نظم الاتصالات الخلوية

أسس ومبادئ



الدكتور هشام عرودكي

نظم الاتصالات الخلوية

«أسس ومبادئ»

الدكتور هشام عرودكي

جميع حقوق الطبع والنشر والنقل والاقتباس كلياً أو جزئياً محفوظة للمؤلف

الطبعة الأولى ٢٠١٣ م

الرقم الدولي للكتاب: ISBN 978-9933-9142-0-2

نظم الاتصالات الخلوية: أسس ومبادئ / هشام عرودكي
.-[دمشق: د.ن ، ٢٠١٣].- ٤٨٧ ص: مص ؛ ٢٧ سم.

١-٦٢١,٣٨٤٥ ع ر و ن ٢- العنوان ٣- عرودكي
مكتبة الأسد

تقديم الكتاب

يسر شركة MTN سوريا أن تضع بين يدي المهتمّين بتقانة الشبكات الخلويّة، طلاباً وأكاديميين ومهنيين، هذه النسخة من كتاب "نظم الاتصالات الخلوية – أسس ومبادئ"، مساهمةً منها في توفير أحد أهم مستلزمات التعليم العالي والبحث العلمي باللغة العربيّة، ألا وهو المرجع التخصصي القيِّم.

تأتي هذه المبادرة في ضوء استراتيجيّة MTN سوريا الخاصّة بالمسؤوليّة الاجتماعيّة، والتي تُعنى على نحوٍ مميز بدعم مسيرة التعليم العالي الموجّهة نحو التخصّصات المعلوماتيّة والهندسيّة كأحد أهم المحاور الحيويّة لعمليّة التنمية، حيث تؤمن الشركة بأنّ تنوع سُبل الحصول على المعلومات التقنية وإتاحة الاطّلاع على أحدث ما توصّل إليه العلم يُسهم بلا شك في إثراء القدرات المعرفيّة لجيل الشباب، التي تُعتبر من أهم متطلبات المشاركة الفاعلة في بناء المستقبل.

تسعى شركة MTN سوريا من خلال هذه المبادرة أيضاً إلى توفير مدخل علمي منهجي، يربط الجانب النظري لأسس الشبكات الخلوية بتطبيقاتها العمليّة الحديثة، وهذا يتيح للكوادر العلمية والفنية، الحاليّة منها والمستقبليّة، مواكبة التطورات المستجدة في هذا المجال، ويرفع من مستوى جاهزيتها للاندماج مع الواقع المهني.

لقد استند انتقاء شركة MTN سوريا لهذا الكتاب إلى حرصٍ شديدٍ على تقديم مرجع علمي يرقى من ناحية المضمون والمنهجية والإخراج إلى مصاف متقدمة، ونحن أكيدون من أن القارئ سيوافقنا على اختيارنا، فقد أودع المؤلفُ أبحاثَ الكتابِ خلاصة خبرته الأكاديمية والعملية الواسعة، فهو حاصل على شهادة الدبلوم في الهندسة الكهربائية من جامعة بوخوم (Bochum) في جمهورية ألمانيا الاتحادية، وعلى شهادة الدكتوراة في هندسة الاتصالات من جامعة فوبرتال (Wuppertal) في ألمانيا أيضاً. عمل الدكتور هشام في مجال البحث والتطوير في شركة فودافون (Vodafone) في ألمانيا (Mannesmann سابقاً) وفي مجال الاستشارات الفنية في شركة سيمنس (Siemens) لتطوير تجهيزات الشبكات الخلوية. وقد انضم لعائلة MTN سوريا في العام ٢٠٠٦، وهو مسؤول حالياً عن دائرة الدراسات الاستراتيجية في الشركة.

تأمل إدارة شركة MTN سوريا أن تحقّق هذه المبادرة الفائدة المرجوّة منها، وأن يُكتب لها حظٌّ وافرٌ في نشر المعرفة وإيصالها إلى أوسع شريحةٍ من المهتمين، ومن ثم المساهمة في وضع لبنةٍ مميزة في بناء مستقبلٍ علميٍّ يليق بالجيل الواعد في وطننا الحبيب.

إلى والديَّ، وزوجتي، وأولادي

وإلى كلِّ طالبِ علمٍ عربي

محتوى الكتاب

تقديم الكتاب ..... أ

محتوى الكتاب ..... ج

مقدمة المؤلف ..... ط

١ مفاهيم أساسية ١

١-١ مدخل إلى أهم المصطلحات ١

١-٢ مبدأ عمل الشبكات الخلوية ٦

١-٣ شكل الخلايا وأبعادها في الأنظمة الواقعية ٨

١-٤ توزيع الترددات على الخلايا ١٤

١-٥ نحو تعريف دقيق لمفهوم التجوال ١٦

١-٦ نظم الاتصالات الخلوية الأوسع انتشاراً والجهات الناظمة لها ١٨

١-٦-١ أنظمة الجيل الثاني ١٨

١-٦-٢ أنظمة الجيل الثالث ٢٢

١-٦-٣ أنظمة الجيل الرابع ٢٤

١-٧ أهم مؤشرات أداء النظم الراديوية ٢٤

١-٧-١ التشويش في الأنظمة الراديوية ٢٥

١-٧-٢ المعايير المستخدمة لتقييم التشويش ٢٩

١-٧-٣ حساسية المستقبل ٣٢

١-٨ مراجع مختارة ٣٥

٢ تقنيات النفاذ المتعدد ٣٧

٢-١ النفاذ المتعدد باقتسام التردد ٣٩

٢-٢ النفاذ المتعدد باقتسام الزمن ٤٥

٢-٣ النفاذ المتعدد بتمييز متتاليات الترميز ٥٢

٢-٣-١ المبادئ العامة لنثر الطيف ٥٤

٢-٣-٢ أداء المستقبل بوجود تشويشٍ ضيق النطاق ٥٩

٢-٣-٣ أداء المستقبل بوجود تشويشٍ عريض النطاق ٦٣

٢-٣-٤ مبادئ اختيار سلاسل النثر ٧١

٢-٣-٥ آثار تفاوت بُعد المستخدمين عن المحطة المغذية ٨٠

٢-٤ مراجع مختارة ٨٣

٣ الخصائص الفيزيائية للرابط الراديوي ٨٥

٣-١ انتشار الإشارة الراديوية في بيئة مثالية ٨٥

٣-٢ انتشار الأمواج في بيئة واقعية ٨٩

٣-٢-١ تخميد الإشارة ضمن بيئة انتشار واقعية ٩٠

٣-٢-٢ ظواهر الخفوت والآثار المرتبطة بها ٩٢

٣-٢-٣ الظواهر الناجمة عن تعدد المسارات ١٠٧

٣-٢-٤ الآثار الناجمة عن حركة أحد طرفي الاتصال ١٢١

٣-٣ أهم آليات تقليل الآثار السلبية للخفوت ١٣١

٣-٣-١ ترميز القناة ١٣٢

٣-٣-٢ تقنيات التباين ١٣٣

٣-٣-٣ التسوية ١٣٧

٣-٣-٤ المستقبل المتعدد المسالك ١٤١

٣-٤ مراجع مختارة ١٤٣

٤ الرابط الراديوي من الناحية الوظيفية ١٤٥

٤-١ تعريف بمصطلحي "القناة الفيزيائية" و"القناة الاعتبارية" ١٤٥

٤-٢ الحيز الزمني ورزمة المعلومات ١٤٩

٤-٣ بنية الرابط الراديوي من الناحية الزمنية ١٥١

٤-٤ تصنيف القنوات الاعتبارية في نظام GSM ١٥٣

٤-٤-١ قنوات نقل المعلومات والمعطيات ١٥٤

٤-٤-٢ قنوات التحكم ١٥٧

٤-٥ توزيع القنوات الاعتبارية على القنوات الفيزيائية ١٧١

٤-٦ أمثلة عن مهام القنوات الإعتبارية ١٨٢

٤-٦-١ المعلومات العامة التي تبثها المحطة عن الشبكة ١٨٢

٤-٦-٢ تنسيق النفاذ العشوائي إلى الشبكة ١٨٧

٤-٦-٣ القياسات الدورية التي يجريها طرفا الاتصال ١٩١

٤-٦-٤ خطوات الولوج أو النفاذ إلى الشبكة ١٩٧

٤-٦-٥ مهام الوحدة في حالة السكون ٢٠٠

٤-٧ بنية الرابط الراديوي في نظام GPRS ٢٠١

٤-٧-١ الوحدة الأساسية لنقل المعطيات الرزمية ٢٠١

٤-٧-٢ آليات تخصيص الموارد الفيزيائية ٢٠٢

٤-٧-٣ القنوات الاعتبارية والفيزيائية الخاصة بالمعطيات الرزمية ٢٠٥

٤-٧-٤ وحدة نقل المعطيات الرزمية عبر الرابط الراديوي ٢٠٧

٤-٧-٥ الإطار المتعدد الخاص بنقل أو تبادل المعطيات ٢٠٩

٤-٨ مراجع مختارة ٢١١

٥ الخطوات الأساسية لمعالجة الإشارة ٢١٣

٥-١ تحويل الإشارة التمثيلية إلى رقمية ٢١٥

٥-٢ ترميز الإشارة الكلامية - ترميز المنبع ٢١٦

٥-٢-١ آلية توليد الإشارة الكلامية عند الإنسان ٢١٨

٥-٢-٢ النموذج الهندسي لآلية توليد الكلام ٢٢٣
٥-٢-٣ النموذج الرياضي التحليلي لآلية توليد الكلام ٢٢٥
٥-٢-٤ المبادئ الأساسية لتقنية الاستقراء الخطي ٢٢٨
٥-٢-٥ الإرسال المتقطع ٢٤١
٥-٣ ترميز القناة ٢٤٤
٥-٣-١ التصحيح بالترميز الاستباقي ٢٤٥
٥-٣-٢ ترميز Turbo ٢٥٤
٥-٣-٣ أمثلة على آليات ترميز القناة في نظام GSM ٢٥٤
٥-٣-٤ ترميز القناة في حالة المعطيات الرزمية ٢٦٢
٥-٣-٥ ترميز القناة في نظام UMTS ٢٦٥
٥-٣-٦ الربح الناجم عن ترميز القناة ٢٦٧
٥-٣-٧ ملاحظات حول كفاءة الترميز ٢٦٨
٥-٤ التفريق ٢٦٩
٥-٤-١ آليات التفريق في نظام GSM ٢٧٠
٥-٤-٢ التفريق في نظام UMTS ٢٧٧
٥-٥ التعمية ٢٧٧
٥-٦ تكوين الرزم الراديوية ٢٧٨
٥-٧ تعديل أو تضمين الإشارة ٢٧٩
٥-٨ مراجع مختارة ٢٨٣

٦ بنية الشبكة ومكوناتها الأساسية ٢٨٥
٦-١ التقسيم الوظيفي للشبكة ٢٨٦
٦-٢ نظام التعريف بالمشترك ٢٨٩
٦-٢-١ الأرقام الدالة على المشترك وهويته ٢٨٩
٦-٢-٢ سجل مقر الاشتراك ٢٩٥
٦-٢-٣ سجل المقر الحالي ٢٩٦

٦-٣ مكونات الشبكة الأساسية ٢٩٨
٦-٤ الوحدة المتحركة ٢٩٨
٦-٤-١ بنية الجهاز المتحرك ٢٩٨
٦-٤-٢ شريحة الاشتراك ٣٠١
٦-٥ شبكة النفاذ الراديوي ٣٠٥
٦-٥-١ المحطة الثابتة ٣٠٥
٦-٥-٢ وحدة التحكم بالمحطات الثابتة ٣٠٩
٦-٥-٣ وحدة فك الترميز وملاءمة الدفق ٣١٤
٦-٥-٤ وحدة التحكم بالرزم ٣٢٠
٦-٦ الشبكة المركزية ٣٢١
٦-٦-١ مركز التبديل ٣٢٢
٦-٦-٢ الموجهات الخاصة بتبادل المعطيات الرزمية ٣٢٥
٦-٦-٣ سجل HLR وسجل VLR ٣٢٩
٦-٦-٤ مركز التَّوَثُّق ٣٣٠
٦-٦-٥ سجل أجهزة المشتركين ٣٣٨
٦-٧ البنية الجغرافية للشبكة ٣٣٩
٦-٨ مراجع مختارة ٣٤٣

٧ مبادئ وآليات التحكم بخطوات الاتصالات ٣٤٥
٧-١ منظومة بروتوكولات التحكم في نظام GSM ٣٤٦
٧-١-١ الرابط الراديوي ٣٤٦
٧-١-٢ الرابط بين المحطة الثابتة ووحدة التحكم ٣٥٩
٧-١-٣ الرابط بين وحدة التحكم ومركز التبديل ٣٦٤
٧-٢ أحوال الوحدة المتحركة من ناحية ارتباطها بالشبكة ٣٧٤

٧-٣ أمثلة على تسلسل خطوات النفاذ إلى الشبكة وإجراءات الاتصال ٣٧٥
٧-٣-١ خطوات اختيار التردد وتحقيق التزامن ٣٧٧
٧-٣-٢ طلب النفاذ العشوائي وتخصيص قناة فيزيائية ٣٨٢
٧-٣-٣ التوثق وتفعيل التعمية ٣٨٥
٧-٣-٤ التحقق من جواز استخدام الوحدة المتحركة ٣٨٨
٧-٣-٥ تحديث رقم منطقة الوجود ٣٩٠
٧-٣-٦ خطوات إصدار مكالمة إلى شبكة الهاتف الثابت ٣٩٧
٧-٣-٧ إنهاء الاتصال وتحرير الموارد الفيزيائية ٤٠٢
٧-٣-٨ ورود اتصال إلى المستخدم ٤٠٤
٧-٣-٩ إجراء التسليم ٤١٠
٧-٤ مراجع مختارة ٤١٨

خاتمة ٤٢١

مسرد بأهم المختصرات ٤٢٣

مسرد بالمصطلحات الانكليزية ٤٣١

مسرد بالمصطلحات العربية ٤٥١

مقدمة المؤلف

يتعثر الطالب العربي المهتم بنظم الاتصالات الحديثة عند محاولة الإفادة من مراجع عربية متخصصة في هذا الباب، وما ذلك إلا لندرة أو شبه انعدام الكتب التي تُعنى بهذا الموضوع من وجهة نظر أكاديمية وهندسية، وهذا التعثُّر يجعل الطالبَ في كثير من الأحيان واقعاً بين "سندان" اعتماد المعاهد العلمية التدريسَ باللغة العربية، حفاظاً على هويتنا القومية، و"مطرقة" عجز هذه المعاهد عنْ توفير مراجعَ معتمدة بهذه اللغة، تفي بحاجات الطلاب من الناحية العلمية.

يأتي هذا الكتاب إيماناً منا بوجود هذا القصور، وتأكيداً على حق كل طالب عربي في أن يجد مدخلاً إلى المادة العلمية التي يدرسها، بلغته التي يتقنها، خصوصاً وقد خَبِرنا هذا الطالب طَموحاً ومُجداً وحريصاً على أن يكون محيطاً بأحدث التطورات العلمية في مجال اختصاصه. لذا، نضع بين يديه أبحاث هذا الكتاب، آملين أن تُزوِّده بمبادئ وأسس يسير على هديها للوصول إلى المعرفة المنشودة.

تقع المواضيع التي يتناولها الكتاب بالشرح في سبعة فصول، نعرض فيها لأهم المبادئ النظرية والعملية التي تقوم عليها نظم الاتصالات الخلوية الحديثة، وذلك وفق منهجٍ وإطارٍ رُسِما بعناية، تتلخص معالمهما في ما يلي:

- يتوجه الكتاب بالدرجة الأولى إلى طلاب الصفوف العليا في هندسة الاتصالات والاختصاصات ذات الصلة، إلا أن التفاصيل العديدة التي تشملها أبحاث الكتاب حول أنظمةٍ واسعة الانتشار، تجعل منه مرجعاً مفيداً أيضاً لشريحةٍ واسعة ومتنوعة من العاملين في قطاع الاتصالات.
- تتطلب متابعة بعض أبحاث الكتاب إلماماً كافياً بالأسس النظرية لنظم الاتصالات، ومبادئ التعديل الرقمي، وبنية شبكات تبادل المعطيات، ونفترض أن هذه الأسس تقع ضمن المقررات الجامعية للصفوف الأولى في كليات الهندسة. لذا، نكتفي عند التطرق لهذه الأسس بإحالة القارئ إلى مراجع متخصصة، من الممكن أن تزوده بأهم ما يحتاجه لمتابعة سياق البحث.
- يلتزم توزيع مواضيع الكتاب على فصوله السبعة مبدأَ البناء التركيبي، حيث يستند كل فصلٍ جزئياً إلى ما طُرح في فصولٍ سابقة، ويكون –في الوقت نفسه– مُمَهِّداً لما يليه من الفصول.
- يُؤكد أسلوبُ نقاشِ أبحاث الكتاب على تشاركِ العديدِ من نظم الاتصالات الخلوية الأسسَ والمبادئَ ذاتها، وهذا المفهوم يجعل من مجموع هذه الأبحاث قاعدة معرفية يمكن الانطلاق منها للمزيد من الدراسات التخصصية أو البحثية في عديدٍ من المجالات العلمية ذات الصلة بنظم الاتصالات الحديثة.

- حرصاً على إتاحة ربطٍ مباشرٍ بين المبادئ النظرية وسُبُلِ استثمارها من الناحية العملية، يعرض الكتاب لتفاصيلَ تتعلق بنظامي GSM و UMTS، مع تركيزٍ أكبر على نظام GSM، كونه الأوسع انتشاراً والأكثر عرضاً في المناهج الدراسية. غير أن هذا التركيز لا يعني أن الكتاب يهدف إلى تقديم عرضٍ شاملٍ لهذا النظام، رغم الإسهاب في بعض تفاصيله عند اقتضاء الحاجة لذلك.

- نريد لهذا الكتاب أن يكون أداةً لـ "تداول العلم باللغة العربية" وليس محاولةً لتعريب مصطلحات حقل الاتصالات. فتعريب أية مادةٍ علميةٍ يهدف بالدرجة الأولى إلى إيجاد مقابلٍ عربي لكل مصطلحٍ تقني أجنبي، وهذا يعارض قناعتنا بأن مواكبة الوتيرة المتسارعة لتطور العلوم تقتضي الإلمام باللغة العلمية المهيمنة (الانكليزية)، وبالمعاني الدقيقة للمصطلحات التقنية المعتمدة. أما "تداول العلم بالعربية" فيعني –وفقاً لفهمنا– طرح وشرح ونقاش المبادئ الفيزيائية والهندسية بلغة القارئ العربي، بحيث يسهل فهمها ويُذلَّل صعبها، مع الحرص على ذكر المصطلحات الأجنبية بأصلها وبيان دلالاتها، لتعزيز فهم القارئ لها وترسيخ ما تحمله من معانٍ تقنية. وهدفنا المرجوُّ من ذلك هو أن يتمكَّن القارئ من المضمون العلمي، دون إهمال التواصل مع لغة العلم المهيمنة.

انطلاقاً من هذا الفهم، نؤكد على أننا لا نقصد من ذكر المقابل العربي لأي مصطلحٍ اعتمادَه كبديلٍ للأصل الانكليزي، وإنما تزويدَ القارئ بدلالات هذا المصطلح، كي يعرف المراد منه في أي سياقٍ بحثي. ونرى لزاماً علينا في هذا الموضع أن ننصح القارئ بأن يعتاد استخدام المصطلحات الانكليزية، فهي الوحيدة المعتمدة من قبل الهيئات الناظمة لقطاع الاتصالات، سواءً القطرية منها أو العالمية، كما أن هذه المصطلحات –دون غيرها– هي المتداولة في الأوساط الأكاديمية أو العاملة في تطوير أو تشغيل الشبكات.

- اعتمدنا –عند اختيار أي مقابلٍ لتعبيرٍ تقني– ما شاع من مصطلحاتٍ إذا كانت تناسب المعنى المقصود، كما آثرنا استخدام تعابير ترجع إلى اجتهادنا الخاص، حين رأينا أن اختيارنا يناسب سياق النص على نحو أفضل، ويرسخ المعنى الوظيفي للمصطلح. هذا وقد حرصنا على أن نعرض ما اعتمدناه على ما ورد في كلٍّ من "معجم المصطلحات العلمية والفنية والهندسية" للأستاذ أحمد شفيق الخطيب، و"معجم المصطلحات الحاسوبية والمعلوماتية" الصادر عن الجمعية المعلوماتية السورية. إضافة إلى ذلك، راجعنا اختياراتنا –من الناحية اللغوية– على إرشادات الدكتور مكي الحسني في كتابه الفريد "نحو إتقان الكتابة العلمية باللغة العربية".

نأمل أن يساهم هذا المنهج، بمعالمه التي سردناها، في تحقيق النفع المنشود من الكتاب.

يطيب لنا في هذا الموضع أن ننوه بالدعم المعنوي والتشجيع الذي لقيه المؤلف من شركة MTN سوريا للمضي قدماً في إنجاز هذا العمل. كما لا نغفل عن التوجه بجزيل الشكر للزميل المهندس محمد عماد العلبي، الذي قرأ فصول الكتاب كاملةً بشغفِ الطالب المهتم بأدق التفاصيل، وخبرة المهندس الممارس الحريص على إيصال المعلومات على أحسن وجه ممكن. وقد أثمرت قراءته للكتاب تحسيناتٍ مهمة وتنويهاتٍ صائبة، نسأل الله أن يجزيه خيراً عنها.

نخص بالشكر أيضاً الزميلة شذى الحوراني لما بذلته من جهدٍ مميز في رسم العديد من صور الكتاب، ومتابعة تفاصيل إخراجه.

ختاماً، نتوجه للقارئ الكريم طالبين منه تزويدنا بملاحظاته واقتراحاته وتعليقاته على مضمون الكتاب، ونعده بأن نحاول الإفادة من كل ما يصلنا في هذا الصدد. وقد خصصنا للكتاب مدونة على شبكة الانترنت سنضمنها مواضيع ذات صلة بأبحاث الكتاب، إضافة إلى تعليقات وملاحظات القراء، وعنوان هذه المدونة هو: www.haroudakibook.wordpress.com.

كما يمكن التواصل المباشر مع المؤلف على العنوان التالي: haroudaki@hotmail.com.

نسأل الله أن ينفع بهذا العمل، وأن يرقى به حسنُ النية ليحقق الفائدة المرجوة منه، وأن يقع لدى طلاب المعرفة موقعاً حسناً، إنه ولي التوفيق.

الدكتور هشام عرودكي

دمشق، آب ٢٠١٣

١

مفاهيم أساسية

يُعنى هذا الفصل التمهيدي بإعطاء لمحاتٍ عامة عن مفاهيم أساسية منتقاة، تتيح تكوين مفهوم أوليٍّ عن مبادئ عمل نظم الاتصالات الخلوية، وأهم المصطلحات المتداولة عند نقاش خصائصها وبنيتها.
نتوجه بشرح هذه المفاهيم إلى القارئ الذي ليست لديه أية فكرة مسبقة عن هذه النظم، حتى تُتاح له متابعةٌ مُثلى للفصول التالية.

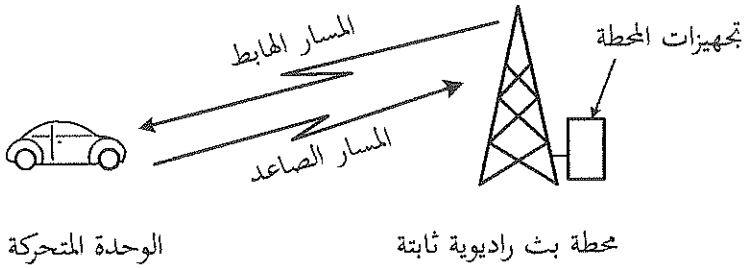
١-١ مدخل إلى أهم المصطلحات

تندرج نظم الاتصالات الخلوية ضمن مجموعة الاتصالات اللاسلكية التي تعتمد على الأمواج الكهرومغناطيسية كحاملٍ أو ناقلٍ أساسي للمعلومات.
يوضح الشكل ١-١ مثالاً مبسطاً جداً لمثل هذه الأنظمة، يمكن استخدامه للتعريف ببعض المصطلحات الأساسية التي ستُعتَمد في نقاش أبحاث هذا الكتاب:

١) يتألف كل نظامٍ لاسلكي من طرفي اتصال على الأقل، كلٌّ منهما مزودٌ بجهاز إرسال وجهاز استقبال، يدمجان في وَحدةٍ متكاملة، توفِّر إمكانية بث المعلومات وتلقيها.
طرفا الاتصال في الشكل ١-١ هما محطة البث والوحدة المتحركة، يُطلَق على "محطة البث" بالإنكليزية تعبير "Base Station"، ويُقصد بذلك محطة اتصال لاسلكية ثابتة، موجودة في مكان محدد وثابت لا يتغير، ويجري تعيينه أو اختياره وفق حاجات توفير الخدمة، واعتماداً على نتائج تخطيط الشبكة. وتجدر الإشارة إلى أن الترجمة الحرفية للمصطلح الإنكليزي تعني "محطة القاعدة" أو "محطة قاعدية"، وهذا الاختيار له خلفية تاريخية ترتبط ببنية شبكات الاتصال عبر الأقمار الصناعية، حيث يدلُّ تعبير "القاعدة" على محطة الاستقبال الأرضية "الثابتة"، تمييزاً لها عن المحطة المتحركة، أي "القمر الصناعي". ونظراً لانتفاء الحاجة إلى هذا التمييز عند الحديث عن أنظمة الاتصال الخلوية الأرضية، سنعتمد في هذا

الكتاب مصطلح "المحطة الثابتة"، إذ أنه يعبر عن الخاصية الأساسية لهذه المحطة وهي وجودها في مكانٍ غير متغير.

تمثل المحطة الثابتة العنصر الأساسي من مكونات الشبكة، الذي يزود المشتركين بخدماتها ضمن منطقة جغرافية ما، لذا تسمى اصطلاحاً أيضاً "محطة التزويد بالخدمة"، كما يشار إليها أحياناً بتعبير "محطة التغذية" "Serving Base Station"، في دلالةٍ على "تغذية" المنطقة الجغرافية بالطاقة الكهرومغناطيسية أو الإشارة اللاسلكية اللازمة للاستفادة من خدمات الشبكة.



الشكل ١-١: نظام اتصال خلوي مبسط.

هذا ويجب التمييز بين مصطلَحي المحطة الثابتة "Base Station" وتجهيزات البث والاستقبال، التي تُعرف بالانكليزية باسم "Base Transceiver Station"، حيث يشير المصطلح الأول إلى جزءٍ وظيفي أو وَحدةٍ وظيفية ضمن مكونات الشبكة، بينما يُقصد بالمصطلح الثاني أجهزة معالجة الإشارة والوحدات الراديوية الخاصة بالإرسال والإستقبال، أي تجهيزات المحطة الثابتة.

٢) الجزء الثاني الأساسي في الشكل ١-١ هو "الوحدة المتحركة"، وتمثِّل ما يطلق عليه إسم "Mobile Station"، ونعني بهذا المصطلح أي جهاز يمكن أن يستخدمه المشترك للاستفادة من خدمات الشبكة. يشمل ذلك على سبيل المثال أجهزة الهاتف، وأجهزة الكمبيوتر المحمول "الحواسب المحمولة"، وكذلك أجهزة عرض الأفلام الرقمية، وأقلام المسح الضوئي، إضافة إلى آلات التصوير الرقمية، وغيرها من الأجهزة التي تزداد تنوعاً كل يوم.

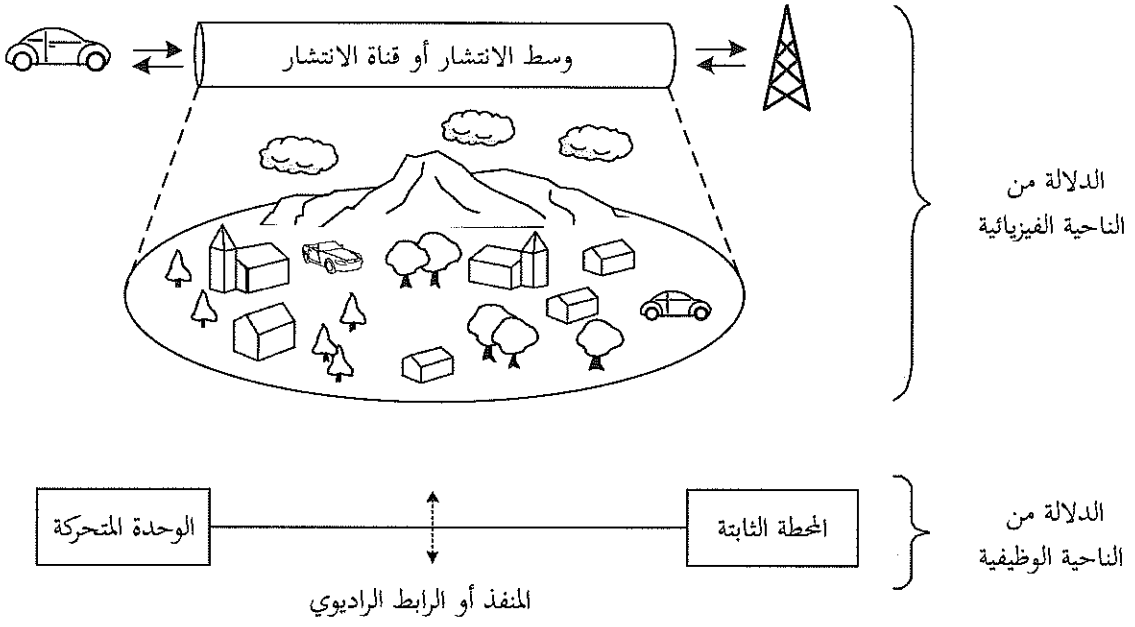
٣) لتمييز جهة نقل الإشارة أو المعلومات بين طرفي الاتصال سنستخدم في هذا الكتاب مصطلحي "المسار الصاعد" و"المسار الهابط" كمرادفين لكلمتي "Uplink" و"Downlink"، المعتمدتين من قبل جهات وضع المعايير الفنية. يُقصد بـ "المسار الصاعد" جهة الاتصال عند كون الوحدة المتحركة هي مصدر المعلومات، بينما يدل "المسار الهابط" على الجهة العكسية، أي من المحطة الثابتة إلى الوحدة المتحركة. هذا ولن نتبَنَّى تعبيري "الوصلة الصاعدة" و"الوصلة الهابطة"، المنتشرَين في المصادر العربية، لأن المقصود بكلمة "Link" ضمن هذا السياق هو جهة الاتصال التي تميِّزُ طرف الإرسال عن طرف الاستقبال، وليس الرابط الفيزيائي بين طرفي الاتصال.

يجدر التنويه أيضاً إلى أن الكثير من المراجع العلمية التخصصية، خصوصاً الأمريكية منها، مازالت تستخدم مصطلحين

ذوي خلفية تاريخية هما "Forward Link" و"Reverse Link"، كمرادفين لكلمتي "Uplink" و"Downlink"، وقد استُحدِث هذان المصطلحان لتمييز نظم الاتصالات الأرضية عن نظم الاتصالات عبر الأقمار الصناعية (انظر [٢٠]).

٤) تكوِّن البيئة الطبيعية المحيطة بالمحطة الثابتة والوحدة المتحركة الوسط الجغرافي الذي تنتشر فيه الأمواج الراديوية الحاملة للمعلومات. يشمل هذا الوسط كل المعالم الطبيعية مثل التضاريس، والبيئة العمرانية، وكذلك المنشآت الصنعية التي يمكن أن تؤثر على انتشار الأمواج من خلال "الانعكاس" "Reflection"، أو "الانتثار" "Diffraction"، أو "التخميد" "Attenuation". سنشير إلى هذه البيئة بـ "وسط الانتشار" أو "قناة الانتشار الراديوية" "Propagation Channel" (انظر الشكل ١-٢)، وهذه القناة تمثل الجزء الأعقد ضمن أي نظامٍ لاسلكي أو خلوي، لذا يشغل التغلب على التحديات التي تفرضها طبيعة هذه القناة على نوعية وجودة الخدمات المقدَّمة من قبل شبكات الاتصالات حيزاً كبيراً من اهتمام الباحثين ومطوري الأنظمة الراديوية ، وسيجد القارئ –ضمن فصول الكتاب المختلفة– إشاراتٍ متكررة إلى هذا الموضوع.

سنستخدم في هذا الكتاب أيضاً تعبير "رابطٍ أو مَنفَذٍ راديوي" كمقابلٍ لمصطلح "Air Interface"، وذلك للدلالة على قناة الانتشار كجزءٍ من مكونات أو هيكلية الشبكة من الناحية الوظيفية. وقد خصصنا الفصل ٤ لشرح وظائف هذا الرابط وبعض تفاصيل بنيته.



الشكل ١-٢: تعريفٌ بمُصطلحَي "قناة الانتشار الراديوية" و"الرابط الراديوي".

٥) لا يمكن لأي اتصال أن يُجرى دون وجود قناة لاسلكية فاعلة بين طرف الإرسال وطرف الاستقبال، وهذا يعني ضمنياً شَغلَ أكثر من مورد فيزيائي من موارد الشبكة. وإدراك ماهية هذه الموارد لا غنى عنه لفهم مبادئ أساسية متعددة، مثل

تقنيات النفاذ المتعدد (انظر الفصل ٢)، وتفاصيل بنية الرابط الراديوي (انظر الفصل ٤)، ومبادئ توزيع الترددات. وليس الغرض الأهم للجهود التي يبذلها مصممو ومهندسو الشبكات إلا استثمار هذه الموارد بأكبر درجة من الفعالية، سواء من الناحية الفنية أو الإقتصادية، لذا نوجز في ما يلي أهم المفاهيم المتعلقة بهذه الموارد:

٥-١) تمثل قناة الانتشار التي أشرنا إليها الحيز المكاني أو "المورد الفيزيائي الأول" الذي يُشغَل أثناء عملية الاتصال. وهذا المعنى يتضح عند المقارنة مع الاتصالات السلكية، حيث تمثل الأسلاك الكهربائية أو الألياف الضوئية الحيز المكاني الذي يجب توفره لنقل الإشارات الحاملة للمعلومات، وهو ما يُستعاض عنه بقناة الانتشار في حالة الاتصالات اللاسلكية.

ولما كانت أية قناة حاملة للمعلومات ذات سعة عظمى لا يمكن تجاوزها، فإن السعة المحدودة لقناة الانتشار تتجلى في الحد الأعلى المسموح به لمستوى التداخل والتشويش، والذي يطرأ على الإشارات الراديوية ضمن الحيز المكاني أو الجغرافي الذي تمثله هذه القناة.

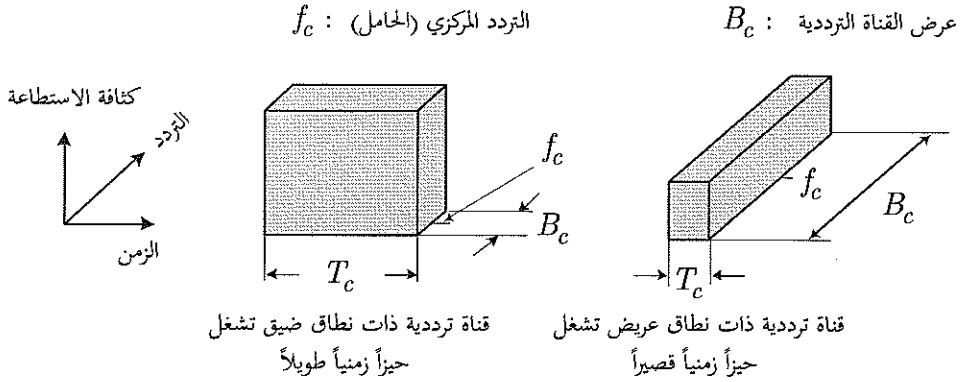
٥-٢) من المعلوم أن أي جهاز استقبال أو إرسال راديوي يعتمد على مبدأ "التعديل أو التضمين" "Modulation" لبث وتلقي المعلومات. وهذا يقتضي استخدام إشارةٍ راديوية مركبة من عدة أمواج كهرومغناطيسية، تتمحور حول "ترددٍ مركزي" معين، يُشار إليه بتعبير "Center Frequency" ونرمز له بـ f_c، وهو يمثل تردد الموجة الراديوية الحاملة للمعلومات، أي ما يُعرف بـ "Carrier Wave". تشغل الإشارة الراديوية المُعَدَّلة -ضمن المجال الترددي المُتاح للنظام- نطاقاً ذا عرضٍ مقداره B_c (انظر الشكل ١-٣)، لذا يمكن القول بأن هذا النطاق الترددي هو "القناة" الحاملة للمعلومات، وأنه يمثل "المورد الفيزيائي الثاني" الذي يجب توفره لإتمام عملية الاتصال. بناءً على ذلك، سنستخدم مصطلح "قناة راديوية" للدلالة على هذا النطاق، وذلك كمرادفٍ لكلمة "Radio Channel"، وقد نستخدم هذا المصطلح أيضاً للدلالة على التردد المركزي f_c حصراً، كمَعلَمٍ أساسيٍّ للقناة. فعلى سبيل المثال، إذا كانت المحطة الثابتة مزودة بأجهزة بث واستقبال تعمل على ثلاثة ترددات مختلفة، نشير إلى ذلك بالقول بأن المحطة تستخدم ثلاث قنوات ترددية، عرض كلٍّ منها B_c، وتشغل نطاقاً إجمالياً عرضه $3B_c$.

٥-٣) لابد من أن نشير في سياق الحديث عن الموارد الفيزيائية إلى نقطة بالغة الأهمية، تمثل محوراً لتطوير العديد من التقنيات والأنظمة الحديثة. ذلك أن الطيف الترددي موردٌ من الموارد المحدودة جداً، إذ لا يقتصر استخدامه على الاتصالات التجارية فقط، بل يمتد ليشمل مختلف أنواع النظم والتطبيقات اللاسلكية، مثل أنظمة البثّ العام، كالتلفاز والراديو، والأنظمة ذات الاستخدامات العسكرية أو الأمنية، وغيرها من الأنظمة الخاصة بالنظام المدني والخدمات العامة، مثل أنظمة اتصال الشرطة المدنية، وشرطة المرور، ومؤسسات إطفاء الحرائق، وشركات النقل المأجور. كذلك يحدد التردد بنية الأجهزة الخاصة بكل نظام، بدءاً من حجم الهوائي، إلى نوعية وجودة "المُرَشِّحات" "Filters"، إلى الطاقة الضرورية لبث المعلومات. لذا، ليس من المبالغة القول بأن أثمن جزءٍ أو موردٍ في أي نظام اتصال لاسلكي هو "النطاق الترددي المتاح"، وسيتبين من خلال الفصول القادمة أن جُلَّ أو معظم التقنيات الحديثة إنما يَصُبُّ في مجال تحسين وتطوير استخدام الترددات، وشَغلها على نحوٍ اقتصادي أمثل.

نظراً لما سبق، يجري عند تطوير أي نظامٍ جديد تعيينُ نطاقٍ ترددي خاص به من قبل "الاتحاد الدولي للاتصالات" "International Telecommunications Union (ITU)"، التي تُراعي وجود مجالٍ ترددي كافٍ، يلائم حاجات وتطبيقات النظام المعني. وعند توفر مواصفات النظام على نحوٍ كامل، وبدء استثماره تجارياً، يجب على أية شركة معنية بإنشاء شبكة اتصالاتٍ تعتمده أن تحصل على ترخيصٍ لاستخدام النطاق الترددي المخصص له. تُصدر هذا الترخيص الهيئة المختصة والناظمة لقطاع الاتصالات في الدولة التي ستُنشأ فيها الشبكة، ويكون ذلك مرتبطاً بأجورٍ واستثماراتٍ كبيرة، لذا، لا يسمح لأية شركة مشغِّلة باستخدام أي تردد خارج النطاق المرخَّصِ لها، ويُعدُّ ذلك انتهاكاً لشروط الترخيص.

يتضح مما سبق أن استثمار الترددات بفعالية عالية عاملٌ أساسيٌّ من عوامل النجاح اقتصادياً.

٥-٤) تقتضي ندرة الترددات كموردٍ فيزيائي أساسي أن يُستخدم النطاق الترددي ذاته لتوفير الاتصال بين المحطة الثابتة وأكثرَ من مشتركٍ في الوقت نفسه، لذا يجري شَغْل النطاق الترددي من قِبل كل مشترك لمدة زمنية محددة، يتسنى خلالها تبادل المعلومات الخاصة به. هذا يعني أن المدة التي تشغلها قناة الاتصال الخاصة بمشتركٍ ما، والمُشار إليها بـ T_c في الشكل ١-٣، تمثل "المورد الفيزيائي الثالث" الذي يُشغل أثناء أي اتصال. هذا وتختلف خصائص قناة الاتصال تبعاً للنظام ومواصفاته، فهناك نظمٌ تتميز بقنواتٍ ذات نطاق عريض، تشغل كلٌ منها مُدةً زمنية قصيرة، وأخرى توفِّر قنواتٍ ذات نطاق ضيق، لكنها تخصص وقتاً أطول لقناة كل مشترك، كما هو موضح في الشكل ١-٣.



الشكل ١-٣: توضيح للموارد الفيزيائية التي تشغلها قناة الاتصال.

٥-٥) يتطلب وصول الإشارات الراديوية إلى أيٍّ من طرفي الاتصال توفر طاقة كافية للأمواج الكهرمغناطيسية الحاملة للمعلومات، حيث تُزوَّد الأمواج بهذه الطاقة من قبل جهاز الإرسال. ويتراوح مقدار هذه الطاقة الراديوية تبعاً للخصائص الفيزيائية للنظام المستخدَم، وخطوات معالجة الإشارة التي يتضمنها، كما يتعلق على نحوٍ مباشر بدرجة التخميد ضمن وسط الانتشار، وبالترددات المستخدمة، حيث يزداد تخامد الأمواج الكهرومغناطيسية كلما ارتفع

تردد الحامل المركزي الراديوي، ومن ثم تكون الحاجة إلى طاقةٍ أعلى لتأمين جودة الاتصال ماسَّةً أكثر. لذا تمثل هذه الطاقة، والتي تسمى أحياناً "الطاقة الراديوية"، "المورد الفيزيائي الرابع" الذي يشغله الاتصال، وهو يختلف عن الموارد السابقة بأنه ليس طبيعياً، وإنما يتحدد وفقاً لمواصفات النظام كما ذكرنا.

يتطلب توفر الطاقة في المحطات الثابتة إما ربطاً مباشراً بالشبكة الكهربائية، أو استخدام مولداتٍ تعمل بالوقود، وكل ذلك يترتب عليه تكاليف مادية تساهم بدرجة ملحوظة في مجموع الكلفة الإجمالية لتشغيل الشبكة. لذا يصبُّ كثير من الأبحاث الحديثة في مجال تطوير وإنتاج محطات ثابتة ذات استهلاكٍ منخفضٍ للطاقة، ومن ثم كلفةٍ أقلَّ للتشغيل.

إن نظرةً متعمقةً إلى الفقرات السابقة تبين أنه من الممكن وصف الاشارة اللاسلكية بأنها "مقدارٌ محددٌ من الطاقة، يحمله نطاقٌ ترددي معين، وينتقل ضمن وسط الانتشار، خلال حيز زمني مخصص"، وهذا الوصف يؤكد مرة أخرى على أن الترددات هي المورد الأهم ضمن الشبكة، حيث لا يمكن تعريف الحيز الزمني، ولا الطاقة، إلا من خلال التردد الحامل للمعلومات.

١-٢ مبدأ عمل الشبكات الخلوية

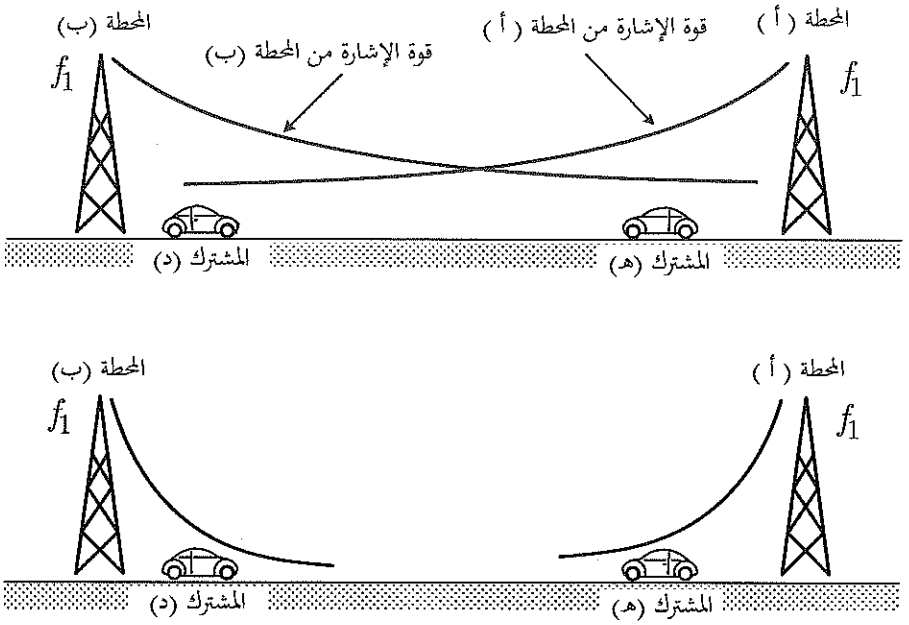
نشأت فكرة الشبكات الخلوية في إطار الجهود الرامية إلى تطوير نظم الاتصالات اللاسلكية الجوالة، التي كانت سائدة حتى نهاية ثمانينيات القرن الماضي، فقد كانت هذه النظم تواجه عدة مشاكل أهمها السعة المحدودة التي كانت تمثل في ذلك الوقت حاجزاً يعوق استيعاب أعداد متزايدة من المشتركين، إضافة إلى عدم توفر خدمات الاتصال إلا في أماكن محدودة جغرافياً، إذ كان أغلب هذه الأنظمة يوفر خدماته ضمن بعض المدن الرئيسية فقط. وقد كانت طريقة استخدام الطيف الترددي من أهم أسباب هذه السلبيات، حيث كان توفير الخدمة يعتمد على إنشاء محطات راديوية ثابتة، مجهزة بهوائيات مرتفعة، وطاقات بث عالية، ما كان يتيح توفر التغذية ضمن رقعة جغرافية واسعة نسبياً حول كل محطة. إضافة إلى ذلك، كانت كل محطة تُزَوَّد بالتجهيزات اللازمة لاستخدام كل الطيف الترددي المخصص للنظام، وذلك من أجل توفير الخدمات لأكبر عدد ممكن من المشتركين المتجولين ضمن المنطقة الجغرافية التي تغذيها.

كانت هذه الطريقة لتوزيع الترددات تحد من قدرة أي نظام على استيعاب عدد متزايد من المشتركين، إذ كان عدد القنوات الترددية المستخدمة في كل محطة (والذي يمثل بدوره كل النطاق الترددي المتاح) يُملي رقماً أعظمياً لعدد المستخدمين الذين يمكن تزويدهم بالخدمات. على صعيد آخر، كان من المتعذر توسيع الرقعة الجغرافية التي تغذيها المحطات عن طريق زيادة طاقة البث واستخدام خلايا ذات قطرٍ كبير، لأن ذلك يتطلب وحدات متحركة ذات طاقة مرتفعة جداً، حتى يتوفر الاتصال في جهة المسار الصاعد أيضاً، وهذا أمرٌ غير عمليٍّ بالطبع.

دفعت السلبيات المذكورة أعلاه الباحثين إلى التفكير في منحىً مختلف، وإلى تبنِّي فكرة "الاستخدام المتكرر للترددات" "Frequency Reuse" كحلٍّ أمثل لتجاوز القيود المتعلقة بسعة الأنظمة، وهذا المبدأ يمكن توضيحه عن طريق الاستعانة بالشكل ١-٤.

لنفترض وجود محطتين ثابتتين تبثان معلومات مختلفة، ولكن باستخدام نفس التردد f_1 ، ولنفترض أيضاً أن المحطة (أ) تزود المشترك (د) بالخدمة، بينما يُزوَّد المشترك (هـ) عبر المحطة (ب).

من الواضح أن كلا المشتركين سيلحظ في الحالة التي يمثلها القسم الأعلى من الشكل، تداخلاً وتشويشاً كبيراً لعدم القدرة على التمييز بين المعلومات الصادرة عن أيٍّ من المحطتين، نظراً لاستخدامهما التردد نفسه. هذه الحالة تختلف جذرياً عندما تكون طاقة البث في كل محطة منخفضة على نحوٍ كافٍ، كما هو موضح في القسم الأسفل من الشكل ١-٤، إذ أن تخفيض الطاقة يؤدي إلى انخفاضٍ ملحوظ في مستوى التداخل، حيث يستقبل المشترك (د) في هذه الحالة إشارة ضئيلة جداً من المحطة (ب)، مقارنةً بالإشارة المستقبَلة من المحطة (أ). هذا التداخل يمكن تجاوزه باستخدام طرق متقدمة لمعالجة الإشارة، وإذا كانت المسافة بين المحطتين كبيرة جداً، سينعدم التداخل والتشويش على نحوٍ شبه تام.



الشكل ١-٤: تخفيض مستوى التداخل بين إشارتين تتشاركان بنفس التردد عن طريق التحكم بطاقة البث في كل محطة.

إستناداً إلى هذا التوضيح يمكن تلخيص المبدأ الأساسي للشبكات الخلوية على أنه استخدام محطاتٍ راديوية ثابتة، ذات طاقة منخفضة نسبياً، وذلك على نحوٍ يسمح بإعادة استخدام القنوات الراديوية من قبل محطات أخرى متباعدة، يتم اختيار عددها ومواضعها وطاقات بثها وفق حاجات التصميم. بذلك تكون كل محطة مصممة لتوفير خدمات الاتصالات ضمن منطقة جغرافية محدودة يُطلق عليها اصطلاحاً اسم "خلية" "Cell"، يُحدِّد أو يَرسُم محيطها عند كل نقطة المسافة الفاصلة عن المحطة الثابتة، والتي تكون كافية كي يبلغ مستوى الإشارة مقداراً ضعيفاً، بحيث لا تؤثر إشارة المحطة المعنية على إشارات المحطات المجاورة أو المتاخمة، وبحيث تكون –أي المسافة– كافية في الوقت نفسه لتوفير اتصال ذي جودة مقبولة مع كل الوحدات المتحركة المرتبطة بها.

هذا يعني أن المشترك يكون على صلة بالشبكة عن طريق إشارة المحطة الثابتة التي يوجد ضمن مساحة الخلية المرتبطة بها، ويظل اتصاله قائماً مع تلك المحطة، ما دام لم يُجاوز طرفَ الخلية أو الحدَّ الذي يفصلها عن خلية مجاورة. فإذا حدث ذلك، أي إذا جاوز المشترك المسافة القصوى المسموح بها عن المحطة الثابتة، فإن نوعية أو جودة الاتصال تسوء بدرجة ملحوظة، ما يؤدي إلى أن يُوعز النظام إلى المحطة بقطع الاتصال مع الوحدة المتحركة، وبإنشاء اتصال جديد بين هذه الوحدة ومحطة جديدة، توفر إشارة ذات طاقة كافية لمتابعة الاتصال بالمستوى المطلوب من الجودة. هذا وتتم عملية قطع الاتصال الأول وإنشاء الاتصال الجديد بسرعة كبيرة، بحيث لا يشعر المشترك بذلك، وبحيث يتولد لديه الانطباع بأن الاتصال مستمر. كذلك يجري الاتصال الجديد مع المحطة المناسبة باستخدام قناة راديوية مختلفة، أي أن الوحدة المتحركة تبدِّل التردد الذي تستخدمه للاتصال أثناء عملية الإنتقال من المحطة الأولى إلى الثانية.

يُفسَّر انتقال المشترك من مجال تغذية محطةٍ ما إلى مجال تغذية محطةٍ أخرى مجازاً على أنه انتقالٌ من خليةٍ إلى أخرى، وقد اصطُلح على تسمية هذا الانتقال بـ "تسليم المشترك من خليةٍ إلى أخرى" "Handover" والذي نشير إليه اختصاراً بـ"إجراء التسليم"، وسنتطرق إلى تفاصيل هذا الإجراء في الفصل ٤.

من إيجابيات مبدأ إعادة استخدام الترددات أيضاً إتاحة تزويد رقعةٍ جغرافية واسعة بالإشارة اللازمة للاتصال، وذلك عن طريق تقسيم الطيف الترددي المتوفر للنظام إلى مجموعات ترددية مختلفة، موزعة على خلايا متباعدة جغرافياً، بحيث لا يُستَخْدَم نفس التردد في أيٍّ من الخلايا المجاورة، وكلما دعت الحاجة إلى توسيع رقعة التغذية، تُنْشأُ محطات جديدة، وتُخصص لها قنوات ترددية غير مستخدمة في المحيط المجاور.

١-٣ شكل الخلايا وأبعادها في الأنظمة الواقعية

لا يتبع شكل الخلايا من الناحية الواقعية نمطاً هندسياً محدداً، كما لا تكون خلايا شبكة معينة ذات مساحة موحدة، إذ يخضع شكل الخلية وأبعادها لتأثير عواملَ مختلفة تتعلق بتضاريس المنطقة الجغرافية، كارتفاعها ووجودها ضمن سهلٍ أو جبلٍ أو غابة، والطبيعة العمرانية المتمثلة بكونها مدينةً أو ريفاً، وكذلك الكثافة السكانية والترددات المتوفرة للنظام.

من جانبٍ آخر، وكما هي الحال في كثيرٍ من حقول الهندسة، تتطلب الدراسات النظرية المتعلقة بتطوير النظم الخلوية اعتمادَ نموذجٍ مبسطٍ لشكل الخلايا، يَسْهُل من خلاله توضيح الكثير من مبادئ التصميم، ويصلُح كمنطلق لوضع تخطيط مبدئي للشبكة، وهذا التخطيط المبدئي يُتيح تحديد عدد المحطات اللازمة لإنشاء أو توسعة الشبكة، وكذلك حساب الرقعة الجغرافية التي ستغذيها بالخدمات، ومن ثم يساعد على التوصل إلى تقديرٍ أوليٍّ للكلف التي ستترتب على مشروع ما.

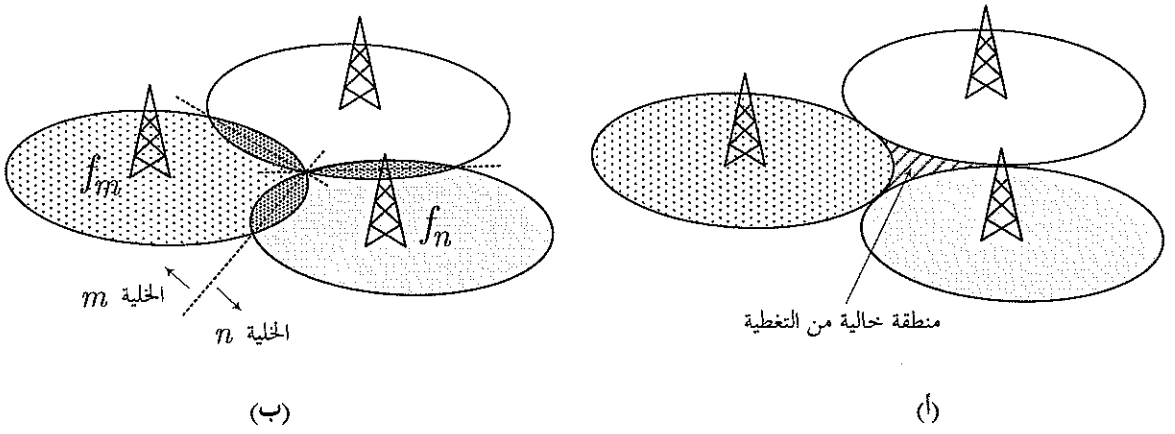
من الممكن لأي شكل هندسي قابلٍ للتكرار باعتماد محورَي إحداثياتٍ أن يؤدي الغرض الرئيسي لتمثيل الخلية، وهو توزيع الخلايا بحيث تغطي رقعة جغرافية معينة، وإن أول ما يتبادر إلى الذهن هو اعتماد الدائرة نظراً لأن شكل الخلية سيكون دائرياً تقريباً في حال وجود بيئة انتشار مثالية، أي في حال كون التضاريس مستوية تقريباً، وانعدام وجود أية حواجز أو عوائق طبيعية أو صنعية تعترض انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية الصادرة عن المحطة. وقد نصادف شبيهاً لهذه البيئة في البادية أو الصحراء أو

في بعض المناطق الريفية النائية ذات العمران البسيط جداً. وإذا تم اعتماد الدائرة كشكل هندسي، فإن تكرارها بانتظام على امتدادٍ ثنائي الأبعاد يمكن أن يغطي أية رقعة جغرافية، غير أنه يجب أخذ النقاط الآتية بعين الاعتبار:

١) إذا تم اختيار ترتيب الدوائر بحيث تتلاقى فقط عند نقاط التماس، كما هو موضح في الجزء (أ) من الشكل ١-٥ ، فإن ذلك يؤدي إلى نشوء فراغات بين الخلايا المفترَضة، ومن ثم وجود مناطق خالية من التغطية، وهو ما يجب تلافيه وتجنبه. لذا يجب أن تكون هذه الدوائر متداخلة بحيث تتسنى تغطية المنطقة على نحوٍ كامل، وهذا ما يبينه الجزء (ب) من الشكل.

٢) يجب الاصطلاح على المنطقة التي تعتبر محصورةً ضمن محيط خلية معينة، وذلك من أجل التوصل إلى تعريف واضح ودقيق لكل خلية، ومن ثم تحديد النقاط التي تُعتبر الحد الفاصل بين خليتين وإذا تجاوزها المشترك يكون قد انتقل من خلية إلى أخرى. وإذا تأملنا منطقة التداخل في الجزء (ب) من الشكل ١-٥، نجد أن هناك خطاً مستقيماً يفصل بين المنطقة التي تعتبر الأقرب إلى المحطة n، وتلك التي هي أقرب للمحطة m. وإذا اعتبرنا أن المحطة الثابتة تقع في مركز كل دائرة، فإن ذلك يعني أن كل النقاط الأقرب إلى المحطة الواقعة قبل هذا الخط الفاصل (من جهة المحطة n) تستقبل إشارة أوضح عن طريق الحامل f_n، ومن ثم يجب اعتبارها جزءاً من مساحة الخلية n. وباستكمال رسم الخطوط الفاصلة ضمن مناطق التداخل مع الخلايا المجاورة الأخرى، نجد أن هذه الخطوط ترسم محيط الشكل الهندسي الذي سنعتبره ممثلاً للخلية.

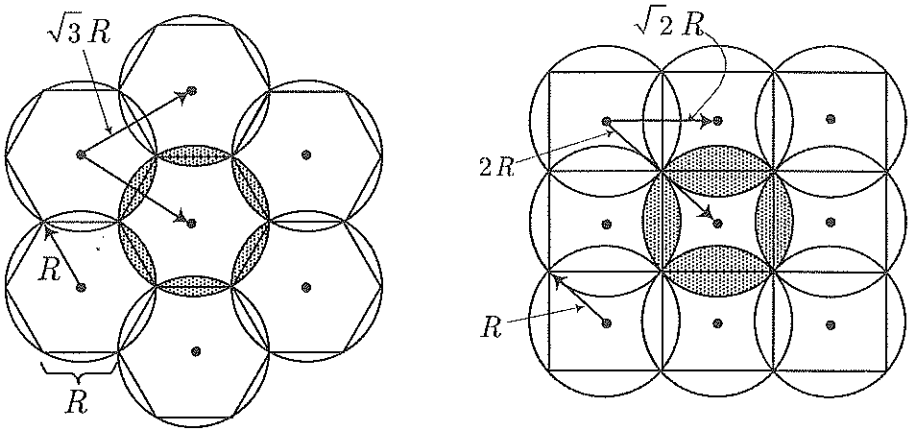
٣) لا يمكن تلافي مناطق التداخل في الجزء (ب) من الشكل ١-٥، إذ أنها ضرورية كي تكتمل تغطية المساحة الجغرافية من جهة، ومن أجل توفير أداءٍ سلسٍ لعملية التسليم من جهة أخرى. غير أن هذه المناطق تعتبر خاضعة لتغذية أكثر من محطة، ما يُفَسِّرُ أيضاً على أنه هدرٌ للموارد، إذ يجب الحرص على تغطية أكبر رقعة جغرافية بأقل عددٍ ممكنٍ من المحطات. لذا لابد من اختيار ترتيب الدوائر وتداخلها بحيث تكون مناطق التداخل ضئيلةً ما أمكن.



الشكل ١-٥: ضرورة تداخل الخلايا و تعريف الحد الفاصل بين خليتين متجاورتين.

لنقاش النقطة الأخيرة بشيءٍ من التفصيل يعرض الشكل ١-٦ وجهين مختلفين لتوضع الدوائر،حيث يمكن تعريف الجزء (أ) على أنه مصفوفة من الخلايا مربعة الشكل، بُعدُ مركز كلٍّ منها عن الدائرة المحيطة هو R. كما يمكن تعريف الجزء (ب) على أنه

مصفوفة من الخلايا سداسية الأضلاع، يمثل كلاً منها مسدسٌ نصف قطره (أي المسافة من مركزه إلى كل رأس من رؤوسه الستة) يساوي نصف قطر الدائرة المحيطة به R ، ويساوي طول ضلعه أيضاً.



الشكل ١-٦: حول اختيار الشكل السداسي لتمثيل الخلية.

عند مقارنة الشكلين نجد أن المسافات بين مراكز الخلايا المتجاورة في حالة الشكل المربع غير متساوية، فمنها ما يساوي R ، ومنها ما هو $\sqrt{2}R$. ولا شك أن وجود مسافة موحدة يُفضي إلى توزيعٍ أكثر اتساقاً وأبسط من الناحية التحليلية، وهذا ما نجده في حالة الشكل المسدس، حيث أن بعد مركز أية خلية عن مركز كل خلية مجاورة ذو قيمة موحدة ثابتة.

إضافة إلى ذلك، نجد عن طريق حسابات هندسية بسيطة أن نسبة منطقة التداخل إلى مساحة الدائرة في حالة الخلايا مربعة الشكل هي:

$$A_{overlap} = \frac{\pi R^2 - 2R^2}{\pi R^2} = 1 - \frac{2}{\pi} = 0.363 \qquad (١-١)$$

بينما يبلغ مقدار هذه النسبة في حالة الخلايا سداسية الشكل:

$$A_{overlap} = \frac{\pi R^2 - \frac{3\sqrt{3}}{2}R^2}{\pi R^2} = 1 - \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} = 0.173 \qquad (١-٢)$$

وبما أن نسبة مساحة التداخل تمثل نسبة المساحة المغطاة من قبل محطتين، والتي يجب اختيارها بحيث تكون أصغر مايمكن، فإن الأرقام التي حصلنا عليها في العلاقتين (١-١) و (١-٢) تبين أن فعالية التغطية الجغرافية بالخلايا سداسية الشكل أعلى بدرجة

ملحوظة، نظراً لأن نسبة مساحة التداخل هي الأصغر، ومن ثم يتطلب إنجاز الشبكة عدداً أقل من المحطات الثابتة، ما يجعله أوفر من الناحية الإقتصادية[1].

استناداً إلى ما سبق، اعتُمِد الشكل سداسي الأضلاع نموذجاً لدراسة أسس توزيع وتخطيط الخلايا، وقد أثبت هذا الشكل فعالية عالية في ذلك، رغم أنه نموذج نظريٌ بحت، لا يمثل الشكل الحقيقي أو الواقعي للخلايا. هذا وسوف نمثل الخلايا في الفصول القادمة إما كدائرة أو كشكل سداسي، وذلك وفق ما يقتضيه العرض والتبسيط.

بعد تبرير اختيار النموذج السداسي لتمثيل الخلايا نظرياً، نتوجه لمتابعة النقاش حول أشكال وأبعاد الخلايا من الناحية الواقعية، وقد كنا أشرنا في مدخل حديثنا إلى التنوع غير المحدود للعوامل التي تؤثر على ذلك، مثل التضاريس المحيطة، ومكان وجود الخلية، والطبيعة العمرانية المحيطة، لذا يمكن إجمال النقاط الرئيسة التي تحكم أشكال الخلايا وأبعادها كما يلي:

- تُعتبر نقطةٌ جغرافيةٌ ما تابعةً لمجال تغذية محطة معينة، أي ضمن نطاق الخلية التي تمثلها المحطة، إذا كانت استطاعة الإشارة عند تلك النقطة أكبر من عتبةٍ دنيا محددة، تختلف من نظام إلى آخر (انظر الفصل ٣). ولما كانت استطاعة الإشارة ترتبط بآليات انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية، كالانعكاس والانتثار، فإنها تختلف من نقطة إلى أخرى تبعاً لطبيعة البيئة المحيطة. فعلى سبيل المثال، قد تُوجد مساحةٌ خالية عمرانياً على بُعدٍ ما من المحطة، وفي الجوار المباشر لهذه المساحة منطقة أخرى مكتظة بالأشجار، كحديقة أو منتزه، ومنطقة ثالثة يحجب وصولَ بث المحطة إليها بناءٌ ضخم. ففي هذه الحالة قد تحقق استطاعة الإشارة في المنطقة الخالية الشروط المطلوبة لتوفير الاتصال، بينما لا تتحقق هذه الشروط في المنطقتين الأخريين المجاورتين، بسبب كثافة الأشجار وامتصاص أوراقها للطاقة، أو بسبب العائق الطابقي، رغم البعد المتقارب عن المحطة الثابتة. لذا تتحدد أطراف منطقة التغذية بالنقاط الراسمة للمنطقة الخالية عمرانياً، بسبب تحقق شروط استقبال الإشارة ضمنها.

  من الممكن تعميم هذا المثال على كل نقطة جغرافية قيد الدراسة، لذا، لا تكون أشكال الخلايا مطابقة للنموذج النظري إطلاقاً، بل تتبع منحنىً متعرجاً يستلزم تحديده أو تعيينه الاستعانة بأدوات برمجية متقدمة، تتيح التنبؤ باستطاعة الإشارة المستقبلة في كل نقطة من محيط المحطة الثابتة، ومن ثم التوصل إلى رسم دقيق لحدود الخلايا. يوضح ذلك الجزء (أ) من الشكل ١-٧، الذي يعرض الشكل المحتمل لخلية واقعية، مقارنةً بالنموذج الهندسي النظري.

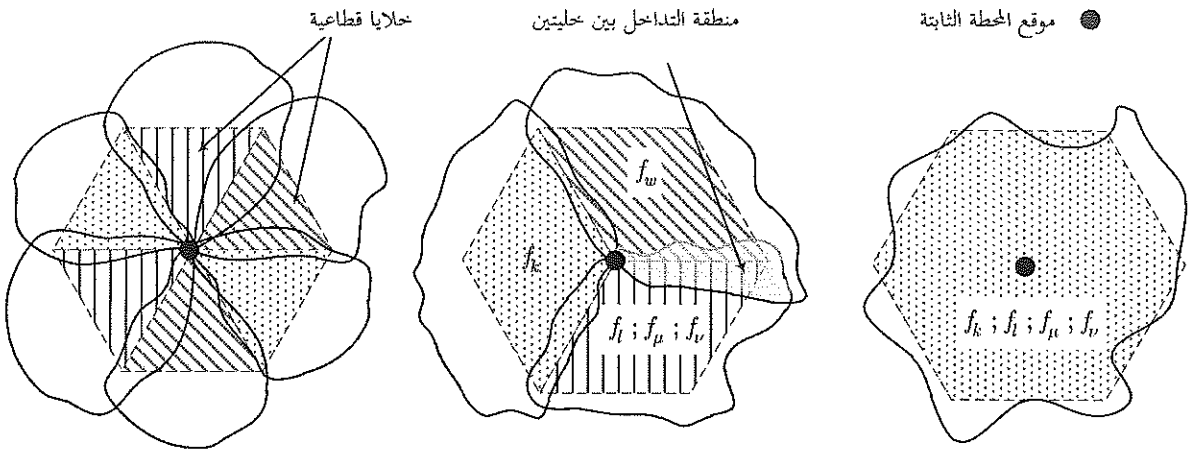
- إذا كانت المحطة الثابتة مجهزة بـ"هوائي ذي ربحٍ ثابتٍ" تقريباً "Omnidirectional Antenna"، أي أنه يبث الطاقة الكهرومغناطيسية على نحوٍ متقاربٍ في كل الاتجاهات، فإن أبعاد الخلية تكون متقاربة أيضاً في كل اتجاه، وذلك إذا افترضنا أن المحطة تقع في مركز الخلية تقريباً.

- ليس لشكل الخلية علاقة بعدد الترددات المتاحة للاستخدام في المحطة الثابتة، إذ يتحدد عدد الترددات تبعاً للمجال الترددي المتاح للنظام، ووفق نتائج التخطيط وأبعاد الخلايا. فعلى سبيل المثال، يفترض الجزء (أ) من الشكل ١-٧ وجود تجهيزات كافية لاستخدام 4 ترددات ضمن الخلية، ومثل هذا العدد شائع عندما تكون الخلية ضمن منطقة ذات كثافة

[1] نترك للقارئ ،كنوع من التمرين، حساب نسبة التداخل في حالة الخلايا مثلثة الشكل، وسيجد أن الخلايا سداسية الأضلاع هي الأكثر فعالية.

سكانية متوسطة، أما إذا كانت الخلية ضمن مدينة مكتظة بالسكان، فهذا العدد لا يكفي، بل قد يتطلب عدد المشتركين المتوقع تزويد المحطة بما لا يقل عن ثمانية إلى عشرة ترددات، من جانب آخر، قد يفي تردد واحد فقط بحاجات المشتركين، وذلك إذا كانت الخلية تقع ضمن منطقة نائية.

- يتطلب تخطيط الشبكة في كثيرٍ من الأحيان الاستعاضة عن خلية واحدة ذات أبعاد متقاربة، بعدة خلايا، تغذي كل منها "قطاعاً" "Sector" جغرافياً محدداً، كما هو موضح في الجزء (ب) من الشكل ١-٧، ويتحقق ذلك باستخدام هوائيات قابلة لتركيز طاقة البث ضمن مجال محدد أفقياً، بحيث تكون طاقة الإشارة خارج هذا المجال منخفضة جداً. يسمى هذا النوع من الهوائيات بـ "الهوائيات الموجَّهة" "Directional Antennas"، وقد يتراوح المجال المحدد أفقياً بين 15 إلى 180 درجة، كما توصف الخلايا في هذه الحالة بأنها "خلايا قطاعية" "Sectorized Cells".



(أ): محطة ثابتة تغذي خلية واحدة ذات امتداد متقارب في كل اتجاه.

(ب): محطة ثابتة تغذي ثلاث خلايا قطاعية الشكل.

(ج): محطة ثابتة تغذي ستة خلايا قطاعية الشكل.

الشكل ١-٧: حول شكل الخلايا من الناحية الواقعية.

- يتراوح عدد القطاعات الممكنة بين حدٍ أدنى هو اثنان، كما تكون الحالة عند وجود محطة تغذي طريقاً سريعة ضمن مناطق خالية سكانياً، حيث يكون هنالك خليتان قطاعيتان على طرفي المحطة، يغذي كلاً منهما هوائي مستقل. كما قد يصل عدد القطاعات إلى ثمانية أو أكثر في المدن المكتظة سكانياً (انظر الجزء (ج) من الشكل ١-٧ كمثال على ستة قطاعات).

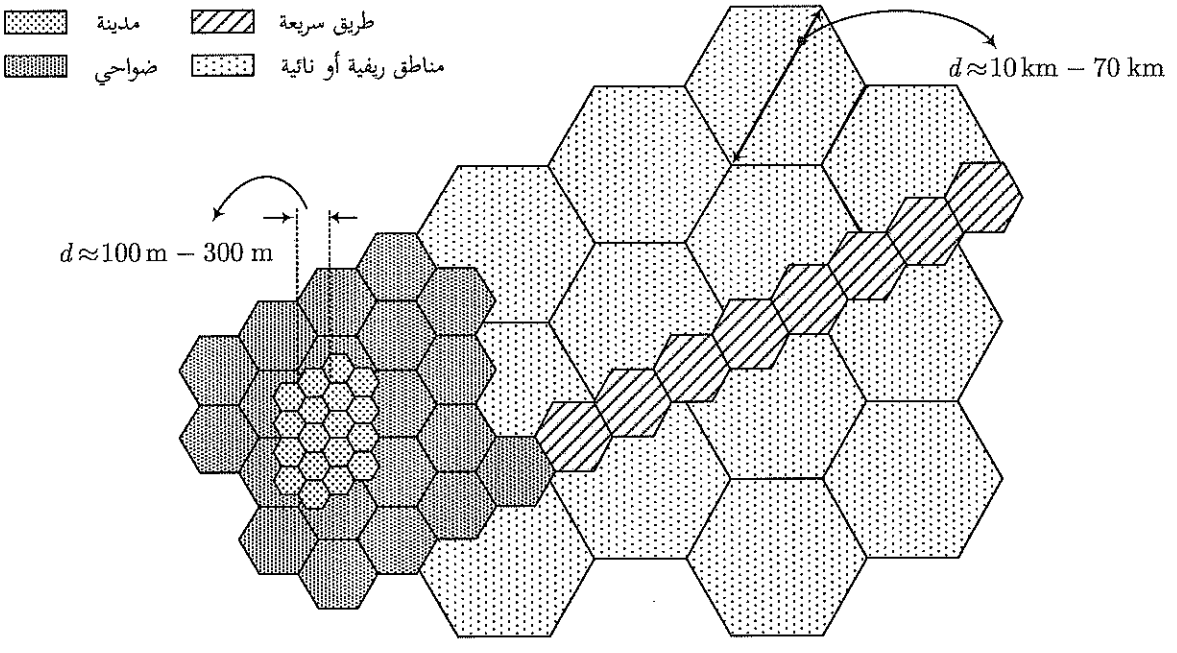
هذا ويجب التأكيد في هذا السياق على ما يلي:

- تمثل كلُّ خليةٍ قطاعيةٍ خليةً مستقلة بذاتها، لها هوائي خاص، وتَستخدم عدداً معيناً من الترددات، وفق حاجيات التخطيط. وليس من الضروري أن يكون عدد هذه الترددات متساوياً في كل القطاعات، فقد تكون خلية ما مجهزةً

بترددين فقط، بينما تكون الخلية القطاعية المجاورة مجهزة بأربعة أو خمسة ترددات، إذ أن الذي يحكم ذلك هو عدد المشتركين ضمن المنطقة الجغرافية التي يمثلها القطاع.

- توجد كل هوائيات الخلايا القطاعية في العادة على سطح بناء واحد، أو في ذروة "صاري" "Mast" مشترك. كما تكون التجهيزات الخاصة بكل معدات الإرسال والاستقبال الخاصة بجميع الترددات في مكان مشترك على سطح البناء، أو في غرفة خاصة ملحقة بالصاري. لذا تمثل كلمة المحطة الثابتة في هذه الحالة كل التجهيزات والهوائيات المشار إليها، كما يدل تعبير "موقع المحطة" على المكان الجغرافي الذي توجد فيه التجهيزات، وهو ما يُطلق عليه اسم "Site" بالانكليزية، فهو بذلك يختلف في دلالته عن تعبير "Cell" الذي يشير إلى خلية من الخلايا التي تغذيها تجهيزات الموقع.
- تختلف أبعاد ومساحات الخلايا حسب موقعها والبيئة الجغرافية المحيطة بها. فمن الممكن أن يصل قطر الخلية إلى 70 km في المناطق النائية ذات التضاريس المنبسطة، وقد لا يتجاوز 100 m في المناطق المزدحمة جداً.

يبين الشكل ١-٨ –من ناحية المبدأ– هذا الاختلاف، ونقرأ منه أيضاً أن الخلايا يمكن أن تتجاورَ حتى لو تباينت تبايناً شديداً في مساحاتها، وهذا لا يعيق أداء نظام الاتصال، ما دامت حدود كل خلية محددة ومعروفة، وما دامت إجراءات عملية التسليم، أي كيفية انتقال المشترك من خلية إلى أخرى، معرّفة على نحو سليم.



الشكل ١-٨: اختلاف أبعاد الخلايا حسب الموقع والبيئة الجغرافية المحيطة.

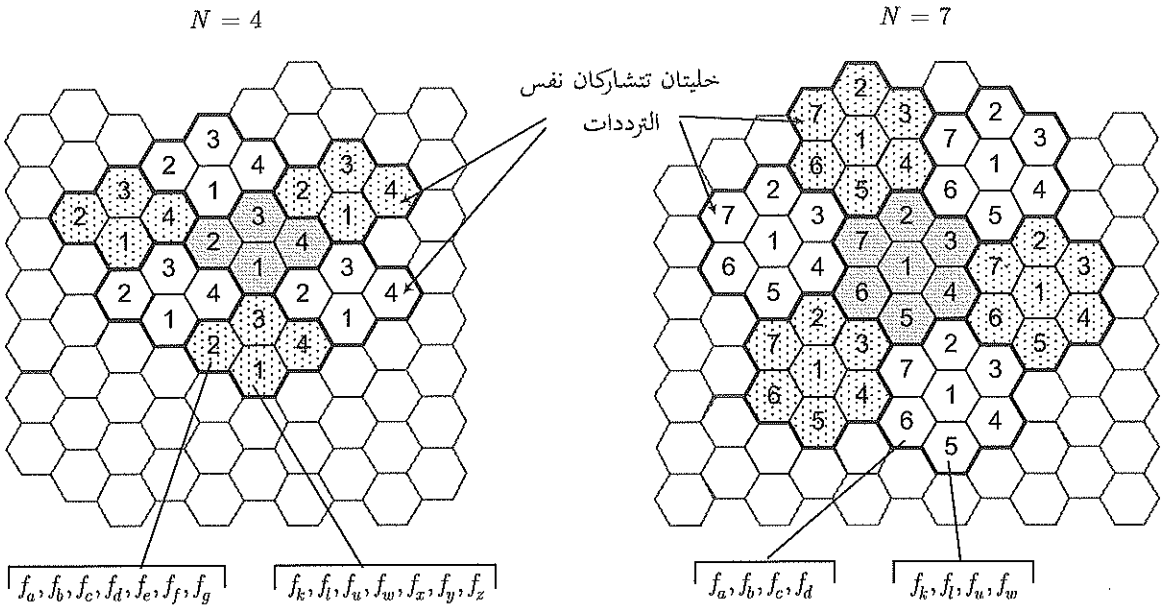
١-٤ توزيع الترددات على الخلايا

عرضنا في البحث ١-٢ لمبدأ إعادة استخدام الترددات، وبيّنا أن جوهر عمل الشبكات الخلوية يكمن في الاستخدام المتكرر للتردد ذاته في خلايا متباعدة عن بعضها على نحوٍ كاف، بحيث يُتاح لعدة مكالمات استخدام هذا التردد في آنٍ واحد.
ذكرنا أيضاً أن ندرة الترددات تقتضي وتحتّم استثمارها وتوزيعها على نحوٍ فعال، بحيث يتسنى تزويد أكبر رقعة جغرافية ممكنة بخدمات الاتصال، مع شَغْل أقل عدد ممكن من الترددات. لذا يمثل تعيين الموضع الأمثل لاستخدام كل تردد متاح، والمساحة الفاصلة بين خليتين تتشاركان التردد ذاته، وعدد الترددات في كل خلية، مهامَّ أساسية ضمن إجراءات تخطيط الشبكة، وذلك ضمن المبادئ التي نعرضها في الفقرات التالية.

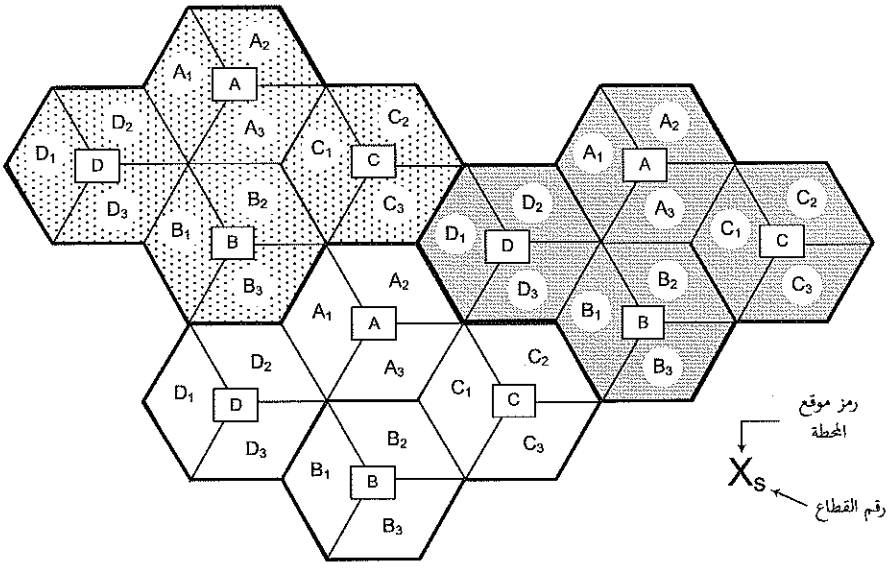
لنفترض أن مُشغلاً ما حصل على ترخيص من الجهات الناظمة لقطاع الاتصالات، يتيح له استخدام عدد مقداره K من الترددات أو الحوامل الراديوية. سيحاول مهندسو التخطيط في هذه الحالة استثمار هذه الترددات مع مراعاة النقاط التي ذكرناها أعلاه، من حيث الفعالية والحرص على وجود مسافة فاصلة بين الخلايا المتشاركة باستخدام التردد ذاته. يستلزم ذلك أن يحدد المهندسون بدايةً المساحة المتوقعة لكل خلية، وذلك تبعاً للطبيعة الجغرافية والعمرانية للمنطقة الجغرافية المحيطة. بعد ذلك، يجري تقديرٌ لعدد المستخدمين المتوقع في كل خلية، ما يسمح بتحديد عدد القنوات الضرورية في كل خلية، والذي نفترض أنه m.
بعد ذلك، يبدأ المهندسون بتوزيع الترددات على خلايا متجاورة، مع الحرص على أن يُستنفد الطيف الترددي المتاح كله، قبل تكرار استخدام أي تردد، لأن ذلك يؤدي إلى أبعد مسافة فاصلة بين محطتين تستخدمان نفس التردد. هذا يعني أن عدد القنوات الترددية المتاحة سيكون كافياً لتزويد عدد مقداره $N = K/m$ من الخلايا، قبل أن يُعاد استخدام التردد في خلية أخرى. لذا يمثل العدد N مجموعة الخلايا المتجاورة التي تكوّن نموذجاً هندسياً يمكن تكرار استخدام الترددات وفقه. يوضح الشكل ١-٩ هذا المبدأ في حالة كون $N = 7$ (الجزء الأيمن) أو $N = 4$ (الجزء الأيسر).
تُعرف مجموعة الخلايا التي تكون النموذج الهندسي اصطلاحاً بـ "وحدة تكرار الخلايا" "Cluster"، ويجدر التنويه مرة أخرى إلى أن الطيف المتاح يُستنفد ضمن الخلايا المكونة لوحدة التكرار، قبل أن يُصار إلى استخدامه في خلايا مجاورة ضمن وحدات تكرار أخرى.
يعني الشكل ١-٩ ضمنياً أيضاً، أنه في حال توفر 28 قناة ترددية على سبيل المثال، فإن كل خلية في حالة $N = 7$ تكون مخصصة بأربعة ترددات، بينما تُستخدم في الحالة الأخرى (أي $N = 4$) مجموعةٌ من سبعة ترددات في كل خلية. هذا ولا تكون الترددات ضمن الخلية نفسها متجاورة طيفياً، وإنما متباعدة عن بعضها بفاصلٍ تحدده متطلبات التخطيط ونوعية الأجهزة المستخدمة.

لا يقتصر نموذج التكرار على خلايا منتظمة الأبعاد، أي سداسية الشكل من الناحية المثالية، بل من الممكن أن يشمل خلايا قطاعية ضمن وحدة التكرار. لتوضيح ذلك، نضرب في ما يلي مثالاً على توزع الترددات ضمن وحدةِ تكرارٍ تتكون من 12 خلية قطاعية، ونفترض أن عدد الترددات المتاحة للنظام هو 36 تردداً.
يبين الشكل ١-١٠ بنية وحدة التكرار في هذه الحالة، حيث تتألف من أربعة مواقع لمحطاتٍ ثابتة، يغذي كل منها ثلاثة خلايا

قطاعية. يُشار إلى نمط التكرار هذا بـ "نمط 3×4"، حيث يدل الرقم 4 إلى عدد المواقع أو المحطات الثابتة ضمن وحدة التكرار، و 3 إلى عدد الخلايا القطاعية التي يغذيها كل موقع.



الشكل ١-٩: تعريف وحدات التكرار "Cluster" في توزيع الترددات.



الشكل ١-١٠: مثال على استخدام وحدة تكرار تشمل 12 خلية قطاعية بنمط 3×4.

يتيح هذا النمط توزيع القنوات الترددية التي افترضنا أن عددها 36، على 12 مجموعة، تُخَصَّص كل منها لخلية محددة ضمن وحدة التكرار، ويُدَلُّ على كلٍّ من هذه المجموعات برمز الموقع ورقم القطاع، كما هو موضح في الشكل. هذا ويوضح الجدول ١-١ واحداً من الخيارات الممكنة لتوزيع الترددات على الخلايا.

الخلية	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
أرقام الترددات المستخدمة	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36

الجدول ١-١: توزيع محتمل للترددات على الخلايا ضمن وحدة التكرار في الشكل ١-١٠.

١-٥ نحو تعريف دقيق لمفهوم التجوال

يقترن الفهم السطحي لمصطلح "الهاتف الجوال" بإمكانية تنقل المشترك أو حركته أثناء إجرائه للمكالمات الهاتفية، دون أن يؤدي هذا التنقل إلى انقطاع الاتصال. هذا الفهمُ، رغم كونه صحيحاً من الناحية المبدئية، يقتصر على وصفِ أبسطِ صورةٍ ممكنة من صور التجوال، دون إبرازِ ما تتميز به الشبكات الخلوية الحديثة عن غيرها من نظم الاتصالات. فعلى سبيل المثال، ينطبق هذا الفهم حتى على أنظمة الهواتف اللاسلكية المنزلية، إذ يمكن للمشترك الذي يستخدم الهاتف اللاسلكي المنزلي أن يتحرك ويتجول ضمن منزله أو حديقته أو البناء الذي يسكن فيه، دون أن يؤدي ذلك إلى انقطاع اتصاله، حيث يبقى هذا المشترك على اتصال بشبكة الهاتف الثابت ما دام لم يتجاوز مسافة معينة عن نقطة النفاذ إلى الشبكة، أي الجزء الثابت من الجهاز، الموصول بالمأخذ أو القابس المثبت في الحائط.

على خلاف ذلك، لا يقتصر مفهوم "التجوال" "Mobility" الذي توفره النظم الحديثة كميزة أساسية على مجرد إمكانية الحركة، بل يحمل طيه مدلولاتٍ أشمل وأعمق، من أهمها:

١) استمرارية الاتصال أثناء التنقل بسرعات كبيرة جداً: فقد صُممت هذه النظم لتوفر للمشترك جودة اتصال عالية، واستمرارية في توفر الخدمة، حتى أثناء استخدامه لأسرع وسائل المواصلات. فعلى سبيل المثال، يضمن نظام الاتصالات الخلوية الأوسع انتشاراً، أي نظام "Global System for Mobile Communications (GSM)"، استمرارية الاتصال وتنقلاً سلساً بين الخلايا، حتى وإن قاربت سرعة المشترك $250\,km/h$ [١]. أما أنظمة الجيل الثالث، فهي تتيح الخدمات الأساسية، مثل الاتصال الصوتي وتبادل المعطيات بمعدل دفقٍ منخفض، مع سرعةِ تِحرُّك قصوى تقارب $500\,km/h$.

[١] قد يشترط ذلك توفر بيئة انتشار مثالية.

٢) حرية التنقل ضمن مسافات شاسعة: بينما لا يمكن أن يُجاوز مستخدم الهاتف اللاسلكي المنزلي مسافة مقدارها 300 m عن نقطة النفاذ أو المأخذ، توفر نظم الاتصالات الحديثة استمرارية الاتصال والخدمات ضمن مسافات أطول بكثير، إذ يبلغ نصف قطر الخلية الأعظمي في نظام GSM 35 km، وإذا توفرت شروط انتشارٍ مساعدة، يمكن لنظم الجيل الثالث أن توفر خدمات ذات معدل دفق عال حتى ضمن مساحات قد تبلغ أبعادها عدة كيلومترات.

٣) تبديل نقطة النفاذ إلى الشبكة: يمثل هذا المعنى المدلول الأهم والأشمل لمصطلح التجوال، فقد سبقت الإشارة إلى أن الوحدة المتحركة تتابع اتصالها عن طريق الإنتقال من خلية إلى أخرى باستخدام التردد الذي توفره المحطة الثابتة في الخلية الجديدة، يشمل ذلك ضمنياً قطع الاتصال الراديوي مع الخلية القديمة وإنشاء اتصال جديد باستخدام تردد مختلف، ما يعني من الناحية الفيزيائية تبديل نقطة النفاذ إلى الشبكة من جهة (محطة جديدة في موقع جديد)، والتغيير الكامل لقناة الانتشار الراديوية من جهة أخرى (بيئة جديدة وتردد جديد، انظر الشكل ١-٢). لذا فإن المشترك الذي يتنقل بسيارته أثناء اتصاله يكون في حالة تبديل مستمر لنقطة النفاذ إلى الشبكة، باستخدام الرقم الهاتفي ذاته، وهوية المشترك ذاتها. ولو عدنا للمقارنة مع الهاتف اللاسلكي المنزلي، سنجد – على خلاف ذلك– أن تبديل نقطة النفاذ إلى الشبكة (أي وصل الجهاز نفسه في منزلٍ أو بناءٍ مجاور) يقتضي قطع الاتصال واستخدام رقم هاتفي مختلف، مرتبط بهوية اشتراك أخرى.

٤) إمكانية استخدام خدمات شبكات أخرى: صار من البدهي في العصر الراهن أن يسافر المشترك من بلده إلى بلد أخرى مع بقائه متمتعاً بإمكانية إجراء واستقبال مكالمات هاتفية، أو الولوج إلى شبكة الإنترنت لتصفح بريده الالكتروني. وتكون هذه الخدمات متوفرة للمشترك باستخدام رقمه الهاتفي ذاته، والمرتبط بهوية اشتراكه نفسها في شبكة موطنه. يطلق على هذا النوع من التجوال اسم "ميزة أو خدمة التجوال الدولي" "International Roaming"، وهو سمة أساسية من سمات نظم الاتصالات الخلوية الحديثة.

إضافة إلى ما تقدَّمَ ذكره، أدى التطور الهائل لتطبيقات و خدمات الشبكات الخلوية إلى إضافة تصنيفات جديدة لمصطلح "التجوال"، ترتبط على نحو أساسي بآلية وكيفية استخدام خدمات الشبكة. نذكر من هذه التصنيفات ما يلي:

- "تجوال أو تنقل الوحدة المتحركة" "Terminal Mobility": يدل هذا التعبير على إمكانية التغيير الجغرافي لموقع الوحدة المتحركة مع الحفاظ على استمرارية الاتصال. هذا التعريف هو الذي ينطبق على الاستخدام العام للهواتف الجوالة، حيث تكون الشبكة من الناحية العملية في حالة اتصال مع الجهاز والبطاقة المودعة فيه، بغض النظر عن الشخص الذي يستخدم هذا الجهاز.
- "تجوال أو تنقل المستخدم" "Personal Mobility": يشير هذا الصنف إلى قدرة المستخدم على الاستفادة من جميع خدمات الشبكة تحت نفس الهوية، وبغض النظر عن الجهاز الذي يلج عبره إليها. وأفضل مثال على ذلك هو استخدام شبكة الانترنت، حيث يمكن للمشترك أن يلج إلى الشبكة عن طريق الحاسب المحمول من المكتب (باتصال لاسلكي مع الشبكة) ثم ينتقل إلى مكان آخر و يتفقد بريده الالكتروني من هاتفه المحمول.

هناك كذلك تصنيفات أخرى يمكن الرجوع إليها في [١]-[٢]. هذا ويجدر التنويه إلى أن إمكانية "التجوال" كما جرى وصفها تتطلب خدمات وآليات مساندة في أكثر من عنصر من مكونات الشبكة، وهو ما سنتطرق إليه في الفصل ٦، الذي يتناول بنية الشبكة ووظائف مكوناتها.

١-٦ نظم الاتصالات الخلوية الأوسع انتشاراً والجهات الناظمة لها

لن نستفيض في هذا الموضع في ذكر تاريخ نشوء وتطور الاتصالات الخلوية، إذ لا يكاد يخلو كتابٌ من بابٍ خاصٍّ بالأطوار الأساسية لهذا التطور، لذا نحيل القارئ المهتم بذلك إلى مصادر أخرى ([٣]-[٦] على سبيل المثال)، ونكتفي في ما يلي بالتعريف بأوسع الأنظمة انتشاراً، والتي سنتطرق إلى بعضها كأمثلةٍ في بقية فصول الكتاب.

١-٦-١ أنظمة الجيل الثاني

كانت أولى الشبكات الخلوية التي انتشرت في أوروبا وأمريكا، والتي تعرف باسم "أنظمة الجيل الأول"، تعتمد "نظماً وتقنياتٍ تمثيلية" "Analogue Systems"، ذات سعاتٍ محدودة، وتقتصر على توفير خدمات الاتصالات الصوتية التقليدية. كما كانت هذه الشبكات تفتقر إلى خدمات التجوال الدولي بسبب كون كلٍ منها مخصصاً لسوق محددة، فقد أُنشأت على سبيل المثال شبكات ألمانية وأخرى سويدية أو بريطانية، غير أنها كانت شبكات قطرية، ولم يكن هناك أي تجانس بين المواصفات الفنية الخاصة بكل منها.

ونتيجة للتطور السريع الذي شهدته التقنيات الرقمية، وعدم قدرة أنظمة الجيل الأول على تلبية حاجات المستخدمين المتزايدة، بُدء العمل على تطوير وبناء نظمٍ تعتمد تقنيات رقمية من جهة، وتستند إلى معايير معتمدة في عدة بلاد من جهة أخرى، ما يضمن انتشاراً أوسع وأسرع لها. وقد تميزت هذه النظم عن سابقاتها بحرص مطوريها على توفير خدمات الاتصال الهاتفي التقليدية بجودة عالية، إضافة إلى خدمات نقل البيانات والمعطيات، وإمكانية التجوال الدولي. يطلق على هذه الأنظمة اصطلاحاً تعبير "أنظمة الجيل الثاني"، وأبرزها دون منازع نظام GSM، الذي طُوِّرت مواصفاته الفنية ضمن جهود أوروبية مشتركة، بهدف إيجاد نظام موحد، يوفر خدمات الاتصالات بجودة عالية ضمن دول الاتحاد الأوروبي كلها، وتشرف على تطويره هيئة معترف بها في كل هذه الدول وهي "European Telecommunications Standards Institute (ETSI)" أو "المعهد الأوروبي لمعايير الاتصالات". وقد لاقى هذا النظام نجاحاً غير متوقع، ورواجاً تخطى حدود أوروبا وتجاوزها ليصبح في غضون سنوات قليلة النظام المهيمن تجارياً وتقنياً في العالم أجمع.

وضعت المواصفات الفنية الأولى لنظام GSM كي يعمل في المجال الترددي المحيط بـ 900 MHz، وخُصِّص له نطاقٌ عرضه 25 MHz، غير أن الانتشار الواسع والسريع لهذا النظام، وتزايد عدد المشتركين على نحوٍ غير متوقع، جعل النطاق الأساسي المخصص قاصراً عن تلبية حاجات الشبكات المشغلة من حيث السعة المنشودة، لذا تنامت الحاجة إلى تخصيص نطاقاتٍ

ومجالات ترددية إضافية له، إما بسبب عدم إتاحة مجال 900 MHz للإستخدامات المدنية في بعض البلدان، أو بسبب كون هذا المجال محدوداً من ناحية النطاق الشاغر. وقد تزايد عدد هذه النطاقات والمجالات الإضافية تدريجياً حتى وصل إلى 14 نطاقاً ترددياً مختلفاً، تتوزع على مجالات ترددية تقع بين 380 MHz و 1900 MHz (انظر [٧]). وقد خصصت هذه النطاقات كلها لتوفير خدمات الاتصال وفق نظام GSM والنظم المعدلة عنه، بتعبيرٍ أخر، هناك عدة أنظمة معتمَدة تستند كلها إلى مواصفات GSM الأساسية، وتتباين بدرجة محدودة في ما يتعلق بالمكونات الخاصة بالأجزاء الراديوية ومعالجة الإشارة. هذا ويجري تمييز هذه الأنظمة عن طريق إضافة المجال الترددي المخصص إلى اسم النظام، كما هو موضح في الجدول ١-٢، الذي يسرد أهم معالم بعض هذه النظم (يمكن الرجوع إلى [٧] لمزيد من التفاصيل).

اسم النظام	أهم الخصائص
P-GSM-900	• الاسم الكامل: نظام GSM الأساسي "P: Primary" • يعمل في المجال الترددي المحيط بـ 900 MHz • عرض النطاق المخصص للنظام 25 MHz
E-GSM-900	• الإسم الكامل: نظام GSM الموسَّع "E: Extended" • يعمل في المجال الترددي المحيط بـ 900 MHz • عرض النطاق المخصص للنظام 35 MHz (يشمل ذلك النطاق الأساسي)
GSM-1800	• يعمل في المجال الترددي المحيط بـ 1800 MHz • عرض النطاق المخصص للنظام 75 MHz • يسمى في المملكة المتحدة "Digital Cellular Service (DCS)"
GSM-1900	• يعمل في المجال الترددي المحيط بـ 1900 MHz • عرض النطاق المخصص للنظام 60 MHz • يسمى في أمريكا الشمالية "Personal Communications Service (PCS)"

الجدول ١-٢: نظم GSM الأوسع انتشاراً.

تجدر الإشارة في هذا السياق إلى أن نظم GSM السائدة في الوطن العربي هي "النظام الأساسي" (P-GSM-900) الذي يشغل 25 MHz ضمن مجال 900 MHz، و"النظام الموسع" (E-GSM-900) الذي يشغل 35 MHz ضمن مجال 900 MHz، أي نطاقاً موسعاً يزيد بـ 10 MHz عن النطاق الأساسي، ونظام GSM-1800 الذي خصص له نطاق عرضه 75 MHz ضمن لمجال الترددي المحيط بـ 1800 MHz. وغالباً ما يُمنح المشغل ترخيصاً لاستخدام المجالين في آنٍ واحد.

لم يكن نظام GSM الممثل الوحيد لأنظمة الجيل الثاني التي لاقت انتشاراً واسعاً، فقد حظيت نظم أمريكية ويابانية بنجاحٍ لافتٍ أيضاً. من أشهر هذه النظم:

- نظام "Digital Advanced Mobile Phone System (D-AMPS)" الأمريكي، يعرف نظام D-AMPS أيضاً باسم "Interim Standard 136 (IS-136)" و "Interim Standard 54 (IS-54)"، وقد طُوِّر عن نظامٍ تمثيلي من نظم الجيل الأول.
- نظام "Code Division Multiple Access-Generation One (CDMA-One)"، وهو أمريكيٌّ أيضاً ويشار إليه باسم "Interim Standard 95 (IS-95)".
- نظام "Personal Handy Phone System (PHS)" الياباني، الذي لاقى رواجاً وانتشاراً في اليابان والصين وتايلاند ودول أخرى في أمريكا اللاتينية.

لم يستمر نجاح هذه النظم طويلاً، إذ تضاءل انتشارها تدريجياً بسبب الهيمنة التي اكتسبها نظام GSM والنظم المعدلة عنه، فعلى سبيل المثال، جرى إيقاف آخر شبكةٍ تعمل بنظام D-AMPS في أيلول من عام ٢٠٠٨، واستُبدلت بأخرى تعتمد نظام GSM. لذا، لن نتطرق في هذا الكتاب لهذه الأنظمة، نظراً لكونها فقدت كل وجود عملي وفعلي.

لم يكن تبادل "المعطيات الرُّزَميَّـة" "Packet Data" شأناً ذا أولوية مميّزة حين طوِّرت الإصدارات الأولى من المواصفات المعيارية لنظام GSM، والمعروفة باسم "الإصدار الأول" "GSM-Phase 1" و"الإصدار الثاني" "GSM-Phase 2"، إذ كانت الاتصالات الهاتفية التقليدية، أي تبادل الإشارة الكلامية، هي الخدمة المهيمنة على تطلعات المشتركين واهتمام مطوري النظام. لذا، نجد أن هذين الإصدارين يُتيحان "خدمات تبادل المعطيات" "Data Communication Services"، ولكن بصيغة محدودة جداً، تعتمد تقنية أو مبدأ "تبديل الدارات" "Circuit Switching" حصراً، وتقتصر على "معدلات نقلٍ أو دفقٍ" "Data Rates" منخفضة، لا تتجاوز 9.6 kbps . وقد كان جُلُّ الاستخدامات أو التطبيقات المرتبطة بذلك هو إرسال رسالةٍ إلى جهاز "فاكس" "Facsimile (FAX)" أو طابعةٍ، أو تبادل بعض أوامر التحكم مع أجهزةٍ طرفية من الممكن أن توصل بالوحدة المتحركة، كما كان ذلك يتطلب تجهيزات إضافية، تجعل من أية عملية تبادل معطياتٍ إجراءاً مكلفاً زمنياً، وغير مجدٍ عملياً بسبب انخفاض معدل إرسال المعطيات.

مع تطور شبكة الانترنت، والانتشار الواسع لها، وإتاحتها أصنافاً جديدةً ومُبتكرة من طرق وأغراض الاتصال، وهيمنتها كأداة ووسيلة لنشر وتبادل المعلومات، بذل مهندسو التطوير جهوداً حثيثة لإتاحة خدمات تبادل المعطيات الرزمية باستخدام البنية التحتية لنظام GSM. وقد شجع على ذلك الانتشار الواسع الذي حظي به هذا النظام، والذي جعل المحللين الاقتصاديين وخبراء التسويق يتنبؤون بعائدات مجدية لهذه الجهود، خصوصاً إذا رُوعيت الكفاءة العالية لتبادل المعطيات باستخدام تقنيات "تبديل الرزم" "Packet Switching" أو "توجيه الرزم" "Packet Routing". وقد قادت هذه الجهود إلى إدراج ما يعرف باسم "خدمات الإرسال الراديوي الرزمي" "General Packet Radio Services (GPRS)" كصنفٍ جديدٍ من التطبيقات التي

يتيحها النظام، وذلك ضمن الإصدار المعروف باسم "الإصدار الثاني المحسَّن" "GSM-Phase 2+". هذا ومن الممكن أن نقرأ من الاسم الكامل لمصطلح GPRS دلالتين مهمتين:

١) يؤكد تعبير "الراديوي" على أن محور جهود الابتكار في التحسينات المتعلقة بـ GPRS يكمن في نقطتين: الأولى هي استخدام رابطٍ صمم أساساً لنقل المعلومات بتقنية "تبديل الدارات"، كبنيةٍ تحتية لتبادل المعطيات وفق مبدأ "توجيه الرزم"، أما الثانية فهي مواءمة البروتوكولات الحاكمة لتبادل المعلومات عبر هذا الرابط كي تتوافق مع منظومة أو بنيان بروتوكولات "Transmission Control Protocol (TCP)" و"Internet Protocol (IP)".

٢) نقرأ من الاسم أيضاً أن التحسينات توصف بتعبير "خدمات" "Services" وليس بتعبير "تقانة" "Technology"، إذ أن هذه التحسينات أُدرجت على نحوٍ لا يمس بنية شبكة GSM الأساسية (أي وفق الإصدار GSM-Phase 2)، ولا يتطلب استبدالَ أيٍّ من مكوناتها الجوهرية. وننوه في هذا السياق أن إدراج خدمات GPRS جرى تاريخياً بعد أن أنشئت العديد من الشبكات ضمن مناطق جغرافية واسعة، وأي تغييرٍ جوهري في بنية الشبكة كان سيقود إلى تكاليف غير مقبولة من ناحية مشغلي الشبكات. إضافةً إلى ذلك، كان أي تعديلٍ جوهري سيتطلب أيضاً استبدال كافة الوحدات المتحركة المستخدمة في ذلك الوقت، وانقطاعاً لتوفر الخدمات، وهذا دون شك كان سيؤدي إلى استياء المشتركين. لذا، كان من الضروري أن تجري التعديلات على الشبكة على نحوٍ يسمح بإدراج خدمات نقل وتبادل المعطيات كخدمات إضافية للخدمات الصوتية، وأن يكون توفير هذه الخدمات يستند إلى مكونات جديدة ضمن الشبكة، تعمل على نحوٍ مستقل تقريباً عن المكونات الموجودة. لذا تُمثل المكونات التي أضيفت إلى الشبكة، والخاصة بخدمات GPRS، شبكةً موازية لشبكة GSM الأصلية، وهذا ما يُطلق عليه تعبير "Overlay Network"، أي شبكة تنشأ عن إحلال مكوناتٍ جديدة ضمن شبكة أساسية.

تبرر النقطتان اللتان تقدم ذكرهما اختيار تعبير Services لتسويق كل ما يتعلق بنظام GPRS، كما تبرران أيضاً استخدام مصطلح "GPRS Network" في كثير من المصادر والمواصفات المعيارية للدلالة على هيكلية أو بنية الشبكة التي تتيح تبادل المعطيات. إضافة إلى ذلك، يُشار إلى الشبكات التي تقدم خدمات GPRS بمصطلح "2.5G Network"، في دلالة على أنها تمثل تحسيناً أو تطويراً لشبكات الجيل الثاني.

هذا وسنستخدم في ما يلي من الفصول تعبيري "نظام GPRS" أو "تقنية GPRS" بنفس المعنى، حيث تتبين الدلالة المقصودة من السياق، كما سنشرح أهم المبادئ التقنية المتعلقة بخدمات GPRS في الفصل ٤.

قاد تطلع مستخدمي الشبكات إلى معدلات نقلٍ أعلى للمعطيات إلى تحسينات إضافية على نظام GPRS، تمس بالدرجة الأولى خطوات معالجة الإشارة، حيث أتاح إدراج تقنية "8 Phase Shift Keying (8PSK)" كخيارٍ إضافي لإنجاز خطوة "التعديل أو التضمين الرقمي" "Digital Modulation"، مضاعفةً معدل نقل المعطيات ثلاث مرات تقريباً، والوصول إلى نظامٍ محسن يُعرف باسم "Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE)"، أو "Enhanced GPRS (EGPRS)".

يعتبر هذا النظام جزءاً من عائلة GSM لأنه يقتصر على تحسينات لا تمس بنية شبكة GSM/GPRS التقليدية، إذ أن العامل

أو العنصر الأساسي الذي يميز تقنية EDGE عن GSM و GPRS هو مبدأ التعديل الرقمي الإضافي، ولا يتطلب جعلُ المحطات الثابتة داعمة لهذا النظام سوى تزويدها بإصدارات متقدمة للبرمجيات التي تحكُمُ عملها. لذا، يُشار إلى الشبكات التي تتيح خدمات EDGE بتعبير "2.75G Network".

١-٦-٢ أنظمة الجيل الثالث

دفع نجاح شبكات الجيل الثاني للاتصالات الخلوية باتجاه دراسة إمكانية تطوير نظام عالمي موحد، يفي بالشروط الفنية والتقنية اللازمة لتوفير تطبيقاتٍ لا تقتصر على خدمات الاتصال الهاتفي التقليدية، بل تتعداها لتشمل خدماتٍ أخرى تحاكي في تنوعها تلك التي تتيحها شبكة الانترنت. وقد جرى تبَنِّي هذه الدراسات من قبل الاتحاد العالمي للاتصالات (ITU) ضمن مشروعٍ أنشئ خصيصاً لذلك، وأطلق عليه اسم "International Mobile Telecommunications 2000 (IMT-2000)"، حيث يحمل الرقم "2000" دلالة على المجال الترددي الذي جرى التوافق على اختياره لهذا النظام، وهو 2000 MHz. وقد تضافرت جهود الباحثين والجهات الناظمة لقطاع الاتصالات في شتى أنحاء العالم لوضع المواصفات الفنية لمثل هذا النظام الشامل، الذي كان الغرض منه تحقيق انتقالٍ نوعيٍّ إلى جيلٍ جديد (أي "جيل ثالث") من خدمات الاتصالات الخلوية والتقنيات المستخدمة لانجازها، يتبناه كل مشغلي الشبكات في العالم أجمع. وقد نجحت هذه الجهود في وضع مقترحاتٍ لمعايير مناسبة لمثل هذا النظام، إلا أنها فشلت في توحيد هذه المعايير عالمياً. يرجع السبب في ذلك إلا أن الاستبدال الكامل والجذري لشبكات الجيل الثاني كان سيتطلب استثماراتٍ كبيرة تعجز عن تحمل أعبائها الشركات المالكة والمشغلة للشبكات، لذا جرى التوافق على اعتماد أكثر من تقنيةٍ داعمةٍ لخدمات الجيل الثالث، وعلى أن يكون الانتقال إلى الجيل الثالث تدريجياً، بحيث يمكن للمشغلين استثمار الشبكات القائمة لأبعد حدٍ ممكن ([٩]-[١١]). هذا وقد أسفرت الجهود الرامية لتوحيد المعايير عالمياً إلى استحداث جهتين أساسيتين معنيتين بوضع المواصفات الفنية لنظم الاتصالات الجوالة:

- الأولى هي "الهيئة التشاركية لتطوير الجيل الثالث للاتصالات" "Third Generation Partnership Project (3GPP)"، وهي جهة تضم كبرى الشركات المصنعة لتجهيزات الاتصالات، وممثلين عن الجهات المشغلة للشبكات، كما يشارك في نشاطاتها أهم الجهات الرسمية والحكومية الناظمة لقطاع الاتصالات.

تُصدر هذه الجهة توصيات مفصلة تتعلق بالمواصفات التي تختص بكل جزء من أجزاء الشبكة، وتكتسب هذه التوصيات صفة رسمية عندما تشترط الجهات الحكومية الناظمة للترددات والمانحة لتراخيص تشغيل الشبكات، أن يكون توفير الخدمات للمشتركين واختيار الأجهزة المكوِّنة للشبكة موافقاً للمعايير الفنية التي تشملها التوصيات الصادرة عن 3GPP.

تمثل 3GPP أيضاً الجهة المسؤولة عن وضع خارطةٍ ترسم معالم النقلات النوعية في نظم الاتصالات الخلوية، بدءاً بنظام GSM، مروراً بنظم الجيل الثالث، ووصولاً إلى مواصفات شبكات الجيل الرابع من الاتصالات، التي باشرت طور الانتشار الفعلي خلال الأعوام الثلاثة الأخيرة. وتميِّزُ هذه الخارطة بين النقلات المختلفة من خلال تسمية "إصدارات" متعددة "Releases" للتوصيات، يغطِّي كلٌ منها مجموعة من التحديثات المقترحة لأجزاء متفرقة من الشبكة، ومن الممكن الرجوع

إلى تفاصيل هذه الإصدارات في [١١]. يجدر التنويه أيضاً إلى أن كل المواصفات المعيارية التي كانت صدرت من قبل المعهد الأوروبي لمعايير الاتصالات (ETSI)، والتي تشمل إصدارات GSM لغاية GSM-Phase2+، قد جرى تبنّيها من قبل 3GPP، وصارت جزءاً من التوصيات التي تشرف على متابعة إصدارها.

- أما الجهة الثانية التي يجدر ذكرها في هذا السياق فهي "Third Generation Partnership Project 2 (3GPP2)"، أي "الهيئة التشاركية الثانية لتطوير الجيل الثالث للاتصالات"، والتي تُعنى على نحوٍ أساسي بوضع الخارطة المتعلقة بتطوير نظم الاتصالات انطلاقاً من نظام CDMA-One المنتشر في الولايات المتحدة وإلى حدٍ ما في اليابان وكوريا الجنوبية. وتُصدر هذه الجهة كذلك مقترحاتها لتصب في إصدارات متجددة، يمكن الرجوع إليها في [١٢].

استناداً إلى ما سبق، يشمل تعبير "الجيل الثالث" مجموعتين أساسيتين من الأنظمة:

- الأولى هي الأنظمة التي تشملها توصيات 3GPP، والتي تتباين من حيث تفاصيل التقنيات الناظمة للرابط الراديوي. تندرج كل هذه الأنظمة ضمن المصطلح الجامع لها وهو "Universal Mobile Telecommunications Services (UMTS)"، الذي أصبح مرادفاً مباشراً لتعبير "الجيل الثالث". وقد اعتمدت هذه الأنظمة في بعض أجزائها على نظام GSM، لذا لاقت انتشاراً واسعاً في كل دول العالم.
- أما القسم الثاني من أنظمة الجيل الثالث، فيشمل نظاماً رئيسياً يعرف بـ"CDMA-2000"، انبثق عن توصيات 3GPP2، ويمثل تطويراً لنظام CDMA-One الأمريكي، لذا لم يلق انتشاراً إلا في المناطق التي هيمن عليها هذا النظام. هذا وقد بدأ تأثير 3GPP2 يتضاءل بسبب توسع انتشار أنظمة الجيل الرابع، التي تعتمد خارطة التطوير المرسومة من قبل 3GPP[1].

لقد تمثل الانتقال النوعي من الجيل الثاني إلى الجيل الثالث وفق خارطة 3GPP في استخدام تقنيةٍ جديدة لإتاحة نفاذ عدد كبير من المشتركين إلى موارد وخدمات الشبكة (انظر الفصل٢)، وفي توسعة عرض النطاق الترددي الذي يتيحه النظام لكل مشترك. وقد ساعد ذلك في الوصول إلى معدل نقلٍ للمعطيات على الرابط الراديوي يصل –ضمن ظروف انتشار مثالية– إلى 2 Mbps.

جرى تبني هذه المبادئ ضمن الإصدار الأولي لأنظمة الجيل الثالث والذي يعرف باسم 3GPP-Release 99، وقد تبعتها تحسينات جذرية عديدة رافقت الإصدارات التي تلت الإصدار الأولي، وقد كان محور أهم هذه التحسينات ما يلي:

١) خفض تكاليف تشغيل الشبكات، وذلك عن طريق الانتقال التدريجي من تقنيات تبديل الدارات إلى تقنيات توجيه الرزم، بحيث يشمل هذا الانتقال أجزاء الشبكة كلها بما فيها الرابط الراديوي.

٢) إتاحة الوصول إلى معدلاتٍ مرتفعة جداً لتبادل المعطيات، وذلك من خلال إدراج أنماط متقدمة للتعديل الرقمي

[1] ننوه في هذا الموضع إلى وجود جهات أخرى مختصة بوضع المعايير، غير أننا اقتصرنا على تلك التي تلعب دوراً رائداً في تطوير نظم الاتصالات الخلوية، والتي من الممكن أن يكون القارئ العربي على تماسٍّ معها.

ضمن خيارات النظام، واستخدام آلياتٍ ابتكرت خصيصاً لرفع فعالية توزيع واستثمار الموارد الفيزيائية المتاحة على الرابط الراديوي، إضافة إلى أساليب متطورة لمعالجة الإشارة.

أتاحت هذه التحسينات وغيرها –مجتمعةً– الوصول بمعدل تبادل المعطيات إلى قيم تتجاوز 40 Mbps، وذلك اعتماداً على التقنيات الداعمة للخدمات المعروفة باسم "High Speed Packet Access Evolution (HSPA+)" (انظر [١٣])، والتي يصفها الإصدار Release 7.

أسوةً بالنظم المحسنة عن الجيل الثاني يُستخدم مصطلحا 3.5G و 3.75G للدلالة على النظم المحسنة والمطورة عن الإصدار الأولي لنظام UMTS، ويحمل هذان المصطلحان دلالة تسويقية بالدرجة الأولى، يستثمرها مشغّلو الشبكات ومصنّعو التجهيزات الخاصة بها، إذ ليس هناك توافقٌ بين الجهات المعنية بوضع المعايير على القواعد الحاكمة لاستخدام هذه التسميات.

١–٦–٣ أنظمة الجيل الرابع

صدرت عن 3GPP في العام ٢٠٠٨ التوصيات الفنية المتعلقة بالإصدار Release 8، الذي يعتمد تقنية جديدة لتبادل المعطيات بين الشبكة والمشترك عبر الرابط الراديوي.

تستند هذه التقنية التي تعرف باسم "Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)" إلى استخدام حوامل ترددية متجاورة وعديدة لنقل الإشارة الراديوية، ويتيح هذا المبدأ –مع تحسينات أخرى عديدة أهمها أستخدام نطاق ترددي لتبادل المعطيات يصل إلى 20 MHz– الوصول بمعدلاتِ تبادل المعطيات إلى قيمٍ تتجاوز 100 Mbps (انظر [١٤]–[١٥] للتفاصيل). وقد أُصطلح على تسمية الأنظمة التي تعتمد هذه التقنية الجديدة بـ "أنظمة الجيل الرابع" وذلك تحت اسمٍ تقني جامع هو "Long Term Evolution (LTE)"، الذي يحمل دلالةً على أن تطور نظم الاتصالات الخلوية سيستمر أمداً طويلاً، وبخطى حثيثة ومتسارعة. ويكفي للتأكيد على ذلك أن هدف مطوري النظم هو الوصول بمعدلات نقل المعلومات إلى 1 Gbps (1000 Mbps).

١–٧ أهم مؤشرات أداء النظم الراديوية

يدل تعبير "أداء النظام الراديوي" على فعالية المستقبل في استخلاص الإشارة الرقمية المرغوبة، بمقدار مقبول من الدقة، حتى عندما تصل هذه الإشارة وقد أصابها تشويهٌ في مطالها أو طَورها، وحتى إذا امتزجت أو تراكمت مع إشاراتٍ أخرى غير مرغوبة. وسوف نجدُ في عدة مواضع في الفصول القادمة إشاراتٍ متكررة إلى هذا التعبير، لذا نخصص هذا الجزء من الفصل لتذكير القارئ بأهم مؤشرات أداء النظم الراديوية، وما تعنيه أو تدل عليه عند استخدامها في إطار تصميم وتقييم النظم الخلوية على نحوٍ خاص.

١-٧-١ التشويش في الأنظمة الراديوية

١-١-٧-١ أهم أصناف التشويش

إن المصطلح الجامع الذي يشمل كل الظواهر التي تؤثر سلباً على أداء نظم الاتصالات هو "التشويش"، ويُقصد به كل ما من شأنه جعل الإشارة المرغوبة مبهمة أو غير واضحة، ما يعيق استخلاص المعلومات التي تتضمنها.

ينشأ التشويش إما بسبب تشوه الإشارة أثناء انتقالها من المرسل إلى المستقبل، أو نتيجة تراكمها مع إشارات أخرى، يرصدها هوائي المستقبل دون التمييز بينها، ودون توفر إمكانية عزلها عن بعضها. ويمكن تصنيف الإشارات المسَبِّبة للتشويش ضمن نوعين رئيسيين (انظر الشكل ١-١١):

١) يمثل النوع الأول الإشارات التي تتركز طاقتها ضمن مجال ترددي ضيق، كتلك المحمولة على قنوات ترددية معينة ومحددة، ويطلق على ظواهر التشويش التي تكون مثل هذه الإشارات سبباً لها إسم "تداخل"، الذي يقابل تعبير "Interference" بالإنكليزية.

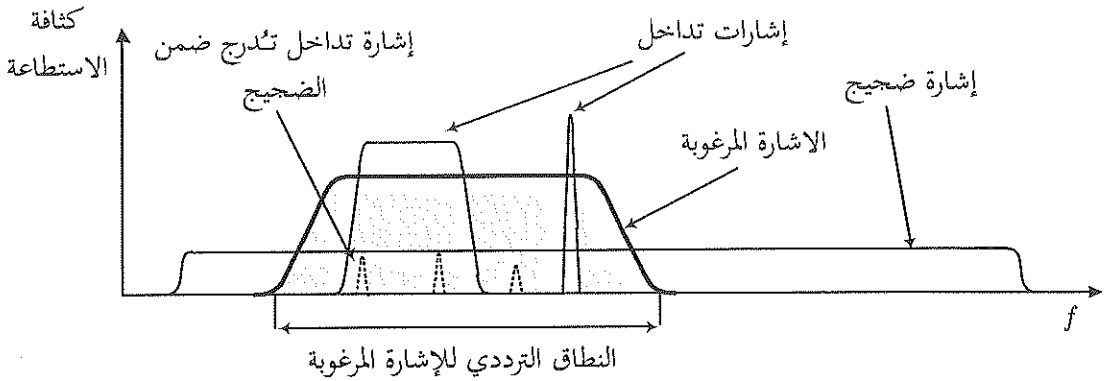
٢) أما النوع الثاني من الإشارات غير المرغوبة فله سمتان أساسيتان، تتجلى الأولى في الطابع العشوائي لهذه الإشارات، حيث لا تتبع القيم اللحظية لهذه الإشارات نمطاً دورياً أو محدداً. أما السمة الثانية فهي توزُّعُ طاقة هذه الإشارات بالتساوي تقريباً على مجال طيفي أعرض بكثير من النطاق الترددي الذي تشغله الإشارة المرغوبة. ينتج عن ذلك أن الكثافة الطيفية لطاقة التشويش تكون ذات قيمة ثابتة تقريباً لكل الترددات المؤثرة على أداء النظام.

يطلق على التشويش الناجم عن مثل هذه الإشارات اسم "ضجيج" "Noise"، وقد يطلق هذا التعبير اصطلاحاً على الإشارة العشوائية نفسها، أو على أية إشارة تشويش، إذا كانت طاقتها موزعة على نحوٍ متساوٍ تقريباً ضمن المجال الطيفي المدروس. ويوصف الضجيج بأنه:

- تراكمي: إذا كانت قيمة إشارة الضجيج غير تابعة لقيمة الإشارة التي تخضع للتشويش، لذا تكون القيمة اللحظية للإشارة المستقبلة -أي المشوَّشة- مساوية لقيمة الإشارة الأصلية، مجموعاً لها قيمة إشارة التشويش.
- أبيض: إذا كانت الكثافة الطيفية لاستطاعة الضجيج لا تختلف باختلاف التردد ضمن أجزاء كبيرة من المجال الطيفي، ويُرمز للكثافة الطيفية لاستطاعة الضجيج في هذه الحالة بـ N_0.
- غاوسي: إذا كانت القيم اللحظية العشوائية لإشارة الضجيج موزعة إحصائياً على نحوٍ يمكن وصفه رياضياً عن طريق "تابع غاوس" "Gauss Distribution".

استناداً إلى ما سبق، يمكن القول بأن التشويش يشمل كل آثار التداخل والضجيج، حيث يدل التداخل على الآثار المرتبطة بتردداتٍ معينة دون غيرها أو بنطاق ترددي ضيق نسبياً، بينما يشير الضجيج إلى كل تشويش يصيب كل النطاق الترددي قيد الدراسة على نحوٍ متساوٍ تقريباً. ويجب التنويه إلى أنه لا يمكن وجود فصل تام بين الأثرين، فعلى سبيل المثال، قد توجد إشارة راديوية ضيقة النطاق تساهم في التشويش، غير أن أثرها ضمن المجال المدروس ضعيف جداً، بحيث يندرج ضمن المستوى

المنخفض للتشويش الناتج عن الضجيج. لذا تُشمل دراسة تأثير هذه الإشارة في هذه الحالة ضمن نقاش آثار الضجيج (يعطي الشكل ١-١١ مثالاً على ذلك). ننوه أيضاً إلى أن مصطلح "Interference" في المراجع الإنكليزية يطلق إما على التشويش أو على التداخل فقط، لذا يكون التفريق في المصادر بين هذه الأثرين ضمن سياق النص، وعلى نحوٍ انتقائي وصريح.



الشكل ١-١١: أصناف الإشارات المسببة للتشويش.

١-٧-١-٢ أهم مصادر التشويش في نظم الاتصالات الخلوية

بعد بيان المصطلحات الأساسية المُعَرِّفة لأنواع التشويش، نتطرق في ما يلي إلى أهم مصادره، التي تؤثر سلباً على أداء النظم الخلوية، وتعيرها المواصفات المعيارية اهتماماً خاصاً، ما يستلزم أخذها بعين الاعتبار عند تصميم أجهزة النظام وتخطيط الشبكة. تتلخص هذه المصادر في ما يلي:

- الضجيج الحراري: من المعلوم أن هذا الضجيج يؤثر على أداء جميع الأجهزة والنظم الإلكترونية، فهو ينتج عن تغيرات عشوائية في الإشارة الكهربائية، تنجم عن حركات عابرة للإلكترونات بفعل التحريض الحراري، لذا فإن أثر هذا الضجيج يزداد مع ازدياد الحرارة.

  من أهم سمات هذا الضجيج أنه يحقق مواصفات الضجيج الغاوسي والضجيج الأبيض التي تقدم ذكرها، كما تؤثر قيمته في تحديد الحد الأدنى للإشارة التي يجب أن يكون المستقبل قادراً على رصدها أو استشعارها.

  يُدَلُّ على الكثافة الطيفية لاستطاعة الضجيج الحراري بالرمز N_0 ،وتُعطى قيمتها مقيسة بوحدة $\left[\mathrm{W/Hz}\right]$ بالعلاقة [١٦]:

$$N_0 = k_B T \qquad (١-٣)$$

حيث تمثل T درجة الحرارة مقيسة بوحدة كلفن "Kelvin"، وحيث يُشيرُ الرمز k_B إلى "ثابت بولتسمان"

"Boltzmann's Constant"، وقيمته (1.38×10^{-23}Joules/Kelvin). بذلك يكون مقدار استطاعة الضجيج P_N ضمن النطاق الطيفي B_c، الذي تشغله دارات المستقبل الراديوية هو:

$$P_N = N_0 B_c = k_B T B_c \qquad (٤-١)$$

- الضجيج الصنعي: يشير الاسم الاصطلاحي لهذا النوع من الضجيج إلى كونه ينشأ عن كل ما يستخدمه الإنسان من أجهزة كهربائية، أو آلاتٍ تُصدر إشارات كهرومغناطيسية، سواءً على نحوٍ عابر أو دائم. يشمل ذلك على سبيل المثال أنظمة الإضاءة العامة في المدن، والأجهزة المنزلية، والتجهيزات الإلكترونية الترفيهية، والآلات الصناعية. كذلك تنضوي تحت هذا الاسم كل أنواع "الإشعاعات الكهرومغناطيسية الثانوية" "Spurious Emissions"، المحمولة على ترددات بينية، والتي تنجم عن بث أجهزة الإرسال والاستقبال في نظم الاتصال والبث المختلفة، مثل نظم الرادار أو الأنظمة الخلوية أو أجهزة البث الإذاعي والتلفزيوني.

يكتسب تأثير مجموع ما تبثه هذه الأجهزة من إشارات كهربائية صفة "الضجيج" بسبب توزع الطاقة الكهرومغناطيسية الناتجة عنها على جزء واسع جداً من الطيف الترددي، كما أن مقدار هذه الطاقة التي يلتقطها الهوائي في أي جهاز استقبال غير قابل للتحديد، كونه ينتج عن مصادر مختلفة جداً يتعذر إحصاؤها، وكونه يتبع في قيمته مكان الهوائي وزمن الاستقبال، لذا تكون هذه الطاقة المستقبلة عشوائية القيمة أو المقدار. وتُظهر بعض الدراسات أن هذا الضجيج يمكن أن يكون أعلى من مستوى الضجيج الحراري بمقدار 10dB عند ترددات نظام GSM-900، أو بمقدار 5dB عند الترددات الخاصة بنظام UMTS [١٦]، لذا يؤخذ تأثير هذا الضجيج بعين الاعتبار عن طريق إضافة هامشٍ مكافئٍ ومناسب لقوة الإشارة التي يجب توفرها عند مدخل المستقبل.

هذا ولن نفرق في ما يلي من فصول الكتاب بين الضجيج الحراري والضجيج الصنعي إلا صراحةً وعند اقتضاء الحاجة، وسنعتبر أن كلمة " الضجيج " تشمل كلتا الظاهرتين.

تجدر الإشارة أيضاً إلى وجود ضجيج ينشأ عن ظواهر طبيعية أخرى، غير أننا لن نتطرق إليها ضمن سياق هذا الفصل.

- الأداء غير المثالي لأجهزة الإرسال والاستقبال: لا تعمل المكونات المختلفة لأجهزة الإرسال والاستقبال بصفة مثالية، ويؤدي قصورها في الأداء إلى نشوء إشارات متعددة غير مرغوبة تساهم في زيادة آثار التشويش. أهم أنواع هذه الإشارات تلك التي تتجاوز من حيث عرض نطاقها الترددي المجال المخصص أو المرخص لعمل النظام، أو على الأقل القنوات الترددية التي من المفترض الالتزام بها. يؤدي ذلك إلى تسرب الطاقة إلى مجالات ترددية مجاورة، تكون مخصصة إما لقنواتٍ أخرى ضمن النظام، أو لأنظمة اتصالاتٍ مختلفة. فعلى سبيل المثال، ينشأ عن "دارات المزج" "Mixers" و"دارات التضخيم" "Amplifiers" في نظام GSM ترددات ثانوية وبينية مختلفة، قد تقع ضمن المجال المحدد لعمل نظام UMTS، وبالعكس. ويجري التقليل من هذه الآثار عبر الالتزام بالضوابط والمواصفات الصارمة التي تتضمنها التوصيات المعيارية. تشمل هذه الضوابط الخصائص الفنية لكل دارةٍ ضمن سلسلة الإرسال والإستقبال في أجهزة المحطات الثابتة والوحدات المتحركة، والتي يجب الالتزام بها من قبل الشركات المصنعة لتجهيزات الشبكة المختلفة. هذا ويمكن الرجوع على [٧]

للوقوف على أمثلة لهذه المواصفات في ما يخص نظام GSM، أو إلى [٨] للاطلاع على التفاصيل الخاصة بنظام UMTS، كما نحيل القارئ إلى [١٦] و [١٧] لشرح وافٍ عن هذا النوع من التداخل وآثاره المختلفة.

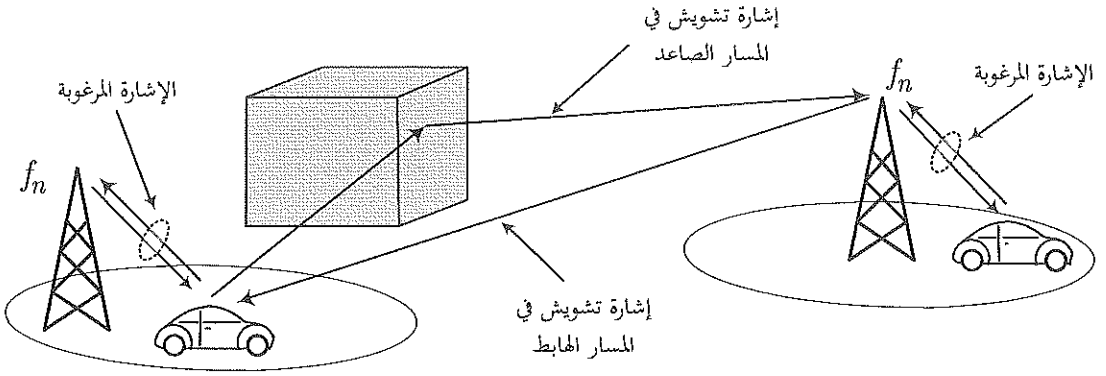
- "تداخل القناة المشتركة" "Co-channel Interference": سبق البيان بأن المفهوم الخلوي للشبكات يقتضي الاستخدام المتكرر للقنوات الترددية المتاحة، على أن تكون الخلايا التي تتشارك باستخدام القناة الترددية ذاتها متباعدة جغرافياً على نحوٍ كاف، بحيث يتوفر عزلٌ شبه كامل بين الإشارات المتشاركة بالحامل الترددي نفسه. بتعبيرٍ أخر، يجب في الحالة المثلى أن لا تلتقط أية وحدة متحركة ضمن خليةٍ ما سوى إشارة المحطة المغذية لهذه الخلية حصراً.

لا يتحقق العزل الكامل بين الإشارات الراديوية إلا في بيئة انتشارٍ مثالية، وعندما تكون المسافات بين المحطات الثابتة كبيرة جداً، وهذا بدوره يتطلب عدداً كبيراً من القنوات الترددية لتشغيل النظام أو الشبكة. من جانبٍ آخر، يفرض الواقع توفر عدد محدود جداً من الحوامل الترددية لكل مشغِّل، لا يُسمح له باستخدام سواها، وهذا يُحتِّم استخدام الترددات ذاتها ضمن مسافات متقاربة. إضافة إلى ذلك، تؤدي ظواهر انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية، كالإنكسار والإنتشار، إلى وصول أجزاء من الإشارات الراديوية إلى نقاط جغرافية من غير المقصود أو المُراد تغذيتها، وذلك عبر مساراتٍ متعددة لانتشار الأمواج لا يمكن تجنبها.

هذا يعني أن أية وحدة استقبال تتحرك ضمن المنطقة الجغرافية التي يفترض تغذيتها من قبل محطةٍ ما، تتلقى إشارات راديوية على نفس الحامل، تبثها محطات أخرى، ما يسبب تشويشاً على الإشارة المرغوبة. ويكون تلقي هذه الإشارات على نحوٍ لا يمكن تحديده تماماً أو التنبؤ به بدقة، لا من ناحية موقع استقبالها الجغرافي ضمن الخلية، ولا من ناحية القيمة اللحظية لهذه الإشارات.

يطلق على هذا النوع من التشويش اسم "تداخل القناة المشتركة"، نظراً لتشارك إشارة التداخل باستخدام الحامل الترددي ذاته الذي ينقل الإشارة المرغوبة ويحمل طاقتها. وهذا التشويش ينشأ في جهة المسار الهابط كما بيَّنا، كما يمكن أن ينشأ في جهة المسار الصاعد، وذلك حين تصل إشارة وحدةٍ متحركة على نحوٍ غير مرغوب إلى أكثر من محطة ثابتة، بحيث ينشأ في هذه الحالة تداخل عند المحطة الثابتة البعيدة، التي من المفترض أن تتلقى الإشارات الراديوية من الوحدات المتحركة الموجودة ضمن مجال تغطيتها حصراً، وهذا ما يوضحه الشكل ١-١٢ على نحوٍ مبسط. هذا ويعتبر تداخل القناة المشتركة أهم ما تهدف إجراءات تخطيط الشبكة إلى تجاوزه وتلافي آثاره.

- "تداخل القنوات المجاورة" "Adjacent Channel Interference": يحول الأداء غير المثالي لأجهزة الإرسال دون حصر الطاقة التي يتم بثها ضمن النطاق المخصص لكل قناة ترددية. كما تعجز المرشحات المستخدمة في أجهزة الشبكة المختلفة عن حجب كل تسرب محتملٍ للطاقة من قنوات ترددية مجاورة. يؤدي ذلك إلى تداخل في الإشارات الراديوية يعرف باسم "تداخل القنوات المجاورة"، ويُقصد بتعبير الجوار في هذا السياق المعنى الترددي حصراً وليس الجغرافي، فقد تكون القناة المجاورة المسبِّبة للتشويش مستخدمة ضمن نفس الخلية، إذا لم يكن التخطيط مثالياً، وقد تكون مستخدمة أيضا ضمن خلية بعيدة جغرافياً، لا تجاور الخلية المعرضة للتشويش على نحوٍ مباشر.



الشكل ١-١٢: من صور التشويش في المسارين الصاعد والهابط.

١-٧-٢ المعايير المستخدمة لتقييم التشويش

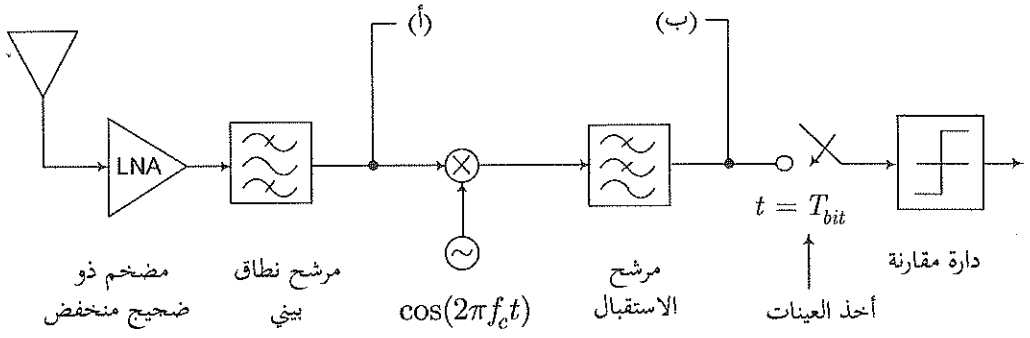
يستوجب التقييم المنهجي لآثار التشويش تعريف معايير مناسبة للدلالة على مقدار التأثير السلبي للإشارات غير المرغوبة على أداء أو كفاءة النظام، يمكن استخدامها -أي المعايير- ضمن المواصفات الفنية لتحديد ما يجب على مُصنِّعي الأجهزة المستخدمة في بنية الشبكة ومشغلي الشبكات الالتزام به من ناحية مقدار التشويش المسموح به، حتى تحقق خدمات الشبكة متطلبات الجودة الضرورية.

من المعروف أن كل أنظمة الاستقبال الراديوية الرقمية تتشارك في مبدأ عملها من ناحية وجود دارة لأخذ عينات الإشارة الرقمية المستخلصة دورياً ("دارة اعتيان" "Sampling Circuit")، تتبعها "دارة مقارنة أو ترجيح" "Decision Device" لتحديد ما إذا كانت العينة المأخوذة تمثل قيمة "1" أو "0" (انظر الشكل ١-١٣). وتتعلق قدرة النظام أو المستقبل على الاختيار الصحيح لقيمة العينة بمقدار التشويش المصاحب للإشارة عند مدخل دارة المقارنة (أي عند النقطة (ب) في الشكل ١-١٣)، فإذا كانت نسبة التشويش مرتفعة، تكون الإشارة مبهمة وغير واضحة، ما يرفع من احتمال اختيار قيمة غير صحيحة للعينة، ومن ثم رفع "معدل خطأ البت" "Bit Error Rate (BER)". يجب التأكيد في هذا السياق على أن الاختيار الصحيح لقيمة العينة لا يتعلق بالقيم المطلقة للإشارة المرغوبة ولإشارة التشويش، وإنما بالعلاقة النسبية التي تربط بينهما، إذ تمثل هذه العلاقة العامل الأساسي في اتخاذ القرار الصحيح. لذا، تُستخدم "نسبة الإشارة إلى التشويش" "Signal to Noise and Interference Ratio (*SNIR*)" كمقياسٍ أو معيارٍ لجودة الإشارة التي يرصدها المستقبل عند إنجاز عملية تحديد قيمة البت.

يُعرّف هذا المعيار، أي *SNIR*، بأنه نسبة متوسط استطاعة الإشارة المرغوبة P_s ، إلى مجموع متوسطات كل إشارات التشويش، أي متوسط إستطاعة الضجيج P_N ، مزيداً عليها متوسطات إستطاعة إشارات التداخل P_{I_n} :

$$SNIR = \frac{P_s}{P_N + \sum_n P_{I_n}} \qquad (١-٥)$$

ويتطلب الاختيار الصحيح لقيمة الإشارة أن تكون قيمة هذه النسبة مرتفعة بدرجة كافية، وفي حال لم يتحقق ذلك، أو كانت هذه النسبة أصغر من عتبةٍ دنيا محددة $SNIR_{min}$، فإن نتيجة اختيار قيمة العينة تكون خاطئة، ما يؤدي إلى زيادة في معدل خطأ البت. لذا تتحدد كفاءة المستقبل بمقدار هذه العتبة.



الشكل ١-١٣: بنية نموذجية مبسطة جداً للمستقبل.

هذا وتُستخدم صيغ معدَّلة أو مشابهة لهذه النسبة، وذلك للتنويه إلى نوعية التشويش المعني بالاهتمام أو الدراسة، حيث تُعنى قيمة "نسبة الإشارة إلى الضجيج" "Signal to Noise Ratio (*SNR*)" بتأثير الضجيج حصراً، بينما تُهمل "نسبة الإشارة إلى التداخل" "Signal to Interference Ratio (*SIR*)" تأثير الضجيج حين تكون قيمته ضئيلة، فتدل فقط على تأثير إشارات التداخل.

$$SNR = \frac{P_s}{P_N} \quad ; \quad SIR = \frac{P_s}{\sum_n P_{I_n}} \qquad (١-٦)$$

يُستخدم معيار *SNIR* في أغلب الأحيان للدلالة على نسبة الإشارة إلى التشويش عند النقطة (ب) في الشكل ١-١٣، أي لتقييم جودة الاشارة ضمن "النطاق الترددي الأساسي" "Baseband"، فإذا دعت الحاجة إلى الدلالة على جودة الإشارة المستقبلة ضمن "نطاق الترددات الراديوية" "Radio Frequency Band (RF-Band)"، أي تلك التي يرصدها المستقبل عند النقطة (أ) في الشكل ١-١٣، فإن المعيار الذي يُستخدم لتقييم جودة الاشارة هو "نسبة إشارة الحامل إلى التشويش" "Carrier to Noise and Interference Ratio (*CNIR*)"، حيث يشير تعبير الحامل في هذا السياق إلى متوسط استطاعة اشارة القناة الراديوية الحاملة للمعلومات. بذلك يدل معيار *CNIR* على نسبة متوسط استطاعة الإشارة المرغوبة إلى مجموع متوسطات الاستطاعة لإشارات التشويش، مقيسةً كلها ضمن النطاق الراديوي.

$$CNIR = \frac{P_s}{P_N + \sum_n P_{I_n}} \qquad (٧-١)$$

هذا وبجدر التنويه هنا إلى أن التشويش في العلاقة (١-٧) يشمل كل أنواع الإشارة التي تؤثر سلباً على جودة الاستقبال، بما فيها إشارة الحامل نفسه، إذا استُقبلت عبر مسارات متعددة. كما ننوه أيضاً إلى أن المصادر الانكليزية تستخدم تعبير "Interference" للدلالة على كلٍ من التداخل أو الضجيج، لذا يشار عادة إلى المعنى المقصود ضمن سياق النص.

على غرار ما تبينه العلاقة (١-٦)، هناك صيغ مشتقة لـ $CNIR$، تبرز نوع التشويش المقصود بالتحليل، ما يقود إلى:

$$CNR = \frac{P_s}{P_N} \quad ; \quad CIR = \frac{P_s}{\sum_n P_{I_n}} \qquad (٨-١)$$

لابد من التنويه أيضاً إلى أن قيمة $SNIR$ تعتمد على حساب الاستطاعة الوسطية للإشارة المستخلصة التي ترصدها دارة المقارنة أو الترجيح، دون تمييزٍ لمعدل دفق البيانات أو سرعتها، أي دون إعطاء دلالاتٍ حول كفاءة نظام التعديل الرقمي المستخدم. غير أن هذه الدلالات ضرورية، لأن نظم التعديل تتفاوت من ناحية المجال الترددي الذي يشغله نظام الإرسال، ومن ناحية الطاقة الضرورية لبث الإشارة المعدلة. لذا، يستخدم مهندسو الاتصالات معياراً إضافياً لتقييم أداء نظم الاستقبال، يتيح الربط بين استطاعة الاشارة المستقبلة والموارد الفيزيائية التي يتطلبها نقلها بمستوىً معين من الجودة، أي بالطاقة الضرورية لنقل الإشارة، وبالنطاق الترددي الذي تشغله الإشارة عند الإرسال، كما يوفر طريقة فعالة للمقارنة بين أساليب أو طرق التعديل المختلفة. هذا المعيار هو نسبة "الطاقة اللازمة لنقل بت من المعلومات" إلى "الكثافة الطيفية لاستطاعة الضجيج"، والذي يرمز له بـ E_b/N_0.

لبيان العلاقة بين هذا المعيار ونسبة الاشارة إلى الضجيج، ننطلق من المعنى الفيزيائي للرمز P_s في العلاقتين (١-٥) و (١-٧)، وهو متوسط استطاعة الاشارة، أي الطاقة التي تحملها الإشارة المستقبلة خلال وحدة الزمن. هذا يعني أن مقدار الطاقة المستقبلة لكل بت، والذي نرمز له بـ E_b، يكافئ الطاقة خلال وحدة الزمن مقسومة على معدل نقل البت في الثانية، أي:

$$E_b = \frac{P_s}{R_{bit}} \qquad (٩-١)$$

لنفترض أيضاً أن التشويش يتمثل في ضجيجٍ يحقق صفات الضجيج الأبيض، هذا يعني أن قيمة الكثافة الطيفية للاستطاعة ثابتة ضمن كل المجال الترددي المتأثر، والذي يعادل في هذه الحالة عرض القناة B_c الضرورية لنقل المعلومات، لذا تكون استطاعة التشويش P_N ممثلة بالعلاقة:

$$P_N = N_0 B_c \qquad (١٠-١)$$

نجد من العلاقتين السابقتين أنَّ:

$$\frac{P_s}{P_N} = \frac{E_b}{N_0}\frac{R_{bit}}{B_c} \qquad (١١-١)$$

يمثل الحد E_b/N_0 الطاقة الضرورية لنقل بت واحد، ضمن نطاق طيفي مقداره 1Hz. ويتميز بأنه يتيح المقارنة بين كفاءة نظم التعديل الرقمي المختلفة، أخذاً بعين الاعتبار معدل نقل البت، والطاقة التي يستهلكها كلٌ من نظم التعديل، والنطاق الترددي الذي يتطلبه نظام الارسال. وتجري المقارنة عادة بتحديد قيمة معينة مطلوبة لنسبة الخطأ BER، ومقارنة ما تتطلبه نظم التعديل المختلفة للحفاظ على معدل الخطأ المطلوب (انظر [١٨] للمزيد عن تفاصيل طرق التعديل الرقمية).

١-٧-٣ حساسية المستقبل

تعتبر "حساسية المستقبل" "Receiver Sensitivity" من أهم مؤشرات تقييم أداء أجهزة الاستقبال، فهي تصف قدرة المستقبل على استخلاص المعلومات من الإشارة المستقبَلة على نحوٍ فعَّالٍ رغم وجود عوامل تشويش مختلفة، ينشأ البعض منها في دارات جهاز الاستقبال نفسه.

هناك أكثر من تعريفٍ لحساسية المستقبل، يصبُّ جميعها في معانٍ متقاربة، لذا نختار من هذه التعريفات ما يناسب المواضيع المطروحة لاحقاً، وما يعزِّزُ المعاني الهندسية الأساسية التي نريد الإشارة إليها ضمن الفصول التالية. هذا التعريف يمكن صياغته على النحو التالي:

"حساسية المستقبل هي الحد الأدنى لمتوسط استطاعة الإشارة المستقبلة، الذي يمكن لجهاز الاستقبال أن ينطلق منه في خطوات معالجة الإشارة التقليدية، بحيث تتوفر عند مدخل دارة المقارنة (كاشف الإشارة) قيمة كافية للإشارة مقارنةً بالضجيج، تكفي لاستخلاص المعلومات مع قدرٍ مقبول من الخطأ".

لتوضيح هذا المفهوم نستعين انظر بالشكل ١-١٤ الذي يمثل المستقبل وظيفياً على نحوٍ مبسط جداً، يقتصر على كونه يضخم الاشارات التي يرصدها الهوائي، ويولد ضجيجاً إضافياً ضمن داراته. يشير هذا الشكل إلى ارتباط إشارات المدخل والمخرج في جهاز الاستقبال كما يلي:

٣) إذا كان مقدار استطاعة الإشارة عند المدخل هو P_{in}، فإن مقدار الإشارة عند المخرج هو $P_{out} = GP_{in}$، حيث يمثل العامل G "ربح المستقبل" "Receiver Gain".

٤) إذا كان مقدار الكثافة الطيفية للضجيج عند مدخل المستقبل هو N_{in}، فإن الضجيج عند مخرج المستقبل يتكون من جزئين: يمثل الأول ضجيج المدخل بعد تضخيمه، حيث لا تفرق دارات التضخيم بين إشارة المعلومات وإشارة الضجيج، أما الثاني فهو الضجيج المتولد ضمن دارات المستقبل N_{add}، والذي يؤدي إلى تردٍّ في نسبة الإشارة إلى الضجيج عند المخرج، مقارنة بقيمتها عند المدخل.

٥) ترتبط نسبتا الإشارة إلى الضجيج عند المدخل والمخرج ببعضهما عن طريق معامل الضجيج F كما يلي [١٩]:

$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \qquad (١٢-١)$$

كذلك يرتبط الضجيج عند المخرج بنظيره عند المدخل عن طريق العلاقة [١٩]:

$$N_{out} = GN_{in} + N_{add} = FGN_{in} \qquad (١٣-١)$$

وباعتبار أن N_{in} يمثل ضجيجاً حرارياً يُعطى بالعلاقة:

$$N_{in} = k_B T B_c \qquad (١٤-١)$$

فإننا نحصل على:

$$N_{out} = FGk_B T B_c \qquad (١٥-١)$$

مما سبق يمكن حساب نسبة الإشارة إلى الضجيج عند مخرج المستقبل كما يلي:

$$SNR_{out} = \frac{P_{out}}{N_{out}} = \frac{GP_{in}}{FGk_B T B_c} = \frac{P_{in}}{Fk_B T B_c} \qquad (١٦-١)$$

٦) تمثل هذه القيمة مقدار SNR_{out} كما يُرصد أو يُقاس عند مدخل دارة المقارنة (أي بعد فك التعديل). فإذا كان تحديد الإشارة يتطلب قيمةً دنيا لهذا المقدار، ندلُّ عليها بـ SNR_{min}، من أجل الإلتزام بسقفٍ أو عتبةٍ مُعرَّفة من معدل خطأ البت BER، فإن ذلك يتطلب تحقق العلاقة:

$$SNR_{out} = \frac{P_{in}}{Fk_B T B_c} \geq SNR_{min} \Leftrightarrow P_{in} \geq Fk_B T B_c SNR_{min} \qquad (١٧-١)$$

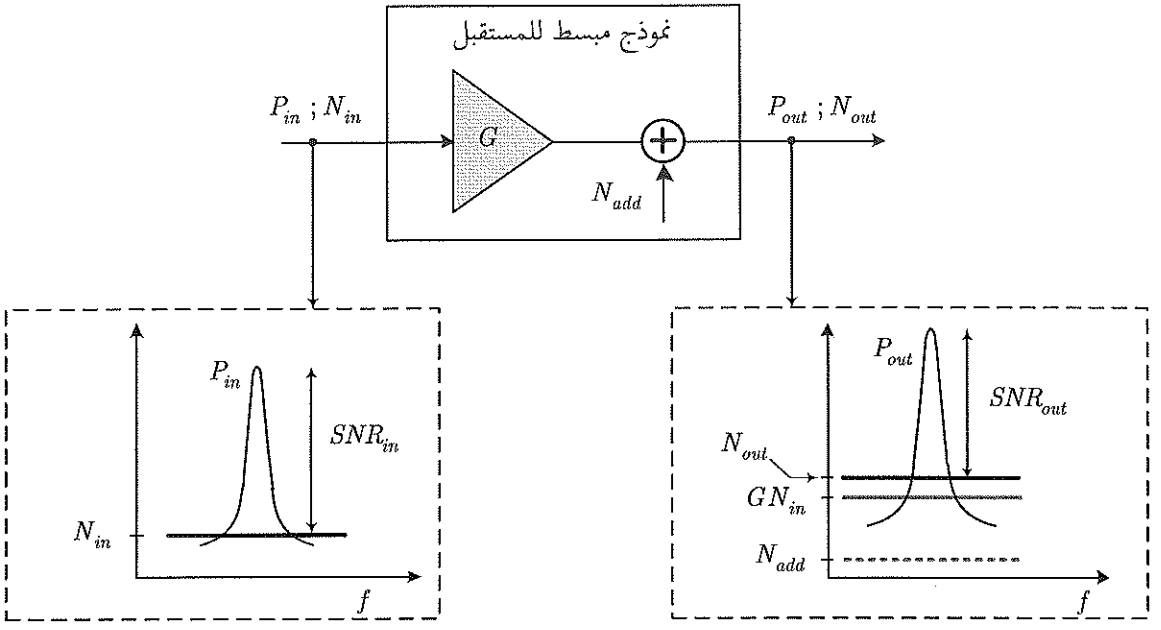
نقرأ من هذه العلاقة أدنى مقدارٍ للإشارة المطلوب توفرها عند مدخل المستقبل لتحقيق أداءٍ يفي بشروط الجودة المطلوبة،

لذا يمكن القول بأن هذه القيمة الدنيا تمثل "حساسية المستقبل" وتُعطى بالعلاقة:

$$P_{sens} = Fk_BTB_cSNR_{min} \tag{١-١٨}$$

وبالتحول إلى القيم اللوغاريتيمة نحصل على:

$$\begin{aligned} P_{sens}|_{dBm} &= F|_{dB} + 10\log_{10}(k_BT) + B_c|_{dB} + SNR_{min}|_{dB} \\ &= -174\text{dBm} + F|_{dB} + B_c|_{dB} + SNR_{min}|_{dB} \end{aligned} \tag{١-١٩}$$



الشكل ١-١٤: تفاصيل الإشارة عند مدخل ومخرج المستقبل.

تؤكد العلاقة السابقة على أن حساسية المستقبل لا يشار إليها كقيمة ثابتة، فهي متغيرة بسبب كون SNR_{min} تتبع معدل دفق البتات ونوعية نظام التعديل الرقمي، لذا تزداد حساسية المستقبل المطلوبة –أو تنقص– تبعاً لطبيعة التطبيقات المستخدمة، وهذا ما يبرر سرد التوصيات والمواصفات المعيارية لأكثر من قيمةٍ لهذا المعيار. تجدر الإشارة أيضاً إلى أن القيمة المعطاة بالعلاقة (١-١٩) تُسمّى في بعض المصادر "قيمة الإشارة الصغرى القابلة للتمييز" "Minimum Detectable Signal (MDS)"، غير أن هذا التعبير يطلق أيضاً على قيمة الإشارة التي يجب توفرها عند مدخل المستقبل حتى يكون كل من الإشارة والضجيج متساويين عند المخرج ($SNR_{out} = 1$)، بمعنىً آخر، يمثل ذلك أضعف إشارة يمكن التقاطها بحيث لا تُغَيَّب ضمن الضجيج، وتبقى قابلة للتمييز عند مخرج المستقبل. لذلك نلتزم في ما يلي التعريف الذي تقدم ذكره.

١-٨ مراجع مختارة

[١] E.Wedlund and H. Schulzrinne, "Mobility support using SIP", Second ACM/IEEE Intl. Conference on Wireless and Mobile Multimedia, Seattle, 1999.

[٢] E.Wedlund and H. Schulzrinne, "Application-Layer Mobility Using SIP", Mobile Computing and Communications Review, Volume 1, Number 2, 2000.

[٣] A. Kumar, "Evolution of Mobile Wireless Communication Networks: 1G to 4G", Intl. Journal of Electronics & Communication Technology (IJECT) Vol. 1, Issue 1, December 2010.

[٤] Nokia Networks, "A history of third generation mobile", Nokia, 2003.

[٥] M. Schwarz, "History of communications", IEEE Communications Magazine, September 2010.

[٦] T. Farley, "Mobile telephone history", Telektronikk 3/4, 2005.

[٧] 3GPP Specifications TS 45.005, "Radio Transmission and Reception".

[٨] 3GPP Specifications TS 25.101, "UE radio transmission and reception (FDD)".

[٩] ITU-D Study Group 2, "Guidelines on the smooth transition of existing mobile networks to IMT-2000 for developing countries (GST); Report on question 18/2", ITU, 2006.

[١٠] B. Walke, "UMTS The fundamentals", John Wiley, 2003.

[١١] http://www.3gpp.org/releases

[١٢] http://www.3gpp2.org

[١٣] H. Holma and A. Toskala, "WCDMA for UMTS–HSPA Evolution and LTE", John Wiley & Sons, 2007.

[١٤] S. Sesia et.al., "LTE – The UMTS Long Term Evolution", John Wiley & Sons, 2009.

[١٥] F. Khan, "LTE for 4G Mobile Broadband", Cambridge University Press, 2009.

[١٦] A. F. Molisch,"Wireless Communications", John Wiley & Sons, 2011.

[١٧] J. Laiho, "Radio Network Planning and Optimisation for UMTS", John Wiley & Sons, 2006.

[١٨] F. Xiong,"Digital Modulation Techniques", Artech House, 2000.

[١٩] D. Pozar,"Microwave and RF Design of Wireless Systems", John Wiley & Sons, 2001.

[٢٠] وليام لي، أسس الاتصالات اللاسلكية، ترجمة محمد موفق العوا، المركز العربي للتعريب والترجمة، دمشق، ٢٠٠٢.

٢

تقنيات النفاذ المتعدد

يتطلب تشاركُ مشتركي شبكةٍ ما بالخدمات المتاحة لهم نفاذَ عددٍ كبيرٍ ومتغيرٍ منهم إلى موارد الشبكة على نحوٍ آنيٍّ ومتزامن. يقتضي هذا النفاذ الآني توفر آليات مناسبة لتنسيق ولوج المشتركين إلى الشبكة، والأولويات التي يخضعون لها، بحيث يتم تزويد أكبر عدد ممكن منهم بالخدمات، مع شَغْل أقل ما يمكن من موارد ومقدرات الشبكة.

يعرَّفُ مجمل هذه الآليات بـ "طرق أو تقنيات النفاذ المتعدد" "Multiple Access Methods"، وتتباين هذه الآليات بدرجة أساسية من حيث المورد الفيزيائي (التردد، الزمن، الطاقة) الذي يتشاركه المشتركون، كما تتباين من حيث مواءمتها وتكيفها مع الخدمات التي تقدمها الشبكة، ومن ثم من حيث كفاءتها وفعاليتها من الناحيتين التقنية والاقتصادية.
نعرض في ما يلي لأهم هذه التقنيات، مع بيان ما تتطلبه من تدابير هندسية، تضمن أداءً فعالاً للنظم التي تعتمدها. وسنقتصر في نقاشنا على التقنيات المستخدمة ضمن أنظمة GSM و UMTS، كون هذه النظم هي الأوسع انتشاراً واستخداماً.

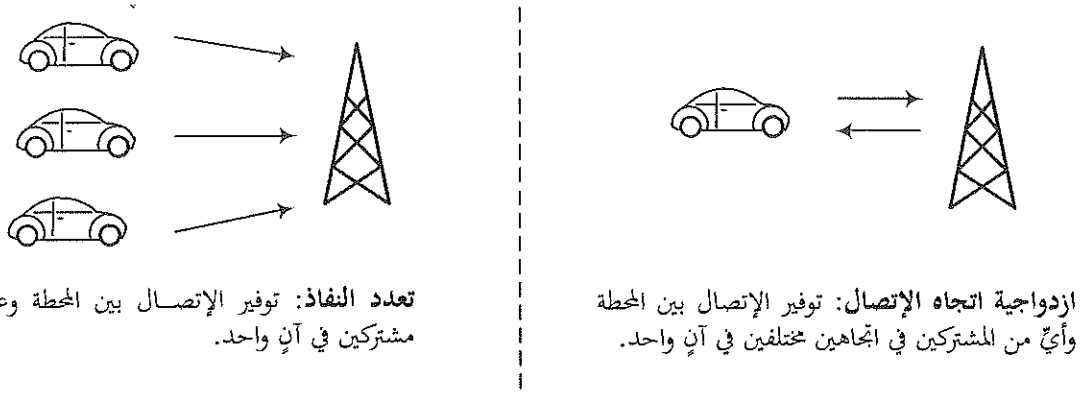
هذا ولابد قبل التطرق إلى تفاصيل التقنيات المختلفة من تبيان الفرق بين طرق النفاذ المتعدد من جهة، و"طرق توفير الاتصال مزدوج الإتجاه" "Duplexing Methods" من جهة أخرى. فكما يوضح الشكل ٢-١، يُقصد بتقنية الإتصال مزدوج الاتجاه المبدأ المعتمد لتنسيق تبادل المعلومات بين طرفي اتصال محدَّدَيْن، بحيث تتوفر إمكانية الإرسال والاستقبال في آن واحد، وهذا يختلف عن الهدف من النفاذ المتعدد، الذي يُعنى بإنجاز الاتصال بين طرف اتصالٍ مشتركٍ ، وعدة أطراف أخرى في آن واحد.

هناك من حيث المبدأ طريقتان أساسيتان لتحقيق ازدواجية اتجاه الاتصال[١] (انظرالشكل ٢-٢):

١) الأولى هي "ازدواج اتجاه الاتصال بتقسيم التردد" "Frequency Division Duplex (FDD)"، حيث تتميز جهتا الإتصال بنطاقٍ أو مجالٍ ترددي منفصل لكل منهما. تُستخدم هذه الطريقة ضمن الأغلبية الساحقة من نظم الإتصالات، لذلك

[١] سنستخدم تعبير "تقسيم" عند الحديث عن ازدواجية الاتجاه و"اقتسام" عند شرح طرق تعدد النفاذ، وذلك لكون الأخيرة تعتمد تشاركاً أو تقاسماً للموارد بين المشتركين.

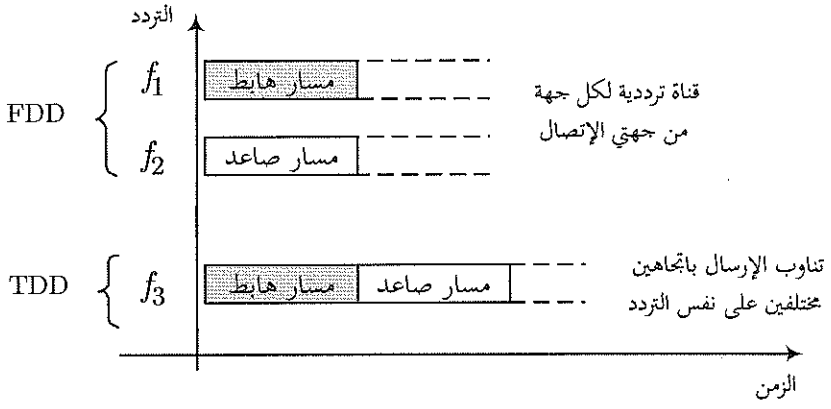
يجري منح أية شركة مشغلة لشبكة خلوية نطاقين ترددين متباعدين، يُخصص الأول منهما للمسار الصاعد ويسمى "النطاق الترددي للمسار الصاعد" "Uplink Band"، ويشمل القنوات الترددية التي تستخدمها الوحدات المتنقلة للإرسال، وهذه القنوات هي نفسها التي يجري استخدامها للاستقبال من طرف المحطات الثابتة. أما النطاق الثاني، فهو "النطاق الترددي للمسار الهابط" "Downlink Band"، ويُستخدم للإرسال من قبل المحطات الثابتة، وللاستقبال من طرف الوحدات المتحركة. ونظراً لكون "التخميد" "Attenuation" الذي يعتري الأمواج الكهرومغناطيسية يزداد مع ارتفاع التردد، يُختار النطاق الترددي الأعلى للمسار الهابط، وذلك لتوفر إمكانية تجاوز التخميد عن طريق زيادة طاقة البث في المحطات الثابتة، بينما يمكن أن يشكل ذلك عبئاً كبيراً على الطاقة المتاحة للوحدات المتحركة.



ازدواجية اتجاه الإتصال: توفير الإتصال بين المحطة وأيٍّ من المشتركين في اتجاهين مختلفين في آنٍ واحد.

تعدد النفاذ: توفير الإتصال بين المحطة وعدة مشتركين في آنٍ واحد.

الشكل ٢-١: الفرق بين ازدواجية اتجاه الاتصال والنفاذ المتعدد.



الشكل ٢-٢: طرق تحقيق إزدواجية اتجاه الاتصال.

٢) تدعى الطريقة الثانية "ازدواج اتجاه الاتصال بتقسيم الزمن" "Time Division Duplex (TDD)"، وتختلف عن الأولى بكونها تعتمد على المجال الزمني للفصل بين جهتي الاتصال، حيث يتم استخدام القناة الترددية نفسها كحاملٍ للمعلومات

في كلا الاتجاهين، مع التنقل المتتابع زمنياً بين حال الإرسال والاستقبال من قِبَل كلٍّ من طرفي الإتصال. لذا يتم تخصيص حيزٍ زمنيٍّ معين لإرسال الإشارة من المحطة الثابتة إلى الوحدة المتحركة (المسار الهابط)، تكون خلاله المحطة الثابتة مُرسِلاً للمعلومات والوحدة المتحركة مُستقبِلاً لها، يتبع ذلك حيزٌ زمنيٌّ آخر تكون فيه المحطة الثابتة مستقبلاً للإشارة والوحدة المتحركة مرسلاً لها (المسار الصاعد)، وهذا ما يوضحه الشكل ٢-٢.

هذا ويجري التبديل أو الانتقال بين حال الإرسال وحال الاستقبال بسرعة كبيرة، بحيث تبدو عملية الإرسال والاستقبال وكأنها آنية، بينما هي في الحقيقة شبه آنية، إذ أن كل طرف من طرفي الاتصال يكون عند لحظةٍ معنية إما مرسلاً أو مستقبلاً.

بعد بيان طرق توفير الإتصال المزدوج ننتقل إلى شرح أهم تقنيات النفاذ المتعدد المستخدمة في مجالات الإتصالات الخلوية.

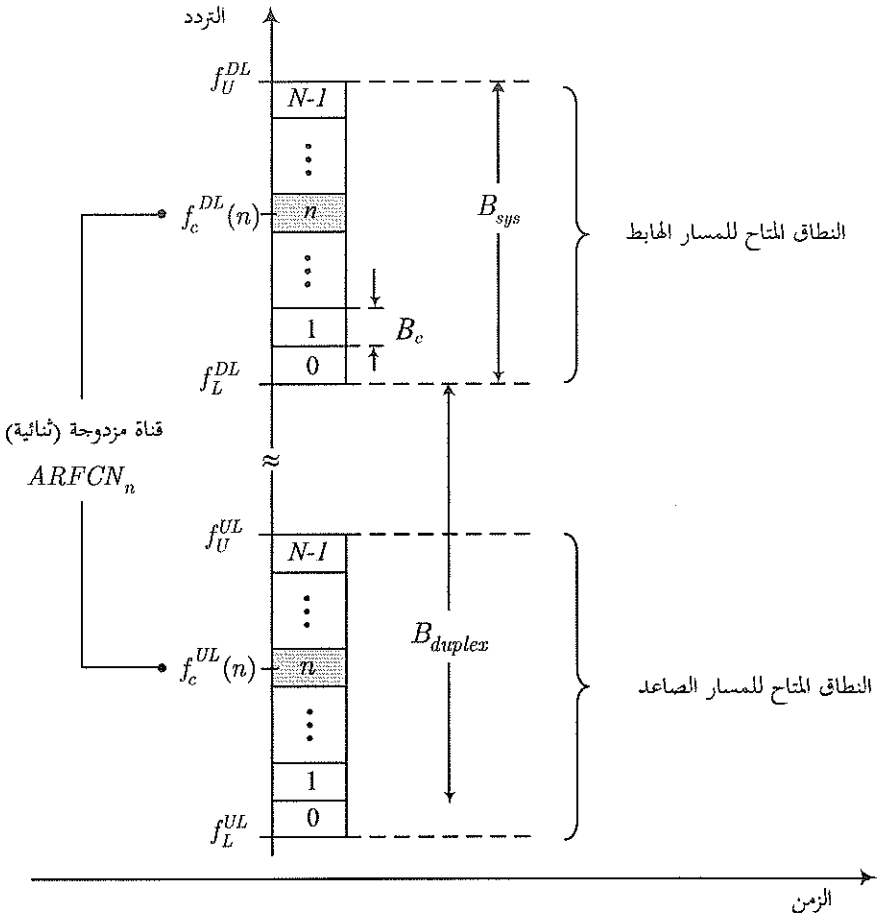
٢-١ النفاذ المتعدد باقتسام التردد

تعتبر هذه الطريقة المسماة "Frequency Division Multiple Access (FDMA)" الأبسط بين طرق النفاذ المتعدد، إذ توفر لعدة مشتركين الاتصال الآني بالمحطة الثابتة عن طريق تقسيم النطاق الترددي المتاح للنظام إلى عدة قنوات، يشغل كلاً منها مشتركٌ مختلف (انظر الشكل ٢-٣). بذلك يتباين المشتركون الذين يستخدمون موارد الشبكة في نفس الوقت عن طريق الحامل المركزي الذي يشغله كل منهم.

يمكن إيجاز السمات الأساسية لهذا المبدأ كما يلي:

- يختلف عرض القناة الواحدة ضمن أيٍّ من النظم حسب الخدمات التي يوفرها النظام، لذا نجد أن عرض هذه القناة في الأنظمة الخلوية من الجيل الأول، والتي كانت مصممة لتوفير خدمات الاتصال الصوتي حصراً، لم يكن يتجاوز 30 kHz، بينما اعتمدت أنظمة الجيل الثاني قنواتٍ ذات نطاقٍ أعرض، وذلك من أجل تقديم خدمات إضافية كنقل البيانات والمعطيات. فعلى سبيل المثال، يستخدم نظام GSM قناةً عرضها 200 kHz، أي ما يقارب سبعة أضعاف عرض القناة التي كانت معتمدة للجيل الأول. أما أنظمة الجيل الثالث، والتي صممت لتوفير تطبيقات متقدمة، ذات معدل عال لنقل المعطيات، فتوفر قناةً عرضها 5 MHz للحامل الواحد، كما تتجه أنظمة الجيل الرابع لتوفير قناة راديوية يمكن أن يصل عرضها إلى 20 MHz، ما سيتيح توفر خدماتٍ متعددة الوسائط ودفقاً للمعطيات يفوق ما تتيحه أنظمة الجيل الثالث أضعافاً كثيرة.
- تُستخدم تقنية FDMA عادة بالترافق مع تقنية FDD لتوفير الاتصالات مزدوجة الاتجاه، حيث يُتاح لكل مشترك قناتان متناظرتان، واحدة لإرسال المعلومات ضمن نطاق المسار الصاعد، وأخرى لاستقبال إشارات المحطة الثابتة ضمن نطاق المسار الهابط، لذا يطلق على هاتين القناتين مجتمعتين اسم "قناة ثنائية أو مزدوجة" "Paired Channel".
- تكون قيمة الفاصل الترددي B_{duplex} بين النطاق المخصص للمسار الصاعد والآخر المخصص للمسار الهابط موحدة

للنظام كله، أي متساوية لكل القنوات المزدوجة (انظر الشكل ٢-٣)، فهي 45 MHz في نظام GSM، و 190 MHz في نظام UMTS، ما يعني أن عملية الاستقبال والإرسال في المحطة أو الوحدة المتحركة تُنجزان على قناتين منفصلتين، تتباعدان بمقدار الفاصل الذي ذكرناه.



الشكل ٢-٣: مبدأ النفاذ المتعدد باقتسام التردد.

- تُخصِّصُ المواصفات المعيارية جُزءاً من النطاق الكلي المتاح للنظام كمجالٍ فاصلٍ عن ترددات أنظمة اتصالاتٍ أخرى، تَستخدم مجالات ترددية مجاورة. يُعرف هذا النطاق باسم "نطاق الحماية أو العزل" "Guard Band"، ويُحظر استخدامه من قبل أي مشترك . فإذا دللنا على هذا النطاق بـ B_g ، وعلى عرض النطاق الكلي المتاح للنظام بـ B_{sys} ، وعلى عرض القناة الترددية الواحدة بـ B_c ، فإن عدد القنوات N المتاحة للإستخدام بشكل آني يكون:

$$N = \frac{B_{sys} - B_g}{B_c} \qquad (١-٢)$$

فعلى سبيل المثال يشغّل نظام GSM الأساسي نطاقاً عرضه 25 MHz لكلٍّ من المسارين، وبما أن عرض القناة الواحدة هو 200 kHz، فإن النظام يوفر 125 -حاملاً أو قناة ترددية، تُحجز القناة الأولى منها كمجال حماية وعزل عن الأنظمة المجاورة، ما يعني أن عدد القنوات المتوفرة للإستخدام بشكل آني هو $N = 124$.

يعرض الجدول ٢-١ الخصائص التي تقدم ذكرها لبعض الأنظمة المختارة، وذلك من باب التوضيح.

اسم النظام	المجال الترددي المخصص B_{sys}	الفاصل الترددي B_{duplex}	عرض القناة الترددية B_c
P-GSM 900	مسار صاعد: 890-915 MHz مسار هابط: 935-960 MHz	45 MHz	200 kHz
GSM-1800	مسار صاعد: 1710-1785 MHz مسار هابط: 1805-1880 MHz	95 MHz	200 kHz
GSM-1900	مسار صاعد: 1850-1910 MHz مسار هابط: 1930-1990 MHz	80 MHz	200 kHz
UMTS	مسار صاعد: 1920-1980 MHz مسار هابط: 2110-2170 MHz	90 MHz	5 MHz

الجدول ٢-١: خصائص المجال الترددي لبعض الأنظمة المختارة.

- لتسهيل عملية ترقيم القنوات الترددية وتعريف كل منها على نحوٍ لا يقبل اللَّبْس، تنفرد كل قناة مزدوجة برقم محدد يسمى "الرقم الأساسي أو المرجعي للقناة الترددية" "Absolute Radio Frequency Channel Number (ARFCN)"، ويتيح تمييز أية قناة ترددية عن غيرها بطريقة متعارف عليها عالمياً، مما يسهِّل عملية تنسيق استخدام الترددات بين الدول في المناطق الحدودية، وكذلك تعيين الترددات الممكن استخدامها من قِبَل مشغلٍ ما في حال وجود أكثر من شبكة ضمن البلد الواحد.

انطلاقاً من قيمة الرقم المرجعي للقناة المستخدَمة يمكن حساب تردد الحامل الراديوي في نظام GSM وفق العلاقة:

$$\begin{aligned} f_c^{UL}(n) &= f_{start}^{UL} + (ARFCN_n - offset) * 0.2\,\text{MHz} \\ f_c^{DL}(n) &= f_c^{UL} + B_{duplex} \end{aligned} \qquad (٢-٢)$$

حيث يدل f_{start}^{UL} على بداية النطاق الترددي للمسار الصاعد، كما يمثل $offset$ رقماً يشير إلى إزاحة اصطلاحية

تحددها المواصفات المعيارية لكل نظام. لتوضيح ذلك، يقدم الجدول ٢-٢ قيم "الموسطات أو المعاملات"[١] "Parameters" المذكورة، كما تستخدم في أهم النظم التي تعتمد تقنية GSM [١]، كما يمكن الرجوع إلى [٢] للوقوف على العلاقات المماثلة الخاصة بنُظم UMTS.

اسم النظام	$ARFCN$	f^{UL}_{start}	$offset$	B_{duplex}
P-GSM 900	$1 \leq n \leq 124$	890.2 MHz	0	45 MHz
E-GSM-900	$0 \leq n \leq 124$	890.0 MHz	0	45 MHZ
	$975 \leq n \leq 1023$	880.2 MHz	1024	
DCS-1800	$512 \leq n \leq 885$	1710.2 MHz	512	95 MHz
GSM-1900	$512 \leq n \leq 810$	1850.2 MHz	512	80 MHz

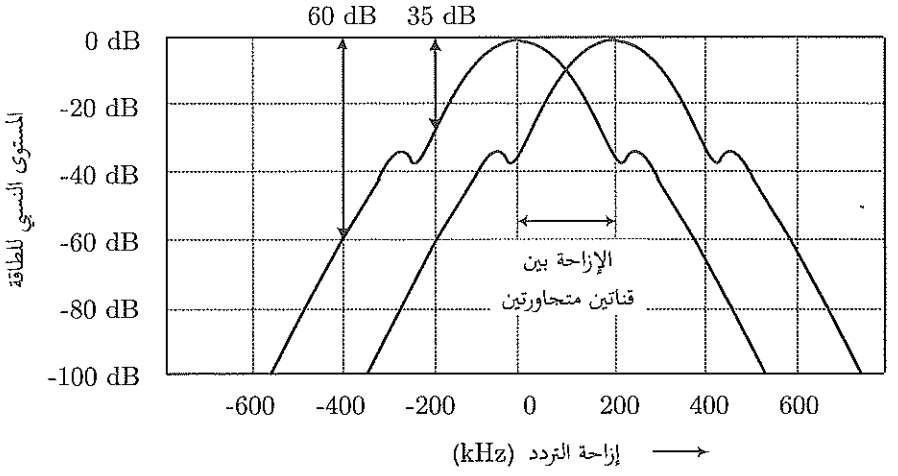
الجدول ٢-٢: أمثلة للموسطات المستخدمة لحساب الحامل الترددي في نُظم GSM.

- لا يمكن للمستقبِل أن يستخلص الإشارة المحمولة على أي حامل راديوي بدرجة مرضية من الفعالية إلا إذا كان العزل بين القنوات الترددية مثالياً تقريباً، بحيث يكون التداخل بين الإشارات الراديوية منخفضاً، ولا يتحقق ذلك لعدة أسباب:
  - الأول هو كون أجهزة الإرسال غير مثالية، ما يجعل طيف الإشارة المعدلة التي تصل للمستقبل أعرض من المجال المتاح أو المخصص لكل قناة B_c. فإذا افترضنا أنّ مشتركاً ما يستخدم الحامل $f_c(n)$، وأن مشتركاً آخر يستخدم الحامل المجاور $f_c(n+1)$، فإن الطيف الترددي لإشارة كلٍّ منهما -بعد إجراء "التعديل أو التضمين" "Modulation"- يكون في الواقع أعرض من B_c، وهذا يؤدي إلى تداخل الإشارتين عند المستقبل. يعطي الشكل ٢-٤ مثالاً على ذلك، حيث يبين طيف الإشارة المعدلة في نظام GSM، ويوضح أن طاقة الإشارة تنخفض بمقدار 35 dB فقط عند التردد الذي يوافق مركز القناة المجاورة الأولى، والذي يوافق إزاحة مقدارها 200 kHz عن التردد المركزي. هذا يعني أن كل القدر الباقي من الطاقة، والذي يمتد حتى إزاحة مقدارها 800 kHz، يمكن أن يساهم في التشويش على القنوات المتجاورة.
  - تؤدي الخصائص الفيزيائية لقناة الإنتشار، مثل الخفوت والنثر الطيفي[٢]، إلى زيادة إضافية في عرض النطاق الترددي للإشارة المرسلة.

[١] اعتمد مجمع اللغة العربية تعبير "موسط" كمقابل لكلمة Parameter، لذا نلتزم بهذا التعبير في بقية الكتاب.

[٢] سنشرح هذه الخصائص بالتفصيل في الفصل الثالث.

- لا تتمتع المرشحات في المستقبل بمنحنى مثالي لـ"الاستجابة الترددية أو الطيفية" "Transfer Function"، إذ يكون هذا المنحنى ذا جوانب غير حادة في انحدارها، ويحتل عرضاً أكثر من B_c. هذا يعني أن المستقبل لايستطيع منع تسرب الطاقة من قنوات مجاورة على نحوٍ تام.

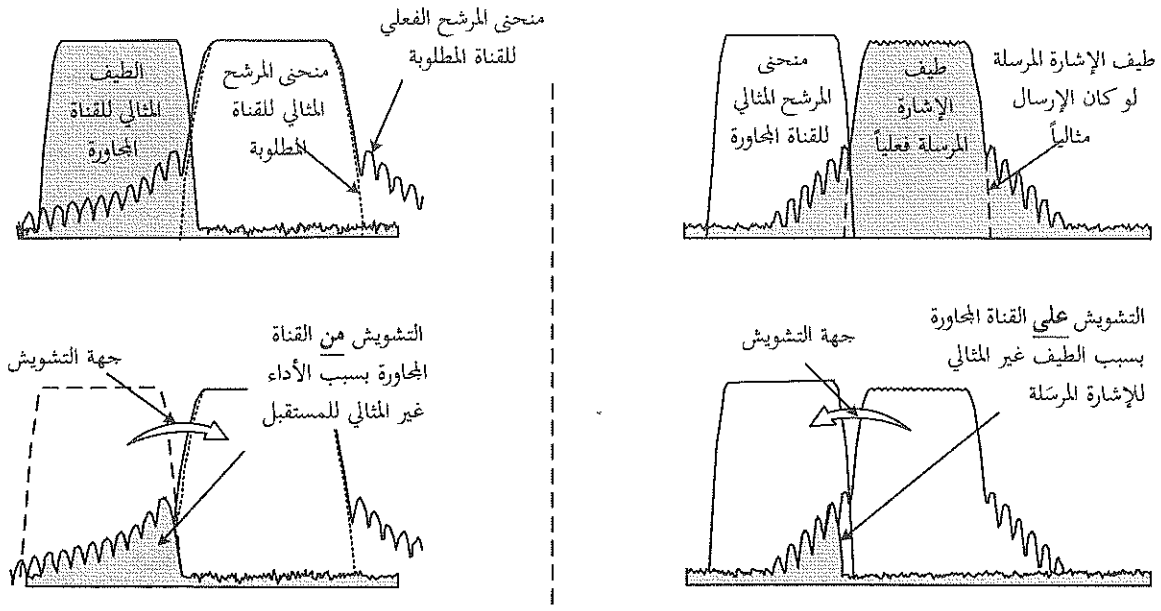


الشكل ٢-٤: طيف إشارة GSM المعدلة، (عن [٣] بتصرف).

يؤدي التأثير التراكمي للظواهر الثلاثة المذكورة إلى تداخلٍ بين إشارات القنوات المتجاورة، وهذا ما يوضحه الشكل ٢-٥، الذي يبين في الجزء (أ) التشويش الناتج عن أداء المرسل، وفي القسم (ب) التشويش الناتج عن أداء المستقبل. أما الجزء (ج) فيوضح التأثير التراكمي للأداء غير المثالي لطرفي الاتصال، حيث تمثل المساحة المظللة طاقة التشويش الإجمالية عند مستقبل القناة المرغوبة. ومن الممكن تقدير هذه الطاقة عن طريق حساب مربع قيمة منحنى الإستجابة الترددية للمرشح مضروباً بالكثافة الطيفية للإشارة المستقبلة ضمن مجال التمرير.

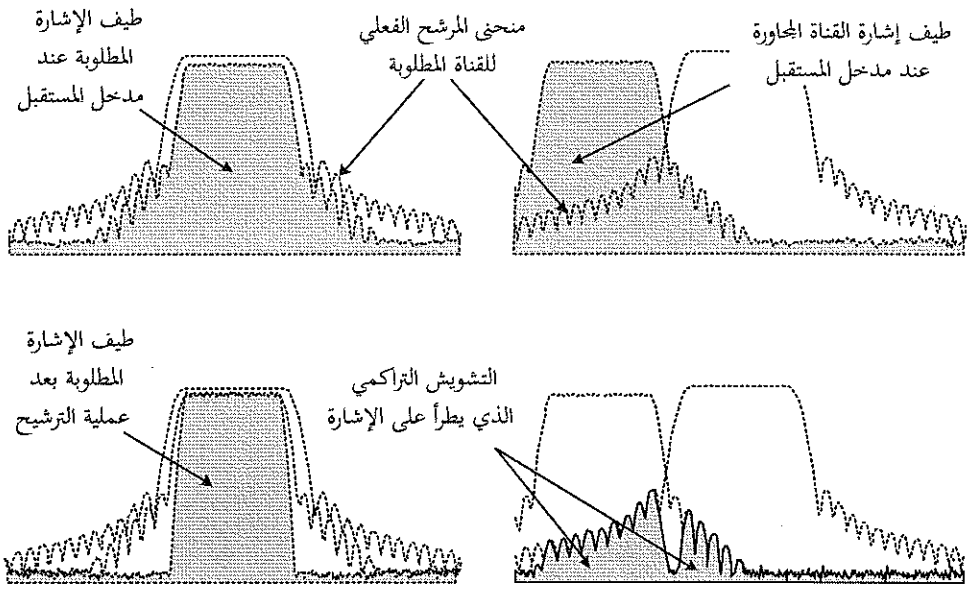
قد يكون تجنب التداخل بين القنوات المتجاورة ممكناً عن طريق استخدام مرشحاتٍ ودواراتٍ راديوية عالية الأداء، غير أن ذلك غير مُجدٍ من الناحية التجارية، نظراً لكونه يرفع من تكاليف إنتاج الوحدات المتحركة بدرجة ملحوظة. لذا يستعاض عن ذلك بمراعاة عدة إجراءات تساعد على رفع كفاءة النظام، وعلى إتاحة جودة مرضية للخدمات المقدَّمة للمشترك. من أبرز هذه الإجراءات ما يلي:

- يُراعى أثناء تصميم الشبكة وتوزيع الترددات على الخلايا أن لا يجري استخدام ترددات متجاورة ضمن الخلية الواحدة، إذ تُوَزَّع المجموعات المختلفة من الترددات على المحطات الثابتة بحيث تكون متباعدة على نحوٍ كاف عن بعضها. فعلى سبيل المثال، إذا استُخدم الحامل $f_c(n)$ في خليةٍ ما ضمن نظام GSM، فإن الحوامل الأخرى ضمن الخلية تُختار بحيث يكون أقرب حامل هو $f_c(n+5)$. ويخضع الفاصل بين الترددات –على نحوٍ عام– لطبيعة النظام وضرورات تخطيط الشبكة، ويشترط تباعد الحوامل وَفرةً في الترددات.



(أ): التشويش الناتج عن أداء المرسل

(ب): التشويش الناتج عن أداء المستقبل



(ج): التأثير التراكمي الناتج عن الأداء غير المثالي للمستقبل والمرسل

الشكل ٢-٥: التشويش الناشئ عن تراكم تأثيري المرسل و المستقبل.

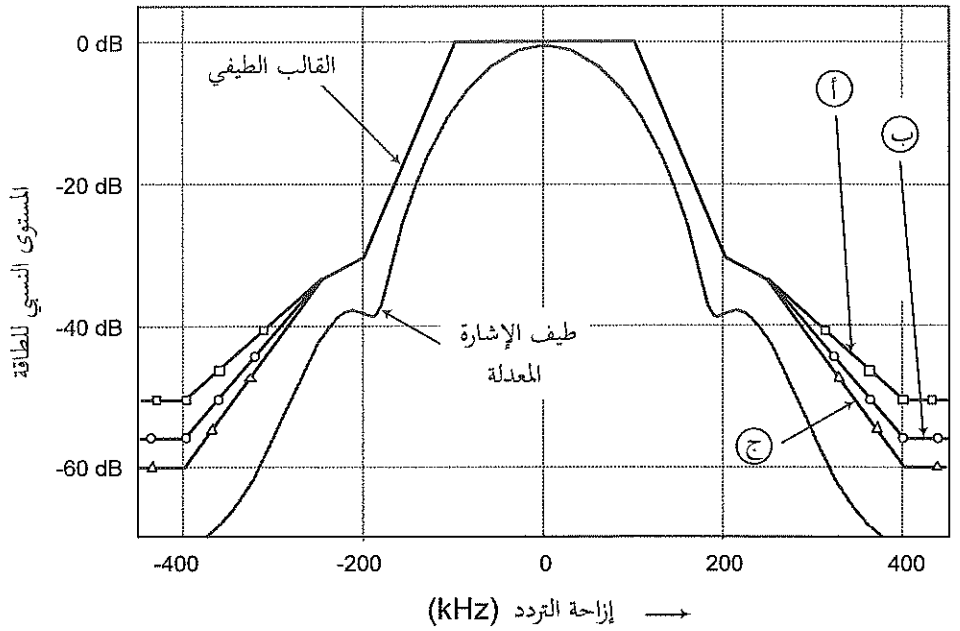
- تراعي المعايير الفنية مشكلة التشويش المتبادل بين القنوات عن طريق فرض قيم عظمى لمستوى التداخل الذي يجيزه النظام، سواءً كان التداخل مع إشارة ناتجة عن استخدام نفس التردد في خلايا أخرى، أو مع أية إشارة ناجمة عن ترددٍ مجاور.
يُقاس هذا التداخل المسموح به بنسبة طاقة الإشارة المرغوبة إلى طاقة التشويش SNR، وتشترط المواصفات المعيارية أن تكون كل الأجهزة المستخدمة في شبكة ما قادرة على كشف الإشارة المرغوبة بمقدار مقبول من الخطأ، ما دامت قيمة SNR لا تقلُّ عن حدٍّ أدنى يرمز له بـ SNR_{min}.

- إضافة إلى ما سبق، تفرض معايير أنظمة الاتصالات خصائص محددة لنوعية الإشارة التي يمكن للمرسل أن يبثها، وذلك للوصول إلى أدنى مقدار ممكن من التداخل. أحد هذه الخصائص هو "القالب أو الإطار الطيفي" "Spectrum Mask"، الذي يرسم الحدود العظمى للاستطاعة التي يُسمح للإشارة المعدَّلة أن تحملها عند كل تردد من الترددات المجاورة. ويجب على أجهزة الإرسال –في المحطة الثابتة وفي الوحدة المتحركة– أن تكون مصممة بحيث تتوافق مع هذا الإطار، مما يتيح أداءً جيداً للنظام على نحوٍ متكامل.
كمثالٍ على ذلك، يبين الشكل ٢-٦ القالب الطيفي للإشارة المعدلة في نظام GSM، حيث يجب أن تكون قيمة المستوى النسبي للاستطاعة أقل من القيمة التي يرسمها الإطار، وذلك لكل قيمة من قيم التردد، لذا يؤدي أيُّ تجاوزٍ للقيم التي يرسمها القالب إلى تشويشٍ ملحوظ على القنوات المجاورة. هذا و تحدد المعايير عدداً من هذه القوالب، طبقاً لتردد النظام، وتبعاً لنوعية التعديل المستخدمة (انظر [٤] و [٥] لمزيد من التفاصيل).
نقرأ من الشكل مثلاً أن الطاقة يجب أن تنخفض بمقدار 30 dB عند إزاحة مقدارها 200 kHz، وذلك مقارنة مع قيمتها عند التردد أو الحامل المركزي. أما مستويات الطاقة عند فاصل ترددي يتجاوز 400 kHz، فهي تتبع نوعية جهاز الإرسال. فإذا كان المرسل هو المحطة الثابتة وكانت طاقة الإرسال تقارب 43 dBm (20 W)، فإن مستوى الطاقة يجب أن لا يتجاوز 60 dBm– (المنحنى ج). أما في حالة الأجهزة التي تبث بطاقةٍ منخفضة، كالمحطات الصغيرة جداً والأجهزة المحمولة، فإن المعايير تسمح بمستوى طاقةٍ أعلى، وذلك باعتبار أن "الخُبُوَّ" "Attenuation" الذي يعتري الإشارة المرسَلة يكون كافياً لتخفيض مستوى الطاقة الجانبية. هذا ما يبينه الشكل في حالة طاقة إرسال لا تتجاوز 2 W (المنحنى أ) أو 5 W (المنحنى ب).
يُستخدم المبدأ نفسه في نظم الاتصالات الأخرى، كنظام UMTS أو غيره، إذ يجب على كل الأجهزة المرخصة ضمن أية شبكة أن تكون محققة لشروط مشابهة من حيث عدم تجاوز عتبة معينة للطاقة المرسلة عند أيٍّ من الترددات المتاحة للنظام، ومن الممكن الرجوع إلى [٦] للوقوف على تفاصيل القالب أو الإطار الطيفي لنظام UMTS.

٢–٢ النفاذ المتعدد باقتسام الزمن

بيَّن البحث السابق كيفية تقسيم النطاق الترددي المتاح إلى قنوات متعددة، وهذه القنوات لا يتم تخصيص كل منها لمشترك معين طيلة مدة اتصاله، إذ يعني ذلك استخداماً غير فعال للترددات المتوفرة. لذا نجد أن كثيراً من الأنظمة الخلوية الحديثة تعتمد مبدأ

النفاذ المتعدد باقتسام الزمن "Time Division Multiple Access (TDMA)" لتحسين فعالية استثمار المجال الطيفي المتاح، حيث يتم تخصيص "حيز زمني" "Time Slot (TS)" معين لكل مشترك، ينفرد أثناءه بِشَغْل قناة ترددية معينة من القنوات المخصصة للنظام، يعقبه مشترك آخر خلال الحيز الزمني التالي، على القناة نفسها، وهكذا.

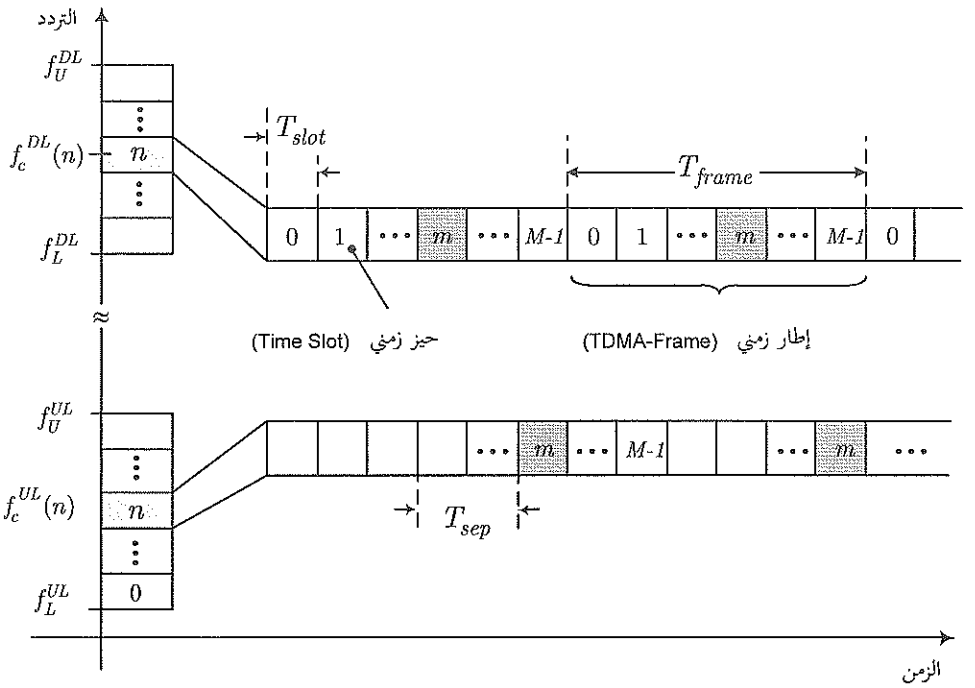


الشكل ٢-٦: أمثلة على القالب الطيفي للإشارة المعدلة في نظام GSM (عن [٤] بتصرف).

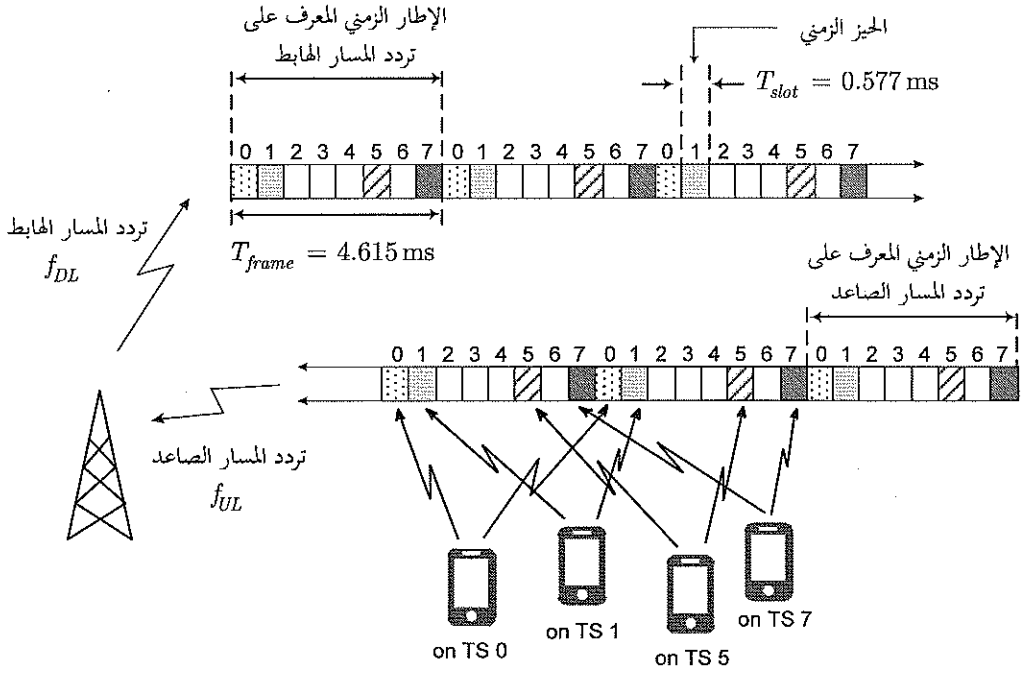
أهم ما يميز مبدأ TDMA ما يلي:

- يجري تنسيق عدد المشتركين والمستخدمين للتردد أو الحامل الواحد من خلال تعريف "إطارٍ زمني" "TDMA-Frame" كـ"وحدة تكرارٍ" تشمل M حيزاً زمنياً (TS)، وتمثل هذه الوحدة المدة الزمنية التي يجب أن تنقضي قبل أن يعاود مشتركٌ ما شَغل القناة (انظر الشكل ٢-٧). بناءً على ذلك، يمثل الحيز زمني على حاملٍ ترددي معين أصغر وحدة فيزيائية متاحة كمورِدٍ يُشغل من قبل المشترك. كذلك يمكن القول بأن التكرار الدوري لهذا الحيز يُكَوِّن "القناة الفيزيائية" المتوفرة لاتصال المشترك الذي يشغل هذا الحيز، ما يعني أن الإطار الزمني يتيح تعريف عدد مقداره M من قنوات الاتصال على كل حامل ترددي أو قناة ترددية.
- تختلف مدة الإطار الزمني وعدد القنوات الفيزيائية على الحامل الواحد تبعاً لمواصفات وخصائص النظام، فعلى سبيل المثال، يشغل الإطار في نظام GSM مدة مقدارها $T_{frame} = 4.615\,ms$، ويشمل 8 أحياز[١] زمنية، يعادل طول كل منها $T_{slot} = 0.577\,ms$ (انظر الشكل ٢-٨)، ما يعني أن النظام يوفر ثماني قنوات فيزيائية على كل حامل ترددي.

[١] اخترنا تعبير أحياز كجمع للمفرد "حيز"، وذلك قياساً على "خير و أخيار" أو "سيد وأسياد".

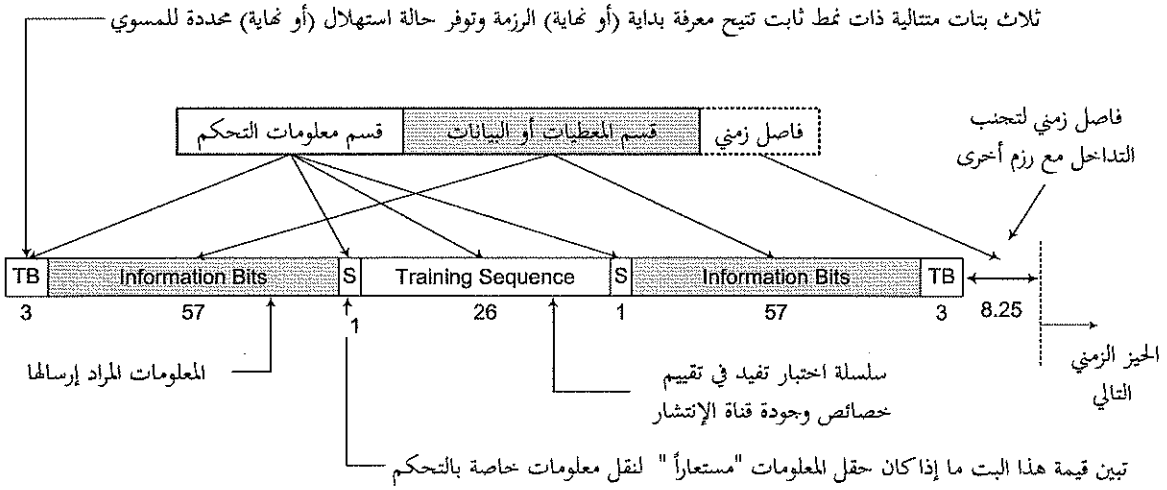


الشكل ٢-٧: مبدأ النفاذ المتعدد بتقسيم الزمن.



الشكل ٢-٨:تطبيق النفاذ المتعدد بتقسيم الزمن في نظام GSM.

- نتيجةً للتعاقب أو التناوب على شغل القناة، يرسل كل مشترك خلال المدة الزمنية الخاصة به جزءاً من المعلومات، يتمثل بعدد معين ومحدد من البتات، ينتظر بعدها حتى يكتمل انقضاء إطارٍ زمني، ثم يعاود إرسال مجموعة بتاتٍ أخرى، وهكذا. وقد اصطُلح على استخدام تعبير "Burst" للدلالة على مجموعة البتات المرسلة ضمن كل حيز زمني، وسنستخدم مصطلح "رزمة معلومات راديوية" أو اختصاراً "رزمة" كمرادف لهذا التعبير، إذ أن كلمة "رزمة" هي المتعارف عليها للدلالة على عدد من البتات، تُكوِّن وحدةَ معلومات، تُرسل كمجموعة متكاملة من طرف إلى آخر ضمن الشبكة (انظر [١٥]).
- تتألف كل رزمة تُرسَل ضمن حيز زمني من ثلاثة أقسام أو مجموعات من البتات، يتضمن القسم الأول البتات التي تمثل المعطيات أو المعلومات، ويشمل الثاني البتات الخاصة بوظائف التحكم، وقد يتألف كل من هذين القسمين من عدة حقول، تتوزع البتات عليها. أما القسم الثالث، فهو لا يحمل أية معلومات من الناحية العملية، وإنما يُخصص كفاصلِ حمايةٍ زمني، حتى لا يكون هناك تداخل مع الرزم المجاورة.
- يتميز كل نظام بعددٍ من الرزم المختلفة من حيث تركيبها والمهام الوظيفية المنوطة بها. لتوضيح ذلك، يبين الشكل ٢-٩ بنية الرزمة الخاصة بنقل المعلومات في نظام GSM، مع التصنيف الوظيفي لكل مجموعةٍ من البتات. يتضح من الشكل أن طول الرزمة يكافئ 156.25 بتاً، يشمل القسم الفاعل منها 148 بتاً، ويتألف القسم الحامل للمعلومات من حقلين يشمل كل منهما 57 بتاً. وكما هو مبين، هناك مدة زمنية في النهاية، تكافئ 8.25 بتاً، وتوفر العزل الزمني عن الرزم المرسَلة في الحيز التالي. ولما كانت مدة الحيز الزمني تساوي 0.577 ms (انظر الشكل ٢-٨)، تكون المدة المكافئة للبت الواحد هي $T_{bit} = 0.577\,\text{ms}/156.25\text{bit} = 3.69\,\mu s$. هذا وسنتطرق لأنواع الرزم والمهام المنوطة بكلٍّ منها بتفصيل وافٍ في الفصل ٤.



الشكل ٢-٩: بنية رزمة نقل المعلومات في نظام GSM (انظر الفصل ٤ لمزيد من التفصيل).

- كي لا يسبب أي مشتركٍ ما تشويشاً للمستخدمين الآخرين الذين يشاركونه الحامل الترددي نفسه، يجب من الناحية النظرية التأكد من أن جهاز إرسال هذا المستخدم لا يبث أية طاقة خلال المدد الزمنية المخصصة للمشتركين الآخرين. من جانبٍ آخر، يسبب إيقاف إرسال الطاقة أو خفضها المفاجئ إلى مستوى شبه معدوم زيادة ملحوظة في عرض النطاق الترددي، وتشويشاً إضافياً على ترددات جانبية مجاورة لنطاق الإشارة الأصلي، ويزداد تأثير هذا التشويش السلبي كلما ازدادت سرعة تعديل الطاقة من حالة القيمة المطلوبة إلى ما يقارب الصفر، وبالعكس. لذا يجب على جهاز الإرسال أن يبلغ طاقة الإرسال العظمى أو الدنيا تدريجياً، وذلك عند بداية أو نهاية كل رزمة، على أن لا يسبب ذلك ضياعاً للمعلومات التي تحتويها الرزمة. لتحقيق ذلك وضبطه ضمن معايير موحدة، تعطي المواصفات المعتمدة تعريفَ "إطارٍ أو قالبٍ للإشارة المرسلة ضمن الرزمة الواحدة" "Burst Power Mask"، يَرسُم الطاقة العظمى المسموح بلوغها، ومدة الحماية الضرورية للفصل زمنياً بين مشترَكَيْن متعاقبين، ويحدد الازدياد أو الانخفاض التدريجي للطاقة في بداية ونهاية الرزمة، حتى يبقى عرض النطاق الطيفي الذي تشغله الاشارة ضمن الحدود المرسومة.

يبين الشكل ٢-١٠ القالب الموافق لرزمة المعلومات الموضحة في الشكل ٢-٩. ونلاحظ منه (أي الشكل ٢-١٠) أن الصعود أو الهبوط التدريجي للطاقة يجب أن يتم ضمن مدة زمنية مقدارها $28\,\mu s$، وهذا يكافئ عدداً من البتات مقداره 7.6 بتاً. نقرأ من الشكل أيضاً أن التغير النسبي للطاقة خلال هذه المدة يبلغ $70\,dB$ تقريباً. هذا ويمكن الرجوع إلى تفاصيل هذه القوالب والأُطُر في [٥] للمحطات الثابتة، أو [٧] للأجهزة المتحركة، أو [٢] لنظام UMTS.

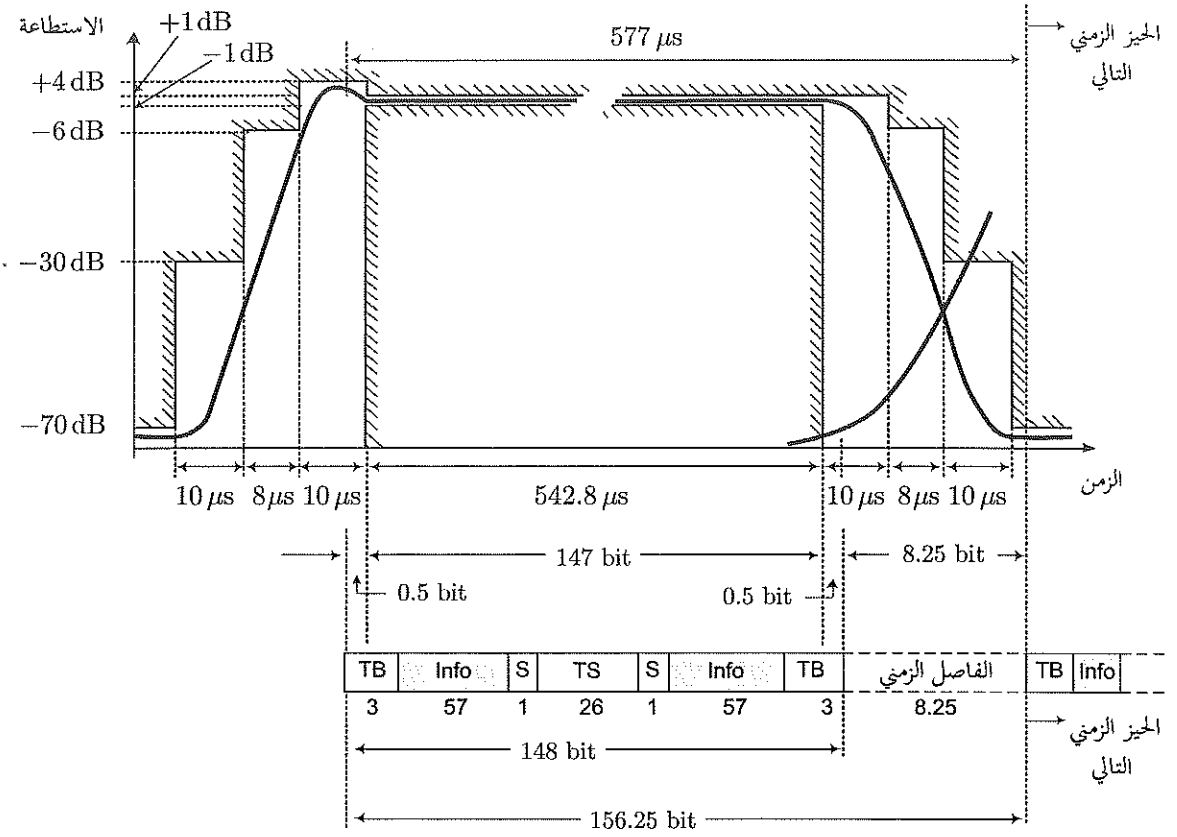
- نظراً لأهمية مدة الحماية، يجب عند تحديد مدتها مراعاة العوامل التالية:
  - لا بد من أخذ المدة الزمنية العظمى τ_{max} التي تحتاجها الإشارة حتى تصل مباشرةً من المرسل إلى المستقبل بعين الاعتبار، وتُقدَّر هذه المدة بناءً على نصف قطر الخلية الأعظمي المتوقع للنظام.
  - نظراً لوصول الإشارة عبر مسارات مختلفة، تطول المدة التي يحتاجها الجزء الحامل للمعلومات للوصول إلى المستقبل عبر أطول مسارٍ بمقدار زمني مقداره $\Delta\tau_{max}$.
  - إضافة إلى ما سبق، يحتاج جهاز الإرسال في كلٍّ من طرفي الاتصال إلى مدة زمنية مقدارها τ_{OnOff}، وذلك للوصول بمستوى الطاقة إلى الحد المطلوب.

لذلك يجب أن يكون مجال الحماية الكامل T_{guard} شاملاً للمدد الزمنية المذكورة، بحيث يحقق العلاقة التالية (انظر الشكل ٢-١١):

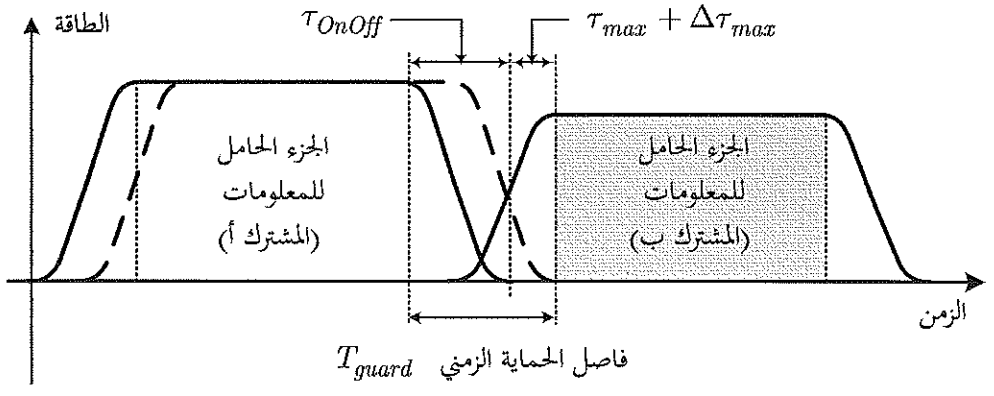
$$T_{guard} \geq \tau_{max} + \Delta\tau_{max} + \tau_{OnOff} \qquad (٢-٣)$$

- لما كان كلُّ حيزٍ زمني مخصصاً لمستخدم مختلف، فإن الوحدة المتحركة لا ترسل إشارتها على نحو متصل أو مستمر، وإنما تكون في حالة إرسال أو استقبال، ثم تنتظر حتى يأتي دورها ضمن دور الإطار الزمني. يتيح ذلك استخدام مبدأ الازدواج بتقسيم الزمن TDD في الوحدات المتحركة، حيث يمكن تخصيص حيز زمني تكون فيه الوحدة مُرسِلةً للمعلومات،

باستخدام قناة ترددية ضمن نطاق المسار الصاعد، وحيز زمني آخر تستقبل فيه الإشارة من المحطة، وذلك باستخدام قناة ترددية ضمن نطاق المسار الهابط، ثم تنتظر حتى يأتي دور الإرسال مرة أخرى.



الشكل ٢-١٠: القالب الخاص برزمة نقل المعلومات في نظام GSM.

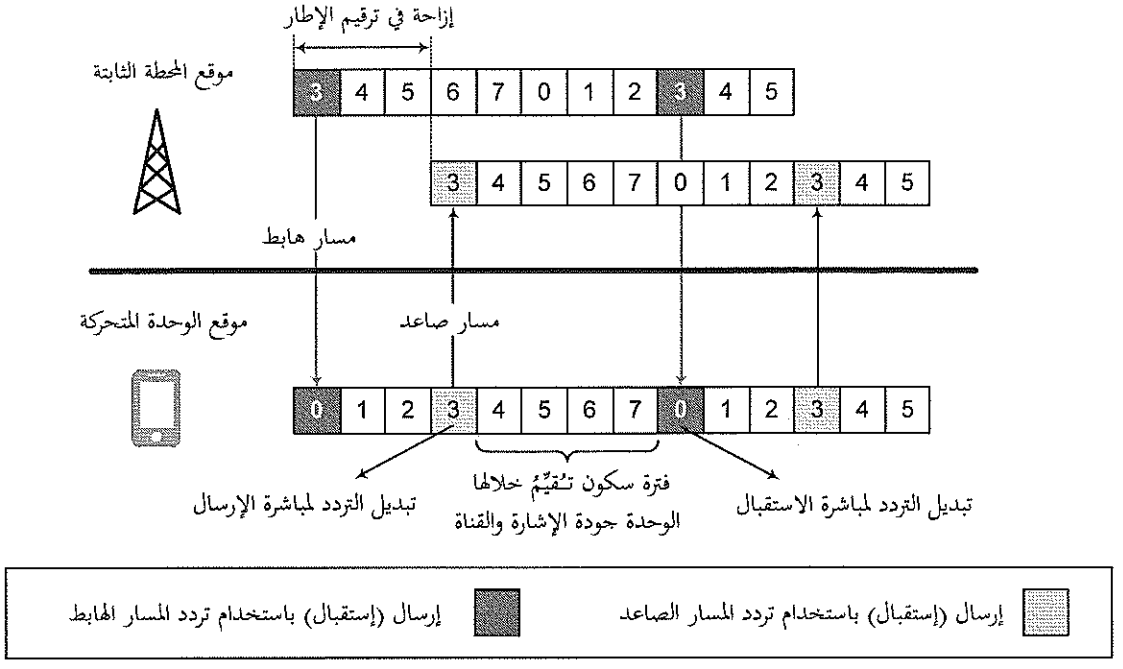


الشكل ٢-١١: فاصل الحماية الزمني بين حيزين متتاليين.

ليس من الممكن تطبيق هذا المبدأ في المحطة الثابتة لأنها تتخاطب آنياً مع عدة مشتركين، ومن ثم تكون كل الأحياز الزمنية ضمن الإطار مشغولة، لتأمين إرسال أو استقبال الإشارة من وإلى المشتركين الفاعلين.

وحتى يتسنى توفير تزامن دقيق بين المحطة الثابتة والوحدة المتحركة، فإن توقيت الإطار الزمني في المحطة الثابتة يكون مختلفاً في جهة الإرسال عن توقيته في جهة الاستقبال. لتوضيح ذلك، يبين الشكل ٢-١٢ ترقيم وتزامن الإطار الزمني لكلٍّ من المسار الصاعد والمسار الهابط في نظام GSM، حيث نقرأ منه أنّ خطوات التخاطب بين طرفي الاتصال تجري كما يلي:

- ترسل المحطة الثابتة إشارتها إلى الوحدة المتحركة باستخدام الحيز الزمني المخصص لهذه الوحدة (رقم 3 في الشكل). ويكون هذا الإرسال ضمن الإطار الزمني المعرّف على تردد المسار الهابط f_c^{DL}.
- تستقبل الوحدة المتحركة الإشارة باستخدام التردد f_c^{DL}، ولكن ضمن حيز زمني ذي رقمٍ مختلف، يسبق رقم الحيز الزمني الذي جرى الإرسال ضمنه من المحطة. ويتباين الفرق بين رقم الحيزين تبعاً للنظام، وكما هو مبين، الفرق في نظام GSM هو ثلاثة أحياز.



الشكل ٢-١٢: الإزاحة في ترقيم إطار المسار الصاعد في نظام GSM.

- تقوم الوحدة المتحركة بتحليل ومعالجة الإشارة المستقبلة، وبعد مدة تكافئ 3 أحياز، تنتقل الوحدة من التردد f_c^{DL} إلى تردد الإرسال، أي $f_c^{DL} + 45$، وترسل إشارتها أو رزمة المعلومات إلى المحطة.
- تتلقى المحطة هذه الإشارة على تردد المسار الصاعد، وبسبب إزاحة إطار الاستقبال عن إطار الإرسال زمنياً

(بعبارة أخرى: اختلاف التوقيت بين الإطارين) تستقبل المحطة الثابتة الإشارة ضمن الحيز الزمني رقم 3، الذي يوافق الرقم المخصص للمشترك في حالة الإرسال. بذلك يتحقق التزامن مع المحطة، ولا يكون هناك لَبْسٌ في رقم الحيز المخصص لمشترك معين، إذ يكون ذاته (رقم 3 في الشكل) سواءً في حال الإرسال أو الاستقبال، ومن ثم يمكن التخاطب مع أكثر من مشترك بنفس الوقت، ما دام رقم الحيز الزمني المخصص لكلٍّ منهم مُعرَّفاً بوضوح.

بقي أن ننوه إلى أن الفائدة الأساسية لاستخدام مبدأ TDD عوضاً عن FDD في الوحدة المتحركة، هو تجنب استخدام "مرشح مزدوج الإتجاه" "Duplexer"، الذي يكون ضرورياً في حال استخدام هوائي مشترك للإرسال والاستقبال، وذلك لتوفير عزلٍ بين مساري الاتصال، حتى لا تتسبب الطاقة المرتفعة التي يحملها تردد الإرسال في تشويه الإشارة الضعيفة على تردد الاستقبال. فهذا المرشح ذو كلفة مرتفعة، لذا يتم الإستعاضة عنه بـ"دارةِ تبديلٍ" "Switch" بسيطة في الوحدات المتحركة التي تعمل بنظام TDMA حصراً، وذلك لتقليل كلفة وحجم هذه الأجهزة. وكما ذكرنا من قبل، لا يمكن استخدام هذا الحل المبسط في المحطات الثابتة.

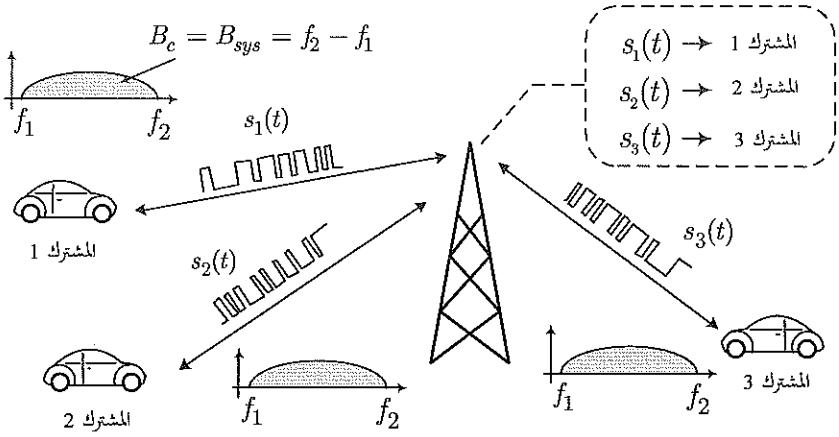
٢-٣ النفاذ المتعدد بتمييز متتاليات الترميز

تختلف هذه التقنية عما سبق عرضه من طرق النفاذ المتعدد من حيث المبدأ الذي تستند إليه، فالسمة الأساسية لتقنيات FDMA و TDMA هي توفير قنوات ترددية ضيقة، تُستخدم من قبل المشتركين بالتناوب. وقد عرفنا بعض ما يفرضه ذلك من تحديات فنية متعددة، تتعلق بتحقيق التزامن وتوفير العزل زمنياً وترددياً بين إشارات المشتركين المختلفة، وذلك من أجل خفض التداخل بأكبر قدر ممكن. أما مبدأ "النفاذ المتعدد بتمييز متتاليات الترميز" "Code Division Multiple Access (CDMA)" فينحو منحىً مختلفاً تماماً من حيث كيفية استثمار الموارد الفيزيائية المتاحة أو المتوفرة، ويتجلى ذلك في اختلافات جوهرية متعددة، نشرحها في الفقرات التالية، مستعينين بالشكل٢-١٣.

١) السمة الأولى لهذا النظام هي شَغل نطاق ترددي عريض، وعدم التقيد بقنوات ترددية ضيقة، حيث يُتيح النظام لكل مشترك قناة اتصالٍ ترددية، يكافئ عرضها أضعاف العرض الأدنى الضروري لضمان اتصال ذي جودة معقولة وفق قانون "شانون" "Shannon". فعلى سبيل المثال، يكفي –من الناحية النظرية– نطاقٌ ترددي عرضه 30 kHz وذلك لتوفير اتصالات هاتفية ذات جودة عالية، وقد كانت أنظمة الجيل الأول وبعض أنظمة الجيل الثاني تستخدم قنوات ترددية بنطاقٍ ذي عرضٍ مماثلٍ أو مشابه. غير أن أنظمة الجيل الثاني التي اعتمدت تقنية CDMA كانت تتيح قناةً عرضها 1250 kHz (1.25 MHz)، كما تُستخدم في أنظمة الجيل الثالث قنوات ترددية عرض كل منها 5 MHz، أي ما يفوق عرض النطاق المطلوب مبدئياً بـ 150 ضعفاً تقريباً. نلحظ أيضاً أن عرض القناة المتاحة في أنظمة الجيل الثالث يعادل أربعة أضعاف عرض القناة التي تتيحها أنظمة الجيل الثاني، لذا تعرف أنظمة الجيل الثالث أيضاً باسم "أنظمة CDMA ذات النطاق العريض" "Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA)".

٢) تنتفي الحاجة إلى تجزئة نطاق النظام كماهي الحال في نظم FDMA، حيث يمكن لجميع المشتركين استخدامُ القناة الترددية

نفسها. ويكون النطاق الأدنى الضروري لعمل النظام B_{sys}^{min} مساوياً لعرض القناة المستخدمة من قبل المشتركين جميعهم، أي $B_c = B_{sys}^{min} = f_2 - f_1$ (انظر الشكل٢-١٣). هذا ويجب التمييز هنا بين النطاق الأدنى الضروري لعمل النظام، الذي يكافئ قناة ترددية واحدة متاحة لكل المشتركين، ويصف الخصائص الفنية التي يجب أن تكون أجهزة النظام متوافقة معها لتوفير الأسس التقنية لعمل الشبكة، وبين النطاق المتاح للمشغل، الذي قد يشمل عدة قنواتٍ ترددية لتلبية احتياجات السعة المتزايدة. ففي حالة أنظمة الجيل الثالث (UMTS) التي تعتمد تقنية WCDMA يمكن إنشاء وتشغيل الشبكة على نحوٍ كاملٍ باستخدام قناة ترددية واحدة بعرض 5 MHz لكلٍّ من المسار الصاعد والمسار الهابط، أما النطاق المتاح للمشغل فقد يصل إلى 20 MHz، أي قد تُخصص 4 قنوات ترددية أساسية للمشغل الواحد، وذلك تبعاً لسياسة الجهات الناظمة لقطاع الاتصالات، ولعدد المشغلين المُرخَّص لهم ضمن البلد أو القطر الواحد.



الشكل٢-١٣: مبدأ النفاذ المتعدد بتمييز الترميز. يشير الشكل إلى تواصل المشتركين المتزامن مع المحطة باستخدام النطاق الترددي ذاته.

٣) بافتراض وجود قناة ترددية وحيدة يكافئ عرضها B_{sys}^{min}، تكون هذه القناة متاحةً لكل المشتركين في آنٍ واحد، فليس هناك ترتيب زمني لتناوب المشتركين على استخدامها كما هي الحال في نظم TDMA. من هنا يجب فهم الشكل٢-١٣ على أنه يعطي صورةً لتواصل جميع الوحدات المتنقلة مع المحطة في لحظة زمنية مشتركة، وباستخدام المجال الترددي نفسه.

٤) هناك رقم أعظمي لعدد المشتركين الذين يمكن للمحطة أن تتواصل معهم في آنٍ واحد، وهذا الرقم لا علاقة له بعرض المجال الترددي المتاح، وإنما تحدده نسبة التشويش المسموح بها لتأمين جودة الاتصال (سنتطرق لذلك لاحقاً).

٥) يُزوِّدُ جهاز الإرسال الخاص بكل مشترك الإشارةَ المرسَلةَ برمزٍ خاص بها، يتيح تمييزها عن إشارات المشتركين الآخرين، وهو عبارة عن "متتالية من النبضات" "Pulse Sequence"، ذات "قيم إثنانية" "Binary Values"، اصطُلح على تسمية مفردها (أي النبضات) باسم "نبضة الترميز" "Chip"، وذلك لتمييزها عن وحدة المعلومات الرقمية، أي الـ"بت" "Bit". تكون المتتالية المميِّزة لكل مشترك معروفة لدى المستقبل في المحطة الثابتة، لذا تُستخدمُ هذه المتتالية لفك أو لكشف ترميز

الإشارة. هذا يعني أن المتتالية تقوم مقام "شيفرة" "Code" تُميِّز اتصال كل مشترك عن اتصالات المشتركين الآخرين، وتصونه من التداخل أو التشويش. بنفس الطريقة أيضاً، تُستخدم عملية الترميز من قِبَل المحطة لتأمين عزل الإشارات عن بعضها في المسار الهابط. استناداً إلى هذا المفهوم، تُعرَف هذه التقنية باسم "Code Division Multiple Access"، وقد آثرنا استخدام تعبير "تمييز الترميز" عوضاً عن "اقتسام الرموز" كمرادفٍ عربي، لما في ذلك من توصيف أدق للمبدأ العام. فكلمة اقتسام صالحة لوصف التناوب على شغل الموارد الفيزيائية المتاحة، كالتردد والزمن، أما متتاليات الترميز، فهي نتاج خوارزميات رياضية ويمكن توليد عدد كبيرٍ جداً منها، لذا فهي لا تمثل مورداً فيزيائياً، وإنما تُستخدم كوسيلة للتمييز بين المشتركين (سنفصِّل في ذلك لاحقاً). هذا وننوه إلى أن كلمة "Chip" لا تحمل معنىً فيزيائياً مستقلاً أو خاصاً بها، فهي تمثل نبضةً من نبضات المتتالية المميِّزة لكل مشترك، وسنستخدم في هذا الكتاب مصطلح "نبضة الترميز" للدلالة عليها[1].

استناداً إلى ما سبق، يمكن تلخيص مبدأ عمل هذه التقنية على أنه استخدام جميع المشتركين لقناةٍ ترددية مشتركة في وقتٍ واحد، واعتماد النظام على متتالية ترميزٍ خاصة بكل مشتركٍ فاعلٍ، تتيح تمييز اتصاله عن اتصالات المشتركين الآخرين.
يطرح هذا المبدأ والخصائص المذكورة أعلاه سؤالين مهمين، وهما:

١) كيف يجري التمييز بين المشتركين باستخدام المتتاليات المتباينة؟

٢) كيف يتم اقتسام الموارد الفيزيائية للشبكة؟

يكمن الجواب على هذين السؤالين في تقنية "نثر الطيف" "Spread Spectrum" التي تمثل القاعدة الأساسية لأنظمة النفاذ المتعدد بتمييز الترميز. ونظراً لندرة المصادر العربية التي توفر مُدخلاً رياضياً واضحاً لهذه التقنية، نتناولها في ما يلي بشيء من الإسهاب، وذلك لنقاش المبادئ الرياضية التي تعتمدها، والفروق الجوهرية التي تميزها عن غيرها من التقنيات.

٢-٣-١ المبادئ العامة لنثر الطيف

إن جوهر تقنية "نثر الطيف" هو تعديل الإشارة المراد إرسالها على نحوٍ يزيد من عرض الطيف الخاص بها زيادة ملحوظة، وهذه الإشارة المعدلة هي التي يتم إرسالها لاسلكياً، لذا تتطلب عملية الإرسال نطاقاً ترددياً يعادل أضعاف النطاق الذي يتطلبه إرسال إشارة المعلومات الأصلية غير المعدلة. ويكمن الهدف الأساسي من عملية التعديل في نثر[2] (أي تفريق) طاقة الإشارة على مجال ترددي عريض، ما يؤدي إلى خفض مستوى "الكثافة الطيفية لاستطاعة الإشارة" "Power Spectral Density" على نحوٍ ملحوظ، بحيث لا يحمل أي تردد ضمن مجال الإرسال إلا جزءاً يسيراً من طاقة الإشارة. هذا بدوره يجعل التشويش

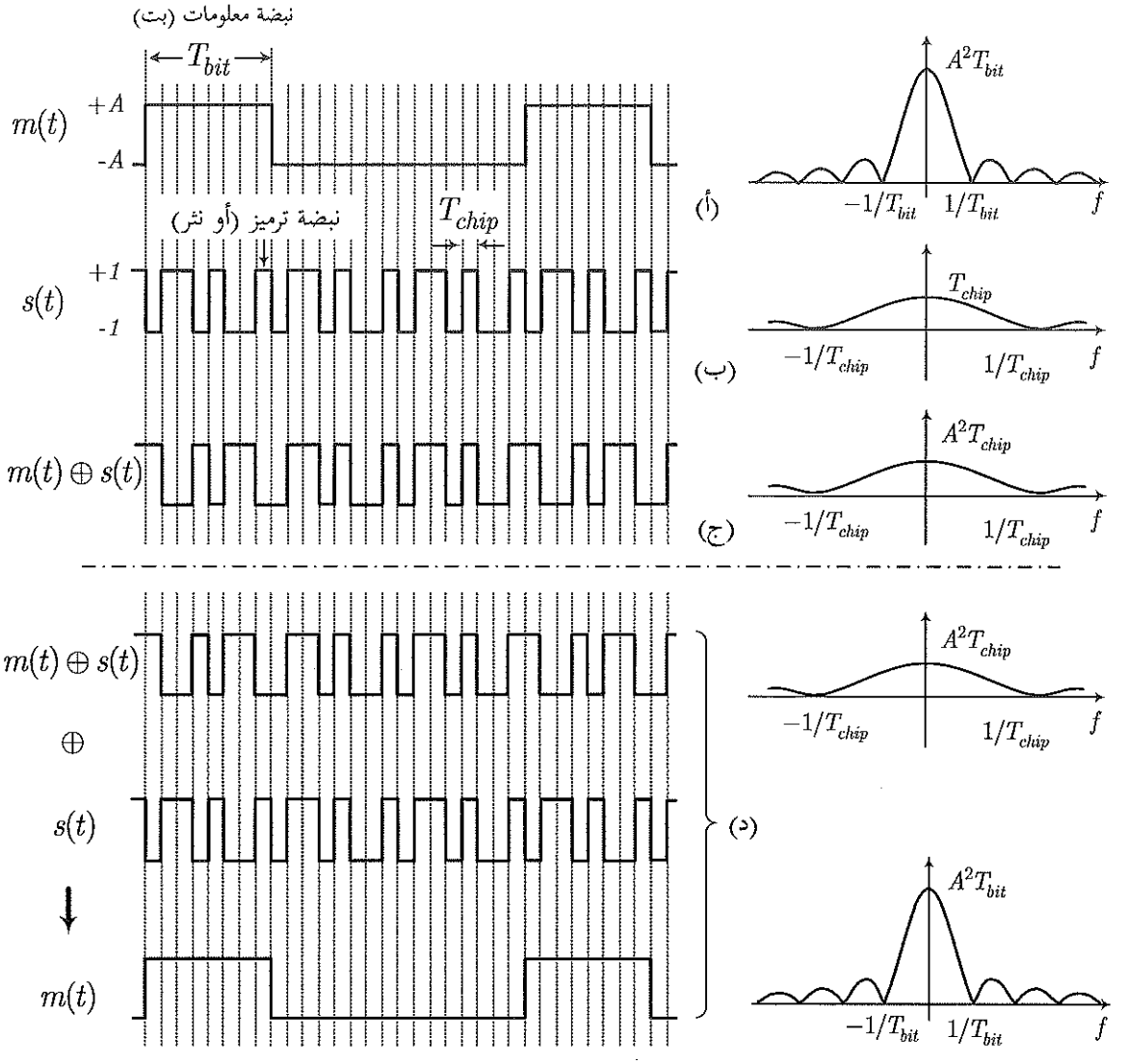
---

[1] لا نرى مانعاً من تسميتها "نَشِبْ" تماشياً مع منهجنا في استخدام المفردات الأصلية للوحدات الفيزيائية دون تعريب. وبما أن كلمة "Chip" تمثل وحدة قياسٍ للمعلومات، فإن قواعد تسمية وحدات القياس تجري عليها كذلك، ونترك الخيار في ذلك للقارئ.

[2] نَثَرَ الشيءَ: رماه متفرقاً (انظر القاموس المحيط). من الممكن كذلك استخدام تعبير "نشر الطيف"، فقد ورد في المعجم نفسه أيضاً "النشر خلاف الطي، ونَشَرَ الثوبَ أي بسطه"، لكننا آثرنا استخدامَ تعبيرِ النثر كونه قد غلب في أدبيات المراجع ولا يخالف المعنى الفيزيائي.

على الإشارة أو اعتراضها أكثر صعوبة، وهو المطلب الأساسي الذي أدى إلى تطوير هذه التقنية، إذ كانت تُستخدم بدايةً لأغراض عسكرية واستخباراتية صرفة.

يوضح الشكل ٢-١٤ المبدأ الأساسي لعملية النثر، حيث يعرض الجزء (أ) متتاليةً من النبضات مستطيلة الشكل، مدة كل منها T_{bit}، تمثل المعلومات المراد إرسالها. بذلك تكون هذه المتتالية ذات "وتيرة (أو معدل) دفقٍ" "Throughput" مقدارها $1/T_{bit}$.



الشكل ٢-١٤: مبدأ عمليتي نثر الطيف (الجزء العلوي) وفك النثر. يبين القسم الأيمن من الشكل تابع الكثافة الطيفية لكل متتالية من الجزء الأيسر.

يعطي الجزء الأيمن من الشكل الكثافة الطيفية لاستطاعة هذه الإشارة، ولما كانت هذه الإشارة تمثل متتالية عشوائية من النبضات، فإن الكثافة الطيفية لها تُعطى رياضياً بالعلاقة [٨]:

$$S_{bit}(f) = A^2 T_{bit} \frac{\sin^2(\pi f T_{bit})}{(\pi f T_{bit})^2} = A^2 T_{bit} \operatorname{sinc}^2(\pi f T_{bit}) \qquad (٤-٢)$$

من الممكن أيضاً إثبات أن 90% من طاقة الإشارة متضمَّنة ضمن المجال الترددي $0 \le f \le 1/T_{bit}$ (انظر [٨] للتفاصيل)، ما يعني أن هذا النطاق كافٍ لإرسال الإشارة لاسلكياً، ويتيح استخلاصها في المستقبل بدرجةٍ مقبولة من الجودة، حتى لو تعرضت لبعض التشوّه أو التغيّر أثناء مسارها من المرسل إلى المستقبل.

نتنقل الآن لمناقشة المتتالية في القسم (ب) من الشكل. تمثل هذه المتتالية دفقاً مشابهاً من النبضات، غير أن عرضَ أو مدة كل نبضة أصغر بكثير مقارنةً بـ T_{bit}، وكما أشرنا من قبل، نُطلق على مفردها اصطلاحاً اسم Chip، وندلُّ على المتتالية بتعبير"متتالية الترميز أو النثر" "Spreading Sequence"، كما ندل على المدة المكافئة لكل نبضة بـ T_{chip}.

نحصل على الكثافة الطيفية لهذه المتتالية باستبدال T_{chip} بـ T_{bit} في العلاقة (٢-٤)، ما يؤدي إلى:

$$S_{chip}(f) = A^2 T_{chip} \operatorname{sinc}^2(\pi f T_{chip}) \qquad (٥-٢)$$

نظراً لتحقق العلاقة $T_{chip} \ll T_{bit}$، تؤدي خاصية الإمتداد العكسي التي تتسم بها تحويلات فوريه إلى أن منحنى كثافة الاستطاعة لمتتالية الترميز يَشغل نطاقاً أعرض بكثير من منحنى الكثافة الخاص بمتتالية المعلومات، إذ يشغل الجزء الأساسي منه مجالاً عرضه $1/T_{chip}$، وهو أكبر بكثير من $1/T_{bit}$. ولو افترضنا أن مطال كل من المتتاليتين هو نفسه، أي A، فإن قيم الكثافة الطيفية بدلالة التردد تكون أصغر بدرجة ملحوظة، كما هو مُشارٌ إليه في الشكل.

يبين القسم (ج) من الشكل الإشارة الناتجة عن جداء دفق المعلومات (أي المتتالية الأولى) مع المتتالية الثانية (متتالية الترميز)، باستخدام دالة "الخيار المقصور" XOR، والتي تخضع للقواعد التالية:

$$\begin{aligned} 1 \oplus 1 &= 0 \qquad 1 \oplus 0 = 1 \\ 0 \oplus 1 &= 1 \qquad 0 \oplus 0 = 0 \end{aligned} \qquad (٦-٢)$$

ونقرأ من الإشارة الناتجة أن بت المعلومات الذي يساوي "1" يعكِس نبضةَ متتالية الترميز، في حين لا تؤدي بتات المعلومات المساوية لـ "0" إلى تغييرٍ في قيمة نبضات الترميز. هذا يعني أن عملية التراكب أو الجداء تكافئ عملية تعديلٍ لمتتالية الترميز، وأن الإشارة المُعَدِّلة هي متتالية المعلومات المراد إرسالها.

بافتراض أن مدة نبضة المعلومات تعادل مضاعفاً صحيحاً لمدة نبضة الترميز، أي بتحقق العلاقة:

$$T_{bit} = N T_{chip} \quad ; \quad N \in \mathcal{N} \qquad (٧-٢)$$

تكون مدة النبضة في القسم (ج) من الشكل مساويةً لمدة نبضة الترميز، ما يعني أيضاً أن طيف الإشارة المركبة، أي حاصل جداء المتتاليتين، يكافئ تماماً طيف متتالية الترميز من حيث عرض النطاق والقيم النسبية لكثافة الاستطاعة.

ننتقل الآن إلى القسم (د) من الشكل، والذي يوضح ما يحدث عند تعديل الإشارة المركبة (الجزء ج من الشكل) مرةً أخرى، باستخدام دالة XOR ومتتالية الترميز ذاتها. فكما هو مبين، يؤدي ذلك إلى استعادة الإشارة الأصلية، شريطة أن يكون هناك تزامنٌ مثالي بين متتاليتي المرسل والمستقبل.

نخلص مما سبق إلى السمات الأساسية لإجراء نثر الطيف، والتي يمكن تلخيصها كما يلي:

١) يمثل جداء دفق المعلومات مع متتالية الترميز عمليةَ تعديلٍ أو تضمين للمعلومات المراد إرسالها في نبضات متتالية الترميز المستخدمة. فإذا أُرسلت الإشارة الناتجة عن عملية الجداء إلى المستقبل، تكون حاويةً على كل تفاصيل المعلومات الأصلية.

٢) تؤدي عملية الجداء إلى إشارة مركبة ذات نطاق طيفي أعرض بكثير من نطاق إشارة المعلومات، وهذا يكافئ نثرَ أو تفريقَ طاقة الإشارة الأصلية على نطاقٍ ترددي عريض، ولما كانت طاقة الإشارة ذات مقدار محدود، فإن النثر يؤدي أيضاً إلى خفض الكثافة الطيفية للإشارة المتفرقة على النطاق الجديد إلى مستوىً يصغر قيم الكثافة الطيفية للإشارة الأصلية بكثير.

٣) يتيح تكرار عملية الجداء مع متتالية النثر، مع تحقق تزامن مثالي بين المرسل والمستقبل، استرجاع المعلومات الأصلية.

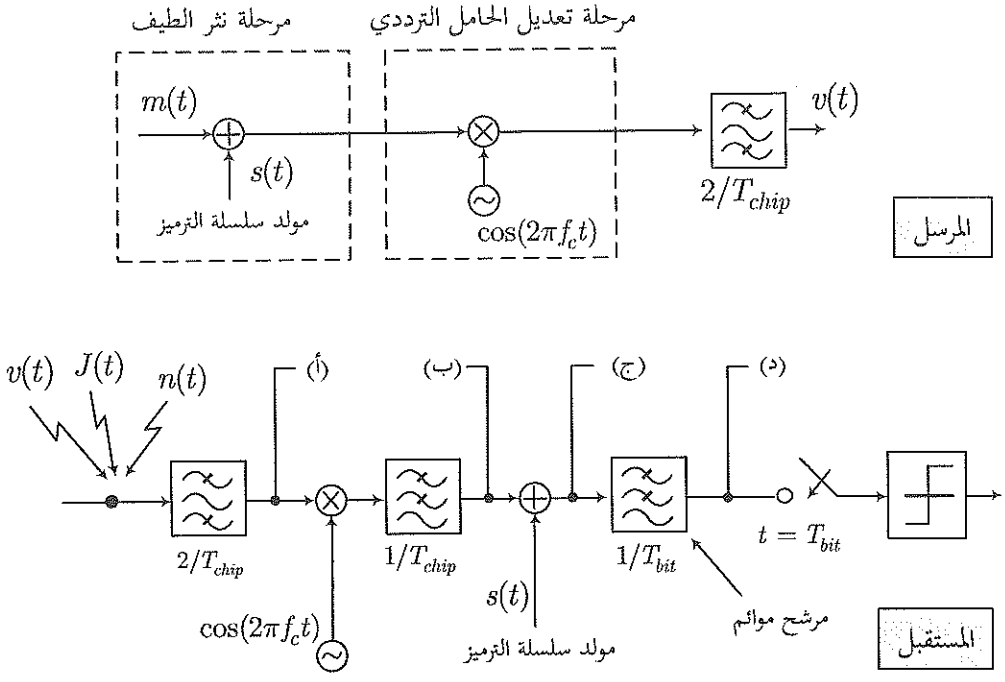
٤) متتالية النثر مستقلة تماماً عن المعلومات المراد إرسالُها، وليس هناك ارتباطٌ بين المتتاليتين إلا من ناحية وجوب كون مدة نبضة المعلومات أو الـ "بت" من مضاعفات مدة نبضة النثر (Chip).

لا تكفي عملية النثر التي وصفناها لجعل الإشارة جاهزةً للإرسال عبر قناة لاسلكية، إذ أن تعديل النثر يُنجَزُ في المجال الترددي الأساسي لإشارة المعلومات (Baseband)، أما إرسال الإشارة عبر قناة لاسلكية فيتطلب تعديلاً ثانياً إضافياً باستخدام إحدى تقنيات التعديل أو التضمين الرقمي المعروفة. وحتى يكون نقاشنا لخصائص نظم الطيف المنثور شاملاً ومتكاملاً، ندرس في ما يلي نظاماً مبسطاً يعتمد "التبديل الإثناني للطور" "Binary Phase Shift Keying (BPSK)"، ونستعين لذلك بالشكل ٢-١٥، الذي يبين جزأي هذا النظام (المرسل والمستقبل). وفقاً للشكل، يشمل المرسل الخطوات التالية لمعالجة الإشارة:

١) يجري بدايةً نثر الإشارة المراد إرسالُها $m(t)$ باستخدام متتالية النثر $s(t)$. وينتج عن عملية النثر هذه إشارة مركبة ذات نطاق ترددي مقداره $1/T_{chip}$.

٢) بعد ذلك، تؤدي عملية التعديل باستخدام الحامل f_c إلى إزاحة نطاق الإشارة المركبة، وتوليد إشارة راديوية قابلة للإرسال. وبافتراض أن كلاً من متتالية المعلومات ومتتالية النثر تتألفان من نبضات مستطيلة الشكل، فإن الإشارة الناتجة تشغل نطاقاً ترددياً حول f_c عرضه $2/T_{chip}$، أي ضعف النطاق الأساسي للاشارة المنثورة (انظر [٨]و[٩]).

٣) تُمَرَّرُ الإشارة بعد ذلك عبر مضخم قبل إرسالها إلى الهوائي لِبثها.



الشكل ٢-١٥: نظام إرسال واستقبال بتقنية الطيف المنثور.

ننتقل الآن إلى المستقبل، حيث تمر الإشارة بعدة خطوات من المعالجة. وقبل الشروع في نقاش تفاصيل هذه الخطوات، لا بد من التنبُّه إلى أن أداء المستقبل وتأثير تقنية نثر الطيف على خطوات استخلاص الإشارة المرغوبة يختلفان تبعاً لطبيعة التشويش الذي يطرأ على الإشارة. لذا، نعرض بدايةً لخطوات معالجة الإشارة في حال وجود تشويشٍ ذي نطاق ضيق، ومن ثمَّ نبين كيفية عمل المستقبل عندما يكون التشويش ناتجاً عن إشاراتٍ تشغل نفس النطاق الترددي للإشارة المراد استخلاصها، وهي الحال التي تنطبق على النفاذ المتعدد.

هذا وسنتبنَّى في ما يلي الفرضيات التالية، التي تبسط العرض دون أي تقييد على المبادئ العامة لعمل النظام:

- كل المرشحات المستخدمة في المستقبل ذات استجابة ترددية مثالية (مستطيلة الشكل) وذات ربحٍ قيمته "1"، هذا يعني أن عملها يقتصر على حجب الترددات غير المرغوبة وتمرير الإشارة ضمن النطاق المرغوب دون أي تخميد أو تشويه.
- كل المتتاليات الإثنانية (دفق المعلومات ومتتاليات النثر) ذات سمةٍ عشوائية، أي لا تُظهر أي نمطٍ معرّف أو محدد من حيث تعاقب القيم الإثنانية.
- كل المتتاليات الإثنانية ممثّلة بنمط "لا عودة للصفر" "NRZ"، أي تتألف من قيمٍ مزدوجة القطبية.
- الضجيج العشوائي ضمن المجال الترددي الذي نناقشه ذو قيمة ثابتة لكثافة الإستطاعة الطيفية، مقدارها $S_n(f) = N_0/2$.

٢-٣-٢ أداء المستقبل بوجود تشويشٍ ضيق النطاق

لنفترض أن الإشارة عند مدخل المستقبل تتكون من الإشارة المرغوبة $v(t)$، إضافة إلى إشارة تشويشٍ ندل عليها بـ $J(t)$، وضجيج عشوائي ممثلٍ بـ $n(t)$. ولنفترض أيضاً أن إشارة التشويش ذات تردد مركزي يوافق الحامل الترددي للإشارة المرغوبة f_c، وذلك لمحاكاة أسوأ حالة ممكنة للتشويش. هذا يعني أن الإشارة عند مدخل المستقبل هي:

$$r(t) = Am(t)s(t)\cos(2\pi f_c t) + J\cos(2\pi f_c t + \theta) + n(t) \qquad (٢-٨)$$

نظراً لأن $m(t)$ و $s(t)$ تتخذان القيم ± 1، فإن الإستطاعة المتوسطة للإشارة المرغوبة المستَقْبَلة هي $P_s = A^2/2$. كذلك نشتق من العلاقة (٢-٨) أن الإستطاعة المتوسطة لإشارة التشويش هي $P_i = J^2/2$. لذا فإن مستوى طاقة التشويش بالنسبة لطاقة لإشارة عند مدخل المستقبل هو:

$$SIR_{in} = \frac{A^2}{J^2} \qquad (٢-٩)$$

نتابع الآن الإشارة بعد خضوعها لعملية الترشيح الأولى، ونظراً لكون المرشح مثالياً، يمكن الدلالة على الإشارة عند النقطة (أ) كما يلي:

$$r_1(t) = Am(t)s(t)\cos(2\pi f_c t) + J\cos(2\pi f_c t + \theta) + n_1(t) \qquad (٢-١٠)$$

حيث يدل الحد $n_1(t)$ على ضجيج حراري عشوائي ذي كثافة طيفية مقدارها $N_0/2$.
تمثل الخطوة التالية في المستقبل عملية فكِّ تعديلٍ تقليدية للإشارة الراديوية، ينتج عنها الرجوع بالإشارة إلى النطاق الأساسي. بذلك تكون قيمة الإشارة عند النقطة (ب):

$$r_2(t) = \frac{A}{2}m(t)s(t) + \frac{J}{2}\cos(\theta) + n_2(t) \qquad (٢-١١)$$

يمثل الحد $n_2(t)$ في هذه العلاقة الضجيج العشوائي ضمن نطاق المرشح $1/T_{chip}$.

بعد ذلك تُضرب الإشارة $r_2(t)$ -مرة أخرى- بنسخة مطابقة لمتتالية النثر $s(t)$ التي استُخدمت في المرسل، وذلك باستخدام دالة XOR. ونكرر التنويه في هذا السياق إلى أن متتالية النثر المولَّدة في المستقبل يجب أن تكون متزامنة بشكل مثالي مع متتالية المرسل. بذلك نحصل عند النقطة (ج) على الإشارة:

$$r_3(t) = \frac{A}{2}m(t) + \frac{J}{2}s(t)\cos(\theta) + n_3(t) \qquad (٢-١٢)$$

وذلك بعد مراعاة أنَّ العلاقة $s^2(t) = 1$ صالحة دائماً نظراً لنمط NRZ، وأنَّ ضرب التشويش $n_2(t)$ بالمتتالية $s(t)$ ليست له أية خاصة مميزة من الناحية الإحصائية. هذا يعني أن الإشارة $n_3(t)$ لها نفس عرض النطاق الخاص بـ $n_2(t)$، وهو $1/T_{chip}$.

تُبرز العلاقة (٢-١٢) أمراً جوهرياً يجب التنويه إليه، فرغم افتراضنا أن إشارة التشويش ذات تردد مركزي مقداره f_c، محاكاةً لأسوأ حالة ممكنة، نجد أن الحد الأول من الإشارة $n_3(t)$ يمثل متتالية المعلومات ويشغل بذلك نطاقاً ترددياً مقداره $1/T_{bit}$، بينما يمثل الحد الثاني $(J/2)\,s(t)\cos(\theta)$ إشارة تشويشٍ معدَّلة، وذات نطاق أعرض بكثير مقداره $1/T_{chip}$. هذا يعني أن عملية فك النثر تؤدي الى إعادة تركيز طاقة الإشارة ضمن مجالها الأساسي من جهة، وإلى نثر إشارة التشويش في الوقت نفسه، ما يكافئ انخفاضاً ملحوظاً للكثافة الطيفية لاستطاعة التشويش بعد النقطة (ج).

نذكِّر قبل مناقشة الخطوات التالية بأن كفاءة المستقبل تكون مُثلى عندما يكون مرشح استخلاص الإشارة يحقق خصائص "المرشح الموائم" "Matched Filter"، بحيث تكون نسبة الإشارة إلى الضجيج عظمى عند مخرجه. لذا ننطلق من أن المرشح الأخير في الشكل، أي الذي يلي النقطة (ج)، يتمتع بهذه الخصائص والتي نلخصها في ما يلي (انظر [١٤]):

- "الاستجابة النبضية" "Impulse Response" للمرشح موائمة لشكل النبضات المكوِّنة للإشارة المرغوبة عند المدخل، يعني ذلك ضمن السياق الذي نناقشه، أن الإستجابة النبضية للمرشح تعطى بالعلاقة:

$$h(t) = \begin{cases} 1, & 0 \le t \le T_{bit} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \qquad (٢-١٣)$$

- إذا كانت الإشارة عند المدخل تمثل ضجيجاً عشوائياً ذا كثافة طيفية مقدارها $S_{input}(f)$، وإذا كانت الاستجابة الطيفية للمرشح هي $H(f)$، فإن الكثافة الطيفية للإشارة عند المخرج تكون:

$$S_{output}(f) = S_{input}(f)\,|H(f)|^2 \qquad (٢-١٤)$$

- إذ كانت إشارة المدخل تتمثل بضجيج حراري عشوائي ذي كثافة طيفية مقدارها $N_0/2$، فإن طاقة الضجيج التي تُرصد عيناتها عند المخرج، والتي ندل عليها بـ σ_n^2، تعطى بالعلاقة:

$$\sigma_n^2 = \frac{N_0}{2}\,T_{bit} \qquad (٢-١٥)$$

وذلك بافتراض أن الرصد الدوري للعينات في المستقبل يجري عند اللحظات $t = T_{bit}$ (انظر الشكل ٢-١٥).

- بالإضافة إلى ما سبق، نذكِّر بأننا افترضنا أن "المرشح ذا نطاقِ تمريرٍ منخفض" "Low-Pass Filter" بعرضٍ مقداره $1/T_{bit}$، وأنه مثالي الأداء، أي أن $|H(f)|^2 = 1$ ضمن مجال التمرير.

نعود الآن إلى متابعة خطوات معالجة الإشارة، حيث يعبّرُ الجزء الممثِّل للإشارة المرغوبة $(A/2)m(t)$ المرشح الموائم دون أي تعديل، نظراً لكون المرشح مثالياً. لذا تكون استطاعة الإشارة المرغوبة عند النقطة (د) هي:

$$P_{so} = \frac{A^2}{4} \qquad (٢-١٦)$$

أما طاقة التشويش، والمتمثلة بالحد الثاني من العلاقة، فيتطلب حسابها بعض التفصيل، الذي نسوق خطواته في ما يلي:

بما أننا افترضنا أن إشارة النثر $s(t)$ تتألف من نبضات متتالية لا تتبع نمطاً منتظماً لتناوب قيمها، فإن احتمال ورود القيمة الموجبة "+1" يكون مساوياً لاحتمال ورود القيمة السالبة "-1"، هذا يعني أن الكثافة الطيفية لهذه الإشارة تعطى بالعلاقة التالية (انظر [٨]):

$$S_s(f) = T_{chip}\,\mathrm{sinc}^2(\pi T_{chip} f) \qquad (٢-١٧)$$

نتيجةً لذلك تكون الكثافة الطيفية لإشارة التشويش عند النقطة (ج) هي:

$$\begin{aligned} S_{i3}(f) &= \frac{J^2\cos^2(\theta)T_{chip}}{4}\,\mathrm{sinc}^2(\pi T_{chip} f) \\ &= \frac{J^2 T_{chip}}{8}\,\mathrm{sinc}^2(\pi T_{chip} f) \end{aligned} \qquad (٢-١٨)$$

وذلك بعد مراعاة أن متوسط $\cos^2(\theta)$ لكل القيم الممكنة لـ θ هو $1/2$.

باعتماد العلاقة (٢-١٤)، وكون المرشح مثالياً ضمن نطاق التمرير، نحصل على الكثافة الطيفية للإشارة عند مخرج المرشح، أي عند النقطة (د)، كما يلي:

$$S_{i4}(f) = |H(f)|^2\ S_{i3}(f) = |H(f)|^2\ \frac{J^2 T_{chip}}{8}\,\mathrm{sinc}^2(\pi T_{chip} f) \qquad (٢-١٩)$$

$$= \begin{cases} \dfrac{J^2 T_{chip}}{8}\,\mathrm{sinc}^2(\pi T_{chip} f), & |f| \le \dfrac{1}{T_{bit}} \\ 0, & |f| > \dfrac{1}{T_{bit}} \end{cases}$$

وحيث أن $1/T_{bit} \ll 1/T_{chip}$، فإن قيمة الحد $\mathrm{sinc}(\pi T_{chip} f)$ تساوي 1 تقريباً لكل الترددات ضمن مجال التمرير. لذلك يمكن تقريب العلاقة (٢-١٩) لتصبح:

$$S_{i4}(f) = \begin{cases} \dfrac{J^2 T_{chip}}{8}, & |f| \leq \dfrac{1}{T_{bit}} \\ 0, & |f| > \dfrac{1}{T_{bit}} \end{cases} \qquad (٢٠-٢)$$

إنطلاقاً من هذه العلاقة يمكن حساب مقدار استطاعة إشارة التشويش عن طريق تكامل منحنى الكثافة الطيفية ضمن مجال التمرير، أي:

$$P_{io} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{i4}(f)df = \int_{-1/T_{bit}}^{1/T_{bit}} \frac{J^2 T_{chip}}{8} df = \frac{J^2 T_{chip}}{4T_{bit}} \qquad (٢١-٢)$$

ومن ثم يمكن الحصول على صيغة نهائية تربط بين نسبة طاقة التشويش إلى طاقة الإشارة عند مدخل ومخرج المستقبل، وذلك عن طريق العلاقتين (٢-١٦) و (٢-٢١)، اللتين تُفضيان بعد تعويض قيمة SIR_{in} من (٢-٩) إلى:

$$\begin{aligned} SIR_{out} &= \frac{P_{so}}{P_{io}} = \frac{A^2 \ / \ 4}{J^2 T_{chip} \ / \ 4T_{bit}} = \frac{A^2}{J^2} \frac{T_{bit}}{T_{chib}} \\ &= SIR_{in} \frac{T_{bit}}{T_{chip}} \end{aligned} \qquad (٢٢-٢)$$

تعبِّر هذه المعادلة رياضياً عن أهم الخصائص التي تضيفها تقنية نثر الطيف على أداء المستقبل في حال وجود إشارة تشويش ضيقة النطاق، والتي تتلخص في ما يلي:

١) لما كانت مدة نبضة المعلومات أطول بكثير من مدة نبضة الرمز، فإن المعادلة السابقة تدل أن خطوات فك النثر تؤدي إلى خفض المستوى النسبي للتشويش بين مدخل ومخرج المستقبل، بمقدارٍ يتناسب طرداً مع نسبة مدة نبضة المعلومات أو الـ بت إلى مدة نبضة النثر، أي T_{bit}/T_{chip} . يطلق على هذه النسبة اسم "عامل (أو معدل) النثر" "Spreading Factor"، ويرمز له بـ SF . هذا يعني أن الفحوى الجوهري للعلاقة (٢-٢٢) هو:

$$SIR_{out} = SIR_{in} \, SF \qquad (٢٣-٢)$$

٢) نلحظ من العلاقات السابقة أيضاً ما أشرنا إليه عند نقاش الشكل ٢-١٤ (انظر العلاقتين (٢-٤) و (٢-٥))، حيث أن قيمة عامل النثر تكافئ نسبة عرض نطاق الإشارة المنثورة إلى عرض نطاق متتالية المعلومات. يعني ذلك أن عملية النثر تكون أكثر فاعلية كلما كانت زيادة عرض المجال الطيفي أكبر، إذ يؤدي ذلك إلى نثر طاقة التشويش على نطاق ترددي أعرض، ومن ثم خفض قيمة الكثافة الطيفية لاستطاعة الإشارة غير المرغوبة، وكبت أثرها على نحوٍ أفضل. لذا، يطلق على النسبة بين نطاق الإشارة الناتجة عن عملية النثر ونطاق الإشارة لأصلية، مقيسةً بالوحدات اللوغاريتمية،

التعبير الاصطلاحي "ربح إجراء النثر" "Processing Gain"، والذي نرمز له بـ PG ، ويُعطى بالعلاقة:

$$PG|_{\text{dB}} = 10\log_{10}\left(\frac{BW_{chip}}{BW_{bit}}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{R_{chip}}{R_{bit}}\right) \qquad (٢٤-٢)$$

حيث يدل الرمز BW_{chip} على نطاق الإشارة بعد النثر، و BW_{bit} على نطاق إشارة المعلومات الأصلية. كما يشير R_{chip} و R_{bit} إلى معدل دفق كلٍّ من متتالية النثر ومتتالية المعلومات، على التوالي.

٣) يتجلى مما سبق أيضاً السبب الرئيسي لاستخدام تقنية نثر الطيف لأغراضٍ عسكرية، إذ توفر حصانة من اكتشاف الإشارة المنثورة، ومناعة من الاعتراض المتعمد للإشارة المرغوبة.

٢-٣-٣ أداء المستقبل بوجود تشويشٍ عريض النطاق

ننتقل الآن إلى شرح كيفية استخدام نثر الطيف كمبدأ لإنجاز أو تحقيق النفاذ المتعدد، وما يميز هذه الحالة عن سابقتها هو أن "التشويش" ينشأ عن إشارات تستخدم نفس القناة الترددية للإشارة المرغوبة، وتماثلها من حيث عرض النطاق المشغول.
نرجع إلى الشكل ٢-١٥ ونفترض أن التشويش ينشأ عن مشتركٍ آخر يرسل إشارته على نفس الحامل، ولكن باستخدام متتالية مختلفة. يمكن أن نصف الإشارة المستقبَلة في هذه الحالة كما يلي:

$$r(t) = A_1 m(t)s_1(t)\cos(2\pi f_c t) + A_2 s_2(t-t_d)\cos(2\pi f_c(t-t_d)) + n(t) \qquad (٢٥-٢)$$

حيث تمثل $s_1(t)$ متتالية المستخدم ذي الإشارة التي نود استخلاصها، و $s_2(t)$ متتالية المستخدم الآخر، أما t_d فهو عامل تأخير زمني يدل على كون إشارتي المستخدمَيْن غير متزامنتين على نحوٍ مثالي، وهي الحالة الغالبة التي نصادفها في الواقع، نظراً لاختلاف بُعدِ كل مشترك عن المحطة الثابتة، ومن ثم اختلاف الوقت الذي تحتاجه الإشارة الصادرة عنه للوصول إلى المستقبِل.

ننوه على أننا لم نذكُر متتالية المعلومات $m_2(t)$ صراحةً في الحد الثاني من المعادلة (٢-٢٥)، والذي يمثل الجزء غير المرغوب من الإشارة، ذلك أن المستقبل ليس لديه علم بتفاصيل إشارة التشويش، ولا يميِّز جزء المعلومات منها. لذلك تمثل كلٌّ من الإشارتين $s_2(t)$ و $s_2(t)m_2(t)$ من منظور المستقبل متتاليةً شبه عشوائية من النبضات، مدة كل منها T_{chip} ، فهُما إذاً سواء، لذا يمكن الاستغناء عن $m_2(t)$ لتبسيط النقاش وللتركيز على المبدأ الأساسي.

باتباع نفس السياق الذي عرضناه للمعادلات (٢-١٠) إلى (٢-١٢)، نجد أن الإشارة عند النقطة (أ) هي:

$$r_1(t) = A_1 m(t)s_1(t)\cos(2\pi f_c t) + A_2 s_2(t-t_d)\cos(2\pi f_c(t-t_d)) + n_1(t) \qquad (٢٦-٢)$$

أما مقدارها عند النقطة (ب) فهو:

$$r_2(t) = \frac{A_1}{2} m_1(t) s_1(t) + \frac{A_2}{2} s_2(t - t_d) \cos(2\pi f_c t_d) + n_2(t) \qquad (٢٧-٢)$$

يجب الإنتباه هنا إلى أن الحد $\cos(2\pi f_c t_d)$ ليس تابعاً للزمن وإنما يمثل –كما سبق التنويه– قيمة ثابتة ناتجة عن عدم تزامن المستقبل مع الحامل الترددي للمستخدم الثاني.

يجري في الخطوة التالية جداء الإشارة بالمتتالية $s_1(t)$ ، فنحصل على:

$$r_3(t) = \frac{A_1}{2} m_1(t) + \frac{A_2}{2} s_1(t) s_2(t - t_d) \cos(2\pi f_c t_d) + n_3(t) \qquad (٢٨-٢)$$

وعندما تمر الإشارة $r_3(t)$ عبر المرشح الموائم، فإن هذا يؤدي إلى قيم العينات التالية [٨]:

$$r_4(T_{bit}) = \pm \frac{A_1}{2} T_{bit} + \frac{A_2}{2} \cos(2\pi f_c t_d) \int_0^{T_{bit}} s_1(t) s_2(t - t_d)\, dt + n_4 \qquad (٢٩-٢)$$

تعتمد قطبية الحد الأول في هذه العلاقة على قيمة بت الإشارة أو المعلومات المرغوبة. أما الحد الثاني، فهو يمثل التشويش الناجم عن المشترك الثاني، ونلاحظ أن هذا الحد يشابه علاقة "الترابط الإحصائي المتبادل" "Cross Correlation" بين المتتاليتين $s_1(t)$ و $s_2(t)$. هذا يعني أن مقدار التشويش مرتبط ارتباطاً مباشراً بالخصائص الرياضية للمتتاليات المستخدَمة من قبل المستخدمَيْن المختلفَين، وتحديداً بمقدار الترابط الإحصائي المتبادل بينها.

لبيان مقدار هذا التشويش نفترض من أجل التبسيط أن المستقبل الأول (بين النقطتين (أ) و (ب)) لا يفرق بين الترميز الناتج $s_2(t)$ ، وبين أية متتالية عشوائية أخرى من النبضات، لذلك عندما تُضرب المتتالية $s_2(t - t_d)$ بالمتتالية $s_1(t)$ ، ثم تُمرَّر عبر المرشح الموائم، تكون النتيجة إشارة عشوائية محاكية للضجيج ومنتشرة على نطاق أعرض بكثير من نطاق تمرير المرشح. لذا يمكن اعتبار أن إشارة التشويش تمثل ضجيجاً عشوائياً من حيث خصائصها، ومن ثم يمكن اعتماد العلاقة (٢-١٤) لحساب استطاعة أو طاقة التشويش عند مخرج المرشح.

بالعودة إلى العلاقة (٢-٢٩) نجد أن الحد الأول يعطي قيمة عينات الإشارة المرغوبة عند خرج المرشح، والتي تساوي $\pm(1/2)\, A_1 T_{bit}$ ، بذلك تكون استطاعة الإشارة المرغوبة هي:

$$P_{s4} = \frac{A_1^2 T_{bit}^2}{4} \qquad (٣٠-٢)$$

على نحوٍ مشابه، نشتق من الحد الأول في العلاقة (٢-٢٥) أن الإستطاعة المتوسطة للإشارة عند مدخل المستقبل هي:

$$P_s = \frac{A_1^2}{2} \qquad (٣١-٢)$$

بمقارنة المعادلة (٢-٣٠) مع المعادلة (٢-٣١) نجد أن:

$$P_{s4} = \frac{P_s T_{bit}^2}{2} \tag{٢-٣٢}$$

ننتقل الآن لتمثيل إشارة التشويش، حيث تبين العلاقة (٢-٢٨) أن مقدارها عند مدخل المرشح الموائم هو:

$$r_{i3}(t) = \frac{A_2}{2}\cos(2\pi f_c t_d)\, s_1(t) s_2(t - t_d) \tag{٢-٣٣}$$

وبما أن $s_1(t)$ و $s_2(t)$ تمثلان متتاليتين عشوائيتين بنمط NRZ، فمن الممكن اعتبار حاصل جدائهما $s_1(t)s_2(t-t_d)$ متتالية عشوائية أيضاً، ما يعني أن طيف كثافة الاستطاعة لحاصل الجداء يساوي تقريباً:

$$S_{s1s2}(f) \cong T_{chip}\mathrm{sinc}^2(\pi T_{chip} f) \tag{٢-٣٤}$$

وهذا يؤدي إلى الكثافة الطيفية التالية لاستطاعة التشويش:

$$\begin{aligned} S_{i3}(f) &= \frac{A_2^2}{4}\langle \cos^2(2\pi f_c t_d)\rangle S_{s1s2}(f) \\ &= \frac{A_2^2}{4}\frac{1}{2}T_{chip}\,\mathrm{sinc}^2(\pi T_{chip} f) = \frac{A_2^2}{8}T_{chip}\,\mathrm{sinc}^2(\pi T_{chip} f) \end{aligned} \tag{٢-٣٥}$$

وذلك باستخدام المعادلة (٢-٣٤)، ومراعاة أن $\langle \cos^2(2\pi f_c t_d)\rangle = 1/2$.

بما أن المرشح الموائم ذا نطاق تمرير منخفض عرضه $1/T_{bit}$، واستناداً إلى أن $1/T_{chip} \gg 1/T_{bit}$، فإن الطيف $S_{i3}(f)$ يكون عريضاً جداً بالمقارنة مع نطاق التمرير. لذا يمكن اعتبار أن $\mathrm{sinc}^2(T_{chip}f) \approx 1$ للقيم الترددية الواقعة ضمن مجال التمرير ($f \ll 1/T_{chip}$)، لذا نحصل على صيغة مبسطة للعلاقة السابقة هي:

$$S_{i3}(f) \approx \frac{A_2^2}{8}T_{chip} \tag{٢-٣٦}$$

يمكن الآن الإستعانة بالعلاقة (٢-١٤) لتمثيل الكثافة الطيفية للاستطاعة عند مخرج المرشح:

$$S_{i4}(f) = |H(f)|^2 \frac{A_2^2}{8}T_{chip} \tag{٢-٣٧}$$

ومن ثم نحصل على متوسط استطاعة إشارة التشويش عن طريق تكامل العلاقة (٢-٣٧) على نحوٍ يشمل الطيف كله.

يقود ذلك إلى:

$$P_{i4} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{i4}(f)df = \frac{A_2^2}{8} T_{chip} \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 df$$
$$= \frac{A_2^2}{8} T_{chip} \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t)dt = \frac{A_2^2}{8} T_{chip} T_{bit} \quad (٣٨-٢)$$

ننوه هنا إلى أننا استبدلنا الإستجابة الطيفية بتكامل الاستجابة النبضية وفقاً لقانون "Parseval"، كما اعتبرنا أن الإستجابة النبضية للمرشح الموائم في هذه الحالة معطاة بالعلاقة (٢-١٣).

إذا رجعنا إلى المعادلة (٢-٢٥)، نجد أن متوسط إستطاعة إشارة التشويش عند مدخل المستقبل هو $P_i = A_2^2/2$. بتعويض هذه القيمة في العلاقة (٢-٣٨) نحصل على:

$$P_{i4} = \frac{P_i}{4} T_{chip} T_{bit} \quad (٣٩-٢)$$

إن تأثير التشويش على أداء النظام يبينه مقدار نسبة الإشارة المرغوبة إلى مجموع كل الإشارات غير المرغوبة عند مخرج المرشح الموائم، يشمل ذلك تداخل المستخدم الآخر و الضجيج العشوائي الحراري. وقد حصلنا على تشويش إشارة المستخدم من العلاقة (٢-٣٩)، أما تاثير الضجيج، فتعطيه العلاقة (٢-١٥). لذا، بمقارنة المعادلات (٢-٣٢) و (٢-٣٩)، واستخدام (٢-١٥)، نحصل على النتيجة النهائية لنسبة الإشارة المرغوبة إلى مجموع التشويش والضجيج، وهي:

$$SINR = \frac{P_{s4}}{P_{i4} + \sigma_{n4}^2} = \frac{\frac{P_s T_b^2}{2}}{\frac{P_i}{4} T_{chip} T_{bit} + \frac{N_0}{2} T_b}$$
$$= 2 \frac{P_s}{P_i} \frac{T_{bit}}{T_{chip}} \frac{1}{1 + 2 \frac{N_0}{P_i T_{chip}}} \quad (٤٠-٢)$$

تتميز هذه العلاقة بأهمية كبيرة، إذ تُفضي إلى عددٍ من الاستنتاجات الجوهرية، أهمها:

١) يتناسب مقدار التشويش النسبي عند مخرج المرشح الموائم عكساً مع عامل النثر T_{bit}/T_{chip}، فكلما كان عامل النثر أكبر، انخفض التأثير السلبي للتشويش.

٢) إذا كانت الإشارة المرغوبة تخص مشتركاً بعيداً عن المحطة، فإن النسبة P_s/P_i يمكن أن تكون ضئيلة جداً، ومن الممكن في هذه الحالة أن لا يكون عامل النثر كافياً للتغلب على تأثير التشويش. تعطي هذه الحالة مثالاً على مشكلة آثار تفاوت قُرْب وبُعْد المشتركين، والتي سنتطرق إليها في البحث ٢-٣-٥. لذلك تُولي أنظمة CDMA موضوعَ التحكم باستطاعة كل وحدة متحركة عناية خاصة، حيث يجري تعديل طاقة بث كل وحدة متحركة بحيث يكون مقدار الطاقة الذي تستقبله المحطة الثابتة متساوياً تقريباً لكل المشتركين. وإذا تحقق ذلك فإن العلاقة (٢-٤٠) تصبح:

$$SINR = 2\frac{T_{bit}}{T_{chip}}\frac{1}{1+2\dfrac{N_0}{P_s T_{chip}}} \qquad (٢-٤١)$$

فإذا كان هناك أكثر من مشترك، أمكن للتشويش الناجم عنهم يُجمع تراكمياً، فلو كان عدد المشتركين هو K، وكان كلٌّ منهم يستخدم نفس الحامل ومتتالية نثرٍ خاصة به، وإذا كان التحكم بطاقة كل المشتركين يُنجز بحيث تستقبل المحطة الثابتة كل الإشارات بنفس مستوى الطاقة، فإن مقدار الإشارة إلى التشويش يكون:

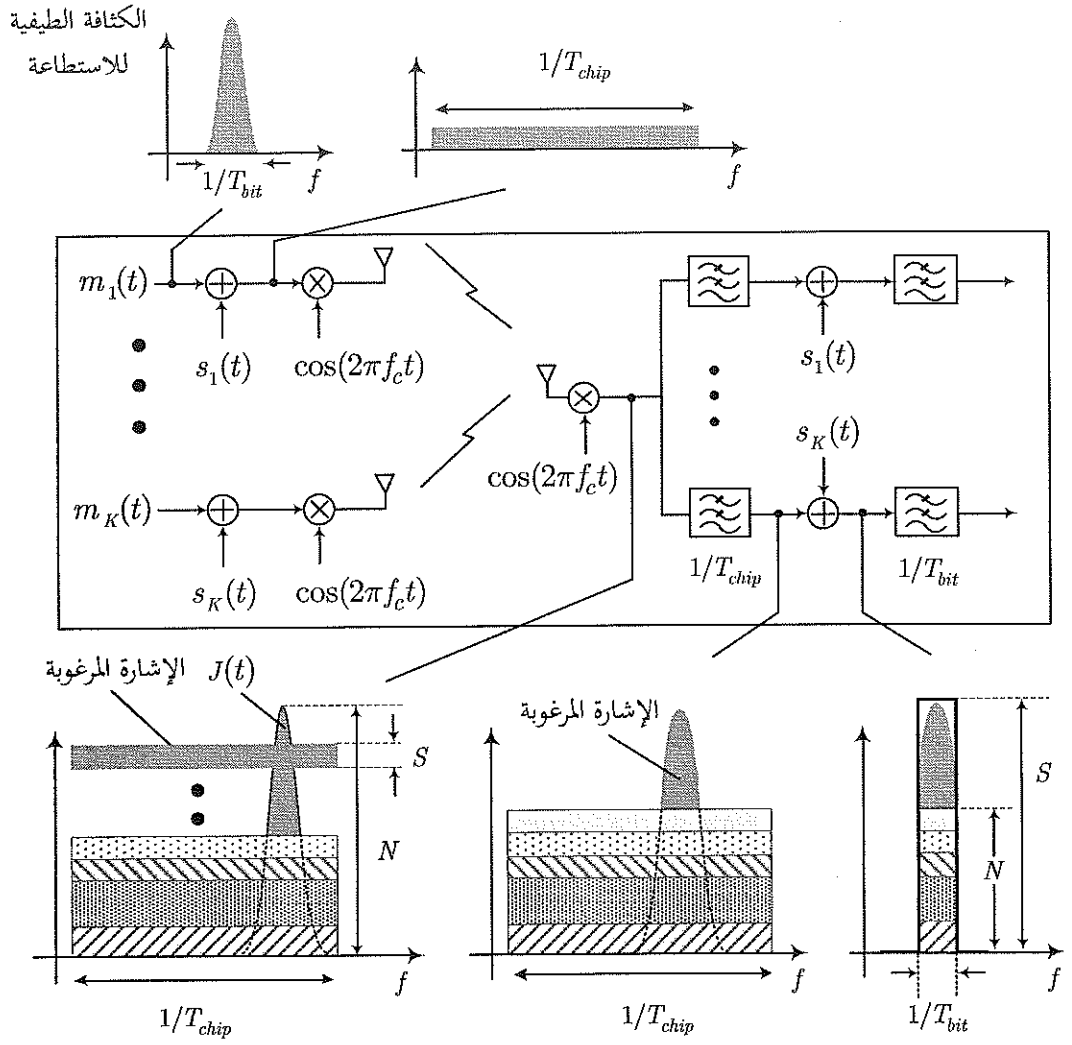
$$SINR = 2\frac{T_{bit}}{T_{chip}}\frac{1}{(K-1)+2\dfrac{N_0}{P_s T_{chip}}} \qquad (٢-٤٢)$$

٣) نقرأ من العلاقة (٢-٤٢) أن مستوى التشويش هو الذي يحدد سعة النظام، أي أن عدد المشتركين الفاعلين ضمن خليةٍ ما مقيَّدٌ بمقدارِ نسبة الإشارة إلى الضجيج المسموح به. لذا توصف أنظمة CDMA بأنها أنظمة "محدودة السعة بسبب التشويش" "Interference Limited Systems"، وهذا يختلف طبعاً عن أنظمة "FDMA/TDMA"، مثل نظام GSM، حيث يتحدد العدد الأعظمي للمشتركين بعرض النطاق الترددي المتاح، ومن ثم بعدد القنوات الترددية التي يمكن توفيرها لاستيعاب إشارات المشتركين. من هنا يطلق على هذه الأنظمة مصطلح "أنظمة محدودة السعة بسبب عرض النطاق المتاح"، الذي يرادفه باللغة الإنكليزية تعبير "Bandwidth Limited Systems".

تجدر الإشارة في هذا السياق إلى أن معظم نظم نثر الطيف تعمل باستخدام متتاليات يتم اختيارُها بحيث تكون شبه عشوائية، نظراً للخصائص الإيجابية التي تتمتع بها هذه المتتاليات من الناحية الرياضية، والتي تؤدي إلى رفع كفاءة التمييز بين المشتركين، ومن ثم خفض مستوى التشويش في المستقبل. هذا وسنناقش لاحقاً بعض مبادئ اختيار هذه المتتاليات، دون الخوض في التفاصيل الرياضية، والتي نحيل القارئ المهتم بها إلى المراجع الخاصة بذلك ([١١] و [١٣] على سبيل المثال).

يلخص الشكل ٢-١٦ المبادئ الأساسية التي ناقشناها لغاية الآن، حيث يصف حالة وجود عدد مقداره K من المستخدمين، يجري تعديل إشارة كل منهم وفق الخطوات التي تقدم ذكرها، وباستخدام متتالية نثرٍ خاصة.

يصبُّ مجموع كلِّ الإشارات، إضافة إلى الضجيج، عند هوائي المستقبل، ثم تجري عملية فك النثر لكل إشارة في مسارٍ مستقلٍ، عن طريق حساب جداء مجموع الإشارات المستقبَلة بكل متتالية من المتتاليات المستخدَمة في المرسل. يبين الشكل هذه الخطوات للمشترك المشار إليه بالرقم 1، إذ تؤدي عملية فك النثر لإشارة هذا المشترك إلى تركيز طيفها في نطاق ضيق، ومن ثم إلى رفع كثافة استطاعتها الطيفية ضمن المجال $1/T_{bit}$، ونظراً لبقاء الإشارات الأخرى غير المرغوبة منثورة على المجال $1/T_{chip}$، تبقى طاقتها موزعة على نطاق عريض، ويبقى مستوى كثافتها الطيفية منخفضاً جداً. لذا يتمكن كاشف الإشارة الذي يلي المرشح الموائم (غير مبين في الشكل) من تمييز قطبية الإشارة المرغوبة على نحوٍ فعال، حيث يكون مستوى الإشارة منسوباً إلى مجموع الضجيج والتشويش قد ارتفع بدرجة ملحوظة.



الشكل ٢-١٦: المبدأ الأساسي للنفاذ المتعدد بتمييز الترميز.

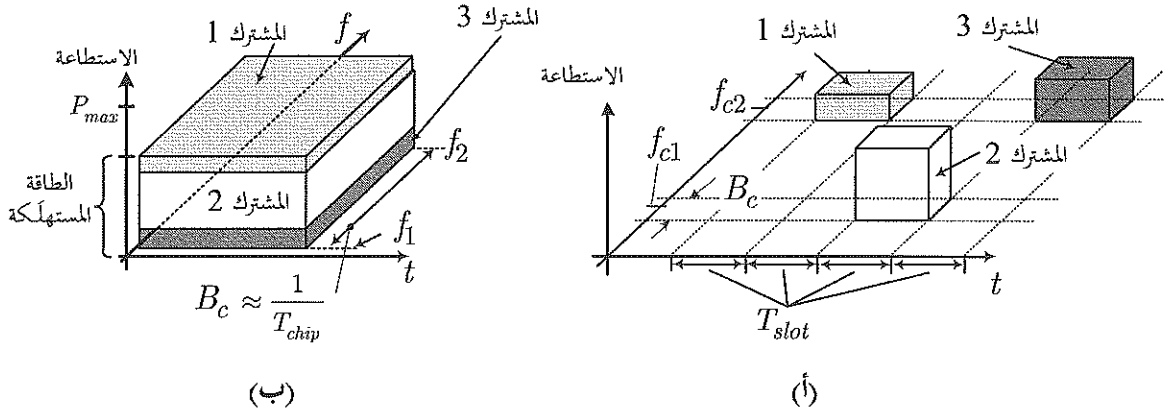
نختم هذا البحث بذكر بعض السمات الإضافية لأنظمة CDMA والتي يجدر ذكرها في هذا السياق:

- تعتمد نظم CDMA عادةً قيمة ثابتة لمعدل دفق الإشارة الناتجة عن عملية النثر، والتي يجري تعديلها بغرض إرسالها عبر المنفذ الراديوي. فعلى سبيل المثال يعتمد نظام UMTS بتقنية WCDMA معدل دفقٍ مقداره 3.84 Mchip/s بين المرسل والمستقبل. لذا يتحدد عامل النثر لكل خدمة تبعاً لنسبة معدل دفقها إلى القيمة المذكورة، فكلما ازدادت سرعة المعلومات المتبادلة، نقصت قيمة عامل النثر. فعلى سبيل المثال، يُستخدم عامل نثر مقداره 256 لتأمين قناة اتصال ذات معدل نقلٍ للمعطيات مقداره 15 kb/s (3840/256). يمكن لهذه القناة أن توفر اتصالاً صوتياً بمعدل دفق صافٍ مقداره 7.95 kb/s (الفرق في معدل الدفق يُستهلك لترميز القناة ولتوفير المعلومات الخاصة بالتحكم، انظر الفصل ٥). من جانبٍ آخر، تحتاج التطبيقات ذات معدلات النقل أو الدفق الأعلى، مثل التتبع الحي لصفحةِ أخبارٍ بالصوت والصورة، إلى قناة اتصال ذات معدل دفق مقداره 240 kb/s على الأقل، ما يتطلب عامل نثر مقداره 16. هذا وتتراوح قيم عامل النثر في نظام UMTS بين 4 و256 للمسار الصاعد، و4 إلى 512 للمسار الهابط [١٠].
- كنا قد ناقشنا في الفصل ١ مفهوم الموارد الفيزيائية المتاحة للنظام، وأوضحنا ماهية هذه الموارد عند الحديث عن أنظمة النفاذ المتعدد باقتسام الزمن أو التردد. لذا من الضروري إكمال هذا البيان بتوضيح ماهية المورد الفيزيائي الذي يجري التشارك به في أنظمة CDMA.

بالعودة إلى الشكل ٢-١٦ نجد أن دور كلٍّ من المتتاليات المختلفة يحاكي دور "شيفرة" أو "رمز" مختلف لكل مشترك، لذا يمكن أن نصف عملية النثر في كل مرسل بأنها "ترميز" للمشترك، حتى يسهل تمييزه عن غيره من المشتركين. ونشير هنا إلى وجود لَبْسٍ شديد في كثير من المراجع التي تعالج وتناقش هذا الموضوع، حيث يُشار للمتتاليات المختلفة (الشيفرات) بأنها المورد الفيزيائي أو القناة الفيزيائية التي تُستخدم لإنجاز الاتصال، وهذا مجانبٌ للصواب. فهذه المتتاليات تتيح إمكانية التمييز بين المشتركين، غير أنها ليست المورد الفيزيائي الفعلي، إذ أنها نِتاجُ خوارزمياتٍ رياضيةٍ معينة، ويمكن زيادة عددها رياضياً وبرمجياً ببساطة، بحيث تتجاوز أضعاف عدد المشتركين المنطقي ضمن أي خلية (انظر [١٠]). أما المورد الفيزيائي الفعلي الذي يجري التشارك به فهو طاقة المحطة الثابتة التي لا يمكن أن تتجاوز قيمة عظمى محددة. فنظراً لأن جميع المشتركين يستخدمون الحامل الترددي ذاته، وينجزون اتصالاتهم آنياً، تنجز المحطة الثابتة الاتصال مع جميع المشتركين في نفس الوقت. لذا يخصص لكل مشترك فاعلٍ ضمن الخلية جزءٌ من طاقة المحطة، فإذا تجاوز عدد المشتركين رقماً أعظمياً، فإن الطاقة المتوفرة لعمل المحطة الثابتة لا تكون كافية لتحقيق الاتصال بهم جميعاً. لذا يَمنع النظام ولوج أي مشترك جديد إلى الخلية عندما تقارب طاقة الإرسال في المحطة الثابتة عتبةً عظمى محددة.

بناءً على ذلك يمكن القولُ أن المعنى الفيزيائي الصحيح لهذه التقنية هو "النفاذ المتعدد باقتسام الطاقة"، غير أن اسم "اقتسام الترميز" غلب على المراجع، لذلك احترنا مصطلح "النفاذ المتعدد بتمييز الترميز" كي نقارب بين المصطلح المتداول والمعنى الفيزيائي الصحيح. يؤكد هذا المعنى الشكل التوضيحي المتداول في كثير من المراجع التي تتناول الطيف المنثور بالشرح، والذي يشابه الجزء (ب) من الشكل ٢-١٧. ونحن نضع هذا الشكل بين يدي القارئ لعقد مقارنة بين المورد الفيزيائي الذي يشغله المشترك في نظم FDMA/TDMA (الجزء أ)، وذاك الذي توفره نظم CDMA (الجزء ب). فمن

الجليّ أن نظم FDMA/TDMA توفر لكل مشترك حيزاً زمنياً معيناً ضمن قناة ترددية محددة، كمورد فيزيائي للتواصل، بغض النظر عن الطاقة التي يستهلكها. أما في نظم CDMA، فلا يتقاسم المشتركون الوقت أو النطاق الترددي، وإنما الطاقة التي توفرها المحطة، حيث يمثل مجموع الطاقة المستهلكة من قبل المشتركين الفاعلين، الجزء المشغول من المورد الفيزيائي المتاح، وهو الطاقة العظمى للمحطة، المُشار إليها بـ P_{max} في الشكل.



الشكل ٢-١٧: مقارنة بين الموارد الفيزيائية في نظم FDMA/TDMA ونظم CDMA.

- من خصائص نظم CDMA أيضاً، أن مقدار الطاقة الضرورية لتحقيق اتصالٍ ما يتناسب طرداً مع معدل دفق المعلومات المراد إرسالُها. يعني ذلك –على سبيل المثال– أن الطاقة التي تُستهلك لتوفير اتصال متعدد الوسائط أكبر بكثير من الطاقة التي يتطلبها إنجاز اتصالٍ صوتي تقليدي. ولمّا كان معدل دفق المعلومات المراد إرسالها يتناسب عكساً مع عامل النثر، فإن مقدار الطاقة الضروري لإنجاز الاتصال يتناسب أيضاً على نحوٍ عكسي مع هذا العامل، كما هو موضح في.الشكل ٢-١٨. من الممكن توضيح هذا المفهوم رياضياً من خلال العلاقة (٢-٤١)، حيث يمكن إعادة ترتيب حدودها لتصبح:

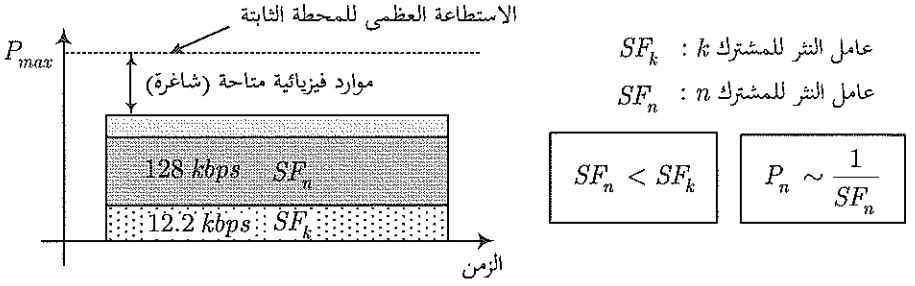
$$PS = \frac{1}{T_{chip}} \frac{2N_0 SNIR}{2\frac{T_{bit}}{T_{chip}} - SNIR} = \frac{1}{T_{chip}} \frac{2N_0 SNIR}{2SF - SNIR} \qquad (٢-٤٣)$$

يمكن لهذه المعادلة أن تُقرأ كما يلي: للحصول على جودة اتصال معينة، بغض النظر عن معدل دفق المعلومات، أي إذا اعتبرنا أن العامل $SNIR$ ذو مقدار ثابت، فإن الاستطاعة المطلوب توفرها عند مدخل المستقبل تتناسب عكساً مع عامل النثر، وذلك بسبب كون المتحولات الأخرى $(N_0 ; T_{chip})$ ثابتة. هذا يعني أن الخدمات ذات السرعة الأعلى لنقل البيانات تتطلب استطاعة أكبر عند نقطة الاستقبال، وهذا بدوره يقتضي مقداراً أكبر من طاقة الارسال.

إستناداً إلى ما سبق، يتعلق عدد المشتركين ضمن الخلية الواحدة بنوعية وطبيعة استخداماتهم وتطبيقاتهم، ومن ثم يتراوح هذا

العدد زيادةً ونقصاناً تبعاً للطاقة المستهلَكة من قِبَل كل مشترك. وبسبب هذه الظاهرة، توصف سعة الخلايا في نظم CDMA بأنها "متكيفة"، وهذا هو المسوغ للمصطلح الإنكليزي "Soft Capacity".

- يطلق على المبدأ الذي ناقشناه مصطلح "النثر المباشر للطيف" "Direct Sequence Spread Spectrum (DS-SS"، ويحمل طيّه دلالة على أن نثر الطيف (أي تعديل المتتالية شبه العشوائية) يُنجز عن طريق ضربها مباشرةً بمتتالية المعلومات. هذا و من الممكن تحقيق مبدأ النثر عن طريق آليات أخرى أشهرها من ناحية الاستخدام في نظم الاتصالات هو "نثر الطيف بالقفز الترددي" "Frequency Hopping Spread Spectrum (FH-SS)"، ولن نُفيض في شرح هذا المبدأ إذ يمكن الرجوع إليه في [١٢] و [١٣].



الشكل ٢-١٨: تناسب الاستطاعة الضرورية للإرسال على نحوٍ عكسي مع عامل النثر.

٢-٣-٤ مبادئ اختيار سلاسل النثر

من الأهمية بمكان اختيار سلاسل النثر المستخدمة في أي نظام على نحو يتيح إجراء عمليتي النثر وفك النثر بأعلى درجة ممكنة من الفعالية، ويُقصد بالفعالية في هذا السياق الإمكانية المثلى للتمييز بين إشارات المستخدمين المختلفة، وأقل درجة ممكنة من التداخل بينها، ما يتيح استخلاص الإشارات الأصلية على أفضل وجه ممكن. لذا، لا بد لسلاسل الترميز من تحقيق بعض الخصائص الرياضية المميَّزة، التي نذكر في ما يلي أهمها:

١) تتمثل عملية فك النثر من الناحية العملية في ضرب الإشارة المستقبَلة بالسلسلة أو المتتالية ذاتها التي استخدمت في عملية النثر، ومن ثم إجراء تكاملٍ للإشارة الناتجة، من أجل استخلاص قطبية أو قيمة نبضة المعلومات (انظر الشكل ٢-١٥ والمعادلة (٢-١٩)). ولما كانت قيمة كل بت ضمن سلسلة المعلومات تُستخلص على حدة، حيث يوافق دور أخذ العينات طول نبضة المعلومات وليس نبضة النثر، فإن عملية التكامل تتكرر وفق دورٍ زمني يعادل مدة أو طول البت الواحد T_{bit}، والذي يكون من المضاعفات الصحيحة لطول نبضة النثر T_{chip}.

كنا أشرنا أيضاً عند نقاش الشكل ٢-١٤ وجوب تحقق تزامن تام بين سلسلة النثر المحفوظة في ذاكرة المستقبل، أي المستخدمة لفك النثر، وتلك التي تُستخدم لنثر الإشارة ضمن إجراءات تحضيرها للإرسال. فإذا تحقق هذا التزامن، أي إذا

كانت الإزاحة الزمنية τ بين السلسلتين أو الإشارتين تساوي صفراً، أدت عملية التكامل إلى قيمة عظمى عند توافق سلسلة النثر مع سلسلة فك النثر. يعني ذلك من الناحية الرياضية أن "معامل الترابط الإحصائي الذاتي" "Autocorrelation Coefficient" لكل من السلاسل المستخدمة، والتي نشير إليها بـ s_i ، يجب أن يحقق العلاقة:

$$R_{s_i}(\tau) = \frac{1}{T_{bit}} \int_{T_{bit}} s_i(t+\tau) s_i(t) dt = \delta(t) \qquad (٢-٤٤)$$

وهذه العلاقة تماثل تماماً إجراء فك النثر، وذلك عند مراعاة أن قيمة أو مطال بت المعلومات غير متغيرة خلال مدة التكامل T_{bit} ، ويمكن عزلها كثابتٍ خارج رمز التكامل.

٢) لتقليل التداخل بين الإشارات المرسلة في نفس الوقت، يجب أن تؤدي عملية فك النثر في حال كون سلسلة النثر s_i وسلسلة المستخدمة لفك النثر في المستقبل s_j مختلفتين إلى قيمة صغيرة جداً، أو إلى الصفر في الحالة المثالية، وذلك بصرف النظر عن قيمة الإزاحة الزمنية بينهما، أي حتى لو كانتا متزامنتين. يُعبر عن ذلك رياضياً بالعلاقة:

$$R_{s_i s_j}(\tau) = \frac{1}{T_{bit}} \int_{T_{bit}} s_i(t+\tau) s_j(t) dt = 0 \qquad (٢-٤٥)$$

والتي تمثل أيضاً الترابط المتبادل بين السلسلتين s_i و s_j .

٣) لما كانت سلاسل النثر تتيح التمييز بين المستخدمين، فإن توفير سعة كبيرة ضمن النظام –من ناحية عدد المشتركين– يتطلب أن يكون عدد السلاسل المتاحة للاستخدام كبيراً. ويجب أن تتوفر هذه السعة بغض النظر عن التطبيقات التي من الممكن أن يستخدمها مشتركون كُثُر في آن واحد.

يتعذر من الناحية العملية تحقيق الشروط الثلاثة السابقة مجتمعة، لذا تمثل السلاسل المستخدمة في الأنظمة التجارية المنتشرة، وأهمها طبعاً نظام UMTS بتقنية WCDMA، اختياراً يفي جزئياً بمجموعة الشروط أو الخصائص السابقة. هذا وقد أثبتت فئتان من سلاسل النثر فعالية عالية ضمن نظم الطيف المنثور، هاتان الفئتان هما سلاسل النثر المتعامدة، وسلاسل النثر شبه العشوائية. لذا نخصهما بشيءٍ من التفصيل، مع بيان وجه وغرض استخدام كل من هاتين الفئتين في نظام UMTS.

٢-٣-٤-١ "متتاليات (سلاسل) النثر المتعامدة" "Orthogonal Spreading Codes"

تُوسَم سلستا نثرٍ بأنهما متعامدتان إذا تحققت بينهما العلاقة الرياضية التالية:

$$\int_{T_{bit}} s_i(t) s_j(t) dt = 0 \qquad (٢-٤٦)$$

يكافئ ذلك أن يكون حاصل جدائهما -باستخدام دالة الخيار المقصور XOR- يفضي إلى سلسلةٍ أو متتاليةٍ ذات عدد متساوٍ من الخانات ذات القيمة "0" والخانات ذات القيمة "1"، كما هو موضح في المثال التالي:

$$1111 \oplus 0101 = 1010 \qquad (٤٧-٢)$$

حيث تكون نتيجة تكامل حاصل الجداء، أي مجموع قيم الخانات مقسوماً على عددها، تساوي صفراً في هذه الحالة.

من الأمثلة على هذه الفئة من السلاسل تلك المستخدمة لإنجاز عمليتي النشر وفك النشر في نظام UMTS والمعروفة باسم."Orthogonal Variable Spreading Factor Codes (OVSF-Codes)"، وأبرز ما يميز هذه المتتاليات او السلاسل ما يلي:

- تحقق هذه المتتاليات خاصية التعامد على نحوٍ جيد وفعال، ويرجع ذلك إلى بنيتها الرياضية، حيث تُستخلص من مصفوفات ذات ترتيب هرمي تعرف بـ "مصفوفات Hadamard"، نسبةً إلى مبتكرها Jacques Hadamard. تتولد هذه المصفوفات وفق الصيغة التكرارية التالية:

$$H_{2n} = \begin{bmatrix} H_n & H_n \\ H_n & \overline{H}_n \end{bmatrix} \qquad (٤٨-٢)$$

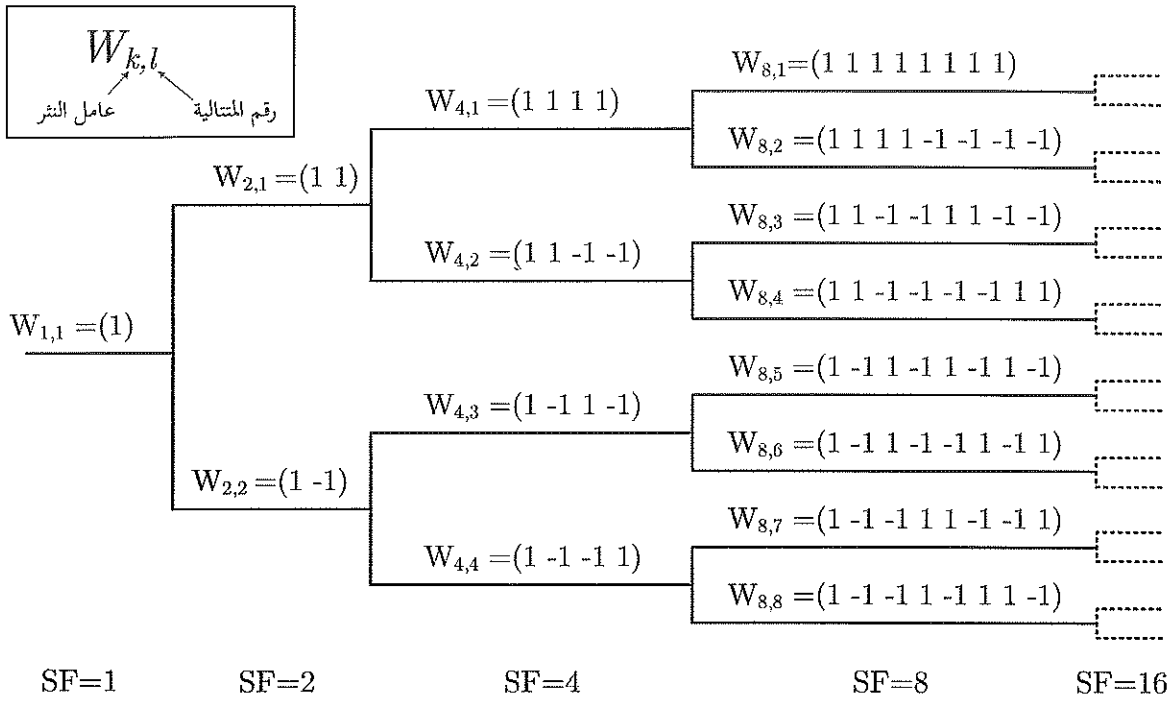
حيث يدل الرمز H_n على مصفوفة من الدرجة n، و H_{2n} على مصفوفة من الدرجة $2n$، وحيث يشير الرمز $\overline{H}_n$ إلى منقول المصفوفة H_n. يوضح ذلك المثال التالي:

$$H_1 = [1] \;\; ; \;\; H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \;\; ; \;\; H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \qquad (٤٩-٢)$$

وقد بيَّن Joseph L. Walsh أن أسطر المصفوفة H_n تمثل متتالياتٍ طول كلٍّ منها n، وتحقق خاصية التعامد التي ذكرناها، أي أن المثال السابق يفضي إلى ما يُسمَّى بـ "متتاليات Walsh-Hadamard" التالية:

$$\begin{aligned} W_{4,1} &= (\ 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1\ ) \\ W_{4,2} &= (\ 1 \quad -1 \quad 1 \quad -1\ ) \\ W_{4,3} &= (\ 1 \quad 1 \quad -1 \quad -1\ ) \\ W_{4,4} &= (\ 1 \quad -1 \quad -1 \quad 1\ ) \end{aligned} \qquad (٥٠-٢)$$

تتيح العلاقات (٢-٤٨) إلى (٢-٥٠) تمثيل متتاليات Walsh بمنظومة هرمية متفرعة من المتتاليات، تتشارك في استخدامها كل الوحدات المتحركة ضمن الخلية الواحدة (انظر الشكل ٢-١٩).

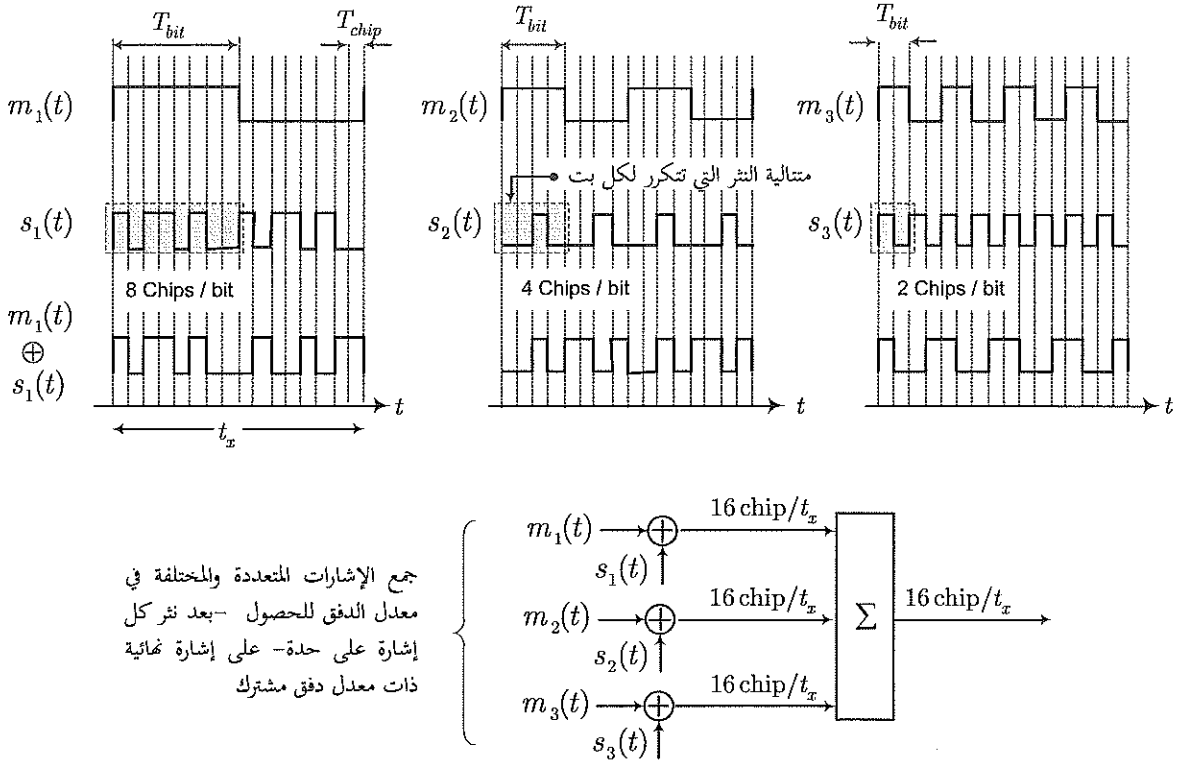


الشكل ٢-١٩: متتاليات Walsh-Hadamard المستخدمة في نظام UMTS.

- تبين البنية الهرمية في هذا الشكل أن طول السلسلة أو المتتالية يمثل عامل النثر، وأن عدد السلاسل المتاحة التي تحقق العلاقة (٢-٤٦) يكافئ عامل النثر المستخدم، فعلى سبيل المثال، هناك 16 متتالية لعامل النثر $SF = 16$، و8 متتاليات لعامل النثر 8، وهكذا. وهذا ما يبرر قصور استخدام عامل النثر $SF = k$ على عدد أقصى من المستخدمين مقداره k. يعني ذلك من ناحية أخرى أنه كلما ارتفع معدل نقل البت الخاص بتطبيق ما، قَلَّ عدد المشتركين الذين بإمكانهم استخدام هذا التطبيق في آنٍ واحد، وهذه سلبية أساسية للمتتاليات المتعامدة.
- يستخدم نظام UMTS معدلاً ثابتاً لدفق النبضات بعد إجراء النثر مقداره 3.84 Mchip/s، أي أن عامل النثر لأي نوع من المعلومات أو التطبيقات يجب اختياره بحيث تفضي عملية النثر إلى إشارة ذات معدل تدفق مقداره 3.840.000 نبضة نثر في الثانية. فعلى سبيل المثال، إذا كانت المعلومات الأصلية تمثل إشارةً صوتية بمعدل دفق مقداره 15 kbps، فإن عامل النثر الضروري في هذه الحالة هو 256، ما يعني أن كل بت يضرب بمتتالية نثرٍ طولها 256 نبضة. وإذا كانت المعلومات الأصلية تتعلق بتطبيقٍ عالي السرعة، مثل تصفح الانترنت أو تحميل ملفاتٍ رقمية بسرعة مقدارها 480 kbps، فإن عامل النثر الضروري في هذه الحالة يكون 8. وبما أن التباين في عوامل النثر يعني اختلافاً في طول متتالية النثر (انظر الفقرة

السابقة)، فقد اصطلح على استخدام تعبير "Orthogonal Variable Spreading Factor Codes (OVSF-Codes)" أي "المتتاليات ذات عامل النثر المتغير" للدلالة على هذه الفئة من سلاسل النثر.

- تتيح عملية النثر بمتتاليات مختلفة الطول، أي بعوامل نثر مختلفة، مزج عدد من الخدمات أو التطبيقات المختلفة وإرسالها من الوحدة المتحركة نفسها. هذا مايوضحه الشكل ٢-٢٠ الذي يبين مبدأ مزج ثلاثة تطبيقات مختلفة، يمثل كلاً منها الاشارة $m_i(t)$، حيث تُستخدم لنثر كلٍّ من هذه الاشارات متتاليةٌ ذات طولٍ مختلف، بحيث يكون ناتج عملية النثر ذا معدلِ دفقٍ موحد.



الشكل ٢-٢٠: مزج أكثر من تطبيقٍ باستخدام متتاليات نثر متباينة في الطول.

- لما كانت التطبيقات المختلفة تحتاج إلى متتاليات نثر متباينة، وتختص بموارد فيزيائية مختلفة (طاقة)، أمكنَ اعتبارُ كل تطبيق شاغلاً لقناة فيزيائية خاصة، تتميز عن غيرها بمقدار الاستطاعة الذي تستنفده، وبمتتالية النثر التي تُستخدم لنقلها. لذا يمكن القول بأن الوحدة المتحركة التي تستخدم تطبيقين مختلفين في آن واحد تشغل قناتين فيزيائيتين متباينتين. لذا يُطلق على متتاليات النثر أيضاً اسم "المتتاليات المميزة للقنوات الفيزيائية المختلفة" "Channelization Codes".
- يتراوح طول المتتاليات المستخدمة في نظام UMTS بين 4 و 256 في المسار الصاعد، و 4 إلى 512 في المسار الهابط. كما تكون متتالية النثر ثابتة ضمن كل إطار زمني مقداره 10 ms، غير أنها ممكن أن تتغير من إطار إلى إطار (انظر [١٠]).

- إذا استُخدمت المتتالية $W_{k,l}$ ضمن خليةٍ ما، فإن كل المتتاليات المتفرعة منها وفق الشكل ٢-١٩ تكون غير محققة لخاصية التعامد (العلاقة (٢-٤٦)). يقتضي ذلك عدم إمكانية استخدام هذه المتتاليات ضمن الخلية المعنية، أي أن استخدام أية متتالية يمنع استخدام المتتاليات المتفرعة منها. فعلى سبيل المثال، إذا استخدمت المتتالية $W_{4,2}$ في نقل إشارة بعامل النثر $SF = 4$، لم يعد بالإمكان استخدام المتتاليتين $W_{8,3}$ و $W_{8,4}$ وما تفرع منهما، أي أن عدد التطبيقات المتاحة باستعمال عامل نثر مقداره 8 يتقلص إلى 6، كما يتقلص عدد التطبيقات المتاحة بعامل نثر مقداره 16 إلى 12، وهكذا.

- تتسم فئة المتتاليات المتعامدة بسلبية أخرى، وهي أن تَحقُّقَ العلاقة (٢-٤٦) لا يضمن تحقق الشرط الثاني من الشروط المطلوب مراعاتها في متتاليات النثر (انظر العلاقة (٢-٤٥))، فإذا كانت الإزاحة الزمنية τ بين متتاليتين من فئة OVSF لا تساوي صفراً، فإن الترابط المتبادل بين المتتاليتين يكون ذا قيمة ملحوظة، ما يعني من الناحية العملية وجود تداخل لا يمكن إغفاله بين الإشارتين اللتين تمثلهما المتتاليتان. هذا ما يوضحه الشكل ٢-٢١ الذي يعرض تداخل إشارتي المستخدم "0" والمستخدم "i" في حالتين اثنتين: تمثل الأولى منهما التزامن التام بين سلاسل النثر (الجزء الأيسر من الشكل)، بينما تمثل الحالة الثانية وجود إزاحة زمنية يعادل مقدارها طول نبضة نثر واحدة (الجزء الأيمن). هذا وَيفْترض الشكل أن المستخدم 0 يرسل إشارته باستخدام سلسلة النثر {1,-1,1,-1}، بينما يرسل المستخدم i الإشارة باستخدام السلسلة {1,-1,-1,1}.

نقرأ من القسم الأيسر من الشكل أنه في حالة وجود تزامن مثالي بين الإشارتين، تكون نتيجة التكامل عند لحظات أخذ العينات، والمشار إليها بالنقاط السوداء الكبيرة، مساوية لـ "+1" كقيمةٍ للإشارة المرغوبة، أو "0" لإشارة التداخل الناجمة عن المستخدم الآخر، ولكن، إذا كانت هناك إزاحة زمنية بين الإشارتين، فإن نتيجة التكامل تفضي إلى قيمٍ تتراوح بين "0.5+" و "0.5-"، وذلك حسب تسلسل بتات المعلومات. ما يعني عدم وضوح قيمة نبضة المعلومات، ويدل على تداخل واضح بين الإشارتين.

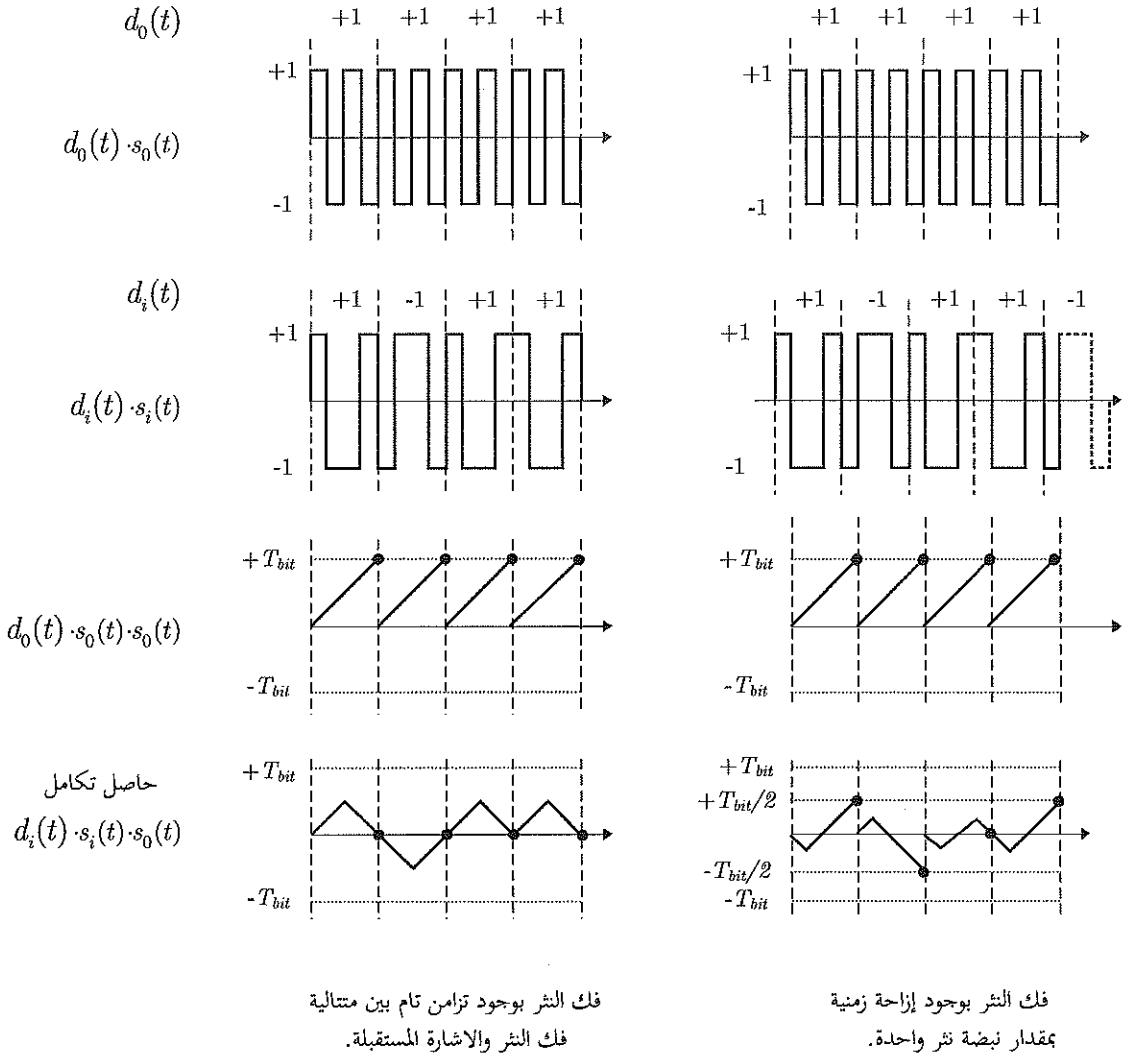
بسبب هذه السلبية، أي عدم تحقق خاصية الترابط المتبادل، لا تستخدم المتتاليات المتعامدة إلا في الحالات التي يكون التزامن فيها مع الإشارات المتداخلة، أي المبثوثة في الوقت نفسه، متوفراً بدرجة مقبولة، وهذا يتطلب أن تكون أجهزة الإرسال التي تصدر إشارات التداخل موجودة في مكان واحد. لذا تستخدم هذه المتتاليات في المسار الصاعد للتمييز بين التطبيقات المختلفة لمستخدم واحد، وفي المسار الهابط للتمييز بين المستخدمين ضمن مجال تغذية المحطة الثابتة نفسها.

٢-٣-٤-٢ "المتتاليات (السلاسل) شبه العشوائية (سلاسل البعثرة)" "Scrambling Codes":

لنفترض وجود وحدة متحركة ضمن خلية ما تستخدم تطبيقاً ذا سرعة عالية، أي بمعدل نثر منخفض، نفترض أنه 4. ولنفترض أيضاً أن وحدة متحركة ضمن خلية مجاورة تستخدم تطبيقاً بمعدل النثر ذاته. ولما كان -كما بيَّنا أعلاه- عدد متتاليات النثر المتاحة لإنجاز عملية النثر لمثل هذا التطبيق هو 4 على الأكثر في كل خلية، أمكن أن تستخدم الوحدتان المذكورتان متتالية النثر

ذاتها. تطرح هذه الحالة تساؤلاً مهماً وهو: "كيف يمكن في مثل هذه الحالات التمييز بين إشارتي الوحدتين، بحيث تتمكن المحطة في كل خلية مواصلة الاتصال دون أن ينشأ لبسٌ في مصدر الإشارة، أي كيف يمكن التأكد تماماً من أن مصدر الإشارة هو الوحدة المتحركة المقصودة أو المعنية، خصوصاً وأن جميع الوحدات تستخدم النطاق الترددي نفسه؟".

تكمن الإجابة على هذا السؤال في استخدام نظام UMTS لمبدأ "البعثرة" "Scrambling" كإجراءٍ يلي عملية النثر، ويتيح تمييز مصدر الإشارة، سواء في المسار الصاعد أو الهابط، على نحوٍ دقيق لا يدع مجالاً لأي لَبْس.



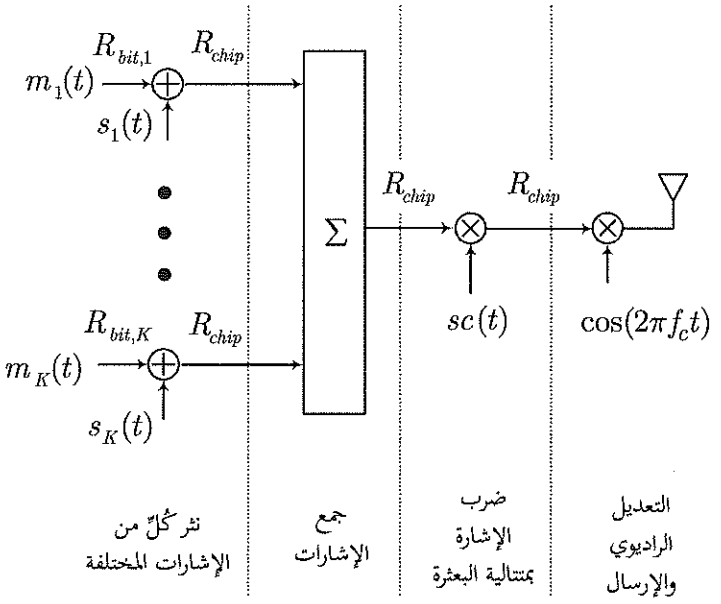
الشكل ٢-٢١: أثر وجود إزاحة زمنية بين المتتاليات المتعامدة على إجراء فك النثر.

إن الهدف الأساسي من عملية البعثرة هو تزويد الإشارة الناتجة عن عملية النثر برمزٍ خاص يميز مصدرها ويحدده، ويتحقق ذلك، كما يبين الشكل ٢-٢٢ بضرب الإشارة بمتتالية إضافية، تكون دالّة إما على الوحدة المتحركة في المسار الصاعد، أو على

المحطة الثابتة في المسار الهابط. فإذا كانت الوحدة المتحركة تستخدم أكثر من تطبيق في آن واحد، وكان أحد التطبيقات يستخدم متتالية نثر مطابقة لمتتاليةٍ مُستخدمة من قبل وحدةٍ متحركة أخرى، أمكن عن طريق متتالية البعثرة التمييز بين الوحدتين. كذلك، إذا أرسلت المحطة الثابتة الإشارة باستخدام متتالية نثر مستخدمة في خلية مجاورة، يكون بإمكان الوحدات المتحركة تمييز الإشارة المرغوبة من خلال متتالية البعثرة التي تُعتبر بمثابة هوية مميزة للمحطة، ويجري إعلام الوحدات المعنية بها عند بداية أو مباشرة الاتصال. يوضح الشكل ٢-٢٣ هذا المبدأ على نحوٍ مبسط بافتراض وجود محطتين متجاورتين، ووحدتين تتشاركان في استخدام سلسلتي النثر $s_1(t)$ و $s_2(t)$.

مما يعنيه استخدام هذا المبدأ أيضاً أن استخلاص الإشارة في المستقبل يجري وفق خطوتين متتابعتين، حيث تنجز بدايةً عملية فكِ البعثرة، ما يسمح بتحديد هوية مصدر الإشارة، ثم تنجز –في خطوة لاحقة– عملية فك النثر لاستخلاص الإشارات المرغوبة.

بناءً على ما سبق، يمكن القول بأن متتاليات النثر تتيح لعدة قنوات فيزيائية التشارك في مصدر الإرسال، وأن متتاليات البعثرة تسمح لعدة أجهزة إرسال أن تتشارك باستخدام التردد ذاته.



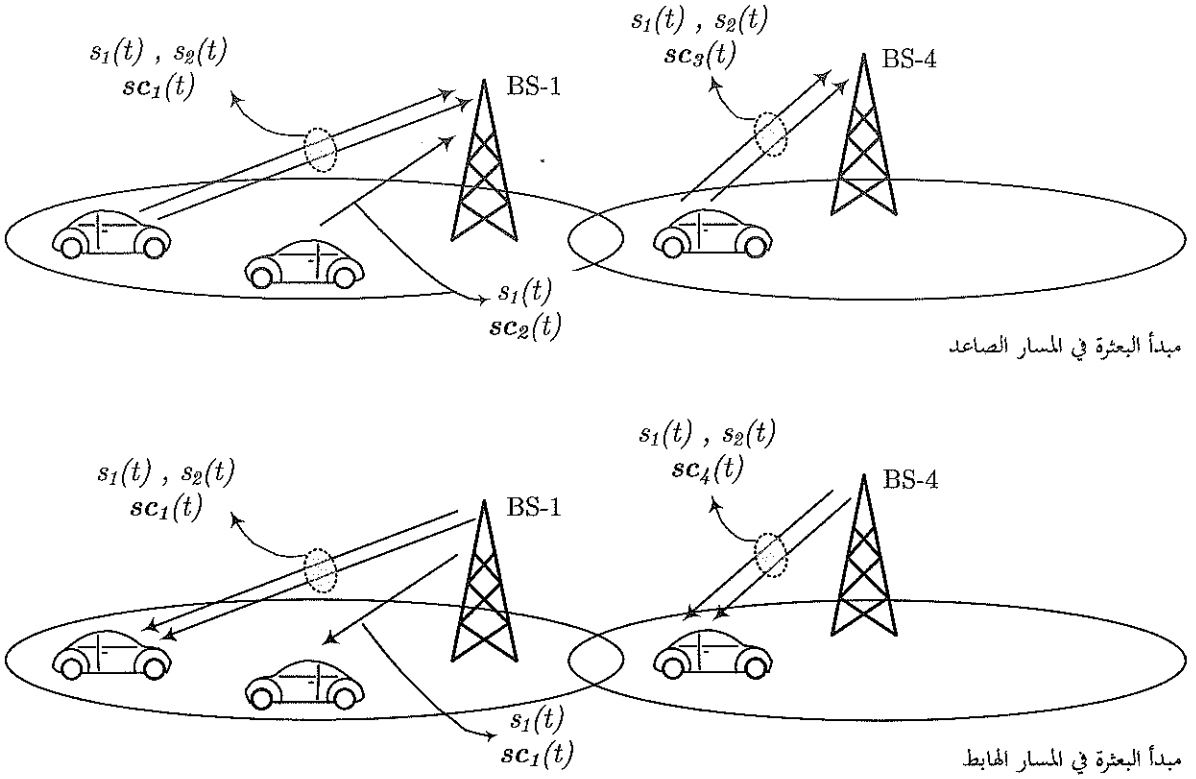
الشكل ٢-٢٢: تسلسل إجراءات النثر والبعثرة في المرسل.

تتميز متتاليات البعثرة بما يلي:

- يجري توليد هذه المتتاليات باستخدام "سجلات إزاحة" "Shift Registers" تعمل وفق خوارزميات خاصة، يمكن الرجوع إليها في [١٠]–[١٣]، وتؤدي هذه الخوارزميات إلى متتاليات توصف بأنها "شبه عشوائية". لذا يطلق على هذه المتتاليات

اسم "Pseudo Noise Codes (PN-Codes)"، كما يُشار إليها بـ"Gold Codes" نسبةً إلى مبتكرها Robert Gold.

- قيمة الترابط الذاتي لكل من هذه المتتاليات كبيرة، حتى مع وجود إزاحة زمنية، ما يجعلها محققة لمتطلبات التزامن التي أشرنا إليها، وما يجعل التمييز بين هذه المتتاليات سهلاً وفعالاً. وقد كنا ذكرنا أن هذه الخاصية غير متوفرة في المتتاليات المتعامدة.



الشكل ٢-٢٣: توضيح لمبدأ البعثرة كما هو مستخدم في المسارين الصاعد والهابط.

- تكون قيمة الترابط المتبادل بين هذه المتتاليات منخفضة، ما يُقلِّل من التداخل بين الإشارات التي تتشارك في استخدام متتالية النثر ذاتها، والصادرة عن أجهزة إرسال مختلفة.
- تؤدي الخوارزميات المولِّدة لمتتاليات البعثرة إلى سلاسل طويلة جداً، لذا تُجزَّأ هذه السلاسل إلى "مُقتطعات" "Segments"، بحيث يوافق طول كل مُقتطع مدة الإطار الزمني المستخدم في نظام UMTS وهو 10 ms، وإذا استحضرنا أن معدل دفق المعلومات بعد إجراء عملية النثر هو 3.84 Mchip/s، نجد أن مدة 10 ms تكافئ 38,400 نبضة، أي أن طول كل متتالية من متتاليات البعثرة هو 38,400 نبضة، تُستخدم على نحوٍ متكرر لبعثرة الإشارة الخاصة بكل إطار زمني.
- يتيح طول متتاليات البعثرة تعريف 2^{24} متتالية مختلفة للاستخدام، ومن البدهي أن هذا الرقم يفوق بكثير أي عدد ممكن

للمستخدمين ضمن الخلية الواحدة. من جانبٍ آخر، ينفي توفر هذا العدد من المتتاليات الحاجة إلى إجراءات تخطيطٍ لتخصيصها واستخدامها.

- نقرأ من الفقرتين السابقتين أيضاً أن معدل دفق نبضات سلسلة البعثرة هو 3.84 Mchip/s، أي أنه يوافق معدل دفق نبضات المعلومات بعد إجراء عملية النثر. يعني ذلك أن كل نبضة من الإشارة الناتجة عن إجراء النثر تُضرب بنبضة مقابلة من متتالية البعثرة، لذا لا تؤدي عملية البعثرة إلى نثر إضافي للطيف، وإنما تبقى الإشارة شاغلة للمقدار نفسه من المجال أو النطاق الطيفي.
- تتيح المواصفات المعيارية استخدام 512 متتالية مختلفة في المسار الهابط، وقد جرى تحديد هذا العدد لتسهيل عملية البحث عن هوية الخلية أو المحطة الثابتة حال مباشرة التواصل معها، وذلك بغية تسريع إجراءات الاتصال. وهذا العدّد كافٍ دون شك، إذ من غير المحتمل أو المعقول وجود 512 خلية متجاورة يمكن للإشارات الصادرة عنها أن تسبب تداخلاً متبادلاً.

٢-٣-٥ آثار تفاوت بُعد المستخدمين عن المحطة المغذية

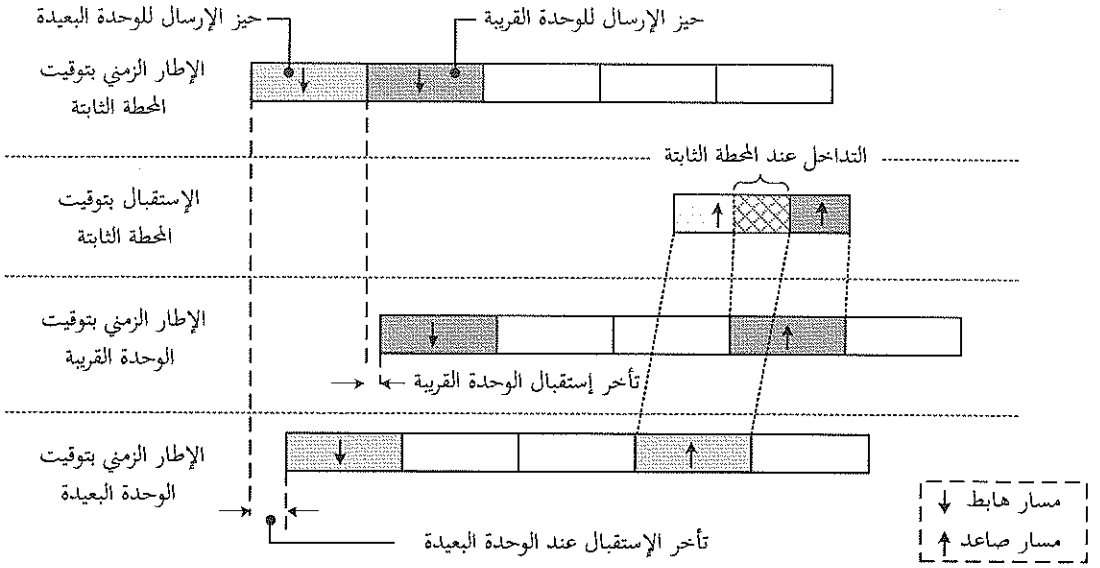
من الطبيعي أن يتفاوت المستخدمون المتواجدون ضمن خلية ما في بُعدهم أو قربهم من محطة التغذية، وهذا التفاوت يفرض على تصميم النظم الخلوية عدة تحديات ترتبط بخصائص قناة الانتشار والتباين الشاسع في مقدار الخبوّ الذي تتعرض له الأمواج الكهرومغناطيسية تبعاً للمسافة الفاصلة بين المرسل و المستقبل. يطلق على مجموع الآثار الناتجة عن ذلك مصطلح "آثار تفاوت القُرب والبُعد" "Near Far Effects"، وسنتناول في ما يلي أهم هذه الآثار، ثم نبين طرق تفاديها.

تتلخص آثار تفاوت القرب والبعد في ما يلي:

١) لنفترض وجود وحدة متحركة على بعد 50 متراً من المحطة وأخرى على بعد 5 كيلومترات، أي ما يعادل 100 ضعف عن بعد الوحدة الأولى. لنفترض أيضاً أن المحطة الثابتة موجودة ضمن مدينة ذات كثافة عمرانية كبيرة، وأن طاقة بث الوحدتين متقاربة جداً. فإذا كانت الوحدتان تستخدمان حاملين مختلفين، أمكن لمستوى التخميد بين الإشارتين الصادرتين عنهما أن يصل عند نقطة المستقبل إلى 80 dB، ومن ثم يجب على المرشح في المستقبل تخميد الإشارة الأقوى، بحيث لا تطغى إشارة الوحدة القريبة على إشارة الوحدة البعيدة. يتطلب ذلك أن يكون المرشح قادراً على إضعاف أو إخماد الإشارة القوية بمقدار يبلغ 80 dB، مما يفرض شروطاً فنية صعبة على نوعية وكفاءة المرشحات، ويعتبر تحدياً تقنياً بالغاً.

٢) نظراً لانتشار الأمواج الكهرومغناطيسية بسرعة محدودة، يمكن أن تختلف المدة التي يتطلبها وصول الإشارة من مصادر مختلفة، وعبر مسارات متعددة. يؤدي هذا إلى تباين في الوقت اللازم لوصول الإشارة من مشتركَين مختلفَين، قد يصل إلى 100 μs، وهذا يؤدي إلى بعض المشاكل في أنظمة TDMA. فعلى سبيل المثال، تستخلص الوحدة المتحركة المعلومات الخاصة بضبط التزامن (أي بداية الحيز أو الإطار الزمني) من الإشارة التي تستقبلها من المحطة الثابتة، ولما كانت هذه الإشارة تحتاج مدة زمنية محددة للوصول إلى الوحدة المتحركة، فإن بداية الحيز الزمني بالنسبة للوحدة تكون متأخرة عن تلك التي يلحظها توقيت المحطة الثابتة (انظر الشكل ٢-٢٤). ويتضاعف هذا التأخير بعد أن ترسل الوحدة المتحركة المعلومات

الخاصة بها إلى المحطة الثابتة. فإذا كانت وحدة متحركة بعيدة عن المحطة تشغل الحيز m، وكانت وحدة أخرى قريبة تشغل الحيز m + 1، فإن التداخل بين الإشارتين عند موقع المحطة يكون حتمياً، ويؤدي إلى تَدَنٍّ في نوعية الاتصال.



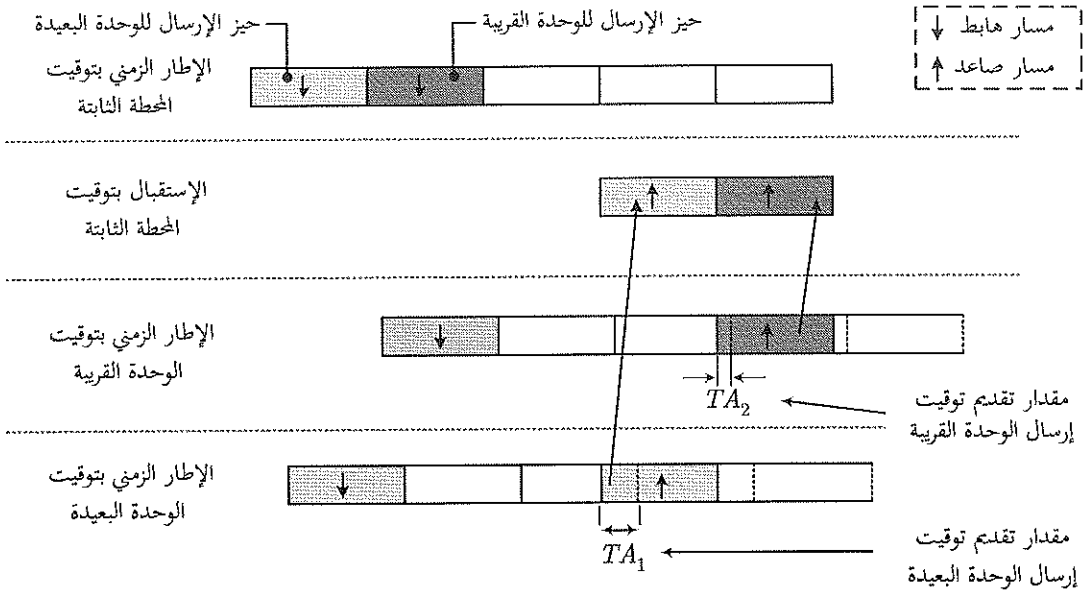
الشكل ٢-٢٤: التداخل الناشئ عن تفاوت البعد عن المحطة.

٣) يتعلق الأثر السلبي الثالث لتفاوت البعد والقرب بأنظمة CDMA. فكما سبق التنويه، يتمثل التشويش في هذه الأنظمة بالطاقة التي تستقبلها المحطة من المشتركين الآخرين، الذين يتزامن اتصالهم مع اتصال مشتركٍ ما. فإذا كانت وحدةُ مشتركٍ ما قريبة، فإن طاقتها المستقبَلة عند المحطة تكون مرتفعة بدرجة ملحوظة، ومن ثم تمثل إشارة هذا المشترك القريب تشويشاً كبيراً جداً على الإشارات الأخرى، وهذا التشويش لا يمكن عزله أو كبته، خصوصاً وأن المتتاليات غير عشوائية تماماً، وأن المحطة لا تكون قادرة على عزل اتصال كل مشترك عن الآخر على نحوٍ مثالي. لذا يجب تجنب هذا الصنف من التشويش بفعالية كافية.

تتفاوت طرق معالجة الآثار السلبية لاختلاف بعد وقرب المشتركين تبعاً للنظام وتقنية النفاذ المتعدد التي يعتمدها. ففي أنظمة TDMA، يمكن التقليل من هذه الآثار عن طريق اختيار فاصل ترددي كبير بين القنوات الترددية المستخدمة ضمن الخلية نفسها، إذ أن وجود هذا الفاصل يتيح عزلاً كافياً للترددات غير المرغوبة باستخدام مرشحات ذات كلفة معقولة.

أما في أنظمة CDMA فهناك قواعد ومعايير عامة عن التداخل المسموح به بين الترددات، ونعني بذلك حالة حصول مشغل على نطاق عرضه 10 MHz أو 15 MHz، بحيث يستطيع استخدام أكثر من حامل ضمن الشبكة. تشابه هذه المعايير من ناحية المبدأ ما شرحناه عند مناقشة تحديات الفصل الترددي بين القنوات، مثل تعريف قالب طيفي للإشارة، ونِسَبٍ عظمى لمقدار التشويش المسموح به (انظر البحث ٢-١).

ننتقل الآن إلى نقاش مشكلة التداخل بين الإشارات، والتي تُعالج عن طريق تقديم اللحظة التي ترسِل عندها الوحدة المتحركة الإشارة، وذلك بمقدارٍ يعادل التأخير الناجم عن انتشار الأمواج بسرعة متناهية من المحطة إلى الوحدة، وبالعكس. يُعرف هذا الإجراء باسم "تقديم توقيت الإرسال" "Timing Advance (TA)" (انظر الشكل ٢-٢٥)، ويؤدي تنفيذه أو تطبيقه إلى وصول جميع إشارات الوحدات المتحركة إلى المحطة الثابتة بتوقيتٍ يوافق بدء الحيز الخاص بكل منها ضمن الإطار الزمني، وذلك بغض النظر عن بُعد الوحدة المتحركة أو قربها.



الشكل ٢-٢٥: توضيح لمبدأ تقديم توقيت الإرسال لتحقيق تزامن فعال عند المحطة الثابتة.

نضرب في ما يلي مثالاً على تفاصيل هذا المبدأ ضمن نظام GSM:

- مدة كل رمز أو بت هي: $0.577\text{ms}/156.25 = 3.69\mu s$.
- المسافة التي تقطعها الأمواج الكهرومغناطيسية خلال مدة البت الواحد هي $1.11\ km$.
- تقوم المحطة الثابتة بتقدير الزمن الذي تحتاجه إشارة الوحدة المتحركة للوصول، وذلك استناداً إلى تفاصيل المعلومات ضمن حقل التحكم في الرزمة المستقبَلة، وهذا طبعاً يعطي تقديراً للمسافة التي تفصل الوحدة المتحركة عن المحطة.
- بناء على مقدار هذه المسافة تقوم المحطة بإشعار الوحدة المتحركة بتقديم الإرسال بمدة مقدارها $n \times 3.69\mu s$، أي ما يوافق مضاعفات المدة التي يحتاجها بت واحد للوصول إلى المحطة، وذلك حتى يكون التزامن مثالياً، بحيث يبدأ الحيز الزمني عند بداية البت الأول وليس في نصفه مثلاً. هذا وتسمح المعايير الفنية أن تكون القيمة العظمى لـ n مساوية لـ 63، أي أن n تُعطى بالعلاقة: $0 \leq n \leq 63$.

- يعني ذلك أن المسافة العظمى التي يمكن تدارك التأخير الناتج عنها تساوي: $63 \times 1.11\,\text{km} = 69.93\,\text{km}$، وهو ما يعادل المسافة من المحطة إلى الوحدة ذهاباً و إياباً.
- بناءً على ما سبق، يستطيع نظام GSM أن يتفادى التأخير الناجم عن مسافة عظمى مقدارها $69.93\,\text{km}$، ومن ثم يكون نصف قطر الخلية الأعظمي مساوياً لـ $35\,\text{km}$ على وجه التقريب.

بقي في هذا السياق أن نعرض لسبل التعامل مع المشكلة الثالثة الناجمة عن تفاوت المسافات عن المحطة، وهي اختلاف الطاقة المستقبَلة عند المحطة الثابتة تبعاً لقرب الوحدة المتحركة أو بعدها، وهذا يؤثر على أداء نظم CDMA بشكل خاص.
إن المبدأ المعتمد لتجنب الآثار السلبية لهذه الظاهرة هو "التحكم بالطاقة" "Power Control (PC)"، حيث تقوم المحطة الثابتة بقياسٍ مستمر لمستوى طاقة الإشارات التي تستقبلها من مختلف الوحدات المتحركة، وتبعاً لمقدار هذا المستوى، توعز المحطة الثابتة إلى الوحدة المتحركة برفع طاقة الإرسال أو خفضها. يؤدي ذلك إلى أن الوحدات القريبة ترسل إشاراتها بطاقةٍ منخفضة جداً، بينما ترسل الوحدات البعيدة الاشارة بطاقةٍ مرتفعة، ونتيجة لذلك، تصل الإشارات من جميع الأجهزة المتحركة بمستوىً متقاربٍ جداً من الطاقة، فلا تطغى إشارة على أخرى، وينخفض مستوى تشويش المشتركين فيما بينهم.
يتميز هذه الإجراء بأهمية خاصة، فكلما ازدادت وتيرة قياس الطاقة وتعديل مستوى الإرسال، أمكن الحفاظ على مستوى شبه ثابت للطاقة المتوسطة التي تصل من الوحدات المتحركة، وهذا يؤدي إلى خفض التشويش ورفع كفاءة وسِعة النظام. لذا نجد أن هذه العملية تجري في نظم UMTS بمعدل مقداره 1500 مرة في الثانية.

ختاماً لهذا الفصل ننوه إلى وجود تقنيات أخرى للنفاذ المتعدد، أهمها دون شك تقنية "النفاذ المتعدد باستخدام الحوامل المتعامدة" "Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)"، التي تكتسب أهميتها من كونها اعتُمِدت كأساسٍ لتوفير النفاذ المتعدد ضمن أنظمة الجيل الرابع. غير أننا نكتفي في إطار هذا المدخل بما عرضناه، لأنه يشمل التقنيات المستخدمة في أكثر نظم الاتصالات الخلوية انتشاراً في الوقت الحاضر، ولأن الغرض من النقاش هو تقريب المبادئ الأساسية لعمل أنظمة الاتصالات، وليس العرض الشامل لها.

٢–٤ مراجع مختارة

[١] 3GPP Specifications TS 45.005, "Radio Transmission and Reception".

[٢] 3GPP Specifications TS 25.101," "UE radio transmission and reception (FDD)".

[٣] R.Steele et al, "GSM, cdmaOne and 3G Systems", John Wiley, 2001.

[٤] A. Mehrotra, "GSM System Engineering", Artech House, 1997.

[٥] 3GPP Specifications TS 11.20, "Base Station conformity specifications".

[٦] 3GPP Specifications TS 25.104, "Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD)".

[٧] 3GPP TS 11.10, " Mobile Station conformity specification".

[٨] F. Xiong,"Digital Modulation Techniques", Artech House, 2000.

[٩] B. A. Black et al., "Introduction to Wireless Systems", Prentice Hall PTR, 2011.

[١٠] H. Holma and A. Toskala, "WCDMA for UMTS, Radio Access for Third Generation Mobile Communications", John Wiley & Sons, 2004

[١١] V. P. Ipatov, "Spread Spectrum and CDMA, Principles and Applications", John Wiley & Sons, 2005.

[١٢] K. Fazel, and S. Kaiser "Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems", John Wiley & Sons, 2003.

[١٣] R. E. Ziemer, "Fundamentals of Spread Spectrum Modulation", Morgan & Claypool, 2007.

[١٤] J. G. Proakis, "Digital Communications", McGraw-Hill, 1995.

[١٥] معجم مصطلحات المعلوماتية، الجمعية العربية السورية للمعلوماتية، دمشق، ٢٠٠٠.

٣

الخصائص الفيزيائية للرابط الراديوي

يمثل وسط انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية أو الإشارة الراديوية، الذي أطلقنا عليه وظيفياً اسم "المنفذ الراديوي" أو "الرابط الراديوي"، العنصر الأهم والأعقد من كل مكونات أو أقسام الشبكة. فطبيعة هذا المنفذ –المتغيرة بتغير الزمن والمكان– لها تأثير كبير ومباشر على جودة الخدمات التي توفرها الشبكة، كما تلعب خصائصه دوراً أساساً في تحديد سعة الخلايا ومواضعها، كما تحكُمُ الكثير من خطوات تخطيط النظام. إضافة إلى ذلك، جرى تصميم العديد من خطوات معالجة الإشارة خصيصاً للتغلب على التحديات التي تفرضها آليات انتشار الإشارة الراديوية. لذا، لا يمكن أن يكتمل الشرح التفصيلي لعمل الشبكة ومكوناتها دون الإشارة المتكررة للمنفذ أو الرابط الراديوي، ودون فهمٍ دقيقٍ لتأثيره على نقل المعلومات بين أطراف الاتصال المختلفة.
انطلاقاً من ذلك، نخصص هذا الفصل والذي يليه لبيان بعض تفاصيل هذا الرابط، وتوضيح كيفية تأثيره على بنية الشبكة ووظائف مكوناتها المختلفة. وننوه –قبل الخوض في التفاصيل– إلى أننا نولي اهتمامنا بالدرجة الأولى تقريبَ وتبسيطَ الظواهر الفيزيائية التي تؤثر على أداء النظام والتي يجب على مهندس الاتصالات الإلمام بها. لذا، سنستعين بنماذج رياضية مبسطة لتفسير أهم هذه الظواهر، وسنحيل القارئ –عند الحاجة– إلى المراجع التخصصية للوقوف على شرحٍ واف للتفاصيل الرياضية التي تخرج عن الإطار المرسوم لهذا الكتاب.

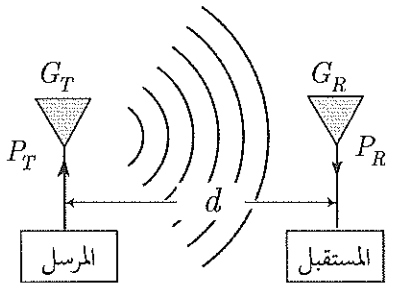
٣–١ انتشار الإشارة الراديوية في بيئة مثالية

من أهم ما يحدد الخصائص الفيزيائية للإشارة الراديوية آليةُ انتشارها ضمن البيئة أو الوسط المحيط بالمرسل والمستقبل، لذا لا بد من التطرق للقوانين الأساسية التي تحكُمُ التغيرات التي تطرأ على الطاقة المحمولة "لاسلكياً"، والتي تحدد مستوى الإشارة عند كل نقطة جغرافية ضمن المنطقة التي تزودها الشبكة بالخدمات.

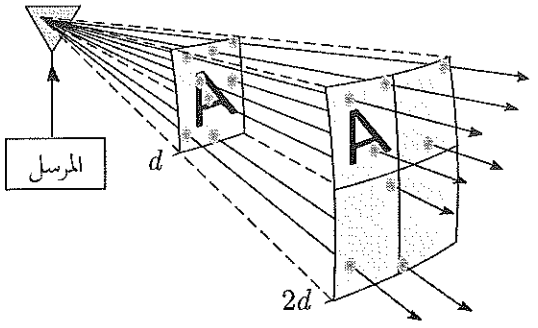
ننطلق بدايةً من حالة مبسطة جداً، وهي انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية في "الفضاء الحر" "Free Space"، أي في وسطٍ مثاليٍّ، يخلو من أية حواجز صنعية أو طبيعية بين المرسل والمستقبل، وتصل الإشارة فيه إلى المستقبل عبر مسارٍ وحيد ومباشر،

ما يعني إهمال ظاهرة انعكاس الأمواج عن أي سطح طبيعي أو صنعي، وإغفال كل ظواهر الامتصاص أو الانحراف أو التبعثر الممكنة. نفترض أيضاً أن هوائيَّيْ الإرسال والاستقبال ذوا خصائص "إيزوتروبية" "Isotropic"، بحيث يرسل -أو يستقبل- كل منهما الأمواج الكهرومغناطيسية بقَدرٍ متساوٍ من الطاقة في كل الاتجاهات.

يوضح القسم الأيمن من الشكل ٣-١ هذه الحالة المبسطة، حيث نشير بـ P_T إلى استطاعة المرسل، و بـ P_R إلى الاستطاعة التي يلتقطها هوائي المستقبل، وحيث يدل G_T و G_R على "ربح" "Antenna Gain" كلٌّ من هوائِيَّي المرسل والمستقبل. ونظراً لكون الهوائيين مثاليين، تكون قيمة ربح كل منهما مساويةً لـ "1".



(أ): انتشار الأمواج في الفضاء الحر.



(ب): تناقص الإستطاعة ضمن وحدة المساحة كلما ازداد البعد عن المرسل.

الشكل ٣-١: انتشار الإشارة الراديوية في بيئة مثالية.

عند انتشار الأمواج وفقاً لهذا الشكل المبسط تتوزع طاقة الهوائي المرسل (طاقة الإرسال) بالتساوي في كل الجهات، ومن ثم تكون "كثافة الاستطاعة ضمن وحدة المساحة" "Power Density" عند نقطة تبعد مقدار d عن المرسل هي:

$$S_T = \frac{P_T}{4\pi d^2} \qquad (١-٣)$$

يمثل المقام $4\pi d^2$ في هذه العلاقة مساحة السطح الكروي الذي يقع مركزه عند المرسل، ويبلغ نصف قطره d، ونقرأ من العلاقة أن كثافة الاستطاعة المتوفرة عند المستقبل تتناقص طرداً مع مربع المسافة الفاصلة عن المرسل. تُعرف هذه الظاهرة باسم "خبو أو تخميد الانتشار" "Propagation Loss"، وسنتجنب عند مناقشتها استخدام تعبيري "خسارة المسار" أو "ضياع المسار" المتداولَين في معظم المراجع العربية، حيث لا يدل أي من التعبيرين على المعنى الفيزيائي المقصود في هذا السياق، وهو النقصان التدريجي لقيمة الاستطاعة المستقبَلة بسبب تزايد مساحة السطح الكروي الذي تتوزع عليه الطاقة كلما ابتعد المستقبل عن المرسل (انظر الجزء ب من الشكل ٣-١). فهذا هو السبب الوحيد لتناقص الاستطاعة المستقبلة ضمن وحدة المساحة، إذ لا

يوجد في الفضاء الحر الذي افترضنا وجود المستقبل ضمنه أية عوائق طبيعية أو صنعية، ما ينفي إمكانية حدوث ظواهر الامتصاص أو الانكسار أو التبعثر، والتي تكون عادةً السبب في ضياع أو خسارة الطاقة الكهرومغناطيسية.

ننتقل الآن إلى الحالة العامة، وهي كون هوائي الاستقبال غير مثالي وذا ربحٍ مقداره G_R. نحصل على الاستطاعة التي يستقبلها الهوائي في هذه عن طريق ضرب كثافة الاستطاعة S_T بالمساحة المكافئة للهوائي، أي ما يمثله الهوائي من مساحةٍ اعتبارية جامعةٍ للطاقة. وإذا أشرنا للمساحة المكافئة لهوائي المستقبل بـ A_{eR} فإن مقدار الاستطاعة الملتقطة يكون:

$$P_R = A_{eR}\, S_T \qquad (٣-٢)$$

تعادل المساحة المكافئة لأي هوائي حاصل جداء ربحه بالمساحة المكافئة للهوائي الآيزوتروبي، التي نشير إليها بـ A_{ei}، والتي ترتبط بطول الموجة λ عن طريق العلاقة $A_{ei} = \lambda^2/4\pi$ ([١]،[٢]). لذا تُعطى المساحة المكافئة لهوائي المستقبِل كما يلي:

$$A_{eR} = A_{ei}\, G_R = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R \qquad (٣-٣)$$

بتعويض العلاقتين (٣-١) و (٣-٣) في المعادلة (٣-٢)، ومراعاة أن طول الموجة λ هو حاصل قسمة سرعة الأمواج الكهرومغناطيسية c على تردد الموجة f، نحصل على:

$$P_R = P_T\, G_R \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} = P_T\, G_R \frac{1}{(4\pi d)^2} \frac{c^2}{f^2} \qquad (٣-٤)$$

تمثل العلاقة (٣-٤) الاستطاعة التي يستقبلها أو يلتقطها الهوائي، ونقرأ منها أن هذه الاستطاعة تتناقص طرداً مع مربع التردد، وهذا أثـرٌ يسببه الهوائي وليس وسط الانتشار المثالي. فالمساحة المكافئة للهوائي A_{eR} هي التي تتناسب طرداً مع التردد، وهو ما رأيناه في العلاقة (٣-٣)، والحد $\lambda^2/4\pi$ يمثل مساحة دائرةٍ محيطها هو طول الموجة λ، ما يعني أن مساحة هذه الدائرة تنقص بازدياد التردد. بعبارة أخرى، تزداد كمية الطاقة التي يمكن أن يلتقطها أو يرصدها الهوائي بازدياد طول الموجة، أما كثافة الطاقة المتوفرة للإلتقاط، مقيسة في وحدة المساحة، فتتناقص -كما سبق البيان- بازدياد البعد عن المرسل حصراً.

إذا أضفنا إلى المعادلة (٣-٤) تأثير هوائي إرسالٍ غير آيزوتروبي، ممثلاً بربح مقداره G_T، فإنّ ذلك يُفضي إلى المعادلة المعروفة باسم "معادلة Friis":

$$P_R = P_T\, G_T\, G_R \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} = P_T\, G_T\, G_R \frac{1}{(4\pi)^2\,(d/\lambda)^2} \qquad (٣-٥)$$

تبين هذه المعادلة أن الاستطاعة المستقبَلة P_R تنتج عن ضرب الاستطاعة المرسَلة P_T بثلاثة حدودٍ هي: G_T، G_R، و $1/((4\pi)^2\,(d/\lambda)^2)$، التي يمثل كلٌ منها "عامل ربحٍ" "Gain Factor"، لأن الاستطاعة المستقبَلة P_R تزداد بازدياد قيمة أيٍّ

من هذه الحدود. يُطلق على الحد الأخير اسم "ربح قناة الإنتشار"، إذ أنه يصف تأثير بيئة الانتشار -حصراً- على مقدار الطاقة المستقبَلة، أي بمعزل عن أية عوامل أخرى، مثل هوائيّي الإرسال والاستقبال. ولما كانت القيمة العكسية لأي ربحٍ تمثل تخميداً أو خُبُوّاً، فإن العلاقة (٣-٥) يمكن أن تكتب على النحو التالي:

$$P_R = P_T\, G_T\, G_R \frac{1}{L_{path}} \tag{٣-٦}$$

حيث يشير الرمز L_{path} في هذه الصيغة إلى ما يُعرف اصطلاحاً بـ "تخميد الانتشار" "Path Loss" أو "التخميد بسبب مسار الانتشار" "Propagation Loss"، وقيمته في الفضاء الحر -كما نقرأ من المعادلة (٣-٥)- هي:

$$L_{path} = (4\pi)^2\,(d/\lambda)^2 = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 d^2 = \left(\frac{4\pi f}{c}\right)^2 d^2 \tag{٣-٧}$$

بالانتقال إلى التدوين بالوحدات اللوغاريتمية، نحصل على الصيغة الأسهل والأكثر تداولاً للعلاقة (٣-٧)، وهي:

$$L_{path}\big|_{\text{dB}} = 20\log(d) + 20\log(f) + \underbrace{20\log\left(\frac{4\pi}{c}\right)}_{=-147.55} \tag{٣-٨}$$

وباستخدام وحدات MHz للتردد و km للمسافة، يمكن كتابة المعادلة الأخيرة على النحو التالي:

$$\begin{aligned} L_{path}\big|_{\text{dB}} &= 20\log(d|_{\text{km}} \times 10^3) + 20\log(f|_{\text{MHz}} \times 10^6) - 147.55 \\ &= 20\log(d|_{\text{km}}) + 20\log(f|_{\text{MHz}}) + 32.45 \end{aligned} \tag{٣-٩}$$

وهذه هي الصيغة المفضلة بالنسبة لمهندسي الاتصالات، إذ تتيح قراءةً مباشرةً لتأثير كل من المسافة والتردد على الاشارة المستقبلة.

مما يمكن أن نقرأه من العلاقة (٣-٦) أيضاً المبدأُ الفيزيائي أو الرياضي الذي يحكُم أو يحدد المسافة القصوى التي يمكن أن تفصل بين الوحدة المتحركة والمحطة الثابتة. فكما سبق البيان في البحث ١-٧-٣، يجب أن يتوفر للمستقبل مقدارٌ أدنى من الاستطاعة يعادل حساسية المستقبل، حتى تكون إجراءات معالجة الإشارة واستخلاص المعلومات ممكنةً بمستوىً مقبول من الجودة، فإذا استبدلنا في العلاقة (٣-٦) حساسية المستقبل P_{sens} بالطاقة المستقبَلة P_R ، وغيرنا ترتيب الحدود، نحصل على تعبيرٍ رياضي يمثل المسافة القصوى المسموح بها كفاصلٍ بين المرسل والمستقبل، والتي نرمز لها بـ d_{max} ، وهذه المسافة هي التي ترسم حدود الخلية أو أطرافها وتحدد منطقة التغذية الممكنة:

$$d_{max} = \sqrt{\frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{sens}}} \qquad (٣-١٠)$$

تبين العلاقة (٣-١٠) بوضوح مبدأ تضاؤل مساحة المنطقة التي من الممكن تغذيتها أو تغطيتها عند ازدياد التردد، حيث تتناسب المسافة القصوى d_{max} طرداً مع طول موجة الحامل، أي عكساً مع التردد. وهذا المفهوم الأخير له أبعاد مهمة من الناحية الاقتصادية، إذ يشير على سبيل المثال إلى أن مساحة الخلية في نظام GSM-1800 أو نظام UMTS أصغر بكثير من مساحة الخلية ضمن نظام GSM-900، مايعني أن عدد الخلايا الضروري لتغطية منطقة معينة باعتماد نظام GSM-900 هو أقل، وأن إنشاء شبكةٍ ما باعتماد نظام GSM-1800 أكثر كلفةً مقارنة مع إنشائها باعتماد نظام GSM-900.

نستدل من تعلُّقِ مساحة الخلايا بتردد النظام أيضاً على ضرورة مراعاة الدقة في عملية التخطيط عند استخدام أكثر من نظامٍ في الشبكة، وذلك لتجنُّبِ أي قصور في الأداء، وحتى تكون عملية التسليم (Handover) بين النظامين المستخدمين متاحة على وجهٍ جيد. فعلى سبيل المثال، قد توفر الشبكة خدمات الاتصال الصوتي باعتماد نظامي GSM و UMTS، فإذا كان المشترك ضمن خليةٍ ما، ويُجري اتصالاً باستخدام نظام UMTS، ثم انتقل إلى منطقة مجاورة لا تتوفر فيها إلا تغذيةٌ بنظام GSM، فإن اتصاله سينقطع إذا لم تكن حدود الخلايا مُعرَّفة على نحو يأخذ بعين الاعتبار اختلاف مساحات الخلايا في كلٍّ من النظامين.

٣-٢ انتشار الأمواج في بيئة واقعية

رغم أن العلاقات (٣-٥) إلى (٣-١٠) تبين بعض المفاهيم الأساسية المتعلقة بانتشار الاشارات الراديوية، إلا أنها تؤدي إلى نتائج غير منطقية إذا استُخدِمت كأساسٍ لتخطيط الشبكات على أرض الواقع. يرجع ذلك إلى أن اشتقاق هذه العلاقات انطلق من انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية في الفضاء الحر المثالي، الذي لا يمكن أن يكون متاحاً كبيئة انتشارٍ حقيقية. ومن الممكن تأكيد هذا المفهوم من خلال المثال التالي:

لنفترض وجود محطةٍ ثابتةٍ ضمن شبكةٍ تعتمد نظام GSM-900 تبث الإشارات الراديوية باستطاعة مقدارها 10 W، وأن مقدار حساسية المستقبل -طبقاً للمواصفات المعيارية- هو $-104\,\mathrm{dBm}$. فإذا أخذنا بالحسبان ضياع جزءٍ من الطاقة بسبب كابلات تغذية الهوائي، والخصائص غير المثالية للمعدات المستخدمة في المحطة الثابتة، إضافةً إلى شروطٍ واقعية لبيئة الانتشار، فإن القيمة الواقعية للتخميد المسموح به يمكن أن تبلغ $148\,\mathrm{dBm}$

باستخدام المعطيات السابقة في العلاقة (٣-٩)، وإعادة ترتيب الحدود، وعزل قيمة المسافة في الطرف الأيسر، نحصل على:

$$\log(d) = \frac{L_{path}|_{\mathrm{dB}} - 20\log(f|_{\mathrm{MHz}}) - 32.45}{20} = \frac{148.3 - 59 - 32.45}{20} \approx 2.84 \qquad (٣-١١)$$

ما يعني أن مقدار المسافة المسموح بها كبعدٍ أقصى للوحدة عن المحطة الثابتة هو $d \approx 10^{2.84}\,\mathrm{km}$، أو ما يعادل $693\,\mathrm{km}$ تقريباً، ومن البدهي أن هذه القيمة غير منطقية بتاتاً.

يؤكد هذا المثال أن العلاقة (٣-٧) لا تمثل ما تتعرض له الإشارة الراديوية في الحالات الواقعية من تغير، لذا لا يمكن استخدامها إلا في حالاتٍ خاصة ومحدودة جداً. نخلص من ذلك إلى أن دراسة تأثير بيئة الانتشار على الإشارة اللاسلكية تتطلب تطوير أو اشتقاق علاقاتٍ رياضية بديلة، تتيح تمثيل آثار وظواهر انتشار الإشارات الراديوية على نحوٍ أكثر شمولاً وقرباً من الواقع.

هذا ما نوليه اهتمامنا في الأبحاث التالية في هذا الفصل، حيث نستهل عرضنا بدراسة تأثير البيئة الواقعية على مقدار التخميد، نناقش بعد ذلك أهم الظواهر التي يشملها مصطلح "الخفوت" "Fading"، كما نبين التغيرات التي تتعرض لها الإشارة نتيجة حركة أحد طرفي الاتصال

٣-٢-١ تخميد الإشارة ضمن بيئة انتشار واقعية

هناك عوامل متعددة تؤثر على انتشار الإشارات الراديوية وتؤدي إلى تغييرٍ جذري في الطاقة التي تحملها وفي تركيبها أو تكوينها الطيفي. يتجلى أبرز هذه الظواهر في ما تتعرض له الأمواج الكهرومغناطيسية من انكسار أو تبعثر أو امتصاص، وذلك بسبب العوائق الطبيعية أو الصنعية التي تشكل السطوح والزوايا التي تسقط عليها هذه الأمواج فترتَدُّ عنها، إما وقد غيرت مسار انتشارها، أو بعد أن تفقد جزءاً كبيراً من الطاقة التي تحملها، أو بعد أن تتبعثر إلى أمواج ثانوية تنتشر في اتجاهاتٍ شتى.

يؤدي التأثير التراكمي لهذه الظواهر إلى ازديادٍ في حدة التخميد والتشوه الذي تتعرض له الإشارة، ومن الطبيعي أن هذا التخميد يزداد كلما ازدادت كثافة العمران في بيئة الانتشار، وكلما اكتظت الحواجز الطبيعية -مثل الأشجار أو التضاريس- التي تعترض الأمواج أثناء انتشارها. كما يؤدي تتابع هذه العوائق في معظم الأحيان إلى عدم توفر مسار انتشارٍ مباشرٍ بين المرسل والمستقبل، ومن ثم يقتصر وصول الإشارة إلى المستقبل على مساراتٍ غير مباشرة، تَفقد الإشارات أثناء سلوكها إياها طاقتها بسبب تكرار عملية الانكسار أو الانتشار[١].

من جانب آخر، ليس هناك شك في أن تحديد مقدار التخميد في بيئة انتشارٍ طبيعية على نحوٍ تحليليٍ ورياضي دقيق غير ممكن، ذلك أن كل ما من شأنه أن يغير من مسار أو طاقة الأمواج له دور في ظاهرة التخميد، يشمل ذلك كل ما يتحرك ضمن البيئة المعنية بالدراسة، مثل وسائل النقل أو الأشجار المتمايلة، ويشمل أيضاً تغير المسارات نفسها بسبب حركة المستقبل، كما يتضمن كل العوارض والتغيرات ذات الصبغة المناخية -مثل المطر والثلج- والتي لها تأثير على امتصاص وتبعثر الأمواج. نتيجةً لذلك، لا يمكن حساب مقدار التخميد رياضياً كقيمة محددة مطلقة، وإنما تُختار قيمٌ تقريبية له، تبعاً لبيئة الانتشار، وعلى نحوٍ يسمح بتقديرٍ مقبولٍ لقيمة الإشارة أثناء عملية تخطيط الشبكة وحساب التداخل بين إشارات المحطات المختلفة. ويكون اختيار القيم التقريبية ممكناً إما عن طريق إجراء قياسات ميدانية لشدة الإشارة في بيئات انتشار مختلفة، تُستنبط منها قيمٌ مشتركة تصلح للاعتماد أثناء عملية التخطيط، أو عن طريق استخدام نماذج رياضية تقريبية، تتيح تمثيل تأثير وسط أو بيئة الانتشار بدرجة مقبولة من الدقة.

لتطوير نموذجٍ رياضي مُحسَّنٍ للتخميد ننطلق من المعادلة (٣-٧) التي يمكن صياغتها على النحو التالي:

---

[١] يعرف المسار المباشر اصطلاحاً بـ "Line of Sight (LOS)"، والمسار غير المباشر بـ "Non Line of Sight (NLOS)".

$$L_{path} = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 d^2 = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 d^{\gamma} \qquad (١٢-٣)$$

يطلق على الأس γ اسم "عامل أو ثابت التخميد" "Path Loss Exponent"، ومقداره في الفضاء الحر هو 2 كما تبيَّن. وتبعاً لما ذكرناه في الفقرات السابقة، فإن مقدار التخميد في أية بيئة انتشار طبيعية يكون أكبر من قيمته في الفضاء الحر. يمكن تمثيل ذلك عن طريق اختيار قيمٍ مختلفة لثابت التخميد γ ، تختلف باختلاف بيئة الانتشار التي هي قيد الدراسة. وبناءً على دراساتٍ وقياساتٍ ميدانيةٍ شتى، اعتمد الباحثون والمهندسون ما يسرده الجدول ٣-١ كقيمٍ تقريبية، يمكن استخدامها والانطلاق منها أثناء عملية التخطيط للحصول على نتائج مقبولة (انظر [١]، [٣]، [٤]).

بيئة الإنتشار	ثابت التخميد (القيمة المطلقة)
مناطق ريفية	2.5
مناطق الضواحي	3.0
وسط المدينة	4.0
المناطق المكتظة عمرانياً	> 4.5

الجدول ٣-١: أمثلة عن قيم ثابت التخميد في بيئات انتشار مختلفة.

بتعريف ثابت التخميد نكون قد أضفنا تحسيناً أو تطويراً أولياً على العلاقة (٣-٧)، باتجاه تمثيل الواقع على نحو أفضل. زيادة على ذلك، من الممكن إضافة تحسينٍ آخر يراعي حقيقة عدم مساواة الطاقة المتوفرة للبث عبر الهوائي لطاقة المرسل، حيث يضيع جزءٌ من هذه الطاقة بسبب الخصائص غير المثالية للمعدات التي تستخدم في المحطة الثابتة، مثل كابلات التغذية الواصلة بين تجهيزات الإرسال وهوائي المحطة، وأدوات الوصل الميكروية المرنة، كما يضيع جزءٌ إضافي من الطاقة بين هوائي الوحدة المتحركة والدارات الالكترونية الخاصة بالمستقبل. هذا يعني أن الإستطاعة النهائية المتوفرة لمستقبل الوحدة أو المحطة لا تعادل أو تساوي القيمة المعطاة في المعادلة (٣-٦)، لذا يجب تعديل هذه العلاقة كي تشمل أصناف الضياع الناتجة عن الخصائص الحقيقية أو الواقعية للأجهزة والمعدات الراديوية المستَخدَمة. لتحقيق ذلك نشير -من باب التبسيط- إلى مجموع الضياع الإضافي للإستطاعة بـ L_{sys} ، ونضيف هذا الحد إلى مقام المعادلة (٣-٦) فتصبح:

$$P_R = P_T\, G_T\, G_R \frac{1}{L_{path}} \frac{1}{L_{sys}} \qquad (١٣-٣)$$

باستخدام العلاقة (٣-١٢) نجد:

$$P_R = P_T\, G_T\, G_R \frac{1}{L_{sys}} \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2} \frac{1}{d^{\gamma}} \qquad (١٤-٣)$$

تتيح هذه العلاقة المُطوَّرة -إذا ما قورنت بالصيغة المعطاة بالمعادلة (٣-٥)- مراعاة خصائص بيئة الإنتشار وضياع الطاقة الناتج عن المعدات الراديوية، إلا أنَّ استخدامها عند التطبيق العملي، وخصوصاً في طور تخطيط الشبكة، يتطلب معرفةً مُفصَّلةً بهوائيَّي المرسل والمستقبل، وبالمواصفات الفنية للتجهيزات المستخدمة في محطة الاستقبال، وذلك حتى تُؤخذ الضياعات الإضافية المرتبطة بها بالحسبان. تتعذر هذه المعرفة الدقيقة من الناحية العملية، كما أن طور تخطيط الشبكة يسبق إجراءات اختيار الأجهزة والمكونات التابعة لها على نحوٍ نهائي. لذا، هناك حاجة للوصول إلى علاقةٍ واصفة للتخميد، تكون أكثر مرونة من (٣-١٤)، وتتيح التركيز حصرياً على العلاقة المتبادلة بين بعد المرسل عن المستقبل ومقدار الاستطاعة المستقبلة.

للوصول إلى مثل هذه العلاقة، نفترض وجود مسافة معينة مقدارها d_0، يمكن تحديد قيمة الاستطاعة عندها عن طريق القياس أو التقدير، فإذا ضربنا البسط والمقام في العلاقة (٣-١٤) بـ d_0^{γ} فإننا نحصل على:

$$P_R = P_T\, G_T\, G_R \frac{1}{L_{sys}} \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d_0^{\gamma}} \left(\frac{d_0}{d}\right)^{\gamma} = P_R(d_0)\left(\frac{d_0}{d}\right)^{\gamma} \qquad (٣-١٥)$$

حيث تمثل $P_R(d_0)$ الاستطاعة المستقبَلة عند المسافة d_0.

نلحظ في العلاقة (٣-١٥) المرونة التي توفرها، إذ يمكن حساب الاستطاعة عند أية نقطة بدلالة الاستطاعة المستقبلة عند المسافة d_0، والتي تشمل قيمتها المقيسة تأثير الهوائيين وعوامل الضياع الأخرى. بالانتقال إلى الوحدات اللوغارتيمية نحصل على صيغة جديدة للعلاقة هي:

$$P_R\big|_{\text{dBm}} = P_R(d_0)\big|_{\text{dBm}} + 10\gamma \log \frac{d}{d_0} \qquad (٣-١٦)$$

تمثل هذه المعادلة الصيغة المعتمدة لتقدير التخميد في كثيرٍ من الحالات العملية، كما تُستخدم أيضاً في الدراسات التحليلية لتقييم مقدار التخميد بدلالة المسافة. ويخضع اختيار قيمة d_0 لطبيعة المنطقة المعنية بالدراسة، ولمساحة الخلايا ونوعها، فقد تكون هذه المسافة مساويةً لـ 1m في الدراسات المُقيَّدة بمسافات صغيرة، وقد تساوي 1km عند دراسة أو تخطيط خلايا ذات مساحات شاسعة. هذا ونشير في ما يلي من النص إلى التخميد الذي تصفه العلاقة (٣-١٥) -اختصاراً- بتعبير "تخميد البُعد أو تخميد المسافة"، في دلالةٍ على الخلفية الفيزيائية للتخميد الذي تصفه.

٣-٢-٢ ظواهر الخفوت والآثار المرتبطة بها

رغم أن العلاقة (٣-١٦) تضيف تحسيناً ملحوظاً على التمثيل الرياضي لانتشار الإشارة، إلا أنها تعطي متوسط الإستطاعة المستقبلة بدلالة المسافة حصراً، ولا تتيح أخذ الظواهر التي تنشأ عن حركة المستقبل بعين الإعتبار. فرغم أن الثابت γ يتيح مرونةً للتفريق بين بيئات انتشارٍ مختلفة، إلا أن المعادلة بصيغتها المذكورة أعلاه تظلُّ قاصرة عن استيعاب الظواهر التي تنشأ عن

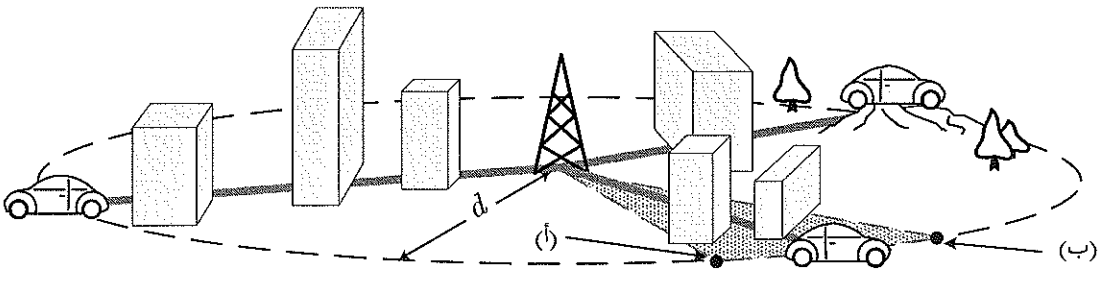
كون بيئة الانتشار متغيرة وغير ساكنة، وعن كونِ قناة الانتشار تتبدل تبعاً لموقع الوحدة المتحركة في كل لحظة. هذا التغيُّر سِمةٌ أساسية من سمات بيئة الانتشار، إذ أن كل مكونات المحيط المباشر للمستقبِل تكون في الواقع متغيرة، لذا تؤثر على آليات انتشار الأمواج حتى لو كان المستقبل ساكناً. تتمثل هذه المكونات بوسائل النقل ذات الأحجام المتباينة التي تتحرك في اتجاهات مختلفة، وبآلات البناء والإنشاء وورشات العمل، وحتى بالمشاة في الطريق. لذا فإن القيمة اللحظية للإشارة التي يرصدها المستقبل تتغير حتى عند ثباته وعدم تحركه، وهذا ما نعبر عنه بقولنا أن بيئة الانتشار متغيرة بتغير الوقت. إضافةً إلى ما سبق، تتأثر قيمة الإشارة المستقبلة عند نقطةٍ ما بالمحيط الطبيعي والعمراني، ما يؤدي إلى تفاوتٍ في قيم التخميد تبعاً للمكان الذي يوجد فيه المستقبل. فإذا كان في مكانٍ معين ضمن المدينة، ثم انتقل إلى مكانٍ آخر يبعد نفس المسافة، فإن عدم تغير المسافة عن المحطة الثابتة لا يُحتِّم أو يقتضي عدم تغير قيمة الإشارة المستقبَلة، وذلك نظراً للمسارات المختلفة التي تسلكها الإشارة للوصول إلى كلٍّ من المكانين.

نخلُص مما سبق إلى أن مكان وجود المستقبل والتغير الزماني لبيئة الانتشار لهما تأثير مباشر على الإشارة المستقبَلة، ويؤديان إلى ظواهر مميزة، تعرف باسم "ظواهر الخفوت" "Fading Mechanisms"، ويمكن تصنيفها كما يلي:

٣-٢-٢-١ "الخفوت بعيد المدى" أو "الخفوت البطيء"

لتوضيح مفهوم "الخفوت بعيد المدى" "Long-Term Fading" ننطلق من الشكل ٣-٢ الذي يفترض وجود ثلاثة أجهزة استقبال في ثلاث سياراتٍ على بعدٍ متساوٍ عن المحطة الثابتة، ولكن في مواضع أو نقاط جغرافية مختلفة. يفترض الشكل أيضاً سكون هذه السيارات وانعدام وجود أي جُرمٍ متحرك ضمن بيئة الانتشار.

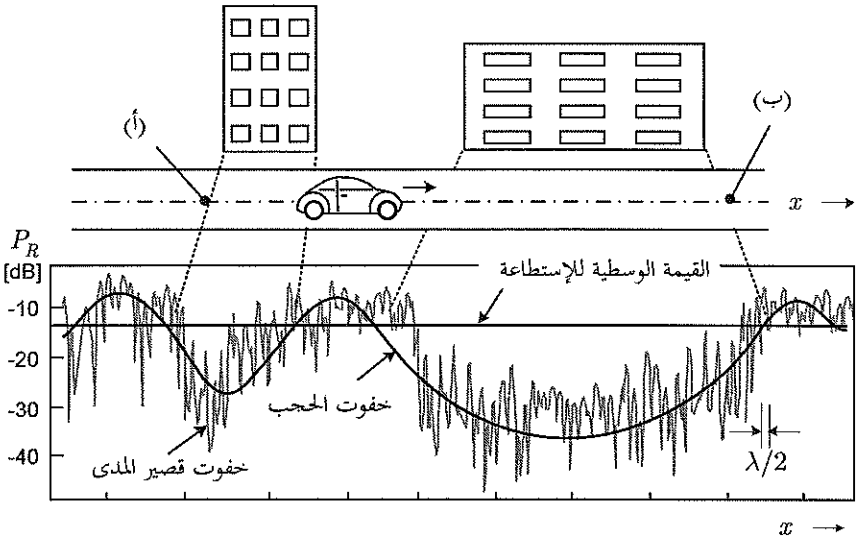
رغم هذه الإفتراضات المؤدية إلى تبسيطٍ شديد لما يمكن أن يكون الواقع عليه، نقرأ من الشكل أن قيمة التخميد تكون متباينة في كلٍّ من المواضع المختلفة، حيث تخضع الإشارة لتغيُّر في مطالها وطورها، يختلف تبعاً لعددِ وطبيعة العوائق التي تعترضها على طول مسارها بين المرسل والمستقبل في كلٍّ من الحالات الثلاثة، وهذا يؤدي إلى اختلافٍ في قيم الإشارة التي يرصدها كل من أجهزة الإستقبال، رغم كون هذه الأجهزة ساكنة، وورغم كونها متساوية في بعدها عن المرسل.



الشكل ٣-٢: توضيح لنشوء اختلاف في قيمة الإشارة المستقبلة تبعاً لمكان المستقبل رغم كون البعد عن المرسل ثابتاً.

من جانبٍ آخر، لو استخدمنا العلاقة (٣-١٦) لحساب الاستطاعة المستقبلة، فإننا نحصل على نفس القيمة لكل من الحالات الثلاثة، ذلك أن البعد عن المستقبل هو الموسط أو المتحول الوحيد الذي تأخذه هذه العلاقة بعين الاعتبار، وهو مشتركٌ أو متساوٍ لكل أجهزة الاستقبال .يتبين من ذلك أن العلاقة (٣-١٦) قاصرة عن تمثيل ما يعترض مسار الإشارة من عوائق، ولا تتيح مراعاة عوامل أخرى مثل ارتفاع المكان الذي يوجد عليه المستقبل أو التضاريس المحيطة به.

ننتقل الآن لنقاش ما يطرأ على الإشارة المستقبلة عند تحرك المستقبل بين النقطة (أ) والنقطة (ب) من الشكل، بحيث يكون مسار المستقبل محاذياً لبناءين متجاورين، مع افتراض أن الوحدة المتحركة تتبع مساراً دائرياً حول المحطة، وبحيث تكون قيمة الحد d في العلاقة (٣-١٦) ثابتة. هذا ما يبينه الشكل ٣-٣، حيث نلاحظ -كما هو متوقع- أن القيمة الوسطية للإشارة تنخفض بدرجة ملحوظة أثناء محاذاة السيارة لكل من البناءين. كذلك نلحظ تغيراتٍ عابرة كثيرة في قيمة الإشارة اللحظية (المنحنى فاتح اللون)، تمثل تأرجحاً ذا وتيرة عالية حول القيمة الوسطية (سنتطرق لهذه الظاهرة لاحقاً).
نلفت النظر في هذا السياق إلى أن الخط الأفقي في هذا الشكل يمثل القيمة الثابتة للإشارة، والتي نحصل عليها باستخدام العلاقة (٣-١٦)، وينتج ثبات قيمة الإشارة عن ثبات قيمة البعد عن المحطة (أي الحد d)، حيث افترضنا بأن الوحدة المتحركة تتبع مساراً دائرياً حول المحطة.



الشكل ٣-٣: خفوت القيم اللحظية للاستطاعة نتيجة تواجد عوائق تعترض مسار الإشارة.

يتضح مما ذُكر أن القيمة الوسطية الفعلية للإشارة المستقبلة "تتراوح أو تتأرجح" حول قيمة الاستطاعة التي تفضي إليها معادلة التخميد بدلالة بُعْدِ الوحدة عن المحطة، أي العلاقة (٣-١٦). يطلق على هذا التفاوت أو التأرجح اسم "الخفوت" ويُعزى من الناحية الفيزيائية إلى حجب الإشارة عن المستقبل عند مروره جانبَ عائقٍ ضخمٍ، كبناء طابقيٍّ كبير على سبيل المثال، أو عند وجود المستقبل ضمن منحدرٍ تحيط به تضاريس ذات ارتفاعاتٍ كبيرة نسبياً، بحيث لا تتوفر إمكانية وصول الإشارة إليه إلا عن

طريق مسارات غير مباشرة، مما يفضي إلى ضعفٍ في مستوى الإشارة. ونظراً لهذا السبب الفيزيائي، نطلق على هذا النوع من الخفوت اسم "خفوت الحجب" "Shadowing"، ويشير المصطلح الانكليزي إلى مشابهةِ هذه الظاهرة من حيث المبدأ لظاهرة نشوء الظل عند وجود عائقٍ ذي أبعاد كبيرة مقارنةً بطول موجة الضوء. وقد اخترنا أن نلتزم باستخدام تعبير "خفوف الحجب" رغم أن الكثير من الكتب والنشرات العلمية العربية تطلق عليه اسم "خفوت التظليل" كترجمة حرفية للمصطلح الانكليزي نرى أنها لا تتسق مع المعنى الفيزيائي.

يلعب خفوت الحجب دوراً مهماً في إجراءات التخطيط، إذ يجب أخذه بعين الاعتبار عند حساب استطاعة أو قوة الإشارة التي يجب توفرها عند كل نقطة ضمن نطاق المنطقة الجغرافية التي تغذيها محطةٌ ثابتةٌ ما. وقد اتضح من خلال مناقشة الشكل ٣-٣ أنه في حال اعتماد المهندس على القيمة التي تؤدي إليها معادلة تخميد المسافة فقط، فإن الإشارة المتاحة للمستقبل تكون في أحيان كثيرة دون هذه القيمة، مما يؤدي إما إلى انقطاع الإتصال، أو إلى عدم توفر القدر الكافي من الطاقة كي يؤدي المستقبل دوره وفق معايير الجودة المطلوبة. لذا لا بد من تحسين نموذج التنبؤ المُعطى بالعلاقة (٣-١٦) من أجل الوصول إلى تمثيلٍ أكثر دقة لما يطرأ على الإشارة المستقبلة من تغيرات.

تختلف قيم الاستطاعة الوسطية تبعاً للمسار الذي تتبعه الوحدة المتحركة ضمن منطقة جغرافية ما، وترتبط هذه القيم بتسلسل وحجم وطبيعة العوائق التي يمكن أن تحجب إشارة المحطة الثابتة عن جهاز الاستقبال. ولـمَّا كانت هذه العوامل التي تمثل البيئة المحيطة، كالأشجار المكتظة والأبنية السكنية والجسور والأنفاق، لا تخضع لترتيبٍ معين، ولا يمكن وصفها عن طريق علاقات رياضية ذات متحولات أو موسطات محددة القيم، وجبَ تمثيل ظاهرة الخفوت كتغيرات عشوائية عابرة تطرأ على قيم الإشارة (انظر الشكل ٣-٣). وقد أثبتت دراساتٌ ميدانية ومُقارِنة عديدة أن القيم الوسطية لمقدار خفوت الحجب تتبع توزيعاً طبيعياً إذا حُوِّلت قيمُها إلى الوحدات اللوغارتيمية. بتعبيرٍ آخر، تتبع قيم الإشارة المستقبلة، مقيسةً بوحدة الـ dBm ، توزيعاً طبيعياً (توزيع "غاوس" "Gauss"). لذلك اصطُلح على تسمية هذا الخفوت أيضاً بـ "Log–Normal Fading"، أي "الخفوت ذو التوزع الطبيعي لقيم اللوغاريتم". هذا يعني أنه عند قياس الإستطاعة عند نقاط عديدة تبعد نفس المسافة عن المحطة الثابتة، فإن القيم المقيسة ستكون موزعةً إحصائياً تبعاً لمنحنى غاوس.

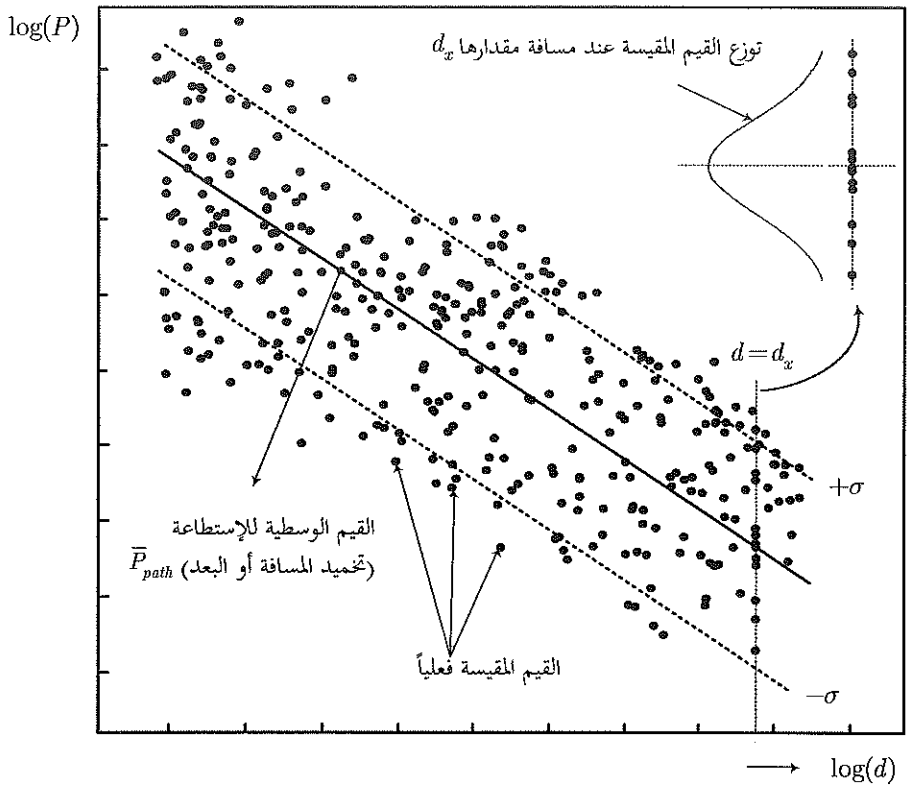
يبين الشكل ٣-٤ هذه الظاهرة من الناحية المبدئية، حيث تشير النقاط المتفرقة إلى القيم العشوائية للاستطاعة عند إجراء قياسات ميدانية، فإذا رُسم خط شاقولي عند قيمةٍ ما للمسافة، ممثلةً بـ d_x في الشكل، فإن النقاط التي يمسها هذا الخط تمثل مجموعة القيم التي تؤدي إليها القياسات عند تغيير النقطة الجغرافية، مع المحافظة على بعدٍ ثابت عن المحطة. هذه المجموعة من القيم، والمدونة بوحدة dBm تتبع توزيع غاوس، كما هو مُشارٌ إليه في الشكل.

لتمثيل خفوت الحجب رياضياً ننطلق من العلاقة (٣-١٢) ونضيف إليها –استناداً إلى الفقرات السابقة– حَدَّاً يصف التغيرات العشوائية. نحصل بذلك على صيغةٍ محسَّنةٍ لعامل التخميد هي:

$$L_{path}|_{\mathrm{dB}} = \bar{L}_{path}|_{\mathrm{dB}} + l_{path}|_{\mathrm{dB}} \qquad (٣-١٧)$$

حيث يمثل الحد $l_{path}|_{\mathrm{dB}}$ متحولاً عشوائياً تدل قيمته على مقدار تراوح التخميد حول القيمة الوسطية $\overline{L}_{path}|_{\mathrm{dB}}$، التي تكافئ الحد $\left(4\pi/\lambda\right)^2 d^{\gamma}$ بالتدوين اللوغاريتمي. ولحساب هذا المتحول، نستند إلى ما قادت إليه نتائج الدراسات والأبحاث الميدانية من أنه يتبع توزيع غاوس، لذا نعتبر أن توزيع الكثافة الاحتمالية لـ $l_{path}|_{\mathrm{dB}}$ يماثل توزيع غاوس (التوزيع الطبيعي) الذي تصفه العلاقة:

$$f_l(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{path}^2}} e^{(x^2/2\sigma_{path}^2)} \qquad (٣-١٨)$$



الشكل ٣-٤: توزع القيم المقيسة للاستطاعة بدلالة البعد عن المحطة الثابتة.

يدل المتحول x في العلاقة السابقة على القيم المحتملة لـ $l_{path}|_{\mathrm{dB}}$، أما σ_{path}، فيمثل قيمة "الانحراف المعياري" "Standard Deviation" للتوزيع $f_l(x)$. ننوه هنا إلى أن العلاقة السابقة تفترض أن القيمة الوسطية لـ $l_{path}|_{\mathrm{dB}}$ تعادل الصفر، إذ أن قيمة هذا المتحول تعطي مقدار تراوح التخميد حول القيمة الوسطية، أي $\overline{L}_{path}|_{\mathrm{dB}}$، ولا تمثل قيمة التخميد المطلقة أو الإجمالية، التي تُعطى بالعلاقة (٣-١٧).

نَذْكُرُ في هذا السياق أيضاً أن الاستطاعة بالتدوين اللوغاريتمي يمكن أن تصاغ انطلاقاً من المعادلة (٣-١٣) كما يلي:

$$\begin{aligned} P_R|_{\mathrm{dB}} &= P_T|_{\mathrm{dB}} + G_T|_{\mathrm{dB}} + G_R|_{\mathrm{dB}} - L_{sys}|_{\mathrm{dB}} - L_{path}|_{\mathrm{dB}} \\ &= P_T|_{\mathrm{dB}} + G_T|_{\mathrm{dB}} + G_R|_{\mathrm{dB}} - L_{sys}|_{\mathrm{dB}} - \bar{L}_{path}|_{\mathrm{dB}} - l_{path}|_{\mathrm{dB}} \\ &= \bar{P}_R|_{\mathrm{dB}} - l_{path}|_{\mathrm{dB}} \end{aligned} \qquad (٣-١٩)$$

حيث يدل الحد $\bar{P}_R|_{\mathrm{dB}}$ على الاستطاعة الوسطية المستقبلة عند مسافة محددة d_0. لذا يمكن اعتبار $P_R|_{\mathrm{dB}}$ متحولاً عشوائياً أيضاً، ذا توزيعٍ مقداره (انظر للإشتقاق [١] و[٣]):

$$f_p(\rho) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{path}^2}} e^{(\rho-\bar{P}_R|_{\mathrm{dB}})^2/2\sigma_{path}^2} \qquad (٣-٢٠)$$

انطلاقاً من العلاقة (٣-٢٠) يمكن حساب احتمال أن تكون استطاعة الإشارة أقل من عتبةٍ معينةٍ مقدارها η كما يلي:

$$\Pr[P_R|_{\mathrm{dB}} \leq \eta] = \int_{-\infty}^{\eta} f_p(\rho)d\rho = \int_{-\infty}^{\eta} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{path}^2}} e^{(\rho-\bar{P}_R|_{\mathrm{dB}})^2/2\sigma_{path}^2}\, d\rho \qquad (٣-٢١)$$

تجدر الإشارة في هذا السياق إلى أن الانحراف المعياري σ_{path} يُستعمَل عادةً لمعايرة النموذج الاحصائي الذي تُمثِّله العلاقة (٣-٢١)، فقد بينت الدراسات الميدانية أيضاً أن قيمة هذا المتحول تكون تابعةً لطبيعة البيئة التي توجد فيها المحطة الثابتة. فعلى سبيل المثال، تبلغ قيمة σ_{path} ضمن المناطق الريفية 6 dB تقريباً، وترتفع في المناطق المكتظة عمرانياً حتى تقارب 14 dB. هذا ويجري اختيار القيمة النهائية لهذا المتحول إما انطلاقاً من قيمٍ متوفرة لبيئات انتشارٍ مشابهة، أو عبر مواءمة نتائج قياساتٍ ميدانية للمنحنيات التي يوفرها النموذج النظري (العلاقة (٣-٢٠)).

ننوه أيضاً إلى أن التكامل في (٣-٢١) لا يمكن أن يحسب تحليلياً، لذا تعطى قيمته عادةً باستخدام تابع الخطأ $Q(x)$ على النحو التالي (انظر [٣]):

$$\Pr[P_R|_{\mathrm{dB}} \leq \eta] = Q\left(\frac{\bar{P}_R|_{\mathrm{dB}} - \eta}{\sigma_{path}}\right) \qquad (٣-٢٢)$$

بعد بيان الخصائص الإحصائية لخفوت الحجب، نسلط الضوء باختصار على بعض المفاهيم الإضافية المتعلقة به:

- تمثل آلية الخفوت في الشكل ٣-٣ حالةً خاصة من الحالة العامة التي يؤدي فيها وجود عائقٍ ما إلى خفضٍ لمستوى الطاقة المستقبلة، أي أن الخفوت قد ينشأ عن أي عائقٍ، مثل الأشجار، أو وسائل النقل الكبيرة، أو التضاريس المحيطة.
- يبلغ طول موجة التردد الحامل في نظم الإتصالات الخلوية بضع عشرات من الـ cm، إذ يتراوح بين 33 cm في نظام GSM-900 وما يقارب نصف هذا المقدار في نظامي GSM-1800 و UMTS. ولمَّا كانت العوائق المسبِّبة لحجب

الإشارة ذات أبعاد كبيرة نسبياً، يكون النطاق الجغرافي للمنطقة التي تحدث ضمنها عملية الحجب (مقارنةً بطول موجة الحامل) واسعاً نسبياً، وهذا ما يبرر الإشارة إلى هذه الظاهرة بمصطلح "الخفوت بعيد المدى" "Long Term Fading".

- لا تتغير طبيعة محيط الوحدة المتحركة -في الأحوال العادية- على نحوٍ فجائي وسريع، إذ يتطلب التنقل من منطقةِ حجبِ بناءٍ أو تضاريس مرتفعة إلى منطقةٍ أخرى وقتاً ملحوظاً، وإذا قورن هذا الوقت بالمدة اللازمة لقطع مسافةٍ مكافئةٍ لطول موجة الحامل الترددي، فإن تغيرَ طبيعة ومقدار الخفوت يبدو بطيئاً نسبياً. لذا يسمى هذا الخفوت أيضا بـ"الخفوت البطيء" "Slow Fading". لتوضيح ذلك على نحوٍ أفضل، من الممكن للقارئ تصوُّرُ مرورِه وسط المدينة ضمن شارعٍ مستوٍ نسبياً، تحيط به الأبنية من الطرفين، فنظراً لكون أبعاد هذه الأبنية (العرض والإرتفاع) متقاربة في الغالب، فإن مقدار الخفوت يكون متقارباً أيضاً ضمن كل الرقعة الجغرافية التي يمثلها الشارع والأبنية المجاورة له.

- يلعب خفوت الحجب أو الخفوت بعيد المدى دوراً مهماً جداً في عملية التخطيط، ويتجلى ذلك من التفسير الصحيح للعلاقة (٣-١٧)، إذ تعني ضمنياً أن استخدام إحدى المعادلتين (٣-١٢) أو (٣-١٦) لحساب التخميد أو الاستطاعة يقود إلى القيم المتوسطة التي تكون محققةً باحتمال 50%، أي في 50% من الوقت، أو عند 50% من النقاط الجغرافية. هذا يعني أنه إذا ما خُططت الشبكة باعتماد هذه القيم، فإن جودة الخدمة تكون مضمونة في 50% فقط من حالات الاستخدام، وهذا غير مقبول بالطبع.

لذا، ومن أجل زيادة احتمال توفر الاستطاعة الكافية لاستقبالٍ وأداءٍ جيدين، يجب رفع مستوى طاقة البث في المحطة الثابتة، بحيث يكون مقدار الاستطاعة المستقبلة أكبر من $\overline{P}_R$ في معظم نقاط منطقة التغذية. يطلق على هذه الزيادة النسبية للطاقة اسم "هامش الخفوت" "Fade Margin"، كما تُعرَّفُ أيضاً على أنها "الفارق بين متوسط الإستطاعة المستقبلة وحساسية المستقبل".

لتوضيح أهمية مراعاة "هامش الخفوت" أثناء عملية التخطيط نسوق المثال التالي:

لنفترض وجود محطةٍ تعمل بنظام GSM-900 في بيئةٍ مقدار الانحراف المعياري لتوزيع التخميد ضمنها هو $\sigma_{path} = 9\,\mathrm{dBi}$، نفترض أيضاً أن معطيات التخطيط تتطلب أن يكون نصف قطر منطقة التغذية (الخلية) معادلاً لـ $2\,\mathrm{km}$، بحيث يكون مقدار تخميد المسافة عند هذه البعد هو $135\,\mathrm{dB}$، علماً بأن المحطة مزودةٍ بهوائي ربحه $6\,\mathrm{dBi}$، وأن المعدات المستخدمة تسبب ضياعاً في الاستطاعة مقداره $1.5\,\mathrm{dB}$. نطلق في هذا المثال أيضاً من أن الوحدات المحمولة مزودة بأجهزة استقبال ذات حساسية مقدارها $-90\,\mathrm{dBm}$، وأن ربح الهوائي في كل منها مقداره $2\,\mathrm{dBi}$.

يُطلب من مهندس التخطيط عند توفر مثل هذه المعطيات حساب مقدار الاستطاعة التي يجب أن تبثها المحطة، كي تكون جودة الخدمة متوفرة في 80% من حالات الاستخدام، وذلك ضمن كل نقاط الخلية. من المطلوب إذاً تحققُ العلاقة:

$$\Pr[P_R|_{\mathrm{dB}} > -90\,\mathrm{dBm}] = 0.8 \qquad (٣-٢٣)$$

إذا انطلقنا من المعادلة (٣-٢٢) وعوضنا القيم المفترضة فإننا نحصل على:

$$\Pr[P_R|_{\text{dB}} > -90\,\text{dBm}] = Q\left(\frac{-90\,\text{dBm} - \overline{P}_R|_{\text{dB}}}{9\,\text{dB}}\right) = 0.8 \qquad (٢٤-٣)$$

من خصائص التابع $Q(x)$ تمَيُّزُه بالعلاقة $Q(-x) = 1 - Q(x)$، كما أن قيمه متوفرة في جداول جاهزة، تعرضها كتب الإحصاء أو الرياضيات العامة. لذا يمكن صياغة العلاقة السابقة كما يلي:

$$1 - Q\left(\frac{-90\,\text{dBm} - \overline{P}_R|_{\text{dB}}}{9\,\text{dB}}\right) = Q\left(\frac{90\,\text{dBm} + \overline{P}_R|_{\text{dB}}}{9\,\text{dB}}\right) = 1 - 0.8 = 0.2 \qquad (٢٥-٣)$$

وبالرجوع إلى جداول التابع في أيٍّ من المصادر المتاحة نجد أن $Q(0.84) = 0.2$، ما يعني تحقق العلاقة:

$$\frac{90\,\text{dBm} + \overline{P}_R|_{\text{dB}}}{9\,\text{dB}} = 0.84 \qquad (٢٦-٣)$$

بإعادة ترتيب الحدود نحصل على القيمة المطلوبة للإستطاعة وهي:

$$\overline{P}_R|_{\text{dB}} = -82.4\,\text{dBm} \qquad (٢٧-٣)$$

يجب أن تتوفر هذه القيمة عند كل نقطة من نقاط منطقة التغذية، حتى عند تلك التي ترسم الإطار الخارجي للخلية، والتي افترضنا أنها تبعد $2\,\text{km}$ عن المحطة. لذا نحصل باستخدام المعطيات المتوفرة لحساب العلاقة (٣-١٩) على مقدار الاستطاعة المطلوب وهو:

$$\begin{aligned} -82.4\,\text{dBm} &= P_T|_{\text{dB}} + 6\,\text{dB} + 2\,\text{dB} - 1.5\,\text{dB} - 135\,\text{dB} \\ &\Rightarrow P_T|_{\text{dB}} = 45.9\,\text{dBm} \end{aligned} \qquad (٢٨-٣)$$

يوضح هذا المثال أنه لولا مراعاة ظاهرة الخفوت، لكان من الممكن اعتبار قيمة حساسية المستقبل في الطرف الأيسر من المعادلة مساويةً لـ $(-90\,\text{dBm})$ بدلاً من $(-82.4\,\text{dBm})$، هذا يعني أن مقدار هامش الخفوت أو الزيادة النسبية للاستطاعة هو $7.6\,\text{dBm}$. يبين المثال أيضاً تأثير هامش الخفوت على الصعيد الاقتصادي، حيث يمكن استناداً إلى العلاقة (٣-١٤) حساب نصف قطر الخلية في حال إهمال هامش الخفوت[1]، وسنجد أنه سيكون أكبر من $2\,\text{km}$ بكثير. هذا يعني أن مساحة الخلية تصغر على نحو ملحوظ عند إجراء التخطيط مع مراعاة متطلبات الجودة، وصِغَرَ مساحة الخلية يعني بدوره زيادة عدد المحطات الثابتة الضرورية لتغطية مساحة جغرافية ما، ومن ثم زيادة التكاليف المترتبة على ذلك.

[1] نترك للقارئ حساب القيمة كمثال تدريبي.

٣-٢-٢-٢ "الخفوت قصير المدى" أو "الخفوت السريع"

عند إمعان النظر في الشكل ٣-٣ مرة أخرى، نلحظ أن الإشارة تتعرض لتغيرات مفاجئة في قيمها اللحظية، يتكرر حدوثها كلما قطعت الوحدة المتحركة مسافة تعادل نصف طول موجة الحامل الراديوي تقريباً، كما أن هذه التغيرات لا تتبع نمطاً محدداً أو معيناً من حيث حدتها، فتارةً يبلغ مقدار التغير بضعة وحداتٍ من الديسيبل، وتارةً يصل إلى 30dB، أي ما يعادل انخفاضاً إلى جُزءٍ من الألف تقريباً.

تمثل هذه التغيرات نوعاً آخر من الخفوت، يطرأ على الإشارة ضمن مسافات صغيرة، لذا يسمى اصطلاحاً بـ "الخفوت قصير المدى" "Small Scale Fading"، وإذا كان المستقبل متحركاً، فإنه يقطع هذه المسافات الضئيلة بسرعة، ومن ثم تكون وتيرة رصد هذه التغيرات مرتفعة، لذا يسمى هذا الخفوت أيضاً بـ "الخفوت السريع" "Fast Fading".

يطرأ الخفوت قصير المدى لأسباب تتعلق بآليات انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية، التي يعرض الشكل ٣-٥ بعضاً منها على نحوٍ مبسط جداً. نقرأ من هذا الشكل أن أي شعاعٍ يصدر عن المرسل يسلك مساراتٍ متعددة إلى المستقبل، أي أن الإشارة التي يرصدها المستقبل في كل لحظة تمثل حصيلة أو مجموع "نُسَخٍ" متعددة من الإشارة الأصلية، تسلك كل منها مساراً مختلفاً، وتتعرض لتسلسلٍ مختلفٍ من عمليات الانكسار والانحراف والامتصاص. لذا يكون مقدار التغير في مطال وطور نسخة الإشارة السالكة لأيٍّ من هذه المسارات مختلفاً أيضاً.

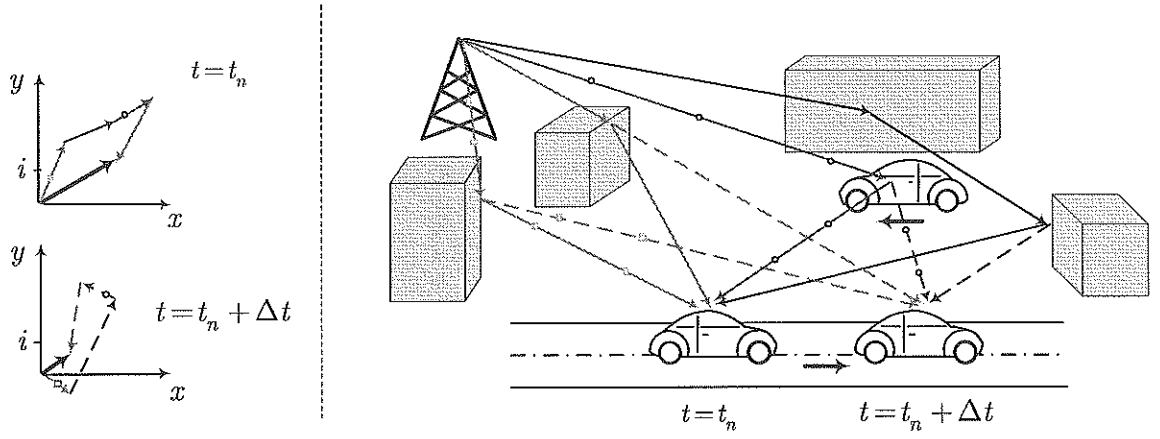
ولما كانت نسخ الإشارة المرسَلة تُجمع عند المستقبل شعاعياً، فإن مجموع الإشارات أو النسخ يختلف وفق مقدار التباين في أطوار هذه النسخ، والذي يؤدي إما إلى جمعٍ تراكميٍ لمطالات الإشارات المختلفة في حال اتفاقها في الطور، ومن ثم إلى مطالٍ نهائي أو إجمالي أكبر من مطال أيٍّ من الإشارات الجزئية، أو إلى مطال صغير جداً في حال تعارض الإشارات الجزئية في قطبية أطوارها وإلغاء بعضها للبعض الآخر. ولما كان فارق الطور الضروري للانتقال من حالة جمع المطالات تراكمياً إلى حالة إلغائها يعادل ربع طول الموجة، أي $\lambda/4$، فإن المسافة التي تفصل بين نقاط إلغاء الإشارة تكون مقاربة لنصف طول موجة الحامل.

استناداً إلى هذه الخلفية الفيزيائية لنشوء هذا الصنف من الخفوت، يشار إليه اصطلاحاً بتعبير "خفوت تعدد المسارات" "Multipath Fading".

من الضروري أيضاً التنويه إلى أن طبيعة التغيرات التي تطرأ على الإشارة تتبدل بين لحظة وأخرى، حتى عند كون المستقبل ساكناً. فإذا افترضنا في الشكل ٣-٥ أن المستقبل لايتحرك، فإن الإشارة التي يلتقطها تختلف زمنياً-رغم ذلك- بسبب تحرك السيارة التي في خلفية الشكل، أي بسبب أي تغير ممكن في بيئة الانتشار. فإذا تحرك المستقبل أيضاً، أصبح الأمر أكثر تعقيداً، إذ تؤثر حركته وحركة ما يحيط به تراكمياً على طبيعة ومقدار الإشارة التي يستقبلها.

تتعدد وتتباين العوائق التي تؤدي إلى ظاهرة الخفوت في الحالات الواقعية على نحوٍ شديد، ومن المتعذر حصر عددها وطبيعتها وآثارها، خاصةً إذا استحضرنا مرة أخرى أن كل جسم أو جُرمٍ فيزيائي ضمن بيئة الانتشار يمثل سطحاً يمكن للأمواج أن تنعكس عنه أو تنتثر عند حوافه، سواءً كان هذا الجسم بناءً طابقياً ضخماً، أو ورقة من أوراق الأشجار. لذا لابد من اللجوء إلى طرق إحصائية لتمثيل الإشارة المستقبَلة، وقد بينت العديد من الدراسات المستفيضة أن مطال الإشارة عند أية نقطة جغرافية

يتبع من حيث قيمه اللحظية توزيع "رايلي" "Rayleigh"، لذا نسوق في ما يلي المعادلات الرياضية الواصفة لهذا التوزيع، دون أن نفصّل خطوات اشتقاقها، وللقارئ المهتم بمزيدٍ من التفاصيل حول المعالجة الرياضية لأنواع الخفوت المختلفة الرجوع إلى المصادر المختصة ([٥]-[٩] مثلاً).



(أ): وصول الإشارة للمستقبل عبر مسارات متعددة.

(ب): حصيلة جمع الإشارات شعاعياً.

الشكل ٣-٥: نشوء الخفوت قصير المدى بسبب تعدد المسارات.

يهتم المهندس في الحالات العملية بمعرفة احتمال حدوث قصورٍ أو تدنٍّ في نوعية الخدمات التي تتيحها الشبكة نتيجة لتأثير ظاهرة الخفوت، وهذا يكافئ انخفاض قيمة مطال الإشارة A دون عتبة معينة ϑ، قد تكون ممثلةً بحساسية المستقبل، أو بقيمة أخرى تفرضها معطيات عملية التخطيط. يُعبَّر عن هذا الاحتمال رياضياً بالعلاقة:

$$Pr\{A \le \vartheta\} = F_A(\vartheta) = \int_0^{\vartheta} f_A(\nu)\,d\nu \qquad (٢٩-٣)$$

التي تمثل تكاملَ تابعِ الكثافة الإحتمالية $f_A(\nu)$ لقيم المطال الممكنة، والتي يدل عليها المتغير ν، وذلك ضمن المجال الممتد من القيمة الدنيا للمطال، وهي الصفر طبعاً، إلى مقدار العتبة المحددة ϑ. فإذا كان مطال الإشارة A يخضع إحصائياً لتوزيع Rayleigh، فإن تابع الكثافة الاحتمالية $f_A(\nu)$ يعطى بالعلاقة:

$$f_A(\nu) = \frac{\nu}{\sigma^2}\, e^{(-\nu^2/2\sigma^2)}, \qquad \nu \ge 0 \qquad (٣٠-٣)$$

حيث يرتبط الرمز σ بالقيمة الوسطية للمطال A_{mean}، وبالانحراف المعياري σ_R، عبر العلاقات:

$$A_{mean} = E\{\nu\} = \int_0^\infty \nu f_A(\nu)\,d\nu = \sigma\sqrt{\frac{\pi}{2}}$$

$$\sigma_R = E\{\nu^2\} - E^2\{\nu\} = \sqrt{\int_0^\infty \nu^2 f_A(\nu)\,d\nu - \sigma^2\,\frac{\pi}{2}} = \sigma\sqrt{2-\frac{\pi}{2}} \qquad (٣-٣١)$$

وحيث تمثل القيمة $2\sigma^2$ متوسط إستطاعة الإشارة العشوائية [٣].

بتعويض العلاقة (٣-٣٠) في (٣-٢٩) نحصل على صيغة تحليلية تربط بين احتمال كون المطال A دون العتبة ϑ، وبين الموسطات الواصفة لتوزيع Rayleigh:

$$Pr\{A \le \vartheta\} = F_A(\vartheta) = \int_0^\vartheta f_A(\nu)\,d\nu = 1 - e^{(-\vartheta^2/2\sigma^2)}, \qquad \nu \ge 0 \qquad (٣-٣٢)$$

قد يكون من الضروري أحيانا أن تُدرَس قيم الاستطاعة المستقبلة عوضاً عن قيم المطال، وهذا يقتضي الاستعانة بتابع الكثافة الاحتمالية للاستطاعة، الذي يمكن اشتقاقه من (٣-٣٠) ويُعطى كما يلي [١]،[٣]:

$$f_P(\mu) = \frac{1}{2\sigma^2}\,e^{(-\mu/2\sigma^2)}, \qquad \mu \ge 0 \qquad (٣-٣٣)$$

كنا قد أشرنا عند نقاشنا لخفوت الحجب إلى أهمية مراعاة آثاره أثناء مرحلة تخطيط الشبكة، ونؤكد هنا على الأمر ذاته من ناحية الخفوت قصير المدى، إذ أن تجاوز قيمة الاشارة الوسطية لحساسية المستقبل بقدرٍ كاف لا يضمن توفرَ الاتصال في كل الأوقات، ما دام الخفوت يعرض الاشارة لتغيرات مفاجئة حسب ظروف ومتغيرات بيئة الانتشار، والتي يتعذر التحكم أو التنبؤ بها. لذلك تطرح ظاهرة الخفوت قصير المدى على مهندسي الاتصالات أسئلة مشابهة لتلك التى ناقشناها في حالة خفوت الحجب، مثل: «ماهي استطاعة الإشارة الوسطية الضرورية حتى يكون الاتصال ممكناً بجودة معقولة في $X\%$ من الحالات»، أو بتعبيرٍ آخر «ما هو هامش الاستطاعة الإضافي الذي يجب أخذه بالحسبان؟». وكما مر في حالة خفوت الحجب، تمثل العلاقات (٣-٣٠) إلى (٣-٣٣) أدوات فعالة يستعين بها مهندس التخطيط للإجابة على مثل هذه التساؤلات، وهذا ما نوضحه في المثال التالي:

إذا كان الخفوت ضمن بيئة انتشارٍ ما يخضع لتوزيع Rayleigh، ما هو احتمال أن تنخفض استطاعة الإشارة بمقدار 20 dB عن القيمة الوسطية؟ وما هو احتمال الانخفاض دون 6 dB أو 3 dB؟.

لحساب القيمة المطلوبة ننطلق من العلاقة (٣-٣٠) التي نقرأ منها أن متوسط الإستطاعة هو $2\sigma^2$. من جانبٍ آخر، يعني انخفاض الإستطاعة بمقدار 20 dB أن العتبة الدنيا ترتبط بمطال الإشارة عن طريق العلاقة:

$$\frac{A_{mean}^2}{2\sigma^2}\Big|_{\text{dB}} = 20 \quad \Rightarrow \quad \frac{A_{mean}^2}{2\sigma^2} = \frac{1}{100} \tag{٣٤-٣}$$

بتعويض هذه القيمة في المعادلة (٣-٣٢) نحصل على:

$$Pr\{A \le A_{mean}\} = F_A(A_{mean}) = 1 - e^{\frac{1}{100}} = 9.95\times 10^{-3} = 0.995\% \tag{٣٥-٣}$$

بنفس الطريقة يمكن الحصول على القيم المتعلقة بـ 6 dB و 3 dB، وهي على التوالي: 22.1% و 39.3%.

يبين هذه المثال مرةً أخرى أهمية موضوع الخفوت قصير المدى وخطورته على أداء الشبكة، إذ أن انخفاض القيمة اللحظية للإشارة بمقدار 3 dB، أي إلى النصف، محتملٌ في 39.3% من الحالات تقريباً، وهذا يعني أنه في حال كانت حساسية المستقبل أقل بـ 3 dB من القيمة الوسطية لاستطاعة الإشارة، وأُهمل هامش الخفوت أثناء تخطيط الشبكة، فإن خطر انقطاع الاتصال يكون مماثلاً في 40% تقريباً من حالات الاستخدام.

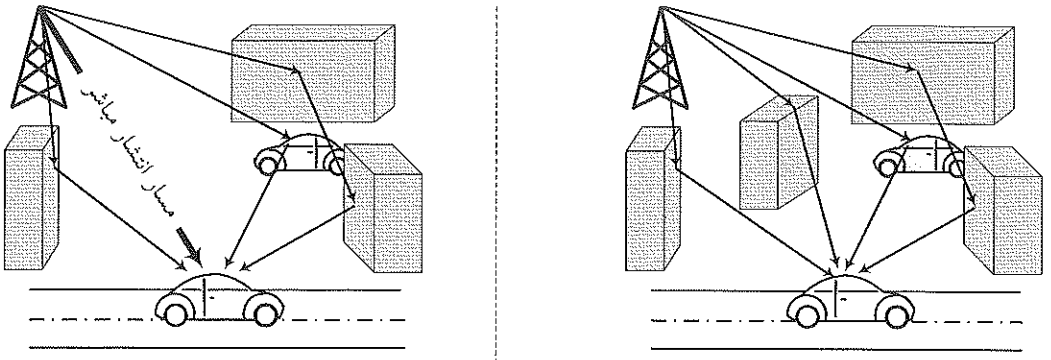
قد يُطرح السؤال عن جودة الخدمة بصيغة أخرى، من الأمثلة على ذلك ما يلي:
تتطلب جودة الخدمة في نظام خلوي أن يكون المستقبل قادراً على رصد الإشارة واستخلاص المعلومات منها في 85% من حالات الاستخدام. ما هو متوسط الإشارة المطلوب توفره في منطقة الخدمة في هذه الحالة، إذا كانت حساسية المستقبل $P_{sens}|_{\text{dB}}$ تساوي $-95\,\text{dBm}$؟
للإجابة على هذا التساؤل نحسب بدايةً القيمة المطلقة للحساسية وهي: $P_{sens} = 316\times 10^{-15}$. بتوفر هذه القيمة يمكن حساب احتمال رصد قيمةٍ للإشارة أكبر منها، وذلك عن طريق تكامل العلاقة (٣-٣٣)، مع مراعاة أن قيمة الحساسية P_{sens} تمثل هنا الحد الأدنى لمجال التكامل:

$$\begin{aligned}\Pr[P_R > P_{sens}] &= \int_{P_{sens}}^{\infty} \frac{1}{2\sigma^2}\, e^{(-\mu/2\sigma^2)}\, d\mu = \Big[-e^{(-\mu/2\sigma^2)}\Big]_{P_{sens}}^{\infty} \\ &= e^{(-P_{sens}/2\sigma^2)} = 0.85\end{aligned} \tag{٣٦-٣}$$

بإعادة ترتيب الحدود وعزل $2\sigma^2$ التي تمثل الإستطاعة الوسطية، نحصل على القيمة المطلقة المطلوبة، وهي $2\sigma^2 = 1.95\times 10^{-12}\,\text{W}$، والتي تساوي بالتدوين اللوغاريتمي ($-87.1\,\text{dBm}$).

ننوه في سياق نقاشنا لخفوت تعدد المسارات إلى أن العلاقات التي عرضناها لغاية الآن تفترض عدم توفر مسار انتشارٍ مباشرٍ بين المرسل والمستقبل، أما في حال تواجد مسار مباشر (انظرالشكل ٣-٦) فإن الكثافة الاحتمالية للقيم اللحظية للإشارة تكون مختلفة، إذ تتبع توزيع "Rice" بدلاً من توزيع "Rayleigh" الذي ناقشناه. ومن السهل استنتاج أن شدة التغيرات تتضاءل في

حال وجود إشارة مباشرة مهيمنة. هذا ولن نفصل في ذلك إذ أن الغرض من هذا الفصل هو بيان المبادئ الأساسية لظاهرة الخفوت، ويمكن الرجوع إلى [١] و [٣] لمزيدٍ من التفاصيل عن العلاقات الرياضية الواصفة لتوزيع Rice، والتي يستخدمها المهندس بنفس السياق الذي عرضناه.



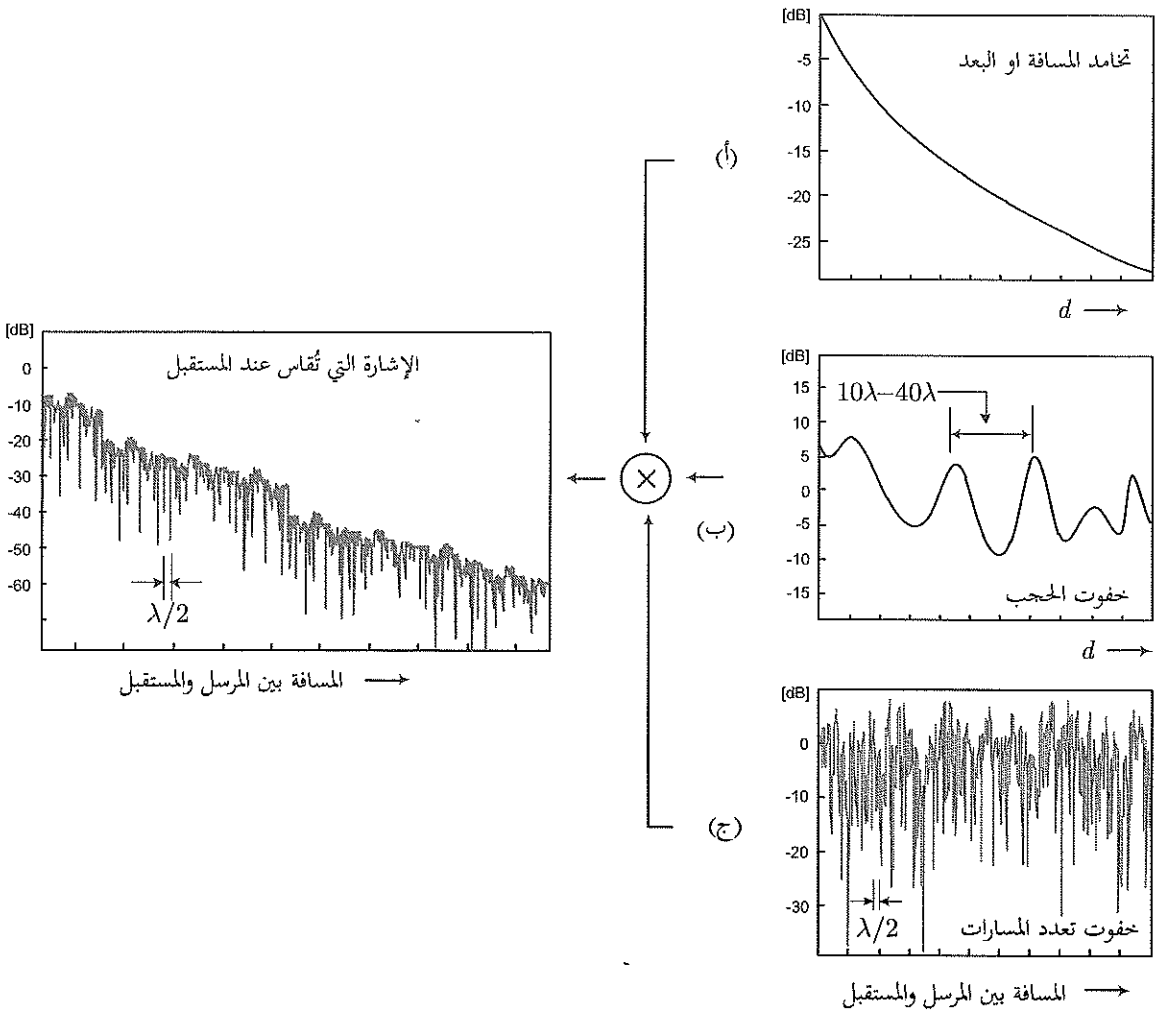
(أ): تعدد المسارات في حال خفوت Rayleigh. (ب): تعدد المسارات في حال خفوت Rice.

الشكل ٣-٦: توضيحٌ للفرق بين الحالات المؤدية لكل من خفوت Rayleigh وخفوت Rice.

ختاماً لهذا الجزء من الفصل، نُلخِّص ما سبق بيانه في الفقرات السابقة، مستعينين بالشكل ٣-٧، الذي يبين وجود أكثر من ظاهرة فيزيائية أساسية تحكُمُ التغيرات التي تطرأ على الإشارة الراديوية ضمن بيئة الانتشار، ويقود تأثيرها التراكمي إلى القيم النهائية لمطال الاشارة الذي ترصده أجهزة الاستقبال في طرفي الاتصال. هذه الظواهر هي:

١) التخميد الذي ينشأ عن البعد الجغرافي الفاصل بين المرسل والمستقبل، والذي قد يتراوح بين عشرات الأمتار وعشرات الكيلومترات. يوضح الجزء (أ) من الشكل ٣-٧ مَنحى هذا التخميد الذي يرسم حدة أو شدة تناقصِ مطال الإشارة كلما كبرت المسافة الفاصلة بين مصدر الإشارة والنقطة الجغرافية التي تُرصَد عندها، ويحدد هذه الشدة ثابت التخميد (Path Loss Exponent) الذي يختلف مقداره تبعاً لبيئة الانتشار، ونقصد بذلك طبيعتها العامة من حيث كونها منطقة ذات تضاريس منبسطة، أو مدينة مكتظة عمرانياً، أو قرية صغيرة ذات كثافة عمرانية محدودة، أو غير ذلك. وقد بيَّنا أن حدة هذا التخميد تزداد كلما ازدادت البيئة المحيطة بطرفي الاتصال تعقيداً، سواء من ناحية التضاريس أو البنية العمرانية (انظر العلاقات (٣-١٥) و (٣-١٦)، والجدول ٣-١).

٢) خفوت الحجب الذي يؤدي إلى انخفاضٍ في مقدار الاستطاعة المستقبَلة عند مرور المستقبل بجانب عوائق تحجب عنه جزءاً من الإشارة، بحيث يقتصر استقبالها على مسارات غير مباشرة تحمل قدراً أقل من الطاقة. يصف هذا الخفوت مقدارَ تغير الإشارة ضمن أبعادٍ جغرافية تتراوح بين 10λ و 40λ (انظر الجزء (ب) من الشكل ٣-٧)، ولا يمكن تمثيله -نظراً لطبيعته العشوائية- إلا باستخدام توابعَ توزيعٍ إحصائية، أشرنا إلى أن أمثلها أو أفضلها هو تابع التوزيع الطبيعي، الذي يصف القيمَ اللوغاريتمية لهذا الخفوت على نحوٍ مقبول من الدقة (انظر العلاقات (٣-٢٠) إلى (٣-٢٢) والشكل ٣-٤).



الشكل ٣-٧: قيم الإشارة بدلالة البعد عن المرسل في بيئة انتشار طبيعية (عن [١] بتصرف).

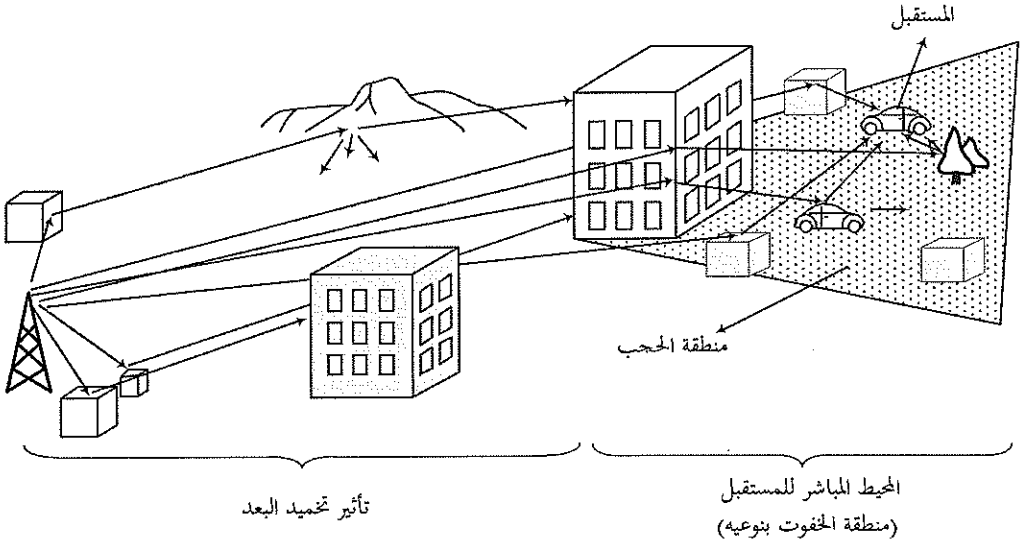
٣) خفوت تعدد المسارات الذي يُعزى فيزيائياً إلى أن الإشارة المستقبلة عبر مسارات متعددة تُجمع شعاعياً، ما يؤدي إلى تأرجحٍ في مطال الإشارة الإجمالية، حسب تباين أطوار الإشارات المجموعة. يتجلى هذا الخفوت في تغيراتٍ مفاجئة ذات وتيرة عالية وعابرة في مطال الإشارة (الجزء (ج) من الشكل ٣-٧)، وهذه التغيرات ذات طبيعة عشوائية من ناحية المقدار والمدة الزمنية التي يدوم الخفوت أثناءها. وكنّا أشرنا إلى أن وصفها رياضيا وتحليلياً ممكنٌ باستخدام توزيع Rayleigh في الحالة العامة، أو توزيع Rice عند توفر مسار مباشر بين المرسل والمستقبل (انظر العلاقات (٣-٣٠) إلى (٣-٣٣) وانظر أيضاً الشكل ٣-٦).

يكون تأثير الظواهر السابقة على مطال الإشارة المستقبلة وطورها تراكمياً، ويتضح ذلك من القسم الأيسر في الشكل ٣-٧، كما يمكن تأكيده من خلال المثال التالي:

لنفترض أن المستقبل يبعد عدة كيلومترات عن المحطة الثابتة (انظر الشكل٣-٨)، يفرض ذلك تخميداً أساسياً يرتبط بالمسافة الفاصلة عن المحطة. ويكون مقدار هذا التخميد متقارباً نسبياً ضمن محيطٍ جغرافي يشمل عدداً قليلاً من الأبنية، إذ أن أبعاد هذه الأبنية –مهما عظمت– تبقى صغيرةً إذ قورنت بالبعد عن المحطة، والذي يبلغ عدة كيلومتراتٍ كما افترضنا.
إذا مر المستقبل بجوار واحدٍ من هذه الأبنية، تُحجب عنه أجزاء من الإشارة التي كان يستقبلها من المحطة، ويقتصر استقباله على أجزاء تصله عبر مساراتٍ تمثّل انعكاساً أو انتثاراً عن الأبنية والعوائق الطبيعية المحيطة، غير أن كل الإشارات التي يستقبلها، إضافةً إلى تلك التي حجبت، تخضع في الأصل للتخميد الأساسي المتعلق بالمسافة، لذا ينخفض مطال الإشارة مقارنةً بحالة عدم الحجب، ويكون تأثير خفوت الحجب متراكماً مع تأثير تخميد المسافة.

لنفترض الآن أن طول المبنى الذي يمر بجانبه المشترك يبلغ عشرات الأمتار، تستوعب هذه المسافة وجود بعض المارة الآخرين، وبعض الأشجار، وسياراتٍ عديدةٍ ثابتة أو متحركة، يصادف مرورها وجود المشترك بجوار البناء.
يستقبل المشترك في هذه الحالة الإشارات المنعكسة من الأبنية المحيطة وغيرها من العوائق القريبة التي ذكرناها، ولا شك أن كل هذه الإشارات تكون قد تعرضت للتخميد المرتبط ببعد المحطة، إضافةً إلى الخفوت الناشئ عن حجب المبنى الضخم لأجزاءَ من الإشارة. لذا يؤدي الجمع الشعاعي للإشارات المختلفة إلى تأرجحٍ في قيمة الإشارة الإجمالية، إلا أن القيمة الوسطية لهذه الإشارة الإجمالية ضمن أية مسافة صغيرة تقلُّ عن طول المبنى تبقى محدودة بالمقدار الذي يفرضه أثر التخميد الأساسي، مجموعاً إليه أثر خفوت الحجب.

نخلص من ذلك إلى أن خفوت الحجب يصف أثر المحيط العمراني الضيّق الذي يوجد فيه المستقبل، بينما يصف خفوت تعدد المسارات أثر العوائق القريبة جداً من المشترك، والتي تختلف في أبعادها وطبيعة حركتها.



الشكل٣-٨: توضيحٌ لتراكم آثار الخفوت والتخميد.

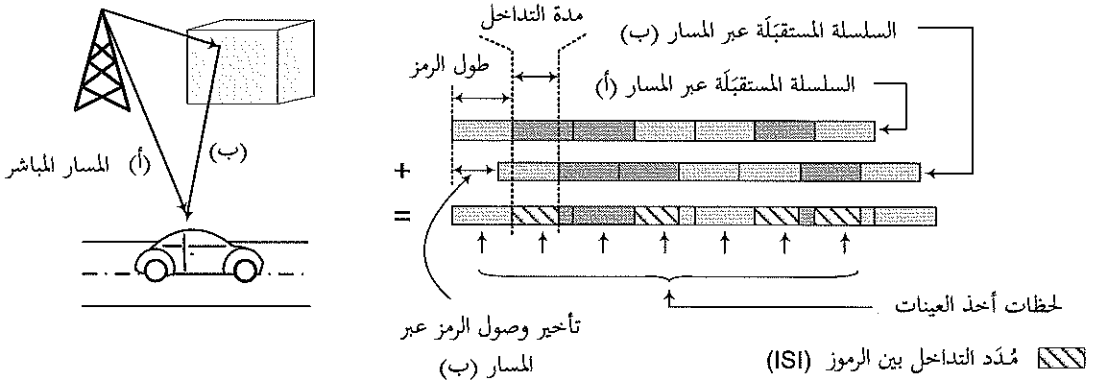
٣-٢-٣ الظواهر الناجمة عن تعدد المسارات

ناقشنا في البحث السابق الخفوت قصير المدى كظاهرةٍ أولى تنشأ عن تعدد المسارات، ونُجمل في ما يلي عرضاً لظواهر أخرى إضافية، تساهم في تحديد التأثير الإجمالي لقناة الانتشار أو المنفذ الراديوي على الإشارة، وتُفضي إلى تعريف خصائص مُمَيِّزة للقناة، لها أثرٌ مباشر على أداء النظام، وتجب مراعاتها أثناء طور التصميم.

٣-٢-٣-١ التداخل بين الرموز

عندما تصل نسخٌ مختلفة من الإشارة -عبر مسارات مختلفة- إلى المستقبل، فإن زمن وصول كلٍّ من هذه النسخ يعتمد عل الطول الإجمالي للمسار الذي تسلكه، حيث تصل الإشارة عبر المسار المباشر -الذي يمثل المسار الأقصر- أولاً، تتبعها النسخة التي تصل عبر المسار التالي من حيث الطول، وهكذا. تتراكم هذه النسخ المتعددة عند المستقبل، وعند اللحظات الموافقة لأخذ العينات، يرصد المستقبل قيم الإشارة الإجمالية، أي حصيلة جمع النسخ المتعددة. وفي كثيرٍ من الأحيان، يؤدي التباين الزمني في وصول الإشارات الجزئية أو النسخ المتعددة إلى صعوبات في كشف القيمة الفعلية للإشارة.

لتبسيط هذا المفهوم يعرض الشكل ٣-٩ سلسلةً من الرموز المتعاقبة، تسلك مسارين مختلفين إلى المستقبل، حيث تصل بدايةً عبر المسار المباشر (المسار (أ) في الشكل)، وبعد تأخيرٍ طفيف، تصل عبر المسار الثاني (المسار (ب)) الذي يمثل مسافةً أطول.



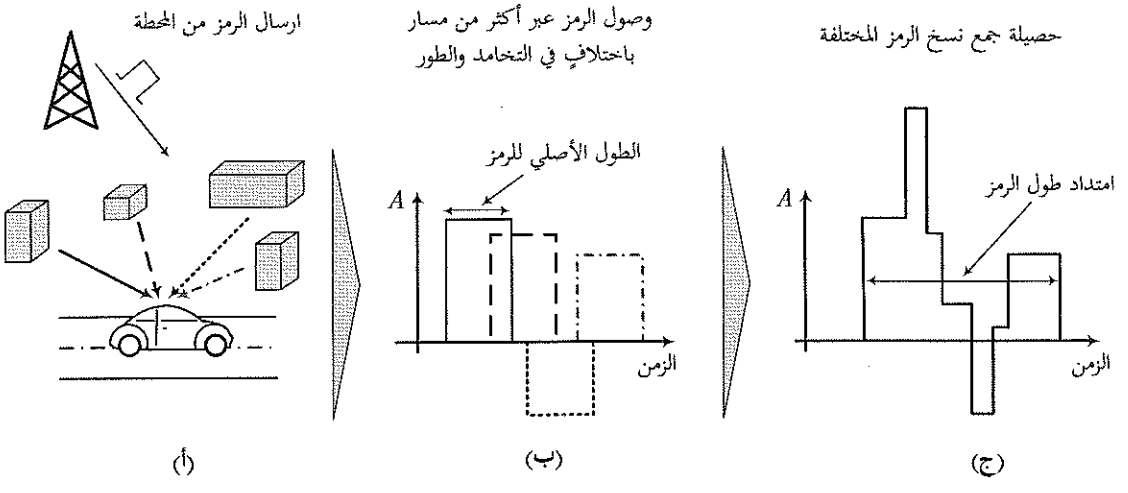
الشكل ٣-٩: ظاهرة تداخل الرموز.

تتراكم هاتان السلسلتان عند المستقبل، وبسبب الانزياح الزمني بينهما، تصادف لحظات أخذ العينة قيماً عدةً تكون فيها العينة المرصودة حصيلة جمع رمزين مختلفين متعاقبين، لا يمكن للمستقبل أن يفرّق بينهما. وإذا كان الاختلاف الزمني -بسبب سلوك مسارين- طويلاً جداً، فقد تصادف لحظة أخذ العينة تراكم رموزٍ غير متجاورة على نحوٍ مباشر، وإنما متباعدة ضمن السلسلة الأصلية. تُفضي هذه الحالات إلى أخطاء في القيمة التي تحددها دارة المقارنة في المستقبل، مما يزيد احتمال خطأ البت (BER) ويؤثر سلباً على أداء المستقبل.

تُعرف هذه الظاهرة باسم "تداخل الرموز" "Intersymbol Interference (ISI)"، وتُعتبر من أهم الظواهر التي يواجه مصمو نظم الاتصالات تحدياتٍ جمةً في تجاوز آثارها السلبية، وكما سيتبين لاحقاً، فإن أكثر من مكَوِّنٍ من مكونات النظام قد صمم خصيصاً للتقليل من تأثير هذه الظاهرة.

٣-٢-٣-٢ النثر الزمني لاستطاعة الاشارة

إضافة إلى تداخل الرموز، ينجم عن تعدد المسارات ظاهرةٌ أخرى مهمة، حيث يؤدي وصول عدة نسخ من كل رمز، مع التأخير بينها، إلى امتدادٍ في المدة التي يَرصد خلالها المستقبلُ طاقةً مرتبطة بهذا الرمز. من الممكن أن يُفهم أو يُفسَّر هذا الأثر على أنه نثرٌ زمنيٌّ للاستطاعة التي يحملها هذا الرمز، أو امتدادٌ في طوله الأصلي، لذا يُشار إلى ذلك اصطلاحاً بتعبير "النثر الزمني"[١] "Time Dispersion". لتوضيح هذا المفهوم، نتأمل الشكل ٣-١٠ الذي يعرض حالة انتشار رمزٍ واحدٍ عبر أكثر من مسار. يفترض هذا الشكل أن الرمز عبارة عن نبضة مستطيلة -وهذا تبسيطٌ يقرب الفهم ولا يؤثر على عموم المبدأ- ونقرأ منه أن تراكم النسخ المختلفة لهذا الرمز عند المستقبل يؤدي إلى تغير أو تشويه في شكله من ناحية، وإلى امتدادٍ في الطول الإجمالي للرمز من ناحية أخرى. ننوه في هذا السياق إلى أن مطال وطور كل نسخة يتبعُ تسلسل آليات انعكاسها وانكسارها و انتشارها عبر مسارها بين المرسل والمستقبل.

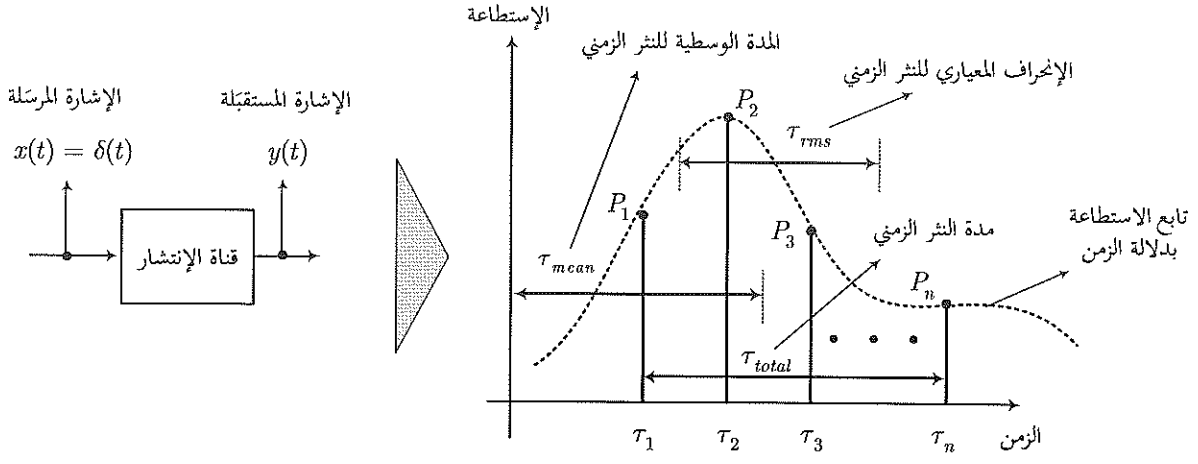


الشكل ٣-١٠: توضيحٌ مبسط لمبدأ النثر الزمني.

مما نستنبطه من الشكل أيضاً ارتباط الحصيلة الإجمالية التي يرصدها المستقبل لأي رمز ضمن الإشارة بعدد المسارات المؤثرة في القناة، ونقصد بـ "المؤثرة" تلك المسارات التي يصل عبرها جزء جدير بالاعتبار من الإشارة، أو أية نسخةٌ ذات طاقة لا يمكن

[١] تستخدم المراجع العربية تعبير "التشتت"، غير أننا نرى مصطلح "النثر" في هذا السياق أقربَ إلى الصواب، وإلى المعنى الفيزيائي المقصود. وقد آثرنا أن نستخدمه أسوة بمصطلح "نثر الطيف".

إغفالها أو تجاهلها، فمن المؤكد وجود مساراتٍ يؤدي تسلسل آليات الانتشار والامتصاص على امتدادها إلى شبه تلاشٍ في قيمة الطاقة التي تحملها الإشارة. هذا ويختلف عدد المسارات المؤثرة على الإشارة من بيئة انتشار إلى أخرى، لذا يشكل عدد هذه المسارات وطبيعتها معلماً مهماً من معالم قناة الانتشار، لا غنى عنه في توصيف خصائصها وأثرها على الاشارات الراديوية. ولنقاش هذا المعلم على نحوٍ منهجيٍ وأكثرَ دقةً، ننطلق من الشكل ٣-١١ الذي يصف استجابة القناة لنبضةٍ مثالية تصدر عن المرسل، يمكن تمثيلها رياضياً بـ"تابع النبضة الأحادية" "Dirac Impulse" $\delta(x)$.



الشكل ٣-١١: تعريف متوسط النشر الزمني والإنحراف المعياري للنشر الزمني (عن [١] بتصرف).

نحصل على هذا الشكل عند تدوين الاستطاعة P_i التي يرصدها المستقبل لحظة وصول كل نسخةٍ من نسخ النبضة المتعددة، بدلالة زمن وصول هذه النسخة τ_i، وهو يمثل تبسيطاً شديداً للواقع، حيث تصل في الحالات الواقعية نسخ كثيرة جداً من الاشارة، يكاد الفاصل الزمني بينها أن يكون معدوماً، ما يعني أن تابع الاستطاعة بدلالة الزمن يمثله منحنى مستمرٌ (المنحنى المُنَقَّط في الشكل)، وليس قيماً أحادية ومتفرقة كما افترضنا من باب التبسيط. غير أننا ننوه أيضاً إلى أن هذا النموذج البسيط أثبت فعاليته في تمثيل الواقع، حتى أن المواصفات المعيارية تستخدمه من حيث المبدأ للتمييز بين بيئات انتشار مختلفة (سيرد توضيح ذلك لاحقاً).

يسمى التابع في الشكل ٣-١١ "نمط النشر الزمني للاستطاعة" "Power Delay Profile"، أو اختصاراً "تابع النشر الزمني". وهو يتيح تعريف الموسطات المهمة التالية:

- "مدة النشر الزمني" "Excess Delay" τ_{total}: وهي الفاصل الزمني بين وصول أول وآخر نسخة من الإشارة إلى المستقبل.
- "متوسط النشر الزمني" "Mean Excess Delay" τ_{mean}: وهو القيمة الوسطية لتأخر النسخ المختلفة، مرَجَّحة بقيمة الاستطاعة النسبية التي تحملها كل منها، ويعطى بالعلاقة (انظر [١] و[٣]):

$$\tau_{mean} = \frac{1}{P_{total}} \sum_{i=1}^{N} P_i \tau_i \quad ; \quad P_{total} = \sum_{i=1}^{N} P_i \tag{٣٧-٣}$$

- "الانحراف المعياري للنثر الزمني" "RMS Delay Spread" τ_{rms}: يتيح هذا الموسط تقييماً أفضل لتوزع الطاقة زمنياً، إذ يراعي تعريفه -إضافة إلى الاستطاعة النسبية التي تُنقل عبر كل مسار- مقدار التأخير المرتبط بهذه الاستطاعة مقارنة بالقيمة الوسطية، ويدل بذلك على كيفية تركُّز الاستطاعة من الناحية الزمنية. يتبين ذلك من العلاقة الواصفة لهذا الموسط وهي ([١] و[٣]):

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{1}{P_{total}} \sum_{i=1}^{N} P_i \tau_i^2 - \tau_{mean}^2} \tag{٣٨-٣}$$

تلعب الموسطات التي ذكرناها، وخصوصاً τ_{rms}، دوراً مهماً جداً في توصيف خصائص القناة، إذ تحدد قيمته عند مقارنتها بطول الرموز المعتمدة لنقل المعلومات ضمن النظام المستخدم، طبيعةَ ومقدارَ التداخل الذي يطرأ أثناء عملية الإرسال. ويمكن التمييز في هذا السياق بين الحالات التي يبينها الشكل ٣-١٢ وهي:

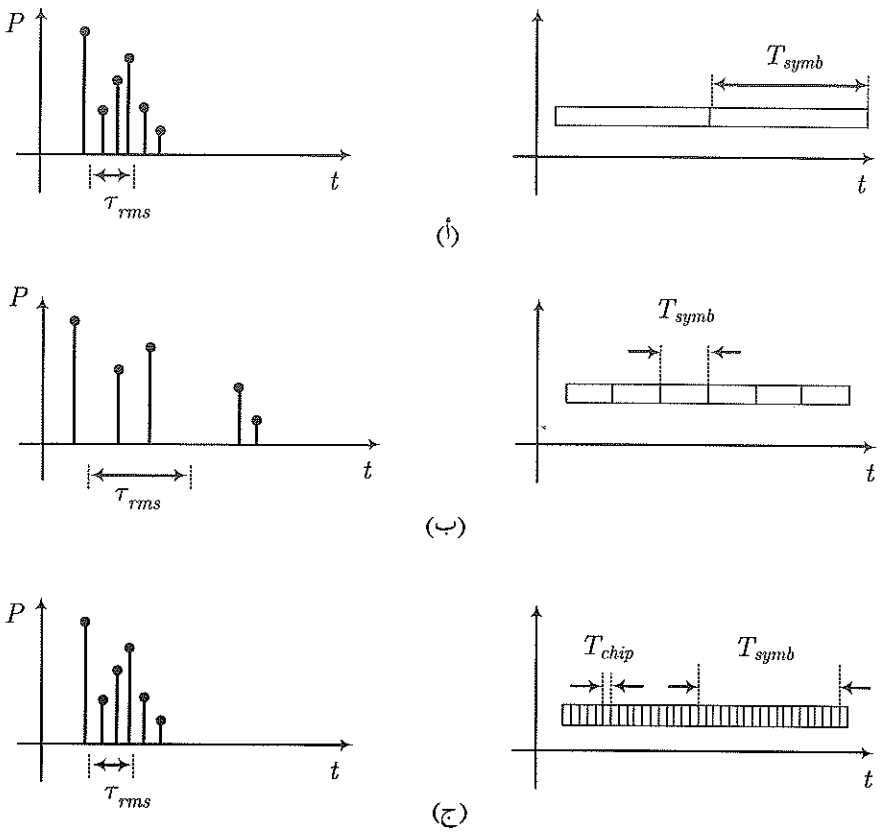
١) إذا كان طول الرمز T_{symb} يتجاوز الانحراف المعياري للنثر الزمني بأضعاف كثيرة (الجزء (أ) من الشكل)، أي إذا تحققت العلاقة $T_{symb} \gg \tau_{rms}$ ، فإن القناة تتصف بما يلي:

- يكون الامتداد الذي يطرأ على كل رمز ضئيلاً إذا قورن بالطول الاجمالي للرمز، ولما كان طول الرمز هو الذي يحدد دور أخذ العينات، تكون لحظات رصد قيمة الاشارة متباعدة عن بعضها على نحوٍ كافٍ، بحيث لا ينشأ التداخل بين الرموز بالدرجة التي أشرنا إليها في الشكل ٣-٩، رغم إمكانية حدوث تداخلٍ بين أطراف بعض الرموز بحكم تأخر وصولها إلى المستقبل.

- لا ينفي عدم التداخل بين الرموز -في هذه الحالة- احتمال حدوث خفوتٍ في مقدار الاشارة، فقد يكون الجمع الشعاعي لإشارة الرمز يفضي إلى قيمة إجمالية صغيرة جداً. هذه المشكلة يمكن تجاوزها عادةً باستخدام تقنيات التباين التي سنذكرها لاحقاً.

- بما أن عرض القناة الترددية المستخدمة في أي نظام يتناسب عكساً مع طول الرمز المستخدم في عملية الإرسال، فإن القناة تكون في هذه الحالة ذات نطاق ضيق (نظراً لطول الرموز)، لذا يُوصف النظام في هذه الحالة بأنه "ضيق النطاق" "Narrow Band System".

٢) إذا كان طول الرمز مقارباً لمدة النثر الزمني أو يصغرها (الجزء (ب) من الشكل)، أي إذا كانت العلاقة $T_{symb} \leq \tau_{rms}$ محققة، فإن احتمال تداخل الرموز في هذه الحالة يكون كبيراً، ويؤثر على أداء النظام على نحوٍ ملحوظ، مما يُحتِّم معالجة هذه الظاهرة للحد من آثارها السلبية، وأشهر السبل الممكنة لتلافي أو تجاوز سلبيات التداخل بين الرموز هو استخدام "المسوي المتكيف" "Adaptive Equalizer"، الذي سنناقش مبدأه لاحقاً.

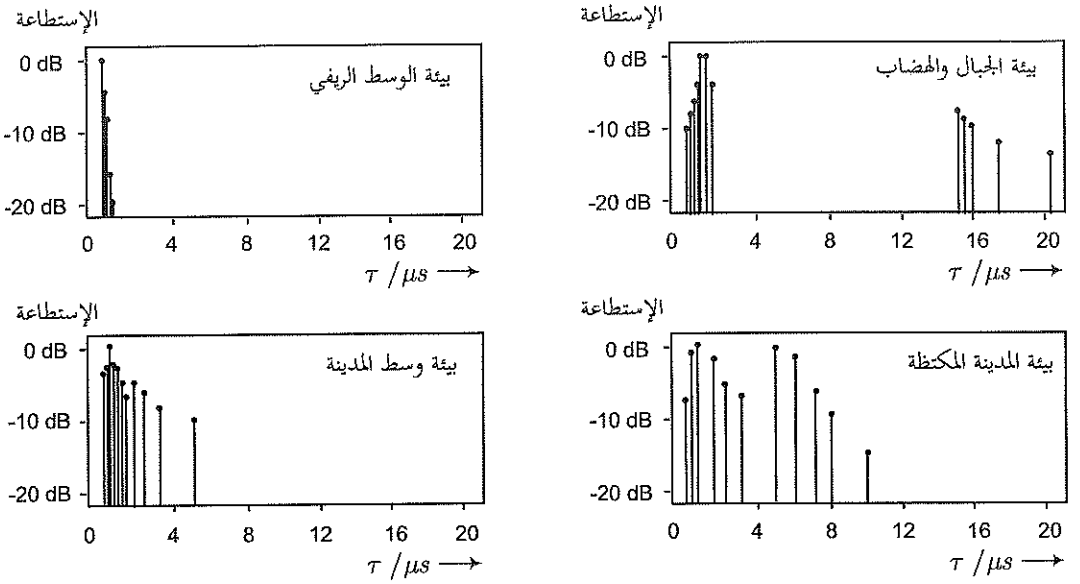


الشكل ٣-١٢: الاحتمالات المختلفة لنسبة طول الرمز T_{symb} إلى الانحراف المعياري للنشر الزمني τ_{rms}.

هذا ومن الممكن اعتبار نظام GSM ممثلاً لهذا الصنف من النظم، إذ تدل الدراسات الميدانية على أن قيمة τ_{rms} تكون $2-4\,\mu s$ في المناطق المكتظة عمرانياً، و $3-8\,\mu s$ في المناطق الريفية، وقد تتجاوز $15\,\mu s$ في المناطق النائية وضمن التضاريس الجبلية. وبمقارنة هذه القيم مع طول البت الواحد ضمن رزمة المعلومات، والذي يكافئ $3.69\,\mu s$ (انظر الشكل ٢-٩)، نجد أن مدة النشر الزمني قد تصل إلى أربعة أضعاف طول الرمز (يتمثل الرمز في نظام GSM بـ "بت واحد"). هذا وتحدد المواصفات المعيارية مقدار $16\,\mu s$ كحدٍ أعلى لمقدار النشر الزمني الذي يمكن للنظام تقبُّله، دون تأثيرٍ سلبي على الأداء ([٣] و [١٢]).

٣) هناك حالة ثالثة تطرأ حين تكون مدة الرمز أطول بكثير من τ_{rms}، وتكون تقنية الإرسال -في الوقت نفسه- قائمة على مبدأ "نثر الطيف" (الجزء (ج) من الشكل). يؤدي ذلك إلى تحقق العلاقة $T_{symb} \gg \tau_{rms} \gg T_{chip}$، التي تمثل نظاماً ضيق النطاق من ناحية طول الرمز، وعريض النطاق من ناحية طول الرمز الناثر T_{chip}. وبما أن أداء المستقبل في نظم الطيف المنثور يتعلق بتزامن سلسلة النثر، وحساب ترابطها الإحصائي مع السلاسل الأخرى المستخدمة، يجب تجنب أي تداخل يفضي إلى حسابٍ أو رصدٍ خاطئٍ للرموز الناثرة. لذا يجب معالجة مشكلة تعدد المسارات في هذه الحالة أيضاً، وهذا ما يحققه مستقبل RAKE، الذي سنوليه عرضاً مجملاً في جزء لاحق من هذا الفصل.

لقد طُوِّرت واعتُمدت طرقٌ متعددة من أجل إجراء القياسات المتعلقة بقناة الانتشار (انظر [١١])، كما عُنيت المواصفات المعيارية بتقديم عدة نماذج لنمط النثر الزمني ([١٢] و [١٣] على سبيل المثال) وذلك ليتمكن مصنعو الأجهزة ومطوروها من اختبار منتجاتهم في بيئات مخبرية، ولتوفير إمكانية فعالة لمحاكاة أداء القناة في سياق الدراسات النظرية (يوضح الشكل ٣-١٣ على سبيل المثال النماذج النظرية المعتمدة لمحاكاة بيئة الانتشار لنظام GSM). إضافة إلى ما سبق، ما زال اهتمام العديد من الدراسات الميدانية ينصبُّ على سُبُل تحديد نمط النثر الزمني للقناة في بيئات مختلفة على نحو دقيق (انظر على سبيل المثال [١٤]). لذا تتباين النماذج النظرية الواصفة لنمط النثر والقيم المتداولة للموسطات التي ذكرناها، غير أنه يمكن تعداد الملامح الأساسية المشتركة بين هذه النماذج كما يلي:



بيئة الانتشار	عدد المسارات	نطاق الترابط B_{coh}	مدة النثر الزمني τ_{total}	الإنحراف المعياري τ_{rms}
بيئة الجبال والهضاب	5	1.6 MHz	0.5 μs	0.1 μs
بيئة الوسط الريفي	12	205 kHz	5 μs	1.0 μs
بيئة المدينة المكتظة	12	68 kHz	10 μs	2.5 μs
بيئة وسط المدينة	12	30 kHz	20 μs	6.1 μs

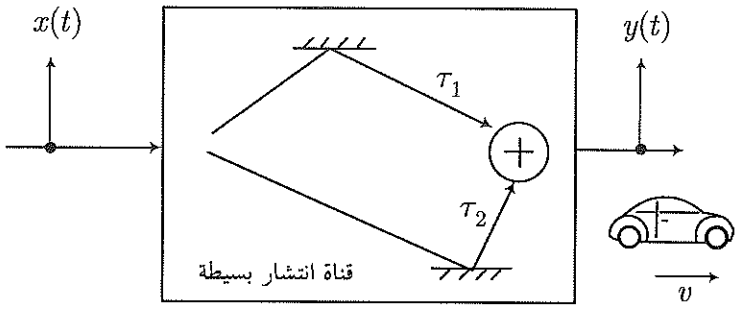
الشكل ٣-١٣: النماذج النظرية المعتمدة لمحاكاة بيئة الانتشار لنظام GSM (انظر[١٣]).

- تكون مدة النثر الزمني قصيرة في المدن إذا قورنت بالقيم الخاصة بالأماكن الريفية أو النائية.
- تتميز المناطق المغلقة، مثل المكاتب والمصانع، بمُـددِ نثرٍ زمني قصيرة جداً.
- تنقص قيمة النثر الزمني عندما تكون الرؤية المباشرة بين المرسل والمستقبل متاحة، أي عند وجود مسار انتشار مباشر.

- من الممكن أن يطرأ بعض التغير على قيم النثر الزمني في حال تغيير التردد أو عرض نطاق الإرسال، غير أن البنية العمرانية والتضاريس، تبقيان العنصر المهيمن في تحديد النمط العام لتأخير نسخ الإشارة المختلفة.

٣-٢-٣-٣ الخفوت الإنتقائي طيفياً

لا يقتصر تأثير تعدد المسارات على خصائص القناة في المجال الزمني فحسب، وإنما يتعداه إلى المجال الطيفي، حيث تكتسب القناة سمات مرشح ترددي، يُمرِّر الاشارة -أو يحد من طاقتها- تبعاً للتردد المستخدم.
لتوضيح هذا المفهوم ننطلق من قناة انتشارٍ بسيطة جداً، يتوفر فيها مساران فقط لنقل الإشارة (انظر الشكل ٣-١٤)، ونفترض بدايةً أن المستقبل ساكن، وأن الإشارة المرسلة هي $x(t)$، بغض النظر عن صورتها والتابع الرياضي الذي يمثلها.



الشكل ٣-١٤: قناة انتشار مبسطة لتوضيح مفهوم الخفوت الانتقائي.

من الممكن في ظل ظروف انتشار مثالية، وبإهمال إزاحة الطور المرتبطة بانعكاس الاشارة عن العوائق، وصف الإشارة المستقبلة $y(t)$ بالعلاقة:

$$y(t) = a_1\, x(t-\tau_1) + a_2\, x(t-\tau_2) \qquad (٣٩-٣)$$

حيث يمثل a_1 و a_2 مطالي نسختي الإشارة، ويكافئان -في هذا المثال- عاملي التخميد، كما يمثل τ_1 و τ_2 الفاصلين الزمنيين الضروريين لوصول الإشارة عبر كلٍ من المسارين.
بالانتقال إلى المجال الطيفي، مع مراعاة خاصية الازاحة الزمنية لتحويل فوريه، نجد:

$$\mathcal{F}\{y(t)\} = Y(f) = a_1\, e^{-j2\pi f\tau_1} X(f) + a_2\, e^{-j2\pi f\tau_2} X(f) \qquad (٤٠-٣)$$

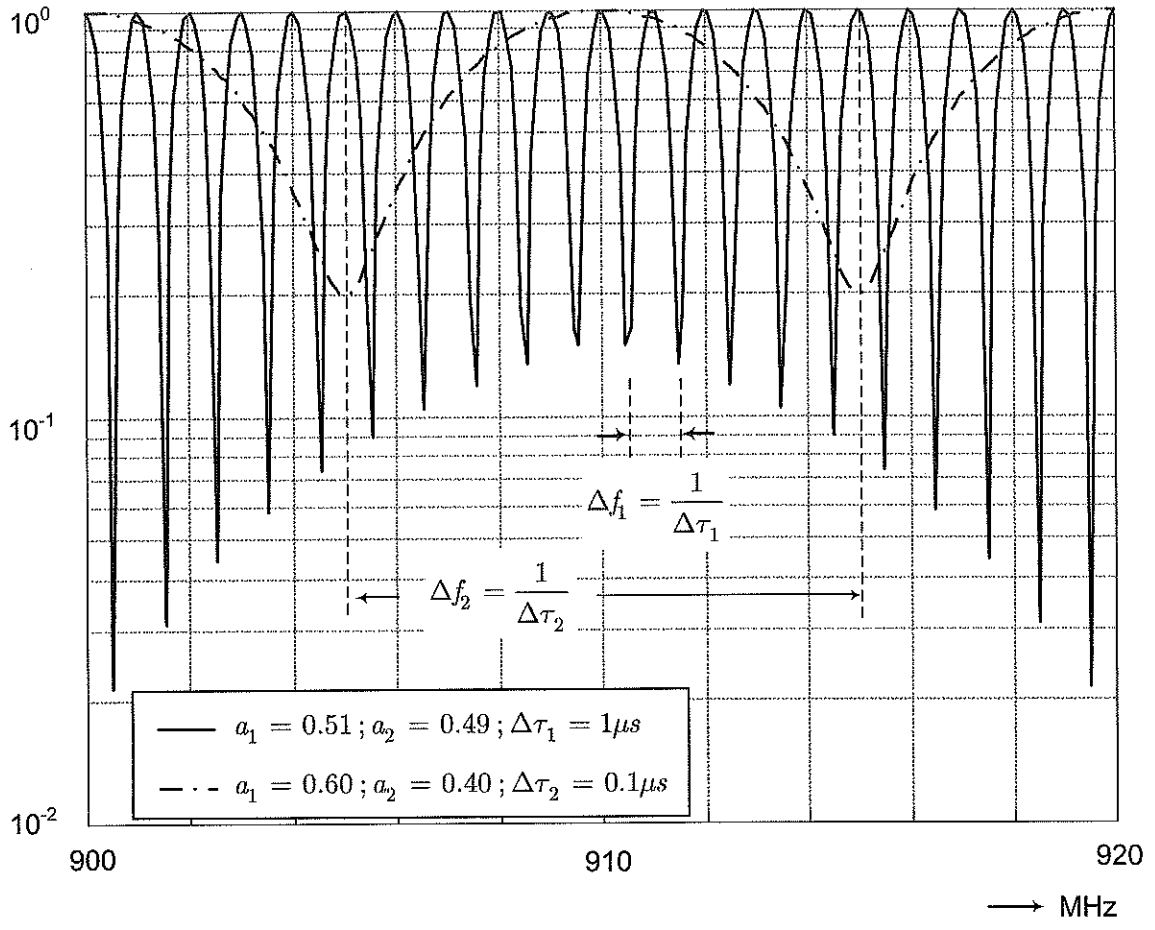
تتيح العلاقة السابقة الحصول على تابع النقل الترددي $H_{ch}(f)$، أي الاستجابة الطيفية للقناة، وذلك عن طريق نسبة الخرج إلى الدخل. بحساب هذه النسبة، وبالاستعاضة عن $\tau_2 - \tau_1$ بـ $\Delta\tau$ نحصل على:

$$H_{ch}(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} = e^{-j2\pi f\tau_1}(a_1 + a_2\, e^{-j2\pi f\Delta\tau}) \qquad (٤١-٣)$$

تصف هذه العلاقة -بدلالة التردد- تغيُّر مقدار التخميد والإزاحة الطورية التي تتعرض لها الإشارة، حيث يكافئ مقدار التخميد مطال التابع $H_{ch}(f)$، كما تساوي قيمة طور هذا التابع العقدي إزاحة طور الإشارة عند كل تردد.
يُعطى مطال الاستجابة الطيفية $H_{ch}(f)$ بالعلاقة:

$$|H_{ch}(f)| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2\,a_1 a_2 \cos(2\pi f\Delta\tau)} \qquad (٤٢-٣)$$

يمثل الشكل ٣-١٥ هذه العلاقة بيانياً لحالتين اثنتين، تختلفان في مطال الإشارة الواردة عبر كل من المسارين، كما تتباينان أيضاً من حيث الفاصل الزمني $\Delta\tau$ بينهما، حيث نفترض أن قيمة الفاصل تبلغ في الحالة الأولى $1\mu s$ وفي الثانية $0.1\mu s$.



الشكل ٣-١٥: مطال الاستجابة الطيفية -بدلالة التردد- للقناة الموصوفة في الشكل ٣-١٤.

يتيح كلٌّ من العلاقة (٣-٤٢) والشكل ٣-١٥ استنباط الدلالات التالية:

١) يتغير المطال بدلالة التردد على نحوٍ دوري بين قيمٍ عظمى وأخرى دنيا، وبسبب وجود مسارين فقط للإشارة، تمثل القيم العظمى جمعاً تراكمياً للإشارتين، بينما تمثل القيم الدنيا حالة انزياحٍ في طور كل منهما، يؤدي إلى إلغائهما لبعضهما البعض. وكما يمكن أن نقرأ من المعادلة (٣-٤٢)، فإن القيم العظمى تُرصد عندما تكون قيمة الحد $\cos(2\pi f\Delta\tau)$ مساوية لـ "1+"، أما القيم الصغرى فتوافق قيمة "1-" لهذا الحد. لذا، يحقق الدور الترددي لورود القيم العظمى أو الدنيا للتخميد، والذي ندل عليه بـالرمز Δf ، العلاقة التالية:

$$\Delta f = \frac{1}{\Delta\tau} \qquad (٣-٤٣)$$

تعني العلاقة السابقة فيزيائياً أن تبدل تردد الاشارة يؤدي إلى تغَيُّر في مقدار التخميد، حتى لو كان المستقبل ساكناً لا يتحرك، أي موجوداً عند نقطة ثابتة. ويُعزى هذا التغير إلى تعدد المسارات التي تسلكها الإشارة في طريقها إلى المستقبل، ولا علاقة له بحركة أيٍّ من طرفي الاتصال، ولا بحركة أي من العوائق أو الأجرام ضمن وسط الانتشار.

يُطلق على هذا النوع من التخميد اسم "الخفوت الانتقائي طيفياً" "Frequency-Selective Fading"، في دلالةٍ على تفاوت الترددات عن بعضها من ناحية حدة التخميد. وتعتبر هذه الخاصية من أهم ما يحدد صفات قناة الانتشار ويميزها عن غيرها، وعند انتفاء هذه الخاصية، أي إذا كان التخميد متقارباً في كل المجال الترددي الذي تشغله القناة، فإن الخفوت يسمى"خفوتاً منتظَماً أو متساوياً (بدلالة التردد)" "Flat Fading".

٢) بما أن الرمز $\Delta\tau$ يمثل الفاصل الزمني بين وصول أولِ وآخرِ نسخة من الإشارة، فهو يكافئ "مدة النثر الزمني" كما سبق تعريفها في الشكل ٣-١١. وباهمال الفرق بين مطالي نسختي الاشارة، أي باعتبار أن $P_1 = P_2$ في المعادلة (٣-٣٨)، يمكن عن طريق بعض الخطوات الجبرية البسيطة إثبات أن $\tau_{rms} = \Delta\tau/2$ ، ما يعني أن الدور الترددي للقيم العظمى والدنيا يرتبط بالانحراف المعياري للنثر الزمني عن طريق العلاقة:

$$\Delta f = \frac{1}{2\tau_{rms}} \qquad (٣-٤٤)$$

التي تُبرِز سمةً مهمة لقناة الانتشار ذات الخفوت الانتقائي، حيث تتناسب وتيرة تغير خصائص هذه القناة في المجال الترددي عكساً مع مدة النثر الزمني، فتزداد هذه الوتيرة -أي تصغر قيمة Δf - كلما كانت مدة النثر الزمني أطول. هذا ما يؤكده الشكل ٣-١٥ عند مقارنة مسار كل من المنحنيين، إذ يتبين أن الفرق بين الترددين اللذين يصادفان ذروةً وقيمةً دنيا متتابعتين، هو $5\,\mathrm{MHz}$ في حالة مدة النثر القصيرة ($\Delta\tau = 0.1\,\mu s$)، و $500\,\mathrm{kHz}$ في حالة مدة النثر الأطول ($\Delta\tau = 1\,\mu s$).

٣) عند إمعان النظر مرة أخرى في العلاقة (٣-٤٢) ، نجد أن مسار المنحنى في الشكل ٣-١٥ يحدده على نحو أساسي الفرق

في طور الإشارة الواردة عبر المسارين. فلو افترضنا أن المطالين -أو عاملي التخميد- متساويين، أي $a_1 = a_2 = a$، فإن العلاقة (٣-٤٢) تقود إلى الصيغة المبسطة:

$$|H_{ch}(f)| = a\sqrt{2}\sqrt{1+\cos(2\pi f \Delta\tau)} \qquad (٣-٤٥)$$

والتي توضح تماما أن النمط الدوري لمطال الاستجابة ينشأ عن الحد تحت الجذر، أما المطال a فيؤثر على القيمة المطلقة، أي حركة المنحنى بكليته "ارتفاعاً وانخفاضاً" على نحو موازٍ للمحور الشاقولي.

يتميز ما استنبطناه من العلاقة (٣-٤٢) بأهمية خاصة ومميزة لتصميم النظام، إذ يطرح السؤال التالي: «إذا كانت خصائص القناة -ونقصد بالخصائص هنا مقدار التخميد الذي تفرضه على الإشارة- متغيرة بتغير التردد، فما هو المجال الترددي الذي يمكن اعتبار تغير الخصائص ضمنه طفيفاً، بحيث لا يؤثر على أداء النظام؟».

تتوضح أهمية هذا السؤال إذا رجعنا إلى الشكل ٣-١٥ وافترضنا أن عرض القناة الترددية المتاحة للنظام هو 10 MHz، ففي هذه الحالة تتعرض أجزاء من الإشارة لتخميد ضئيل، بينما تتعرض أجزاء أخرى لمقدار قد يفوق 10 أضعاف ما تتعرض له الأجزاء الأخرى، وهذا له تأثير سلبي شديد على نوعية الإشارة المستقبلة، ويوجب تصميمَ داراتِ معالجة الإشارة على نحو يتيح آليات مناسبة لتجنب آثاره. أما لو كان عرض قناة الاتصال 200 kHz فقط، فإن كل أجزاء الإشارة تتعرض لمقدار متقارب من التخميد، ومن ثم يكون تصميم النظام أبسط على نحو ملحوظ. وبما أن المنحنى في الشكل ٣-١٥ يتبدل حسب نوعية القناة، أي تبعاً لطبيعة بيئة الانتشار، نستنتج أن هناك علاقات متبادلة ومباشرة بين طبيعة وسط الانتشار وعرض القناة الترددية المتاح من جهة، وكيفية التأثير على أداء النظام ومن ثم درجة تعقيده من جهة أخرى. لذا يجب على مهندس الاتصالات الإلمام بتفاصيل هذه العلاقات، وأخذها بعين الاعتبار عند اضطلاعه بمهمة تصميم نظامٍ ما، بناءً على معطيات محددة.

للإجابة على السؤال الذي طرحناه ننطلق من العلاقة (٣-٣٩) ونفترض أن $x(t)$ إشارة جيبية وأن مطالي الإشارتين متساويين، نحصل بذلك على الإشارة المستقبلة:

$$y(t) = a[\cos(2\pi f(t-\tau_1) + \cos(2\pi f(t-\tau_2)] \qquad (٣-٤٦)$$

لتبسيط الخطوات التالية، ننتقل إلى تمثيل الإشارات الجيبية بـ"التدوين العقدي" "Complex Numbers Notation"، معتمدين الصيغة التالية:

$$y(t) = \mathcal{R}\{e^{j2\pi ft}\, y(f,t)\} \qquad (٣-٤٧)$$

حيث يمثل الرمز $y(f,t)$ عدداً عقدياً، يشمل مطال الإشارة وطورها. باعتماد هذا التدوين، تكون الصيغة العقدية المكافئة للعلاقة (٣-٤٦) كما يلي:

$$y(f,t) = a[e^{-j2\pi f\tau_1} + e^{-j2\pi f\tau_2}] \qquad (٤٨-٣)$$

نذكّر في هذا الموضع أننا ما زلنا بصدد تحديد المجال الترددي الذي يمكن اعتبار تغير خصائص القناة ضمنه طفيفاً، لذا نفترض الآن استخدام إشارة جيبية للدخل، مزاحةً ترددياً بمقدار δf عن الإشارة السابقة. نحصل في هذه الحالة على استجابة القناة أو إشارة الخرج بالاستعاضة بـ $(f+\delta f)$ عن f في العلاقات السابقة، ما يؤدي إلى:

$$y(f+\delta f,t) = a[e^{-j2\pi(f+\delta f)\tau_1} + e^{-j2\pi(f+\delta f)\tau_2}] \qquad (٤٩-٣)$$

باستخدام العلاقات (٣-٤٨) و (٣-٤٩) يصبح السؤال المطروح: «ما هو مقدار التشابه في استجابة القناة المعطاة بالشكل ٣-١٤ للإشارتين المتباينتين بالإزاحة الترددية δf؟». نؤكد في هذا السياق على تعبير "التشابه" إذ أن $y(f,t)$ و $y(f+\delta f,t)$ تمثلان في الحالات الواقعية إشارتين عشوائيتين، تنتج كلٌ منهما عن جمع عددٍ غير متناهٍ من الإشارات الجزئية المتراكمة، والتي ترد عبر مسارات متباينة، بينما تقتصر كل من الإشارتين في المثال الذي نناقشه على جمع مسارين فقط، كما افترضنا في نموذج القناة المبسط.

إن المعيار الرياضي المعتمد لتقييم أو توصيف مقدار التشابه أو التماثل بين قيم لحظية لمتحولين عشوائيين، هو "معامل الترابط الإحصائي" "Correlation Coefficient"، الذي يُعرَّف في حالة المتحولات العقدية على النحو التالي [١٥]:

$$\Psi = \frac{\mathrm{E}\{(\varepsilon-\overline{\varepsilon})^*(\eta-\overline{\eta})\}}{\sigma_\varepsilon \sigma_\eta} \qquad (٥٠-٣)$$

حيث يدل الرمز $\mathrm{E}\{\cdot\}$ على عملية حساب القيمة الوسطية أو المتوقعة، كما يدل الرمزان $\overline{\eta}$ و σ_η على كلٍّ من القيمة الوسطية والانحراف المعياري للمتحول η، أما النجمة فوق القوس فتشير إلى "المرافق العقدي" "Complex Conjugate" لما بين القوسين.

يتميز عامل الترابط بما يلي:

- تكون قيمته صفراً عندما يكون المتحولان مستقلين تماماً، أي أن القيمة الدنيا التي من الممكن لمعيار التشابه أن يبلغها هي $\Psi = 0$، وذلك عندما تكون قيمة المتحول η غير مرتبطة إطلاقاً بقيمة ε، ولا تشابهها بأية درجة.
- عندما يكون الارتباط بين المتغيرين طردياً، تكون قيمة Ψ مقداراً موجباً. ويكون الارتباط أو التشابه قوياً عندما يكون المقدار الموجب قريباً من الواحد الصحيح، وضعيفاً عندما يكون المقدار الموجب قريباً من الصفر. بتعبيرٍ آخر، تؤدي العلاقة (٣-٥٠) إلى قيمةٍ عظمى مقدارها $\Psi = 1$ عند كون المتحولين متماثلين تماماً، وهذا يوافق في الحالة التي نناقشها أن يكون الترددان متطابقين، أي $\delta f = 0$.

- تكون قيمة عامل الترابط مقداراً سالباً عندما يكون الارتباط بين المتغيرين أو المتحولين عكسياً، وتمثل قيمة "1-" حالة كون المتحولين متعاكسين تماماً.

بتعويض $y(f,t)$ و $y(f+\delta f,t)$ في العلاقة (٣-٥٠) نحصل على:

$$\Psi = \frac{\mathrm{E}\left\{(y(f,t)-\overline{y}(f,t))^{*}(y(f+\delta f,t)-\overline{y}(f+\delta f,t))\right\}}{\sigma_{y(f,t)}\,\sigma_{y(f+\delta f,t)}} \qquad (٣-٥١)$$

ولحساب مقدار Ψ ننطلق من صيغة الاشارة في (٣-٤٨) و (٣-٤٩)، التي تشمل حدين يمثلان إشارتين دوريتين جيبيتين، لذا فالمتوسط الحسابي لكل منهما هو "0"، وبما أن المتوسط الحسابي لمجموع إشارتين هو حاصل جمع المتوسط لكل منهما، نستنتج أن $\overline{y}(f,t)=0$. على نحوٍ مماثل نستنبط أيضاً أن $\overline{y}(f+\delta f,t)=0$، لذا يمكن كتابة العلاقة (٣-٥١) على النحو التالي:

$$\Psi = \frac{\mathrm{E}\left\{a^{2}(e^{j2\pi f\tau_1}+e^{j2\pi f\tau_2})(e^{-j2\pi(f+\delta f)\tau_1}+e^{-j2\pi(f+\delta f)\tau_2})\right\}}{\sigma_{y(f,t)}\,\sigma_{y(f+\delta f,t)}} \qquad (٣-٥٢)$$

باستخدام بعض عمليات الجبر الأساسية، ومراعاة أن القيمة الوسطية لأية إشارة جيبية دورية ($e^{j2\pi f(\tau_1-\tau_2)}$ على سبيل المثال) هو "0" نحصل على العلاقة المبسطة:

$$\Psi(\delta f) = \frac{a^{2}(e^{-j2\pi\delta f\tau_1}+e^{-j2\pi\delta f\tau_2})}{\sigma_{y(f,t)}\,\sigma_{y(f+\delta f,t)}} \qquad (٣-٥٣)$$

التي نقرأ منها أن تابع الترابط يتعلق حصراً بالإزاحة الترددية، وبمقدار التفاوت الزمني بين المسارين.

بدلاً من حساب الانحراف المعياري لكل من التابعين، يمكن الوصول إلى حصيلة جدائهما على نحوٍ مباشر، إذ نعلم أن قيمة Ψ هي "1" عندما تكون δf تساوي "0"، كما نعلم أن البسط في المعادلة السابقة يساوي في هذه الحالة $2a^2$. بتعويض هذه القيم نحصل على:

$$\Psi(\delta f) = \frac{e^{-j2\pi\delta f\tau_1}+e^{-j2\pi\delta f\tau_2}}{2} \qquad (٣-٥٤)$$

تمثل هذه العلاقة عامل ارتباطٍ ذا قيمٍ عقدية، لذا تحسب قيمته المطلقة بالعلاقة:

$$|\Psi(\delta f)| = \frac{1+\cos(\delta f(\tau_2-\tau_1))}{2} \qquad (٣-٥٥)$$

تصف هذه المعادلة العلاقة المباشرة بين القيمة المطلقة لعامل الترابط وقيمة الإزاحة الترددية، وباعادة ترتيب حدودها، مع مراعاة أن $\tau_{rms} = \Delta\tau/2$ ، يمكن التعبير عن الإزاحة الترددية بدلالة مقدار الترابط كما يلي:

$$\delta f = \frac{\cos^{-1}\left(2\left|\Psi(\delta f)\right| - 1\right)}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{\cos^{-1}\left(2\left|\Psi(\delta f)\right| - 1\right)}{2\tau_{rms}} \qquad (٣-٥٦)$$

تبين هذه العلاقة على نحو جلي وواضح التناسب العكسي بين مقدار الإزاحة الترددية -المرتبط بقيمة الترابط- ومقدار النثر الزمني. ونضرب على ذلك المثال التالي:

إذا أردنا أن نعرف مقدار الفاصل الترددي المسموح به بين إشارتين جيبيتين، بحيث لا يقل مقدار الترابط بين استجابة القناة لكل منهما عن 0.9، وبافتراض أن $\tau_{rms} = 0.5\,\mu s$ ، فإننا نحصل من العلاقة السابقة على القيمة:

$$\delta f = \frac{\cos^{-1}\left(2 \times 0.9^2 - 1\right)}{2 \times 0.5\mu s} = 144\,\mathrm{kHz} \qquad (٣-٥٧)$$

أما إذا كان عامل الترابط المطلوب هو 0.5، فإن مقدار الإزاحة المسموح به يكون:

$$\delta f = \frac{\cos^{-1}\left(2 \times 0.5^2 - 1\right)}{2 \times 0.5\mu s} = 333\,\mathrm{kHz} \qquad (٣-٥٨)$$

نستطيع بذلك القول بأن المجال الترددي الذي لا تتغير خصائص القناة ضمنه بمقدار نسبي يزيد على 0.1 (أي الذي لا ينقص مقدار الترابط ضمنه عن 0.9) هو 144 kHz، في حين يمتد هذا المجال ليصبح 333 kHz عندما تتغير خصائص القناة بمقدار نسبي مقداره 0.5.

لقد أتاح نموذج القناة المبسط جداً، والمعطى بالشكل ٣-١٤، الوصول إلى صيغة تحليلية بسيطة للعلاقة (٣-٥٠). وقد سُقنا الخطوات السابقة لتوضيح المعنى الأساسي المقصود بتعبير "تغير مقدار الترابط بين خصائص القناة عند تغير التردد". وما وصلنا إليه يمكن تعميمه ليشمل قنوات الانتشار في الحالات الواقعية، حيث يطلق على المجال الترددي المكافئ لـ δf في العلاقات السابقة اصطلاحاً اسم "نطاق الترابط" "Coherence Bandwidth"، ويشار له بـ B_{coh} ، ويُقصد بمصطلح الترابط في هذا السياق "التغير المحدود لخصائص القناة" ضمن هذا النطاق.

هناك مفاهيم متعددة مهمة تتعلق بنطاق الترابط B_{coh} ، نذكر في ما يلي بعضاً منها:

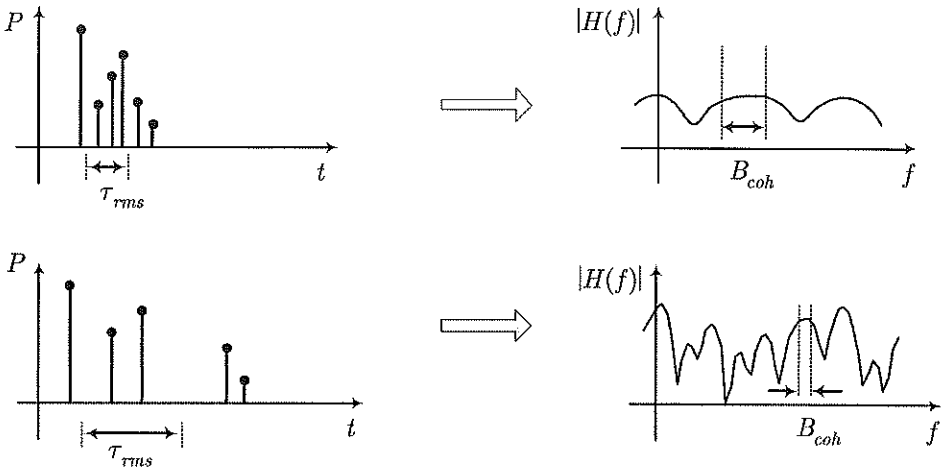
- من الممكن أن نطلق على هذا المجال الترددي اسم " نطاق استقرار خصائص القناة" أو "نطاق تشابه أو تماثل التخميد"، فمن الجلي أن الترابط بالمعنى الإحصائي بين مقدار التخميد عند ترددين ينقص كلما كان الفاصل بينهما أكبر، غير أننا

آثرنا استخدام تعبير "نطاق الترابط" لشيوعه في المراجع الفيزيائية، و لكونه الأدق من الناحية الرياضية، وأيضاً للتأكيد على الطبيعة العشوائية للآثار الفيزيائية التي يمثلها.

- يحدد هذا النطاق المجال الترددي الأصغر الذي يجب أن تحقق ضمنه كل دارات النظام وخطوات معالجة الإشارة أداءً جيداً، يفي بمتطلبات معايير التصميم المعتمدة، لذا فإن معرفة قيمة نطاق الترابط ضرورية جداً في طور تصميم النظام.
- يشير المنحنيان في الشكل ٣-١٥ والعلاقة (٣-٤٤) إلى علاقة زيادةٍ ونقصانٍ عكسية بين نطاق الترابط B_{coh} والانحراف المعياري للنشر الزمني τ_{rms}، وهو ما يبينه الشكل ٣-١٦ على سبيل التوضيح، لذا يمكن صياغة هذه العلاقة كما يلي:

$$B_{coh} = \frac{1}{k\,\tau_{rms}} \qquad (٣-٥٩)$$

حيث يمثل الرمز k ثابتاً تختلف قيمته تبعاً لما يُعتبر "تغيراً طفيفاً" في خصائص القناة (تُفصِّل النقطة التالية هذا المفهوم).



الشكل ٣-١٦: العلاقة العكسية بين نطاق الترابط والانحراف المعياري للنشر الزمني.

- تَبيَّن من خلال العلاقات (٣-٥٧) و (٣-٥٨) أن تحديد نطاق الترابط يعتمد على قيمة التشابه بين خصائص القناة لترددين مختلفين، أي أن قيمة B_{coh} مقيدة بتحديد قيمة عتبة معينة لـ Ψ، تتعلق بما يرغب المهندس تناوله بالبحث. فإذا أراد بيان ما إذا كانت القناة ذات خفوت منتظم أم لا،فإنه يختار مقدار Ψ ليكون مكافئاً للمجال الترددي الذي يكون مقدار التحميد ضمنه ثابتاً تقريباً، وهذا يتطلب أن يكون عامل الترابط أكبر من 0.9. أما إذ أراد المهندس وصف مقدار الإزاحة الترددية المؤدية إلى تغيُّر جذري في خصائص القناة، كأن يرغب في معرفة إزاحة التردد الضرورية للتأكد من تجنب خفوتٍ يصادف تردداً ما، فإنه يستخدم في هذه الحالة قيمةً للترابط قريبة من الصفر (0.1 على سبيل المثال). وفي حالة الحاجة إلى تحديد ضرورة استخدام دارات خاصة لتجاوز آثار التداخل بين الرموز، يتعين تحديد المجال الذي لا يمكن إهمال

تغيرات الخصائص عند تجاوزه، ويكون اختيار قيمة متوسطة لـ Ψ (0.5 مثلاً) مناسباً في هذ الحالة.
لذا لا يوجد قيمة وحيدة ومعينة لـ B_{coh}، وقد شاع استخدام بعض العلاقات التقريبية المعطاة في الجدول ٣-٢، والتي تربط بين التعبير الرياضي المختزل لـ B_{coh}، وقيمة الترابط التي تؤدي إلى هذا التعبير. هذا وتعطي المصادر [٣]-[٥] بعض هذه القيم، والخلفية التحليلية والفيزيائية لاختيار كل منها.

عامل الترابط	قيمة نطاق الترابط
~0.1	$B_{coh} \approx 1 / \tau_{rms}$
~0.5	$B_{coh} \approx 1 / (5\tau_{rms})$
>0.9	$B_{coh} \approx 1 / (50\tau_{rms})$

الجدول ٣-٢: أمثلة عن قيم نطاق الترابط.

٣-٢-٤ الآثار الناجمة عن حركة أحد طرفي الاتصال

ترتبط الظواهر التي عرضنا لها لغاية الآن بطبيعة بيئة الانتشار حصراً، فهي تصف تأثير الوسط المحيط على قيمة الإشارة التي يمكن رصدها في كل نقطة، سواء كان المستقبل موجوداً أم لا. فظواهر التخميد والخفوت وتعدد المسارات تكون فاعلةً دائماً بسبب وجود العوائق الطبيعية والصنعية، وبسبب طبيعة التضاريس والبنية العمرانية، وليس لوجود المستقبل أو عدمه أي أثرٍ على ذلك.
من جانبٍ آخر، تُضيف حركةُ أحد طرفي الاتصال بعداً جديداً للآليات الحاكمة لانتشار الإشارة، يزيد من طبيعتها العشوائية، ويؤدي إلى آثارٍ وظواهرَ إضافية، لم نتطرق إليها لغاية الآن. لذا نذكر في ما يلي الملامح العامة لبعض هذه الظواهر، ونفترض في عرضنا أن المستقبل هو الطرف المتحرك.

٣-٢-٤-١ "الاتساع أو النثر الطيفي" "Doppler Spread"

من الظواهر الفيزيائية المعروفة تغيُّر ترددِ الموجة الكهرومغناطيسية أو الصوتية عندما يكون أحد طرفي الاستقبال متحركاً بالنسبة إلى الآخر. تسري هذه الظاهرة المعروفة باسم "ظاهرة دوبلر" "Doppler Effect" على نظم الاتصالات الخلوية أيضاً، فمن الناحية المبدئية، تؤدي حركة المستقبل إلى إزاحة في تردد الإشارة، يتعلق مقدارها بسرعة المستقبل وباتجاه حركته بالنسبة للمرسل، حيث يزداد التردد عندما يتحرك المستقبل باتجاه المرسل، وينقص عندما يبتعد عنه.

لتوضيح ذلك، ننطلق من الشكل ٣-١٧، الذي يفترض وجود مستقبلٍ ساكنٍ غير متحرك يبعد مسافةً مقدارها x_0 عن المرسل، نفترض كذلك أن المحطة ترسل إشارة جيبية بسيطة على التردد f_c ، وتُعطى بالعلاقة :

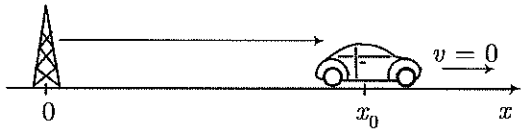
$$S_{TX}(t) = \cos(2\pi f_c t) \qquad (٦٠-٣)$$

عندما يكون المستقبل ساكناً، لا تتغير قيمة المسافة التي تفصله عن المحطة، لذا يمكن اعتبار قناة الانتشار -في هذه الحالة- ذات خصائص ثابتة غير متغيرة، ومن ثم تكون الإشارة المستقبلة هي:

$$S_{RX}(t) = A_0 \cos(2\pi f_c t - \phi_0) \qquad (٦١-٣)$$

يدل الرمز A_0 في هذه العلاقة على مطال الإشارة عند النقطة x_0 ، أما الرمز ϕ_0 ، فهو يمثل مقدار الإزاحة الطورية التي تتعرض لها الإشارة نتيجة السرعة المتناهية للأمواج الكهرومغناطيسية أو الراديوية، إذ تحتاج مدةً مقدارها T_0 كي تقطع المسافة x_0 . بذلك يكون مقدار ϕ_0 مرتبطاً بالمسافة x_0 ، والتردد f_c ، وسرعة الضوء c ، عن طريق العلاقة:

$$\phi_0 = 2\pi f_c T_0 = 2\pi f_c \frac{x_0}{c} \qquad (٦٢-٣)$$



الشكل ٣-١٧: انزياح طور الموجة عند بلوغها المستقبل.

عندما يكون المستقبل متحركاً، تصبح المسافة الفاصلة عن المحطة متغيرة زمنياً، يؤدي ذلك إلى أن خصائص بيئة الانتشار تصبح متغيرةً أيضاً. فإذا كانت وحدة الاستقبال تتحرك مبتعدة عن المحطة، وافترضنا أننا نراقب ذروة الموجة الراديوية، فإن تحرك المستقبل يقتضي أن نقطة الذروة في الموجات الصادرة بتأخيرٍ معين -نفترض أن مقداره τ- تحتاج إلى قطع مسافةٍ أطول لبلوغ المستقبل، وذلك مقارنةً بالموجات السابقة لها زمنياً. يؤدي ذلك إلى أن الفاصل الزمني بين نقاط الذروة يكون عند المستقبل أطول من نظيره عند المرسل، ما يعني فيزيائياً أن تردد الموجة المستقبلة أقل من تردد الموجة المرسلة.

لوصف هذه الظاهرة رياضياً، نفترض أن المستقبل يتحرك بسرعة ثابتة مقدارها v ، منطلقاً من النقطة $x = x_0$ ، في اللحظة $t = t_0$ ، بذلك تكون المسافة التي تفصله عن المحطة هي $x = x_0 + vt$ ، وهذه المسافة المتغيرة تعني كذلك تغيُّرَ الطور بدلالة الزمن وفق العلاقة التالية، التي نحصل عليها بالاستعاضة عن x_0 بـ x في العلاقة (٣-٦٢):

$$\phi(t) = \frac{2\pi f_c(x_0 + vt)}{c} = \phi_0 + 2\pi f_c t \frac{v}{c} \qquad (٦٣-٣)$$

بذلك تستقبل الوحدة المتحركة الإشارة :

$$\begin{aligned} S_{RX}(t) &= A_0 \cos(2\pi(f_c - f_c \frac{v}{c})t - \phi_0) \\ &= A_0 \cos(2\pi(f_c - f_D)t - \phi_0) \end{aligned} \tag{٦٤-٣}$$

ونحن نلحظ في هذه الإشارة وجود الفاصل الترددي:

$$f_D = f_c \frac{v}{c} = \frac{v}{\lambda} \tag{٦٥-٣}$$

الذي ينشأ عن حركة المستقبل، والذي يدل على أن تردد الإشارة المستقبلة هو $f_c - f_D$ ، أي أنه أصغر من تردد الإشارة المرسلة بمقدارٍ يتناسب طرداً مع سرعة المستقبل v ، وعكسأمع طول الموجة λ . يُطلق على هذا الفاصل الترددي اسم "إزاحة دوبلر الترددية" "Doppler Frequency Shift" أو اصطلاحاً "تردد دوبلر".

لقد انطلقنا للوصول إلى العلاقة (٣-٦٤) من أن المستقبل يتحرك مبتعداً عن المرسل، ويمكن على نحوٍ مشابه تماماً اشتقاق الإزاحة الترددية في حالة كون المستقبل يتحرك مقترباً من المرسل، ونجد بتعويض $x = x_0 - vt$ أن الإزاحة تكون في هذه الحالة:

$$f_D = -f_c \frac{v}{c} = -\frac{v}{\lambda} \tag{٦٦-٣}$$

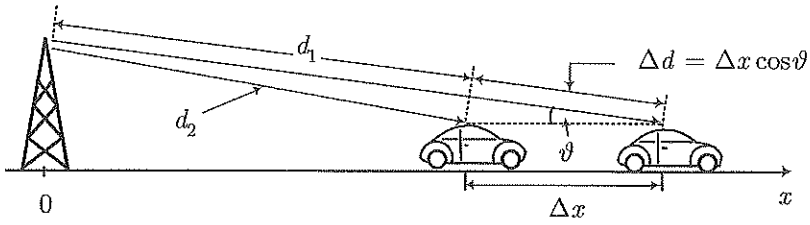
أي أن تردد الإشارة المستقبلة يكون أكبر من تردد الإشارة المرسلة.

تستند صيغة العلاقتين (٣-٦٤) و (٣-٦٥) إلى تبسيطٍ مهم، وهو أن جهة الحركة تطابق جهة انتشار الأمواج الراديوية، لذا يكون الفاصل بين ذروتين من ذرى الموجة مكافئاً للمسافة التي يقطعها المستقبل خلال المدة الزمنية t . أما لو كانت جهة الحركة مغايرة لذلك (كما هو مبين في الشكل٣-١٨) فإن الفاصل بين ذروتي الموجة يرتبط بالمسافة المقطوعة عن طريق العلاقة:

$$\Delta d = \Delta x \cos\vartheta \tag{٦٧-٣}$$

حيث يدل الرمز ϑ على الزاوية بين مسار انتشار الموجة ومسار الوحدة المتحركة. وإذا عوضنا هذه العلاقة في (٣-٦٣) وافترضنا أن المحطة بعيدة على نحوٍ كافٍ بحيث يكون طول المسافة d_1 في الشكل٣-١٨ مساوياً للمسافة d_2 ، فإننا نحصل على إزاحة دوبلر بدلالة الزاوية ϑ التي تبنيها جهة الحركة مع خط النظر المباشر بين المحطة والوحدة المتحركة، وذلك كما يلي:

$$f_D = f_c \frac{v}{c} \cos\vartheta \qquad (٦٨-٣)$$

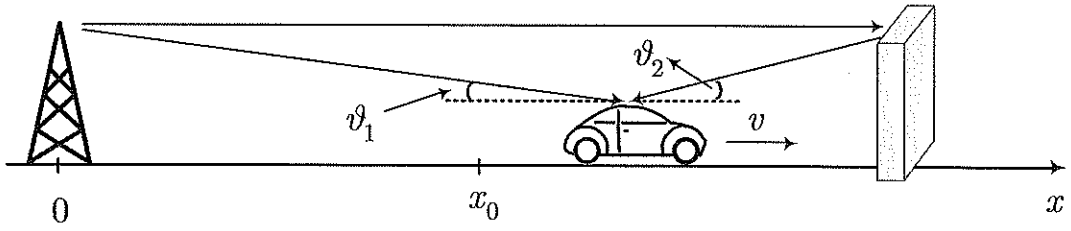


الشكل٣-١٨: انزياح تردد الموجة عندما يتحرك المستقبل مبتعداً عن المرسل.

تمثل العلاقة (٣-٦٨) الصيغة الأكثر شمولاً للعلاقتين (٣-٦٥) و (٣-٦٦)، حيث يمكن الحصول على كليهما بتعويض $\vartheta = 0^0$ أو $\vartheta = 180^0$. نستنتج من هذه العلاقة أيضاً أن القيم المطلقة المعطاة بالعلاقتين (٣-٦٥) و (٣-٦٦) تمثلان القيمة العظمى لإزاحة دوبلر، والتي نرمز لها بـ f_{Dmax}، أي أن:

$$f_{Dmax} = \left| \pm \frac{v f_c}{c} \right| = \left| \pm \frac{v}{\lambda} \right| \qquad (٦٩-٣)$$

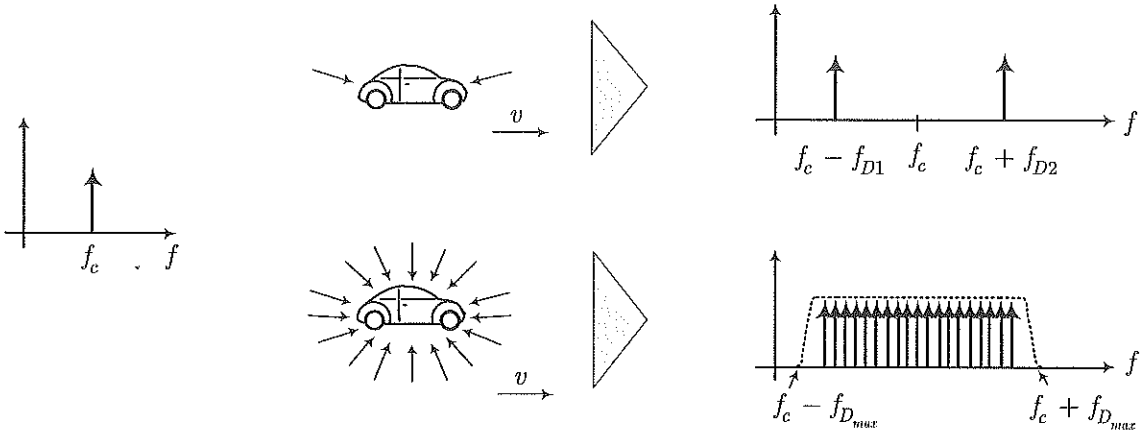
بينت العلاقات السابقة أثر حركة المستقبل على التردد عند استقبال الإشارة من مسارٍ واحدٍ فقط، وهذا يخالف الواقع الذي يتسم بوجود مسارات متعددة. لذا، نخطو خطوة إضافية في سبيل تحسين النموذج الرياضي في العلاقة (٣-٦٤)، وذلك بافتراض وجود مسارين للإشارة المستقبلة، أحدهما مباشر، والآخر ناشئ عن انعكاس الموجات الراديوية عن عائقٍ ما، كما هو موضح في الشكل٣-١٩.



الشكل٣-١٩: وصول الإشارة إلى المستقبل المتحرك عبر مسارين منفصلين.

إذا كان المستقبل يتحرك باتجاه العائق، فإنه يستقبل الإشارة المباشرة بتردد مقداره $f_1 = f_c - f_{D1}$، بينما يستقبل الإشارة المنعكسة بتردد مقداره $f_2 = f_c + f_{D2}$. هذا يعني أن مجال ترددات الإشارة المستقبلة يشمل النطاق من f_1 إلى f_2 (انظر الجزء الأعلى من الشكل ٣-٢٠)، وهذا بدوره يكافئ اتساعاً في المجال الترددي، أو نثراً للطاقة المستقبلة على ترددات مختلفة.

يطلق على هذه الظاهرة اسم "النثر أو الاتساع الطيفي" "Frequency Dispersion"، أو "نثر دوبلر" "Doppler Spread"، وتنشأ -كما بيّنا- عن تراكم تأثير تعدد المسارات مع تأثير حركة المستقبل.



طيف الإشارة المرسلة تعدد المسارات عند المستقبل طيف الإشارة المستقبلة تبعاً لعدد المسارات

الشكل ٣-٢٠: حول نشوء ظاهرة النثر الطيفي.

يمكن -كما بينت العلاقات السابقة- تحديد وتعيين الإزاحة الترددية لكل مسارٍ في حالاتٍ مبسطة جداً، تقتصر على مسار واحد أو مسارين، بينما يتعذر ذلك في الحالات الواقعية نظراً لما يلي:

١) لا توجد سرعة ثابتة للمتحرك أثناء تنقله من مكان إلى آخر، كما لا توجد جهة محددة للحركة. يؤدي ذلك إلى أن كلا المتحولين v وϑ يتغير عشوائياً. لذا، لا يمكن الحديث في هذه الحالة عن إزاحات ترددية متفرقة وأحادية، وإنما عن "توسعٍ أو نثرٍ طيفي" يشغل كل المجال الترددي بين قيمة دنيا مقدارها $f_{min} = f_c - f_{Dmax}$، وأخرى عظمى هي $f_{max} = f_c + f_{Dmax}$ (انظر الجزء الأدنى من الشكل ٣-٢٠).

٢) نظراً لاستقبال الإشارة عبر مسارات متعددة، ونتيجةً لكون هذه الإشارات غير مترابطة من ناحية تسلسل العوائق التي تعترضها، فإن كل نسخةٍ تتعرض لتوسع طيفي على نحوٍ مستقل عن النسخ الأخرى. هذا يعني أن المستقبل سيرصد عدداً أكبر من الترددات، وأن التردد الذي سيرصده في كل لحظة يتبع لكثافة احتمالية تفرضها وتحدد معالمها بيئة الانتشار (انظر [٣] و [٤]و [٧] لتفاصيل ذلك).

٣-٢-٤-٢ الخفوت الانتقائي زمنياً

إضافة إلى التوسع أو النثر الطيفي، تؤدي حركة المستقبل إلى ظاهرة أخرى مهمة، وهي زيادة وتيرة تغير خصائص القناة أثناء الحركة من مكان إلى آخر. لتوضيح ذلك، ننطلق مرة أخرى من الحالة المبسطة في الشكل ٣-١٤ ونناقش تأثير حركة المستقبل.

لنفترض أن الإشارة المرسلة إشارة جيبية بسيطة تمثل الجزء الحقيقي من العلاقة $x(t) = e^{(j2\pi f_c + \phi)}$، هذا يعني أن المستقبل يرصد نسختين من هذه الإشارة، تتباينان في مقدار التخميد ومقدار الإزاحة الترددية بسبب ظاهرة دوبلر. لذا يمكن صياغة الإشارة الإجمالية كما يلي:

$$y(t) = e^{j2\pi f_c}\left[a_1\, e^{j2\pi f_{D1}t+\phi_1} + a_2\, e^{j2\pi f_{D2}t+\phi_2)}\right] \qquad (٧٠-٣)$$

حيث يدل f_{Di} على الإزاحة الترددية، و a_i على التخميد، و ϕ_i على الطور الأولي أو الاستهلالي للإشارة عبر كلٍّ من المسارين.

بإهمال قيم ϕ_1 و ϕ_2 تكون قيمة مطال الإشارة كما يلي:

$$|y(t)| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2\,a_1 a_2 \cos(2\pi(f_{D2} - f_{D1}))t} \qquad (٧١-٣)$$

تشابه البنية الرياضية لهذه المعادلة بنية العلاقة (٣-٤٢) مشابهة تامةً، غير أن المتحول هنا هو t بدلاً من f، والحد الذي يُملي كيفية تغير المطال هو الفرق بين ترددي دوبلر $(f_{D2} - f_{D1})$ عوضاً عن الفرق في مدة وصول الاشارة $\Delta\tau$ (انظر العلاقة (٣-٤٥)). بتعبيرٍ آخر، تصف هذه العلاقة تغير خصائص القناة -مقدار التخميد- بدلالة الزمن بدلاً من التردد، ويلعب فيها فرق الإزاحة الترددية لكل من الاشارتين دور المتغير، وإذا رُسمت بيانياً -بدلالة المتحول t- فإن ذلك يقود إلى منحنى مماثلٍ تماماً للذي في الشكل ٣-١٥، لذا يمكن أن نتابع نقاشنا اعتماداً على الشكل نفسه، حيث نستنبط ما يلي:

١) بما أننا انطلقنا من أن الإشارة الأصلية ذات مطال ثابت، فإن تغير مطال الإشارة المستقبلة بتغير الزمن يعني ضمنياً أن حركة المستقبل هي التي تؤدي إلى تعديل مطال الإشارة. وعلى نحوٍ مماثلٍ لما ناقشناه سابقاً، يتغير مقدار التخميد دورياً، ويكون الفاصل الزمني بين القيم العظمى للتخميد هو:

$$\Delta t = \frac{1}{|f_{D2} - f_{D1}|} \qquad (٧٢-٣)$$

نشتق من ذلك أن القيمة الصغرى لهذا الفاصل الزمني تتحقق عندما تكون الإزاحتان الترديتان متعاكستين، أي $f_{D2} = -f_{D1}$، وعندما تكون كل منهما مساوية لـ f_{Dmax}. يفضي ذلك إلى:

$$\Delta t_{min} = \frac{1}{2f_{Dmax}} \qquad (٧٣-٣)$$

هذا يعني أن الفاصل الزمني يبلغ قيمته الدنيا عندما يتحرك المستقبل باتجاه المرسل مباشرةً، ويكون المسار الأول بزاوية مقدارها $\phi_1 = 0^0$ والآخر بزاوية مقدارها $\phi_2 = \phi_1 + 180^0$.

يكافئ هذا الفاصل الزمني مسافة صغرى مقدارها:

$$\Delta d_{min} = v\,\Delta t_{min} = \frac{v}{2 f_{Dmax}} = \frac{\lambda}{2} \qquad (٣-٧٤)$$

٢) توضح العلاقات السابقة ما يعرف بـ "ظاهرة الازدواجية" بين التأثيرات في المجال الزمني والمجال الطيفي. ففي حالة العلاقة (٣-٤٢) يؤدي تعدد المسارات إلى نثرٍ زمني، أي إلى تباين في لحظة وصول الإشارتين المتراكمتين إلى المستقبل، دون أن يكون هناك تغير في تردد أي منهما. وقد رأينا أن هذا يؤدي إلى تخميد انتقائي من ناحية الترددات، أطلقنا عليه تعبير "الخفوت الانتقائي طيفياً". أما في حالة العلاقة (٣-٧١)، فإن حركة المستقبل تؤدي إلى نثرٍ طيفي، حيث تختلف الاشاراتان المرصودتان في نفس اللحظة في قيمة التردد بسبب حركة المستقبل، وهذا النثر الطيفي يؤدي بدوره إلى تخميد متغير بدلالة الزمن، نطلق عليه اصطلاحاً تعبير "الخفوت الانتقائي زمنياً" "Time-Selective Fading".

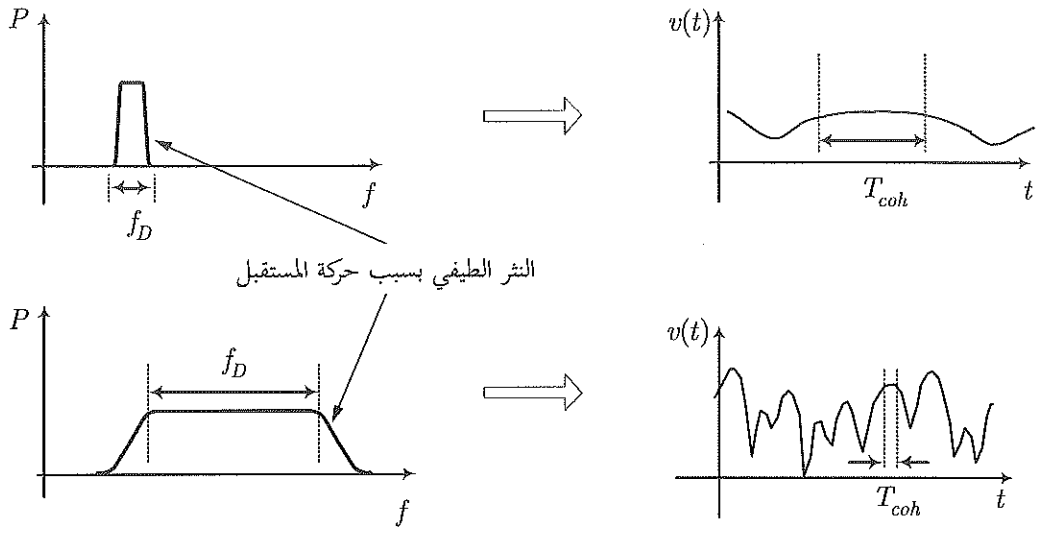
نقرأ من العلاقة (٣-٧٤) أيضاً، أن وتيرة تغير مواصفات القناة (أي انخفاض قيمة Δt_{min}) تزداد مع زيادة الاتساع الطيفي الذي يطرأ على الإشارة، والذي يرتبط بدوره بسرعة الحركة وجهتها. هذا يعني أن المستقبل يلحظ عند الحركة السريعة وتيرةً متزايدة في تغير مقدار التخميد. وأسوةً بالمعلَم الذي عرَّفناه سابقاً وهو "نطاق الترابط"، الذي يدل على عرض النطاق الذي يبقى ضمنه مقدار التخميد متقارباً نسبياً، يمكن تعريف معلمٍ آخر للقناة، يصف المدة الزمنية التي يلحظ خلالها المستقبل أثناء حركته تغيراً طفيفاً في مقدار التخميد. نطلق على هذا المعلَم اسم "مدة الترابط" "Coherence Time"، التي ندل عليها بـ T_{coh}، ويمثل هذا المعلم مؤشراً على سرعة تغير مواصفات أو خصائص قناة الانتشار، ومراعاته مهمة جداً عند تصميم نظم التحكم بالطاقة، سواءً في المرسل أو المستقبل.

تبين العلاقة (٣-٧٢) أن مدة الترابط تتناسب عكساً مع مقدار التوسع الطيفي الذي تسببه ظاهرة دوبلر (انظر الشكل ٣-٢١ لتوضيح هذا المبدأ)، لذا يمكن ربط هذين الموسطين بالعلاقة:

$$T_{coh} = \frac{1}{\varrho f_D} \qquad (٣-٧٥)$$

حيث يمثل ϱ عاملَ تناسب، تختلف قيمته تبعاً لمقدار الترابط الاحصائي بين قيمتين لحظيتين للإشارة، يفصل بينهما فاصل زمني معين δt، ويمكن حساب هذا الترابط باتباع خطواتٍ مشابهة لتلك التي عرضناها في العلاقات (٣-٥١) إلى (٣-٥٩). وكما هي الحال بالنسبة لنطاق الترابط في المجال الترددي، يوجد أكثر من قيمة لعامل التناسب ϱ:

- فإذا كانت قيمة عامل الترابط صغيرة تقارب 0.1، كان عامل التناسب يساوي 1، أي $T_{coh} = 1/f_D$.
- أما في حالة كون عامل الترابط مساوياً لـ 0.5 تقريباً، فإن مدة الترابط تعطى كما يلي: $T_{coh} \approx 9 \,/\, (16\,\pi\, f_D)$.
- هذا وتستخدم في كثير من الأحيان قيمة تجريبية تعرَّف بالعلاقة: $T_{coh} \approx \sqrt{9 \,/\, (16\,\pi\, f_D^2)}$، وهي تكافئ المتوسط الحسابي للقيمتين السابقتين، ومن الممكن الرجوع إلى [١] و [٦] للتفاصيل المتعلقة بذلك.



الشكل ٣-٢١: العلاقة العكسية بين إزاحة أو توسع دوبلر ومدة الترابط الزمني.

تَبرز أهمية تعريف "مدة الترابط" عند مقارنتها بطول الرمز الذي يُرسل عبر القناة، فإذا كان طول الرمز أقل أو يساوي تقريباً مدة الترابط فإن مواصفات القناة لا تتغير أثناء عملية إرسال رمزٍ ما، ومن ثم تُوصف القناة بأنها ذات "خفوت بطيء" "Slow Fading". أما إذا كان طول الرمز أطول بكثير من مدة الترابط، فهذا يعني أن مقدار التخميد يتفاوت أثناء مدة إرسال الرمز الواحد، مما يؤدي إلى تشوه في الإشارة المستقبلة. تتميَّز القناة في هذه الحالة بأنها ذات "خفوت سريع" "Fast Fading"، ما يتطلب آليات خاصة لتجنب الآثار السلبية لهذه الصفة. هذا وننوه إلى أن صفة "سريع" أو "بطيء" في هذا السياق مختلفة عما كنا ناقشناه في الفصل ٣-٢-٢، حيث ترتبط سمة السرعة هناك بالحركة ضمن المجال الجغرافي، بينما تدل في هذا الموضع على وتيرة تغير الخفوت خلال المدة الزمنية المكافئة للرموز الرقمية المتبادلة بين طرفي الاتصال.

لتزويد القارئ بتصور واقعي عن القيم الفيزيائية للموسطات والمعالم التي ذكرناها، نسوق في ما يلي مثالاً يوضح مقدار النثر الطيفي في نظام GSM.

لنفترض أن مستخدماً لنظام GSM–900 يشغل قناة راديوية ذات تردد مركزي مقداره 900 MHz، وأنه يتحرك بسرعة مقدارها 100 km ضمن بيئة مقدار τ_{rms} فيها هو $25\,\mu s$. يمكن باعتماد هذه المعطيات استنباط ما يلي:

- بتعويض القيم المذكورة في العلاقة (٣-٦٩) نحصل على مقدار الإزاحة الترددية العظمى التي تطرأ على الاشارة، وهي:

$$f_{Dmax} = \frac{vf_c}{c} = \frac{27.77 \times 900 \times 10^6}{3 \times 10^8} = 83.33\,\text{Hz} \qquad (٣-٧٦)$$

- لحساب T_{coh} نستعين بالعلاقة $T_{coh} \approx 9 \,/\, (16\,\pi\, f_D)$ التي أشرنا إليها، فهي الأكثر استخداماً من قبل مهندسي الاتصالات. تفضي هذه العلاقة إلى قيمة مقدارها 2.1 ms لمدة الترابط.

- لتجنب التأثير السلبي للنشر الزمني الناجم عن حركة المستقبل، يجب أن لا يتجاوز طول الرمز مدة الترابط، ومن ثم نستطيع القول بأن أقل معدل لنقل البيانات ضمن هذه البيئة هو (1/2.1 ms)، أي 465 رمزاً في الثانية تقريباً، وأي قيمةٍ أقل من ذلك ستفضي إلى كون القناة ذات خفوت سريع زمنياً.
- من المعلوم أن طول الحيز الزمني في نظام GSM هو 0.577 ms، بمقارنة هذا الرقم مع طول مدة الترابط (أو الاستقرار) T_{coh} نجد أن أربعة أحياز زمنية تقريباً ($2.1\text{ms}/0.577\,\text{ms} = 3.6$) ترصد خصائص متشابهة أو متقاربة للقناة. لذا يمكن اعتبار أن القناة ذات خفوتٍ بطيء بالنسبة لهذا النظام.
- بتعويض $\tau_{rms} = 25\,\mu s$ في العلاقة (٣-٥٩)، وافتراض أن $k = 1$ نجد أن:

$$B_{coh} = \frac{1}{25 \times 10^{-6}} = 40\,\text{kHz} \qquad (٣-٧٧)$$

بمقارنة هذه القيمة مع عرض القناة في نظام GSM (200 kHz)، نجد أن قيمة "نطاق الترابط" أصغر على نحوٍ ملحوظ، هذا يعني أن القناة تخضع للخفوت الانتقائي طيفياً.

- نخلص مما سبق إلى أن الخفوت الذي يطرأ على الإشارة في هذه القناة انتقائي (من الناحية الطيفية)، ولكنه بطيء (من الناحية الزمنية).

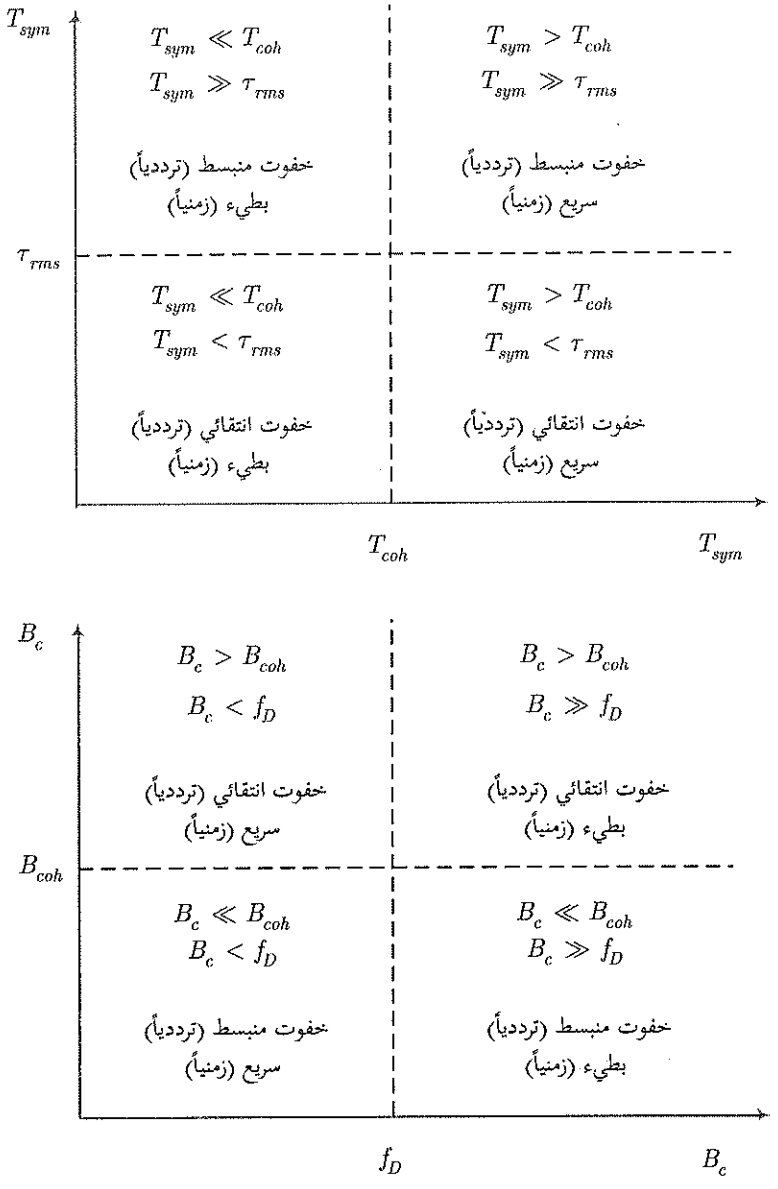
نختم هذا الجزء من الفصل بملخَّصٍ عن الظواهر التي ناقشناها، وبعرضٍ موجزٍ لبعض النقاط ذات الصلة:

١) يؤدي تعدد المسارات إلى ظاهرة النشر الزمني، التي تسبب تشوهاً في شكل الإشارة، وإلى ظاهرة الخفوت الانتقائي طيفياً، الذي يتجلى في تخميد المكونات الطيفية للإشارة الراديوية على نحوٍ متفاوت.

٢) تؤدي حركة المستقبل إلى ظاهرة النشر أو الاتساع الطيفي، كما يؤدي وجود مسارات متعددة للإشارة مع حركة المستقبل إلى تغير حدة التخميد بدلالة الزمن، وهذا ما يعرف بـ الخفوت الانتقائي زمنياً.

٣) تكون هذه الظواهر –على أرض الواقع– فاعلة ومؤثرة في آنٍ واحدٍ، إذ تتعرض الإشارة في كل لحظة لنشرٍ زمني يصاحبه اتساعٌ طيفي، وتتحدد نوعية الخفوت الإجمالي وطبيعة التشوه الذي يعتري الإشارة تبعاً للعلاقات التي تربط بين خصائص الإشارة، مثل عرض القناة الترددية التي تشغلها وطول الرمز، والخصائص الفيزيائية لقناة أو وسط الانتشار، كمدة النشر الزمني ومقدار الاتساع الطيفي.

يلخص الشكل ٣-٢٢ ما ذكرناه، مع بيان خصائص كل من الإشارة والقناة في المجالين الزمني والطيفي، ونوعية الخفوت المرتبطة بهذه الخصائص. ونقرأ منه أن تأثير قناة الانتشار ذاتها قد يختلف حسب الإشارة الراديوية الحاملة للمعلومات، وهذا يفسر الأداء المختلف لنظم الاتصالات ضمن البيئة نفسها إذا كانت هذه النظم تعتمد بُنىً مختلفة للمنفذ الراديوي.



الشكل ٣-٢٢: أنماط الخفوت المختلفة وعلاقتها بالخصائص الفيزيائية لكل من القناة والإشارة.

يوضح الشكل أيضاً أن نوع الخفوت المؤثر قد ينشأ أو ينجم إما بسبب خصائص القناة في المجال الزمني، أو بسبب خصائصها في المجال الطيفي، فعلى سبيل المثال، يكون الخفوت منبسطاً طيفياً وبطيئاً زمنياً إذا كان عرض القناة الترددية أقل بكثير من نطاق الترابط، أي إذا تحققت العلاقة $B_c \ll B_{coh}$ ، كما نحصل على نفس نوعية الخفوت إذا تحققت علاقة مكافئة في المجال الزمني، وهي كون مدة الرمز أطول من مدة النشر الزمني، أي $T_{sym} \gg \tau_{rms}$. (انظر المربع المعني في كلٍّ من جزئي الشكل).

٤) إن معرفة طبيعة وخصائص الخفوت المهيمن مهمة جداً من الناحية العملية، فهي التي تحدد آليات معالجة الإشارة الضرورية لتوفير أداءٍ جيدٍ للنظام، واللاتي يجب مراعاتها لتجنب الآثار السلبية لأنواع الخفوت المختلفة. فعلى سبيل المثال، تتعرض الإشارة في نظام GSM إلى خفوت انتقائي التردد، مما يتطلب وجود دارة تسوية في المستقبل (انظر البحث ٣-٣-٣)، بينما يكون تأثر الإشارة في نظام UMTS مختلفاً، نظراً لكونها ذات نطاق أعرض، ونظراً لكون طول الرموز الناثرة مختلفاً. لذا تتباين بنية المستقبل في النظامين.

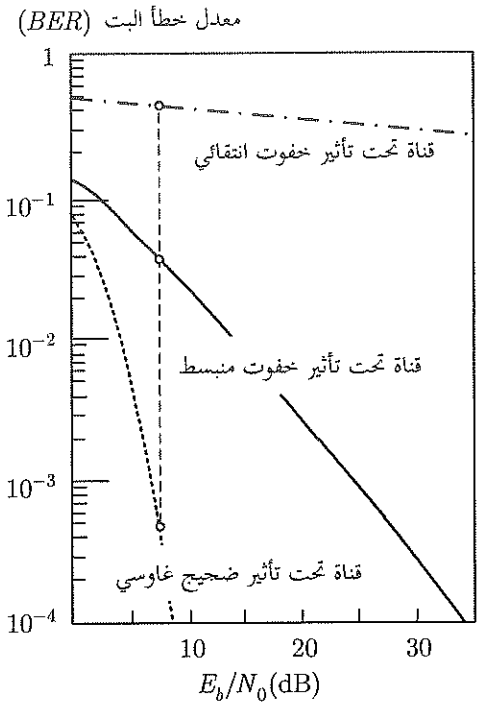
٣-٣ أهم آليات تقليل الآثار السلبية للخفوت

يؤدي التأثير التراكمي لظواهر الخفوت والتخميد المختلفة التي ذكرت لغاية الآن إلى تشويه ملحوظ للإشارة، ومن ثم إلى قصور شديد في قدرة المستقبل على استخلاص المعلومات المرغوبة من الإشارة، وإلى ارتفاع غير مقبول لمعدل خطأ البت. يتجلى هذا بوضوح عند دراسة أداء المستقبل بدلالة نوعية القناة وطبيعة الخفوت المؤثر، فعلى سبيل المثال، نقرأ من الشكل ٣-٢٣ مقارنةً بين أداء المستقبل في حال كون القناة متأثرة بخفوت منبسط أو خفوت انتقائي، ويتضح من هذه المقارنة أنه عند الحفاظ على مقدار ثابت لقيمة E_b/N_0 (7.5 dB مثلاً) فإن معدل الخطأ يتضاعف بمقدار ألف مرة تقريباً، وذلك عند الانتقال من أداءٍ ضمن قناة بدون خفوت إلى قناة تحت تأثير خفوت انتقائي. يبين الشكل أيضاً أن هذا الفرق يزداد بازدياد قيمة E_b/N_0، أي أن تحسين نسبة الاستطاعة إلى الضجيج يؤدي إلى تحسُّن في أداء المستقبل إذا بقيت الشروط المحيطة -أي نوع الخفوت- ثابتة، غير أن الفرق في نوعية وجودة الأداء ضمن بيئات مختلفة يزداد.

لمّا كان تجاهل هذه الدرجة من التفاوت في أداء المستقبل غير مقبول، وجب تطوير واستخدام طرقٍ وأساليبَ فعالة للتخفيف قدر الإمكان من الآثار السلبية للخفوت. يؤدي هذا إلى تحسين أداء النظام من جهة، كما أن استخدام أيٍ من هذه الطرق يعود بفوائد ومنافع اقتصادية جمة على مشغلي الشبكات، إذ أن أي تحسين في الأداء يُفضي إلى خفضٍ في عدد المحطات الثابتة الضرورية لتغطية منطقة جغرافية معينة، ما يؤدي بدوره إلى تقليصٍ ملحوظٍ في نفقات إنشاء وتشغيل الشبكات.

إن أول ما يتبادر إلى الذهن كوسيلة ممكنة لتخفيف آثار الخفوت هو زيادة مقدار الاستطاعة المرسلة من المحطة الثابتة، وهذا ممكن من الناحية النظرية، غير أنه يساعد على تخفيف حدة تخميد البعد وخفوت الحجب فقط. وقد كنا أشرنا إلى وجوب مراعاة هامشٍ للخفوت أثناء إجراءات التخطيط كوسيلة لتحسين نوعية الإشارة، وهذا يمثل ترجمة مباشرة لرفع مستوى الاستطاعة.

من جانبٍ آخر، لا يكفي رفع مستوى الاستطاعة -كإجراءٍ وحيد- لتجاوز تأثير ظواهر الخفوت الناجمة عن تعدد المسارات وعن حركة المستقبل، فمقدار الخفوت قصير المدى ليس مرتبطاً بمقدار الاستطاعة المتوفرة عند نقطة جغرافية ما، وإنما بتراكم الإشارة الواردة إلى المستقبل عبر مسارات متعددة، وبالجمع الشعاعي الذي قد يؤدي إلى إشارة كلِّيَّة ضعيفة جداً، حتى لو كانت نسخ الإشارة -كلاً على حدة- تحمل مقداراً كافياً من الطاقة.



الشكل ٣-٢٣: مؤشرات أداء القناة حسب طبيعة الخفوت (عن [١٦] بتصرف).

كذلك لا يمكن لقيمة الاستطاعة المرتفعة أن تقلل من الآثار السلبية الناجمة عن تداخل الرموز، إذ أن هذه الظاهرة مرتبطة بطول الرموز المرسلة، وبتردد الإشارة في النطاق الأساسي، وبطبيعة قناة الانتشار أيضاً. كما أنه ليس لمقدار استطاعة الإشارة دورٌ في مدى تأثير ظاهرة النثر أو الاتساع الطيفي.

نظراً لما سبق، طُوِّرت طرق عديدة بديلة، يهدف كل منها إلى معالجة جانب من الجوانب السلبية لآثار انتشار الإشارة في بيئة واقعية، لذا نَعرِضُ في ما يلي لأهم هذه الطرق على نحوٍ موجزٍ ومجمل، كي يتكون لدى القارئ تصورٌ وافٍ عن أهم مبادئها.

٣-٣-١ ترميز القناة

يُشير تعبير "ترميز القناة" "Channel Coding" إلى مجموعةٍ من آلياتِ وتقنياتِ معالجة الإشارة رقمياً، تهدف إلى تحسين أداء عملية الاستقبال عن طريق إضافة "فائضٍ من المعلومات" "Redundant Information" إلى المعطيات الأصلية، يتبع (أي الفائض) في بنيته وكيفية إضافته خوارزميات رياضية تكون معروفة لدى المستقبل. فإذا تلقى المستقبل الإشارة، أمكنه -عن طريق تحليل المعلومات الفائضة- كشف أو تصحيح جزءٍ من الأخطاء التي تنتج عن إرسال الإشارة عبر الرابط أو المنفذ الراديوي.
ننوه في هذا السياق إلى أن ترميز القناة يساعد على التقليل من قيمة أو معدل الخطأ في البت عند كشف الإشارة، غير أنه لا يتيح إمكانية منع حدوث الخطأ. كذلك تعني إضافة "فائض" من المعلومات إلى المعطيات التي يتبادلها طرفا الاتصال هدراً لموارد

الشبكة، يتعارض مع ما أشرنا إليه تكراراً من وجوب استثمار الرابط الراديوي بأكبر فعالية ممكنة. غير أن هذا الهدر يجب القبول به مقابل ما تؤدي إليه عملية ترميز القناة من تحسين في أداء المستقبل. لذا، من الممكن اعتبار تأثير إجراء ترميز القناة مقايضةً بين أداءٍ سيء وجودة غير مقبولة للاتصال من جهة، وخفضٍ لفعالية استثمار الموارد الفيزيائية المتاحة من جهة أخرى.
هذا وسنتناول طرق ترميز القناة الأكثر استخداماً في الاتصالات الخلوية بتفصيل أوسع في الفصل ٥.

٣-٣-٢ تقنيات التباين

ترتكز "تقنيات التباين" "Diversity Techniques" على مبدأ أساسي يتمثل في إيصال المعلومات نفسها عبر نسخٍ متعددة للإشارة الراديوية الحاملة، بحيث تتباين هذه النسخ في ما بينها على نحوٍ يتيح للمستقبل إما أن يجمعها للحصول على إشارة إجمالية أكثر وضوحاً وأقل تشويهاً، أو أن يختار الأفضل منها. ويهدف إرسال المعلومات عبر أكثر من نسخة للإشارة إلى استثمار الاختلاف في مقدار الخفوت الذي تتعرض له كلٌ من الإشارات السالكة لمسارات متباينة، فتبعاً للطبيعة العشوائية للخفوت، واختلاف تسلسل العوائق وبنيتها، يكون احتمال تماثل مقدار الخفوت لكل المسارات ضئيلاً جداً، وهذا يعني أن احتمال استقبال إشارةٍ ذات جودة مقبولة على واحدٍ من هذه المسارات يزداد نسبياً.

تختلف تقنيات التباين فيما بينها تبعاً للمورد الفيزيائي الذي تعتمده للتمييز بين الإشارات المختلفة، ولما كانت الموارد الفيزيائية التي يمكن أن تشغلها الإشارة الراديوية هي الحيز المكاني- والحيز الزمني، والتردد، يمكن التمييز بين أصناف التباين التالية:

١) "تباين مسار الانتشار أو التباين المكاني" "Space Diversity": حيث تُستقبل الإشارة عن طريق هوائيين منفصلين ومتباعدين على نحوٍ كافٍ يجعل مقدار الترابط الإحصائي بين الإشارتين ضعيفاً جداً. وما أشرنا إليه عند الحديث عن نطاق الترابط الترددي أو الزمني، يمكن أن ينطبق من ناحية المبدأ على الوسط المادي الذي تنتشر ضمنه الإشارة، إذ يمكن تعريف "مسافة ترابط" تكون قيم الخفوت ضمنها متقاربة، فإذا تجاوز البعد بين نقطتي استقبالٍ هذه المسافة، أتاح التباعد وجود مسارين مختلفين للإشارة، متباينين في المسافة التي يمثلانها بين المرسل والمستقبل، ومستقلين عن بعضهما من ناحية مستوى الخفوت الذي يعتري نسخة الإشارة التي تسلكه. فإذا تعرضت واحدة من الإشارتين لخفوت شديد، يكون احتمال توفر إشارةٍ أفضلَ نسبياً كبيراً عبر المسار الثاني، ومن ثم يزداد احتمال التقاط إشارةٍ ذات جودة مقبولة. هذا وتدل بعض الدراسات على أن هذه المسافة تعادل خمسة إلى ستة أضعاف طول موجة إشارة الحامل الراديوية، أي ما يقارب متراً ونصف المتر في نظام GSM – 900، لذا يمكن تجهيز المحطة الثابتة بهوائيي استقبال متباعدين بمقدار 1.5 m على الأقل.
تستخدم تقنية تباين المسارات بكثرة، وقد أثبتت فعالية عالية على أرض الواقع، وهذا ما يبرر ما يُشاهَدُ على أسطح كثير من الأبنية، وهو وجود ثلاثة هوائيات لخلية واحدة، حيث يُخصص واحد من الهوائيات للإرسال، بينما يتيح الآخران استقبال الاشارة وفق مبدأ التباين.
تتصف هذه التقنية -رغم فعاليتها- بسلبية أساسية، وهي الحيز المكاني الذي يتطلبه وجود وإنشاء ثلاثة هوائيات عوضاً عن اثنين. ولا شك أن أبعاد هذا الأثر السلبي تزداد وتتعاظم في المدن والمناطق المكتظة عمرانياً وسكانياً.

٢) "التباين الترددي" "Frequency Diversity": يتحقق مبدأ التباين –وفق هذه التقنية– عن طريق إرسال الإشارة عبر أكثر من قناة ترددية، وهذا يقتضي استخدام أكثر من حامل راديوي. وتبعاً لما ناقشناه سابقاً، لابد أن يكون الفاصل الترددي بين الحاملين أكبر من نطاق الترابط B_{coh}، حتى تتحقق الإفادة من هذه التقنية.

من سلبيات هذه التقنية أنها غير مجدية عندما تكون القناة ذات خفوت منبسط، أي غير انتقائي، ومن سلبياتها أيضاً أن الطاقة المتوفرة للإرسال يجب أن توزع على الحاملين أو القناتين الترديتين، ما يؤدي إلى ضعفٍ في مستوى الإشارة المحمولة على كلٍ منهما. كذلك تتطلب هذه التقنية استخدام نطاق طيفي ذي عرضٍ مضاعف، وهو ما يعارض مبدأ استخدام الترددات المتاحة على وجهٍ فعال، ويزيد من كلفة تشغيل الشبكة. لذلك لا تستخدم هذه التقنية على نحوٍ تقليدي (أي باستخدام قناتين مخصصتين لكل مسار) في أنظمة الاتصالات الخلوية التجارية.

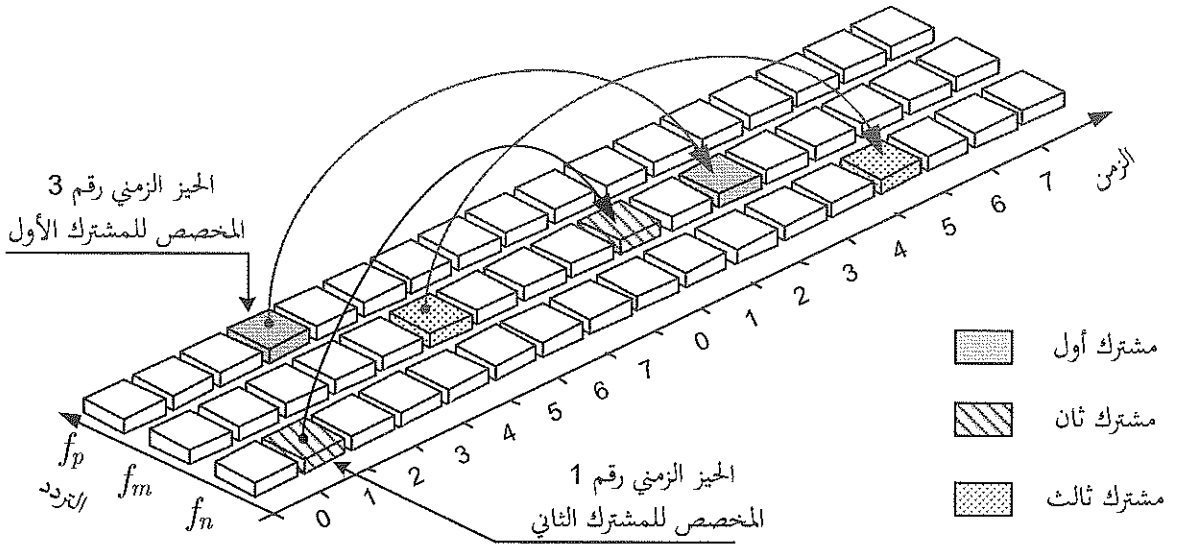
من جانبٍ آخر، تعني سمة "الانتقاء" في الخفوت انتقائيّ التردد من الناحية الفيزيائية أن كل حامل ترددي أو قناة ترددية تتأثر بظواهر الخفوت على نحوٍ مختلف، فعلى سبيل المثال تتعرض القناة ذات الرقم ARFCN = 78، والتي توافق التردد المركزي 950.6 MHz في نظام GSM، لدرجة مختلفة من التغيُّر أو التشويه، عند مقارنتها بما تتعرض له القناة رقم 6، الموافقة للتردد 936.2 MHz. ويكون هذا الاختلاف ملحوظاً حتى حين استخدام القناتين في آنٍ واحد، وضمن بيئة الانتشار نفسها. هذا يعني أنه إذا استخدمت القناتان ضمن نفس الخلية، فإن إشارة كل تردد ستكون مختلفة من ناحية الجودة، نظراً لاختلاف تأثرها بظواهر الخفوت.

يُستثْمر هذا المفهوم في نظام GSM ضمن ما يعرف اصطلاحاً بتقنية "القفز الترددي" "Frequency Hopping"[١]، حيث ينتقل المستخدم من ترددٍ إلى آخر ضمن كل إطار زمني. لتوضيح ذلك نُذكِّر بأن كل مستخدم يشغل أثناء اتصاله حيزاً زمنياً محدداً من الأحياز الثمانية المتوفرة ضمن الإطار الزمني المعرف على كل تردد (TDMA-Frame)، وأن المحطة الثابتة ترسل معلوماتها على الحيز الزمني ذي الرقم ذاته ضمن الإطار المعرف على قناة المسار الهابط، والتي يفصلها فاصل مقداره 45 MHz عن قناة المسار الصاعد (انظر الشكل ٢-٣ والجدول ٢-١). هذه هي الحالة التقليدية لتوزيع وشغل الترددات والأحياز الزمنية، حيث لا يتبدل التردد ولا رقم الحيز الزمني طوال مدة الاتصال الواحد. أما في حالة القفز الترددي فإن المستخدم ينتقل بين أكثر من تردد أثناء الاتصال نفسه (انظر الشكل ٣-٢٤)، حيث يرسل أو يستقبل المعلومات على ترددٍ مختلفٍ بين إطارٍ وآخر، مع الحفاظ على رقم الحيز الزمني المخصص ضمن الإطار. فإذا كان يستخدم القناة الترددية f_u والحيز الزمني TS_m، فإنه يستخدم –حين الانتقال إلى إطارٍ تالٍ– تردداً مختلفاً f_w ضمن الحيز نفسه TS_m. ويتكرر تبديل التردد على نحوٍ دوري يوافق تكرر الإطار، وبالتنسيق مع المحطة الثابتة. وقد عرَّفت المواصفات المعيارية [١٨] و [١٩] أكثر من نمط لتنظيم وتيرة وكيفية اختيار الترددات المستخدمة، لذا يمكن الرجوع إليها لمزيد من التفاصيل.

٣) "التباين الزمني" "Time Diversity": نعني بهذا الصنف من التباين إما إرسال الإشارة نفسها ضمن مدد زمنية متتالية على نحوٍ دوري، أو تفريق رموز الإشارة المتعاقبة عن بعضها وإرسالها متفرقةً ضمن مدد زمنية متباعدة. تُسمَّى هذه التقنية أيضاً "التفريق" "Interleaving"، وسنتطرق لها بتفصيل أكبر في الفصل ٥.

---

[١] تستخدم هذه التقنية في أنظمة أخرى أيضاً مثل نظام Bluetooth، وبعض نظم الطيف المنثور.



الشكل ٣-٢٤: تنقل المشتركين من تردد إلى آخر وفق تقنية القفز الترددي.

٤) "تباين الاستقطاب" "Polarization Diversity": تتيح هذه التقنية التقاط الإشارة عن طريق هوائيين اثنين متباينين في استقطابهما (أحدهما ذو استقطاب عمودي والآخر ذو استقطاب أفقي مثلاً)، وتتميز بأن هذين الهوائيين يكونان ضمن حافظٍ معدني مشترك، وهذا يستلزم مكاناً ومساحةً أصغر مقارنة بتلك التي تتطلبها تقنية تباين المسارات.

يتطلب استقبال الإشارة المرسلة باستخدام أيٍّ من طرق التباين التي عرضناها أن يكون المستقبل قادراً على تجميع الإشارات المختلفة، وتقييمها للوصول إلى قيمةٍ مثلى للإشارة التي تُستخدم في خطوات المعالجة التالية. وكما هي الحال من ناحية تعدد مبادئ التباين، توجد طرق مختلفة لتجميع الإشارة في المستقبل، تهدف جميعها إما إلى اختيار الإشارة الأفضل، أو إلى ضم الإشارات المستقبلة عبر قنوات (أو مسارات) متباينة متعددة، وذلك للوصول إلى قيمةٍ مثلى لنسبة الإشارة إلى الضجيج. وننوه إلى أن المقصود بالقناة في هذا الموضع هو أي الموارد الفيزيائية المستخدمة لتحقيق التباين (أي قنوات ترددية أو زمنية أو مسارات مختلفة). لذا نَذكُر في ما يلي أهم "طرق التجميع" "Diversity Combining Techniques"، وذلك بغرض التنويه لا التفصيل، ونحيل القارئ إلى الفصول المخصصة لشرح هذه التقنيات في [٣] و [٢٠].

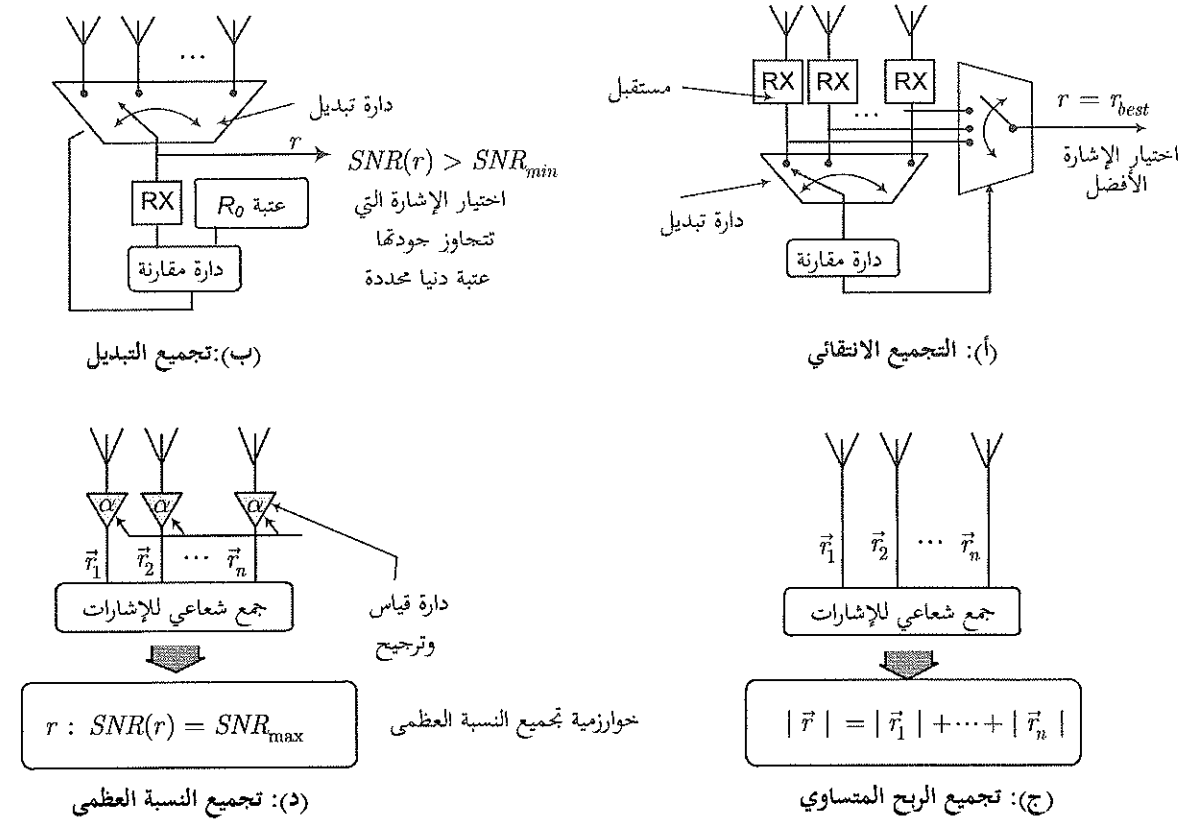
يلخص الشكل ٣-٢٥ مبادئ عمل أهم طرق التجميع المستخدمة وهي:

١) "التجميع الانتقائي" "Selection Combining": تمثل هذه الطريقة أبسط أساليب التجميع، حيث تُختار الإشارة الأقوى من بين الإشارات المستقبلة وتُهمل الإشارات الأخرى. لا تؤدي هذه الطريقة إلى أداءٍ مثالي من ناحية القيمة النهائية لنسبة الإشارة إلى الضجيج SNR، إلا أن بساطتها وعدم تطلبها لدارات معالجة إضافية يبرران استخدامها على نحوٍ واسع.

٢) "تجميع التبديل" "Switching Combining": تعتمد هذه الطريقة قياساً دورياً لمقدار SNR، ومقارنة القيم المقيسة بعتبةٍ دنيا مطلوبة، فإذا تجاوزت أي من الإشارات المستقبلة هذه العتبة، يجري اختيارها من قبل المستقبل وتبقى هي الإشارة

المعتمدة حتى تنخفض قيمة SNR دون العتبة الدنيا. فإن حدث ذلك، اختار المستقبل إشارة أخرى واستبدلها بالإشارة السابقة، وتجري عملية التبديل وفقاً لخوارزمية محددة تكون مُعرَّفة في المستقبل. تعرف هذه التقنية اصطلاحاً باسم آخر هو "Threshold Combining".

من ميزات هذه التقنية الاكتفاء بدارة استقبال واحدة، غير أن أداءها لا يؤدي في كثيرٍ من الأحيان إلى النتائج المثلى المرجوة .



الشكل ٣-٢٥: أهم طرق التجميع المعتمدة.

٣) "تجميع الربح المتساوي" "Equal Gain Combining": يستند المبدأ الأساسي لهذه التقنية إلى توحيد طور الإشارات المتباينة المختلفة، ثم جمعها شعاعياً للحصول على إشارة نهائية تُعتمد لخطوات المعالجة التالية. هذا يعني أن الإشارة الناتجة هي مجموع القيم اللحظية للإشارات المُستَقْبلة، إذ أن توحيد الطور يجعل الجمع الشعاعي مكافئاً لجمع مطالات الإشارات المتباينة. هذا ولا تَستخدم هذه التقنية أي ترجيح بين الإشارات المتوفرة، وتَفترض ضمنياً أن ربح كلٍ من الإشارات، أي نسبة تأثيرها في الإشارة الإجمالية، متساوٍ بغض النظر عن مطال كلٍ منها والمسار الذي سلكته، وقد أُشتق الاسم الدال على التقنية من هذا الافتراض.

٤) "تجميع النسبة العظمى" "Maximum Ratio Combining": يقصد بالنسبة العظمى هنا القيمة الأمثل لنسبة الإشارة إلى الضجيج SNR، حيث يجري وفق هذه التقنية تجميع كل الإشارات المتباينة المتوفرة، ثم معالجتها على نحوٍ يضمن أن تكون قيمة SNR هي أعلى قيمة يمكن الحصول عليها من هذه الإشارات المجمَّعة. ومن الممكن البرهنة رياضياً (انظر [٣]) أن ذلك يتحقق عن طريق ترجيح كل إشارة من الإشارات باستخدام عاملٍ أو ثابتٍ عقدي، يشتق من قيمة SNR لهذه الإشارة، طبقاً لخوارزمية خاصة.

لقد أثبتت مقارناتٌ عديدة لأداء طرق التجميع أن تقنية تجميع النسبة العظمى توفر الأداء الأمثل من بين كل التقنيات المذكورة، لذا فهي الأكثر استخداماً، خصوصاً في المحطات الثابتة، رغم كونها أكثر تعقيداً وتكلفةً مقارنةً بالطرق الأخرى.

٣-٣-٣ التسوية

يُشير تعبير "التسوية" "Equalization" بمفهومه العام إلى سُبُلٍ خاصة لمعالجة الإشارة، تهدف إلى التقليل من الآثار السلبية للخفوت الانتقائي، وخاصة ما يتعلق منها بظاهرة تداخل الرموز. ويتطلب تحقيق ذلك إضافة دارة خاصة في المستقبل، تعرف باسم "دارة أو مرشح التسوية" أو بتعبير عام "المسوي" "Equalizer".
هناك أصناف عديدة لدارات التسوية، تختلف من ناحية تعقيدها والتطبيقات الملائمة لها، وتتباين تبعاً للمبادئ النظرية والرياضية التي تُبنى على أسسها. ولمَّا كانت هذه المبادئ متشعبة ويتطلب عرضها معرفة متعمقة بنظريات معالجة الإشارات العشوائية، نقتصر في سياق نقاشنا على شرحٍ موجزٍ لآلية عمل المسوي المعروف باسم "Viterbi Equalizer"، وذلك كمثالٍ يكتسب أهميته من الانتشار الواسع والأداء المميز، حيث يستخدم في نظام GSM، وجزئياً في أنظمة الجيل الثالث، وفي نظم اتصالاتٍ أخرى مختلفة.

لما كان الهدف من المسوي هو التقليل أو التخفيف من آثار التغيير والتشويه التي تفرضها قناة الانتشار على الإشارة، فإن آلية عمله تقتضي معرفة أو تقدير خصائص القناة، وهذا يعني وجوبَ توفُّرِ نموذجٍ رياضي، يتيح وصف أو تمثيل القناة على نحوٍ متكيف مع التغيرات التي تطرأ على خصائصها، أي أن هذا النموذج يجب أن يكون قادراً على مراعاة تغير خصائص القناة بتغير الزمن.

للحصول على هذا النموذج ننطلق من أن الإشارة المرسلة هي نبضة مثالية $\delta(t)$، تصل إلى المستقبل في نسخ متعددة، عبر مسارات مختلفة، وتتمايز هذه النسخ في ما بينها من حيث عامل التأخير τ_i والمطال a_i، اللذَيْن يمثلان تأثير كلٍّ من المسارات على نسخة الاشارة التي سلكته. بذلك يمكن وصف الإشارة المستقبلة رياضياً، والتي تمثل في هذه الحالة "الاستجابة النبضية للقناة" "Channel Impulse Response"، على النحو التالي:

$$h(t) = \sum_{i=1}^{N} a_i \, \delta(t - \tau_i) \qquad (٣-٧٨)$$

تعطي هذه العلاقة استجابة القناة عندما تكون الإشارة مقتصرة على نبضة واحدة فقط، لذا فهي تصف تأثير التخميد وبُعدَ المرسل عن المستقبل، كما تمثل -عبر τ_i- التأخير الذي يطرأ على وصول بعض نسخ الإشارة تبعاً لمواضع العوائق ضمن بيئة الانتشار. غير أن هذه العلاقة قاصرة عن تمثيل القناة إذا كانت الإشارة تتكون من نبضات أو رموز متتالية، ومن ثم لا تتيح إمكانية تمثيل ظاهرة التداخل بين الرموز.

من جانبٍ آخر، لا تعكس العلاقة (٣-٧٨) أيَّ تغير زمني في خصائص القناة، فالموسطات أو المعاملات τ_i و a_i -كما هي ممثلة في العلاقة- ثابتة بدلالة الزمن، بينما تكون في الواقع متغيرةً بين لحظة وأخرى. فعلى سبيل المثال، لو تخيلنا أن الوحدة المتحركة تتحرك بسرعة ثابتة، مبتعدةً عن المحطة، ومتبعةً مساراً مستقيماً، فإن الإشارة اللحظية التي يرصدها المستقبل تتغير بدلالة عاملين اثنين: الأول هو المسافة الفاصلة عن المحطة d، وهذا العامل يشير ضمنياً إلى تغيرٍ زمني نظراً لارتباط المسافة مع الزمن والسرعة عن طريق العلاقة $d(t) = vt$. أما العامل الثاني فهو الفارق الزمني بين لحظة إرسال الاشارة، ولحظة استقبالها أو رصدها، إذ أن المستقبل يلتقط عند أية نقطة جغرافية إشاراتٍ أو نبضاتٍ متباينة في لحظة صدورها عن المحطة، إذ نظراً للسرعة المتناهية للأمواج الكهرومغناطيسية، لا يرصد المستقبل الإشارة التي صدرت في نفس اللحظة، وإنما مجموع الإشارات الناتجة عن النبضات التي أرسلت قبل لحظة رصد الإشارة بفواصل زمنية مختلفة، وبقي أثرها فاعلاً بسبب وصول بعض النسخ المتأخرة (نتيجة الانعكاس عن عوائق بعيدة مثلاً). ومن الطبيعي أن طبيعة الإشارة المستقبلة تختلف باختلاف هذا الفاصل الزمني، لذا تكون استجابة القناة لكل نبضة متعلقة بلحظة رصد الإشارة وبالفاصل الزمني عن لحظة إرسال النبضة.

نشير إلى ذلك رياضياً بذكر هذين الموسطين على نحوٍ صريح في العلاقة الواصفة لاستجابة القناة، لذا يمكن اختيار صيغة محسنة للعلاقة (٣-٧٨) هي:

$$h(\tau, t) = \sum_{i=1}^{N} a_i(t)\,\delta(t - \tau_i(t)) \qquad (٣-٧٩)$$

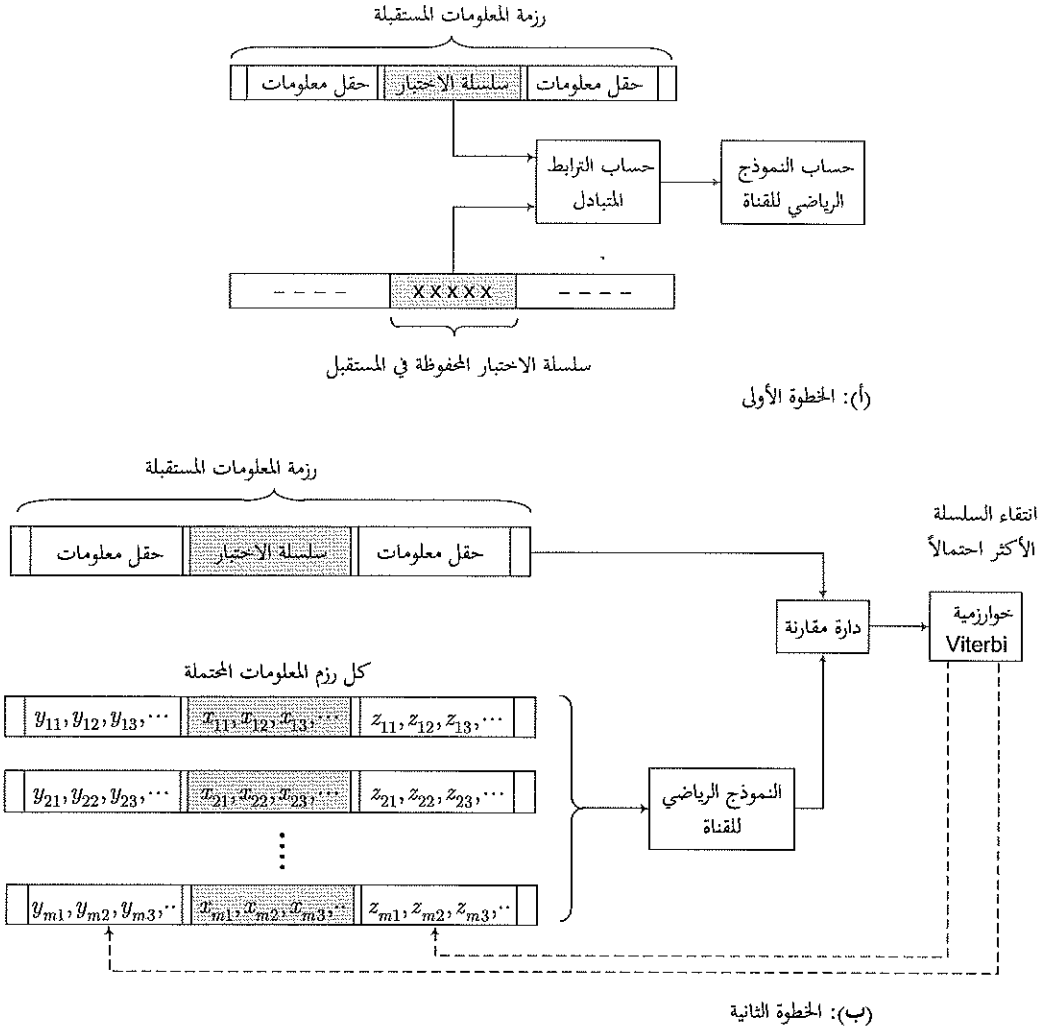
نعني بـ $h(\tau, t)$ في هذا السياق استجابة القناة كما نرصدها في اللحظة t، وذلك لنبضة صدرت قبل فاصل زمني مقداره τ، أي عند اللحظة $(t - \tau)$. كما يعني الرمز $\tau_i(t)$ التأخير في وصول النبضة عبر المسار i، وهو متغير بدلالة الزمن، كما يدل $a_i(t)$ على مطال الإشارة الواصلة عبر المسار i، وهو متغير زمنياً أيضاً. وإذا اعتبرنا أن مطال النبضة الصادرة عن المرسل هو "1"، فإن $a_i(t)$ يدل على مقدار التخميد الذي تتعرض له الاشارة.

توفر العلاقة (٣-٧٩) القاعدة التي يتطلبها النموذج الرياضي لتمثيل ومحاكاة القناة، إذ أن تحديد كل من $\tau_i(t)$ و $a_i(t)$ يتيح معرفة تأثير القناة على الاشارة، ومن ثم يمكن استخدام هذه الموسطات لحساب خرج القناة إذا كانت إشارة الدخل معروفة.

ننتقل الآن إلى بيانٍ موجزٍ لآلية التسوية كما تُنجز أو تطبق في نظام GSM. وتستند هذه الآلية إلى المبدأ التالي:

«إذا توفرت للمستقبل معلومات كافية عن خصائص القناة، أمكن الحصول على قيمة تقديرية للإشارة المرسَلة، وذلك عن طريق محاكاة تأثير القناة على كل إشارةِ إرسالٍ محتملة، ثم اختيار أكثر النتائج مشابهة للإشارة المستقبَلة فعلاً».

يُعرف هذا المبدأ باسم "Maximum Likelihood Sequence Estimation (MLSE)"، أي "اختيار أكثر السلاسل احتمالاً" أو "تحديد السلسلة ذات الاحتمال الأعظمي"، ويمكن تفصيل خطوات إنجازه وفقاً لما يلي (انظر الشكل ٣-٢٦):



الشكل ٣-٢٦: مبدأ عمل دارة التسوية في نظام GSM.

١) كنا قد أشرنا في الفصل ٢ إلى بنية رزمة المعلومات في نظام GSM (انظر الشكل ٢-٩)، حيث تتكون هذه الرزمة من 148 بتاً، يتوسطها حقل يتألف من 26 بتاً، نُشير إليه باسم "سلسلة (متتالية) الاختبار"[١] "Training Sequence". لا يستخدم هذا الحقل لتبادل المعلومات، وإنما لنقل نمطٍ محدد من البتات، يكون معروفاً لدى المستقبل أيضاً.

[١] لقد اخترنا تعبير "الاختبار" عوضاً عن الترجمة الحرفية وهي "التدريب"، لابراز الدور الوظيفي الفعلي لهذه السلسلة، وهو اختبار تأثير القناة على سلسلة من الرموز المتتالية.

تُستخلص هذه السلسلة بدايةً من الرزمة المستقبَلة (الجزء (أ) من الشكل ٣-٢٦)، وبما أنها قد تتعرض لتشويه أوتغيير بسبب تاثير القناة، فإن مقارنتها مع السلسلة المعروفة لدى المستقبل تُفضي إلى اشتقاق الاستجابة النبضية للقناة، أي لحساب النموذج الرياضي، كما عرضناه في العلاقة (٣-٧٩). تُنجز إجراءات الاشتقاق والمقارنة عند استقبال كل رزمة، وهذا يفترض ضمنياً أن خصائص القناة لا تتغير ضمن المدة الزمنية المكافئة لطول الرزمة، وأنه لا يوجد خفوت سريع يمكن أن يؤدي إلى تأثير متباين أو متفاوت على أجزاء مختلفة من البتات ضمن الرزمة الواحدة.

٢) نظراً لكون عدد البتات التي يتألف منها حقل المعلومات المرغوبة معروفاً، يمكن للمستقبل أن يولِّد كل سلاسل المعلومات المحتملة أو الممكنة، والتي لا بد أن تكون السلسلة المرسَلة واحدة منها.

٣) في خطوة تالية (الجزء (ب) من الشكل ٣-٢٦) يستخدم المستقبل كلاً من هذه السلاسل كدخلٍ لنموذج القناة الذي اشتُقَّ في الخطوة الأولى، وهذا يُفضي إلى عددٍ من سلاسل الخرج يُكافئ عدد السلاسل التي نتجت عن الخطوة السابقة.

٤) بعد ذلك يُقارن المستقبل كلاً من سلاسل الخرج التي أدى إليها نموذج القناة، بسلسلة المعلومات التي استُقبِلَت فعلياً، ثم يحدد عن طريق خوارزميات مقارَنة خاصة أكثر سلاسل الخرج شبهاً بالسلسلة المستقبلة. فإذا حُددت سلسلة الخرج المشابهة، يختار المسوي سلسلة الدخل التي أدت إلى سلسلة الخرج هذه كإشارةٍ صدرت من طرف المرسل، أو بالأحرى، كسلسلةٍ احتمالُ صحتها هو الأكبر من بين كل الاحتمالات المتوفرة.

تُكَوِّن الخطوات المذكورة أعلاه تسلسلاً سهل التتبع من الناحية الهندسية، غير أنها تمثل تحدياً كبيراً من ناحية التعقيد الرياضي، والوقت الذي يتطلبه إجراء مقارنة السلاسل المختلفة. فعلى سبيل المثال، يتألف كل حقلٍ من حقلي المعلومات في رزمة GSM من 57 بتاً، هذا يعني أنه يجب مقارنة السلسلة المستقبلة مع عدد كبيرٍ جداً من السلاسل مقداره $1.44 \times 10^{17} \approx 2^{57}$، وهذا غير قابل للتطبيق من الناحية العملية. لذا، لم يبدأ الاستخدام الفعلي لهذا النوع من دارات التسوية إلا بعد تبلور بعض الأبحاث التي بينت أنه لو كان طول سلسلة الرموز التي هي محط الدراسة N، وكان تأثير أي رمز على الرموز التي تعقبه محدوداً زمنياً، أي أنه لا يتداخل إلا مع عددٍ محدود جداً من الرموز اللاحقة، ندل عليه بـ η، فإن عدد السلاسل التي يجب مقارنة السلسلة المستقبَلة معها ينخفض من 2^N إلى $N \times 2^\eta$ (انظر [٢١] و [٢٢]). كذلك بينت هذه الأبحاث أنه من الممكن استخدام خوارزمية Viterbi لتحسين أداء عملية المقارنة. وحتى يتبين للقارئ مدى التبسيط الذي أفضت إليه هذه الأبحاث، نذكِّر بأن التداخل بين الرموز في حالة GSM يمكن إهماله بعد مدة زمنية تعادل 4 بتات تقريباً، أي أن كل رمز يتداخل مع الرموز الأربعة اللاحقة، مما يعني أن $\eta = 4$ في هذه الحالة. لذا ينخفض عدد عمليات المقارنة إلى $58 \times 2^4 = 928$، عوضاً عن العدد الذي ذكرناه في مستهل الفقرة. يعني المثال المذكور أيضاً، أن المسوي في نظام GSM يتيح تجاوز الآثار السلبية للإشارات المنعكسة عن عوائق لا يتجاوز مقدار التأخير الزمني الذي تسببه المدة المكافئة لـ 4 بتات، أي $16\,\mu s$ تقريباً، وهذا يعادل فرقاً في طول مسار الانتشار مقداره 4.8 km.

بقي التنويه أخيراً إلى أن مكان "دارة التسوية" في المستقبل يكون بعد دارة أخذ العينات وقبل دارة المقارنة الخاصة بكشف التعديل الرقمي، كما نشير إلى أن دارة المقارنة في الشكل ٣-٢٦ جزءٌ من المسوي ومختلفة عن التي في الشكل ١-١٣.

٣-٣-٤ المستقبل المتعدد المسالك

لما كان الرمز في أنظمة الطيف المنثور أطول بكثير من نبضة النثر، فإن احتمال كونِ مدة النثر الزمني طويلةً إلى حدٍّ يؤدي إلى تداخل بين الرموز ينخفض على نحوٍ ملحوظ. إضافةً إلى ذلك، تكون نسخ الإشارات المتأخرة عند إنجاز عملية فك النثر غير متزامنة مع سلسلة النثر المولَّدة في المستقبل، لذا يؤدي فك النثر إلى تخميدٍ لنسخ الإشارة المتأخرة على نحوٍ مشابهٍ لتخميد إشارات سلاسل النثر الأخرى، ومن ثم تبدو هذه الإشارات مثل ضجيج إضافي بالنسبة للمستقبل. استناداً إلى ذلك، تنتفي الحاجة لدارات التسوية في نظم الطيف المنثور التقليدية[١].

من جهة أخرى، يمكن تحقيق أداءٍ أفضل للمستقبل إذا أمكن استخلاص الاستطاعة المتوفرة في نسخ الإشارات الواردة عبر مسارات مختلفة، وجمعها بعضاً إلى بعض على نحوٍ يؤدي إلى تحسين نسبة الإشارة إلى الضجيج. وهذا الغرض بالتحديد، أي استثمار استطاعة الإشارة المتناثرة على مسارات مختلفة، هو الدافع الأساسي الذي قاد إلى تصميم وابتكار "المستقبل المتعدد المسالك" "RAKE Receiver".

يتكون هذا المستقبل من عدة دارات استقبال متماثلة، تُخصص كل منها لمعالجة الإشارة الواردة عبر مسار معين من المسارات التي تسلكها الإشارة إلى هوائي المستقبل. بتعبير آخر، تتولى كل دارة إنجاز خطوات معالجة الإشارة الخاصة بنسخةٍ من نسخ الإشارة أثناء عبورها من مدخل المستقبل إلى مخرجه، ومن هنا اخترنا لكل دارةٍ اسم "مَسْلَك"[٢].

يبين الشكل ٣-٢٧ بنية مبسطة للمستقبل متعدد المسالك، ومن الممكن فهم آلية عمله إذا استُعرضت الوظائف المنوطة بكل جزءٍ منه على حدة. هذا ما نوجزه في ما يلي، مفترضين أن تبادل المعلومات الخاص بمشتركٍ ما يجري تبعاً للخطوات التي بيناها في البحث ٢-٣ وباستخدام سلسلة نثر شبه عشوائية محددة ندل عليها بـ SC_1.

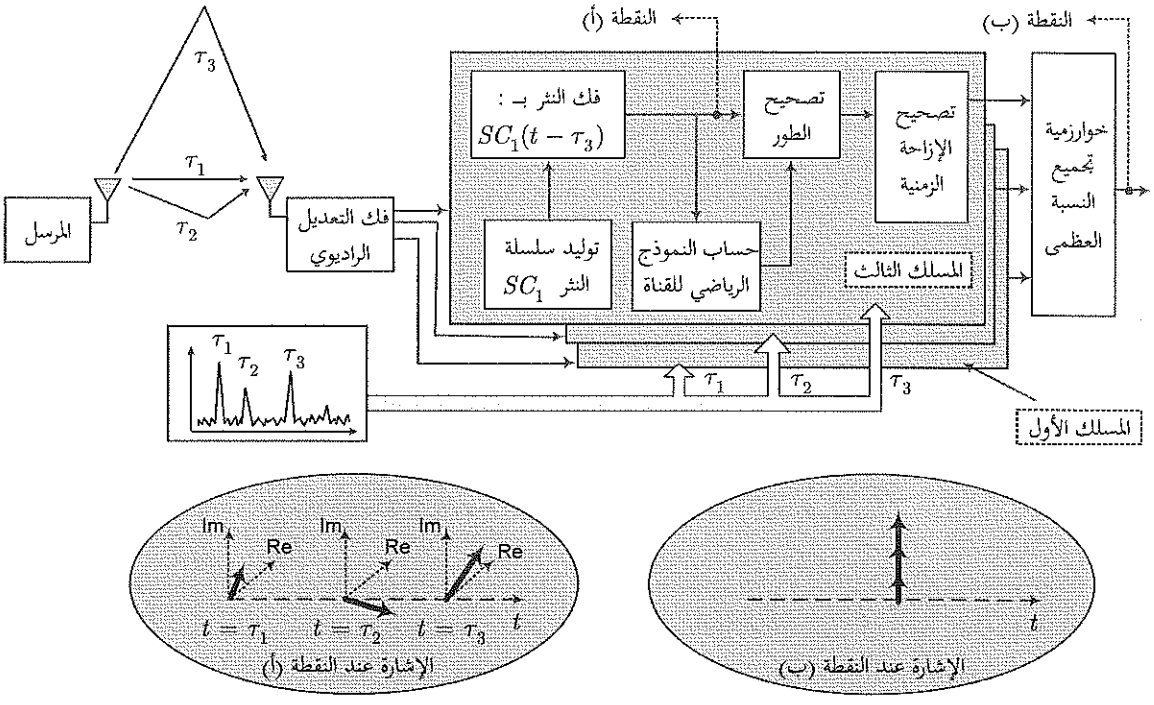
١) تصل الإشارة إلى الهوائي عبر عدة مسارات كما هو مبين في الشكل، وبعد إنجاز عملية فك التعديل الراديوي، أي نقل الإشارة إلى النطاق الترددي الأساسي، تُحدد المدة الزمنية اللازمة لوصول كل نسخة من نسخ الإشارة التي تحمل استطاعةً يمكن استثمارها. هذه المدد الزمنية، والتي نرمز لها بـ $(\tau_1,\cdots,\tau_n)$، يمكن اشتقاقها عن طريق حساب الترابط المتبادل بين الإشارة المستقبلة وسلسلة النثر SC_1، ومن ثم رصد اللحظات الزمنية التي توافق قيماً عظمى لنتيجة حساب الترابط، إذ تمثل كلٌ من هذه اللحظات زمنَ وصول إحدى نسخ الإشارة، أو التأخير الزمني الذي يفصل بين كل من النسخ عن النسخة الأولى وصولاً.

بعد عملية الاشتقاق، تُخَصَّصُ كلٌّ من قيم التأخير τ_i للاستخدام ضمن خطوات معالجة الإشارة في مسلكٍ محدد من مسالك المستقبل، أي دارات الاستقبال الفرعية.

---

[١] لا يسري ذلك على بعض النظم الحديثة، التي تعتمد الطيف المنثور لتوفير تبادل معطيات بسرعاتٍ كبيرة جداً (مثل نظم HSPA)، حيث تكون هناك حاجة ماسة لوجود دارة تسوية. تنشأ هذه الحاجة لأن عامل النثر في هذه النظم يَصْغُر كثيراً، مما يؤدي إلى تضاؤل الفرق بين طول الرمز وطول نبضة النثر.

[٢] جاء في مقاييس اللغة: مسلك: يدل على نفوذ شيء في شيء، يقال: سلكتُ الطريقَ أو أسلكه.



الشكل ٣-٢٧: بنية المستقبل المتعدد المسالك.

٢) تجري ضمن كل مسلك عملية فك النثر تبعاً للخطوات التي فصلناها في البحث ٢-٣-١، حيث تُضرب الإشارة المستقبلة بنسخة مزاحة من سلسلة النثر، ويكون مقدار الإزاحة موافقاً لقيمة التأخير الزمني المخصصة لهذا المسلك. لذا تكون السلسلة المستخدمة لفك النثر هي $SC_1(t-\tau_n)$.

تؤدي هذه الإزاحة إلى تحقيق تزامن بين إشارة سلسلة النثر ونسخة الإشارة المتأخرة بمقدار τ_n، والمتضَمَّنة في الإشارة الإجمالية أو الكلية. وهذا التزامن يؤدي بدوره إلى انتخاب هذه النسخة من الإشارة، وإلى تخميد كل النسخ الأخرى، وذلك بسبب خصائص الترابط الذاتي المميَّزة للسلاسل شبه العشوائية (انظر البحث ٢-٣).
يبين الجزء الأدنى من الشكل تمثيلاً شعاعياً للإشارة الناتجة عند النقطة (أ) في كل مسلك، ونلاحظ أن الإشارات الجزئية المستخلصة تكون متباينة في طورها ومطالها، كما تكون متفرقة زمنياً.

٣) لحساب تأثير القناة على كلٍ من المسارات المتعددة، وللتكيُّف مع التغيرات السريعة التي يتعرض لها مطال وطور الإشارة في كل مسار، توجد في كل مسلك من المسالك دارةُ تقييمٍ أو تقديرٍ لاستجابة القناة، وينفرد كل مسلك بدارة مستقلة لأن خصائص القناة تختلف من مسارٍ إلى آخر، تبعاً لتسلسل وطبيعة العوائق التي يمثلها هذا المسار. هذا ويعتمد حساب استجابة القناة على معلومات خاصة مرافقةً للإشارة، ترسلها المحطة الثابتة، وتسمى "إشارة الإرشاد أو الدليل" "Pilot Signal". تشابه هذه الاشارة من حيث وظيفتها واستخدامها سلسلة الاختبار التي أشرنا إليها في نظام GSM، إذ تتيح معرفةُ ما يطرأ عليها من تغيير تقديرَ مقدارِ الإزاحة الطورية والتخميد اللذين تتعرض لهما الإشارة أثناء انتشارها.

٤) استناداً إلى المعلومات المتوفرة من الخطوات السابقة يجري تصحيحٌ لطور الإشارة في كل مسلك، يتبعه تعديلٌ للإزاحة الزمنية، بحيث تتوفر إمكانية جمع القيم اللحظية للإشارة من كل المسالك على نحوٍ شعاعيٍّ ومتوافقٍ طورياً (انظر تمثيل الإشارة عند النقطة (ب) في الشكل).

٥) تجمع الإشارات التي يُحصل عليها من المسالك المختلفة باستخدام تقنية تجميع النسبة العظمى، ويجري ترجيح كل نسخة من نسخ الإشارة عن طريق ضربها بالمرافق العقدي لاستجابة القناة في المسلك الخاص بها، وبعد إجراء الترجيح، تُجمع النسخ المختلفة لتقود إلى الإشارة الإجمالية [٣].

تؤدي الخطوات السابقة إلى استثمار معظم الطاقة المتناثرة على المسارات المختلفة، وإلى قيمةٍ مثلى لنسبة الإشارة إلى الضجيج. لذا يمثل المستقبل متعدد المسالك البنية التقليدية لجهاز الاستقبال في أنظمة الطيف المنثور، ويُستخدم في كلٍّ من المحطة الثابتة والوحدة المتحركة على حدٍّ سواء، غير أنه أكثر تعقيداً في المحطة الثابتة، إذ يتألف عادةً من خمسة أو ستة مسالك، بينما يقتصر تكوينه في الوحدة المتحركة على ثلاثة مسالك. ننوه أخيراً إلى أن هذا المستقبل يعرف باسم "مستقبل RAKE"، وهو اللقب الذي أطلقه عليه مبتكراه. وتعني كلمة RAKE بالعربية المِدمَّة أو المشط الذي يستخدم لتسوية التربة أو لجمع أوراق الشجر المتناثرة على الأرض. ويعود اختيار هذا التعبير إلى جمع هذا المستقبل للطاقة وتركيزها في نقطة واحدة، ومشابهةِ هذه العملية لجمع الأوراق المتناثرة.

تترجم المراجع العربية تعبير RAKE حرفياً، فتسمي هذا المستقبل " المستقبل الشوكي" أو "المشطي"، كما تدل على كل مسلك بتعبير "إصبع"، غير أننا نرى أن الدلالة على هذا المستقبل يجب أن تكون إما باسمه، أي "مستقبل RAKE"، باعتباره اسم علم، أو بما يصفه وظيفياً، وهذا سبب اختيارنا لتعبير "المسلك" الذي يمثل الخطوات التي تسلكها الإشارة في كل دارة استقبالٍ فرعية.

٣-٤ مراجع مختارة

[١] S. Saunders, "Antennas and propagation for Wireless Communication Systems", John Wiley & Sons, 2007.

[٢] C. Haslett, "Essentials of Radio Wave Propagation", Cambridge University Press, 2008.

[٣] A. F. Molisch, Wireless Communications", John Wiley & Sons, 2011.

[٤] Th. S. Rappaport ,"Wireless Communications, Principles and Practice", Prentice Hall, 2002.

[٥] M. Pätzold, "Mobile Fading Channels", John Wiley & Sons, 2002.

[٦] B. Sklar, "Digital communications, Fundamentals and Applications", Printice-Hall, 1988.

[٧] J. D. Parsons, "The Mobile Radio Propagation Channel", John Wiley & Sons, 2000.

A. Goldsmith, "Wireless Communications", Cambridge University Press 2005. [٨]

D. Tse, P. Viswanath, "Fundamentals of Wireless Communication", Cambridge University Press 2005. [٩]

R. Steele et al, "GSM, cdmaOne and 3G Systems", John Wiley & Sons, 2001. [١٠]

K. Feher, "Wireless Digital Communications", Prentice Hall, 1995. [١١]

3GPP Technical Specifications 45.005, "Radio transmission and reception". [١٢]

COST 207: Digital land mobile radio communications. Commission of the European Communities, 1988. [١٣]

H. Asplund, K. Larsson, P. Okvist, "How Typical is the "Typical Urban" channel model?", IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 340 - 343, 2008. [١٤]

D. C. Montgomery and G. C. Runger, "Applied Statistics and Probability for Engineers", John Wiley & Sons, 2003 [١٥]

B. Sklar, "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part I: Characterization", IEEE Communications Magazine, vol. 35, no. 9, September 1997, pp. 136–146. [١٦]

B. Sklar, "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part II: Migration", IEEE Communications Magazine, vol. 35, no. 9, September 1997, pp. 148–155. [١٧]

3GPP Technicla Specifications 45.001, "Physical layer on the radio path; General description". [١٨]

3GPP Technicla Specifications 45.002, "Multiplexing and multiple access on the radio path". [١٩]

V. K. Garg,"Wireless Communications and Networking", Morgan Kaufmann Publishers, 2007. [٢٠]

G. Ungerboeck, "Adaptive maximum-likelihood receiver for carrier modulated data-transmission systems", IEEE Trans. Communications, vol. 22, no. 5, pp. 624-636, May 1974. [٢١]

G. D. Forney, "Maximum-likelihood sequence estimation of digital sequences in the presence of intersymbol interference," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 18, no. 2, pp. 363–378, May 1972. [٢٢]

٤

الرابط الراديوي من الناحية الوظيفية

ناقشنا في الفصل السابق الرابط الراديوي من حيث كونه قناةً فيزيائية، تتيح نقل الإشارات اللاسلكية وتضفي عليها تغيرات كثيرة، وكان من أهم مقاصد العرض بيان التحديات التي تواجه مصمِّمي نظم الاتصالات عند دراسة وتطوير السبل المثلى لنقل الإشارة بين طرفي الاتصال.

نتابع في هذا الفصل نقاشنا لهذا الرابط، غير أننا سنتناوله من ناحية بنيته والوظائف المنوطة به، ومن حيث كونه صلة الوصل الأساسية بين المستخدم والشبكة، و"مرآةً اعتباريةً" لجودة الخدمات وتنوعها. وتجنباً لأي لبسٍ، ننوه إلى أن تعبير "بنية" في سياق هذا الفصل يدل على كيفية شغل هذا الرابط بالمعلومات المتبادلة بين طرفي الاتصال، وعلى ماهية هذه المعلومات، وعلى التسلسل والترتيب الزمني لنقلها.

يتطلب توضيح بنية الرابط الراديوي عرضاً تفصيلياً لِبُنى رزم المعلومات المتبادلة عبره، ويتعذَّر ذلك إذا أردنا أن يكون العرض شاملاً لأصناف الشبكات الخلوية الشائعة. لذا، وتماشياً مع منهج الكتاب في كونه مدخلاً إلى المفاهيم الأساسية، نتناول في هذا الفصل تفاصيل الرابط الراديوي في نظام GSM، كونه الأوسع انتشاراً، ولأن المبادئ التي تستند إليها بنيته مشتركة في جوهرها بينه وبين النظم الأخرى. وقبل الشروع في عرض التفاصيل، نوضح في الفقرات التالية دلالات بعض التعابير الأساسية المستخدمة لوصف بنية الرابط الراديوي في أيٍّ من نظم الاتصالات اللاسلكية والخلوية، إذ أنَّ معرفة هذه الدلالات ضرورية جداً لفهم آلية تبادل المعلومات بين الشبكة والمشترك (أي بين المحطة الثابتة والوحدة المتحركة).

٤–١ تعريف بمصطلحي "القناة الفيزيائية" و"القناة الاعتبارية"

من المسلَّم به أن عمليات الاتصال ضمن شبكة تضم آلاف المشتركين لا تقتصر على تبادل المعلومات بين طرفي الاتصال فحسب، وإنما تتطلب أيضاً تواصلاً إضافياً ومتزامناً بين الشبكة وكلٍّ من المشتركين، يِنظِم توزيع الموارد الفيزيائية المتاحة لكل مشترك، كالقناة الترددية المستخدمة والحيز الزمني المخصص، ويتحكم ببداية ونهاية كل اتصال. زيادةً على ذلك، تتطلب حركة

المشتركين وتغيير أماكنهم أثناء إجراء اتصالاتهم تنسيقاً دقيقاً وشاملاً بين المحطات الثابتة الواقعة ضمن المنطقة التي يتحرك فيها المشترك، بحيث يختار النظام – في حال دعت الحاجة لذلك– المحطة الأنسب لإكمال الاتصال.

من جانبٍ آخر، يقتضي توفير اتصالٍ وخدماتٍ ذات جودة عالية تقييماً مستمراً لنوعية الإشارة ولمقدار التخميد الذي تتعرض له، ولبعد المشترك عن المحطة، إضافةً إلى مؤشراتٍ أخرى واصفةٍ لكفاءة تقديم الخدمة. ويجب أن يُنجزَ هذا التقييم على نحوٍ مستمرٍ طوال مدة الاتصال، حتى تتمكن الشبكة من تفعيل الآليات الضرورية لتحسين جودة الإشارة ومن ثم إتاحة أفضل نوعية اتصالٍ ممكنة.

يتبين مما سبق أن توفير خدمات الاتصال يتطلب تبادل الكثير من "معلومات التحكم" "Control Information" و"رسائل التشوير" "Signaling Messages" بين الشبكة والمشتركين على نحوٍ موازٍ للاتصال، ولا يمكن لهذا التبادل أن يكون إلا عن طريق الرابط الراديوي، فهو صلة الوصل الوحيدة المتاحة بين الشبكة والمشتركين. لذا، يجب أن يحمل هذا الرابطُ إلى جانب معلومات الاتصال الأساسية أو الفعلية مقداراً إضافياً من المعلومات الناظمة لآليات الاتصال، ما يزيد الحاجة إلى تنسيق تبادلِ المعلومات ورسائل التحكم على نحوٍ يستثمر موارد الرابط المتاحة –الترددات والأحياز الزمنية– على نحوٍ أمثل.

تمثل هذه الحاجة الحافز الأساسي لتعريف صنفين من القنوات هما "القنوات الفيزيائية" "Physical Channels" و"القنوات الاعتبارية" "Logical Channels"، ولتوضيح ماهية هذين الصنفين نعقد مقارنةً مع نموذجٍ مبسط جداً لإجراءات اتصالٍ ما، نستقيه من واقع الحياة العملية.

لنفترض أن موظفاً يجري اتصالاً هاتفياً مع مديره الذي تربطه به –إلى جانب العلاقة المهنية– صداقةٌ شخصية. ولنفترض أيضاً أن مجريات الاتصال تسير وفق التسلسل التالي:

يتبادل الاثنان بدايةً استفساراتٍ عن الصحة والعائلة والأمور الشخصية العامة، بعد ذلك، يتخلل الحديثَ طلبٌ من المدير متعلقٌ بالعمل مثل: «أرجو ترتيب اجتماع مع الزبون الفلاني»، يتلو ذلك سؤال الموظف: «أي يوم تقترح للاجتماع؟»، فيجيب المدير: «الخميس إذا أمكن».

ينتقل الاثنان بعد ذلك لمتابعة الحديث عن الأمور ذات الصبغة الخاصة، وبعد دقائق يوجه المدير طلباً آخر: «أرجو تحضير بعض النسخ عن العقد»، وبعد سؤال الموظف عن العدد المطلوب يجيب المدير: «أربع نسخ تفي بالغرض». يتبع ذلك حديثٌ شخصي مرةً أخرى، وفي نهاية المكالمة يوعز المدير للموظف قائلاً: «لا تتأخر غداً إذا سمحت»، فيجيب الموظف: «حاضر، ولكن بالمناسبة، أيَّ ساعةٍ وأية قاعة تقترح لاجتماع يوم الخميس؟»، يجيب المدير: «التاسعة صباحاً في قاعة الاجتماعات الثانية»، يردف الموظف قائلاً: «كما تشاء، مع السلامة»، ثم ينهي الطرفان المكالمة.

نلاحظ من مجريات الاتصال السابق ما يلي:

- تمثّل بعض أجزاء الاتصال، مثل «أرجو تحضير الاجتماع» أو «لا تتأخر»، أوامرَ أو رسائلَ تحكُّمٍ تتعلق بالعمل.
- تصدر هذه الأوامر متفرقة زمنياً وتتخلل الاتصال الشخصي، أي أنها تشغل أجزاءَ محددة من زمن المكالمة على نحوٍ متعاقب، لكن دون أن تكون هذه الأجزاء متتاليةً على نحوٍ مباشر.

- يحتاج أيُّ أمرٍ أو إيعازٍ مهني (أي رسائل التحكم بالمعنى العام) إلى محددات واضحة مثل: وقت الاجتماع، ومكانه، وقاعة الاجتماع، وعدد نسخ العقد. وهذه المحددات الضرورية لإكمال فحوى ومضمون الطلب أو الأمر يمكن أن تُتَبادل على نحوٍ مُحَزَّأ ومتباعدٍ زمنياً، ولا يؤدي ذلك إلى أي تأثيرٍ سلبي على تبادل المعلومات الشخصية.
- من الممكن –من الناحية المنطقية– فصل أجزاء المكالمة المتعلقة بالعمل عن تلك المتعلقة بالأمور الشخصية. فإذا اجتزأنا الكلمات المتعلقة بالأوامر ورتبناها نحصل على النص التالي: «أرجو ترتيب اجتماع مع الزبون، يوم الخميس إذا أمكن، التاسعة صباحاً، في قاعة الاجتماعات الثانية. وأرجو تحضير نسخ عن العقد عددها أربعة، وأرجو أن لا تتأخر». بذلك تكون المكالمة قد حوت موضوعين مختلفين هما: موضوع العمل والموضوع الشخصي، جرى طرحهما على نحوٍ متزامن، وتقاسما الوقت الذي شغله الاتصال. لذا يمكن القول بأن المكالمة شملت قناتي تواصلٍ في آنٍ واحد، تتعلق الأولى من ناحية موضوعها بالأمور الشخصية بينما خُصصت الأخرى لأمور رسمية تتعلق بالعمل، وهذا يكافئ قولنا أن المكالمة شملت قناتين "اعتباريتين"، تتباينان فيما بينهما من حيث الموضوع حصراً.
- تتشارك كلتا القناتين الاعتباريتين في استخدام الموارد الفيزيائية ذاتها، ونقصد بالموارد الفيزيائية هنا المُـدَدَ الزمنية المتاحة للاتصال إما على قناة ترددية معينة –في حال الاتصال باستخدام هاتف خلوي– أو على قناةٍ سلكية –في حالة الاتصال عن طريق الهاتف الثابت.

يتيح النموذج السابق لعملية الاتصال والسمات التي عرضناها تكوين تصوُّرٍ واضحٍ لمفهوم القناة الفيزيائية والقناة الاعتبارية، ولبيان دلالة النقاط التي شرحناها في حالة نظم الاتصالات الخلوية نذكِّر بدايةً ببنية الرابط الراديوي في نظام GSM، الذي يستخدم مزيجاً من تقنيتي النفاذ المتعدد باقتسام التردد (FDMA)، والنفاذ المتعدد باقتسام الزمن (TDMA) (انظر الفصل٢). يتجلى اقتسام التردد في كون كل قناة ترددية تشغل نطاقاً مقداره 200 kHz، ما يعني إتاحة عددٍ من القنوات الترددية في كلٍّ من جهتي الاتصال، يحدده عرض المجال المخصص للنظام (انظر الجدول ١-٢). أما اقتسام الزمن، فيتمثل في تخصيص حيز زمني لكل مشترك (Time Slot)، يشغل أثناءه القناة الترددية المستخدمة، يتلو أو يعقب هذا الحيز حيز مخصص لمشتركٍ آخر، وهكذا.

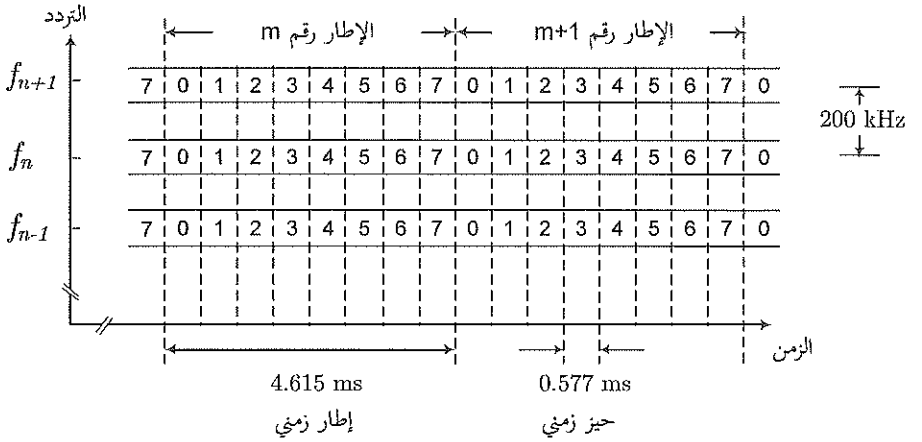
أشرنا أيضاً في الفصل ٢ إلى أن كل ثمانية أحياز زمنية تكوِّن إطاراً زمنياً يمثل وحدة التكرار الأساسية على المحور الزمني (TDMA-Frame)، ما يعني أن العدد الأعظم للمشتركين الذين يمكن أن يشغلوا القناة الترددية في آنٍ واحد هو ثمانية. سبق البيان أيضاً بأن مدة هذا الحيز الزمني هي 0.577 ms، وأن مدة الإطار الزمني هي 4.615 ms.

يوضح الشكل ٤-١ هذه التفاصيل، وهو يماثل من ناحية المضمون الشكل ٢-٧، إلا أنه يعرض تطبيقه ضمن نظام GSM على وجه الخصوص.

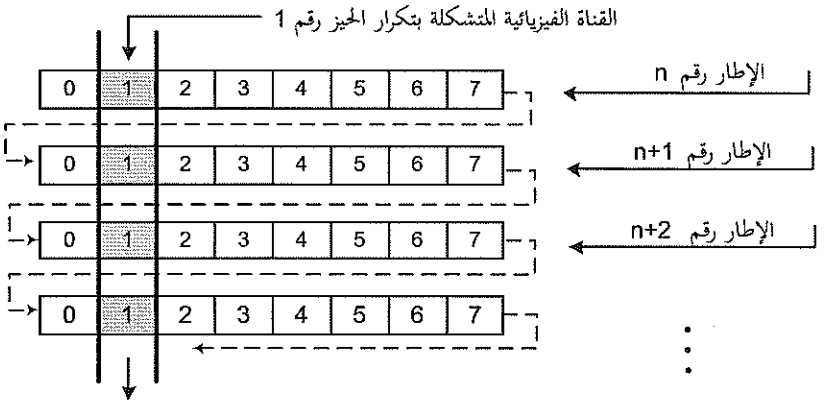
نخلص مما سبق إلى أن الحيز الزمني هو أصغر وحدةٍ فيزيائية يمكن للمشترك أن يشغلها، بينما تتكون القناة الفيزيائية (أي الوسط الحامل للمعلومات) من تكرار هذا الحيز بدورٍ يوافق مدة الإطار الزمني.

يوضح الشكل ٤-٢ هذا المفهوم –أي الفرق بين الحيز والقناة– ونقرأ منه تكوُّنَ القناة الفيزيائية نتيجةَ تتابعِ الحيز المخصص

لإجراء اتصال المشترك، والذي نفترض أنه الحيز رقم "1". يبين الشكل أيضاً أن القناة الفيزيائية تُشغل من قبل المشترك على نحوٍ عابر، فإذا انتهت مكالمته شُغِلت من قِبَل مشتركٍ آخر، وهكذا. يتضح مما ذكرناه كذلك أن بنية الإطار الزمني في نظام GSM تتيح تعريف ثماني قنوات فيزيائية على كل قناة ترددية.



الشكل ٤-١: تعدد النفاذ في نظام GSM.



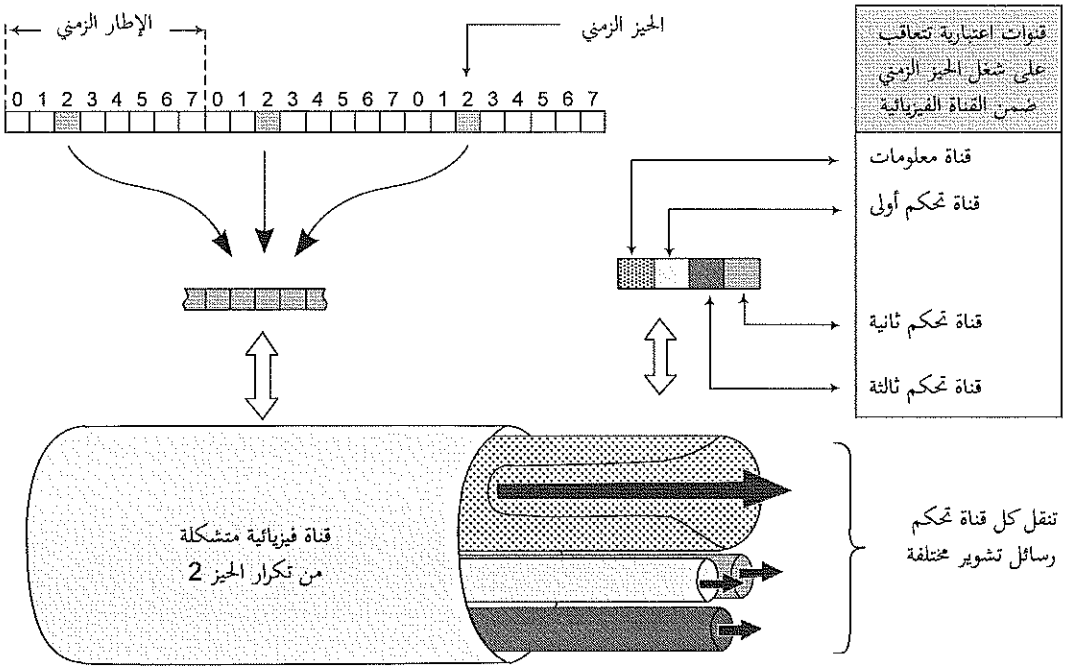
الشكل ٤-٢: تكوُّن القناة الفيزيائية نتيجة تكرار الحيز الزمني.

أشرنا في سياق عرضنا لنموذج الاتصال بين الموظف والمدير إلى أن موضوع الكلام المتبادل يحدد ماهية القناة، وأن تباين المواضيع ضمن المكالمة الواحدة يؤدي إلى تعريف أكثر من قناة اعتبارية. نعبِّر عن ذلك بقولنا أن القناة الفيزيائية هي "الحامل" أو "الناقل" للمعلومات، وأن القناة الاعتبارية هي "فحوى أو سمة" هذه المعلومات. كذلك هي الحال بالنسبة لنظم الاتصالات، إذ تتباين المعلومات التي تُنقل أثناء كل حيز زمني من حيث فحواها والغرض منها، فمن الممكن أن تكون هذه المعلومات جزءاً من الكلام أو الحديث المتبادل بين طرفي الاتصال، أو جزءاً من إيعازاتِ تحكُّمٍ تصدرها الشبكة للوحدة المتحركة، أو نتائجَ قياسٍ

ترسلها الوحدة المتحركة إلى الشبكة، أو معلومات خاصة بتنسيق سير الاتصال عندما ينتقل المشترك من خلية إلى أخرى، أو غير ذلك مما يجري تبادله بين طرفي الاتصال.تتناوب كل هذه المعلومات على شغل الحيز الزمني نفسه، ومن ثم فهي تستخدم القناة الفيزيائية ذاتها. فإذا مَيَّزنا بين معطيات المشتركين أو الحديث المتبادل من جهة، وبين المعلومات الخاصة بتنسيق الاتصال والتحكم بنوعيته من جهة أخرى، أمكن تعريف صنفين أساسيين من القنوات الاعتبارية هما: "قنوات نقل المعلومات والمعطيات" "Traffic Channels" و"قنوات التحكم" "Control Channels".

يبين الشكل ٤-٣ هذا المفهوم، حيث نقرأ منه كيفية شغل القناة الفيزيائية الواحدة، المتمثلةفي تكرار الحيز الزمني رقم 2، بأكثر من قناة اعتبارية في الوقت نفسه.

يتميز كل نظام اتصالاتٍ بالعديد من قنوات المعلومات المخصصة لنقل المعطيات والبيانات أو معلومات الاتصال الهاتفي، وبقنوات تحكم أيضاً، تتباين من ناحية البنية والمهام الوظيفية المنوطة بها.

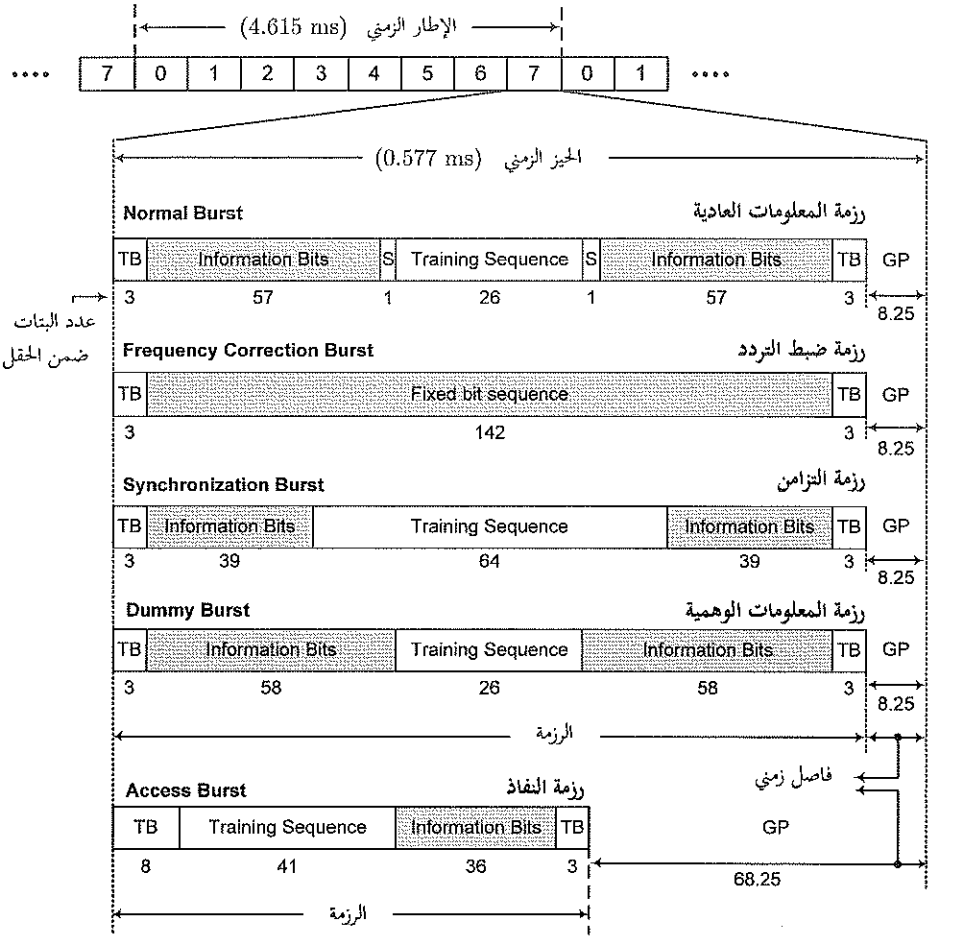


الشكل ٤-٣: العلاقة بين القناة الفيزيائية والقنوات الاعتبارية.

٤-٢ الحيز الزمني ورزمة المعلومات

بعد بيان الفرق بين القناة الفيزيائية والقناة الإعتبارية، ننتقل إلى المفهوم الأساسي الثاني، وهو الفرق الجوهري بين "الحيز الزمني" "Time Slot" و"رزمة المعلومات الراديوية" "Burst"، إذ يمثل الحيز الزمني "وحدةً زمنيةً" هي المدة المخصصة للمشترك ضمن

نسق وتركيب الإطار الزمني المعرف على القناة الترددية (TDMA-Frame)، أما رزمة المعلومات الراديوية فهي مجموعة البتات التي تُنقل عبر الرابط الراديوي ضمن مدة الحيز الزمني. لتوضيح ذلك، يعرض الشكل ٤-٤ أنواع الرزم المعرَّفة في نظام GSM، ونقرأ منه مايلي:



الشكل ٤-٤: أنواع الرزم المستخدمة في نظام GSM.

- تشغل بتات الرزمة جزءاً محدوداً من الحيز الزمني و ليس الحيز كله، ويهدف ذلك إلى إتاحة "فاصل زمني عازل" "Guard Period (GP)" بين كلّ رزمتين متتاليتين حتى لا يحصل أي تداخل بينهما. لذلك تكون مدة الحيز الزمني مساوية للمدة التي تشغلها الرزمة، والتي تكافئ عدد البتات مضروباً بطول البت الواحد، مزيداً عليها مدة هذا الفاصل الزمني.

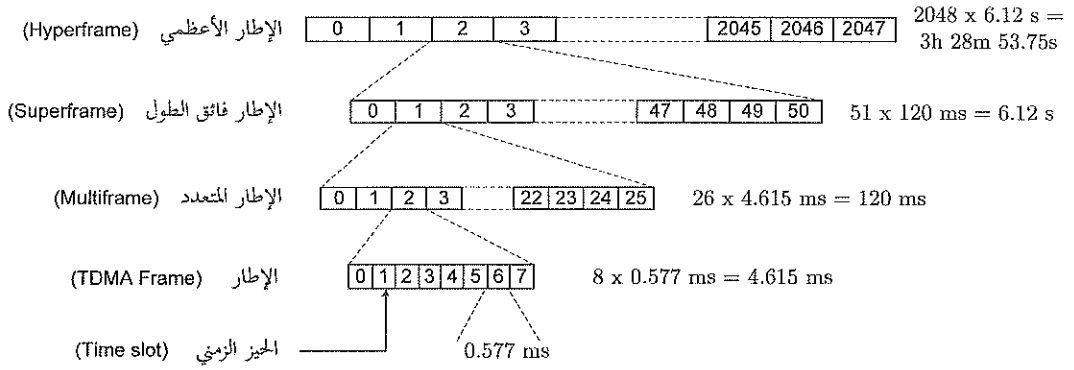
- هناك خمس رزم مختلفة في نظام GSM تتباين من حيث بنيتها وعدد الحقول التي تتألف منها، وعدد البتات التي تحويها. واختلاف هذه الرزم من ناحية المدة المكافئة لكل منها يؤدي إلى اختلاف مدة الفاصل الزمني العازل، ذلك أن مدة الحيز الزمني هي الثابتة لكل الرزم.
- يخدم التباين في بنى رزم المعلومات اختلاف الأغراض الوظيفية المنوطة بالقنوات الاعتبارية التي تستخدمها لتبادل المعلومات الخاصة بكل منها، ويمكن تشبيه هذه الرزم –عند العودة إلى مثال الحديث بين الموظف والمدير– بالمفردات المتعارف عليها لصياغة الأوامر والتعليمات مثل «لا تتأخر» أو «أحضر نسخ العقد». إذ أن مجموع هذه المفردات واستخدامها ضمن نسقٍ وترتيبٍ متعارف عليهما هو الذي يضمن أو يُتيح إمكانية التحكم بفحوى ومضمون المكالمة على النحو المرجوّ أو المطلوب.

هذا ويقتصر الغرض من عرض الرزم في هذا الموضع على توضيح تباينها وبيان الفرق بين الحيز والرزمة، وسنتطرق لاحقاً إلى تفاصيل بنية كلٍّ من هذه الرزم والمهام الوظيفية التي صُمِّمت لأدائها وإنجازها.

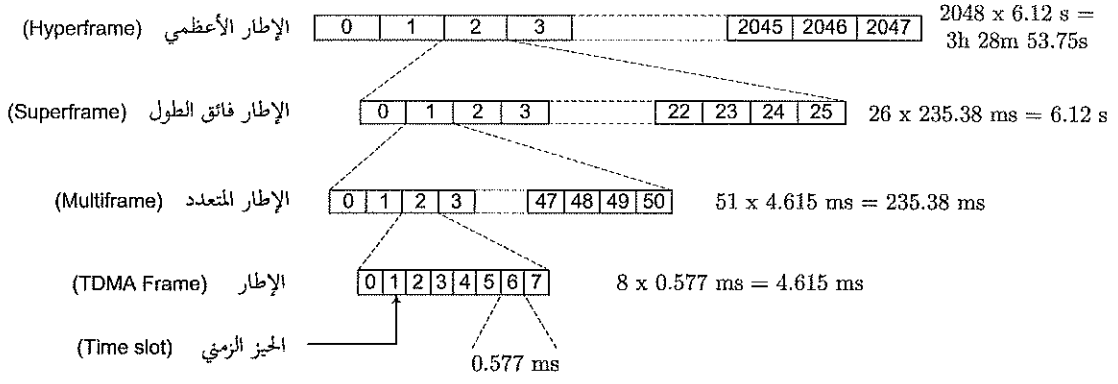
٤–٣ بنية الرابط الراديوي من الناحية الزمنية

يتكرر الإطار الزمني المعرف في الشكل ٤-١، والمؤلف من ثمانية أحياز، على نحوٍ مستمر ضمن تسلسلٍ أو تراتبٍ هرميٍّ محدد، تتلخص خصائصه في ما يلي:

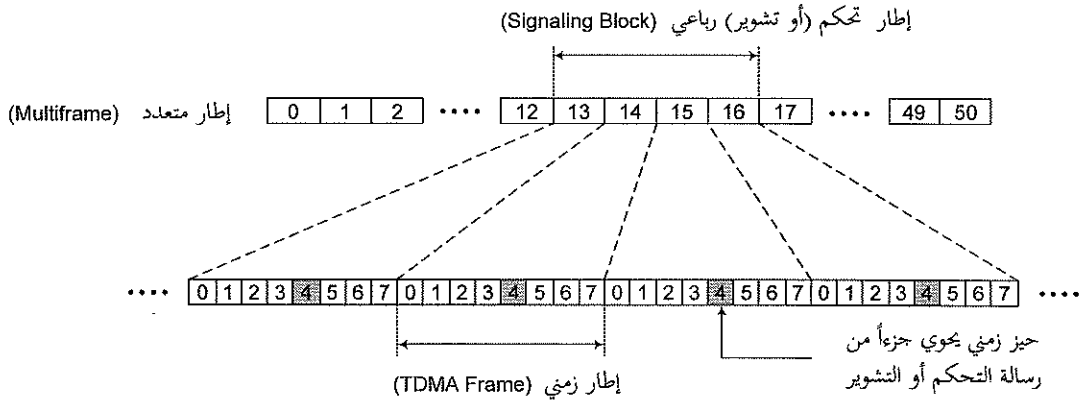
- يختلف التراتب في بنيته تبعاً لطبيعة القناة الاعتبارية. ففي حالة قنوات المعلومات يشكل 26 إطاراً متتابعاً ما يُعرف بـ "الإطار المتعدد" "Multiframe"، والذي يكافئ مدة زمنية مقدارها 120 ms، كما يؤدي تتابع 51 إطاراً متعدداً إلى تكوين ما يُعرف بـ" الإطار فائق الطول" "Superframe"، الذي يشغل مدة زمنية مقدارها 6.12 ms. أما أطول وحدة زمنية يعرفها نظام GSM فهي التي يشغلها ما يعرف بـ "الإطار الأعظمي" "Hyperframe"، الذي ينشأ عن تتابع 2048 إطاراً فائق الطول، ويشغل بذلك مدةً تقارب ثلاث ساعات ونصف (انظر الشكل ٤-٥).
- ينطبق التراتب الهرمي –من ناحية المبدأ– على قنوات التحكم أيضاً، مع اختلافٍ وحيد، حيث يتألف الإطار المتعدد من 51 إطاراً بدلاً من 26 في حالة قنوات المعلومات. بدوره يشمل الإطار فائق الطول 26 إطاراً متعددا بدلاً من 51 إطاراً في حالة قناة المعلومات (انظر الشكل ٤-٦). هذا وسنتناول هذه البنية لاحقاً بشرحٍ مفصل، غير أننا ننوه في هذا السياق إلى أهم نتائجها ألا وهو إتاحة نقل المعلومات بمعدل تدفق مختلف بين المعلومات الفعلية ومعلومات التحكم.
- يتبين من مقارنة الشكل ٤-٥ والشكل ٤-٦ أن الإطار فائق الطول والإطار الأعظمي متساويان في مدتهما في كلا الشكلين، ما يعني أن رقم الإطار فائق الطول مشتركٌ بين الحالتين.
- يتطلب اكتمال بعض رسائل التشوير تتابع أربعة أطرٍ متالية ضمن الإطار المتعدد Multiframe، لذا يطلق على أربعة أطر متتالية اسم "إطار تحكم أو تشوير رباعي" أو اختصاراً "إطار رباعي" "Signaling Block" (انظر الشكل ٤-٧).



الشكل ٤-٥: البنية الهرمية للأطر الزمنية في نظام GSM، والخاصة بنقل المعلومات.



الشكل ٤-٦: البنية الهرمية للأطر الزمنية في نظام GSM، والخاصة بنقل رسائل التحكم.



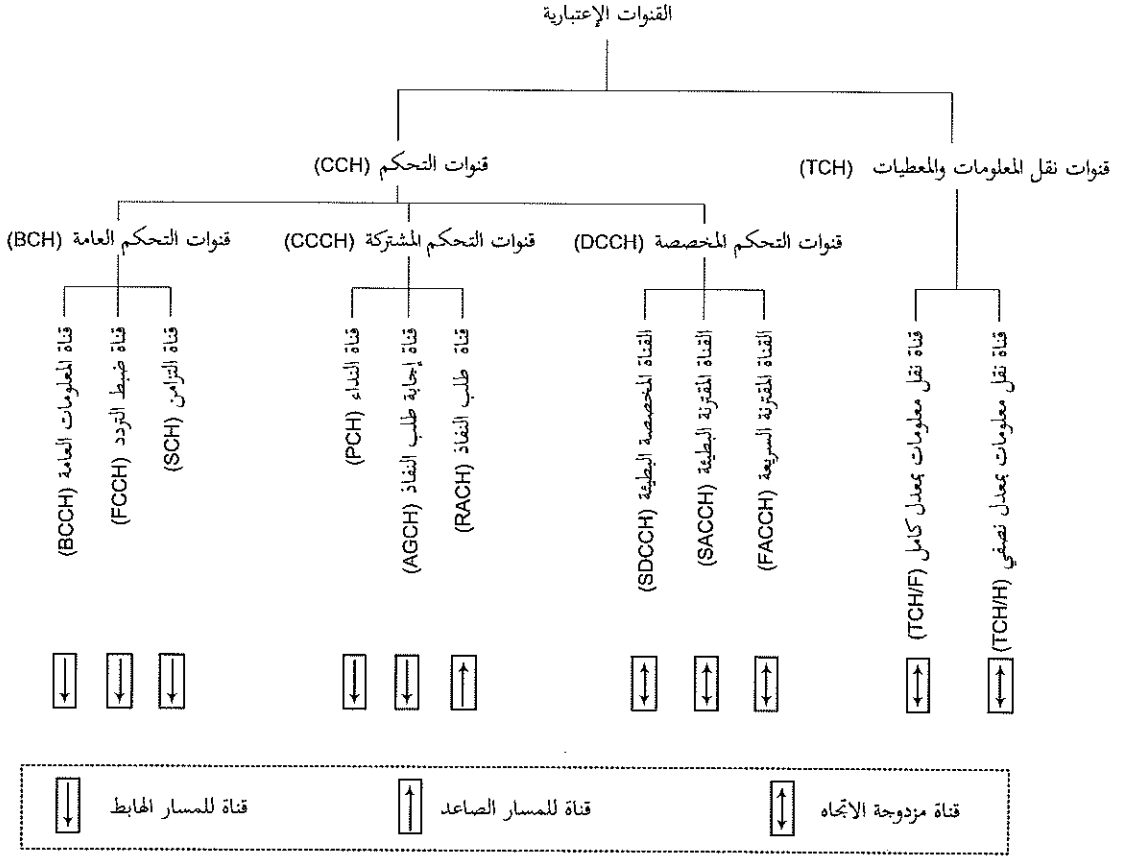
الشكل ٤-٧: تعريف إطار التحكم أو التشوير الرباعي (Signaling Block).

- يتميز كل إطارٍ مفردٍ -أي المتكون من 8 أحياز زمنية- برقمٍ متسلسلٍ يتراوح بين "0" ورقمِ آخرِ إطارٍ ضمن الإطار الأعظمي، هذا الرقم يرمز له بـ FN_{max}، ويساوي حاصل جداء الأرقام التي ذكرناها ضمن الترتيب الهرمي، أي $FN_{max} = 51 \times 25 \times 2048 = 2,715,648$.

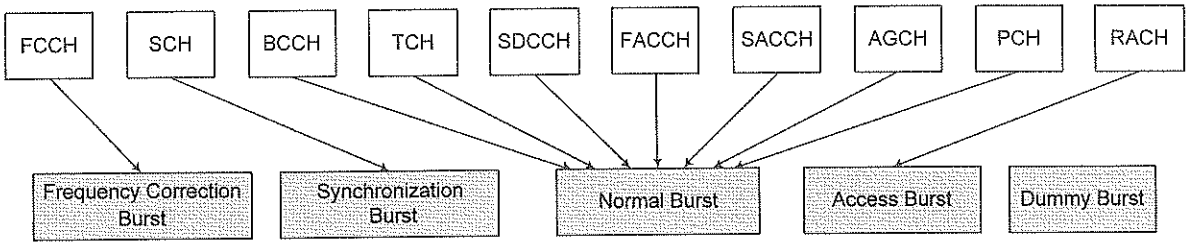
٤-٤ تصنيف القنوات الاعتبارية في نظام GSM

ينطلق التصنيف الأساسي للقنوات الاعتبارية في نظام GSM من التمييز بين قنوات المعلومات وقنوات التحكم، ويشمل كلٌ من هذين الصنفين قنواتٍ مختلفة، ما يؤدي إلى التنوع الذي يلخصه الشكل ٤-٨.

نذكر في ما يلي نبذة عن كل من هذه القنوات من ناحية وظائفها والرزمة المستخدمة لنقلها (الشكل ٤-٩)، وسنختار لكل منها الاسم الذي نعتقد أنه الأنسب للدلالة عليها، كما سنذكر أيضاً التعبير المقابل بالإنكليزية مع الاسم المختصر المتعارف عليه -بين قوسين مزدوجين- وهو الذي سنعتمده كاختصارٍ لاسم القناة في بقية النص.



الشكل ٤-٨: تصنيف القنوات الإعتبارية في نظام GSM.



الشكل ٤-٩: أصناف الرزم التي تستخدمها كلٌّ من القنوات الاعتبارية في نظام GSM.

٤-٤-١ قنوات نقل المعلومات والمعطيات

تستخدم "قنوات نقل المعلومات والمعطيات" "Traffic Channels (TCH)" لنقل المعلومات الرقمية الأساسية بين طرفي الإتصال. وقد تُمثِّل المعلومات التي تحملها أو تنقلها هذه القنوات "إشارة كلامية" "Speech Traffic" ضمن اتصال هاتفي، أو "معطيات رقمية" "Data" يرسلها أحد طرفي الاتصال. تُصنَّف هذه القنوات إلى نوعين أساسيين:

٤-٤-١-١ "قناة نقل المعلومات والمعطيات بمعدل كامل" "Full-rate Traffic Channel (TCH/F)"

تنقل هذه القناة المعلومات الرقمية بمعدل إجمالي مقداره 22.8 kbps، يشمل فائضاً يُضاف إلى المعلومات الأساسية أثناء إجراء "ترميز القناة" "Channel Coding" الذي يتيح للمستقبل كشف الأخطاء الناجمة عن الإرسال وتصحيحها (سنناقش ترميز القناة في الفصل ٥). وإذا استثنينا الفائض الخاص بترميز القناة، فإن هذه القناة تتيح نقلاً للإشارة الكلامية بمعدلٍ صافٍ مقداره 13 kbps، أو نقلاً للمعطيات بمعدلات تتراوح بين 2.4 kbps و14.4 kbps[١]. هذا وننوه إلى أن تبادل المعطيات المقصود في هذا السياق يعتمد تقنية تبديل الدارات.

يُشار إلى هذه القناة اصطلاحاً بتعبير "Full-rate Traffic Channel" واختصاراً بـ "TCH/F".

٤-٤-١-٢ "قناة نقل المعلومات والمعطيات بمعدلٍ نصفي" "Half-rate Traffic Channel (TCH/H)"

عند الحاجة إلى زيادة سعة الشبكة من ناحية عدد المشتركين الممكن استيعابهم، تُستخدم تقنيةٌ خاصة لترميز الكلام أو المعطيات، تسمح بنقل المعلومات بمعدلٍ مقداره 6.5 kbps عوضاً عن13 kbps. يتحقق هذا النقل ذو المعدل المنخفض عن طريق تخصيص حيز زمني للمشترك من كل إطارين متتابعين بدلاً من كل إطار، ما يتيح تناوبَ مشتركَيْن اثنين على شَغْل حيز زمني واحد. فعلى سبيل المثال، يمكن للمشترك (أ) وللمشترك (ب) أن يشغلا الحيز الزمني رقم 5، فيشغل المشترك (أ) هذا الحيز

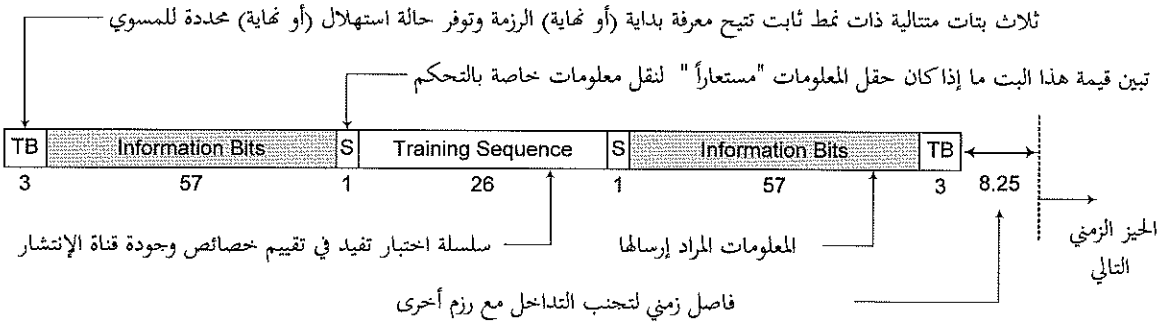
[١] توافق القيم المذكورة المعدلات الأساسية، وقد أدخلت مع الوقت تحسينات على النظام أثمرت تنوعاً أكثر لمعدلات الإرسال (انظر [١٤]).

في الإطار رقم n، ثم يشغله المشترك (ب) في الإطار التالي ذي الرقم $n+1$. بعد ذلك يعود المشترك (أ) إلى شغل هذا الحيز (أي رقم 5) في الإطار رقم $n+2$، وهكذا. بتعبيرٍ آخر، تنقُل القناة الفيزيائية الممثلة بتكرار الحيز رقم 5 قناتي محادثة، تخص كل منها مشتركاً مختلفاً.

يؤدي شغل الحيز الزمني على النحو الذي شرحناه إلى نقلٍ للمعلومات بمعدل إجمالي مقداره 11.4 kbps، ويكافئ ذلك معدل نقلٍ صاف للإشارة الكلامية مقداره 6.5 kbps، كما يتيح نقلاً للمعطيات بسرعاتٍ تتراوح بين 2.4 kbps و 9.6 kbps.

تَستخدم قنوات نقل المعلومات رزمة المعلومات المسماة اصطلاحاً بـ "الرزمة العادية" "Normal Burst"،التي تتألف من الحقول التالية (انظر الشكل ٤-١٠):

- حقلان مخصصان لحمل المعلومات الفعلية المتبادلة بين الشبكة والوحدة المتحركة، سواءً كانت هذه المعلومات تمثل كلاماً أو معطيات. يتألف كلٌ من هذين الحقلين من 57 بتاً متتالياً، أي أن عدد بتات المعلومات التي تحملها هذه الرزمة هو 114 بتاً. يتضمن هذا العدد فائض المعلومات الذي يضاف أثناء عملية ترميز القناة لتوفير حصانةٍ من التشويه الذي يطرأ على المعلومات أثناء انتشار الإشارة، وهذا يعني أن عدد البتات الممثِّلة للمعلومات الصرفة ضمن كلٌ من الحقلين أقل من ذلك (انظر الفصل ٥). يشار إلى كلٌ من هذين الحقلين بالإنكليزية باسم "Information Field" أو "Data Field".



الشكل ٤-١٠: بنية الرزمة العادية المستخدمة لنقل المعلومات.

- حقلان يتألف كل منهما من بت واحد يستخدم كعلامةٍ أو مؤشرٍ إلى أن الرزمة تنقل معلوماتِ تحكُّمٍ عوضاً عن معلومات فعلية، وذلك على نحوٍ استثنائي. لذا يُطلق على كلٌ من هذين البتين مصطلح "مؤشر استعارة" للدلالة على استعارة سعة الرزمة لأغراضٍ تتعلق بالتحكم. ننوه هنا إلى أننا اخترنا تعبير "علامة الاستعارة" كمقابلٍ للمصطلح الإنكليزي الخاص بهذين البتين وهو "Stealing Flag".

- يتوسط حقلي المعلومات حقلٌ يتضمن 26 بتاً تؤلف ما يُعرف بـ "سلسلة الاختبار" "Training Sequence". تعطي المواصفات المعيارية لهذه السلسلة ثماني بُنىً مختلفة ومحددة بدقة [١] و [١٤]، ما يعني أن لها صيغة أساسية أو مرجعية معروفة للمستقبل في كل من طرفي الاتصال على نحو مسبق. تُستخدم هذه السلسلة من أجل حساب نموذجٍ رياضيٍ

للقناة، حيث يمكن للطرف المستقبل أن يقارن بين النسخة المستقبَلة من السلسلة مع تلك المحفوظة في ذاكرة المستقبل (النسخة المرجعية)، وبناءً على نتيجة المقارنة، يستطيع المستقبل تقدير مقدار وطبيعة التشويه الذي يطرأ على الإشارة بسبب تأثير القناة (انظر البحث ٣-٣-٣). تفيد عملية المقارنة أيضاً في تقدير نسبة خطأ البت (BER) الناجمة عن تأثير القناة.

تتألف سلسلة الاختبار من حقل مركزي طوله 16 بتاً، يمتد باتجاه كلٍّ من الطرفين بمقدار 5 بتات إضافية، تشكل نسخة عن البتات الخمسة من الطرف الآخر للحقل المركزي (يبين الجدول ٤-١ هذه السلاسل مع توضيحٍ لبنية السلسلة ذات الرقم 0). تتيح هذه البتات الطرفية هامشاً للخطأ في حساب النموذج الرياضي للقناة، قبل أن تبدأ سلسلة المعلومات الفعلية. يتميز تابع الارتباط الذاتي للسلسلة المركزية -تبعاً لبنيتها- بذروةٍ مقدارها 16، محاطةٍ بخمسة أصفارٍ من كل جهة. هذا وتنفرد كلٌّ من هذه السلاسل برمزٍ يعرف بـ "Training Sequence Code (TSC)"، يميزها عن غيرها.

تستخدم سلسلة الاختبار أيضاً من أجل تحقيق التزامن بين المرسل والمستقبل، أما الغرض من وجودها في وسط الرزمة، فهو أن يكون تأثير التشوه الذي يصيب حقل المعلومات متشابهاً في أجزاء الحقل كله. فلو كانت سلسلة الاختبار في طرف الرزمة، فإن الحقل الحامل للمعلومات على نحوٍ متصل سيكون أطول، ومن ثم تزداد إمكانية أو احتمال تعرض أجزاء من المعلومات لمقدار أكبر -أو أصغر- من التشوه مقارنة بغيرها.

من المهم أيضاً التنويه إلى أنه رغم إمكانية تعريف آلافٍ من سلاسل الاختبار المحتملة، فإن المواصفات المعيارية اقتصرت على تعريف السلاسل في الجدول ٤-١، والتي تتميز بعوامل ترابط متبادلة ضعيفة، بحيث يسهل تمييزها عن بعضها البعض. تَستخدم كلُّ محطة عادةً سلسلةً معينة، تُعرَّفُ عند إعداد المحطة لمباشرة البث وتقديم الخدمات ضمن الشبكة الحية، ويحرص مهندسو الشبكة على أن تَستخدم كلٌّ من المحطات المتجاورة ضمن رقعة جغرافية محددة سلسلةَ اختبارٍ مختلفة. وكما سنشرح لاحقاً، تُعلِم كل محطة جميع الوحدات المتحركة التي تتواصل معها برمز السلسلة المخصصة لها، وذلك لاستخدام السلسلة ذاتها في المسار الصاعد أيضاً، وحتى يسهلَ للوحدات المتحركة تمييز الرزم المرغوبة (أي الصادرة عن المحطة المغذية) عن تلك التي قد تستقبلها من محطاتٍ أخرى قريبة تستخدم القناة الترددية ذاتها.

- تتضمن الرزمة أيضاً حقلين طرفيين يمثلان نمط بدايةٍ و نهايةٍ للرزمة. يتألف كلٌّ من هذين الحقلين من ثلاثة بتات متتابعة ذات قيمة ثابتة (0)، وتعرف باسم "بتات الاستهلال أو التذييل" "Tail Bits". يُستخدم هذان الحقلان لشَغْلِ ذاكرة المسوي بنمطٍ ابتدائي أو استهلالي معين عند بداية الرزمة، والعودة إلى هذا النمط المحدد عند نهاية الرزمة [٣].
- تكوِّن الحقول التي ذكرناها فحوى أو متن رزمة المعلومات المؤلف من 148 بتاً، وإذا أخذنا بالحسبان أن مدة كل بت تعادل 3.69 µs، نجد أن المدة المكافئة زمنياً لمجموع هذه الحقول هو 546.12 µs، وهذه المدة أصغر من طول الحيز الزمني بفارق مقداره 30.44 µs، أي ما يكافئ طول ثمانية بتات وربع (8.25). يمثل هذا الفاصل الزمني مدة عزل لحماية المعلومات الخاصة بحيزين متتالين من التداخل الذي يمكن أن ينشأ بسبب الوقت الزمني الذي تحتاجه الرزمة للوصول إلى المستقبل عبر مسارات متعددة. فإذا كان طرفا الاتصال بعيدين عن بعضهما البعض، قد تصل الرزمة إلى المستقبل ضمن

الوقت المخصص للحيز الزمني التالي، مما يؤدي إلى تداخل في المعلومات. نلفت النظر في هذا السياق إلى أن مدة العزل هذه ضرورية رغم استخدام تقنية تقديم الإرسال في نظام GSM (انظر الفصل ٢) ، فتقنية تقديم الإرسال تتيح تحقيق تزامن بين بداية المعلومات المرسلة وبداية الحيز الزمني في المستقبل بما يتعلق بمستخدمٍ واحد، أما الفاصل الزمني، فتندرج مهامه أو وظيفته ضمن إطار التنسيق بين أكثر من مشتركٍ يشغلون أحيازاً زمنية متتالية على نفس الحامل الترددي في مستقبِل المحطة الثابتة، حيث يضمن هذا الفاصل عدم تداخل المعلومات الخاصة بمشتركَيْن مختلفين، خصوصاً إذا كانا متباينين كثيراً في بعدهما عن المحطة.

إضافةً إلى ما سبق، تتيح مدة العزل فاصلاً زمنياً يمكّن دارات الإرسال من رفع مستوى الطاقة تدريجياً حتى تصل إلى المستوى المطلوب للإرسال عند بداية حقل المعلومات الأول، أو خفضها على نحو تدريجي أيضاً عند نهاية الرزمة، فبدون هذا الفاصل ستُرسل المعلومات أو البتات في بداية أو نهاية الرزمة بمستوى طاقةٍ ضئيل جداً ومتغير، وهذا يزيد من معدل خطأ البت.

رمزها أو رقمها (TSC)	سلسلة الإختبار
0	00100 10111 00001 00100 10111 (16 Bits)
1	00101101110111100010110111
2	01000011101101000100011110
3	01000111101101000100011110
4	00011010111001000001101011
5	01001110101100000100111010
6	10100111110110001010011111
7	11101111000100101110111100

الجدول ٤-١: سلاسل الإختبار المعرّفة في نظام GSM [١٤].

٤-٤-٢ قنوات التحكم

يعتمد نظام GSM على العديد من "قنوات التحكم" "Control Channels (CCH)" لإنجاز مهام تنسيق مختلفة ومتشعبة، منها ما هو خاص بالتحكم بأطوار الاتصال المختلفة، ومنها ما يتعلق بتحقيق التزامن بين الشبكة والوحدات المتحركة، أو بتنسيق التشارك في موارد الشبكة، أو الإيعاز بضرورة مباشرة ما يلزم من إجراءات تضمن إتاحة نوعيةِ اتصالٍ مُثلى.

نخصص الفقرات التالية لتسليط الضوء على أبرز ما يميز كلاً من هذه القنوات من ناحية دورها ضمن السياق العام للتحكم بموارد الشبكة، غير أننا نلفت عناية القارئ إلى أن مهام وخصائص وبنية هذه القنوات تشغل عدة مئاتٍ من الصفحات في مواضع مختلفة ضمن المواصفات المعيارية، لذا تهدف الفقرات التالية إلى التركيز على أبرز العناوين وعلى تكوين قاعدة معرفية أساسية، يحتاجها مهندس الاتصالات لفهم المبادئ الأساسية الناظمة لإجراءات الاتصال. وتفادياً لأي لَبْسٍ ننوه –قبل عرض التفاصيل– إلى أننا سنستخدم التعابير التالية للدلالة على "الأطوار الأساسية لأي اتصال" "Call Phases":

- "إنشاء الاتصال" "Call Establishment": يشير هذا التعبير إلى الخطوات التي تشمل التحضير لمرحلة التبادل الفعلي للمعلومات بين طرفي الاتصال، أي إلى كل الخطوات التي تسبق حجز قناة فيزيائية خاصة للمشترك تتيح إجراء اتصاله.
- "إجراء الاتصال" "Information Exchange": تدل كلمة "إجراء" هنا على طور تبادل المعلومات الفعلية، أي المدة التي تبدأ بشغلِ قناة TCH لقناةٍ فيزيائية وتنتهي عند إنهاء الاتصال (المكالمة) من قِبَل أحد الطرفين.
- "تحرير الاتصال" "Call Release": نعني بذلك كل ما يلي طور إجراء الإتصال من تحريرٍ للموارد الفيزيائية التي كانت محجوزة أو مشغولة أثناء إجراء الاتصال، وتهيئتها لاستخدامٍ آخر.

تصنَّف قنوات التحكم من حيث خصائصها الوظيفية العامة إلى ثلاثة أقسام، يندرج تحت كلٍّ منها عدة قنوات متباينة في مهامها (انظر الشكل ٤-٨)، وهذا ما سنبينه في ما يلي.

٤-٤-٢-١ "قنوات التحكم العامة" "Broadcast Channels (BCH)"

تحمل هذه القنوات معلوماتٍ أو أوامرَ تحكم باتجاه المسار الهابط فقط، أي من طرف النظام أو الشبكة –ممثلة بالمحطة الثابتة– إلى كل الوحدات المتحركة الموجودة ضمن منطقة تغذيتها، ويشمل هذا الصنف القنوات التالية:

١) "قناة التحكم الحاملة للمعلومات العامة" "Broadcast Control Channel (BCCH)"

تحمل هذه القناة، التي نشير إليها اختصاراً بـ "قناة المعلومات العامة"، أهم المعلومات المتعلقة بالشبكة وبالمحطة الثابتة التي تبثها، يتضمن ذلك هوية البلد الذي تقع الشبكة فيه، وهوية الشبكة ضمن هذا البلد، وعدد وأرقام القنوات الترددية المتاحة ضمن الخلية المعنية. إضافة إلى ذلك، تبث المحطة عبر هذه القناة معلومات تفصيلية عن الشبكة، وهذه المعلومات يجب أن تكون معروفة لكل وحدة متحركة تصل الإشارة من هذه المحطة إليها ومن المحتمل أن تحاول الولوج إلى الشبكة عن طريقها. من الأمثلة على هذه المعلومات أنواع التقنيات المتقدمة للتحكم بإرسال الإشارة، كـ"تقنية الإرسال المتقطع" "Discontinuous Transmission (DTX)"، وتقنية "ضبط الطاقة" "Power Control (PC)"، و"ميزة القفز الترددي" "Frequency Hopping (FH)"، والتي يجب على الوحدات الموجودة ضمن نطاق الخلية الإلتزام بتنسيق استخدامها مع المحطة. تتلقى الوحدة المتحركة عبر هذه القناة أيضاً معلومات عن القنوات الترددية المتاحة أو الخاصة بالمحطات المجاورة. وبمعرفة هذه

القنوات –أي الترددات– تجري الوحدة قياساً دورياً لقوة الإشارة المستقبلة على كلٍ منها، وترسل للشبكة تقريراً عن نتائج هذه القياسات، مما يتيح للشبكة إمكانية المقارنة بين الإشارات المختلفة وتحديد القناة الأنسب لإنشاء اتصالٍ أو ربطٍ راديوي مع هذه الوحدة. فإذا أظهرت نتائج القياس أن الإشارة المستقبلة على قناة ترددية تبثها محطة مجاورة أفضل من إشارة المحطة الحالية، أوعزت الشبكة إلى الوحدة المتحركة بضرورة تغيير القناة، وباشرت الشبكة من طرفها بإجراءات عملية نقل الوحدة من الخلية الحالية إلى الخلية الأنسب، ضمن ما يُعرف بـ"إجراء التسليم" "Handover" (انظر الفصل ٧).

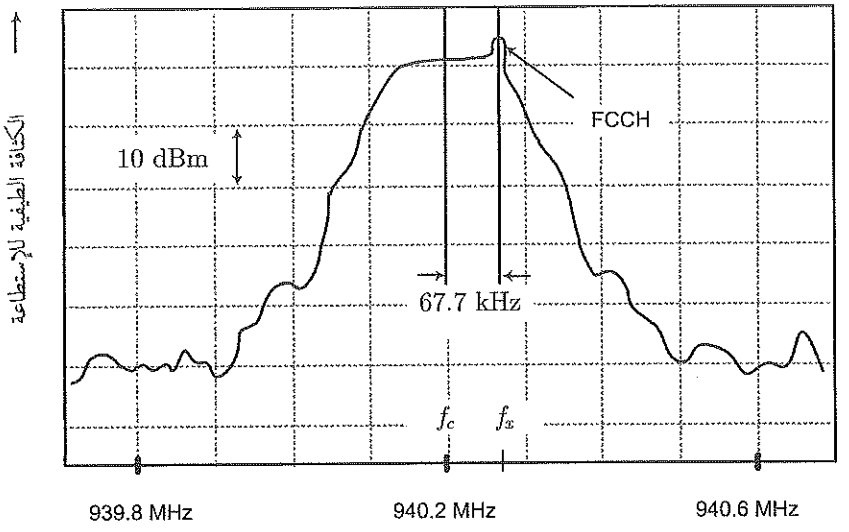
تستخدم قناة المعلومات العامة، التي نشير إليها في ما يلي بـ "قناة BCCH"، الرزمة العادية لنقل المعلومات المذكورة سابقاً، حيث تكون هذه المعلومات مُرَمَّزة في حقلي المعلومات المُبيَّنين في الشكل ٤-١٠. هذا ولا يكفي عدد البتات المتاحة في هذين الحقلين لاستيعاب متن أو فحوى كل رسالة تبثها القناة، لذا تُجَزَّأ هذه المعلومات إلى أكثر من مجموعة، يُنقل كل منها باستخدام رزمة منفردة، أي أن هذه المعلومات تُرسل مُجَزَّأةً وفق ترتيب محددٍ ومتفق عليه. هذا وتحتاج أغلب الرسائل إلى أربع رزم لاستكمال بثها، لذا اصطُلح على تخصيص اسمٍ للدلالة على الدور الذي يشمل إرسال أربع رزم متتالية، وهذا الاسم هو "BCCH-Block".

ترسَل معلومات قناة BCCH على أحد الترددات المتاحة في الخلية، ولما كانت هذه القناة تحمل المعلومات الخاصة بالمحطة التي تبثها حصراً، والمميِّزة لها عن غيرها، يُشار إلى التردد الذي ترسل عليه باسم "التردد المميِّز للمحطة" أو "التردد الدَّال على المحطة"، وهو ما يعرف اصطلاحاً بـ "Beacon Frequency".

٢) "قناة ضبط أو تصحيح التردد" "Frequency Correction Channel (FCCH)"

تُبثُّ عبر هذه القناة معلوماتٌ باتجاه المسار الهابط يمكن لكل وحدةٍ متحركة ضمن الخلية الإستفادة منها لضبط ترددها، بحيث يكون موافقاً لتردد قناة المعلومات العامة، أي للتردد الدال على المحطة. وهذا الضبط ضروري جداً، إذ يتعذر بدونه على الوحدة المتحركة قراءة المعلومات من قناة BCCH، ومن ثم لا يمكنها أن تعرف هوية الشبكة أو المحطة الثابتة، ولا أن تباشر أي إجراء للنفاذ إلى الشبكة. يعني ذلك أيضاً أن ضبط تردد الوحدة المتحركة هو الخطوة الأولى من خطوات الولوج إلى الشبكة عند تشغيل الوحدة إذاكانت مغلقة.

تَستخدِم قناة FCCH رزمة خاصة لإنجاز أو تحقيق عملية الضبط، تسمى اصطلاحاً "رزمة ضبط التردد" أو "رزمة تصحيح التردد" "Frequency Correction Burst". بنية هذه الرزمة بسيطة جداً، إذ تحوي –إضافةً إلى حقلي البداية والنهاية– سلسلةً من البتات المتتالية، عددها 148 وذات قيمة ثابتة موَحَّدة أو مشتركة هي "0" (انظر الشكل ٤-٤). تُقود هذه القيمة الثابتة للمعلومات إلى إشارةٍ جيبيةٍ صرفة كناتجٍ لإجراء التعديل الراديوي، إذ أن ثبات قيمة المعلومات المعدِّلة –سلسلة البتات– يكافئ عدم وجود أي تغييرٍ في مطال أو طور الإشارة الراديوية المعدَّلة. هذا ويكون تردد الإشارة الجيبية الصرفة ذا إزاحة ترددية ثابتة عن الحامل الترددي المركزي للقناة مقدارها 67.7 kHz ([٣]، [١٤])، فإذا التقطت الوحدة المتحركة هذه الإشارة الجيبية التي يسهل التعرف عليها كونها غير مُعَدَّلة وذات استطاعةٍ مميزة، وإذا كان تردد هذه الإشارة مساوياً لـ f_x ، أمكن حساب تردد الحامل المركزي للقناة عن طريق العلاقة $f_c = f_x - 67.74\,\text{kHz}$ (انظر الشكل ٤-١١).



الشكل ٤-١١:توضيح للإزاحة الترددية بين الحامل المركزي للقناة وإشارة ضبط التردد (عن [٤] بتصرف).

ننوه في هذا السياق إلى أن قناة تصحيح أو ضبط التردد تُبثُّ على نحو دوري ضمن سياقٍ ثابتٍ ومعروف لكل الوحدات المتحركة، لذا يمثّل ضبط التردد إجراءً دورياً، يتكرر طوال المدة التي تكون فيها الوحدة المتحركة على اتصال بالشبكة أو مُراقِبةً لإشارة المحطة التي توجد ضمن مجال تغذيتها. فإجراء ضبط التردد ليس مقتصراً على لحظة الولوج ولا على كون الوحدة طرفاً في اتصالٍ قائم، وهذا ضروري لأن التردد المُعتمد من قبل الوحدة المتحركة قد لا يطابق تردد المحطة الثابتة لسببين: الأول هو أن تردد الإشارة المستقبلة يتعرض للتغيير بسبب ظاهرة دوبلر (انظر البحث ٣-٢-٤)، خصوصاً عندما تتنقل الوحدة بسرعة كبيرة، والثاني هو أن "مذبذب الوحدة المتحركة" "Local Oscillator (LO)" لا يمكن أن يكون مثالياً، وهذان العاملان يؤديان إلى تَدَنٍّ في درجة موافقة تردد الوحدة المتحركة لتردد المحطة المغذّية.

نلفت النظر أيضاً إلى أن قناة BCCH وقناة FCCH تُبثّـان على القناة الفيزيائية ذاتها، لذا يعني تحديد التردد الحامل لقناة ضبط التردد ضمنياً تحديداً لتردد قناة BCCH أيضاً.

٣) "قناة (ضبط) التزامن" "Synchronization Channel (SCH)"

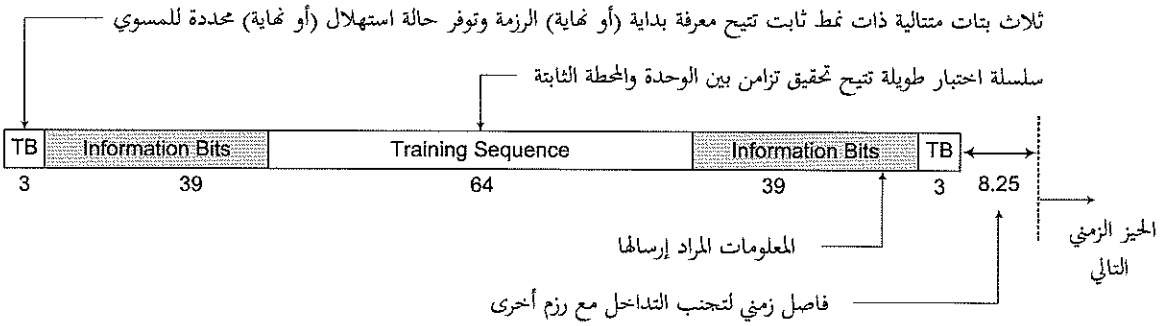
بعد إتمام إجراء ضبط التردد، لابد من تحقيق توافقٍ زمني بين الوحدة المتحركة والمحطة الثابتة، حتى يتسنى للوحدة المتحركة معرفة بداية كل حيز زمني، وتحديد رقمِ كل بت ضمن الرزمة التي يتضمنها، ومن ثم قراءة وتحليل معلومات الرزمة على نحوٍ صحيح.

تَستخدم قناة SCH رزمة محددة يدل اسمها على وظيفتها، وهي "رزمة (ضبط) التزامن" "Synchronization Burst" (انظر الجزء (أ) من الشكل ٤-١٢). لهذه الرزمة بنية خاصة تشمل سلسلة طولها 64 بتاً تكون معروفة لدى الوحدة المتحركة أيضاً، ويمكن عن طريق حساب تابع الترابط الإحصائي بين السلسلة المحفوظة في ذاكرة الوحدة المتحركة والسلسلة المستقبَلة تحقيق تزامن تام بين طرفي الاتصال. تتضمن عملية حساب الترابط تقييم "معامل الترابط" "Correlation Coefficient" بدلالة

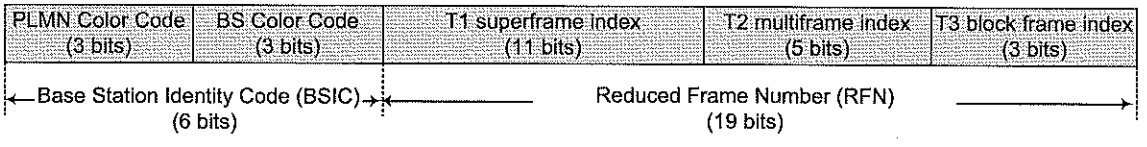
الإزاحة الزمنية بين نسختي السلسلة –المحفوظة والمستقبلة– ولا شك أن قيمة هذا التابع تبلغ ذروتها عند تطابق السلسلتين، مما يتيح تحديد بداية السلسلة زمنياً على نحوٍ دقيق.

مما يميز رزمة التزامن أن طول سلسلة الاختبار التي تتضمنها يبلغ 64 بتاً، وهذا يفوق كثيراً طول سلسلة الاختبار في الرزمة العادية (26 بتاً كما بيَّنَّا)، يرجع ذلك إلى أن هذه الرزمة هي الأولى التي يلتقطها المستقبل ويحاول فك تعديلها واستخلاص المعلومات الأساسية منها، وهذا الطول الزائد يتيح هامشاً زمنياً أطول لإنجاز عملية التزامن ويزيد من دقتها، وهذه الدقة ضرورية خصوصاً إذا كانت الوحدة المتحركة بعيدة جداً عن المحطة.

يبلغ عدد بتات المعلومات التي تحملها الرزمة 78 بتاً، غير أن هذا العدد يشمل الفائض الخاص بإجراءات ترميز القناة، وباستثناء هذا الفائض يتقلص عدد بتات المعلومات إلى 25 بتاً تتوزع على حقلين رئيسيين كما يبين الجزء (ب) من الشكل ٤-١٢.
يُعرَف الحقل الأول بـاسم "الرقم المختصر أو المختزل للإطار" "Reduced Frame Number (RFN)" ويدل على ترتيب أو رقم الإطار الزمني المفرد (TDMA-Frame) الذي يقع الحيز الزمني الحامل لقناة أو رزمة التزامن ضمنه. يفيد هذا الرقم في معرفة تسلسل المعلومات التي تبثها المحطة وفي تحديد ماهيتها، فكما أشرنا من قبل، هناك ترتيب هرمي للأطر الزمنية ينتهي بالإطار الأعظمي، وهذه البنية تحددّ بدورها تسلسلاً معيناً للمعلومات ضمن كل إطار متعدد (انظر الشرح المفصل لهذا المبدأ لاحقاً).



(أ)



(ب)

الشكل ٤-١٢: (أ) بنية رزمة التزامن، (ب) المعلومات التي تحملها الرزمة.

أثناء بثها للمعلومات، تقرن المحطة كل إطارٍ برقمٍ تسلسلٍ ضمن الإطار الأعظمي يعرف بـ"رقم الإطار" "Frame Number"، ويرمز له بـ FN. تبدأ قيمة هذا الرقم بالعدد "0"، حتى إذا بلغت العدد المكافئ لآخر إطار ضمن الإطار الأعظمي،

أي $FN_{max} = 2,715,648$ ، بُدئ بالرقم "0" من جديد، وهكذا. وعند معرفة رقم هذا الإطار يتحقق توافقٌ بين المحطة والوحدات المتحركة التي تكون قادرة على تحديد نوعية المعلومات التي تبثها المحطة وتسلسلها وماهيتها.

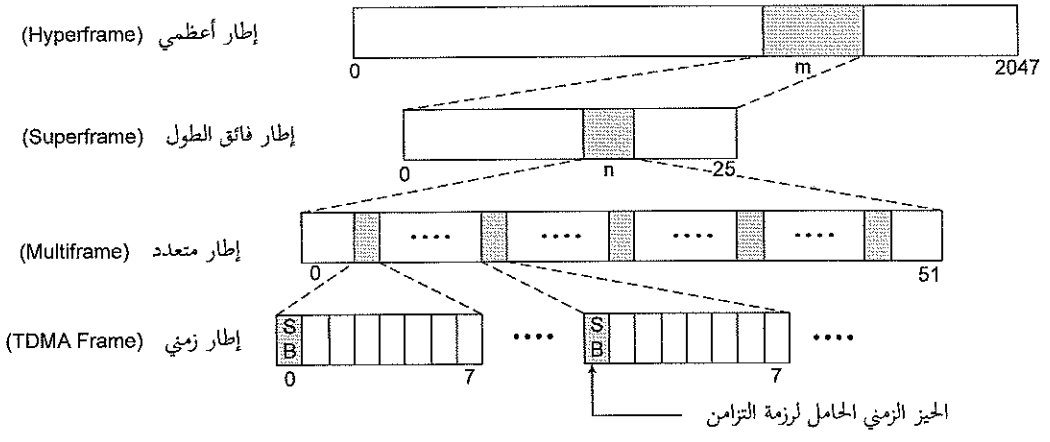
يتطلب تدوين رقم الإطار بالنظام الإثناني 22 بتاً، غير أنه لا يرسَل كرقمٍ مجرد، وإنما يستعاض عنه برقم طوله 19 بتاً يتألف من ثلاثة موسطات تُستخدم لاشتقاق كلٍّ من رقم الإطار المفرد، ورقم الإطار فائق الطول (Superframe)، ورقم الإطار المتعدد (Multiframe) أيضاً. فكثير من العمليات الحسابية التي تجريها الوحدة ترتبط برقم الإطار المتعدد أو رقم الإطار فائق الطول وليس برقم الإطار FN، وكلما قلّ عدد البتات الضرورية لتدوين أو تمثيل أرقام الأطر الأعلى رتبةً ضمن الترتيب الهرمي، أمكن إجراء العمليات الحسابية بسرعة أكبر.

يشمل حقل RFN الموسطات التالية:

١) T1: طول هذا الموسط 11 بتاً، ويحدد رقم أو ترتيب الإطار فائق الطول (Superframe) ضمن الإطار الأعظمي، لذا تتراوح قيمته بين 0 و 2047.

٢) T2: يتألف هذا الموسط من 5 بتات، ويدل على رقم الإطار المتعدد (Multiframe) ضمن الإطار فائق الطول، أي أن قيمته العظمى هي 25. يُستثمر هذا الموسط وظيفياً في تحديد جزء أو نوع المعلومات التي تحملها قناة BCCH ضمن الإطار المتعدد الحالي.

٣) T3': سيمر لاحقاً أن ورود الحيز الزمني الذي ينقل رزمة التزامن يتكرر 5 مرات ضمن الإطار المتعدد (انظر الشكل ٤-١٣)، لذا يُستخدم هذا الموسط للدلالة على ترتيب ورود الحيز الذي قُرئت منه رزمة التزامن ضمن الإطار المتعدد الحالي (أي من 0 إلى 4)، وهذا الرقم يُغني عن رقم الإطار ويتيح خفض عدد البتات اللازمة للدلالة عليه.



الشكل ٤-١٣: حول تعريف الموسط T3'.

تتكرر قيم كلٍّ من هذه الموسطات على نحوٍ دوري يضبطه عدد البتات المتاحة لتمثيل كل منها، وترتبط أيضاً برقم الإطار FN عبر العلاقات المعطاة في الجدول ٤-٢.

الموسط وعلاقته برقم الإطار (FN)	مجال القيم الممكنة
T1 = FN div (26 × 51)	0-2047
T2 = FN mod 26	0-25
T3' = (T3 - 1) div 10	0-4
T3 = FN mod 51	0-50

الجدول ٤-٢: العلاقات التي تربط بين الموسطات (T1، T2، T3') ورقم الإطار FN.

أستناداً إلى هذه العلاقات يمكن اشتقاق رقم الإطار على النحو التالي:

$$FN = 51 \times ((T3 - T2) \bmod 26) + T3 + 51 \times 26 \times T1 \quad ; \quad T3 = 10 \times T3' + 1 \qquad (٤-١)$$

نخلُص من الفقرات السابقة إلى أن الوحدة تحدد عن طريق تقييم سلسلة الاختبار بداية الرزمة، كما تقرأ من الحقل RFN رقم الإطار الحالي. زيادةً على ذلك، تستخدم الوحدة مؤقتات زمنية أخرى لضبط ترتيب كل بت ضمن الرزمة أو الحيز الزمني، هذه المؤقتات تعرفها المواصفات المعيارية كما يلي [١٤]:

١) "Quarter Bit Number (QN)": تزداد قيمة هذا المؤقت بمقدار "1" كل مدة زمنية مقدارها $12/13\,\mu s$، و تعادل هذه المدة ربع المدة المكافئة لبت واحد. تشتق قيمة QN من سلسلة الاختبار، حيث يمكن بعد حساب الترابط الإحصائي بين السلسلة المستقبلة والنسخة المحفوظة في ذاكرة الوحدة تحديد بدايتها على نحو دقيق، وبما أن مكان هذه السلسلة ضمن الرزمة معروف، يمكن اشتقاق قيمة QN باعتماد القيمة المكافئة لأول بت ضمن الرزمة. تتغير قيمة هذا المؤقت على نحو دوري ضمن المجال "0" إلى "625"، وهذا يكافئ المدة المعادلة للحيز الزمني كاملاً (156.25 bit).

٢) "Bit Number (BN)": كما يشير الاسم، يمثل هذا المؤقت رقم البت أو ترتيبه ضمن الرزمة، وتحسب قيمته من ناتج قسمة QN على أربعة، إذ تكافئ قيمة BN العدد الصحيح لهذا الناتج.

٣) "Timeslot Number (TN)": يدل هذا المؤقت على رقم الحيز الزمني ضمن الإطار الحالي، أي أن قيمته تتراوح بين "0" و "7". هذا وسنبين لاحقاً أن رقم الحيز الزمني الذي ترسل عليه قناة SCH هو "0" دائماً، لذا تختار الوحدة لهذا المؤقت قيمة "0" عند استقبال رزمة التزامن.

٤) "Frame Number (FN)": المؤقت الرابع الذي تستخدمه الوحدة هو رقم الإطار، وكنا أوضحنا طريقة اشتقاقه اعتماداً على الموسطات الأخرى المعطاة بالعلاقة (٤-١).

تتغير قيم المؤقتات التي ذكرناها تدريجياً، ويحكُم تغيُّرُ المؤقت الأقصرِ مدةً تغيُّرَ المؤقت الدال على مدة أطول، وهكذا. فالموسط BN يمثل -كما ذكرنا- العدد الصحيح لقسمة QN على أربعة، كما يزداد المؤقت TN الممثل لرقم الحيز عندما تتغير

قيمة QN من القيمة العظمى (625) إلى قيمة البداية (0) أي عند إتمام QN للدور المكافئ لطول الحيز الزمني. على نحوٍ مشابه، تزداد قيمة FN كلما تبدلت قيمة TN من "7" إلى "0".

هذا من ناحية الحقل الأول من البتات ضمن رزمة التزامن (حقل RFN)، أما الحقل الثاني فيتألف من مجموعةٍ من 6 بتات تمثل "رمزاً لهوية المحطة" يميزها عن المحطات المجاورة، ويعرف بـ "Base Station Identity Code (BSIC)". لهذا الرمز أهمية خاصة في إنجاز عملية التسليم على نحوٍ سلسٍ، فقد كنا أشرنا إلى أن الوحدة تزوِّد الشبكة بنتائج قياس الإشارات المستقبلة على القنوات الترددية للمحطات المجاورة، غير أن معرفة قوة الإشارة وترددها غير كافٍ لتحديد مصدرها، إذ من الممكن أن ينشأ لبسٌ بسبب إشارات من محطاتٍ غير مجاورة تستخدم التردد ذاته وتصل إشاراتها إلى الوحدة المتحركة لسببٍ ما، كأن يكون موقع المحطة المسببة للتشويش مرتفعاً، أو أن يُجرى تعديلٌ في توزيع الترددات على المحطات دون تخطيطٍ دقيق، أو غير ذلك من الأسباب. ولا يمكن تجنب هذا اللبس إلا إذا قُرِنَتْ كلٌّ من الإشارات المستقبَلة بالمحطة التي تبثها. ولما كانت قائمة ترددات المحطات المجاورة متوفرة لدى الوحدة المتحركة –كونها تُبثُّ ضمن المعلومات العامة على قناة BCCH– يمكن للوحدة أن تَقْرِنَ بين هوية المحطة التي تستخلصها من رزمة التزامن، وقوة الإشارة المقيسة على تردد قناةٍ لها نفس التردد المركزي لقناة SCH. بذلك يتحقق ربط كل إشارة راديوية بمصدرها.

يتألف رمز المحطة "BSIC" من جزأين طول كل منهما ثلاثة بتات. تدل البتات الثلاثة الأعلى قيمةً على "هوية الشبكة" "Network Color Code (NCC)"، بينما تدل البتات الثلاثة الأخرى على "رقم المحطة ضمن المنطقة الجغرافية" التي تقع ضمنها، ويُشار إليه بـ "Base Station Color Code (BCC)". هذا وننوه في هذا السياق إلى أن كلمة Color تُستخدم كمصطلحٍ توارثه مهندسو تخطيط الشبكات، ولا تحمل أية دلالة متعلقة بالألوان. ويرجع استخدام التعبير إلى أن الألوان كانت تُستخدم لتمييز المناطق الجغرافية ضمن الشبكة الواحدة عن بعضها، وذلك إذا كان مخطط الشبكة مرسوماً على ورقةٍ واحدة، فكان رقم اللون هو الدليل على المنطقة الجغرافية المعنية.

يُخصص رقم BCC من قبل مشغل الشبكة، ومن البدهي أن ثلاثة بتات لا تكفي للتمييز بين أكثر من ثماني محطات، لذا يجب توزيع أو تخصيص كل من القيم الثمانية المتاحة لـ BCC بحيث تتباين المحطات المتجاورة في أرقامها على نحوٍ واضحٍ، فلا ينشأ أي لبسٍ بينها. لذا، وكما يتكرر استخدام الترددات في الشبكة، يُعاد استخدام هذا الرقم –أي BCC– كهويةٍ مميزة عن محطاتٍ أخرى، مع الحرص على عدم استخدام القيمة نفسها لمحطتين تستخدمان التردد نفسه وتتباعدان مسافةً يمكن أن تؤدي إلى تداخلٍ بينهما. نشير أيضاً إلى أن قيمة BCC تكون مساويةً دائماً لرقم سلسلة التدريب TSC التي تستخدمها المحطة في الرزمة العادية، هذا يعني أن استخلاص رمز المحطة "BSIC" يتيح معرفة السلسلة المستخدمة، وتنوع رقم المحطة BCC على النحو الذي ذكرناه يجعل استخدام السلسلة ذاتها من قِبَلِ أكثر من محطةٍ مجاورة غير ممكن أيضاً (انظر [٥] للتفاصيل).

٤–٤–٢–٢ "قنوات التحكم المشتَرَكة" "Common Control Channels (CCCH)"

تندرج تحت هذا الاسم مجموعةٌ من القنوات التي يخصصها النظام لأغراضٍ تتعلق بمراقبة جودة الإتصال وبتنسيق استخدام موارد الشبكة. ففي المسار الصاعد، تُستخدم هذه القنوات من قِبَل الوحدات المتحركة عند محاولة النفاذ إلى الشبكة وطلب تخصيص

قناة فيزيائية للاتصال، أما في المسار الهابط، فتؤدي هذه القنوات وظيفة إشعارِ الوحدة المتحركة بأن طلب السماح بالنفاذ قد أُجيبَ أو أُقِرَّ. تُستخدم هذه القنوات أيضاً لنداء المشترك ولإشعاره بورود مكالمة له، ولإرسال الرسائل النصية القصيرة.

تكون هذه القنوات متاحةً لجميع الوحدات المتحركة الموجودة ضمن منطقة تغذية محطةٍ ما، ومن الممكن لأيٍّ من هذه الوحدات شغلُها إذا كانت شاغرة، بتعبيرٍ آخر، تتشارك كل الوحدات في استخدام هذه القنوات، لذا اصطُلِحَ على تسميتها بـ "قنوات التحكم المشتَرَكة"

تتميز هذه القنوات عن قنوات التحكم العامة التي ذكرناها في الفقرات السابقة بأنها ثنائيةُ أو مزدوجةُ الاتجاه، أي من الممكن لكلٍّ من المحطة الثابتة أو الوحدة استخدام هذه القنوات لإبلاغ الطرف الآخر بأمرٍ يتعلق بالاتصال. على خلاف ذلك، تُبَثُّ قنوات التحكم العامة (BCH) من قِبل المحطة الثابتة حصراً، فهي أحادية الاتجاه. إضافةً إلى ازدواجية الإتجاه، تتميز القنوات المشتركة عن العامة بأنها لا يمكن أن تُشغَلَ بدون وجود مشتركٍ فاعلٍ ضمن منطقة تغذية المحطة، أما القنوات العامة فهي تبثُّ باستمرار ما دامت المحطة في نطاق الخدمة، وبصرف النظر عن وجود أيٍّ من المشتركين أو عدمه.

تضم هذه المجموعة القنوات التالية:

١) قناة النداء "Paging Channel (PCH)"

تُستخدم هذه القناة، كما يدل اسمها، للإشعار بورود مكالمة خاصةٍ بمشتركٍ معين. هذا الإشعار يماثل أو يشابه عملية النداء، حيث يرسل النظام –ممثلاً بالمحطة الثابتة– رسالةً محددةً باتجاه المسار الهابط، تتضمن هوية المشترك المعني بورود الاتصال، ومن الممكن لكل المشتركين الموجودين ضمن الخلية رصدها. ولما كان متن الرسالة يتضمن هوية المنادى، تتجاهلها الوحدات الأخرى بينما يباشر المشترك المعني بها خطوات إجابة النداء بطلب قناةٍ مخصصةٍ له لشغلها عند قبول الاتصال.

تَستخدم قناة النداء رزمة المعلومات العادية، حيث يضم حقلا المعلومات في هذه الحالة هوية المشترك المعني بالنداء ومعلومات أخرى تتعلق بتفاصيل النداء ونوع وطبيعة القنوات التي تتطلبها إجابة النداء.

٢) قناة طلب النفاذ العشوائي "Random Access Channel (RACH)"

عند رغبة مشتركٍ ما في إنشاء اتصال، يَطلب من النظام تخصيص قناة فيزيائية له –حيز زمني على تردد متاح– ويرسل طلبه هذا باستخدام رسالة محددة على "قناة طلب النفاذ العشوائي"، ويدل اسم هذه القناة على سمة أو كيفية طلب المشترك للنفاذ، حيث يمثِّل ذلك إجراءاً عشوائيَّ الحدوث أو الحصول. يُفهم ذلك على نحوٍ أوضح إذا استحضرنا حالة أية شبكة من الناحية الواقعية، وهي وجود الكثير من المشتركين ضمن خليةٍ ما، يتغير عددهم بين لحظة وأخرى على نحوٍ لا يمكن التنبؤ به، لذا يمثل هذا العدد –أي عدد المشتركين– متحولاً عشوائياً بدلالة الزمن.

هذا وتنطبق صفة العشوائية أيضاً على محاولات النفاذ إلى الشبكة، حيث لا يحكمُها تسلسلٌ أو ترتيبٌ زمني محدد، وإنما تخضع لحاجات المشتركين الآنية.

تستخدم الوحدة المتحركة لطلب النفاذ الرزمة الرابعة في الشكل ٤-٤، المسماة وفقاً لوظيفتها بـ"رزمة طلب النفاذ" "Access Burst"، وتتميز بأن عدد البتات فيها هو الأقل من بين كل الرزم.

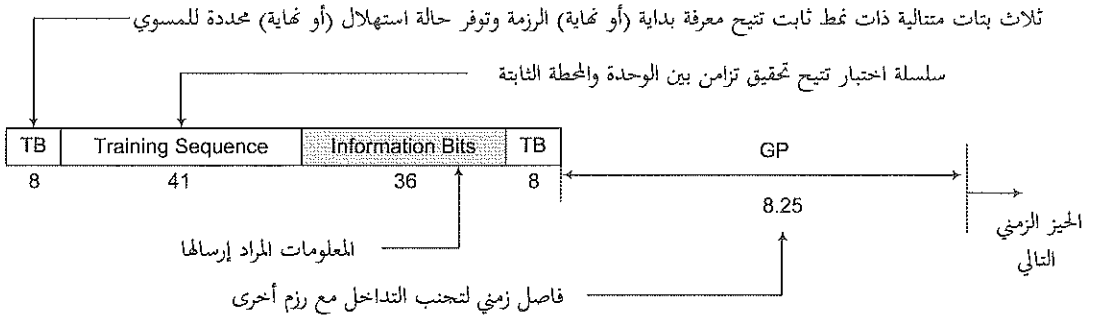
تضم هذه الرزمة سلسلة اختبار طولها 41 بتاً، إضافة إلى حقل معلومات مؤلف من 36 بتاً، وحقلي بداية ونهاية بطول 8 و 3 بتات على التوالي. نلحظ من هذه البنية أن حقل البداية (TB) وسلسلة الاختبار (Training Sequence) أطول من نظيريهما في الرزمة العادية (انظر الجزء (أ) من الشكل ٤-١٤)، وهذا يساعد على زيادة احتمال نجاح نقل معلومات طلب النفاذ، حيث لا يكون لدى المستقبل –أي المحطة الثابتة– عند بداية طلب النفاذ أية معلومات عن الإشارة أو عن القيمة الدقيقة لتردد الوحدة المتحركة، ومن ثم يتطلب تحقيق التزامن والتعرف على تردد الإشارة المرسَلة هامشاً زمنياً أطول.

يشمل حقل المعلومات في هذه الرزمة 36 بتاً تتضمن فائض ترميز القناة الذي يُرفق بالرسالة لتزويدها بالحصانة من عوارض وسط الانتشار، ولاتتجاوز المعلومات الفعلية في هذا الحقل –أي بعد عملية فك ترميز القناة– 8 بتات، حتى أن هوية المشترك لا تكون متضمنة فيها، فالغرض الأساسي من إرسال هذه الرزمة واستخدام قناة طلب النفاذ هو إشعار الشبكة بالحاجة إلى قناةٍ مخصصة للمشترك، يمكنه استخدامها لمباشرة خطوات الاتصال الأولى، وهذه القناة الأخرى –حين تُخصص– هي التي يرسل عليها المشترك المعلومات الضرورية لإنشاء الاتصال، مثل هويته والرقم المطلوب والمعلومات الخاصة بالتوثق وغيرها.

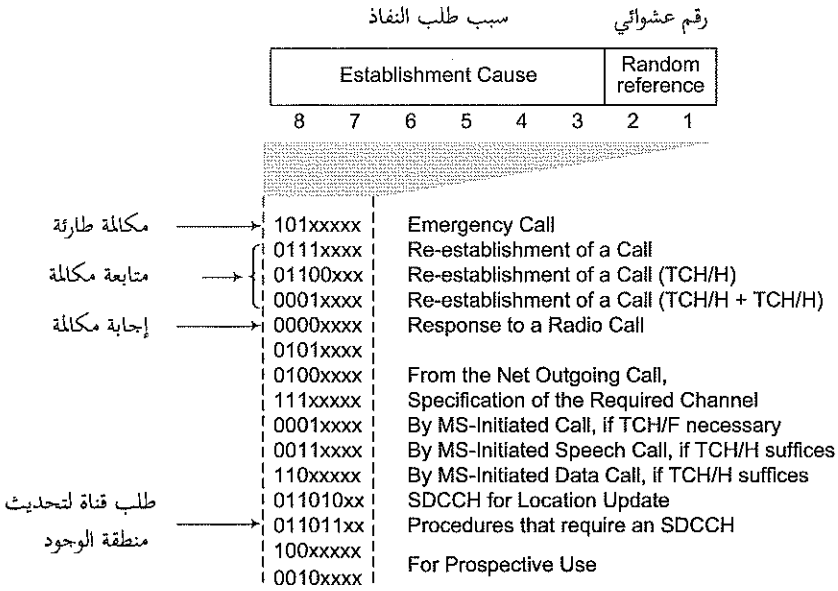
تؤلف المعلومات الفعلية من الرزمة (8 بتات) رسالةً تُعرف بـ "رسالة طلب قناة" "CHANNEL_REQUEST" تضم حقلين رئيسيين، يتفاوتان في طول كل منهما تبعاً لإصدار GSM المعتمد، حيث يشمل الحقل الأول 3-6 بتات، بينما يتألف الحقل الثاني من 2-5 بتات. يعرض الجزء (ب) من الشكل ٤-١٤ بنية هذين الحقلين في حالة الإصدار Phase 2، حيث يشمل الحقل الأول في هذه الحالة البتات الستة الأعلى قيمة، وهذه البتات تبين الغرض المرجو من النفاذ إلى الشبكة، لذا يعرف هذا الحقل أيضاً باسم "Establishment Cause". يفيد هذا الحقل في تحديد أولوية الاتصال وأهميته، فقد يكون غرض النفاذ إنشاء مكالمة عادية، أو تحديث مكان وجود المشترك في حالة حركته، أو إجراء مكالمة طارئة، أو إرسال رسالة نصية قصيرة، أو غير ذلك من الأسباب. فعلى سبيل المثال، يُمنح "الاتصال الاضطراري أو الطارئ" "Emergency Call" أولوية مميزة من قبل الشبكة، ويوصل بالمقسم على أسرع نحوٍ ممكن.

أما الحقل الثاني، فيمثل رقماً عشوائياً يتيح تمييز الرزمة –أي رزمة طلب النفاذ– عن غيرها حين ورودها للمحطة. يعرف هذا الحقل باسم "Random Reference"، وتستخدمه المحطة الثابتة كبديلٍ عن هوية الوحدة المتحركة التي طلبت النفاذ، فكما تقدم، لا تكون هوية الوحدة معروفة أثناء هذا الطور من أطوار الاتصال.

يُولَّد هذا الرقم العشوائي عند كل محاولة ولوجٍ إلى الشبكة، ويجري انتقاؤه كخرجٍ لخوارزميةٍ خاصة تولِّد أرقاماً عشوائية وفق توزيع غاوس، فإذا أُجيب طلب النفاذ، أرفقت الشبكة هذا الرقم العشوائي برسالة إجابة الطلب، وهذا يتيح التأكد من أن المشترك المعني هو الذي سيقرؤها (انظر [٤] للتفاصيل). ولما كان الرقم المؤلف من خانتين لا يمكن أن يفي باحتياجات تمييز عددٍ كبيرٍ من المشتركين، يعتمد النظام آليات إضافية للتعامل مع النفاذ العشوائي [٦].



(أ)



(ب)

الشكل ٤-١٤: (أ) بنية رزمة طلب النفاذ، (ب) رسالة طلب النفاذ CHANNEL_REQUEST (وفق الاصدار Phase 2).

تتميز هذه الرزمة أيضاً بمدة عزل طويلة جداً مقدارها 252 µs، تساعد على تجاوز أي تداخلٍ محتملٍ مع الأحياز الزمنية المجاورة عند المستقبل، أي المحطة، خصوصاً إذا كانت الوحدة المتحركة بعيدة جداً. تنشأ الحاجة إلى هذه المدة الطويلة بسبب كون المقدار اللازم لتقديم الإرسال -أي قيمة الموسط TA- غير معروف عند بداية الاتصال، لذا تتيح هذه المدة هامشاً زمنياً يعادل ما تحتاجه الإشارة الراديوية لقطع مسافةٍ مقدارها 75.6 km تقريباً، يضمن هذا أن يقع جزء المعلومات ضمن الحيز الزمني المخصص للرزمة عند المستقبل، فينتفي التداخل مع الحيز التالي. تتجاوز مسافة 75.6 km- من باب الحيطة- قطر الخلية الأعظمي (انظر الفصل ٢ لحسابها)، وتنجم الحاجة لمراعاة قطر الخلية الأعظمي وليس نصفه لأن طلب النفاذ قد يكون ناجماً عن إجابة الوحدة لرسالة نداء من قِبَل المحطة، فتكون هذه المدة الزمنية كافية لتشمل التأخير المتعلق بوصول رسالة النداء إلى الوحدة، بالإضافة إلى التأخير الذي يتطلبه وصول طلب النفاذ من الوحدة إلى المحطة.

تتضمن هذه الرزمة 41 بتاً بنمطٍ خاص، تفيد في تحقيق تزامنٍ مع الوحدة الطالبة للنفاذ، على غرار ما عرضناه عند شرحنا لرزمة التزامن. وتعرف هذه البتات بـ "سلسلة اختبار" أيضاً، رغم أن هدفها هو تحقيق التزامن حصراً. يسهُلُ بعد تحقق التزامن تحديد بداية حقل المعلومات وقراءة فحواه على نحوٍ صحيح، كما يمكن عن طريق حساب نتيجة الترابط الإحصائي تحديد مدة تقديم الإرسال المطلوبة من هذه الوحدة لإبلاغها بها.

كنا قد أشرنا إلى الطبيعة العشوائية لإجراء طلب النفاذ، ونوّهنا أيضاً إلى أن قناة RACH مشتركة بين جميع المشتركين. هذا يعني أنه من المحتمل أن يحاول أكثر من مشترك إرسال طلب نفاذٍ على القناة المتاحة لذلك في آن واحد، وعند حصول ذلك، أي عند وصول أكثر من رزمةِ طلبِ نفاذٍ إلى المحطة الثابتة في آن واحد لشغل الحيز الزمني لقناة RACH، يتعذر على المحطة التعرف على فحوى هذه الرزم فتتجاهلها،، فإذا لم تستقبل الوحدة جواباً بإقرار أو رفض طلب النفاذ فإنها -أي الوحدة- تفترض حدوث تنازعٍ على قناة RACH، وتعاود إرسال الطلب بعد مدة زمنية عشوائية يحددها النظام. هذا ويتولى النظام تنسيق وإجابة تلبية طلبات النفاذ تبعاً لبروتوكول خاص بذلك هو بروتوكول "Slotted-Aloha (S_ALOHA)"، المعروف والشائع الاستخدام في شبكات الاتصالات السلكية أيضاً (يمكن الرجوع إلى [٦] و [٧] لعرضٍ وافٍ عن هذا البروتوكول)، هذا وسنعرض لاحقاً في هذا الفصل بعض مبادئ التحكم بالنفاذ العشوائي.

٣) "قناة قبول طلب النفاذ" "Access Grant Channel (AGCH)"

تُعلم الشبكة -باستخدام هذه القناة- المشترك أن طلب نفاذه قد أجيب أو رفض، وأن قناة تحكُّمٍ خاصة به (في حالة الإيجاب طبعاً) متاحةٌ لمباشرة خطوات إنشاء الاتصال المرغوب.

هذه القناة أحادية الاتجاه، تبثُّ من الشبكة إلى الوحدة المتحركة حصراً، وتكون عند إرسالها حاملةً لمعلوماتٍ خاصةٍ بمشترك معين، يفترض أن يكون قد طلب تخصيص قناة اتصالٍ عن طريق قناة RACH.

تَستخدم هذه القناة الرزمة العادية لنقل رسائل الشبكة إلى الوحدة المتحركة، ويحوي حقلا المعلومات في هذه الحالة إما رسالة إجابة أو رفض، حيث تُعلَم الوحدة في حالة الإجابة بتلبية طلب النفاذ، وبرقم القناة التي عليها استخدامها لمباشرة إنشاء الاتصال. أما في حالة الرفض، فيحوي حقلا المعلومات إشعاراً للمشترك بذلك. هذا وتعرف الوحدة المتحركة أنها معنية برسالة الإقرار أو الرفض عبر مقارنة الرقم العشوائي الذي أُرسل في رسالة الطلب مع رقمٍ عشوائي ترسله المحطة ضمن رسالة الإجابة أو الرفض.

٤-٤-٢-٣ "قنوات التحكم المُخصَّصَة" "Dedicated Control Channels (DCCH)"

تتميز هذه القنوات بأنها تكون مخصصة لمشتركٍ معين، وذلك لتبادل رسائل التحكم الخاصة باتصاله إما في طور التحضير للاتصال، أو أثناء إجراء الاتصال. ويجري تخصيص هذه القنوات بعد اتخاذ قرارٍ من طرف النظام بأن اتصالاً سيُجرى، وأن هذا المشترك سيكون طرفاً فيه. ويكمن وجه الاختلاف بين القنوات المشتركة والقنوات المخصصة في أن الأولى تُعنى بتنسيق

خطوات الاتصال في الطور الذي يسبق حجز أية موارد في الشبكة، بينما تكون القنوات المخصصة فاعلةً بعد تخصيص وشغل الموارد لإنجاز اتصالٍ ما. تتميز القنوات المخصصة أيضاً بأنها مزدوجة الاتجاه، على خلاف القنوات المشتركة التي تكون أحادية الإتجاه حصراً.

تشمل قنوات التحكم المُخصَّصَة ما يلي:

١) **"قناة التحكم المخصصة المنفردة"** "Standalone Dedicated Control Channel (SDCCH)"

تحمل هذه القناة كلَّ ما تتبادله الشبكة مع الوحدة المتحركة من رسائل تحكم في طور التحضير لتبادل المعلومات الفعلية، أي قبل أن تخصص قناة TCH لتبادل المعلومات الفعلية بين الشبكة والمشترك. فعلى سبيل المثال، تسبق طورَ تبادل المعلومات الفعلية إجراءاتُ التوثق من هوية المشترك، والتأكد من كونه مخولاً باستخدام الخدمات التي يطلبها من الشبكة، والتعمية، والتحقق من صلاحية الجهاز للاستخدام. تُستخدم قناة SDCCH لتبادل المعلومات الخاصة بمثل هذه الإجراءات التحضيرية، فإذا اكتملت هذه الإجراءات بنجاح، حُررت قناة SDCCH وخصصت للمشترك قناة TCH لاستخدامها كحامل للمعلومات المتبادلة مع الشبكة.

يخصص النظام قناة SDCCH للمشترك بعد طلبه النفاذ أو الولوج إلى الشبكة، أي بعد إرسال المشترك إشعاراً بذلك عن طريق قناة طلب النفاذ RACH، سواءً كان هذا الطلب مبادرةً من المشترك أو تلبيةً منه لنداءٍ من طرف الشبكة. ويعلِم النظام المشتركَ بالموارد الفيزيائية المخصصة لهذه القناة عن طريق المعلومات التي تحملها قناة قبول طلب النفاذ (AGCH).

تتصف قناة SDCCH أيضاً بكونها ذات صلاحية أو فعالية عابرة ومحدودة زمنياً، فعلى سبيل المثال، إذا كانت هناك حاجة من قبل المشترك لإبلاغ النظام بتغيير مكان وجوده، تُخصص هذه القناة لتبادل المعلومات المتعلقة بالموقع الجديد، ثم تُحرَّر هذه القناة كي تُستخدَم للتحكم باتصال مشتركٍ آخر. يسري ذلك أيضاً عند رغبة المشترك بإجراء اتصالٍ ما، حيث تُحرر هذه القناة فور تخصيص قناة نقل معلومات TCH لخدمة المشترك. وبسبب ما سبق، أي كون هذه القناة فاعلة قبل إجراء الاتصال، توصف قناة SDCCH بأنها منفردة وغير مقترنة بالاتصال نفسه. يعزِّز هذا المفهومَ أيضاً أنها تُستخدم في حالاتِ تحكُّمٍ وتشويرٍ أخرى، لا علاقة لها بإجراء أي اتصال، مثل الإعلام عن تغيير مكان وجود المشترك كما ذكرنا، أو عند تسجيل المشترك في الشبكة فور تشغيل جهازه، أو لإرسال الرسائل النصية القصيرة.
تَستخدم هذه القناة الرزمة العادية، حيث ينقل حقلا المعلومات في هذه الحالة رسائل التشوير أو التحكم، أو المعطيات المُرسلة من قبل المشترك إلى الشبكة.

٢) **"قناة التحكم المقترِنة البطيئة"** "Slow Associated Control Channel (SACCH)"

عند تخصيص أية قناة للمشترك، سواء كانت هذه القناة للتشوير –كقناة SDCCH– أو لنقل المعلومات وتبادل الكلام –كقناة TCH– تكون هناك حاجةٌ للتأكد من أن المعلومات التي تصل عبر أيٍّ من هاتين القناتين صحيحة، لا يشوبها تغييرٌ في متنها أو فحواها نتيجة تأثير عوارض قناة الانتشار. لذا يجب تبادل المعلومات الخاصة بجودة القناة، مثل نتائج القياس الدوري التي

تقوم بها الوحدة المتحركة، على نحوٍ مرافقٍ وملازمٍ للمعلومات المحمولة على قناة SDCCH أو قناة TCH. ولما كانت هاتان القناتان مشغولتين، وجب توفر قناة أخرى (وهي قناة SACCH) ترسل عبرها الوحدةُ نتائج قياس جودة القناة، وتستخدمها الشبكة في الاتجاه المعاكس، أي في المسار الهابط، لإبلاغ الوحدة المتحركة بالآليات أو الإجراءات الضرورية لتحسين جودة الاتصال.

يكون توفر قناة SACCH ضرورياً طوال المدة التي تكون فيها أيٌّ من قناتي SDCCH أو TCH فاعلة، أي أن استخدامها يكون "مقترناً" دائماً بوجود قناةٍ أخرى فاعلة، وهذا ما يفسر اختيار سمة الاقتران "Associated" للدلالة عليها. أما صفة "بطيئة" ففيها دلالة على أن هذه القناة تنقل المعلومات بمعدَّلٍ منخفض، حيث يُخصص لها حيز زمني واحد فقط من بين 26 إطاراً متتابعاً (سنأتي على تفصيل ذلك لاحقاً). هذا ويحتاج إتمام كل رسالة ترسل على قناة SACCH إلى أربعة أحيازٍ زمنية مخصصة لها، ولما كان دورها يعادل 26 إطاراً، فإن اكتمال ارسال الرسالة يتطلب مدة تعادل 102 إطاراً زمنياً، أي 480 ms.
من أهم مهام هذه القناة –كماسبق الذكر– نقل تقارير القياسات الدورية التي تجريها الوحدة المتحركة حول جودة الإشارة المستقبَلة من المحطة المغذية ومن المحطات المجاورة، وكنا بيَّنا عند نقاشنا لقناة المعلومات العامة أن هذه التقارير تساعد النظام في اتخاذ القرارات المتعلقة بالمحطة الأنسب للاتصال بالوحدة المتحركة. يشتق النظام من هذه التقارير أيضاً القيم التي يجب على الوحدة المتحركة الإلتزام بها من ناحية مستوى طاقة البث، ومدة تقديم الإرسال الضرورية لضمان عدم تداخل المعلومات،.ومن ثم يُعلم الوحدة المتحركة بهذه القيم باستخدام قناة SACCH في المسار الهابط.

تستخدم هذه القناة الرزمة العادية لنقل المعلومات في كلا جهتي الاتصال.

٣) "قناة التحكم المقترنة السريعة" "Fast Associated Control Channel (FACCH)"

إن القناة الوحيدة المتاحة للتحكم أثناء انشغال الوحدة المتحركة باتصالٍ ما هي قناة SACCH، التي تحتاج كما ذكرنا إلى 480 ms لإتمام نقل متن رسالةٍ من رسائل التحكم. لذا، فهذه القناة غير مناسبة لنقل المعلومات عند وجود طارئ أو حاجةٍ ملحة لنقل رسائل التحكم بأقصى سرعة ممكنة، مثل تلك المتعلقة بضرورة تغيير الخلية أثناء الاتصال، إذ لا يمكن للنظام في مثل هذه الحالة أن ينتظر مدة طويلة حتى يكتمل دور الحيز الزمني المخصص لقناة SACCH.

يلجأ النظام في مثل هذه الحالات إلى إرسال معلومات التحكم باستخدام رزمةٍ عادية ضمن حيزٍ زمني مخصص لنقل المعلومات، بعبارةٍ أخرى، يقتطع أو يستعير النظام جزءاً من الموارد المخصصة لنقل المعلومات لينقل عليها رسائل أو أوامر تحكم. وحتى يتسنى للوحدة المتحركة معرفة ذلك، يميِّزُ النظام الرزمة المخصصة بمعلومات التشوير عن طريق قيمة البتَّين المجاورين لسلسلة الاختبار، والمخصصين للدلالة على إستعارة الرزمة لأغراض التحكم (انظر الشرح المتعلق بالرزمة العادية والشكل ٤-١٠).
تؤدي استعارة رزمة المعلومات لإرسال أوامر التحكم إلى فقدان جزءٍ مقداره 20 ms من سياق الكلام، وهذا لا يُلاحظ من قِبَل المستخدم نظراً لكون هذه المدة الزمنية أقصر من العتبة الزمنية الدنيا التي يمكن لحاسة السمع أن تميزها.
هناك أمرٌ آخر يجدر التنويه إليه فيما يتعلق باستعارة الرزمة العادية، فالتدقيق في بنية الرزمة يطرح تساؤلاً حول سبب الحاجة على

علامتين للاستعارة وعدم الاكتفاء بعلامة واحدة. يكمن الجواب على هذا التساؤل في أن عملية التفريق (التي سنشرحها في الفصل ٥) تسمح بنقل بتات خاصة بمعلوماتٍ مختلفة ضمن نفس الرزمة، وهذه المعلومات تتباين عن بعضها في كونها تشغل إما الترتيب الفردي أو الزوجي للبتات ضمن حقل المعلومات. لذا لا بد من وجود علامتين، تدل الأولى على استعارة البتات ذات الترتيب الفردي، بينما تدل الثانية على استعارة البتات ذات الترتيب الزوجي.

بذلك نكون قد أكملنا عرض أنواع القنوات الاعتبارية وأصناف الرزم التي تُستخدم كحامل للمعلومات الخاصة بكلٍّ منها. بقي أن نشير إلى الرزمة الرابعة حسب ترتيب الشكل ٤-٤، المعروفة باسم "Dummy Burst"، والتي نختار تعبير "رزمة المعلومات الوهمية أو الصورية" للدلالة عليها.
تُستخدم هذه الرزمة لشغل الأحياز الزمنية الفارغة أوالشاغرة التي لا تُنقل أثناءها أية معلومات من الشبكة إلى المشتركين، ويكمن الحافز لاستخدام هذه الرزمة في وجوب الحفاظ على مستوىً ثابتٍ لطاقة بث التردد المميز لكل محطة، حتى يتسنى للوحدات المتحركة قياس جودة إشارتها على نحوٍ مستمر. فإذا لم تكن هناك أية معلومات للإرسال خلال حيزٍ زمنيٍّ ما، شُغِل الحيز بهذه الرزمة.
تماثل هذه الرزمة في بنيتها الرزمة العادية، غير أن جزء المعلومات يُملأ بسلسلةٍ شبه عشوائية من البتات، تمثِّل معلوماتٍ وهمية.

٤-٥ توزيع القنوات الاعتبارية على القنوات الفيزيائية

ناقشنا في جزءٍ سابقٍ من هذا الفصل مفهوم القناة الفيزيائية والقناة الاعتبارية، وبيَّنّا أن القناة الفيزيائية تنشأ عن تكرار حيز زمني على تردد معين، بدورٍ يعادل ثمانية أحياز زمنية، أي مدة الإطار الزمني المعرَّف ضمن نمط تعدد النفاذ (TDMA). عرضنا أيضاً أنواع القنوات الاعتبارية وأجملنا مهامها الوظيفية، وتوضح من خلال النقاش أن هذه القنوات تحمل المعلومات على نحوٍ مجزأ، وأن المعلومات المجزأة ترسل متفرقةً ومتباعدةً زمنياً.
أشرنا كذلك إلى أن القناة الفيزيائية الواحدة يمكن أن تُشغل من قِبَل أكثر من قناة اعتبارية في آنٍ واحد، فعلى سبيل المثال، يمكن أن تتشارك قناتا BCCH و FCCH الاعتباريتان في شغل القناة الفيزيائية الناجمة عن تكرار الحيز الزمني ذاته، بحيث يحمل الحيز رقم "0" في الإطار رقم "n" رزمة المعلومات العادية الخاصة بقناة BCCH، وفي الإطار الذي يليه، أي في الإطار رقم "$n+1$"، يحمل الحيز نفسه معلومات قناة FCCH، ممثَّلةً برزمة ضبط التردد، وهكذا.

نعرض في هذا البحث لكيفية تشارك القنوات الاعتبارية في شَغل القنوات الفيزيائية المتاحة، وللقواعد والمبادئ التي تَحكُمُ وتَنْظم هذا التشارك. فمن الطبيعي أن تنسيقاً دقيقاً ومحكماً يجب أن يكون مهيمناً على تخاطب المحطة الثابتة مع عدد كبيرٍ من الوحدات المتحركة، يتغير عددها عشوائياً بدلالة الزمن، ولا يمكن التنبؤ بعدد المكالمات التي تجريها كلٌّ منها، ولا بطول أيٍّ من هذه المكالمات، ومن الطبيعي أيضاً أن هذا التنسيق يجب أن يؤدي إلى استثمار فعال للموارد الفيزيائية المتاحة.

استجابةً لهذا المطلب، تُعرِّف المواصفات المعيارية سبعة أنماطٍ محددة لكيفية شغل القنوات الاعتبارية لقناةٍ فيزيائيةٍ ما،

يُلَخِّص الجدول ٤-٣ هذه الأنماط، غير أن قراءته على النحو الصحيح تتطلب توضيحاً لبعض المسميات والاختصارات، التي نوجزها في ما يلي:

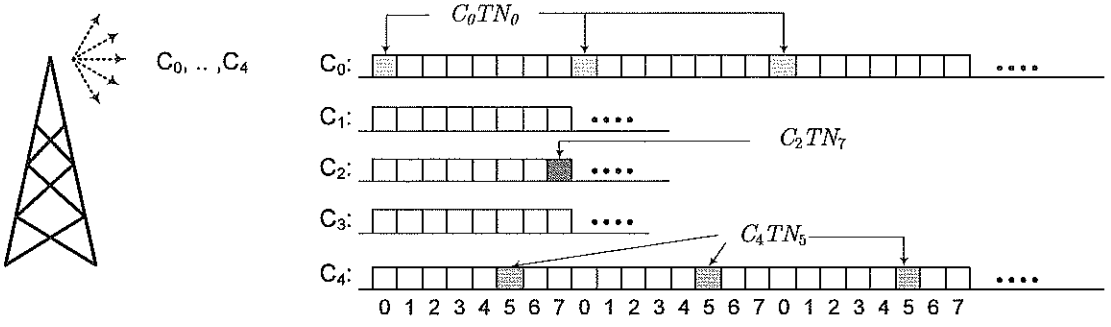
نمط التوزيع	ترتيب القنوات الإعتبارية
CC_1	TCH/F + FACCH/F + SACCH/TF
CC_2	TCH/H(0,1) + FACCH/H(0,1) + SACCH/TH(0,1)
CC_3	TCH/H(0) + FACCH/H(0) + SACCH/TH(0) +TCH/H(1)
CC_4	FCCH + SCH + BCCH + CCCH
CC_5	CCCH + SDCCH/4(0,..,3) + SACCH/C4(0,..,3)+ FCCH + SCH + BCCH
CC_6	BCCH + CCCH
CC_7	SDCCH/8(0,..,7) + SACCH/8(0,..7)

الجدول ٤-٣: أنماط توزيع القنوات الإعتبارية في نظام GSM ([٦] و [١٤]).

- يُشار إلى كل نمط اختصاراً بـ CC_n، حيث يختزل الحرفان تعبير "Channel Combination"، وحيث تدل القرينة n على رقم النمط.
- تندرج قنوات التحكم المشتركة، أي قناة النداء PCH، وقناة طلب النفاذ RACH، وقناة إقرار النفاذ AGCH، تحت رمز CCCH، الذي يشملها كلها.
- يشير حرف T إلى قناة معلومات (Traffic Channel)، وحرف F إلى قناةٍ ذات معدل كامل (Full-rate Channel)، وحرف H إلى قناةٍ ذات معدل نصفي (Half-rate Channel). فعلى سبيل المثال، يدل الرمز TCH/F على قناة معلومات ذات معدل تدفق كامل، كما يدل مصطلح SACCH/TH على قناةٍ مقترنة بقناة معلوماتٍ ذات معدل نصفي.
- إذا تتابعت أكثر من قناة اعتبارية من نفس النوع على شغل قناةٍ فيزيائية واحدة، وكانت كلٌّ من هذه القنوات الاعتبارية مخصصة لمشتركٍ معين، أطلق على كلٍّ من هذه القنوات مصطلح "قناة جزئية" "Sub-channel"، ودلَّت القرينة بين القوسين على رقم القناة. فعلى سبيل المثال، يدل تعبير TCH/H(0,1) على قناتي معلومات، كل منها ذات معدل تدفق نصفي، الأولى هي TCH/H(0)، والثانية هي TCH/H(1)، وهاتان القناتان تتعاقبان على شغل القناة الفيزيائية نفسها. على نحوٍ مشابه، يدل تعبير SDCCH/4(0,..,3) على أربع قنوات اعتبارية مخصصة، يمكن أن تُستخدم كل منها للتحكم باتصالٍ مختلف.
- يدل تعبير SACCH/C على قناةٍ مقترنة بقناة تحكم (SDCCH)، بينما يدل تعبير SACCH/T على قناة مقترنة بقناة معلومات (TCH).

- إضافةً إلى هذه التعريفات أو المسميات، تجب الإشارة إلى أن التجهيزات الخاصة بكل محطة تكون مُعَدَّةً لاستخدام عدد متفاوتٍ من القنوات الترددية، يتراوح بين قناةٍ واحدة وعددٍ أعظمي تحدده إمكانيات التجهيزات وحاجات التخطيط. يُشار إلى كل من هذه القنوات، أو بالأحرى إلى كلٍّ من الحوامل المركزية لهذه القنوات، بـ C_n، حيث يدل حرف C اختصاراً على كلمة "حامل" "Carrier". هذا وليست هناك أية علاقة بين قرينة الحامل n وبين القيمة الترددية لهذا الحامل، أو رقم القناة الترددية التي يمثلها وفق ترتيب القنوات المعتمد (ARFCN).

يُشار —وفق هذا التدوين– إلى التردد الذي ترسل عليه قناة BCCH (أي الحامل المميِّز أو الدَّال على المحطة الثابتة) بـ C_0. كما يُشار إلى كلٍّ من الأحياز الزمنية الثمانية المعرفة على كل قناةٍ ترددية بـ TN_m، حيث يختزل حرفا TN كلمتي "Timeslot Number". تبعاً لذلك، تتحدد أية قناة فيزيائية بالحامل C_n ورقم الحيز الزمني TN_m الذي تنشأ عن تكراره، وهذا يتيح الدلالة عليها اختصاراً بـ C_nTN_m. يوضح الشكل ٤-١٥ هذا المبدأ بافتراض أن المحطة مجهزة بمنظومة إرسال واستقبال تتيح استخدام خمسة ترددات مختلفة.



الشكل ٤-١٥: الدلالة على القنوات الفيزيائية برقم الحامل C_n ورقم الحيز الزمني TN_m.

بعد توضيح المسميات، نعود إلى الجدول ٤-٣ للتعريف بأهم أنماط توزيع القنوات الاعتبارية وكيفية شغلها للقنوات الفيزيائية. نبدأ بالنمط الأول CC_1 الذي يتيح تعاقب ثلاث قنوات اعتبارية على شغل قناة فيزيائية واحدة. هذه القنوات هي:

١) قناة لنقل المعلومات بمعدل كامل TCH/F.

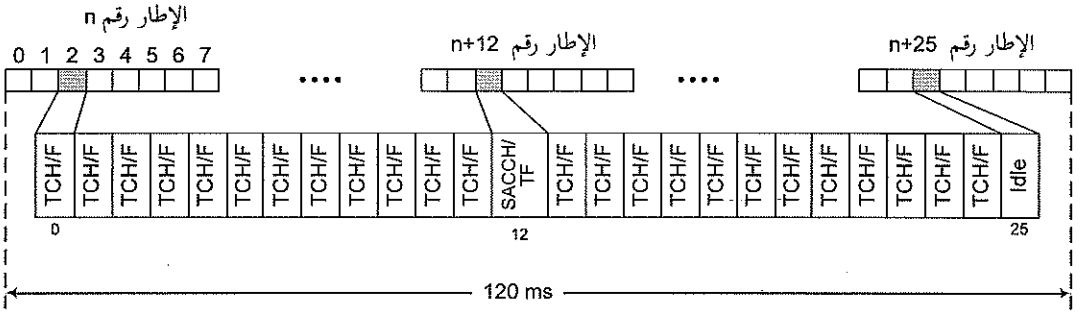
٢) قناة مقترنة SACCH/TF تنقل رسائل التحكم الخاصة بقناة المعلومات. وكنا أشرنا إلى أن كل قناة معلومات TCH أو قناة مخصصة SDCCH بحاجة إلى قناة مقترنة بها لإرسال نتائج قياس جودة القناة إلى المحطة الثابتة، ولتلقي بعض الأوامر أو رسائل التشوير من المحطة الثابتة.

٣) قناة مقترنة سريعة FACCH/F يمكن استخدامها لإرسال رسائل تحكم على نحوٍ طارئٍ وسريع. نذكِّر في هذا السياق أن هذه القناة يمكن أن تَشغَلَ أياً من الأحياز الزمنية عند الحاجة الماسة لنقل معلومات تحكُّم بين طرفي الاتصال، دون انتظار دور الحيز الحامل لقناة SACCH.

من الواضح أن هذا النمط، أي CC_1، مخصص لقناة نقل معلومات وليس لقناة تحكم، ومن الممكن أن يُعَرَّف على أي قناة فيزيائية باستثناء القناة C_0TN_0 المخصصة لقنوات التحكم حصراً.

يبين الشكل ٤-١٦ تتالي أو تعاقب القنوات الاعتبارية الثلاثة على شغل قناة فيزيائية، بافتراض أن القناة الفيزيائية ناجمة عن تكرار الحيز الزمني رقم "2". هذا التعاقب يحكمه دور الإطار المتعدد المؤلف من 26 إطاراً —في حالة قنوات المعلومات– والتسلسل المحدد للقنوات الاعتبارية. نلحظ من الشكل أن كل حيز من كل إطار يُشغل بقناة معلومات TCH، باستثناء الحيز ضمن الإطار رقم 12 الذي تشغله قناة SACCH، وباستثناء الحيز ضمن الإطار رقم 25، الذي يترك فارغاً لإتاحة الفرصة للوحدة المتحركة كي تجري القياسات الخاصة بإشارات المحطات المجاورة. هذا ولا نجد في الشكل ٤-١٦ حيزاً مخصصاً للقناة المقترنة السريعة FACCH، إذ يمكن لهذه القناة —كما أشرنا– أن تشغل أياً من الأحياز الزمنية عند الحاجة.

يتيح الشكل ٤-١٦ أيضاً حساب معدل نقل المعلومات على قناة TCH أو قناة SACCH، فالمدة المكافئة للإطار المتعدد هي $T_{multiframe} = 26 \times 4.615\text{ms} = 120\text{ms}$، وعدد الأحياز الزمنية المشغولة بقناة معلومات TCH هو 24. وإذا أخذنا بالحسبان أن كل رزمة من رزم المعلومات المحمولة على كلٍ من هذه الأحياز تتضمن 114 بتاً (انظر الشكل ٤-١٠)، أمكن حساب معدل نقل البيانات بالعلاقة: $R_{TCH} = 24 \times 114\,\text{bit}/120\text{ms} = 22.8\text{kbps}$.
على نحوٍ مماثل، يمكن حساب معدل نقل البيانات أو المعلومات على قناة SACCH، مع مراعاة أن هذه القناة تستخدم الرزمة العادية أيضاً. لذا تفضي الخطوات السابقة في هذه الحالة إلى: $R_{SACCH} = 1 \times 114\,\text{bit}/120\text{ms} = 0.95\text{kbps}$.



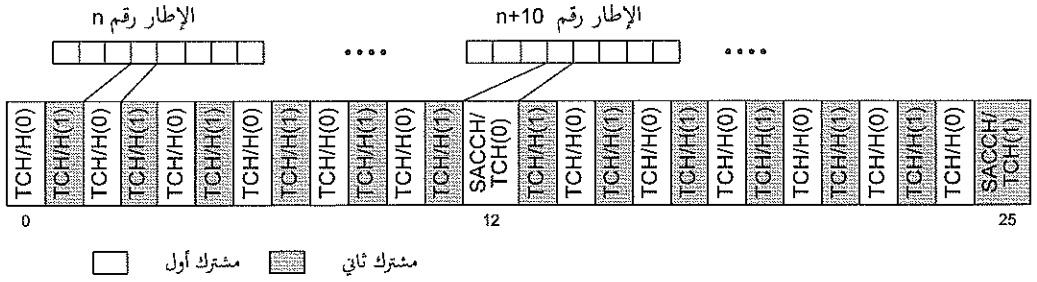
الشكل ٤-١٦: شغل القنوات الإعتبارية لقناة فيزيائية وفق النمط CC_1.

نشير أخيراً إلى أن الحيز الفارغ والحيز المشغول بقناة SACCH يتبادَلان الترتيب ضمن الإطار المتعدد، تبعاً لرقم القناة الفيزيائية الممثلة بـ TN_m، فإذا كانت القرينة m رقماً مفرداً كان رقم الحيز الفارغ 12، وشُغِل الحيز الأخير بقناة SACCH، أما إذا كانت القرينة m رقماً زوجياً، شُغل الحيزان كما هو مبينٌ في الشكل.
ننوه أيضاً إلى أن هذا النمط يُستخدم على النحو ذاته في المسار الصاعد أيضاً، حيث تقرأ المحطة الثابتة المعلومات على هذا الحيز —أي الحيز رقم 2 على تردد المسار الصاعد– حسب الترتيب أو التسلسل الذي شرحناه.

ننتقل الآن إلى النمط الثاني في الجدول، وهو CC_2، واستناداً إلى المسميات المصطلح عليها والتي شرحناها سابقاً، يتبين من الجدول أن هذا النمط مخصص لقنوات معلومات بمعدل نصفي، وأن قناتين فرعيتين تتعاقبان على شغل القناة الفيزيائية.

يوضح الشكل ٤-١٧ كيفية تتابع القنوات الاعتبارية على شغل القناة الفيزيائية المعرفة بالحيز الزمني رقم 3، ونلاحظ من الشكل أن القناة الفرعية TCH/H(0)، أي قناة النقل المخصصة لمعلومات مشتركٍ أول، تشغل الأحياز الزمنية من الأطر ذات الترتيب الزوجي، بينما تشغل القناة المخصصة لنقل معلومات المشترك الآخر الذي يُشارك في شغل الحيز الزمني ذاته، وهي القناة الفرعية رقم "1"، الأحياز الزمنية من الأطر ذات الترتيب الفردي. يبين الشكل أيضاً تخصيص الحيز الزمني من الإطار رقم 12 للقناة المقترنة بالقناة الفرعية "0"، وتخصيص الحيز الزمني من الإطار رقم 25 للقناة المقترنة بالقناة الفرعية الأخرى.

فيما عدا ذلك يشابه هذا النمط في استخدامه النمط الأول CC_1، وذلك من حيث إمكانية شغله لأي قناة فيزيائية باستثناء C_0TN_0، وفي كونه معرفاً على المسار الصاعد والهابط على النحو نفسه.

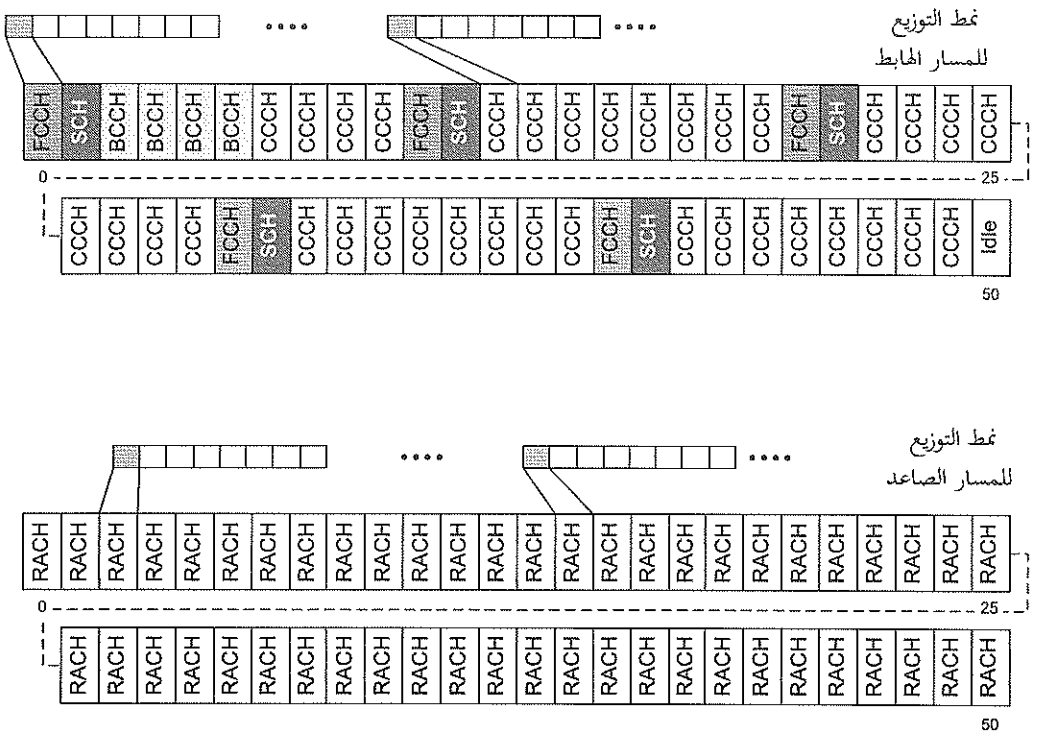


الشكل ٤-١٧: شغل القنوات الإعتبارية لقناة فيزيائية وفق النمط CC_2.

يشابه النمط الثالث (CC_3) النمط الثاني، فهو مخصص لقنوات معلومات بمعدل نصفي، غير أنه يختلف عنه من حيث كونه مخصصاً لنقل معلومات مستخدم واحدٍ حصراً، فبينما تُخصص كلٌّ من القناتين الفرعيتين TCH/H(0) وTCH/H(1) في نمط CC_2 لمستخدمٍ مختلف، تحمل كلا القناتان -في حالة CC_3- معلومات خاصة بنفس المشترك. تتباين هاتان القناتان الفرعيتان من حيث طبيعة المعلومات، إذ تُخصص إحداهما لنقل المعطيات الرقمية الممثِّلة للكلام، أما الأخرى فيمكن أن تنقل معطياتٍ خاصة بالمشترك نفسه (رسالة فاكس على سبيل المثال).

تختلف الأنماط الأربعة الباقية عن التي ذكرناها لغاية الآن من حيث كونها مخصصة لنقل معلومات خاصة بقنوات التحكم. لذا فهي تنظِم شغلَ القنوات الفيزيائية بدورٍ يكافئ الإطار المتعدد الخاص بقنوات التحكم، والذي يتكون من 51 إطاراً، وليس من 26 إطاراً (قارن الشكل ٤-٥ مع الشكل ٤-٦). فعلى سبيل المثال، ينظم النمط CC_4 تعاقب أربع قنوات اعتبارية على شغل قناة فيزيائية واحدة، وفق الترتيب أو التسلسل الزمني الموضح في الشكل ٤-١٨، والذي يتلخص وصفه كما يلي:

- يُشغل الحيز الزمني الأول TN_0 من الإطار رقم "0" من قِبَل قناة ضبط التردد FCCH.
- يعقب ذلك شغل الحيز الزمني الأول TN_0 من الإطار رقم "1" من قِبَل قناة ضبط الزمن SCH.



الشكل ٤-١٨: شغل القنوات الإعتبارية لقناة فيزيائية وفق النمط CC_4.

- تحمل الأحياز الأربعة التالية، أي الحيز رقم TN_0 من الأطر ذات الأرقام 2 إلى 5، المعلومات الخاصة بقناة المعلومات العامة BCCH.
- يتلو ذلك أربعة أحياز من أربعة أطر متعاقبة، يحمل كل منها –أي الأحياز– معلومات خاصة بقنوات التحكم المشتركة PCH وAGCH، ويكون ترتيب شغل القناتين وفق تسلسل محدد يمكن الرجوع إلى تفاصيله في [١٤].
- بعد ذلك، يحين دور قناة ضبط التردد مرة أخرى، وتتعاقب قنوات التحكم المذكورة –باستثناء قناة BCCH– على شغل القناة الفيزيائية وفق التسلسل الموضح في الشكل ٤-١٨ حتى بلوغ الحيز TN_0 في الإطار رقم 49.
- يبقى الإطار رقم "50" فارغاً، لا ترسل المحطة ضمنه معلومات محددة ويُشغلُ برزمة المعلومات الوهمية.

هناك خاصة فارقة لهذا النمط، وهو أنه لا يمكن أن يُعرَّف إلا على القناة الفيزيائية المكونة بتكرار الحيز الزمني الأول على التردد الرئيسي، أي القناة C_0TN_0. هذا التقييد، والذي يسري على بعض الأنماط الأخرى أيضاً، يفيد في تسهيل متابعة الوحدة الثابتة لقراءة المعلومات الأساسية المتعلقة بالشبكة كما سنرى لاحقاً.

يجب التنويه أيضاً إلى أن معلومات التحكم العامة والمعلومات الخاصة بضبط التردد والزمن ترسل باستمرار من قبل المحطة، بغض النظر عن وجود مشتركين ضمن الخلية أو عدمه. أما المعلومات المتعلقة بالقنوات المشتركة، أي معلومات النداء أو الإشعار

بقبول النفاذ، فترسل عند الحاجة، وإذا لم يكن هناك أي نداء فإن الحيز الزمني يملأ برسالة نداء فارغة، أي دون تحديد أي هوية للوحدات المتحركة ضمن متن الرسالة.

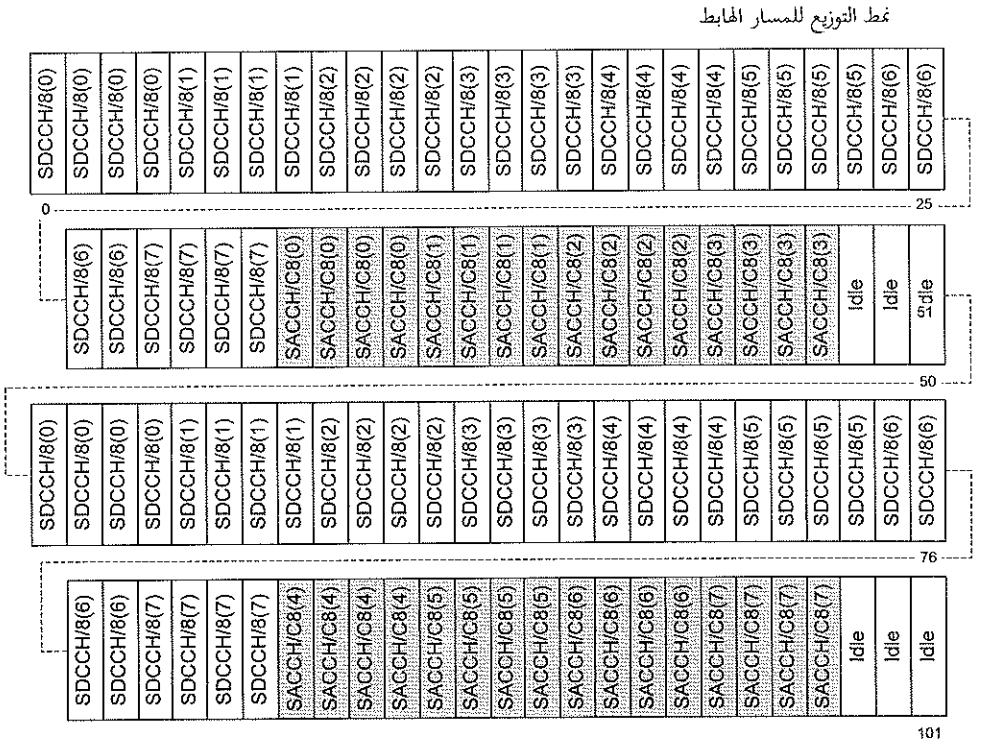
ينطبق الوصف الذي ذكرناه على تسلسل القنوات في المسار الهابط، وهذا يجعل الوحدة المتحركة التي تتلقى رقم النمط ضمن المعلومات الأساسية، على درايةٍ بترتيب وماهية المعلومات المتتابعة، مما يضمن قراءة هذه المعلومات على نحوٍ صحيح.
أما في جهة المسار الصاعد، فإن الحيز الزمني TN_0 ضمن الإطار المتعدد يكون مخصصاً لقناة طلب النفاذ RACH حصراً، أي أن المحطة الثابتة "تصغي" أثناء مدة الحيز الأول من كل إطار إلى الطلبات المحتملة للنفاذ إلى الشبكة. هذه القناة الاعتبارية –قناة RACH– تكون متاحةً على نحو مستمر، بغض النظر عن عدد الوحدات المتحركة الموجودة ضمن نطاق تغطية أو تغذية الخلية، وبغض النظر عن الوقت أو اللحظة المحتملة لطلب كلٍ منها. وكما ذكرنا من قبل، إذا نشأ تعارض بسبب طلب أكثر من وحدة للنفاذ في آن واحد، ومن ثم وصلت حزمتا طلب نفاذٍ من مشتركَيْن مختلفين ضمن حيز زمني واحد، فإن المحطة الثابتة تتجاهل كلا الطلبين، وعندما لا تستلم أيّ من الوحدتين رسالة إقرار أو رفض فإن كلاً منهما تعاود إرسال الطلب بعد مدة زمنية عشوائية تبعاً لبروتوكول Slotted-ALOHA.

نلحظ من تركيب أو تكوين هذ النمط (أي النمط CC_4) أنه يحدد تعاقب قنوات المعلومات العامة وقنوات التحكم المشتركة، غير أنه لا يتضمن ذكراً لأيٍّ من القنوات المخصصة (SDCCH) أو القنوات المقترنة (SACCH)، رغم ما سبق بيانه من أن أي اتصالٍ لا يمكن أن يكتمل دون هاتين القناتين الاعتباريتين، بسبب أهمية الدور الذي تلعبه قناة SDCCH في تهيئة الاتصال، وقناة SACCH في مراقبة جودته. لذا يُخصص لهاتين القناتين قناة فيزيائية أخرى منفصلة، تتعاقبان على شغلها وفق نمطٍ خاص وهو النمط CC_7 في الجدول ٤-٣، لذا نوضح في ما يلي بنية هذا النمط.

نقرأ بدايةً من الاسم المدون في الجدول أن هذا النمط ينظِم تعاقب ثماني قنوات اعتبارية مخصصة ((SDCCH/8(0,..,7))، وثماني قنوات أخرى مقترنة ((SACCH/8(0,..,7))، على شغل قناة فيزيائية واحدة. هذا يعني أن هذا النمط يتيح التحكم بثمانية اتصالات مختلفة، تخص ثمانية مشتركين مختلفين، في آن واحد. يؤكد هذا الترتيب والتنسيق مرةً أخرى حرصَ مصممي النظام على استثمار القنوات الفيزيائية المتاحة على نحوٍ أمثل، إذ أن حجم المعلومات أو معدل تدفق البيانات الخاص بطور إنشاء المكالمة يكون قليلاً مقارنةً بمعدل تدفق البيانات أثناء إجراء الاتصال، لذا تنتفي الحاجة إلى شغل حيز زمني من كل إطارٍ متتابعٍ بقناة مخصصة (SDCCH)، ومن ثم يمكن أن تتشارك أكثر من قناة في شغل القناة الفيزيائية نفسها –أي الحيز الزمني المتكرر– على نحو عابر، تحدده الحاجة أو يفرضه عدد المكالمات الجارية.

يسري هذا المبدأ على القناة المقترنة (SACCH) أيضاً، إذ ليست هناك حاجة لإرسال نتائج قياس جودة الإشارة في كل إطار. وقد سبق عند شرح النمط الأول CC_1، أن قناة SACCH المقترنة باتصال جارٍ تشغل واحداً من بين 26 حيزاً زمنياً ضمن القناة الفيزيائية، وترسل معلومات أو بيانات بمعدل مقداره 0.95 kbps، مقارنة مع 22.8 kbps للبتات الممثلة للمعلومات الأساسية أو الصرفة.

يوضح الشكل ٤-١٩ الترتيب أو التسلسل الزمني لشغل الإطار المتعدد وفق هذا النمط، ويتبين عند إمعان النظر في هذا الشكل أن الدور الأساسي لتكرار النمط يكتمل بعد إطارين متعددين متعاقبين، أي بعد 102 إطاراً، مرقمةً من "0" إلى "101".



الشكل ٤-١٩: شغل القنوات الإعتبارية لقناة فيزيائية وفق النمط CC_7 في المسار الهابط.

نلحظ من الشكل أيضاً أن شغل القناة الفيزيائية يكون وفق مجموعاتٍ تتكون كل منها من أربعة أحياز متتالية، وتختص بالتحكم أو بتنسيق اتصال مختلفٍ، حيث تُشغل الأحياز الأربعة الأولى من قبل القناة المخصصة للتحكم باتصال المشترك الأول، تتبعها مجموعة مخصصة لاتصال المشترك الثاني، وهكذا. وبعد اكتمال المجموعات الثمانية الخاصة بقنوات SDCCH يحين دور المجموعات الرباعية المخصصة للقنوات المقترنة (SACCH)، حيث تتتابع أربع مجموعاتٍ للمشتركين الأربعة الأوائل، يعقبها ثلاثة أحياز فارغة تتيح فاصلاً زمنياً لإجراء بعض القياسات. هذه الأحياز الفارغة تشكل نهاية الإطار المتعدد الأول، الذي يتلوه الإطار المتعدد الثاني والمكَمِّل للدور.

تُشغل القناة الفيزيائية ضمن طور الإطار المتعدد الثاني وفقاً للنسق نفسه الذي كان في الإطار المتعدد السابق، باستثناءِ أنَّ مجموعات القنوات المقترنة –أي (SACCH/8(5,..,8– تكون مخصصة للمشتركين الأربعة الباقين.

نَخلُص مما سبق إلى أن دور القناة الاعتبارية المخصصة SDCCH وفقاً لهذا النمط يعادل ضعف دور القناة المقترنة SACCH، حيث تشغل كل قناة SDCCH ثمانية أحياز زمنية في كل 102 إطاراً متتابعاً، بينما تشغل قناة SACCH أربعة أحياز فقط.

يجب التنويه أيضاً إلى أن تتابع القنوات الاعتبارية الثمانية لا يقتضي أو يستلزم وجود ثماني اتصالات فاعلة أو جارية، فهذه القنوات تُبَثُّ من قِبَلِ المحطة الثابتة على نحوٍ مستمر، وهي متاحة عند الحاجة. لذا، قد تكون مشغولة كلها أو بعضها، وقد لا يكون أياً منها مشغولاً، حيث يتبع ذلك عدد الاتصالات الجارية في لحظةٍ ما.

قد يُطرح سؤال أيضاً حول جدوى إتاحة سعةٍ للتحكم بثماني اتصالات مع العلم بأنه في حالة وجود حامل واحد يكون الحيز الأول TN_0 وفق النمط CC_1 مشغولاً بالقنوات العامة حصراً، كما يكون حيزٌ ثانٍ مشغولاً وفق النمط CC_7 حصراً، ومن ثم لا يمكن أن يكون هناك أكثر من ستة اتصالات قائمة في آن واحد. يكمن الجواب على هذا التساؤل في أن هذا النمط يتيح سعةً مستقلةً لقناتي SDCCH و SACCH عندما يتاح أكثر من تردد واحد ضمن خلية واحدة، ومن ثم يكون هذا النمط موجوداً لتلبية حاجات التحكم بالاتصالات المختلفة الشاغلة للقنوات الفيزيائية على الحوامل المختلفة (سيتوضح هذا الإشكال عند شرح الشكل ٤-٢٠). وإذا كانت الخلية ذات سعة كبيرة، وبلغ عدد الترددات 4 مثلاً، فمن الممكن أن تخصص قناة فيزيائية ثانية لشغلها وفق هذا النمط.

بقي أن ننوه إلى أنه نظراً لكون كل من قناتي SDCCH و SACCH مزدوجة الاتجاه، فإن إتاحتهما كلتيهما على المسار الصاعد مطلوب أيضاً. يقتضي ذلك وجود ترتيب خاص للمسار الصاعد، مشابه لما يصفه الشكل ٤-١٩، مع اختلافٍ في تسلسل القنوات المقترنة.

استكمالاً لتوضيح مبدأ التوزيع نورد في ما يلي مثالاً لتشارك الأنماط CC_1 و CC_4 و CC_7 في شغل القنوات الفيزيائية المتاحة في خليةٍ ما، ونفترض في هذا المثال وجود أكثر من حاملٍ ترددي، وأن النمط CC_7 معرف على القناة الفيزيائية C_0TN_2.

تتوزع القنوات الاعتبارية على القنوات الفيزيائية في هذه الحالة وفق الشكل ٤-٢٠، الذي يبين نوع القناة الاعتبارية التي تَشغل كل حيز ضمن الإطار الزمني الذي يتكرر شاقولياً، ويعرض كيفية شغلِ القنوات الفيزيائية المعرفة على الحامل المميز C_0 في المسارين الصاعد والهابط، وذلك ضمن الأطر "0" إلى "50".

يوضح الشكل شَغلَ القناة الفيزيائية الأولى في المسار الهابط -أي الحيز الزمني TN_0- وفق النمط CC_4، بدورٍ يعادل 51 إطاراً، وشَغلَ القناة الثانية -الحيز الزمني TN_1- وفق نمط قنوات نقل المعلومات CC_1، بدورٍ يعادل 26 إطاراً. أما القناة الفيزيائية الثالثة (C_0TN_2) فهي مستخدمة لنقل معلومات التحكم وفق النمط CC_7 وبدورٍ يكافئ 102 إطاراً زمنياً (نذكر بأن الشكل يعرض الأطر الـ 51 الأولى فقط).

نقرأ من الشكل أيضاً أن القنوات الخمسة المتبقية مشغولة وفق النمط CC_1، ما يعني إتاحة 6 قنوات فيزيائية للإتصال على هذا الحامل الترددي.

يشابه التوزيع على المسار الصاعد ما شرحناه، مع بعض الاختلافات التي تتجلى في كون القناة الفيزيائية الأولى مخصصة لقناة طلب النفاذ RACH حصراً ، وأن ترتيب القنوات الإعتبارية على القناة الفيزيائية C_0TN_2 مختلف عن نظيره في المسار الهابط.

نمط التوزيع للمسار الهابط

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	FCCH	T	SDCCH/8(0)	T	T	T	T	T
	SCH	T	SDCCH/8(0)	T	T	T	T	T
	BCCH	T	SDCCH/8(0)	T	T	T	T	T
	BCCH	T	SDCCH/8(0)	T	T	T	T	T
	BCCH	T	SDCCH/8(1)	T	T	T	T	T
	BCCH	T	SDCCH/8(1)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SDCCH/8(1)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SDCCH/8(1)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SDCCH/8(2)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SDCCH/8(2)	T	T	T	T	T
	FCCH	T	SDCCH/8(2)	T	T	T	T	T
	SCH	T	SDCCH/8(2)	T	T	T	T	T
12	CCCH	A	SDCCH/8(3)	I	A	I	A	I
	CCCH	T	SDCCH/8(3)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SDCCH/8(3)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SDCCH/8(3)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SDCCH/8(4)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SDCCH/8(4)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SDCCH/8(4)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SDCCH/8(4)	T	T	T	T	T
	FCCH	T	SDCCH/8(5)	T	T	T	T	T
	SCH	T	SDCCH/8(5)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SDCCH/8(5)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SDCCH/8(5)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SDCCH/8(6)	T	T	T	T	T
25	CCCH	I	SDCCH/8(6)	A	I	A	I	A
	CCCH	T	SDCCH/8(6)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SDCCH/8(6)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SDCCH/8(7)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SDCCH/8(7)	T	T	T	T	T
	FCCH	T	SDCCH/8(7)	T	T	T	T	T
	SCH	T	SDCCH/8(7)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SACCH/C8(0)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SACCH/C8(0)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SACCH/C8(0)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SACCH/C8(0)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SACCH/C8(1)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SACCH/C8(1)	T	T	T	T	T
38	CCCH	A	SACCH/C8(1)	I	A	I	A	I
	CCCH	T	SACCH/C8(1)	T	T	T	T	T
	FCCH	T	SACCH/C8(2)	T	T	T	T	T
	SCH	T	SACCH/C8(2)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SACCH/C8(2)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SACCH/C8(2)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SACCH/C8(3)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SACCH/C8(3)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SACCH/C8(3)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	SACCH/C8(3)	T	T	T	T	T
	CCCH	T	Idle	T	T	T	T	T
	CCCH	T	Idle	T	T	T	T	T
50	Idle	T	Idle	T	T	T	T	T

رقم الحيز الزمني

رقم الإطار الزمني

T: TCH

A: SACCH

I: Idle

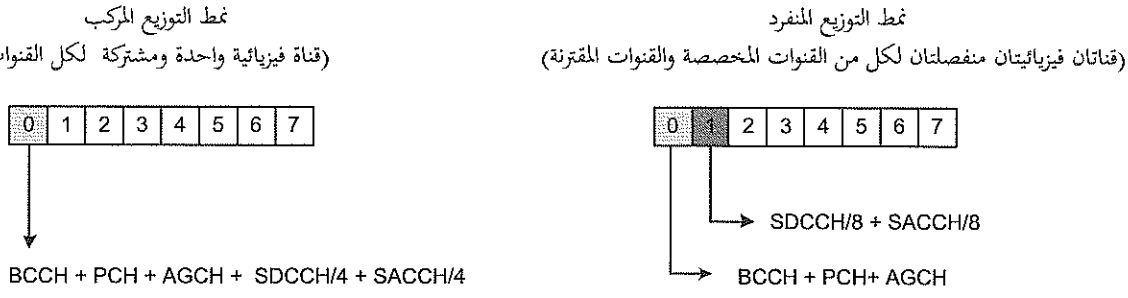
نمط التوزيع للمسار الصاعد

0	1	2	3	4	5	6	7
RACH	T	SACCH/C8(5)	T	T	T	T	T
RACH	T	SACCH/C8(5)	T	T	T	T	T
RACH	T	SACCH/C8(5)	T	T	T	T	T
RACH	T	SACCH/C8(5)	T	T	T	T	T
RACH	T	SACCH/C8(6)	T	T	T	T	T
RACH	T	SACCH/C8(6)	T	T	T	T	T
RACH	T	SACCH/C8(6)	T	T	T	T	T
RACH	T	SACCH/C8(6)	T	T	T	T	T
RACH	T	SACCH/C8(7)	T	T	T	T	T
RACH	T	SACCH/C8(7)	T	T	T	T	T
RACH	T	SACCH/C8(7)	T	T	T	T	T
RACH	T	SACCH/C8(7)	T	T	T	T	T
RACH	A	Idle	I	A	I	A	I
RACH	T	Idle	T	T	T	T	T
RACH	T	Idle	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(0)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(0)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(0)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(0)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(1)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(1)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(1)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(1)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(2)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(2)	T	T	T	T	T
RACH	I	SDCCH/8(2)	A	I	A	I	A
RACH	T	SDCCH/8(2)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(3)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(3)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(3)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(3)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(4)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(4)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(4)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(4)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(5)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(5)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(5)	T	T	T	T	T
RACH	A	SDCCH/8(5)	I	A	I	A	I
RACH	T	SDCCH/8(6)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(6)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(6)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(6)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(7)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(7)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(7)	T	T	T	T	T
RACH	T	SDCCH/8(7)	T	T	T	T	T
RACH	T	SACCH/C8(0)	T	T	T	T	T
RACH	T	SACCH/C8(0)	T	T	T	T	T
RACH	T	SACCH/C8(0)	T	T	T	T	T
RACH	T	SACCH/C8(0)	T	T	T	T	T

الشكل ٤-٢٠: مثال على توزيع القنوات الإعتبارية يجمع الأنماط CC_1 و CC_4 و CC_7.

يُطلق على أسلوب شغل القنوات الفيزيائية وفق النمط CC_7 اسم "النمط المنفرد أو غير المركب" وذلك لانفراد القنوات المقترنة والمخصصة بشغل قناة فيزيائية منفصلة، وهذا الأسلوب أو النمط هو الأكثر استخداماً في الخلايا ذات السعات المتوسطة أو الكبيرة، أما في حالة الخلايا ذات السعات الضئيلة، والتي لا تتطلب أكثر من حامل ترددي واحد، فإن كل قنوات التحكم تتشارك في شغل القناة الفيزيائية نفسها، وهي القناة C_0TN_0 حصراً. يكون هذا التشارك وفق نمط التوزيع CC_5 الخامس في الجدول ٤-٣، والذي يسمى لهذا السبب بـ "النمط المركّب" "Combined Combination" (انظر الشكل ٤-٢١).

تخضع بنية هذا النمط والأنماط الأخرى المتبقية لنفس المبادئ العامة الذي شرحناها، لذا لن نتعرض لها بتفصيلٍ أكثر، ونحيل القارئ المهتم إلى المواصفات المعيارية [١٤] لقراءة المزيد حول هذا الموضوع.



الشكل ٤-٢١: توضيح الفرق بين نمط التوزيع المنفرد ونمط التوزيع المركّب.

نختم عرضنا لأنماط التوزيع ببعض الملاحظات الإضافية المتعلقة بشغل القنوات الفيزيائية من الناحية العملية:

- الأنماط المذكورة في الجدول ٤-٣ محددة وثابتة وملزمة لمشغلي الشبكات، وبدون هذا الالتزام والتقييد لا يمكن للوحدات المتحركة أن تعرف ماهية المعلومات التي تبثها المحطة الثابتة.
- عند إنشاء أية محطة ثابتة وتشغيلها، أي إدراجها ضمن بنية الشبكة القائمة أو الحية، يختار مهندسو الإنشاء -أثناء طور التجهيز- نمط التوزيع المناسب لكل حيز، حسب معطيات السعة ونتائج التخطيط، وحسب عدد الترددات المتاحة. فإذا أُدخلت المحطة ضمن نطاق الشبكة الحية وصارت فاعلة، بقي النمط المعرف لكل حيز زمني فاعلاً وصالحاً، ولا يتغير إلا إذا قام المهندسون بذلك (عند زيادة سعة المحطة مثلاً).
- يُعرَّف نمط التوزيع لكل حيز زمني -أو بالأحرى لكل قناة فيزيائية- على المحطة الثابتة حصراً، ويكون هذا التوزيع جزءاً من المعلومات العامة التي تبثها المحطة حول الموارد المتاحة للاستخدام. أما الوحدات المتحركة، فهي تلتزم بنمط التوزيع الخاص بالمحطة التي هي على اتصال بها أو في مجال تغذيتها، فإذا انتقلت الوحدة إلى خلية أخرى، التزمت بنمط التوزيع المتاح في الخلية الجديدة، والذي تُبلَّغُ به عند قراءة المعلومات العامة على قناة BCCH.
- لا يمكن أن تعرف بعض أنماط التوزيع، مثل النمط CC_4 والنمط المركب CC_6، إلا على القناة C_0TN_0.

- تُختار أنماط التوزيع في المحطة حسب السعة والحاجة، وحسب توصيات مصنعي التجهيزات، وقد يتطلب توزيع القنوات الخاصة بالتحكم عملية تخطيط منفصلة عن تخطيط الشبكة العامة.

٤-٦ أمثلة عن مهام القنوات الإعتبارية

٤-٦-١ المعلومات العامة التي تبثها المحطة عن الشبكة

أشرنا في أكثر من موضع ضمن هذا الفصل إلى أن الوحدة المتحركة تستقي معلوماتٍ تفصيلية عن الشبكة عبر قراءة فحوى أو مضمون الرسائل التي تحملها قناة المعلومات العامة BCCH. ونوّهنا أيضاً إلى أنه بدون هذه المعلومات لا تكون الوحدة قادرة على إكمال أي إجراء يتعلق بأي نوعٍ من أنواع الاتصال مع الشبكة، فهذه المعلومات تشمل هوية الشبكة، والترددات التي تتيحها المحطة للاستخدام، إضافةً إلى المحددات الناظمة لعملية الإرسال والاستقبال، وكل هذه التفاصيل ستكون مبهمةً للوحدة المتحركة، إذا لم تستطع قراءة المعلومات على قناة BCCH. لذا، ولأهمية الدور الذي تلعبه هذه المعلومات، نعرض في ما يلي بعض الأمثلة عنها بقصد التعريف بطبيعتها ومبادئ تصنيفها.

تصنف المواصفات المعيارية لنظام GSM طبيعة أو ماهية المعلومات التي تبثها المحطة من الناحية الوظيفية إلى 13 صنفاً، يشمل كل صنفٍ بعض الموسطات التي تُبَثُّ مجتمعةً ضمن رسائلَ تحكم ذات بنيةٍ محددة. لذا، يُشار إلى المعلومات التي يرسلها النظام برقم الصنف الذي تتبع له، فيقال على سبيل المثال: "معلومات النظام من الصنف الأول" أو "معلومات النظام من الصنف الثاني"، وهكذا. يوافق هذا التعبير مصطلحَ "System Information Type x"، حيث يدل الرمز "x" على رقم الصنف.

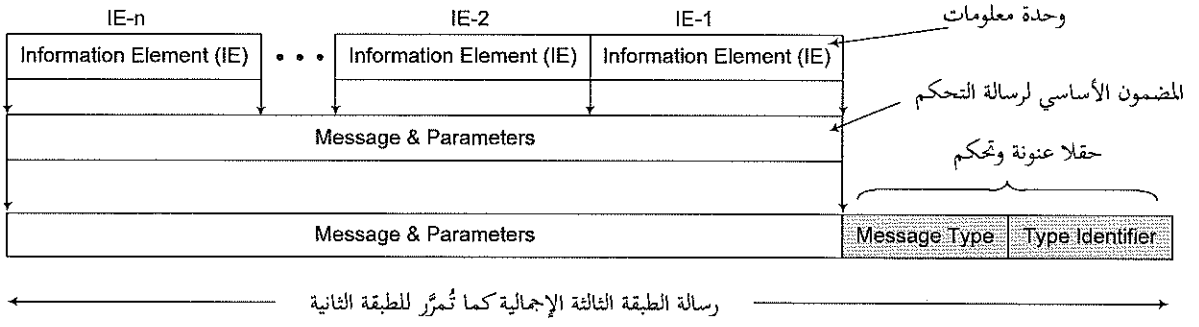
يتطلب إرسال أية رسالة تابعة لصنف من الأصناف مجموعة من الأحياز زمنية، تتوزع على أكثر من إطارٍ متعدد، ما يعني أن اكتمال بعض الرسائل قد يتطلب تعاقب أضعاف العدد 51 من الأطر المنفردة أو البسيطة (انظر الشكل ٤-١٨). ترسل المعلومات إذاً متفرقةً ضمن مجموعاتٍ، فيُرسل على سبيل المثال جزءٌ من معلومات النظام من الصنف $x = m$، يتلوها جزءٌ من معلومات الصنف $x = n$، وهكذا. ويتبع ترتيبُ المعلومات المرسلة تسلسلاً محدداً تبيِّنه المواصفات المعيارية [٩].

تتعلق طبيعة المعلومات التي تنقلها قناة BCCH على نحوٍ أساسي بمحدداتٍ تحكُمُ عمل النظام من حيث توزيع الترددات، أو الآليات الناظمة للنفاذ أو الولوج إلى الشبكة، أو الأساليب المتقدمة للتحكم بإرسال واستقبال الإشارة. لذا تصدر هذه المعلومات عن مكونات الشبكة المتحكمة بأدائها والمسؤولة عن تنسيق استخدام الموارد المتاحة فيها، وهي المقسم (أو مركز التبديل) ووحدة التحكم بالمحطات الثابتة (انظر الفصل ٦). يعني ذلك أن المحطة الثابتة ليست هي مصدر رسائل ومعلومات التحكم، وأن دورها -أي المحطة- يقتصر في كثيرٍ من الحالات على نقلٍ أو تمرير رسائل ومعلومات التحكم من الشبكة إلى الوحدات المتحركة.

يحكم تبادل الرسائل على الرابط الراديوي منظومة بروتوكولات محددة، تشمل من الناحية الوظيفية ثلاث طبقات

(انظر الفصل ٧)، تسمى الثالثة منها "الطبقة الثالثة للمنفذ الراديوي" "Radio Interface Layer 3 (RIL3)". هذه الطبقة هي المعنية بإدارة موارد وخدمات الشبكة، لذا تتولى البروتوكولات التي تقع ضمن هذه الطبقة صَوغَ رسائل التحكم التي يجري تبادلها بين الوحدات المتحركة والشبكة. بسبب ذلك، يُطلق على جميع رسائل التحكم اصطلاحاً اسم "رسائل الطبقة الثالثة" "Layer-3 Messages".

يوضح الشكل ٤-٢٢ البنية النوذجية لأية رسالة من رسائل الطبقة الثالثة، حيث تشمل هذه البنية العديد من "وحدات المعلومات" "Information Elements (IE)"، تشمل كلٌ منها –أي الوحدات– جزءاً من فحوى الرسالة يتمثل بموسطٍ واحدٍ أو عدة موسطات، وذلك تبعاً لمضمون ومهام الرسالة التي تمثلها هذه الوحدات. تشمل بنية الرسالة أيضاً حقلي عنونة وتحكم (أو "بادئة" "Header") يحددان نوع المعلومات التي تحملها، ونوع البروتوكول الذي ينسق هذه المعلومات.
تتباين وحدات المعلومات ضمن الرسالة الواحدة من ناحية طولها (أي عدد "البايتات" "Octets" التي تتضمنها) ومن ناحية كونها جزءاً أساسياً أو خيارياً من الرسالة. كما تتفاوت الرسائل من ناحية مهامها وطولها الإجمالي، وفي ذلك تفصيل مسهب يمكن الرجوع إليه في [٩] و [١٠].
نظراً لطول هذه الرسائل (قد يصل طول الرسالة الواحدة إلى 251 بايتاً) يجري عرض فحواها عادةً باتباع تسلسل شاقولي للبايتات التي تتكون منها، وذلك على النحو الذي يبينه الشكل ٤-٢٣، الذي نقرأ منه أيضاً كيفية توزع الموسطات المختلفة ضمن وحدة المعلومات.

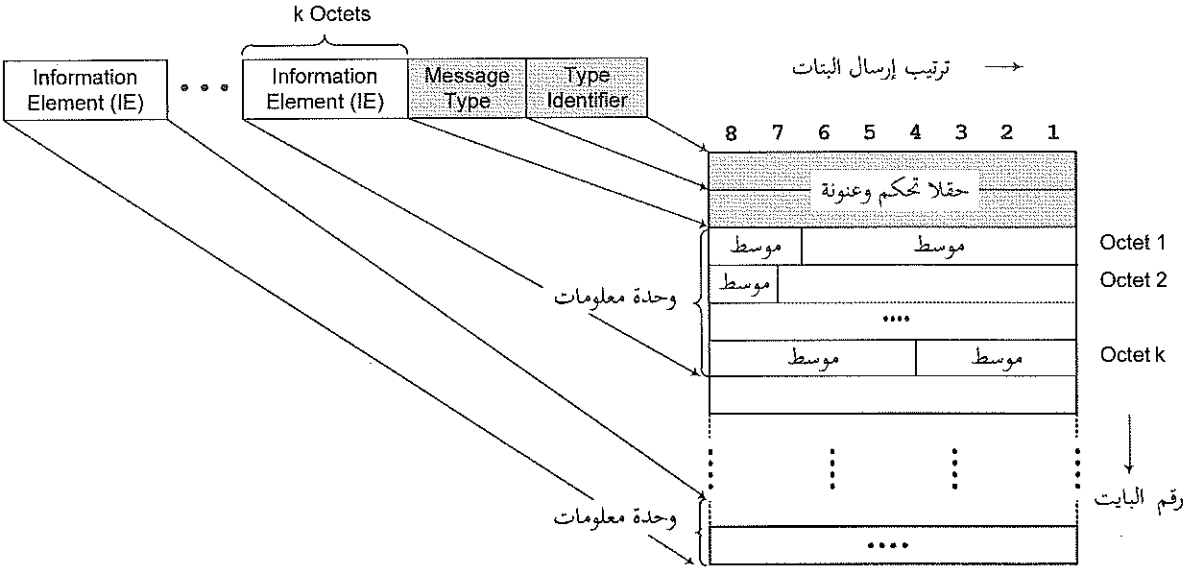


الشكل ٤-٢٢: البنية النموذجية المبسطة للرسائل التي يجري تبادلها على الرابط الراديوي ضمن الطبقة البروتوكولية الثالثة.

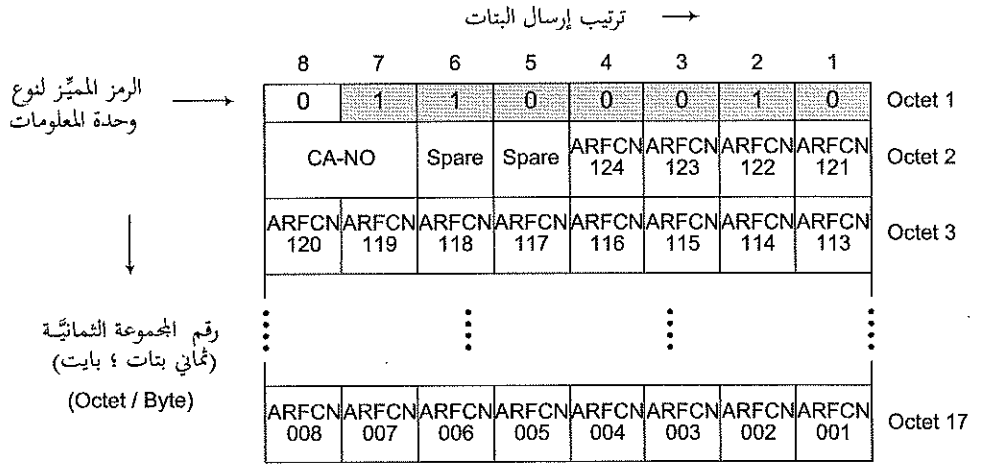
تُنقل المعلومات التي تحملها قناة BCCH ضمن رسائل الطبقة الثالثة، حيث تمثل هذه المعلومات جزءاً من مجموعة المعلومات المتعلقة بالتحكم. لذا نعرض في ما يلي لبعضٍ من وحدات المعلومات والموسطات المهمة، والتي اخترناها كأمثلةٍ لتوضيح بعض مهام الرسائل التي تحملها قناة BCCH.

- وحدة المعلومات الواصفة للقنوات الترددية المتاحة "Cell Channel Description IE" (انظر الشكل ٤-٢٤): تشمل هذه الوحدة أهم المعلومات المتعلقة بالقنوات الترددية المتاحة في الخلية، من ذلك النطاق الترددي المستخدم في المحطة،

الذي تحدده قيمة الموسط CA - NO المؤلف من بتّين، فإذا كانت قيمتهما "00" عرفت الوحدة المتحركة أن النطاق الترددي المستخدم هو GSM-900، على نحوٍ مشابه، تدل القيمة "01" على النطاق الخاص بـ E-GSM، والقيمة "10" على النطاق الخاص بـ GSM-1800. إضافةً إلى ذلك، تشمل الوحدة مصفوفةً من البتات، متسلسلة وفق نمط محدد، تدل قيمة كل منها على كون القناة الترددية التي تمثلها متاحةً في المحطة أم لا. فعلى سبيل المثال، إذا كان البت رقم n يمثل القناة الترددية $ARFCN_n$ فإن قيمة "0" لهذا البت تعني أن القناة غير متاحة للاستخدام ضمن هذه الخلية، أما قيمة "1" فتدل على أن القناة متاحة.



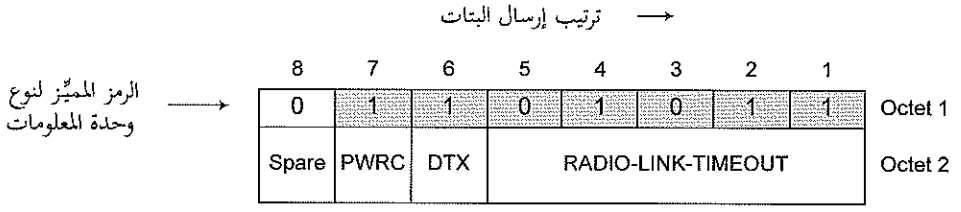
الشكل ٤-٢٣: البنية العامة أو النموذجية لرسائل الطبقة الثالثة.



الشكل ٤-٢٤: وحدة المعلومات الواصفة للقنوات الترددية المتاحة.

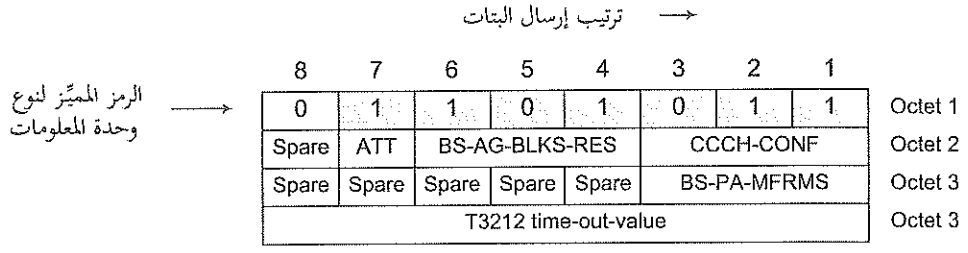
- وحدة المعلومات الخاصة بخيارات تشغيل المحطة ضمن الخلية "Cell Options IE": تتضمن هذه الوحدة الموسط PWCR الذي يُعلم الوحدات المتحركة عما إذا كانت تقنية ضبط الطاقة مستخدمة في المحطة أم لا، كما تتضمن الموسط DTX الذي يدل على إمكانية استخدام تقنية الإرسال المتقطع ضمن الخلية الحالية (انظر الشكل٤-٢٥). هذا ويتألف الموسط DTX من بتين اثنين، فإذا كانت قيمتهما "10"، دلَّ ذلك على أنه من غير المسموح للوحدة أن تستخدم هذه التقنية، أما إذا كانت القيمة "01"، فيشير ذلك إلى وجوب الاستخدام. هناك قيمة ثالثة ممكنة وهي "00"، وتدل على أنه من الممكن استخدام هذه التقنية عند الحاجة.

إضافة إلى ما سبق، تتضمن هذه الوحدة موسطاً يساعد على مراقبة جودة الاتصال هو Radio_Link_Timeout، عند قراءة الوحدة لهذا الموسط، تختار لمؤقتٍ خاصٍّ قيمةً استهلالية توافق القيمة التي أرسلتها المحطة، وعند كل إخفاقٍ في قراءة قناة SACCH، تُنقص الوحدة قيمة المؤقت، كما ترفعها عند استخلاص المعلومات من القناة على نحوٍ صحيح. فإذا نقصت قيمة المؤقت -ضمن مكالمةٍ ما- عن عتبةٍ محددة، دلَّ ذلك على نوعيةِ اتصال متدنية وعدم جدوى متابعة المكالمة، لذا تعمد الوحدة في هذه الحالة إلى قطع المكالمة وإنهائها.



الشكل٤-٢٥: وحدة المعلومات الخاصة بخيارات تشغيل المحطة (Cell Options IE)

- الوحدة الواصفة لقنوات التحكم "Control Channel Description IE" (انظر الشكل ٤-٢٦): تشمل هذه الوحدة موسطين يتيحان معرفة كيفية توزيع القنوات الاعتبارية على القنوات الفيزيائية المتاحة، وهذان الموسطان هما CCCH_CONF و BS_AG_BLKS_RES، (انظر البحث ٤-٥، وكذلك [٦] و [٩]لشرحٍ مُفَصَّل عنِ القيم المحتملة لهذين الموسطين). كما تتضمن موسطاً يبين للوحدة المتحركة ما عليها فعله عند إغلاقها أو فصل الطاقة عنها، إذ تقرأ الوحدة من قيمة الموسط ATT ("0" أو "1") ما إذا كان يجب عليها إعلام الشبكة بتغيير موقع وجودها على نحوٍ دوري أم لا. تتضمن هذه الوحدة أيضاً الموسط T3212، الذي يمثل مؤقتاً يضبط الدور الذي يجب على الوحدة الالتزام به عند تحديث موقع وجودها، أي المدة الزمنية التي يجب أن تنقضي قبل إجراء التحديث الدوري لموقع الوجود.
- وحدة المعلومات الواصفة لقنوات المحطات المجاورة "Neighbour Cells Description IE": بنية هذه الوحدة مشابهة جداً لبنية الوحدة الواصفة للقنوات المتاحة (الشكل ٤-٢٤)، حيث يشير نمط البتات إلى القنوات الترددية المستخدمة في المحطات المجاورة.



الشكل ٤-٢٦: وحدة المعلومات الواصفة لقنوات التحكم.

- وحدة الموسطات الخاصة بالنفاذ العشوائي "RACH Control Parameters": هناك موصفات خاصة تبثها المحطة تهدف إلى تنسيق نفاذ المشتركين إلى الشبكة، وسيتم التعرض لهذه الموصفات بالتفصيل لاحقاً.

بعد عرض وحدات المعلومات السابقة، نشير في ما يلي إلى عددٍ من الموسطات المنتقاة، والتي تُبث ضمن وحداتٍ متفرقة.

- الموسط "Not_Allowed_Access": ترسل المحطة هذا الموسط لبيان نوعية أو تصنيف الوحدات المتحركة المسموح لها بالولوج إلى خلية معينة. يتيح هذا الموسط للمشغل مرونة في تعريف أو تحديد أولوياتٍ للمشتركين المخولين باستخدام خلية ما، كما يتيح التحكم بمستوى عبء الشبكة في بعض المناطق.

- الموسط "Rxlev_Access_Min": إن التقاط الوحدة المتحركة لإشارة محطةٍ ما لا يعني بالضرورة أن الوحدة يمكن أن تجري اتصالاتها بمستوىً مقبولٍ من الجودة. لذا ترسل المحطة الموسط Rxlev_Access_Min ضمن قناة BCCH لإعلام الوحدات المتحركة بالحد الأدنى لقوة الإشارة الذي يجب أن يكون متوفراً في أية نقطة ضمن الخلية، وذلك حتى تتمكن الوحدات المتحركة من إجراء الاتصال بجودة مقبولة. فإذا تبين لوحدةٍ ما أن الإشارة المقيسة أفضل من هذه العتبة –أي Rxlev_Access_Min– فإن ذلك يعني أنها موجودة ضمن محيط الخلية التي تغذيها المحطة، أما إذا كانت القيمة المقيسة دون هذه العتبة، فمعنى ذلك أن الوحدة موجودة خارج محيط أو مجال تغذية المحطة، ولا يمكنها أن تلج إلى الشبكة عبرها، حتى وإن كانت ترصد إشارتها. هذا وتتراوح قيم هذا الموسط في الحالات الواقعية بين حدٍّ أدنى مقداره (-106 dBm) وقيمة عظمى تعادل (-98 dBm) [٤].

- الموسط "Cell_Barred": قد يحتاج المشغل في بعض الأحيان إلى تجربة بعض الميِّزات أو التقنيات الحديثة، أو إلى إجراء قياسات وأبحاثٍ في ظروفِ تشغيلٍ طبيعية وواقعية. يزوِّد المهندسون في هذه الحالة بعض المحطات المنتقاة بهذه الميِّزات، ثم تُعزل هذه المحطات عن الشبكة، حتى لا يؤثر أي خللٍ محتمل على اتصالات المشتركين.
تكافئ عملية العزل في الحالة الواقعية منع المشتركين من استخدام هذه المحطة، وحتى يتحقق ذلك، يُرسل على قناة BCCH موسطٌ هو Cell_Barred، يمكن لقيمته أن تكون "0" أو "1". فإذا كانت القيمة "1"، عرفت الوحدات المتحركة أن هذه المحطة غير متاحة للاستخدام، وأنه يتوجب عليها البحث عن محطة بديلة للولوج إلى الشبكة.

- الموسط MS_TXPWR_MAX_CCH: عندما تحدد الوحدة المتحركة الخلية المناسبة للارتباط بالشبكة، تبدأ ببث

الإشارات الراديوية المتعلقة بإنشاء الاتصال. غير أنه من الضروري الأخذ بالحسبان أن هذه الوحدة تستخدم تردداً قد يكون مستخدماً من طرف وحداتٍ ومحطاتٍ أخرى ضمن خلايا مجاورة قريبة. لذا يجب أن لا تتجاوز الاستطاعة التي تبثها الوحدة المتحركة عتبة يحددها الموسط MS_TXPWR_MAX_CCH، حتى لا تتسبب في أي تداخل مع الإشارات المرغوبة في خلايا أخرى. هذا وتقع القيم المعتمدة لهذا الموسط في المجال (31 dBm إلى 39 dBm) [٤].

كانت هذه أمثلة مختارة، أردنا من سردها إعطاء فكرة عن مدى التعقيد المرتبط بتنسيق استخدام موارد الشبكة. وكما أشرنا من قبل، يمكن الرجوع إلى [٨] و [٩] للوقوف على تفصيلٍ كاملٍ للرسائل المحمولة على قنوات التحكم المختلفة.

٤-٦-٢ تنسيق النفاذ العشوائي إلى الشبكة

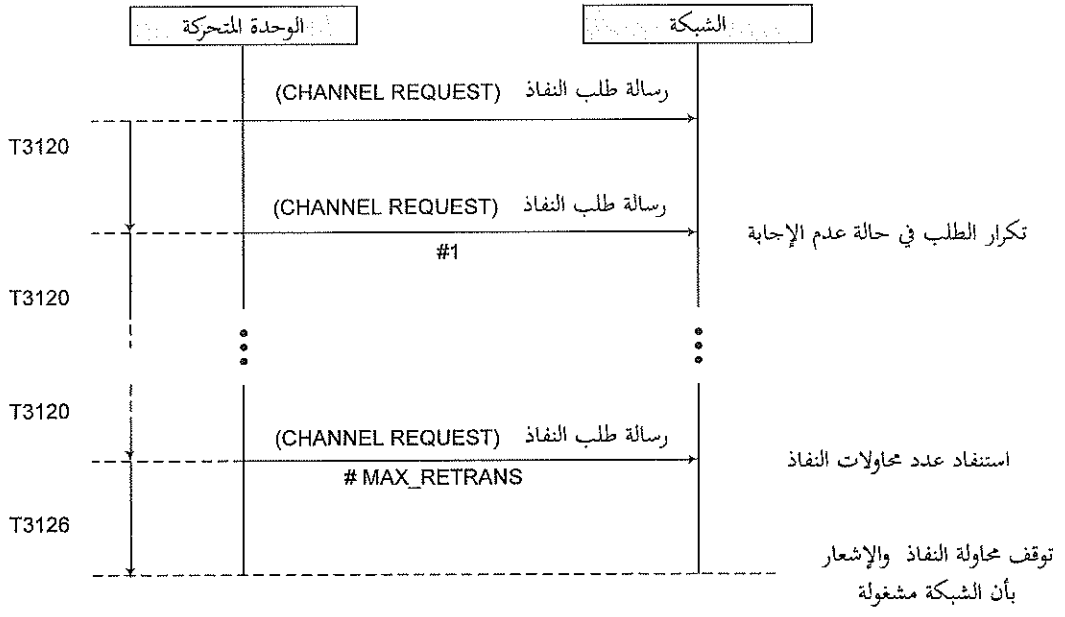
تبين عند شرح أنماط توزيع القنوات الاعتبارية على القنوات الفيزيائية، خصوصاً عند مناقشة النمط CC_4 (الشكل ٤-١٨)، أن قناة طلب النفاذ RACH تكون متاحة في آن واحد لكل المشتركين ضمن الخلية. ولما كانت محاولات طلب النفاذ ذات طبيعة عشوائية، ولا تتبع تسلسلاً زمنياً محدداً، أمكن أن يرسلَ مشتركان أو أكثر طلباً للنفاذ في الوقت نفسه، مما يؤدي إلى استقبال المحطة -على قناة RACH في المسار الصاعد- لأكثر من طلب نفاذ ضمن الحيز الزمني نفسه. تعرف هذه الظاهرة بـ "التصادم" أو "التعارض" "Collision"، ويمكن أن تُفهم على أنها "تنافسٌ" أو " تنازعٌ" "Contention" على شغل موارد الشبكة الفيزيائية.

كنا أشرنا أيضاً إلى أن النظام يتولى تنسيق وإجابة طلبات النفاذ وفق بروتوكول Slotted-Aloha، ونظراً لأن شرح تفاصيل هذا البروتوكول وفاعليته يخرج عن الإطار المرسوم لهذا الفصل، نكتفي في ما يلي بعرضٍ مبسطٍ للمبادئ التي تحكم نفاذ المشتركين إلى الشبكة، ولكيفية معالجة ظاهرة التعارض على نحوٍ يضمن نفاذ أكبر عدد منهم خلال أقصر وقتٍ ممكن. ولا يفوتنا أن نحيل القارئ المهتم بتفاصيل بروتوكول النفاذ العشوائي إلى [٦] و[٧].و[١١].

تجري خطوات التحكم بالنفاذ العشوائي وفق ما يلي (انظر الشكل ٤-٢٧):

- ترسل كل وحدة متحركة من طرفها طلب النفاذ ثم تفعِّل مؤقِّتاً من مؤقتات النظام هو T3120، الذي تُبثُّ قيمته على قناة BCCH.
- إذا وصلت أكثر من رزمة طلب نفاذ إلى المحطة الثابتة ضمن الحيز الزمني نفسه يتعذر على المحطة التعرف على فحوى أيٍّ من هذه الرزم التي تتراكم وتتداخل مع بعضها، لذا تتجاهل المحطة كل طلبات النفاذ ولا ترسل في المسار الهابط أي إقرارٍ أو رسالة إجابة على قناة AGCH المخصصة لذلك.
- إذا انقضت مدة المؤقِّت T3120 ولمَّا تستلم الوحدة رداً من المحطة على طلبها، أعادت إرسال طلب النفاذ مرةً أخرى بعد مدة زمنية عشوائية، يجري تحديدها لكل محاولة جديدة، ولكل وحدةٍ على حدة. وهذا يحول دون حدوث تصادم في طلب النفاذ مرة أخرى. وعندما تكرر الوحدة الطلب، تفعَّل المؤقت من جديد.

- إذا لم تستلم الوحدة أي رد من المحطة، فإنها تعاود طلبها مرة أخرى، ويُسمح للوحدة تكرار إرسال الطلب لعددٍ أقصى مقداره MAX_RETRANS من المرات. هذا ويحدد كل مشغل عدد المحاولات المسموح به وفق ما يراه مناسباً، كما تُعلَم الوحدات المتحركة عن هذا العدد عبر قناة BCCH التي تحمل MAX_RETRANS ضمن المعلومات العامة عن النظام.
- إذا استنفدت الوحدة كل محاولات النفاذ، تُفعِّل مع المحاولة الأخيرة مؤقتاً هو T3126، فإذا انقضت مدته ولم تحصل على قناةٍ فيزيائية مخصصة، يطُلب منها أن تحاول الولوج عن طريق خلية أخرى، أو إعطاء إشارة مفادها أن الشبكة مشغولة (أي الرنين المتكرر السريع الذي يدل على انشغال الشبكة).



الشكل ٤-٢٧: آلية التحكم بتكرار طلب النفاذ.

هناك إذاً موسطان مهمان يحكمان الجدول الزمني لطلب النفاذ من قِبَل كل وحدة: يتعلق الأول بالمدة الزمنية الفاصلة بين محاولتين متتاليتين للنفاذ، بينما يدل الثاني على عدد محاولات النفاذ المسموح بها.
يمثل هذان الموسطان جزءاً من المعلومات العامة التي يزود بها النظام المشتركين في كل خلية ضمن ما يبثه على قناة BCCH، لذا يمكن أن تختلف قيمهما من خلية إلى أخرى، تبعاً لسعة الخلية أو المحطة ومتطلبات التخطيط.
تدل المواصفات المعيارية على الموسط الأول بـ TX_INTEGER، وتُستخدم قيمته لحساب المدة التي يجب أن تنقضي بين محاولتي نفاذٍ متعاقبتين.

يوضح الجدول ٤-٤ العلاقة بين القيم الممكنة للموسط TX_INTEGER وعدد الأطر الزمنية T التي ينبغي انقضاؤها قبل تكرار إرسال طلب النفاذ. يُستخدم هذا الجدول وفق ما يلي:

- عندما تريد الوحدة المتحركة إرسال طلب نفاذ، تميز بين المحاولة الأولى والمحاولات اللاحقة. ففي حالة المحاولة الأولى تختار الوحدة رقماً نرمز إليه بـ $N_{retr,1}$، يُحسب وفق خوارزميةٍ خاصة تقود إلى قيمة عشوائية تقع ضمن المجال المعرَّف بالعلاقة:

$$N_{retr,1} \in \{0,...,\max(T,8)-1\} \quad (٤-٢)$$

حيث يمثل T عدد الأطر وفق الجدول ٤-٤.

- بعد اختيار $N_{retr,1}$، تنتظر الوحدة مدة زمنية تكافئ $T_{retr,1} = N_{retr,1} \times 4.615\text{ms}$، وذلك قبل إرسال طلب النفاذ الأول، فإذا أرسلت الوحدة هذا الطلب الأول ولم يُستجب لها، أعادت المحاولة مرات أخرى، بحيث يكون الفارق الزمني بين كل محاولتين عشوائياً ويكافئ $T_{retr,n} = N_{retr,n} \times 4.615\text{ms}$، حيث يدل n على رقم المحاولة، أي أنه يقع ضمن المجال $(1 < n \leq \text{MAX_RETRANSM})$، أما $N_{retr,n}$، فهو معاملٌ يُعطى بالعلاقة:

$$N_{retr,n} \in \{S,...,(S+T+1)\} \quad (٤-٣)$$

يدل الرمز S في هذه العلاقة على موسطٍ آخر، يرتبط بعدد الأطر T، وبنمط توزيع القنوات الاعتبارية، وفق الجدول ٤-٥. بتعبيرٍ آخر، يكون مقدار الفارق الزمني بين محاولتين حاصل جمع مدتين اثنتين، تتحدد الأولى بدلالة الرقم الثابت S، بينما تتبع الثانية رقماً عشوائياً (يوضح الشكل ٤-٢٨ هذا المبدأ على نحوٍ مبسط).

TX_INTEGER	عدد الأطر الزمنية (T)	TX_INTEGER	عدد الأطر الزمنية (T)
0	3	8	11
1	4	9	12
2	5	10	14
3	6	11	16
4	7	12	20
5	8	13	25
6	9	14	32
7	10	15	50

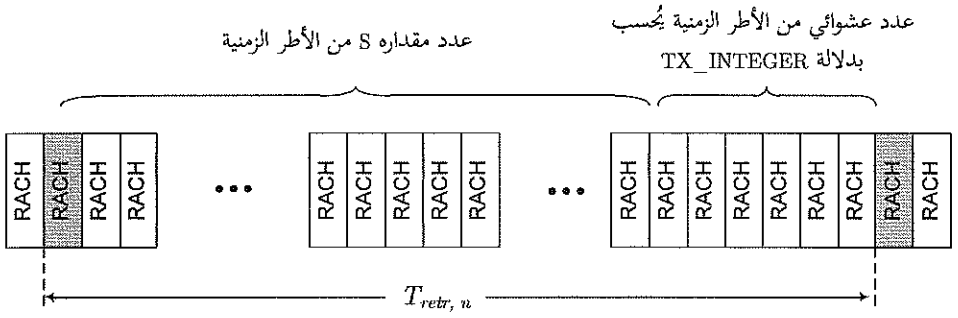
الجدول ٤-٤: عدد الأطر الزمنية الفاصلة بين محاولتي نفاذ بدلالة الموسط TX_INTEGER.

لتوضيح كيفية استخدام الجدولين السابقين معاً، نفترض أن قيمة TX_INTEGER التي تبثها المحطة هي 11. تؤدي هذه القيمة وفق الجدول ٤-٤ إلى: $T = 16$. لذا تختار الوحدة قيمةً لـ $N_{retr,1}$ ضمن المجال $\{0,...,\max(16,8)-1\}$، أي $\{0,...,15\}$.

لنفترض أن الرقم الذي اختارته الوحدة هو: $N_{retr,1} = 6$ ، هذا يعني أنها تنتظر قبل إرسال الطلب الأول مدة تكافئ 6 أطر زمنية، أي: $T_{retr,1} = 27.7\,\text{ms}$. فإذا لم يُستجب للطلب ولم تحصل الوحدة على قناة مخصصة، تعاود محاولة النفاذ مرة أخرى. لذا تحسب بدايةً قيمة الموسط S، فإذا افترضنا أن نمط التوزيع هو النمط المركب، فإن قيمة S تكون وفق الجدول ٤-٥ مساويةً لـ 52. هذا يعني أن الوحدة تختار قبل كل محاولة لاحقة للنفاذ قيمةً عشوائية لـ $N_{retr,n}$ تقع ضمن المجال $\{52,...,67\}$ (انظر العلاقة (٤-٣))، ثم تنتظر مدة تعادل $T_{retr,n} = N_{retr,n} \times 4.615\text{ms}$ قبل إرسال طلب النفاذ الجديد.

عدد الأطر الزمنية (T)	قيمة الموسط S (نمط توزيع مركَّب)	قيمة الموسط S (نمط توزيع منفرد)
3,8,14,50	41	55
4,9,16	52	76
5,10,20	58	109
6,11,25	86	163
7,12,32	115	217

الجدول ٤-٥: قيم الموسط S بدلالة عدد الأطر الزمنية الفاصلة بين محاولتي نفاذ ونمط التوزيع المستخدم.



الشكل ٤-٢٨: المدة الزمنية الفاصلة بين طلبي نفاذ إلى الشبكة.

هذا عن الموسط الأول (TX_INTEGER)، أما الموسط الثاني الذي تحدده المواصفات، فهو عدد المرات المسموح بها لتكرار طلب النفاذ. يُشار إلى هذا الموسط بـ "MAX_RETRANS"، ويمكن أن تتراوح قيمته بين "0" و "4"، دالّاً بذلك على محاولاتٍ متكررة تتراوح بين "1" و "7" وفق الجدول ٤-٦.

MAX_RETRANS	عدد محاولات النفاذ المسموح بها
0	1
1	2
2	4
3	7

الجدول ٤-٦: عدد محاولات النفاذ المسموح بها بدلالة الموسط MAX_RETRANS.

٤-٦-٣ القياسات الدورية التي يجريها طرفا الاتصال

يقتضي توفير خدمات الاتصالات المتنوعة بجودة عالية مراقبةً مستمرةً لنوعية الإشارة التي تستقبلها الوحدة المتحركة في كل لحظة، كما يقتضي اختيارُ الخلية المثلى لنفاذ المشترك أو ولوجه إلى الشبكة أن يكون النظام على دراية تامة وآنية بقوة وجودة الإشارات الراديوية التي تستقبلها الوحدة المتحركة -أثناء انتقالها- من المحطات المجاورة. هذه المراقبة مطلوبة وضرورية حتى أثناء إجراء الاتصالات، التي قد تطول لدقائق عديدة، يقطع أثناءها المشترك مجال تغطية محطات مختلفة وعديدة.

كنا ذكرنا في ما سبق أن تقارير أو نتائج القياسات التي تجريها الوحدة المتحركة ترسل على قناة SACCH، وهذا يطرح سؤالاً مهماً وهو: كيف يتسنى للوحدة أن تجري هذه القياسات أثناء انشغالها باتصال ما؟ وكيف تتاح لها إمكانية مراقبة جودة الإشارات المستقبلة من أكثر من محطة في آنٍ واحدٍ؟.
للإجابة على هذا التساؤل، نعرض في ما يلي لبعض التفاصيل المتعلقة بكيفية إجراء الوحدة لهذه القياسات، وفي ذلك بيانٌ إضافيٌّ لتشعب المهام الوظيفية للرابط الراديوي ولتنوع المعلومات التي تُنقل عبره بين طرفي الاتصال.

يجري تقييم نوعية الإشارة المستقبلة من أحد طرفي الاتصال (الوحدة المتحركة أو المحطة الثابتة) باستخدام موسطين أساسيين: يدل الأول منهما على الاستطاعة المتوسطة للإشارة المستقبلة، ويعرف اختصاراً بـ RXLEV، بينما يعطي الآخر نسبة خطأ البت في الإشارة المستقبلة، ويشار إليه بـ RXQUAL. ومن الطبيعي أن قياس هذين الموسطين يكون من طرف كلٍّ من المحطة الثابتة والوحدة المتحركة.

تُحسب قيمة الاستطاعة المتوسطة (أي قيمة RXLEV) بالتدوين اللوغاريتمي، وتسهيلاً لعملية التنسيق والمقارنة بين قيم الإشارات المستقبلة من محطات متعددة، تعرف المواصفات المعيارية [١٢] سلَّماً محدداً لقيم هذا الموسط، يتألف من 64 درجة، ويشمل القيم من $-110\,\mathrm{dBm}$ إلى $-48\,\mathrm{dBm}$، هذا يعني أن الفرق بين درجتين متتاليتين، والذي يحدد دقة القياس المتاحة، هو $1\,\mathrm{dBm}$ (انظرالجزء الأيمن من الجدول ٤-٧). أما الموسط RXQUAL، والذي يصف معدل خطأ البت، فيُصنَّف وفق سلَّمٍ أخر مؤلف من ثماني درجات كما هو مبين في الجزء الأيسر من الجدول ٤-٧.

قيمة الموسط RXLEV	قيمة الاستطاعة المتوسطة
0	< -110 dBm
1	-110 to -109 dBm
2	-109 to -108 dBm
3	-108 to -107 dBm
4	.
5	.
6	-49 to -48 dBm
7	> -48 dBm
8	-47 to -46 dBm
9	-46 to -45 dBm
10	-45 to -44 dBm
11	-44 to -43 dBm
12	.
13	.
14	-33 to -32 dBm
15	-32 to -31 dBm
16	-31 to -30 dBm
17	-30 to -29 dBm
18	.
19	.
20	-13 to -12 dBm
21	-12 to -11 dBm
22	-11 to -10 dBm
23	-10 to -9 dBm
24	.
25	.
26	6 to 7 dBm
27	7 to 8 dBm
28	8 to 9 dBm
29	9 to 10 dBm
30	.
31	.

قيمة الموسط RXQUAL	نسبة خطأ البت (BER)
0	< 0.2%
1	0.2% to 0.4%
2	0.4% to 0.8%
3	0.8% to 1.6%
4	1.6% to 3.2%
5	3.2% to 6.4%
6	6.4% to 12.8%
7	> 12.8%

الجدول ٤-٧: قيم الموسطين RXLEV و RXQUAL حسب المواصفات المعيارية [١٢].

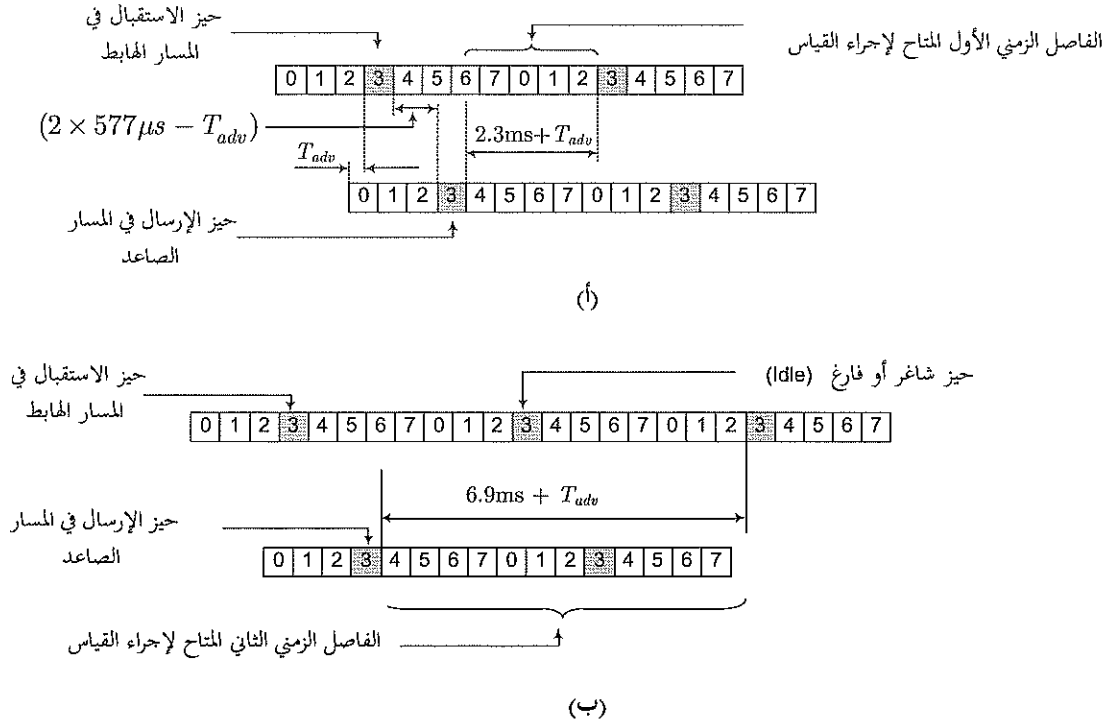
أثناء اتصال جارٍ، يجري قياس الاستطاعة المستقبلة خلال كل حيز زمني، حيث تقيس الوحدة المتحركة استطاعة الإشارة عند استقبال كلٍّ من الرزم التي تبثها المحطة. تمثل قيمة كلِّ عينةِ قياس استطاعةَ الإشارة بعد فك التعديل الراديوي، أي القيمة التربيعية لمطال الإشارة في "النطاق الأساسي" "Baseband". واختيار النطاق الأساسي ضروري هنا لسببين: الأول هو عزل التغيرات الطارئة على الإشارة والمرتبطة بأداء الدارات الراديوية، والثاني هو أن الإشارة في النطاق الأساسي هي التي تُستَخلص منها المعلومات. يتلو ذلك تحويل القيم المقيسة –كما ذكرنا– إلى التدوين اللوغاريتمي، ثم يحسب متوسط قيم العينات المقيسة خلال مدة زمنية مقدارها 480 ms، وتصنف قيمته وفق الجدول ٤-٧. بعد ذلك يجري إبلاغ المحطة بهذه القيمة، حيث ترسل عبر قناة SACCH باتجاه المسار الصاعد.

لا تمثل قيمة الموسط RXLEV مؤشراً لنسبة الإشارة إلى الضجيج (CIR)، فقيمته تكافئ حاصل جمع استطاعة الإشارة المرغوبة إلى استطاعة إشارة الضجيج. لذا لا بد لإكمال تقييم جودة الإشارة من حساب معدل خطأ البت، الذي تشتق قيمته عن طريق مقارنة سلسلة الاختبار المستقبلة ضمن كل رزمة مع السلسلة المرجعية المحفوظة في ذاكرة الوحدة، ورصد عدد البتات المتباينة في السلسلتين. وكما في حالة الموسط RXLEV ، يجري حساب متوسط القيم المشتقة لـ RXQUAL ضمن مدة مقدارها 480 ms، ثم تصنف قيمة المتوسط الحسابي وفق الجدول ٤-٧ وترسل إلى المحطة.

تشترط المواصفات المعيارية أن تكون قيمة RXQUAL أقل من 4، ذلك أنه في حالة كون BER أقل من 1.6% فإن معظم –إن لم يكن كل– الأخطاء المتعلقة بأهم فئة من البتات المرسلة يمكن تصحيحها أثناء عملية فك ترميز القناة.

نأتي الآن إلى توضيح التسلسل الزمني الذي يجري وفقه قياس الموسطين اللذين ذكرناهما، ونستعين لذلك بـ الشكل ٤-٢٩، الذي يفترض أن الحيز الزمني رقم "3" قد خُصص للوحدة المتحركة لإجراء اتصالها، أي أن القناة الفيزيائية C_0TN_3 هي المستخدمة للاتصال. نذكّر بداية بوجود فاصل زمني بين الحيز الذي تستقبل الوحدة المتحركة أثناءه المعلومات من المحطة الثابتة في المسار الهابط والحيز الذي ترسل أثناءه المعلومات في المسار الصاعد. ينشأ هذا الفاصل بسبب الإزاحة الزمنية بين الإطار

المعرف على تردد الاستقبال والإطار المعرف على تردد الإرسال (في المحطة)، وكنا أشرنا في الفصل ٢ إلى أن مقدار هذا الفاصل هو ثلاثة أحياز زمنية، وأنه يتيح استخدام دارات مبسطة في الوحدة المتحركة، إذ تنتفي بوجوده ضرورة الارسال والاستقبال في وقت واحد.



الشكل ٤-٢٩: الفواصل الزمنية المتاحة لإجراء قياسات جودة الإشارة.

نقرأ من تسلسل الإرسال والاستقبال في الجزء (أ) من الشكل ٤-٢٩ أن الوحدة تضبط ترددها على تردد الاستقبال وتستقبل المعلومات في المسار الهابط، وبعد استكمال استقبال الرزمة، يكون لديها مدة زمنية مقدارها $2 \times 577\,\mu s$ لضبط داراتها على تردد الإرسال، وهذه المدة تكافئ الفاصل الزمني بين نهاية حيز الاستقبال وبداية حيز الارسال. وإذا أخذنا بالحسبان أن الوحدة يمكن أن تكون بعيدة عن المحطة، وعليها تقديم إرسالها بأطول مدة زمنية ممكنة، أي $63 \times 3.69\,\mu s$، فإن المدة المتاحة للوحدة بين الاستقبال والإرسال تكون $921\,\mu s$ فقط. وهذه مدة زمنية قصيرة جداً، لا تكفي لإجراء أي تقييم أو قياس يتعلق بنوعية الإشارة وجودة الاتصال.

يبين الجزء (أ) من الشكل أيضاً وجود فاصلٍ زمني آخر ينشأ بسبب كون الوحدة تشغل حيزاً واحداً فقط أثناء الاتصال، فكما هو واضح في الشكل، ترسل الوحدة المعلومات في المسار الصاعد، ثم تنتظر مدة مقدارها أربعة أحياز زمنية إضافة إلى مقدار تقديم الإرسال، أي $4 \times 0.577\,\text{ms} + T_{adv}$، قبل أن يحين وقت استقبال رزمة المعلومات في المسار الهابط مرة أخرى، أي حتى ورود الحيز الزمني "3" في الإطار التالي. هذه المدة كافية كي تجري الوحدة المتحركة قياساً لاستطاعة الإشارة المستقبلة من

إحدى المحطات المجاورة، وهذا يتطلب من الوحدة أن تعدِّل ترددها ليوافق تردد المحطة المجاورة وأن تجري قياس الاستطاعة، ثم تُعدِّل ترددها مرة أخرى ليكون موافقاً لتردد القناة الفيزيائية المستخدَمة للاستقبال.

يجب أن يكتمل هذا التسلسل الزمني لإجراءات الانتقال من تردد الإرسال إلى تردد القياس (أي تردد المحطة المجاورة)، ثم إلى تردد الاستقبال مرةً أخرى، ضمن المدة الزمنية الوجيزة المتاحة ($2.3\,\mathrm{ms} + T_{adv}$). لذا، يجب أن تكون إشارة التردد المميِّز للمحطة المجاورة والحامل لقناة BCCH، متاحةً للقياس في أي وقت، وهذا يتطلب أن تُبَثَّ كل الأحياز الزمنية على هذا التردد بمستوى ثابت للطاقة. يتضح من ذلك مرة أخرى ضرورة شغل الأحياز الشاغرة برزمة المعلومات الوهمية، فلو كان الحيز الأول فقط مشغولاً بالمعلومات العامة حسب النمط CC_4، لوجب على الوحدة أن تنتظر مدة قد تصل إلى $7 \times 0.577\,\mathrm{ms}$ قبل أن تتمكن من رصد إشارة المحطة المجاورة وقياسها. يبرر هذا أيضاً عدم تطبيق إجراءات ضبط الطاقة وميزات الإرسال المتقطع على التردد المميِّز للمحطة.

تقدم التنويه إلى أن الوحدة المتحركة تكون على دراية تامة بالترددات التي يجب قياس الإشارات المحمولة عليها، وبينت الفقرة لسابقة كيفية ذلك، غير أن استخدام الترددات ذاتها في أكثر من خلية ضمن الشبكة يعني احتمال وجود إشارة راديوية، محمولة على نفس التردد المقيس، غير أن مصدرها محطة أخرى مختلفة ليست مدرجة في قائمة المحطات المجاورة. هذا احتمالٌ يزداد وروده ضمن المدن والأماكن المكتظة سكانياً، حيث تصغر المسافة بين المحطات المستخدِمة للتردد ذاته. لذا، لا يعني قياس استطاعة الإشارة على ترددٍ معين أن هذه الإشارة صادرة فعلاً عن واحدة من المحطات المجاورة، ولا بد لتأكيد ذلك من قراءة هوية المحطة (BSIC) التي تبث الإشارة الملتقَطة. ولما كانت هوية المحطة مُتضمَّنة في رزمة التزامن (انظر الشكل ٤-١٢)، وجب على الوحدة أن تقرأ أو تستخلص فحوى قناة SCH، التي تبثها المحطة المجاورة حتى يتسنى لها تأكيد هوية هذه المحطة.

يتطلب ذلك توفر مدة زمنية أطول من التي عرضنا لها في الفقرات السابقة، هذه المدة أو الفسحة الزمنية يتيحها نمط توزيع القنوات الاعتبارية على القنوات الفيزيائية، وتحديداً وجودُ حيز زمني فارغ في نهاية كل إطار متعدد (انظر الشكل ٤-١٦ والشكل ٤-٢٩)، حيث يؤدي وجود هذا الحيز -في جهتي الاتصال- إلى نشوء فاصل زمني بين إرسال الوحدة وتلقيها للمعلومات، مقداره 12 حيزاً تقريباً. يكفي هذا الفاصل كي تضبط الوحدة ترددها ليوافق تردد المحطة المجاورة، ثم تنتظر حتى تلتقط رزمة ضبط الزمن التي تبثها هذه المحطة، وتقرأ منها رقم BSIC المُراد، ثم تعود لضبط ترددها مرة أخرى كي يوافق تردد الاستقبال من المحطة الحالية المزوِّدة للخدمة.

يتطلب إجراء القياس السابق تحقق شرطين اثنين:

الأول هو أن يكون الفاصل الزمني بين استقبال الوحدة وإرسالها موافقاً لمرور الحيز الزمني TN_0، وهذا الشرط محققٌ نظراً لكون مدة هذا الفاصل تعادل 12 حيزاً زمنياً، بينما يتكرر TN_0 بدورٍ مقداره 8 أحياز. أما الشرط الثاني فهو أن يكون الحيز TN_0 الموافق لمرور الفاصل الزمني في الشكل ٤-٢٩، حاملاً لقناة التزامن (SCH). فحيز قناة التزامن يتكرر كل 10 أطر (انظر الشكل ٤-١٨)، بينما يتكرر الفاصل الزمني بتكرر الحيز الشاغر (Idle)، أي مرةً كل 26 إطاراً (قارن مع الشكل ٤-١٦). يضمن تحقق هذا الشرط اختلافُ طول الإطار المتعدد الخاص بقنوات المعلومات (26 إطاراً) والذي يحكم دور الحيز الشاغر،

عن طول الإطار المتعدد الخاص بقنوات التحكم (51 إطاراً)، فكون دوري الإطارين غير قابلين للقسمة على قاسمٍ مشترك يجعل تحقق هذا الشرط أكيداً مرة على الأقل ضمن الإطار فائق الطول (Superframe).

تشترط المواصفات المعيارية أن تُقرأ هوية المحطة التي تبث قناة BCCH مرة على الأقل كل 10 ثوان، وهذا يقتضي أيضاً أن المعلومات الخاصة بالتزامن، ومنها المؤقتات المذكورة في الجدول ٤-٢، تُستخلص أيضاً مع هوية المحطة، بحيث تتوفر للوحدة باستمرار كل المعلومات الأساسية التي تحتاجها لإنجاز عملية الانتقال من خلية إلى أخرى على أسرع وجهٍ ممكن.

يتضح مما سبق أن الوحدة تحصل على عينة قياس لواحدة من المحطات في كل إطارٍ زمني (باستثناء الإطار الزمني الخالي)، لذا يتوفر لها خلال مدةٍ تكافئ أربعة أطر متعددة، أي خلال مدة الإطار الرباعي، 100 عينة قياس. فالإطار المتعدد يتألف في حالة قناة المعلومات من 26 إطاراً، ومن ثم يكون عدد الأطر 104، وإذا استثنينا الحيز الخالي من كل إطار متعدد، يبقى عدد من الأطر مقداره 100.

تكافئ مدة الإطار المتعدد الرباعي 480 ms ($4 \times 120\,\text{ms} = 480\,\text{ms}$)، وتحسب الوحدة متوسط قيم عينات القياس خلال هذه المدة، لذا يطلق على هذه المدة أيضاً مصطلح "دور إجراء القياسات" "Reporting Period"، أو دور قناة SACCH، لأن هذه القناة هي التي تحمل نتائج القياسات. يجب التنبيه في هذا السياق إلى أن العينات المئة تتوزع على كل المحطات الواجب مراقبتها، فإذا كان عدد المحطات 32، توفر عن كل محطة ثلاث عينات تقريباً، وإذا كان العدد 16، تَوفَّر عن كل محطة ست إلى سبع عينات، وهكذا. أي أنه كلما ازداد عدد المحطات، نقص عدد العينات المقيسة عن كل محطة، ومن ثم تَدنَّت دقة القيمة المتوسطة، لذا، تقتصر إجراءات القياس في العادة على 6 محطات مجاورة بحيث يتوفر عن كل محطة 12 عينة قياس تقريباً، وبعد حساب متوسط هذه العينات تختار الوحدة القيمة المكافئة وفق الجدول ٤-٧، ثم ترسلها على قناة SACCH إلى المحطة.

كنا أشرنا إلى أن استطاعة الإشارة المستقبلة (RXLEV) وجودتها (RXQUAL) تقاسان من طرف المحطة الثابتة أيضاً، إضافةً إلى هذين الموسطين، تقيس المحطة البعد الجغرافي للوحدة. وهذا البعد يمكن اشتقاقه من قيمة مُوسِط تقديم الإرسال T_A التي تختارها المحطة وتطالب الوحدة بالالتزام بها، والتي تشتقها –كما ذكرنا– من مقارنة سلسلة الاختبار المستقبلة من طرف الوحدة مع النسخة المرجعية المحفوظة في ذاكرة المحطة . تحسب المسافة بدلالة قيمة T_A على النحو التالي:

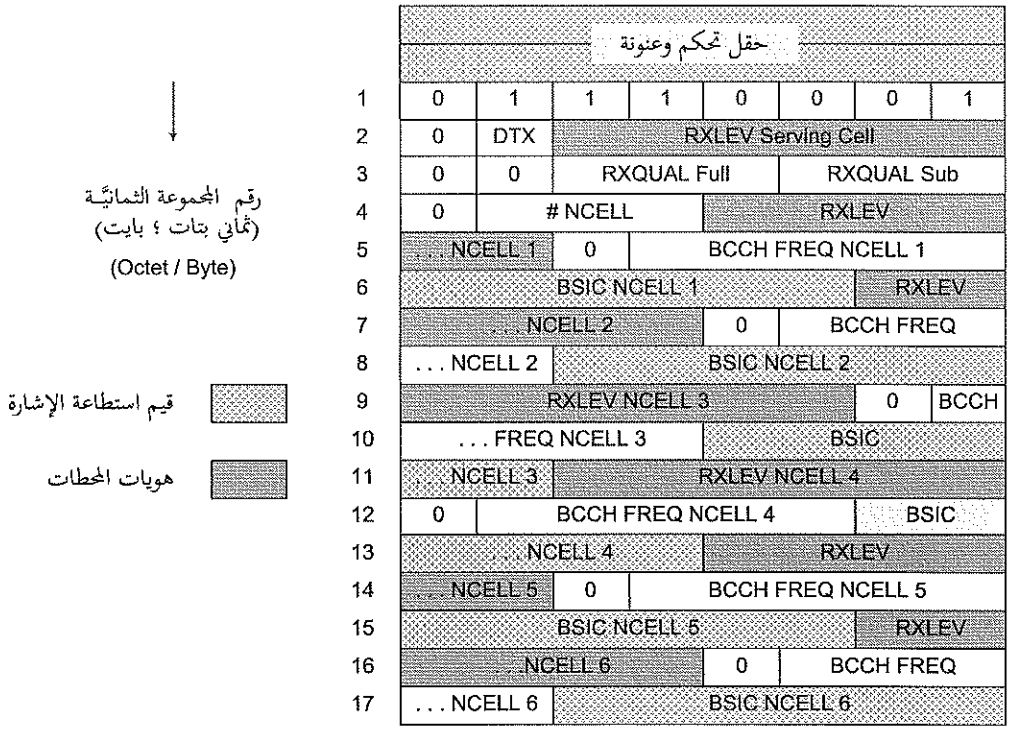
$$d(T_A) = \frac{T_A\, c\, t_{bit}}{2} = \frac{T_A\, 3 \times 10^8\,\text{m/s}\, 3.69 \times 10^{-6}\,\text{s}}{2} = T_A\, 554\,\text{m} \qquad (٤-٤)$$

حيث يشير الرمز t_{bit} إلى المدة المكافئة للبت، و c إلى سرعة الضوء. نُذَكِّر في هذا السياق بأن الموسط T_A لا يمثل مدة زمنية وإنما عدداً صحيحاً بين "0" و"63".

هذا ويجب عند حساب بُعدِ الوحدة مراعاة أن تقديم الإرسال يأخذ بالحسبان المسافة التي تقتطعها الإشارة من الوحدة إلى المحطة وبالعكس، لذا يقسم البسط في المعادلة السابقة على 2.

بعد نقاشنا لأهم القياسات التي تجريها الوحدة على نحوٍ دوري ومنتظم، نعرض في ما يلي –من باب التوضيح لا التفصيل– لبنية تقرير أو نتائج القياس التي ترسلها الوحدة إلى المحطة، والتي تكتمل بعد ارسالها ضمن أربعة رُزَم متتالية على قناة SACCH. هذا يعني أن نتائج القياس لمدة مقدارها 480 ms تحتاج أيضاً إلى مثل هذه المدة حتى يكتمل إرسالها إلى المحطة.

يوضح الشكل ٤-٣٠ بنية ما يسمى اصطلاحاً "تقرير قياسات الوحدة" "Measurement Report"، الذي يرسل ضمن رسالة من رسائل الطبقة الثالثة. تتكون هذه البنية من عدة حقول تحوي الموسطات التالية (انظر [٩]).



الشكل ٤-٣٠: بنية تقرير القياسات الذي ترسله الوحدة المتحركة إلى المحطة الثابتة.

- DTX: يدل هذا الموسط على كون الوحدة تستخدم تقنية الإرسال المتقطع أم لا (انظر الفصل ٥).
- RXLEV Serving Cell: يعطي هذا الموسط قيمة الاستطاعة المتوسطة لإشارة الخلية المغذية أو الحالية وفق الجدول ٤-٧، ويحتاج هذا الموسط إلى 6 بتات لترميز هذه القيم بالتدوين الاثناني.
- RXQUAL Full: تقرأ المحطة من هذا الموسط جودة القناة وفق الجدول ٤-٧ وباعتماد إشارة المحطة المغذية.
- RXQUAL Sub: عند استخدام تقنية الإرسال المتقطع، تبقى بعض الأحياز الزمنية دون إرسال، ومن ثم لا تتوفر للوحدة 100 عينة لحساب القيمة المتوسطة، لذا يعطي هذا الموسط جودة القناة عند توفر عددٍ أقل من العينات.
- #NCELL: يشير هذا الموسط إلى عدد المحطات المجاورة التي تراقبها الوحدة، ويمكن أن يتراوح العدد بين "0" و "6".

- RXLEV NCELL m: تقرأ المحطة من هذا الموسط مقدار الاستطاعة المتوسطة للإشارة المستقبلة من المحطة ذات الرقم m.
- BCCH FREQ NCELL m: يمثل هذا الموسط التردد المميز للمحطة m، الحامل لمعلومات قناة BCCH، وتُدوَّن قيمته باعتماد الرقم $ARFCN_m$ المكافئ لهذه القناة.
- BSIC NCELL m: يدل هذا الموسط على هوية المحطة m، هذا يتيح أن يقرِنَ التقرير قيمة كل موسطٍ دال على استطاعة اشارة مقيسة (RXLEV NCELL m) بهوية المحطة الموافقة، التي تمثل مصدر هذه الإشارة.
- BCCH FREQ: تعطي هذه القيمة ترتيب الحامل الترددي وفق قائمة الترددات التي تزود المحطةُ المشتركين بها، وهذا الرقم لا يمثل قيمةً مباشرة للتردد الذي يرمز له، بل يتطلب حساب التردد الفعلي خطوات أخرى يمكن الرجوع إليها في[٩].

٤-٦-٤ خطوات الولوج أو النفاذ إلى الشبكة

بعد عرض الأمثلة السابقة، ننتقل إلى توضيح أهم الخطوات التي تُتَّبَع حال أو فور تشغيل الوحدة المتحركة، وللإجراءات الأساسية المرتبطة بولوجها أو نفاذها إلى الشبكة. وستبين هذه الخطوات مدى المرونة التي تتيحها القنوات الاعتبارية في إنجاز إجراءاتٍ غاية في الدقة، تتطلب مستوىً عالياً من التنسيق بين مكونات الشبكة المختلفة.
هذا وسنعرض هذه الخطوات على نحوٍ مبسطٍ يتجاوز الكثير من التفاصيل، والتي يمكن الوقوف عليها في [٩] و[١٣].

يمكن تلخيص إجراءات النفاذ إلى الشبكة كما يلي:

١) تكمن المهمة الأولى للوحدة المتحركة -بعد تشغيلها- في تحديد المحطة الأنسب للنفاذ إلى الشبكة. لذا تُجري داراتُ الاستقبال بدايةً مسحاً لكل القنوات الترددية المعرَّفة ضمن نظام GSM، يشمل ذلك 124 قناة لنظام P–GSM 900 و174 قناة لنظام E–GSM، و374 قناة لنظام DCS–1800.
أثناء عملية المسح، تقيس الوحدة قوة الإشارة المحمولة على كل من هذه القنوات، حيث تحسب قيمة الموسط RXLEV لكلٍ من هذه القنوات اعتماداً على 5 عينات قياس.
لتقصير المدة اللازمة لعملية المسح، تحتفظ الوحدة عادةً بقائمة تتضمن الترددات التي استخدمتها من قبل، والتي تكون في الغالب ترددات مخصصةٍ لشبكة المشترك الأم. يمكن أن يصل عدد الترددات في هذه القائمة إلى 32 تردداً، تبدأ الوحدة بمسحها بحثاً عن قناة مناسبة للنفاذ إلى الشبكة، مما يضيِّق مجال البحث ويسرِّع في إيجاد الإشارة الأنسب على نحوٍ مُجدٍ.
أما إذا لم تكن هذه القائمة متوفرة، كأن يكون المشترك بصدد إجراء أول اتصالاته بعد شرائه شريحةً جديدة، فإن الوحدة تقوم -كما ذكرنا- باجراء مسحٍ لكامل الطيف الترددي الخاص بنظام GSM.

٢) بعد إتمام عملية المسح وحساب الاستطاعة المتوسطة لكل قناة، تجري الوحدة ترتيباً أولياً للترددات وفق قيمة الموسط RXLEV، وتضبط مجال ترددها على نحوٍ مبدئي ليوافق تردد القناة ذات الإشارة أو الاستطاعة الأقوى.

٣) يجب على الوحدة في الخطوة التالية التحقق من أن الإشارة الأقوى تمثل إشارةَ حاملٍ لقناة BCCH، إذ أن بمجرد رصد إشارة راديوية قوية على تردد معين غير كافٍ للتأكد من أن هذه الإشارة تحمل معلوماتٍ خاصة بمحطةٍ ثابتةٍ ما. لذا تبدأ الوحدة بالخطوات التي تتيح قراءة المعلومات من قناة BCCH، وأولى هذه الخطوات -بدون شك- هو ضبط التردد على نحوٍ دقيق، إذ أن الخطوة رقم (٢) تؤدي إلى تحديد "نافذة ترددية" للبحث، وليس إلى ضبطٍ دقيقٍ للتردد.

يتعرف المستقبل على قناة ضبط التردد FCCH عند رصد ذروة مميزة للكثافة الطيفية للاستطاعة المستقبلة، إذ تمثل هذه الذروة استطاعة الإشارة الجيبية المحمولة على قناة FCCH (انظر الشكل ٤-١١). ويبحث المستقبل عن هذه الذروة بدايةً ضمن نطاق القناة الترددية ذات الاستطاعة الأقوى وفق الترتيب الذي نتج عن الخطوة رقم (١)، فإذا لم يُمكن تمييز الإشارة الجيبية، انتقل المستقبل إلى القناة التالية وفق هذا الترتيب، وهكذا.

٤) بعد استخلاص تردد الإشارة الجيبية، يُضْبط تردد الاستقبال ليوافق قيمةً تصغر التردد المستخلص بمقدار 67.7 kHz.

٥) يمثل التقاط معلوماتِ رزمة التردد دليلاً حتمياً على أن القناة التي رُصدت هي حاملٌ أساسي لمحطة يمكن الولوج عبرها إلى الشبكة. لذا، يكمن الإجراء التالي في البحث عن قناة ضبط الزمن أو التزامن (SCH)، حتى يتسنى للوحدة تحقيق توافق زمني تام بين مؤقتات المحطة والمؤقتات الخاصة بها أو التي تحكم عملها، وهذا يمكّنها من تحديد بداية ونهاية كل حيز زمني (أو رزمة معلومات) على نحو دقيق، ومن ثم قراءة فحواها دون لبسٍ أو خطأ.

تتيح قراءة رزمة التزامن أيضاً استخلاص هوية المحطة (BSIC) والرقم المختصر للإطار الزمني الذي استُقبِلت رزمة التزامن ضمنه (انظر الشكل ٤-١٢).

٦) تنتقل الوحدة في الخطوة اللاحقة لقراءة المعلومات من قناة BCCH، التي تلتقطها على نفس الحامل، وبفاصلٍ زمني محدد ومعروف أيضاً (انظر الشكل الشارح لنمط CC_4). من أهم المعلومات التي تقرؤها الوحدة هوية الشبكة بتفصيل كامل، ومكان وجود المحطة ضمن الشبكة، ونمط توزيع القنوات الاعتبارية على كلٍ من القنوات الفيزيائية المتاحة، وقائمةً بترددات المحطات المجاورة التي يجب مراقبة إشاراتها. تقرأ الوحدة أيضاً الحد الأدنى المطلوب لاستطاعة الإشارة المستقبلة (أي الموسط Rxlev_Access_Min) حتى يكون النفاذ إلى الشبكة ممكناً بمستوىً مُرضٍ من الجودة. يقترن بهذا الموسط الحد الأعلى المسموح لطاقة بث الوحدة أن تبلغه (MS_TXPWR_MAX_CCH) حتى لا تؤثر سلباً على محطاتٍ أو وحداتٍ متحركة قريبة، تستخدم التردد ذاته. يُستخدم الموسطان السابقان مع الاستطاعة المتوسطة للإشارة المستقبلة من المحطة n ($\mathrm{RXLEV}(n)$) والاستطاعة العظمى للوحدة المتحركة P، لحساب موسطٍ خاص يرمز له بـ $C1(n)$ ويعطى بالعلاقة:

$$\begin{aligned} C1(n) &= (RXLEV(n) - RXLEV_ACCESS_MIN \\ &\quad - \max(0,(MS_TXPWR_MAX_CCH - P))) \end{aligned} \qquad (٤-٥)$$

يسمى هذا الموسط "معيار تحميد الاشارة" "Path Loss Criterion"، ويَدُلُّ على نوعية القناة الترددية كمنفذٍ إلى الشبكة.

فإذا كانت قيمة $C1$ للمحطة أكبر من "0"، تابعت الوحدة إجراءات النفاذ، وإلا وجب عليها البحث عن إشارةٍ أنسب، فتنتقل إلى تردد الإشارة التالية من حيث الاستطاعة وتعيد الخطوات اعتباراً من الخطوة رقم (٢).

٧) تقرأ الوحدة من معلومات قناة BCCH مكان وجودها ضمن الشبكة (انظر الفصل ٦)، وتقارنه بما هو محفوظ في ذاكرتها، فإذا لم يكن هناك تطابق، دلَّ ذلك على أن الوحدة قد غيرت مكانها على نحوٍ جذري. يحدث ذلك على سبيل المثال إذا كان المشترك موجوداً في منزله وأطفأ الجهاز، ثم غادر في اليوم التالي صباحاً إلى عمله أو إلى مدينة قريبة ولم يشَغِّل الجهاز إلا بعد وصوله. في هذه الحالة، يُعتبر المشترك -لغاية إعادة تشغيل الجهاز- موجوداً ضمن نطاق تغطية المقسم الأقرب لمنزله، إذ ليس لدى الشبكة أية إمكانية للعلم بتغيير المشترك لمكانه ومعرفة هذا المكان الجديد، وبدون عملية تحديث مكان الوجود التي نحن بصدد شرحها، ستوجه الشبكة رسائل النداء الخاصة بهذا المشترك إلى المحطة المغذية لمحيط إقامته وليس لتلك القريبة من مكان وجوده الفعلي أو الحقيقي.

ننوه في هذا السياق إلى أن الوحدة المتحركة -رغم إتمام الخطوات السابقة كلها- ما زالت لم تبادر بإرسال أية رسالة إلى الشبكة، وأن كل ما سبق من خطوات كان يهدف إلى إنجاز الإجراءات الضرورية للتعرف على الشبكة عن طريق قراءة المعلومات الأساسية عنها. لذا تكون هذه الوحدة -من وجهة نظر الشبكة- إما مجهولة الهوية ومكان الوجود (إذا كانت الشريحة جديدة)، أو موجودةً في المكان الذي كانت فيه قبل إطفاء الجهاز.

تباشر الوحدة إذاً -في حالة عدم تطابق مكان وجودها القديم مع المكان الذي تقرؤه من قناة BCCH- ما يعرف باسم "إجراء تسجيل مكان الوجود ضمن الشبكة" "Registration". حيث ترسل طلباً إلى الشبكة من أجل الحصول على قناة اتصال، يُرسل هذا الطلب على قناة طلب النفاذ RACH المحمولة على القناة الفيزيائية C_0TN_0 في الاتجاه الصاعد (انظر الشكل ٤-١٨)، حيث يكون سبب طلب قناة الاتصال هو تخصيص قناة SDCCH من أجل تحديث مكان الوجود (انظر الشكل ٤-١٤).

٨) في حالة إقرار الطلب وقبوله، يجيب النظام برسالة إقرار على قناة إجابة النفاذ AGCH، وتتضمن هذه الرسالة إشعاراً بالقناة الفيزيائية الحاملة لقناة SDCCH التي خُصصت للوحدة المتحركة.

٩) تُنجز بعد ذلك إجراءات التوثق، أي التحقق من هوية المشترك والتأكد من كونه مخَولاً للنفاذ إلى الشبكة ولاستخدام مواردها (سنشرح ذلك لاحقاً، انظر الفصل ٦)، حيث تُستخدم قناة SDCCH لتبادل المعلومات الخاصة بهذا الشأن بين طرفي الاتصال، كما تجري مراقبة جودة الإشارة الحاملة لهذه المعلومات عن طريق تبادل نتائج القياسات الدورية، والتي تحملها قناة SACCH المقترنة بقناة SDCCH.

بإتمام أو إكمال عملية أو إجراءات التسجيل تتوفر لدى الشبكة المعلومات الضرورية عن مكان وجود الوحدة، مما يمكِّنها عند الحاجة من توجيه رسائل النداء إلى المحطة الصحيحة.

١٠) بذلك تكون إجراءات التعرف على الشبكة والتسجيل قد استُكملت، وهذه الإجراءات تُتَّبع على النحو الذي ذكرناه عند كل تشغيلٍ للجهاز، وقبل المباشرة بأي اتصال. ومتابعةً لسياق الخطوات، نفترض أن اتصالاً يرد لهذه الوحدة بعد مدةً

زمنيةً ما. توجه المحطة في هذه الحالة رسالة نداء إلى الوحدة باستخدام قناة النداء PCH، فإذا قرأت الوحدة هذه الرسالة واستخلصت منها أنها المعنية بالنداء، بادرت إلى إرسال طلبٍ للنفاذ على قناة RACH في المسار الصاعد. استجابةً لذلك، يخصص النظام قناة تحكم مخصصة SDCCH لإنشاء الاتصال، كما يرسل النظام المعلومات الخاصة بهذه القناة،أي رقم قناة SDCCH/8(x) الفرعية والقناة الفيزيائية الحاملة لها، في متن رسالة الإجابة التي يرسلها على قناة AGCH. بعد تخصيص قناة التحكم، تباشر الوحدة تبادل المعلومات الأساسية الضرورية لإنشاء الاتصال، ويجري هذا التبادل باستخدام قناة SDCCH/8(x) والقناة المقترنة بها SACCH/8(x) على القناة الفيزيائية الحاملة لهاتين القناتين.

١١) بعد اكتمال طور التحضير للمكالمة أو إنشاء الاتصال، يخصص للوحدة قناة اتصال خاصة بها TCH/F، ومن ثَم تدخل الوحدة طور إجراء الاتصال أو تبادل المعلومات الفعلية.

٤-٦-٥ مهام الوحدة في حالة السكون

إذا أتمت الوحدة إجراءات إعلام الشبكة بوجودها (إجراءات التسجيل) ولم تكن هناك حاجةٌ من طرفها لإجراء اتصالٍ ما، فإنها تدخل بعد إكمال الخطوة (٩) في المثال السابق، في ما يسمى اصطلاحاً "حالة السكون" "Idle Mode"، وهي الحالة التي يكون فيها الجهاز مُشَغَّلاً وجاهزاً لتلقي أية مكالمة واردة، أو لمباشرة اتصالٍ مع طرفٍ آخر.

لا تكون الوحدة المتحركة في حالة السكون طرفاً في أي اتصال جارٍ أو قائم، غير أنها –رغم ذلك– تكون مضطلعة بعدة مهامٍ نوجزها في ما يلي:

١) تكون الوحدة في حالة إنصاتٍ دائم لقناة النداء PCH، والتي تقرؤها على نحوٍ دوري تحسباً لورود أي نداءٍ أو اتصال من طرف الشبكة.

٢) تستمر الوحدة في مراقبة إشارة المحطة التي اختارتها عند إنجاز عملية التسجيل، كما تستمر في تقييم إشارات المحطات المجاورة التي زُوِّدت بتردداتها عند قراءة قناة BCCH، فإذا تبين –نتيجةً لحساب ومقارنة قيم الموسط $C1$ للمحطة التي اختارتها الوحدة ولكل المحطات المجاورة– أن هناك محطة أخرى ذات إشارة راديوية أفضل، انتقلت الوحدة لتلك المحطة. ويعني الانتقال هنا أنها تضبط ترددها ومؤقتاتها الزمنية لتوافق المحطة الجديدة، ثم تتابع قراءة قناة BCCH على التردد الجديد، كما يصبح إنصاتها لقناة النداء PCH مرتبطاً بهذا التردد الجديد أيضاً، وإذا أرادت إجراء اتصال، فهي ترسل رسائل طلب النفاذ على هذا التردد أيضاً.

٣) عندما تختار الوحدة خلية جديدة، تقرأ من المعلومات العامة منطقة وجود هذه الخلية ضمن الشبكة. فإذا كانت المنطقة لم تتغير، أي إذا كان رمز المنطقة الجغرافية هو نفسه الذي تحتفظ به الوحدة، لا يتم إعلام الشبكة بشيء، إذ أن أي نداءٍ من طرف الشبكة سيصل إلى الخليتين ما دامتا ضمن المنطقة ذات الرمز الجغرافي نفسه (انظر الفصل ٦ للتفاصيل). غير أن هذه الحالة تختلف عندما يكون المشترك في حالة انتقال بالسيارة مثلاً، قاطعاً مسافات طويلة، إذ يؤدي ذلك في كثير من الأحيان إلى المرور ضمن مجال محطات عديدة وإلى تبديل لرمز منطقة الوجود، وهذا يقتضي أن تباشر الوحدة عملية

تحديثٍ لرمز مكان الوجود وفق الخطوات التي شرحناها سابقاً. يكمن الهدف الأساسي من ذلك في أن تكون الشبكة على دراية مستمرة بالمكان الصحيح لوجود الوحدة، حتى يُتاح توجيه رسائل النداء -في أي وقت- إلى مجموعة الخلايا المناسبة.

٤) تنجز الوحدة المتحركة كلاً من الإجراءات السابقة وفق أدوارٍ محددة تتلخص في ما يلي (يمكن الرجوع إلى [٩] و [١٣] لمزيد من التفاصيل عن كل إجراء):

- يجب استخلاص المعلومات من قناة BCCH الخاصة بالخلية المغذية الحالية (خلية النفاذ) كل 30 ثانية.
- يجب ضبط التردد والمؤقتات الزمنية وقراءة حقل BSIC من رزمة التزامن الصادرة عن محطة التغذية الحالية كل 30 ثانية.
- يجب إكمال قراءة المعلومات التي تحملها قنوات BCCH من المحطات المجاورة كل 5 دقائق.
- تقتضي مراقبة إشارات الخلايا المجاورة تحديث قائمة الخلايا الستة -ذوات الإشارات الأقوى- كل 60 ثانية، وإذا تبين وجوب إدراج خلية جديدة في اللائحة (عوضاً عن واحدةٍ أخرى)، يجب على الوحدة المتحركة أن تقرأ المعلومات من قناة BCCH الخاصة بهذه الخلية خلال 30 ثانية.

٤-٧ بنية الرابط الراديوي في نظام GPRS

أشرنا في الفصل الأول إلى أن جُلَّ التحسينات المتعلقة بإتاحة خدمات تبادل المعطيات، والتي وفرها نظام GPRS، كان متعلقاً بالرابط الراديوي. ونوهنا إلى أن الإسم التسويقي لهذ النظام يؤكد على هذه الحقيقة. لذا، نسلط الضوء في ما يلي على بعضٍ من هذه التحسينات، بغية تعريف القارئ بأهم المبادئ التي تحكم تبادل المعطيات عبر الرابط الراديوي.

ننوه بدايةً -تجنباً لأي لبس- إلى أننا سنستخدم في معرض النقاش المصطلحات التالية:
"رزمة معلومات راديوية" أو اختصاراً "رزمة ": سبق التعريف بهذا المصطلح على أنه يقابل كلمة "Burst" الدالة على البتات التي يشملها حيز زمني ما.
"رزمة معطيات": سنستعين بهذا المصطلح كمقابل لكلمة "Packet" بمفهومها التقليدي.
"معطيات رزمية" أو "المعطيات": نعني بهذا المصطلح دفقاً من المعلومات المجزأة إلى رزم معطيات، أي "Packet Data".
"اتصال رزمي": نقصد بذلك إجراءَ تبادل المعطيات بين الشبكة والوحدة المتحركة، أي "Packet Data Call".

٤-٧-١ الوحدة الأساسية لنقل المعطيات الرزمية

تبين من خلال الفصل ٢ ومما ناقشناه في هذا الفصل، أن بنية الشبكة ومكوناتها ترتبط ارتباطاً مباشراً بتقنية تعدد النفاذ المستخدمة، وبالوحدة الأساسية لنقل المعلومات عبر الرابط الراديوي. وسبق التنويه في الفصل الأول أيضاً إلى أن الحفاظ على

بنية الشبكة كان من أهم الأغراض والمقاصد التي رافقت تطوير التقنيات والتحسينات المتعلقة بإتاحة تبادل المعطيات الرزمية، ونقصد في هذا السياق تقنية GPRS على وجه الخصوص. لذا، اقتضت التحسينات المضافة الإبقاء على الحيز الزمني وإطار TDMA كبنية مشتركة بين نظام GSM التقليدي ونظام GPRS، وهذا يعني أن رزمة نقل المعلومات (Normal Burst) التي شرحنا بنيتها في الشكل ٤-١٠، والتي تشمل حقلي معلومات بسعة 57 بتاً لكل منهما، هي التي تُستخدم لنقل المعطيات الرزمية على نحوٍ سيأتي تفصيله .

إضافة إلى ذلك، يستخدم نظام GPRS الأصناف الأخرى للرزم، والمبينة في الشكل ٤-٤، للمهام الوظيفية نفسها المنوطة بكلٍّ منها، وهذا يؤكد على الطبيعة الهجينة لنظام GPRS، إذ تُستخدم قنوات التحكم الخاصة بالخدمات التقليدية، المستَنِدة إلى تقنية تبديل الدارات، لتنسيق وإدارة آليات تبادل المعطيات الرزمية.

٤-٧-٢ آليات تخصيص الموارد الفيزيائية

يمثل عدد البتات التي يمكن نقلها أو حملها ضمن رزمة راديوية واحدة العامل الأساسي في الحد من السرعة المتاحة لنقل المعلومات عبر الرابط الراديوي، خصوصاً وأن هذه البتات تشمل -إضافةً إلى المعلومات المراد إرسالها- معلومات أخرى فائضة، خاصة بتوفير حصانةٍ من عوارض القناة (انظر البحث ٥-٣). لذا تكون المعلومات الصرفة ضمن الرزمة الواحدة أقل من 114 بتاً. إضافة إلى ذلك، لا يتيح نظام GSM التقليدي حجز أو تخصيص أكثر من حيز زمني واحد للمشترك نفسه، وهذا الحيز يجري تخصيصه أثناء طور إنشاء الاتصال، ويبقى مخصصاً للمشترك طوال مدة الاتصال، ولا يمكن شَغْلَه باتصالات مشتركين آخرين حتى تنتهي مكالمة المشترك الذي خُصص هذا الحيز له، إذ يجري تحريره بعد نهاية المكالمة. كذلك يقتضي مبدأ تبديل الدارات أن يبقى هذا الحيز محجوزاً للمشترك، حتى إذا لم يكن يحمل معلوماتٍ مهمة (أثناء مدد الصمت على سبيل المثال).

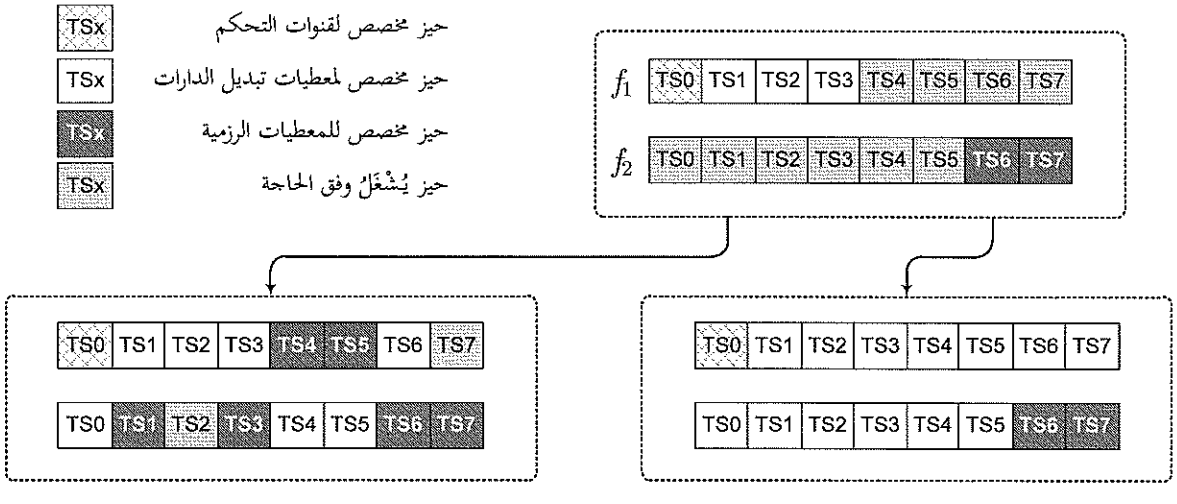
يتضح مما سبق أن تخصيص حيزٍ واحد لكل مشترك يحدُّ من السعة المتاحة أو الممكنة لنقل المعلومات، كما أنه يعني استثماراً غير فعال للموارد الفيزيائية المتاحة. لذا، أدرجت ضمن التحسينات الخاصة بـ GPRS تعديلات مهمة على آليات شغل وتخصيص الأحياز الزمنية، نشير إلى أهمها في ما يلي:

١) تتيح المواصفات المعيارية تشاركَ كلٍّ من نوعي أو صنفي المعلومات ضمن الشبكة، أي المتعلق بالخدمات الهاتفية التقليدية والآخر الممثِّل لمعطيات رزمية، بحجز الأحياز الزمنية المتاحة على كل قناة ترددية ضمن الخلية. وهذا يعني جواز استخدام كل حيز من الأحياز الثمانية ضمن الإطار الزمني (إطار TDMA) إما لنقل رزمٍ راديوية تحمل معلومات تقليدية تحكمها تقنية تبديل الدارات، أو لتبادل رزم راديوية تمثل معطيات رزمية استناداً إلى مبادئ توجيه الرزم.

ويجري تعيين الأحياز أو القنوات المخصصة لتبادل المعطيات إما على نحوٍ ثابت وحصري، أي أن الأحياز الزمنية الخاصة بتبادل المعطيات تكون معرَّفة من قبل المشغِّل لكل خلية، ولا تستخدم إلا لخدمات نقل المعطيات، وقد يجري تخصيص الأحياز على نحوٍ ديناميكي، بحيث يمكن استخدامها لخدمات تبادل المعطيات على نحوٍ مؤقت، عندما تكون شاغرة، وإذا كان عبء المكالمات أو الاتصالات الهاتفية التقليدية يسمح بذلك.

تُعيَّن هذه الأحياز من قبل المشغل، ومن ثم يكون عدد الأحياز المشغولة بارزم التي تنقل معطيات رزمية متغيراً وفقاً لغزارة أو كثافة الاتصالات في الخلية. فعلى سبيل المثال، ترصد الشبكات في الحالة الواقعية طلباً متزايداً لنقل المعطيات الرزمية في الأوقات المسائية أو المتأخرة ليلاً، وذلك بعد انتهاء دوام العاملين والموظفين، حيث يتاح الوقت للكثير منهم لتصفح الانترنت أو تحميل مقاطع صوتية أو مرئية، أو التواصل مع المعارف والأصدقاء عبر تطبيقات التخاطب البديلة. لذا، من الممكن أن يخصِّصَ المشغل عدداً أكبر من الأحياز الزمنية لتبادل المعطيات الرزمية، بحيث يمكن شغلها مساءاً، مع إبقاء الأولوية للخدمات الهاتفية التقليدية. فإذا انخفضت كثافة المكالمات مساءً، أمكن شغل الأحياز بالمعطيات الرزمية، دون أن يؤدي ذلك إلى اختناقات في حركة المكالمات.

يوضح الشكل ٤-٣١ هذا المبدأ في حالة محطة ثابتة مزوَّدة بحاملين ترددين، يخصص على الأول حيز زمني للتشوير، وثلاثة أحياز للمكالمات الهاتفية حصراً، كما يخصص الحيِّزان الأخيران على الحامل الثاني لنقل المعطيات الرزمية، حصراً كذلك. أما الأحياز المتبقية، فيمكن أن تُشغل وفقاً للحاجة. نقرأ من الشكل أن كل الأحياز المتوفرة تُشغل بمكالمات هاتفية وقت الذروة، بينما تُستخدم أربعة أحياز إضافية لنقل المعطيات الرزمية في غير أوقات الذروة.



الشكل ٤-٣١: مثال على تشارك المكالمات و المعطيات بشغل الأحياز الزمنية على نحوٍ متكيف مع عبئ الشبكة.

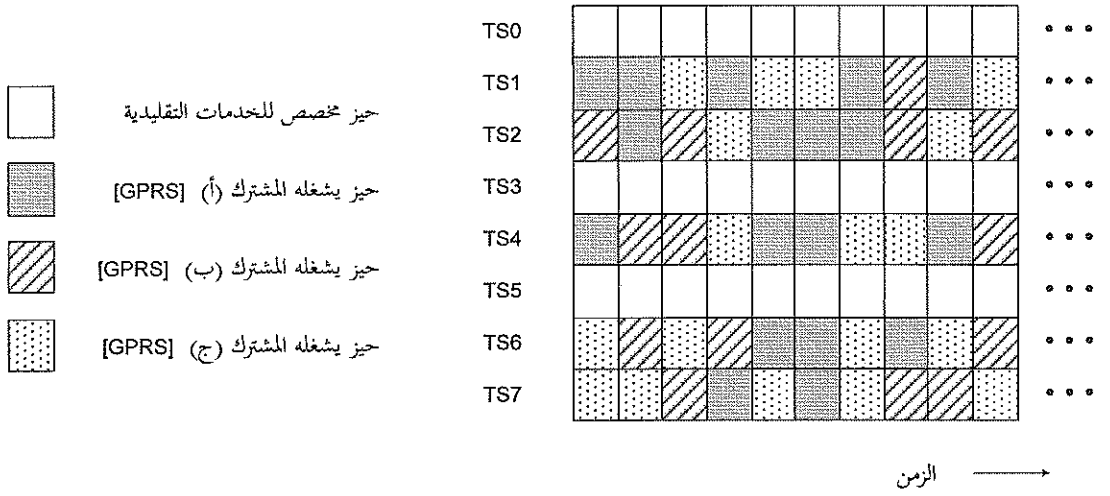
٢) يمكن للوحدة المتحركة أن تستخدم أكثر من حيز زمني في الوقت نفسه، وهذا يعني أن السعة المتاحة لنقل المعطيات الرزمية تكون أكبر، ما يقود إلى معدلاتِ دفقٍ تفوق ما يتيحه حيزٌ واحدٌ.

تصنف المواصفات المعيارية عدد الأحياز التي من الممكن أن يشغلها مشتركٌ ضمن فئات متعددة، وتطلق على هذا العدد تعبير "نمط تعدد شغل الأحياز" "Multislot Class". كما تعطي المواصفات المعيارية تحديداً دقيقاً لهذا الأنماط، وذلك

وفقاً للسعات المتاحة، ولاعتباراتٍ أخرى تتعلق بنوعية الأجهزة أو الوحدات المتحركة، وبمعايير الجودة التي يجب أن تحكم تبادل المعطيات [١٤]. هذا وتتيح الأجهزة الحديثة دعم عددٍ يصل إلى خمسة أحياز.

٣) من الممكن تخصيص الأحياز الزمنية للمشترك الواحد على نحوٍ مستقلٍ لكلٍّ من جهتي الاتصال، ففي غالب الأحيان، يكون كم المعطيات في جهة المسار الهابط أعلى بكثير من نظيره في المسار الصاعد، لذا يتيح تخصيص عددٍ أكبر من الأحياز للمسار الهابط –عند الحاجة– مرونة أكبر في استثمار الموارد الفيزيائية، حيث من الممكن أن تُمنح الأحياز الشاغرة في المسار الصاعد لمشتركين آخرين.

٤) يخصص الحيز الزمني لنقل معلوماتِ وحدةٍ متحركة ما على نحوٍ مؤقت، أي طيلة المدة اللازمة لإنجاز نقل المعطيات المرغوبة بمعدل الدفق المتاح. بعد ذلك، يُحرّر هذا الحيز الزمني، ويصير متاحاً لوحداتٍ أخرى. هذا يعني جوازَ تشاركِ عدة وحدات متحركة في استخدام أو شغل الحيز الزمني المتكرر نفسه، وفقاً للحاجة، وتبعاً للموارد الفيزيائية المتاحة (انظر الشكل ٤-٣٢). فعلى سبيل المثال، إذا تعاقبت ثلاث وحدات على شغل الحيز،أي شغلته الوحدة الأولى في الإطار x ، ثم الوحدة الثانية في الإطار $x+1$، ثم الثالثة في الإطار $x+2$، ثم الأولى في الإطار $x+3$، وهكذا، فإن هذا التعاقب يستمر ما دعت الحاجة لذلك. وحين تفرغ وحدةٌ من نقل المعطيات الخاصة بها، من الممكن أن تتعاقب اثنتان فقط على شغل الحيز، كما من الممكن أن تُضاف وحدة ثالثة أو رابعة أيضاً، وفق الحاجة.



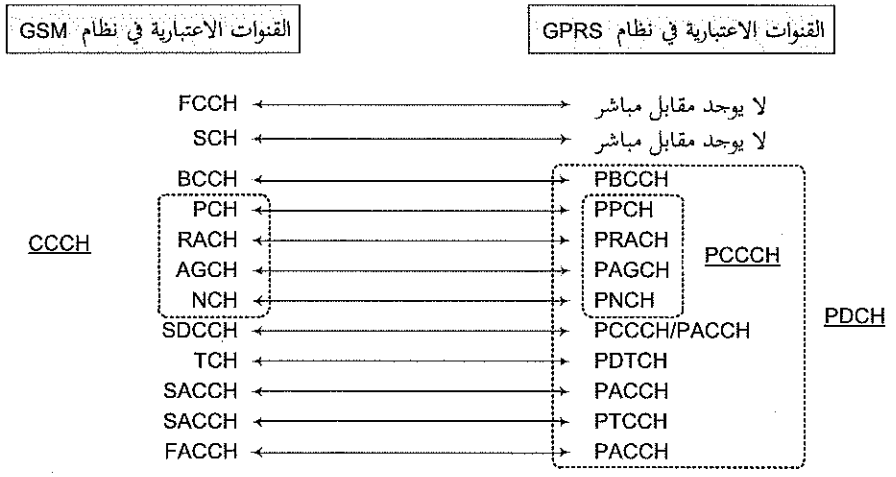
الشكل ٤-٣٢: توضيحٌ لتعاقب أكثر من مشترك على شغل حيز زمني واحد، ولشغل المشترك الواحد لأكثر من حيز (مؤقتاً).

يُعرف مجموع الآليات التي ذكرناها، والتي تصب في إتاحة سعات أكبر لنقل المعطيات عبر الرابط الراديوي، مع الشغل الأمثل للموارد المتاحة، بمصطلحٍ جامع هو "التخصيص المتكيف للقنوات الفيزيائية" "Dynamic Channel Allocation (DCA)"، وقد يُشار إليها أيضاً بتعبير "تخصيص الموارد وفق الحاجة أو وفق الطلب" "On Demand Allocation". بالمقابل، يطلق على حالة "التخصيص الحصري للقنوات المتاحة" اسم "Dedicated Channel Allocation".

٤-٧-٣ القنوات الاعتبارية والفيزيائية الخاصة بالمعطيات الرزمية

لم يجر تعديلٌ جذري على تعريف القنوات الاعتبارية أو الفيزيائية المعتمد في نظام GSM. فالقناة الفيزيائية في نظام GPRS تتمثل أو تنشأ من خلال تكرار الحيز الزمني، ضمن إطار TDMA وعلى تردد محدد. أما القنوات الاعتبارية، فتدل على التصنيف الوظيفي للمعلومات المتبادلة بين طرفي الاتصال، وعلى سياق كلٍّ منها. ولعل الفرق الوحيد هو أن مصطلح القناة الفيزيائية في حالة GPRS قد يدل على أكثر من حيز زمني، إذا كان أيٌّ من الوحدة المتحركة أو المحطة الثابتة يستخدم أكثر من حيز لنقل المعلومات الخاصة بدفق معطياتٍ مشتَرَك، أو اتصالٍ رزمي واحد، كما بيَّنّا في الفقرات السابقة.

لتمييز القنوات الفيزيائية الحاملة لمعطيات رزمية (أو لمعلومات تشوير وتحكم متعلقة بها) عن غيرها من القنوات، اصطُلح على استخدام كلمة "رزمة" "Packet" كبادئة أو قرينة لأسماء تلك القنوات. لذا يُطلق على أي حيز زمني يُشغل بهذه المعطياتِ تعبير "قناة معطيات رزمية" "Packet Data Channel (PDCH)". ويجري تصنيف القنوات الاعتبارية على نحوٍ مشابهٍ لما عرضناه في حالة نظام GSM التقليدي، فإذا حملت القناة معطياتٍ فعلية سُمِّيتْ بـ "Packet Data Traffic Channel (PDTCH)"، أما إذا حملت معلومات تحكم بدفق معطيات رزمية، فإنها تندرج ضمن المصطلح الشامل لقنوات التحكم وهو "قناة تحكم بالمعطيات الرزمية" "Packet Data Control Channel (PDCCH)". وعلى نحوٍ مشابهٍ لنظام GSM التقليدي، تخضع قنوات التحكم لتصنيف إضافي، يشمل قنوات تحكمٍ عامةٍ ومشتركةٍ ومخصصةٍ (انظر الشكل ٤-٨). ولمَّا كنا عرضنا لمبادئ التصنيف باسهاب، نكتفي فما يلي بعرض مقتضب لأهم هذه القنوات، كما نحيل القارئ إلى الشكل ٤-٣٣ الذي يسرد هذه القنوات ونظير كل منها في نظام GSM.



الشكل ٤-٣٣: القنوات الاعتبارية الخاصة بالمعطيات الرزمية ومقابلها في نظام GSM التقليدي.

- "قناة المعلومات العامة" "Packet Broadcast Control Channel (PBCCH)": تعتبر هذه القناة من حيث مهامها نظيرةً لقناة BCCH، وتُستخدم لبث المعلومات الضرورية عن الشبكة إلى كل المشتركين الموجودين ضمن مجالٍ يمكِّنهم من

استقبال هذه المعلومات. تكون المعلومات التي تحمل على هذه القناة من ناحية فحواها مماثلة لما تحمله قناة BCCH، يتيح هذا التماثل للوحدات المتحركة المؤهلة لتقديم الخدمات التقليدية إضافة إلى خدمات المعطيات، الاكتفاء بمتابعة هذه القناة، دون الحاجة إلى متابعة قناة BCCH. ينطبق ذلك على الغالبية الساحقة للوحدات المتحركة المُتداولة والمتاحة، ولا يُستثنى منها إلا أجهزة المودم المصممة لتبادل المعطيات فقط "Dongles".

- "قناة التحكم العامة" "Packet Common Control Channel (PCCCH)": تُستخدم هذه القناة لنقل معلومات تحكم خاصة بإدارة موارد الشبكة، وآليات الولوج إليها، وتمثل هذه القناة عنواناً جامعاً لأكثر من قناة ، أهمها:
  - "قناة طلب النفاذ العشوائي" "Packet Random Access Channel (PRACH)": هذه القناة هي المستخدمة لطلب النفاذ العشوائي إلى الشبكة، حيث تصرِّح الوحدة المتحركة من خلال المعلومات المحمولة على هذه القناة عن حاجتها لقناةِ حمل معطيات (PDTCH)، أو لعدة قنوات، وفق الحاجة.
  - "قناة قبول طلب النفاذ" "Packet Access Grant Channel (PAGCH)": تُستخدم هذه القناة في المسار الهابط لإعلام الوحدة المتحركة بقبول طلب النفاذ وتخصيص قناة لنقل المعطيات (PDTCH).
  - "قناة النداء" "Packet Paging Channel (PPCH)":تحمل هذا القناة معلومات النداء من قبل الشبكة في حالة ورود اتصالٍ رزمي للمشترك، أو طلبِ نقل معلوماتٍ إليه.
  - "قناة الإخطار العامة" "Packet Notification Channel (PNCH)": تُستخدم هذه القناة لإعلام الوحدة المتحركة بورود معلومة عامة تُبَثُّ لكل المشتركين ضمن الخلية.
  - "قناة التحكم المُقترنة" "Packet Associated Control Channel (PACCH)": على غرار ما ناقشناه في نظام GSM التقليدي، تكون هذه القناة مقترنة دائماً باتصالٍ رزمي قائم مع الشبكة، حيث تنقُل معلوماتِ تحكم خاصة بمشترك محدد، مثل المعلومات المتعلقة بخفض أو رفع طاقة البث على سبيل المثال.
  - "قناة ضبط تقديم الإرسال" "Packet Timing Advance Control Channel (PTCCH)": تستخدم هذه القناة لتحقيق تزامن الإطار الحامل للمعطيات المتبادلة بين الوحدة والمحطة الثابتة، حيث ترسل الوحدة في المسار الصاعد على هذه القناة رزمة طلب نفاذ إلى المحطة الثابتة، واستناداً إلى التأخير الذي يطرأ على هذه الرزمة، تُجري المحطة تقديراً للمسافة الفاصلة بين الوحدة المتحركة والمحطة، وتحدد لمدة الضرورية لتقديم الإرسال، حتى لا يحدث تداخل بين المعلومات الخاصة بأحياز زمنية مختلفة. هذا وتُعلِم المحطة الثابتة الوحدةَ المتحركة بالقيمة المقدرة للموسط TA باستخدام القناة ذاتها في المسار الهابط.

ننوه في هذا السياق إلى وجود حالات خاصة تتطلب تنسيقاً بين القنوات الخاصة بالمعطيات الرزمية والقنوات الخاصة بالخدمات التقليدية، فعلى سبيل المثال، إذا كانت قناة PRACH غير متوفرة أو متاحة لسبب ما، يمكن للوحدة المتحركة استخدام قناة RACH التقليدية لطلب النفاذ إلى الشبكة، خصوصاً وأن الرزمة المستخدمة من قبل كلا القناتين هي نفسها.

لا تُستخدم قنوات المعطيات إلا وفق أنماطٍ محددة ومعرَّفة، على نحو مشابه لما ناقشناه في حالة نظام GSM التقليدي. تناسب هذه الأنماط حالات الاتصال المختلفة، وتساعد على استثمار الرابط الراديوي على أحسن وجهٍ ممكن. وقد عرَّفت المواصفات المعيارية ثلاثة أنماط خاصة بنظام GPRS، نحيل القارئ إلى [٤] و[١٥] للمزيد من التفاصيل عنها.

٤-٧-٤ وحدة نقل المعطيات الرزمية عبر الرابط الراديوي

مرَّ في ما سبق أن أصغر وحدة فيزيائية لنقل المعطيات هي الرزمة الراديوية (Burst)، والتي تحمل 114 بتاً من المعلومات. وهذا يقتضي أن تُجزَّأ المعلومات المراد إرسالها، والتي تمثل معطيات الطبقات العليا ضمن مجموعة بروتوكولات TCP/IP، على نحوٍ مناسب، يكون متوافقاً مع السعة التي تتيحها الرزمة الراديوية.

لتوضيح مبادئ هذه التجزئة ننطلق من دفق المعطيات الرُّزَمي الذي يَرِد إلى الطبقة البروتوكولية المسماة "طبقة التحكم بمسار نقل المعطيات" "Logical Link Control Layer (LLC)" ضمن منظومة TCP/IP[1]. تُعنى هذه الطبقة بتوفير مسارٍ آمنٍ وموثوق لتبادل المعطيات بين الوحدة المتحركة والشبكة، ممثَّلةً بـ"الموجِّه" "Router" الرئيسي ضمن الشبكة المركزية (سنعرض لبنية الشبكة في الفصل ٦)، وتقدم هذه الطبقة آليات أو خدمات التحكم بغض النظر عن طبيعة وسط النقل المادي بين طرفي الاتصال، أو ماهية الموارد الفيزيائية الحقيقية التي ستُنقل عليها المعطيات.

تضيف طبقة LLC إلى معطيات الطبقات العليا معلومات تحكم في هيئة " ترويسة" أو "بادئة" "Header"، وتُعْرف وحدة المعلومات الناتجة عن هذا الإجراء على نحوٍ عام باسم "وحدة معطيات بروتوكولية" "Protocol Data Unit (PDU)". تُميَّز هذه الوحدة من طبقةٍ إلى أخرى عن طريق قرنِ اختصارِ اسمِ هذه الوحدة باسم الطبقة المعنية، لذا يقود هذا الإجراء ضمن طبقة LLC إلى وحدات معطيات طبقة LLC، التي يُشار إليها بـ "LLC-PDU".

بعد إعداد وحدة LLC-PDU، تـُمَـرَّر بتمامها إلى الطبقة التي تدنوها وهي "طبقة حماية المعطيات" "Data Link Layer"، التي تتألف من طبقتين فرعيتين: تعرف الأولى منهما باسم "طبقة التحكم بالمسار الراديوي" "Radio Link Control (RLC)"، والثانية باسم "طبقة التحكم بالنفاذ إلى الوسط المادي" "Medium Access Control (MAC)".

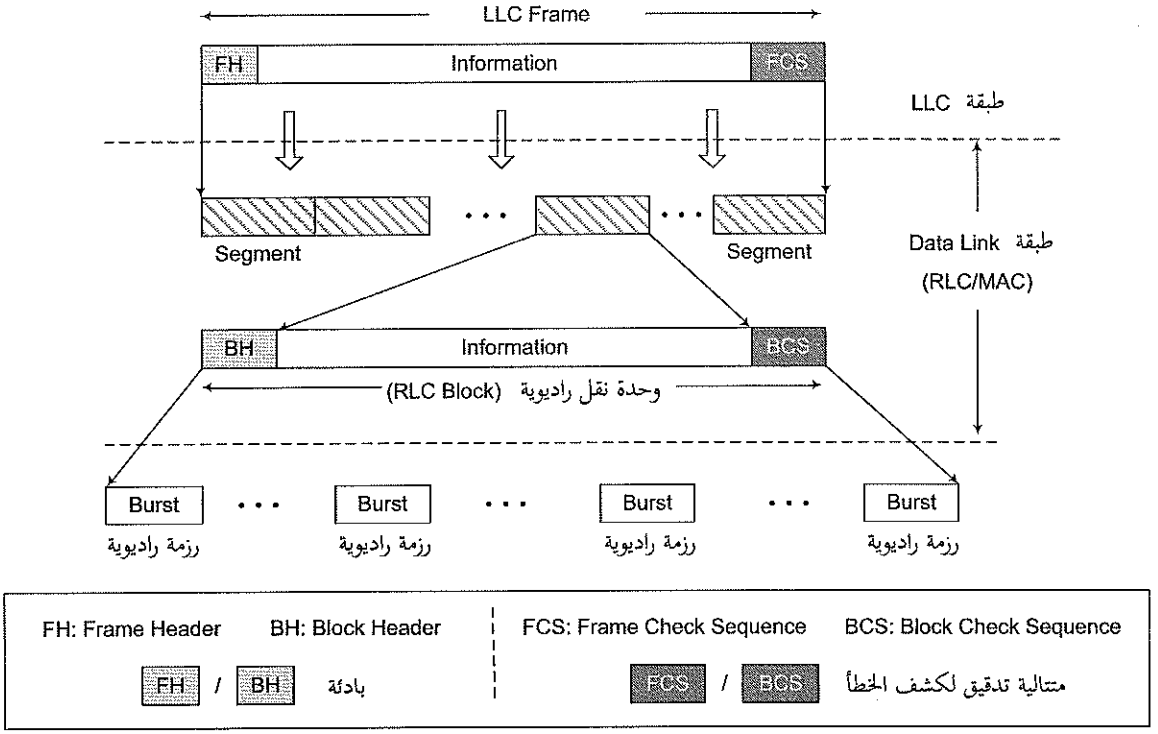
تتولى طبقة RLC مهام تحضير المعلومات الواردة من طبقة LLC لتكون ملائمة ومناسبة للوسط المادي الفعلي الذي سيحملها، أي الرزم الراديوية ضمن الأحياز الزمنية. لذا يتمثل دور هذه الطبقة الأساسي في تجزئة المعلومات إلى "مقتطعات" "Segments"، وتزويد كل مقتطع عند الإرسال بحقولٍ إضافية تضم معلومات خاصة بالعنونة، أي عنوان وجهة الإرسال، وبمعلوماتِ تحكمٍ تتيح كشف الأخطاء الناجمة عن خطوات النقل. أما عند الاستقبال، فتتولى هذه الطبقة إعادة تجميع المعلومات من الوحدات الجزئية (المقتطعات) المحمولة ضمن الأطر المتتابعة، وضمها تبعاً للعناوين والوجهات المعنية بالاستقبال، وتحليل حقول التحكم، بغية الكشف عن وقوع أية أخطاء.

---

[1] نفترض في هذا السياق إلمام القارئ بمبادئ البنية الطبقية للبروتوكولات على نحوٍ عام، ولمجموعة بروتوكولات TCP/IP على نحوٍ خاص.

أما الطبقة الجزئية الثانية (طبقة MAC) فتُعنى بتنسيق توزيع وحدات المعلومات المختلفة على الموارد الفيزيائية المتاحة فعلياً، أي أن هذه الطبقة هي التي تُحدد أرقام الأحياز الفعلية التي ستشغلها المعلومات.

توافقاً مع مهام هاتين الطبقتين تجري تجزئة وحدات LLC-PDU إلى وحداتٍ أصغر، يُذَيَّلُ كلٌّ منها بمتتالية لكشف الخطأ "متتالية تدقيق" "Block Check Sequence (BCS)"، كما يضاف لكل وحدة بادئة (Header) تحوي معلومات تحكم أخرى تتعلق بالعنونة وتنسيق النفاذ. يفضي ذلك إلى وحدة معلومات خاصة بهذه الطبقة نطلق عليها اسم "وحدة النقل الراديوي" "RLC-Block"، وتجري عملية تجزئة المعلومات الواردة من طبقة LLC بحيث يكون طول كل وحدةِ نقلٍ راديوي ناتجة، أي طول كل RLC-Block، ملائماً تماماً للنقل ضمن أربعة أحياز زمنية (انظر الشكل ٤-٣٤)، حيث تتولى معلومات التحكم التي أضافتها طبقة MAC تحديد الأحياز الزمنية المناسبة لحمل أجزاء RLC-Block الأربعة ضمن سياق الإطار المتعدد.
بذلك تمثل وحدة النقل الراديوي (RLC-Block) –من منظور طبقات البروتوكولات العليا– الوحدة الأساسية لتبادل المعطيات الرزمية، بينما تمثل الرزمة الراديوية (Burst) الوحدة الأساسية لنقل هذه المعطيات (أي من منظور الطبقة المادية)



الشكل ٤-٣٤: الحصول على وحدة النقل الراديوي (RLC-Block) وتجزئتها للنقل ضمن أربعة أحياز زمنية.

مرَّ في ما سبق أنه من الممكن لعدة مشتركين التشاركُ بشغل قناة فيزيائية واحدة، كما يمكن للمشترك الواحد أن يُشارك بشغل أكثر من حيز على نحوٍ مؤقت. لذا، لا يكفي استخدام رقم الحيز الزمني فقط لتمييز المشتركين عن بعضهم، خصوصاً وأن هذا

التشارك ذو صفةٍ مؤقتة، أي أنه من الممكن أن يتشارك 4 مستخدمين في استخدام القناة الفيزيائية نفسها، ثم ينتهي نقل المعلومات أو المعطيات الخاص بأحدهم، فيحل محله مشتركٌ جديد، وهكذا. ولإتاحة هذا التمييز، يُشار إلى دفق المعطيات الرزمية الخاص بكلٍّ من المشتركين، والذي ينتج عن تجميع وضم المعطيات المرسلة في كل وحدة RLC-Block، باسم "دفق المعطيات الجزئي أو المؤقت" "Temporary Block Flow (TBF)".

يتحقق تمييز هذا الدفق عن غيره برقمٍ خاص به يكون متضَمَّناً في بادئة أو معلومات التحكم ضمن كل وحدة RLC-Block، بحيث يكون من الواضح تماماً رقم الدفق الذي تمثل المعلومات المحمولة ضمن الوحدة المعنية جزءاً منه. يُعرف هذا الرقم باسم "رقم الدفق الجزئي أو المؤقت" "Temporary Flow Identifier (TFI)"، ويشغل 5 بتات ضمن بادئة التحكم. ولمَّا كان شَغل أو تخصيص القنوات الفيزيائية يجري للمسار الصاعد على نحوٍ مستقل عن المسار الهابط، فإن الشبكة تخصص رقم TFI لكل مسارٍ على حدة. فعندما يرغب المشترك بإرسال كمية من المعلومات، يُطلب من الشبكة تخصيص أو تعريف TBF خاص بالمسار الصاعد، وعندما تريد الشبكة إرسال معلومات إلى المشترك، تخصص TBF آخر خاص بالمسار الهابط، كما تُعرِّف رقم TFI خاص لكل من المسارين.

٤-٧-٥ الإطار المتعدد الخاص بنقل أو تبادل المعطيات

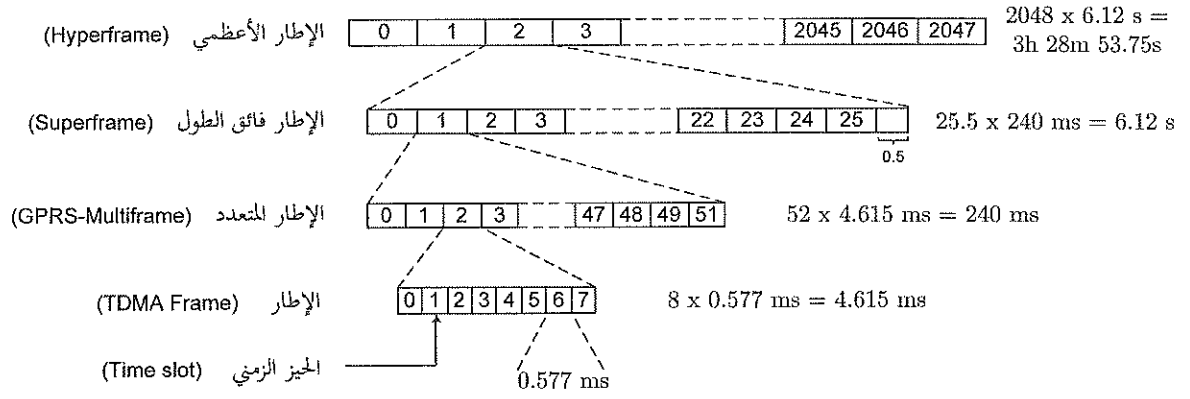
أشرنا عند شرح بنية الرابط الراديوي إلى أن نظام GSM التقليدي يُعرِّف صنفين للإطار المتعدد (Multiframe)، يشمل الأول 26 إطاراً أساسياً (إطار TDMA)، ويُستخدم لتنسيق نقل معلومات المشترك، أما الثاني فيشمل 51 إطاراً، ويخصص لمعلومات التحكم (انظر الشكل ٤-٥ و الشكل ٤-٦). وقد اقتضى الحرص على عدم تغيير البنية التقليدية للرابط الراديوي استحداثَ إطارٍ متعددٍ جديد، خاص بنقل المعطيات الرزمية ورسائل التحكم المتعلقة بها.

يتكون هذا الإطار من 52 إطاراً أساسياً متتابعاً، ويُستخدم كوحدةٍ إضافية لتنسيق وترتيب تعاقب القنوات الاعتبارية المعنية بنقل المعطيات الرزمية على شغل الأحياز الزمنية، وذلك وفق الأنماط المحددة التي تتيحها المواصفات المعيارية.
يندرج هذا الإطار المتعدد ضمن الهيكلية التراتبية التي يعرفها نظام GSM الأساسي (انظر الشكل ٤-٣٥)، حيث يوافق كل 25.5 إطاراً متعدداً لنقل المعطيات الإطارَ المسمّى بالإطار فائق الطول (Superframe)، بذلك يكون كل إطارٍ فائقٍ شاملاً إما لـ 26 إطاراً لنقل معلومات تقليدية، أو لـ 51 إطاراً تنقل معلومات تحكم، أو لـ 25.5 إطاراً لنقل المعطيات الرزمية (قارن بين الشكل ٤-٥ و الشكل ٤-٦ و الشكل ٤-٣٥).

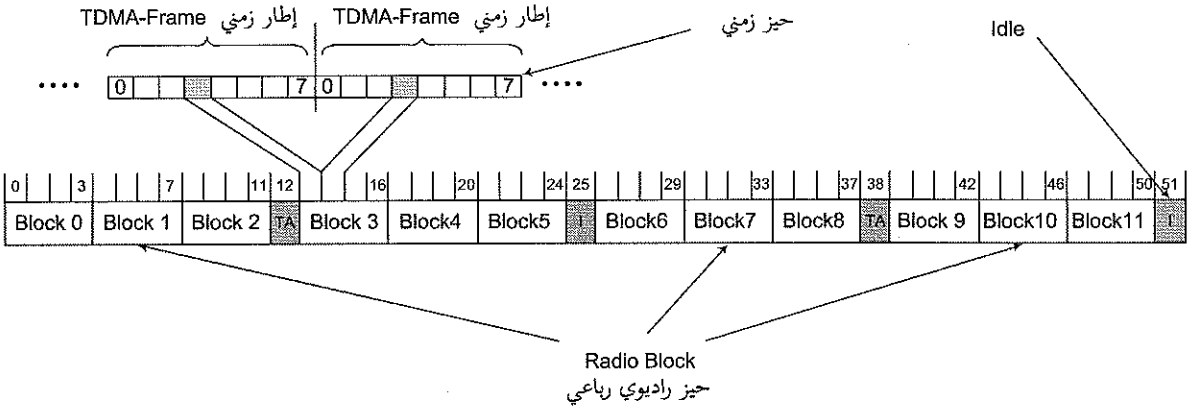
يُشغل الإطار المتعدد -كما ذكرنا-بالمعلومات الناتجة عن تجزئة وحدات النقل الراديوي (RLC-Block)، ولما كانت كل وحدة تجزأ إلى أربع رزم راديوية، يتطلب نقل كل وحدة تعاقبَ أربعة أطر زمنية (TDMA Frame)، بحيث تشغل كل رزمة حيزاً زمنياً ضمن واحدٍ من هذه الأطر. يُطلق على الأحياز الأربعة مجتمعة تعبير "حيز راديوي رباعي" "Radio Block" (أو اختصاراً حيِّز رباعي). ولما كان الإطار المتعدد يشمل 52 إطاراً، فهو يتيح سعةً لنقل 12 وحدة RLC-Block ضمن 12 حيزاً رباعياً

(Radio Block)، إضافةً إلى حيزين شاغرين (Idle)، وحيزين يُستخدمان لنقل معلومات التحكم بتقديم الإرسال (TA). يقود ذلك إلى البنية التي يوضحها الشكل ٤-٣٦.

هذا ويحمل كل حيز رباعي رقماً تسلسلياً محدداً ، يستخدم لأغراض التنسيق بين القنوات الاعتبارية التي تشغل الأحياز الزمنية المتتابعة .



الشكل ٤-٣٥: تعريف الإطار المتعدد لنقل المعطيات الرزمية وكيفية إدراجه ضمن البنية الهرمية للرابط الراديوي.



الشكل ٤-٣٦: تعريف الحيز الراديوي الرباعي (Radio Block).

ختاماً لهذا الفصل نؤكد مرة أخرى أن ما عرضناه من المبادئ والمفاهيم لا يختص بنظام GSM وحده، بل هو مشتركٌ بين النظم كلها. فالقنوات الاعتبارية، وتنوعها، وحمل مضمونها على قنوات فيزيائية، مبدأٌ مستخدمٌ –من ناحية الجوهر– في كل النظم الأخرى، غير أنه قد يختلف من نظامٍ إلى آخر في بعض التفاصيل، كعدد القنوات الإعتبارية، ومهامها. من الممكن أيضاً أن

تكون المرونة في تعريف القنوات الفيزيائية أكبر، فعلى سبيل المثال، تقتصر أصناف القنوات الفيزيائية في نظام GSM على نوعٍ واحد يتكون بتكرار الحيز الزمني، أما في نظام UMTS، فيمكن تعريف قنوات فيزيائية متعددة تتباين في بعض خصائصها، مثل جودة نقل المعلومات، ومعدَّل سرعة نقل المعلومات، ما يتيح مرونة أكثر في استخدام الموارد الفيزيائية على نحو فعال، خصوصاً مع وجود تطبيقات مختلفة، يجب على الرابط الراديوي تنسيق نقل المعلومات الخاصة بكل منها.

من المفاهيم المشتركة والمهمة بين النظم كلها أيضاً، وجود رزم معلومات مختلفة، ووجود حقول ذات مهام خاصة، مثل حقل الاختبار، وحقلا البداية والنهاية، وإن كانت بنية هذه الرزم والمسميات المختلفة لهذه الحقول تختلف من نظام إلى آخر.

نجد التشابه أيضاً من ناحية البنية الزمنية للرابط الراديوي، وتعريف إطار زمني أساسي أو مفرد، وأطرٍ أخرى متعددة ذات تراتب هرمي محدد (انظر [١٦] لمزيدٍ من التفاصيل عن نظام UMTS).

هذا وقد آثرنا أن نكتفي بعرض نظام GSM ونظام GPRS، حتى نخصص مساحةً أوسع لشرح التفاصيل، وكي نسلط الضوء على جوانب متعددة للرابط الراديوي كوحدةٍ وظيفيةٍ ضمن الشبكة.

٤-٨ مراجع مختارة

[١] 3GPP Technical Specifications 45.001, "Physical layer on the radio path; General description".

[٢] 3GPP Technical Specifications 45.002: "Radio Access Network, Multiplexing and multiple access on the radio path".

[٣] A.F. Molisch, "Wireless communications", John Wiley & Sons, 2011.

[٤] J. Eberspächer, et al, "GSM – Architecture, Protocols and Services", John Wiley & Sons, 2009.

[٥] 3GPP Technical Specifications 23.03, "Numbing, Addressing, and Identity".

[٦] B. H. Walke, "Mobile Radio Networks: Networking and Protocols", John Wiley & Sons, 1999.

[٧] B. Brand, H. Aghvami, "Multiple Access Protocols for Mobile Communications, GPRS, UMTS and Beyond", John Wiley & Sons, 2002.

[٨] 3GPP Technical Specifications 44.007, "Mobile Radio Interface Signalling Layer 3 Specifications, General Aspects".

[٩] 3GPP Specifications TS 44.008, "Mobile radio interface Layer 3 specifications; Core network protocols".

[١٠] G. Heine, "GSM Networks: Protocols, Terminology, and Implementation", Artech House Inc., 1999.

[١١] C. Lueders, R. Haferbeck, "The performance of the GSM random access procedure", Proc. IEEE 44th Veh. Tech. Conf., Stockholm, Sweden, June 1994; 1165–1169.

3GPP Technical Specifications 45.008, "Radio subsystem link control". [١٢]

3GPP Technical Specifications 43.022, "Functions related to Mobile Station (MS) in idle mode and group receive mode". [١٣]

3GPP Specifications TS 45.002, "Radio Access Network; Multiplexing and multiple access on the radio path". [١٤]

3GPP Specifications TS 43.064, "General Packet Radio Service (GPRS); Overall description of the GPRS radio interface". [١٥]

J. Korhonen, "Introduction to 3G Mobile Communications", Artech House, 2003. [١٦]

٥

الخطوات الأساسية لمعالجة الإشارة

تكمن الوظيفة الأساسية لأي نظام اتصالات في رصد معطيات المستخدم في وحدة الإرسال، ونقلها عبر قناة الاتصال باستخدام الموارد الفيزيائية المتاحة، ثم إعادة توليدها في وحدة الاستقبال بأفضل درجة ممكنة من الدقة. وتتحدد كفاءة نظام الاتصال –بالمفهوم العام– من خلال عوامل متعددة، نذكر منها:

- فعالية استثمار الموارد المتاحة، والتي من أهمها النطاق الترددي المرخص للاستخدام، والطاقة التي يتطلبها إنجاز خطوات نقل المعلومات واستخلاصها من جديد.
- قدرة النظام على التغلب على الآثار السلبية للتشويش والتشويه، الذي تفرضه دارات الإرسال والاستقبال من جهة، وقناة الاتصال من جهة أخرى.

يتطلب الوصول إلى أكبر درجة ممكنة من الفعالية معالجةً متعددةً الخطوات للإشارة، تأخذ بعين الاعتبار عامِلَيْ تحديد الكفاءة السابقين، وتقود إلى إشارةٍ محصنةٍ من عوارض التشويش، وذات طاقةٍ مركَّزةٍ ضمن أضيق مجالٍ ترددِيٍّ ممكن، يقود هذا المطلب إلى بنية نموذجية مبسطة لخطوات معالجة الإشارة، يعرضها الشكل ٥-١.

يُعنى هذا الفصل بشرح كلٍّ من هذه الخطوات، وفق التسلسل الذي يوضحه الشكل، ولكن بدرجاتٍ مختلفة من التفصيل، حيث نعرض لبعض المواضيع باختصارٍ شديد، كما في حالة "تعديل أو تضمين الإشارة" "Modulation"، إذ نفترض أن القارئ مُلِمٌّ بأسس معالجة الإشارة الرقمية، بينما تَخُصُّ مواضيع أخرى بنوعٍ من الإسهاب، مثل "ترميز المنبع" "Source Coding" على سبيل المثال، وذلك لندرة المصادر العربية التي تناقشها ضمن سياق نظم الاتصالات، ولأهميتها في تكوين مفهوم متكامل عن آلية تبادل المعلومات ضمن الشبكات الخلوية.

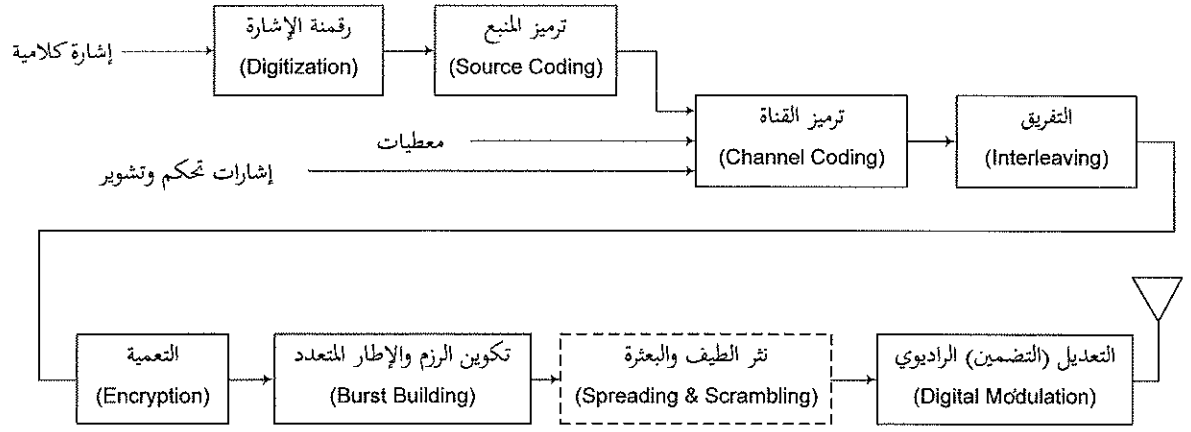
مما يُميِّز هذا الفصل أنه يسلط الضوء على نقطتين مهمتين: تتمثل الأولى في الجهد الكبير والهائل الذي بُذل للوصول إلى مواصفات معيارية تحقق أو تضمن أداءً عالياً لأنظمة الاتصالات، وفي مدى التعاون المتبادل المطلوب بين جهات ومجموعات

بحثية مختلفة للوصول إلى نظام يصلح للتسويق والانتشار على نحوٍ واسع. أما النقطة الثانية فهي تنوُّع التحديات التي يفرضها الرابط أو المنفذ الراديوي على مصممي ومطوري النظم الخلوية، حيث يُعنى جُلُّ الخطوات التي سنعرض لها إما بتحضير الإشارة الكلامية لتكون ملائمةً للإرسال عبر هذا المنفذ، أو برفع فعالية استثمار القنوات الترددية المتاحة، أو بالتغلب على الآثار السلبية التي يفرضها هذا المنفذ على الإشارة الراديوية.

قبل الشروع في نقاش تفاصيل الخطوات، نعطي في ما يلي خلاصةً موجزةً عن كل منها (انظر الشكل ٥-١):

١) يَجري في خطوةٍ أولى تحويل "الإشارات التمثيلية" "Analogue Signals" إلى "إشارات رقمية" "Digital Signals"، وهو ما اصطُلِح على تسميته "رقمنة الإشارة" "Digitization". يشمل هذا الإجراء الإشارة الكلامية على نحو الخصوص، إذ تكون الإشارات الأخرى، أي إشارات المعطيات وإشارات التحكم، متوفرة بصيغة رقمية.

٢) تقود خطوة "ترميز المنبع" "Source Coding" إلى اختزالٍ للإشارة الأصلية، كي تكون قابلةً للتمثيل بأقل قدرٍ ممكن من البتات، ما يَصُبُّ في رفع فعالية استثمار موارد النظام.



الشكل ٥-١: نموذج مبسط للخطوات الأساسية لمعالجة الإشارة في المرسل.

٣) يتلو ذلك خطوةٌ تقود إلى تحصين الإشارة من عوارض التشويش، وتعرف باسم "ترميز القناة" "Channel Coding". تشمل هذه الخطوة –من ناحية المبدأ– تعديلِ دفق المعلومات وفقَ خوارزمياتٍ مناسبة، ما يتيح كشف الأخطاء وتصحيحها في المستقبل. ومن الممكن أن تُؤوَّلَ هذه الخطوة على أنها "جعلُ الإشارة أكثرَ ملاءمةً لقناة الإرسال المتاحة".

٤) ترمي خطوة "التفريق" "Interleaving" إلى تزويد الإشارة بحصانةٍ إضافية من عوارض التشويه التي تنجم عن نقلها عبر الرابط الراديوي، وخصوصاً تلك التي تقود إلى تشويه مجموعاتٍ متتاليةٍ أو متعاقبةٍ من البتات.

٥) يعقب إجراء التفريق خطوةُ "التعمية" "Encryption"، التي تتضمن تعديلاً على بنية المعلومات يحفظ خصوصيتها، ويصونها من فضول المتنصتين غير المخولين بمعرفة فحواها.

٦) بعد تحضير دفق المعطيات الممثلة لمعلومات المشترك، يجري تزويد هذا الدفق بالبتات الخاصة بالتحكم، التي تحتاجها الشبكة لتنسيق توفير الخدمة لعدد كبير من المشتركين في آن واحد، وتزوّد المستقبل بمعلومات وافية عن طبيعة القناة ونوعيتها، ما يجعله قادراً على تخمين وتقدير الأخطاء التي قد تنشأ عنها. أي أن هذه الخطوة تقود إلى البنية النهائية للرزم التي تحملها القنوات الفيزيائية، لذا نشير إليها اصطلاحاً بتعبير: خطوة "تكوين الرزم" "Burst Forming". إضافة إلى ذلك، يجري ضمن هذه الخطوة تكوين الأطر المتعددة حسب الأنماط التي يُتيحها النظام (سبق شرح هذه الأنماط في الفصل ٤).

٧) تتطلب بعض الأنظمة خطوات إضافية خاصة، مثل نثر الطيف والبعثرة في حالة UMTS، لذا يشير إليها الشكل كخطوة اختيارية.

٨) تقود خطوة "التعديل أو التضمين الرقمي"[١] "Digital Modulation" إلى الإشارة التمثيلية الراديوية، التي تُرسل عبر قناة الاتصال.

هذا ويجدر التنويه إلى أن الخطوات المذكورة تشمل خطوات جزئية متعددة، سيرد ذكرها في سياق الشرح التفصيلي، كما نلفت الانتباه أيضاً إلى أن استرجاع أو استخلاص الإشارة الأصلية في المستقبل يُنجَزُ عبر خطوات عكسية لما ذكرناه، مع بعض الفروق التي سنشير إليها في موضعها.

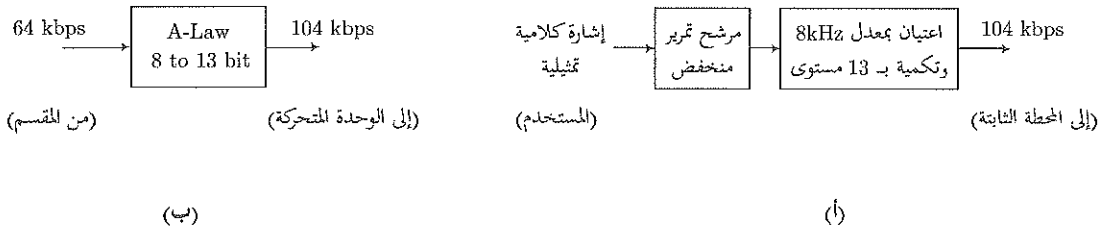
٥-١ تحويل الإشارة التمثيلية إلى رقمية

يُنجزُ تحويل أية إشارةِ دخلٍ تمثيلية إلى صيغةٍ رقمية وفق خطوات "الرقمنة" المعروفة، وهي "أخذ العينات أو الاعتيان" "Sampling"، والتكمية "Quantization"، والترميز "Coding" (انظر [١]-[٢] و[٢٦]-[٢٧]). ويقتصر هذا الإجراء ضمن نظم الاتصالات الخلوية على الإشارة الكلامية أو الصوتية حصراً. توصي المواصفات المعيارية لنظامي GSM و UMTS في هذا الشأن بتردد اعتيان مقداره 8 kHz ، وبتكمية الإشارة إلى 13 مستوىً لكل عينة [٣] و [٤]، ما يقود إلى دفقٍ للبتات مقداره 104 kbps.

يجدر التنويه في هذا الموضع إلى اختلافٍ في خطوات الحصول على هذا المعدل (104 kbps) عندما تكون الإشارة مُرسلة من المقسم إلى المحطة الثابتة، وذلك في طريقها إلى الوحدة المتحركة (أي في جهة المسار الهابط)، حيث تكون الإشارة في هذه الحالة رقمية، ذات معدل دفقٍ مقداره 64 kbps، ويوافق معايير شبكة الهاتف الثابت الرقمية "الشبكة الرقمية متكاملة الخدمات" "Integrated Services Digital Network (ISDN)". لذا، تخضع الإشارة في هذه الحالة إلى تعديلٍ في مستويات التكمية (من 8 إلى 13 مستوىً) وفق قانون A-Law، وهذا الإجراء يقود إلى المعدل المطلوب (انظر الشكل ٥-٢).

---

[١] نستخدم في ما يلي مصطلحي التعديل و التضمين على حد سواء، فكلاهما يدل على تعبير "Modulation" من الناحية الوظيفية، وإن كانت كلمة "تضمين" هي الأدق.



الشكل ٥-٢: خطوات الحصول على معدل الدفق الأساسي في حالة الوحدة المتحركة (أ)، والمحطة الثابتة (ب).

٥-٢ ترميز الإشارة الكلامية – ترميز المنبع

يُستخدم مصطلح "ترميز المنبع" "Source Coding" بمعناه الشامل للدلالة على أي إجراء أو تقنية تتيح اختزال أو خفض كمية المعلومات الضرورية لتمثيل الإشارة الأصلية، وتؤدي إلى عددٍ أقلَّ من البتات التي يجب أن تُرسَل عبر قناة الاتصال، ومن ثم إلى استثمارٍ أكثر فعالية للقنوات الترددية كموردٍ فيزيائيٍّ. وهذا بدوره يعني خفضاً في تكلفة نقل المعلومات بين أطراف الاتصال، وزيادةً في سعة الشبكة. يتحقق اختزال المعلومات عبر طرقٍ متعددة، تقوم في مجملها على أحد المبدأين التاليين:

١) يعتمد المبدأ الأول استخدامَ طرق متقدمة للتكمية والترميز تُفضي إلى تمثيلٍ دقيقٍ نسبياً للإشارة، بأقل عدد ممكن من الخانات أو البتات. من أشهر الأمثلة على ذلك تقنية "التعديل النبضي التفاضلي المتكيف" "Adaptive Pulse Code Modulation"، حيث يُستعاض عن إرسال القيم المطلقة لعينات الإشارة بارسال قيمةٍ تفاضلية لكل عينة، مقارنةً مع التي تسبقها. يؤدي ذلك إلى خفض عدد البتات الممثِّلة للإشارة الرقمية، ذلك أنَّ مجال تغيُّرٍ أو تراوح القيم التفاضلية يكون أضيق بكثير من مجال تغيُّرِ القيم المطلقة (انظر [١] و [٢٦] للتفاصيل).
يتميَّزُ هذا المبدأ بأن القيمَ التي تُرسَل عبر قناة الاتصال هي القيم الممثِّلة للإشارة نفسها، أو بتعبيرٍ أدق، القيم التي تتيح استعادة القيم الفعلية للإشارة بمقدارٍ عالٍ من الدقة. فالمعلومات المرسلة وفق هذا المبدأ تدل على الإشارة التمثيلية الأصلية، وأي تغيرٍ في القيم المرسَلة يحاكي التغيراتِ في قيمِ الإشارة الأصلية، لذا يُفسَّر أو يُؤوَّلُ هذا الإجراء مَجازاً على أنه عمليةُ "ترميزٍ لشكل وهيئة الإشارة"، وهذا ما يبرر تسميته بـ "Wave Form Coding".

٢) أما المبدأ الثاني، فينحو منحىً مختلفاً تماماً من ناحية تمثيل المعلومات، إذ لا تُرسَل –وفْقَهُ– القيم الفعلية أو التفاضلية للإشارة الأصلية، وإنما المعلومات الواصفة لطريقة وآلية توليد هذه الإشارة، ممثَّلةً بموسطات محددة. وهذه الموسطات تُستخدم في المستقبل لتوليد نسخة صنعية أو تركيبية من الإشارة.
يؤدي هذا المبدأ إلى اختزالٍ ملحوظ لكم المعلومات التي تُرسل عبر القناة، لأن عدد البتات الذي يتطلبه تمثيلُ الموسطات يكون أقل بكثير من عدد البتات الممثِّلة للإشارة، سواءً كقيمٍ مطلقةٍ أو تفاضلية. لتقريب ذلك، نسوق المثال التالي الذي يبسِّط الفكرة الأساسية الكامنة خلف هذا المبدأ.

لنفترض أن الإشارة الأصلية تمثل قيمَ تابعٍ من الدرجة الثانية مُعطَى بالعلاقة:

$$y = ax^2 + b = 3x^2 + 4 \qquad (٥-١)$$

ولنفترض أيضاً أن التابع معرَّفٌ لقيم x الصحيحة الواقعة ضمن المجال:

$$x_{min} \le x \le x_{max}\ ; \qquad x_{min} = -15\ ;\ \ x_{max} = 215 \qquad (٥-٢)$$

يعني ذلك أن الإشارة المراد إرسالها تشمل 230 قيمة ضمن المجال $679 \le y \le 138679$. فإذا كان لدى كلٍّ من المرسل والمستقبل معرفة مسبقة بدرجة التابع في العلاقة (٥-١)، أمكن الاقتصار على إرسال الموسطات $\{a, b, x_{min}, x_{max}\}$، حيث يتسنى للمستقبل –اعتماداً عليها وعلى معرفته بدرجة التابع– توليد قيم الإشارة الأصلية، أي قيم y. هذا يعني أنه من الممكن –وفق هذا المبدأ– الاستعاضة عن إرسال 230 قيمة للمتغير y بإرسال 4 قيمٍ لأربعة موسطات فقط، وهذا يكافئ اختزالاً للمعلومات بمقدار 98%. وإذا انطلقنا إلى الحالة العامة، وهي أن يُعطى كثير الحدود بالعلاقة:

$$y(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \cdots + \alpha_m x^m = \sum_{i=0}^{m} \alpha_i x^i \qquad (٥-٣)$$

فإنه يكفي إرسال الموسطات α_i، بالإضافة إلى درجة التابع m، من أجل توليد الإشارة على نحوٍ كامل.
يُعرَف ترميز الإشارة وفق هذا المبدأ باسم "الترميز الوسيطي للمنبع" "Parametric Source Coding"، في إشارةٍ إلى تمثيل الإشارة أو منبعها بموسطاتٍ أو معاملاتٍ وسيطة.

يتضح من نقاش المبدأين السابقين أن كلمة "المنبع" ضمن مصطلح "ترميز المنبع" تحتمل الدلالة على معنيين مختلفين، الأول هو "الإشارة الأصلية" نفسها، فيكون المقصود هو ترميز الإشارة الأصلية كمنبعٍ للمعلومات المراد إرسالها (المبدأ الأول)، أما المعنى الثاني، فهو "منبع الإشارة"، أو الآلية والكيفية التي تتولد وفقها المعلومات الأصلية (المبدأ الثاني). هذا وتعتمد نظم الاتصالات الخلوية الطريقة الثانية، أي الترميز الوسيطي، لتمثيل الإشارات أو المعلومات المتبادلة بين طرفي الاتصال، لذا نقتصر في ما يلي على بيان بعض التفاصيل العامة لهذا المبدأ، ونظراً لتشعب الطرق الرياضية المتعلقة بهذا الشأن، والتي تندرج ضمن إطار الأبحاث المتقدمة لمعالجة الإشارة، سيكون شرحنا مقيداً بما يحتاجه مهندس الاتصالات كمعلوماتٍ أساسية لفهم الآليات التي تحكم ترميز الإشارة الكلامية. أما التفاصيل التحليلية الدقيقة، فيمكن للقارئ المهتم أن يرجع إليها في [٥]-[٩].

يتطلب الترميز الوسيطي للمنبع إنجاز الخطوات التالية:

١) تحليل الإشارة الأصلية للحصول على الموسطات الواصفة لآلية توليدها. وإذا طبقنا هذه الخطوة على المعادلة (٥-٣)، مع افتراض أن المرسل ليست لديه معرفة بـ m، ولا بقيم α_i، فإن تحليل الإشارة في المرسل يمكن أن يقود إلى تحديد قيمٍ لهذه الموسطات، تتيح تمثيل الإشارة على أمثل أو أدق وجه ممكن.

٢) إرسال الموسطات المستخلَصَة في إطار الخطوة السابقة إلى المستقبل.

٣) توليد الإشارة في المستقبل باستخدام كلٍّ من الموسطات والنموذج الرياضي لآلية توليد الإشارة. وهذا النموذج يتمثل بكثير الحدود (الخوارزمية الرياضية) في حالة المثال السابق.

لذا، يقتضي استخدام الترميز الوسيطي في حالة تبادل الإشارة الكلامية توفُّرَ نموذجٍ نظري، يتيح تمثيل ومحكاة آلية توليد هذه الإشارة. واختيار أو تطوير هذا النموذج يتطلب بدوره فهماً دقيقاً لهذه الآلية من الناحية الفيزيولوجية. لذا نعرض في ما يلي المبادئ الأساسية لهذه الآلية، مع شرح مبسط للوظائف المنوطة بجهاز النطق عند الإنسان، متوخين الاختصار والتركيز على ما هو ضروري لمتابعة سياق العرض.

٥-٢-١ آلية توليد الإشارة الكلامية عند الإنسان

يتكون "جهاز النطق" "Vocal Tract" البشري من عدة أعضاء، تشمل الحنجرة مع الحبلين أو الوترين الصوتيين، والتجاويف الموجودة بين الحنجرة والشفتين، أي التجويف الحلقي والتجويف الفموي والتجويف الأنفي، إضافة إلى اللسان والشفتين.
يختص كلٍ عضو من الأعضاء المذكورة بوظائف محددة منوطة به، كما تعمل هذه الأعضاء بدقة وانسجام فيما بينها، إذ يتحكم بها ما يقرب من 100 عضلة. أما آلية إصدار الكلام أو الإشارة الصوتية فيمكن تلخيصها كما يلي (انظر الشكل ٥-٣):

١) تنشأ الأمواج الصوتية -بالمعنى الفيزيائي العام- نتيجةَ تغيرات منتظمة في ضغط الهواء، يُحدثها مصدر الصوت، وتؤدي إلى وجود مناطق ذات ضغط مرتفع (مناطق تضاغط) وأخرى ذات ضغط منخفض (مناطق تخلخل). وتنتقل الأمواج بسبب اهتزاز جزيئات وسط الانتشار ذهاباً وإياباً، ما يقود إلى تغير دوري في شدة التضاغط والتخلخل عند كل نقطة. ويمثل عددُ مرات تعاقب التضاغط والتخلخل في كل ثانية تردد الموجة الصوتية.

تنتج هذه التغيرات في حالة الإشارة الكلامية بسبب اعتراض تيار الهواء المطرود من الرئتين، ما يقود إلى اضطرابات موضعية في ضغطه. ومن الممكن أن يكون هذا الاعتراض جزئياً أو كلياً، كما من الممكن أن يكون في أي موضعٍ ضمن مجرى الهواء. وتحدد الوضعية الآنية للأعضاء المشاركة في آلية النطق، كاللسان والتجاويف والشفتين، طبيعة الاضطرابات الناجمة عن الاعتراض وشدة وتردد الموجات الصوتية الصادرة.

٢) تحتوي الحنجرة على الحبلين أو الوترين الصوتيين[١]، وهما متصلان في المقدمة ومنفصلان في المؤخرة، يوضح ذلك القسم الأيمن من الشكل ٥-٣، الذي يصف شكلهما كما يبدوان عند النظر من أعلى. ويتحكم بالوترين الصوتيين الغضروفان الهَرَمِيَّان[٢]، اللذان يقومان بشدهما أو إرخائهما، ما يؤدي إلى تقابلهما أو تباعدهما.

---

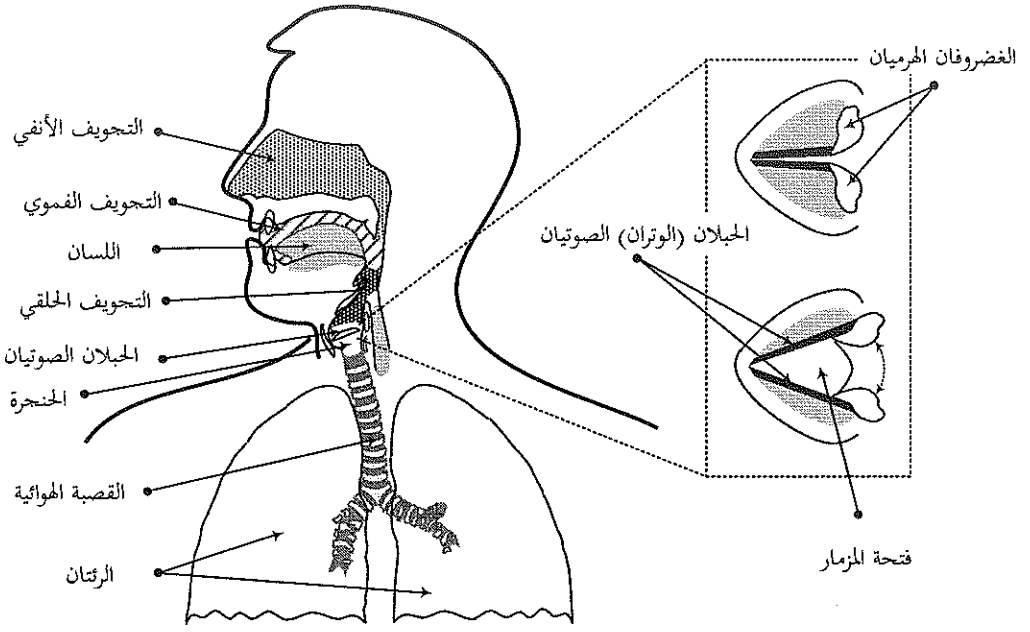
[١] لم نَقِفْ على مصطلحٍ توافقي للدلالة على هذا العضو، لذا نستخدم كلمتي "الحبلان" و "الوتران" بنفس المعنى.

[٢] يُسَمَّيَانِ في كتب التَّشريح بالغضروفين الطَّرْجَهَالِيَّيْنِ.

٣) عند ابتعاد الحبلين الصوتيين عن بعضهما، يمر الهواء عبر الفتحة المسماة "فتحة المزمار" "Glottis"، دون إحداث صوت، أما إذا تقاربا بدرجة كافية أثناء الزفير، فيتذبذبان، أي يهتزان بحركة تباعدٍ وتقارب، وفق ترددٍ يمكن التحكم به. وكلما زادت حدة شد الوترين، ازداد تردد الاهتزاز، والعكس صحيح.

ينشأ اهتزاز الحبلين عن اقترابهما من بعضٍ بدرجةٍ تكفي لمنع الهواء من العبور بينهما، وهذا يزيد ضغطه –أي الهواء– تحت فتحة المزمار. تؤدي زيادة الضغط هذه إلى إبعاد الحبلين عن بعضهما البعض، فتخرج كميةٌ من الهواء عبر فتحة المزمار، مسببةً انخفاضاً في الضغط أسفل منها، وهذا بدوره يسمح بتلاقي الحبلين مرة أخرى. فإذا التقى أو تقارب الحبلان مجدداً، تضيَّق مجرى الهواء، وارتفع الضغط تحت الفتحة من جديد، ما يؤدي إلى إبعاد الحبلين مرة أخرى، وهكذا.

يؤدي تعاقب إرتفاع وانخفاض ضغط الهواء وفق هذه الألية إلى تباعد وتقارب الحبلين على نحوٍ شبه دوري، بترددٍ تحدده مدة الفاصل الزمني الذي ينقضي بين فتح وإغلاق فتحة المزمار لمرة واحدة.



الشكل ٥-٣: بنية الجهاز التنفسي والجهاز الصوتي عند الإنسان.

٤) يتفاوت تردد اهتزاز الحبلين الصوتيين من شخص إلى آخر، تبعاً لجنسه وعمره. إذ يكون فوق 300 مرة في الثانية عند الأطفال، وفوق 200 مرة في الثانية عند النساء، أما عند الرجال، فيقارب 120 مرة في الثانية. وتتأثر قيمة التردد بعدة عوامل أهمها: طولُ وكتلة وتوتر أو قوة شد الحبلين الصوتيين.

٥) يسمى تردد اهتزاز الحبلين الصوتيين "التردد الأساسي" "Fundamental Frequency"، ويُشار إليه بالرمز F_0، كما يُعرَف هذا التردد في علم الصوتيات بـ "درجة حِدَّة الصوت" أو "طبقة الصوت" "Pitch"، التي يُدَلُّ عليها بـ P. ويجدر التنويه إلى أن مصطلحي "التردد الأساسي" و"حِدَّة أو طبقة الصوت" يُستخدمان في كثيرٍ من الأحيان بنفس المعنى، غير

أن تعبير Pitch يصف في الحقيقة وَقْعَ الصوت على الأذن أو كيفية إحساسها به، فهو يدل على معنى حسيٍّ إدراكي، وليس على قيمة ترددية بالمعنى الفيزيائي المتعارف عليه (انظر في ذلك [٢٨] و [٢٩]).

٦) يعتبر التردد الأساسي من أهم ما يحدد خصائص الإشارة الكلامية، وهو كما ذكرنا ليس ذا قيمة ثابتة، إذ يتغير عند نفس الشخص حسب العمر والحالة الصحية، وحسب طبيعة العواطف المُصاحِبة لعملية النطق، مثل التوتر أو الحزن أو الخوف. يتغير التردد الأساسي أيضاً حسب النبرة المرافقة للكلام، فقد ينطق الإنسان الجملة نفسها، ولكن مرة بصيغة استفهامية، وأخرى بصيغة استنكارية، وتباين التردد هو الذي يزود الكلام المنطوق بالمعنى المقصود في كلٍّ من الحالتين.

٧) إذا مر الهواء عبر فتحة المزمار، وصاحب ذلك اهتزاز الحبلين الصوتيين، يُسمَّى الصوت الناتج "مجهوراً" "Voiced". ينطبق ذلك في حالة اللغة العربية على "الأحرف الصوتية" أو "الصوائت" "Vowels"، أي الألف والواو والياء والحركات، والأصوات المرافقة للأحرف التالية: /ب/، /م/، /ذ/، /ظ/، /ن/، /د/، /ز/، /ل/، /ض/، /ر/، /ج/، /غ/، /ع/.

٨) قد يتقارب الحبلان الصوتيان من بعضهما أثناء مرور الهواء عبر فتحة المزمار، فيضيق مجرى الهواء، ولكن دون أن يقود مقدار التَضَيُّق إلى اهتزازهما. يحتك الهواء في هذه الحالة بالحبلين، ويواجه عائقاً يتمثل في تغيُّر مساحة فتحة المزمار. وهذا يؤدي إلى نشوء اضطرابات في تيار الهواء، ليست لها صورة محددة ولا متسقة، لذا يغلب على الأمواج الصوتية المصاحبة لها أن تكون عشوائية.

يُطلق على الأصوات الصادرة في هذه الحالة مصطلح "الأصوات المهموسة" "Unvoiced"، وهي في اللغة العربية: /ف/، /ث/، /ت/، /س/، /ص/، /ط/، /ش/، /ك/، /ق/، /خ/، /ح/، /هـ/، /ء/. وننوه إلى أن علماء الصوتيات يطلقون على تصنيف الأصوات إلى مجهورة ومهموسة تعبير " التصنيف الوظيفي"، ويستخدمون تصنيفات أخرى للأصوات، تبعاً لميكانيكية نطقها أو مخرجها (انظر [٢٨] و [٢٩]).

٩) بعد عبور تيار الهواء فتحةَ المزمار، يمر ضمن التجويف الحَلْقي، الذي يمكن اعتباره أنبوباً يصل بين الحنجرة من جهة، والتجويفين الفموي والأنفي من جهة أخرى. وهذا التجويف يمكن التحكم بطوله عن طريق رفع الحنجرة أو خفضها، كما يمكن تغيير مساحة مقطعه بواسطة جذر اللسان وإمالة لسان المزمار تجاه الجدار الحلقي الداخلي.

يؤدي التغير في طول ومساحة التجويف الحلقي إلى تغير في كمية وضغط الهواء الذي يعبر منه إلى التجويف الأنفي أو الفموي، وإلى نشوء تيارات هوائية داخل التجويف، تنتج عن تراكم الهواء المرتد من أعلاه وجدرانه الداخلية، مع الهواء القادم من جهة الحنجرة. يؤدي ذلك إلى تغير واضح في توزع ضغط الهواء ضمن التجويف الحلقي، وإلى حدوث تجاوبٍ –أي زيادة في ضغط الهواء العابر– عند بعض المواضع، وتخامدٍ –أي تخلخل بين ذرات الهواء– عند مواضع أخرى.

١٠) يمر تيار الهواء بعد ذلك إما عبر التجويف الأنفي أو عبر التجويف الفموي. أما التجويف الأنفي، فلا يمكن التحكم بحجمه ومواضع الأعضاء المحددة له، لذا تقتصر وظيفته الصوتية على تعزيز نطق بعض الأصوات مثل /م/ و/ن/. على عكس ذلك، يتسم التجويف الفموي بأنه أكثر تعقيداً، حيث تتحدد أبعاده وحدوده باللسان والحنك والفكين والأسنان والشفتين، ويتحكم بكل هذه الأعضاء مجموعة كبيرة من العضلات تتيح تغيير أبعاد وحجم التجويف على نحوٍ يؤدي إلى

تغيير شكل الأمواج الصوتية (ضغط الهواء) على نحوٍ بالغ التعقيد، وإلى اختلافٍ وتباينٍ كبيرين في طبيعة الأصوات الصادرة أثناء الكلام.

١١) تمثل الشفتان العضو الأخير من الأعضاء التي تساهم في عملية النطق، وتتحركان أثناء النطق إما حركة أفقية تتجلى في امتدادهما كما في حالة الابتسام، أو رأسية تَظهر في افتراق الشفة العليا عن الشفة السفلى، أو مستديرة تَبرز بصورة رئيسية عند نطق الواو على سبيل المثال. كما يمكن أن تكون حركة الشفتين مركبة، وذلك عند وجود حركة رأسية وأفقية أو رأسية ومدورة في آن واحدٍ. ويؤدي ضم الشفتين أو انفراجهما، وكذلك التحكم بشكل الفتحة المتكونة بينهما، إلى تضييقٍ على خروج الهواء في بعض الأحيان، أو إلى تعزيزِ مروره في أحيان أخرى، ما يعني تعديلاً إضافياً على شكل الأمواج الصوتية.

بعد هذا العرض المقتضب لآلية النطق من الناحية الفيزيولوجية والميكانيكية، نذكر أهم ما يميِّز بنيةَ الأمواج الصوتية البشرية، إذ أن إدراك ذلك لا غنى عنه في سياق تطوير نموذج نظري لآلية الكلام. وأهم ما يجدر ذكره ما يلي:

١) تتميز الإشارة الكلامية عند صدورها من الشفتين والأنفين ببنية معقدة، وذلك تبعاً لتعاقب الأصوات المنطوقة، وتبعاً لشدتها ولطبيعة المتكلم (جنسه وحالته العاطفية). فعلى سبيل المثال، يوضح الجزء (أ) من الشكل ٥-٤ الإشارة الصوتية (أي تابع ضغط الهواء بدلالة الزمن) المُمثِّلة لـ"المقتطع الكلامي" "Speech Segment"[١] المكافئ للجملة الانكليزية "paint the circuits"، وذلك بعد تحويله إلى إشارة رقمية بمعدل اعتيان مقداره 8 kHz.
يكافئ هذا المقتطع مدة زمنية مقدارها 1.125 ثانية، أي 9000 عينة (كل 1000 عينة توافق 1/8 ثانية). ونلاحظ من الشكل أنه يشمل مقتطعات جزئية ذات طاقة كبيرة، كالمقتطع الموافق للعينات 6100-5050 على سبيل المثال، ومقتطعات أخرى ذات طاقة منخفضة.

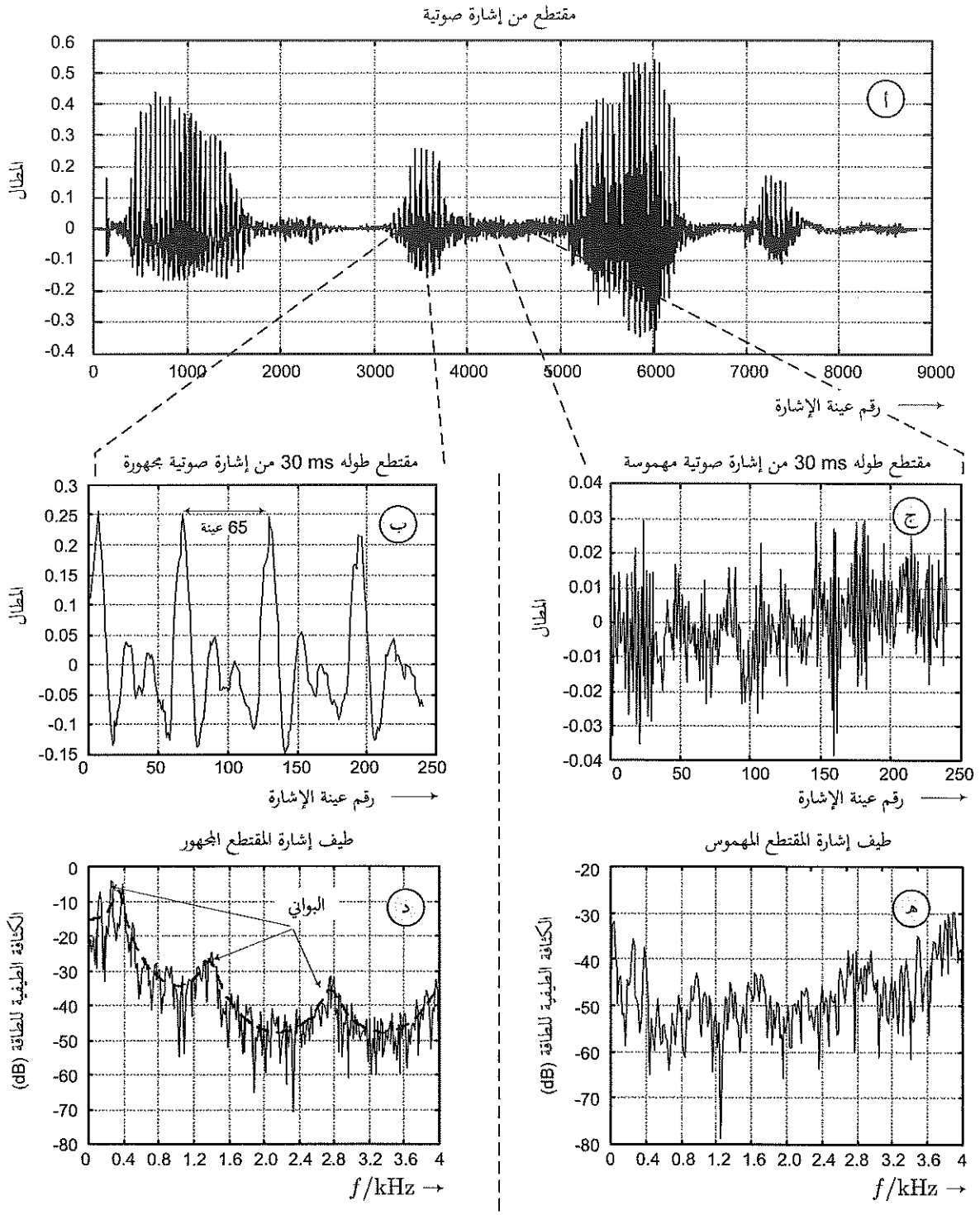
توافق المقتطعات ذات الطاقة المرتفعة الأصوات المجهورة، أما الطاقة المنخفضة في الإشارة فتدل على الأصوات المهموسة.

٢) عند معاينة مقتطعات الأصوات المجهورة (الجزء (ب) من الشكل) نجد أن الإشارة ضمن هذه المقتطعات تكون شبه دورية، أما في حالة الأصوات المهموسة (الجزء (ج) من الشكل) فتكون الإشارة عشوائية. وقد سبق البيان بأن الطبيعة الدورية للإشارة المجهورة تنتج عن اهتزاز الحبلين الصوتيين، لذا يتيح الجزء (ب) من الشكل تحديد مقدار التردد الأساسي لهذا الاهتزاز على نحوٍ تقريبي، حيث نقرأ منه أن القيم العظمى لمطال الإشارة تبعد عن بعضها بمقدار 65 عينة تقريباً، ما يكافئ دوراً زمنياً مقداره $T_0 \approx 8\text{ms}$، ويقود إلى ترددٍ يساوي $F_0 = 1/T_0 = 125\,\text{Hz}$.

٣) عند معاينة الإشارة الصوتية في المجال الترددي، نجد أن طيف المقتطع المجهور يحمل طاقة مميزة عند بعض الترددات. تُعرف هذه الترددات بـ"ترددات التجاوب" أو "البواني" "Formants" (الجزء (د) من الشكل). أما في حالة الأصوات المهموسة (الجزء (هـ) من الشكل)، فيكون الطيف منبسطاً نظراً لأنه يمثل إشارة ضجيجية.

---

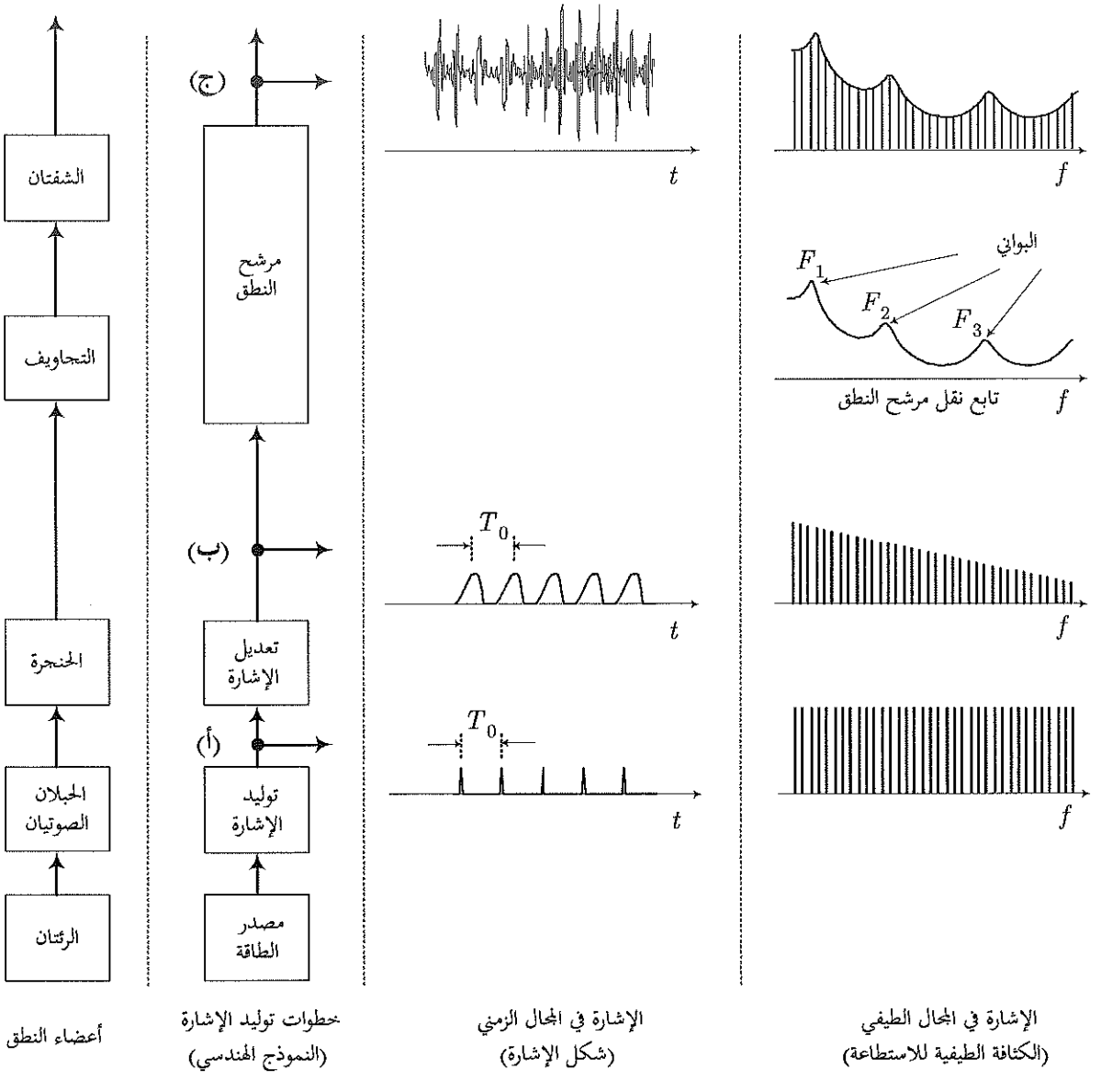
[١] نستخدم تعبير مُقتطع كمقابل لكلمة Segment، أما كلمة مقتطع فذات دلالة هندسية وتقابل كلمة Cross-Section.



الشكل ٥-٤: بنية مقتطع مجهور ومقتطع مهموس من الإشارة كلامية في المجال الزمني والمجال الترددي.

٥-٢-٢ النموذج الهندسي لآلية توليد الكلام

استناداً إلى المبادئ الفيزيولوجية لآلية النطق يمكن تطوير نموذج هندسيٍ مبسط، يمثِّل وظيفة وتأثير كلٍّ من أعضاء النطق على الإشارة الصوتية بعنصرٍ أو مُكوِّنٍ ضمن دارةٍ كهربائية بسيطة. ويجب أن يأخذ هذا النموذج بالحسبان عدة مفاهيم، نناقشها في ما يلي، مستعينين بالشكل ٥-٥.



الشكل ٥-٥: النموذج الهندسي لتوليد الإشارة الكلامية في حالة مقتطع مجهور.

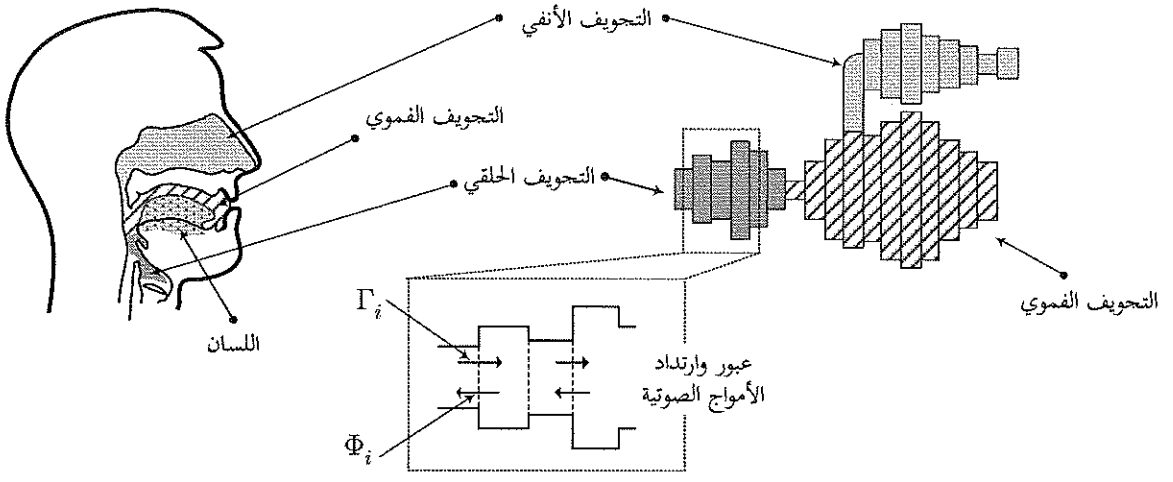
يمكن أن تتلخص خصائص هذا النموذج كما يلي:

١) لا يمكن لجهاز النطق أن يصدر أي صوت دون مصدرٍ للطاقة، وبدون هذه الطاقة يشابه هذا الجهاز مذياعاً بدون تغذية كهربائية. ومصدر الطاقة لجهاز النطق هو الجهد العضلي المبذول لإخراج الهواء من الرئتين عند انقباض العضلات المتحكمة بالقفص الصدري، حيث يتحول هذا الجهد العضلي إلى طاقة حركية يحملها الهواء.

٢) يحوّل اهتزاز الحبلين الصوتيين تيار الهواء المستمر الذي يعبر فتحة المزمار إلى نبضات دورية، وقد سبق البيان بأنه إذا لم يهتز الحبلان الصوتيان (أي عند نطق الأصوات المهموسة) فإن الهواء يمر عبر الفتحة ويحتك بأطرافها، ما يؤدي إلى نشوء اضطرابات عشوائية غير متسقة وإلى إشارة ذات طبيعة ضجيجية. لذا يؤدي الحبلان الصوتيان دور "مولّد الإشارة الصوتية" أو "منبع الإشارة الصوتية"، ويمكن اعتبارهما الموضع الذي يكتسب فيه طيف الإشارة الصوتية بنية محددة (انظر النقطة (أ) من الشكل ٥-٥، الذي ننوه إلى أنه يعرض حالة مقتطع بجهورٍ فقط).

٣) نظراً لعطالة العضلات المتحكمة بالحبلين الصوتيين وبالحنجرة، لا يمكن أن تكون دفقات الهواء الذي يصدر عن فتحة المزمار ذات أمدٍ متناهي القِصَر، فعملية فتح واغلاق الفتحة تكون تدريجية، بحيث يتشكل دفق الهواء على الصيغة المعطاة عند النقطة (ب) في الشكل. لذا يمكن القول بأن متتالية النبضات الحقيقية تنتج عن تعديلٍ لمتتالية نبضاتٍ مثالية، تصدر عن الحبلين الصوتيين (النقطة (أ) في الشكل)، ثم تخضع أثناء اجتيازها الحنجرة (أي اثناء عبورها فتحةَ المزمار) إلى عملية ترشيحٍ تقود إلى تغييرٍ في شكلها. وتُعتبر الحنجرة في هذه الحالة مرشحاً أولياً يعطي دفق النبضات المثالية شكله النهائي.

٤) من الممكن تمثيل التجاويف ما بين الحنجرة والشفتين بأنابيب أسطوانية متصلة ومتفاوتة في أطوالها ومساحة مقاطعها (الشكل ٥-٦). ويؤدي ارتداد الأمواج الصوتية عند مواضع تضيُّق هذه الأنابيب إلى تجاوبٍ، أي إلى تضخيم الطاقة الصوتية، عند بعض الترددات، وإلى تخميدٍ لها عند ترددات أخرى.



الشكل ٥-٦: تمثيل كلٌّ من تجاويف جهاز النطق كمجموعة أنابيب أسطوانية قصيرة متباينة المقطع.

يَبرز هذا التجاوب ضمن بعض النطاقات الترددية القريبة من "توافقيات" "Harmonics" التردد الأساسي (أي الترددات التي توافق أضعاف التردد الأساسي)، والتي تحددها أبعاد الأنابيب التي تمثل التجاويف المختلفة، ويمكن حساب قيمها من خلال معاملات ارتدادٍ Φ_i، وعبورٍ Γ_i، تُعرَّف عند نقاط التقاء هذه الأنابيب.
يمكن القول إذن بأن الأنابيب تلعب دور تجاويف رنينية، كما يمكن وصف التغيرات التي تطرأ على الإشارة بأنها عملية ترشيح في المجال الطيفي. لذا تُمثَّلُ سلسلة التجاويف بمرشحٍ ذي تابع نقلٍ يتميز ببعض "القمم" أو "الذُرى"، التي توافق مواضع ترددات الاستجابة الرنينية لمرشح النطق، والتي تُعرف باسم "البواني" "Formants".

يتضح أثر مرشح التجاويف في الجزء (د) من الشكل ٥-٤، حيث يمثل الخط الأسود المتقطع تابعَ نقل هذا المرشح، وهذا التابع يحدد غلاف الإشارة في المجال الترددي، وتوافق قممه ترددات البواني (300 Hz و 1400 Hz و 2700 Hz).
يتجلى أثر البواني أيضاً في تغير بنية الإشارة في المجال الطيفي بين النقطة (ب) و النقطة (ج) من الشكل ٥-٥.

٥-٢-٣ النموذج الرياضي التحليلي لآلية توليد الكلام

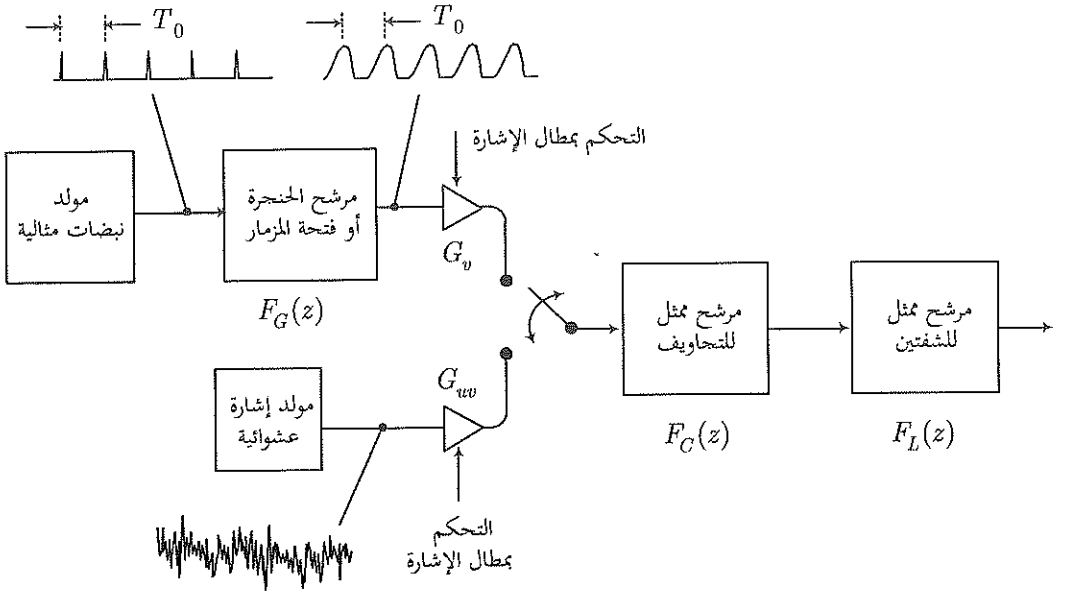
يتيح النموذج الهندسي الذي عرضنا أهم خصائصه صوغ أو صياغة نموذجٍ رياضي للخطوات التي تقود إلى الإشارة الكلامية، وهذا النموذج هو جلُّ ما يحتاجه مهندسو التطوير لترجمة المفاهيم و المبادئ البيولوجية التي عرضناها إلى علاقات رياضية، تُسهِّل دراسة الإشارة على نحوٍ تحليلي.

يتألف النموذج الرياضي من العناصر التي يبينها الجزء (أ) من الشكل ٥-٧، وهي:

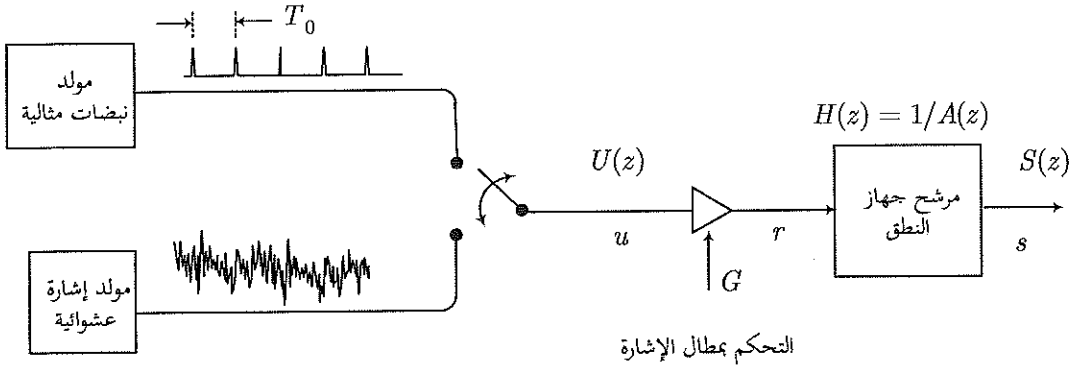
١) "منبع الإشارة" أو "إشارة التحريض" "Excitation Signal": سبق البيان بأن الأصوات المجهورة يمكن أن تُمثَّل كمتتالية من النبضات الدورية ذات التردد $F_0 = 1/T_0$. وقد أوضحنا أيضاً أن شكل النبضات النهائي ينتج عن عملية ترشيحٍ في الحنجرة. يكافئ ذلك رياضياً عملية "طَيٍّ أو تلافٍّ" "Convolution" بين متتالية النبضات المثالية، ومرشح فتحة المزمار الذي نرمز لتابع نقله أو استجابته النبضية في المجال الطيفي (أي في المجال z) بـ $F_G(z)$. أما إذا كانت الإشارة مهموسة، فيمكن تمثيلها كإشارة عشوائية ذات كثافة طيفية ثابتة تقريباً.
هذا ويجب أن يُضاف إلى جزء تمثيلِ منبع الإشارة "مفتاح تبديل" يتيح اختيار نوعية الصوت (مجهور أو مهموس)، يجري هذا الاختيار نتيجة تحليل الإشارة من ناحية الطاقة التي تحملها.
إضافةً إلى مفتاح التبديل، يشمل منبع الإشارة أيضاً عاملَ تضخيم يتيح تمثيل شدة الإشارة، نشير له إما بـ G_v في حالة الصوت المجهور، أو بـ G_{uv} في حالة الصوت المهموس.

٢) مرشحٌ ممثِّلٌ للتجاويف: أشرنا في ما سبق إلى أن التجاويف المختلفة تحاكي في أثرها مرشحاً يضخم الطاقة عند بعض النطاقات الترددية (البواني). وقد أثبتت دراسات مستفيضة أن هذا المرشح يمكن تمثيله على نحوٍ تقريبي بـ "مرشح متعدد الأقطاب" "All-pole Filter"، يمرر الترددات المنخفضة، ويحجب المرتفعة، وندل عليه بـ $F_G(z)$.

٣) مرشحٌ ممثّلٌ للشفتين: يمثل ضم وفتح الشفتين تقييداً للأمواج الصوتية، وممانعةً لانتشارها على نحو حر. هذا بدوره يجعلها تحاكي مرشحاً إضافياً، يمرر الترددات المرتفعة ويُخمد الترددات المنخفضة، ويُشار لتابع نقله بـ $F_L(z)$.



(أ)



(ب)

الشكل ٥-٧: النموذج الرياضي لتوليد الإشارة الصوتية. (أ): البنية التفصيلية، (ب): البنية المختصرة.

تقود الأجزاء التي عدّدناها إلى الجزء (أ) من الشكل ٥-٧، الذي تعتمده كثيرٌ من المصادر لدراسة أثر كل عضوٍ من أعضاء النطق على الإشارة، حيث يتيحُ استخدامُ توابع مناسبة لتمثيل كلٍّ من $F_G(z)$ و $F_C(z)$ و $F_L(z)$ دراسةَ الإشارة تحليلياً على نحوٍ يبرز التغيرات التي تطرأ عليها عند مرورها بكل مرشح.

من جانبٍ آخر، يمكن البرهان على أن المرشحات الثلاثة (مرشح فتحة المزمار ومرشح التجاويف ومرشح الشفاه) يمكن دمجها من الناحية الرياضية في مرشحٍ وحيدٍ متعدد الأقطاب يُسمى "مرشح جهاز النطق" "Vocal Tract Filter".
يفضي هذا الدمج إلى النموذج المبسط في الجزء (ب) من الشكل ٥-٧، الذي يُعرف باسم "نموذج المنبع والمرشح لتوليد الإشارة" "Source Filter Model". ورغم بساطته، أثبت هذا النموذج جدارته في كثيرٍ من الاستخدامات، ويُعتبر النموذج المهيمن في تطبيقات الاتصالات اللاسلكية، التي تندرج الاتصالات الخلوية ضمنها.

من أهم خصائص النموذج المبسط ما يلي:

- يُعطى تابع الاستجابة الطيفية لمرشح جهاز النطق ضمن هذا النموذج بالعلاقة:

$$H(z) = \frac{1}{A(z)} = \frac{1}{1 - \sum_{k=1}^{N} \alpha_k z^{-k}} \qquad (٥-٤)$$

- ترجع بساطة النموذج إلى أنه يمثل إشارة التحريض ومرشح النطق كجزئين منفصلين ومستقلين عن بعضهما من ناحية تأثيرهما على الإشارة.يتجلى ذلك في أن العلاقة (٥-٤) لا تحوي أي حدٍّ يرتبط بإشارة المنبع، كما أن تمثيل المنبع يقتصر على إشاراتٍ مثالية. يمثل هذا الفصلُ بين الجزأين تبسيطاً شديداً للواقع ويُغفل بعض خصائص آلية النطق، مثل علاقة التأثير المتبادلة بين منبع الإشارة والمرشح (انظر لمزيد من التفصيل في هذا الموضوع [٥] و [٩]).

- نظراً لعطالة أعضاء النطق والعضلات المتحكمة بها يمكن تعريف مدة زمنية قصيرة، لا يتغير وضع اللسان أو الشفتين أو شكلُ وحجم التجاويف المتعددة خلالها على نحوٍ ملحوظ. وقد دل الكثير من الدراسات والأبحاث التجريبية على أن هذه المدة، التي ندلُّ عليها في ما يلي بتعبير "مقتطع زمني"، تقدَّر بـ 20 ms إلى 40 ms (انظر [٥])، ما يعني أيضاً أن جهازَ النطق مرشحٌ متغيرٌ زمنياً، وأن $H(z)$ في العلاقة السابقة تابعٌ للزمن أيضاً، تتغير موسطاته من مقتطع زمنيٍّ إلى آخر. لذا يصلح هذا النموذج المبسط لتمثيل جهاز النطق ضمن مدة زمنية محدودة، يمكن اعتبار خصائص الجهاز خلالها ثابتة نسبياً.

- يقود الشكل ٥-٧ إلى مبدأ "الترميز الوسيطي"، الذي كنا أشرنا إليه كطريقة يمكن توظيفها لاختزال المعلومات المرسلة إلى المستقبل. فعند توفر قيم المعاملات α_k في المعادلة (٥-٤)، ومعلوماتٍ حول طبيعة إشارة التحريض (ضجيجية أو دورية)، ومقدار T_0، يكون من الممكن إرسال هذه القيم إلى المستقبل عوضاً عن إرسال الإشارة ذاتها، حيث تتيح معرفة α_k و T_0، والخوارزمية الممثَّلة بالتابع $H(z)$، إعادة توليد الإشارة في المستقبل.

يتطلب ترميز أو اختزال الإشارة الكلامية إذن معرفة قيم المعاملات α_k، التي لا تكون متوفرة على نحوٍ تلقائي. فالإشارة التي يتلقاها المرسل فعلياً هي إشارة مخرج المرشح (أي الإشارة s في الشكل ٥-٧)، وليس إشارة التحريض. لذا يتطلب تحديد هذه المعاملات طرقاً تحليلية، تتيح اشتقاقها على نحوٍ تقريبي، وذلك انطلاقاً من الإشارة الصوتية الأصلية. ويُعتبر مبدأ "الاستقراء

الخطي" "Linear Prediction" من أكثر الطرق شيوعاً واستخداماً لحساب هذه المعاملات، وهو الذي تعتمده نظم الاتصالات الخلوية، لذا نخصه ببعض الشرح والبيان.

٥-٢-٤ المبادئ الأساسية لتقنية الاستقراء الخطي

لبيان المبادئ الأساسية لمبدأ الاستقراء[١]، ننطلق من الشكل ٥-٧، الذي نقرأ منه أن العلاقة بين إشارة التحريض u والإشارة الصوتية النهائية s، الممثلّتان في المجال الطيفي بـ $U(z)$ و $S(z)$، تُعطى بالمعادلة:

$$S(z) = T(z)\,U(z) \Rightarrow T(z) = \frac{S(z)}{U(z)} = \frac{G}{1 - \sum_{k=1}^{N} \alpha_k z^{-k}} \qquad (٥-٥)$$

حيث يدل $T(z)$ على تابع نقل المرشح مع المضخم. بترتيب الحدود نحصل على:

$$S(z) - \sum_{k=1}^{N} \alpha_k\, S(z)\, z^{-k} = G\, U(z) \qquad (٥-٦)$$

تكافئ هذه العلاقة في المجال الزمني:

$$s[n] = \sum_{k=1}^{N} \alpha_k\, s[n-k] + G\, u[n] \qquad (٥-٧)$$

حيث يشير الرمز $x[n]$ إلى قيمة العينة n من المتغير x.

تدل العلاقة (٥-٧) ضمنياً على أمرٍ في غاية الأهمية، وهو أن القيمة اللحظية للإشارة $s[n]$ تساوي مجموع N من العينات السابقة $s[n-k]$، مُرَجَّحةً -أي القيم- بـ"معاملات الترجيح" "Weighting Factors" α_k، مضافاً إليها القيمة اللحظية لإشارة التحريض أو المنبع $u[n]$، أي أنه من الممكن "استقراء" القيمة اللحظية للإشارة اعتماداً على عددٍ محدود من القيم السابقة، وفي ذلك دلالة أو إشارة إلى وجود "حَشْوٍ" أو "فائضٍ في المعلومات" "Redundant Information"، يمكن الاستغناء عنه عند إرسالها إلى المستقبل.

يُستثمر هذا المفهوم، أي إمكانية استقراء القيم اللحظية للإشارة، لتطوير طرقٍ رياضية تتيح تحديد قيم α_k، وهو ما يتطلبه مبدأ

[١] آثرنا تعبير "استقراء" على مصطلح "التنبؤ"، ذلك أن المعادلة (٥-٧) تدل على قراءة القيمة الآنية للإشارة استناداً إلى قيم سابقة، وليس على التنبؤ بالقيم المستقبلية.

الاختزال كما بيّنّا سلفاً. لتوضيح ذلك، ننطلق من العلاقة (٥–٧)، ونفترض أن الإشارة الخاضعة للتحليل تمثل عيناتٍ من مقتطع صوتي مجهور، ولما كانت إشارة التحريض في هذه الحالة تتكون من متتالية من النبضات، يفصلها عن بعضها الدور الأساسي T_0، فإن إشارة التحريض تكون ذات قيمة ملحوظة فقط عند اللحظات الموافقة للنبضات، وفيما عدا ذلك، تكون قيمة إشارة التحريض صفراً. لذا، من الممكن تبسيط المعادلة (٥–٧) لكل اللحظات التي لا توافق تحريضاً نبضياً فتصبح:

$$s[n] = \sum_{k=1}^{N} \alpha_k \, s[n-k] \quad , \quad n \neq kT_0 \tag{٥–٨}$$

لنفترض الآن وجود قيم تقريبية للمعاملات α_k، ندل عليها بـ $\tilde{\alpha}_k$، تُفضي إلى قيم تقريبية للإشارة $s[n]$. يتيح ذلك كتابة الإشارة التقريبية، على غرار المعادلة (٥–٨)، كما يلي:

$$\tilde{s}[n] = \sum_{k=1}^{N} \tilde{\alpha}_k \, s[n-k] \tag{٥–٩}$$

هذا يعني أن $\tilde{s}[n]$ تمثل القيمة اللحظية التقريبية لـ $s[n]$، استناداً إلى القيم الفعلية السابقة $s[n-k]$، وإلى قيمٍ تقريبية لمعاملات الترجيح $\tilde{\alpha}_k$. بذلك يكون الفرق بين الإشارة الفعلية والإشارة التقريبية، أي "خطأ الاستقراء" "Prediction Error"، هو:

$$e[n] = s[n] - \tilde{s}[n] = s[n] - \sum_{k=1}^{N} \tilde{\alpha}_k \, s[n-k] \tag{٥–١٠}$$

تتيح هذه العلاقة حساب القيمة المتوسطة لمربع الخطأ، وهي:

$$\epsilon = E\{e^2[n]\} = E\left\{ \left[s[n] - \sum_{k=1}^{N} \tilde{\alpha}_k \, s[n-k] \right]^2 \right\} \tag{٥–١١}$$

تُمثّل هذه العلاقة تابعاً بدلالة $\tilde{\alpha}_k$، أي بدلالة عدد مقداره N من المتغيرات. ولتوليد نسخة قريبة من الإشارة الأصلية يجب إيجاد قيم المعاملات $\tilde{\alpha}_k$، التي تقود إلى القيمة الدنيا لخطأ الاستقراء ϵ، فإذا عُرفت هذه القيم، أمكن الاستعاضة بها عن القيم الفعلية α_k.

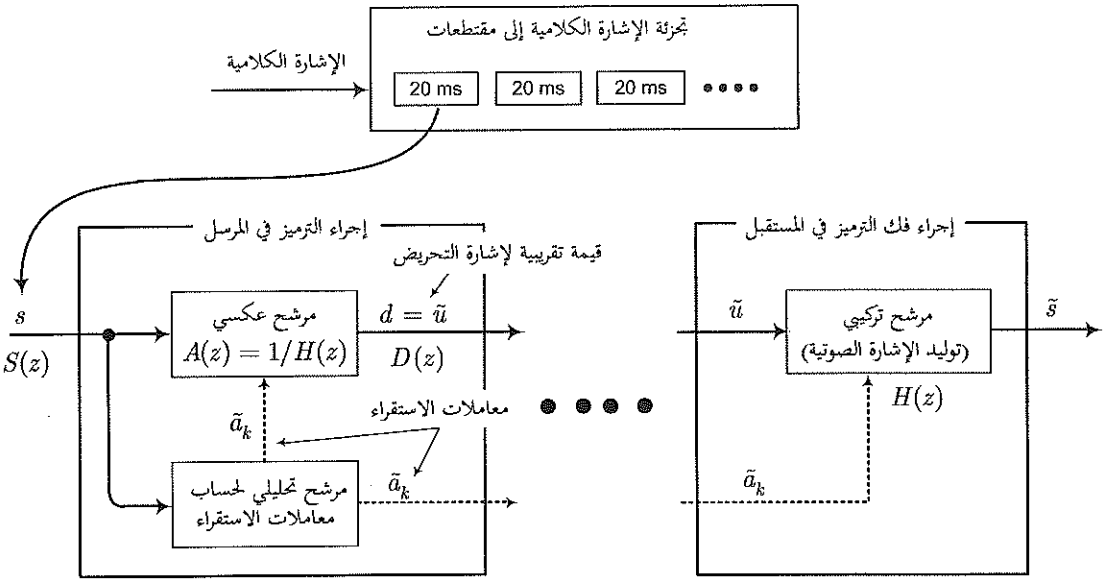
للحصول على القيم المنشودة، يجب اشتقاق ϵ بالنسبة إلى كلٍّ من المعاملات، وجعل الحد المشتق معدوماً، أي:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \tilde{\alpha}_k} = 0 \quad ; \quad k = 1, \cdots, N \tag{٥–١٢}$$

بتطبيق المعادلة (٥-١٢) لكل قيم k الممكنة، نحصل على مجموعة من المعادلات التي يفضي حلها إلى القيم المثلى لـ $\tilde{\alpha}_k$. ولن نتطرق في هذا الموضع إلى تفاصيل وطرق حل هذه المعادلات، إذ يمكن للقارئ المهتم الوقوف عليها في المصادر الخاصة بتحليل الإشارات الصوتية ([٦]-[٨] على سبيل المثال).

تلخيصاً لما سبق، يمكن القول بأن النموذج الرياضي لآلية توليد الإشارة الصوتية يقود إلى تمثيلٍ وسيطي للإشارة اعتماداً على المعاملات الواصفة لمرشح جهاز النطق، وأن مبدأ الاستقراء الخطي هو الذي يتيح تحديد هذه المعاملات على نحوٍ تقريبي.

ننتقل الآن لبيان طريقة استثمار المبادئ النظرية السابقة ضمن النظم الواقعية، ونستعين لذلك بالشكل ٥-٨. كما نذكّر بدايةً بأنه من الممكن اعتبار مرشح النطق ذا خصائص ثابتة نسبياً ضمن مدة زمنية محدودة، لذا تجري تجزئة الإشارة الكلامية إلى مقتطعات متتالية، يساوي طول كل منها 20 ms، وهي المدة المعتمدة في نظامي GSM و UMTS، ثم تُنجز خطوات ترميز المنبع لكل مقتطع على حدة.



الشكل ٥-٨: اختزال المعلومات المرسلة بطريقة الاستقراء الخطي.

يَجري -في المرسل- تحليل المقتطع الكلامي وفق مبدأ الاستقراء الخطي (العلاقات (٥-٩) إلى (٥-١٢))، وذلك للحصول على القيم التقريبية $\tilde{\alpha}_k$، التي نشير إليها في ما يلي بتعبير "معاملات الاستقراء" "Prediction Coefficients"، والتي تصف أو تمثل جهاز النطق خلال المدة المكافئة للمقتطع. بعد ذلك، تُستخدم هذه المعاملات مع الإشارة الأصلية لتغذية مرشحٍ ذي تابع نقل معاكس لتابع مرشح النطق، يقود هذا الإجراء إلى الحصول على قيمة تقريبية لإشارة التحريض الأصلية.

لتوضيح ذلك رياضياً، نكتب خرج المرشح العكسي بدلالة دخله، مع مراعاة العلاقة (٥-٤)، والانتباه إلى أن المرشح يستخدم القيم التقريبية $\tilde{\alpha}_k$. يؤدي ذلك إلى:

$$D(z) = A(z)S(z) = S(z)\,(1 - \sum_{k=1}^{N} \tilde{\alpha}_k\, z^{-k}\,) = S(z) - \sum_{k=1}^{N} \tilde{\alpha}_k\, S(z)\, z^{-k} \qquad (١٣-٥)$$

تكافئ هذه العلاقة في المجال الزمني:

$$d[n] = s[n] - \sum_{k=1}^{N} \tilde{\alpha}_k\, s[n-k] \qquad (١٤-٥)$$

بتعويض القيمة الفعلية لـ $s[n]$، المعطاة بالعلاقة (٥-٧)، وترتيب الحدود، نحصل على:

$$\begin{aligned} d[n] \;&= \sum_{k=1}^{N} \alpha_k\, s[n-k] + G\,u[n] - \sum_{k=1}^{N} \tilde{\alpha}_k\, s[n-k] \\ &= G\,u[n] + \sum_{k=1}^{N} (\alpha_k - \tilde{\alpha}_k)\, s[n-k] \end{aligned} \qquad (١٥-٥)$$

تقرأ من هذه المعادلة أن خرج المرشح العكسي يساوي تماماً إشارة المنبع أو التحريض $G\,u[n]$، وذلك في الحالة المثالية، أي عندما تكون قيم المعاملات التقريبية $\tilde{\alpha}_k$ تساوي تماماً قيم المعاملات النظرية α_k. أما في الحالة الواقعية، فإن المعاملات تكون متباينة، ما يعني أن خرج المرشح يمثل قيمة تقريبية لهذه الإشارة، أي:

$$d[n] = \tilde{u}[n] \qquad (١٦-٥)$$

تقود الخطوة السابقة إذن إلى قيمٍ تقريبية لكلٍّ من المعاملات الواصفة لمرشح النطق، إضافة إلى قيمة تقريبية لإشارة التحريض، وكما أشرنا عند نقاش الشكل ٥-٧، فإن هذه المعلومات هي كل ما يلزم لتوليد الإشارة في المستقبل على نحوٍ مقبول من الدقة. لذا، وفي خطوة تالية، تُرسَل القيم المستخلصة $\tilde{\alpha}_k$ و $\tilde{u}$ إلى المستقبل، حيث تغذي هذه القيم مرشحاً تركيبياً يوافق مرشح النطق (الجزء الأيمن من الشكل ٥-٨)، حيث يقود ذلك إلى نسخة صنعية عن الإشارة الأصلية.

يجدر التنويه في هذا السياق إلى الدلالات والمفاهيم التالية:

١) من أهم نتائج خطوات الترميز في المرسل أنه يقود إلى تضييقٍ حاد للمجال الذي تتباين وتتفاوت ضمنه الإشارة التي تُرسل عبر قناة الاتصال، حيث يكون مجال تباين الإشارة $\tilde{u}$ أقل بكثير من مجال تباين الإشارة s، لذا تُعرف إشارة الخرج $\tilde{u}$ اصطلاحاً بـ "الإشارة المتبقية" "Residual Signal".

٢) يدل الرمز N في العلاقة (٥-٧) على عدد العينات السابقة التي تؤخذ بعين الاعتبار عند حساب أو استقراء القيمة الآنية للإشارة، أي على درجة مرشح الاستقراء. وكلما ارتفعت درجة المرشح، اقتربت قيمة الإشارة المشتقة أو المستقرأة من قيمة الإشارة الأصلية، ومن ثم تناقص مجال تباين الإشارة المتبقية $\tilde{u}$.

٣) يلغي المرشح العكسي في الجزء الأيسر من الشكل ٥-٨ تأثير مرشح النطق في الشكل ٥-٧، لذا لا تُبرز الإشارة $\tilde{u}$ أي أثرٍ للبواني. أي أن المرشح العكسي يقود إلى بسطٍ لطيف الإشارة s، وهذا ما يبرر تسميته في بعض المصادر بـ "Whitening Filter".

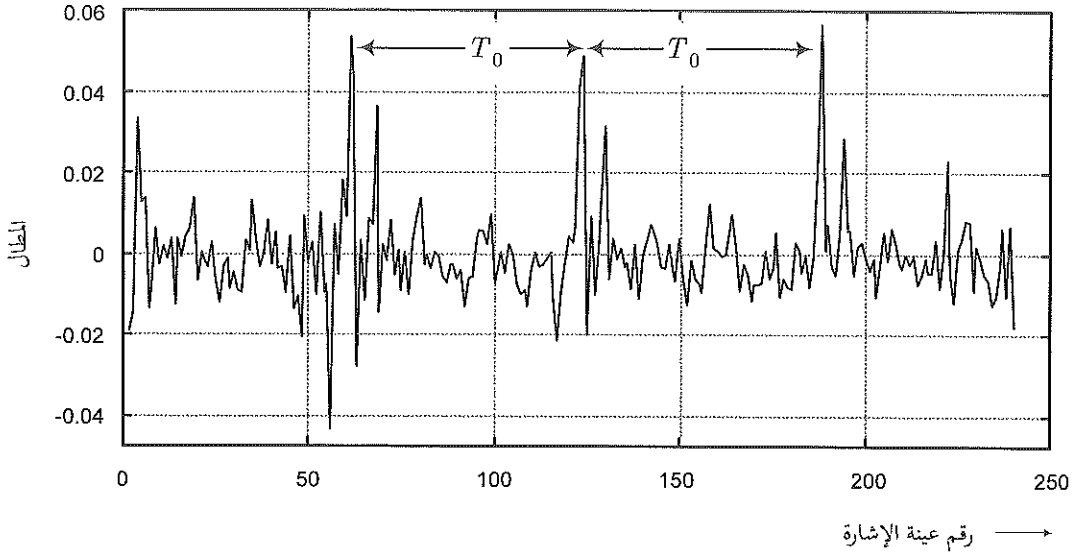
٤) كنا انطلقنا عند نقاشنا لملامح الاستقراء الخطي من المعادلة (٥-٨)، التي تمثل تبسيطاً للمعادلة (٥-٧)، وتُغفِل إشارة التحريض المتضمَّنة ضمن الإشارة الكلامية. غير أن العلاقات (٥-١٣)- (٥-١٦) تبيِّن أن تغذية المرشح العكسي بالإشارة الأصلية تقود إلى الإبقاء على كل تفاصيل الإشارة التي لا يمكن للمعاملات التقريبية أن تمثِّلها، ضمن الإشارة المتبقية $d[n]$. فالإشارة المتبقية تتألف من إشارة التحريض $Gu[n]$ التي جرى إغفالها عند تبسيط العلاقة (٥-٧)، إضافة إلى الخطأ الناتج عن كون المعاملات التقريبية $\tilde{\alpha}_k$ لا تساوي تماماً المعاملات النظرية α_k. وبما أن الإشارة المتبقية تُرسل إلى المستقبل وتُستخدم كدخلٍ للمرشح التركيبي، يكون جزء الإشارة الذي جرى إغفاله متوفراً لدى المستقبل أيضاً ضمن إشارة التحريض، ما يعني عدم ضياعه نتيجةً للتبسيط.

٥) عند تحليل مقتطع كلامي طوله 20 ms، وناتج عن تردد اعتيان أو تقطيع مقداره 8 kHz، فإن ذلك يوافق 160 عينة للإشارة ضمن كل مقتطع. فإذا كانت درجة مرشح التحليل (مرشح الاستقراء الخطي) تساوي 8، كما هي الحال في نظام GSM على سبيل المثال، فإن ذلك يعني أن كل عينة تُحسب اعتماداً على عينات سابقة بحيث تشمل هذه العينات مدة زمنية مقدارها 1 ms، تمثِّل -أي المدة- مقتطعاً جزئياً يخضع للتحليل من ناحية ترابط قيم الإشارة ضمنه. وإذا قارنا طول المقتطع الخاضع للتحليل (1 ms) بطول المقتطع الكامل (20 ms)، نجد أن الترابط المتبادل بين عينات الإشارة يُدرس أو يؤخذ بعين الاعتبار ضمن مدة قصيرة نسبياً، خصوصاً إذا ما استحضرنا أيضاً أن المدة الزمنية المكافئة للدور الأساسي للإشارة الكلامية يتراوح بين 4 ms و 20 ms، تبعاً لجنس وعمر المتكلم، أي أن الدور الأساسي يساوي على الأقل أربعة أضعاف طول المقتطع الجزئي. لذا تُعرف التقنية التي ناقشناها لغاية الآن بمبدأ "الاستقراء قصير الأمد" "Short Term Prediction"، وذلك لتمييزها عن تقنيات الاستقراء طويل الأمد (انظر الفقرات التالية)، التي تتيح استشفاف البنية الدورية للإشارة، حتى إذا كان دور هذه البنية يتجاوز 1 ms.

تمثل خطوات معالجة الإشارة وفق الشكل ٥-٨ نواة كل طرق الترميز المستخدمة في أنظمة الاتصالات الخلوية، غير أن هذه الخطوات، مجردةً من أية إضافات، ذات سلبياتٍ متعددة، تؤثر على كفاءة الترميز ونوعية الإشارة التركيبية أو الصنعية في المستقبل. لذا، تعتمد أنظمة الاتصالات الشائعة هذا المبدأ مع تحسينات أخرى نشير إلى أهمها في الفقرات التالية.

٥-٢-٤-١ الاستقراء طويل الأمد

لما كانت إشارة التحريض -في حالة الأصوات المجهورة- مغايرةً للصفر فقط عند اللحظات الموافقة لنبضات التحريض، فإن قيم الإشارة المتبقية $\tilde{u}$ تبلغ ذرىً مميزة عند هذه اللحظات. يتجلى ذلك في الشكل ٥-٩، الذي يعرض قيم الإشارة المتبقية لمقتطع الإشارة المجهورة في الشكل ٥-٤.



الشكل ٥-٩: الإشارة المتبقية $\tilde{a}$ بعد تحليل مقتطع الإشارة المجهور في الشكل ٥-٤.

يتيح المنحى الدوري للإشارة في هذا الشكل التعرف على لحظات التحريض، كما يَسهُلُ التأكد من أن دورَ تتابع القمم ضمن الإشارة المتبقية يساوي الدور الأساسي للإشارة.

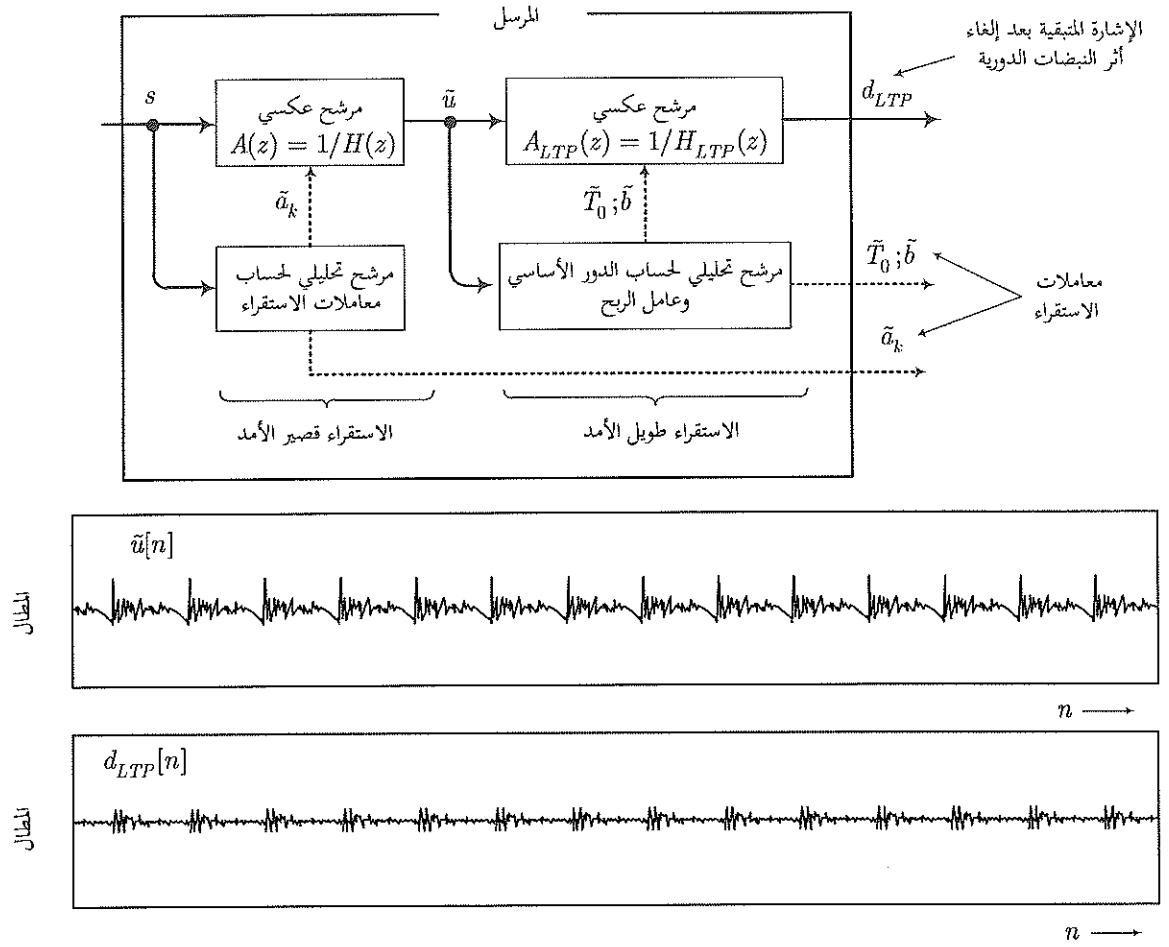
من جانبٍ آخر، تتطلب القيم المرتفعة ضمن الإشارة المتبقية عدداً أكبر من البتات لتمثيلها عند إنجاز خطوة التكمية، ومن ثم يزداد كم المعلومات التي يجب إرسالها عبر القناة. لذا، يجب إيجاد وسيلة مناسبة للتخلص من هذه القيم، أو الحد من عددها. وأوَّلُ ما قد يتبادر إلى الذهن كحلٍّ لذلك هو زيادة درجة تابع الاستقراء الخطي، أي عدد العينات السابقة المستخدمة للاستقراء، بحيث تمتد هذه العينات زمنياً على نحوٍ يتجاوز دورةَ النبضات، ما يضمن أن تكون القيمة الموافقة زمنياً للحظة التحريض ضمن عينات القيمة التقريبية للإشارة، ويؤدي إلى الحد من قيم الإشارة المتبقية أو التفاضلية. يتميز هذا الحل ببساطته من الناحية الرياضية، إلا أنه يقود إلى تعقيدات شديدة من حيث التطبيق والتأخير المرتبط بإجراء الحسابات المكافئة لحل مجموعة المعادلات الناتجة عن العلاقة (٥-١٢). لذا يجب اللجوء إلى طريقة أخرى للتعامل مع هذه النقطة، وهذا هو الحافز الأساسي لإضافة خطوة جديدة إلى الشكل ٥-٨ تعرف باسم "الاستقراء طويل الأمد" "Long Term Prediction". فقد أكدت دراسات مستفيضة أن أثر الترابط طويل الأمد على الإشارة المتبقية، والمتمثل بالقمم الدورية في الشكل ٥-٩، يمكن تمثيله أو محاكاته بمرشح خطيٍّ آخر، يضاف إلى نموذج معالجة الإشارة المُعطى بالشكل ٥-٨، ما يقود إلى الشكل ٥-١٠. يوصف هذا المرشح رياضياً بالعلاقة التالية ([٦] و[٧]):

$$H_{LTP}(z) = -b\,z^{-T_0} \qquad (٥-١٧)$$

حيث يدل كل من الرمز T_0 على الدور الأساسي، و b على معامل ربحٍ يصف مقدار الترابط بين عينات الإشارة المتباعدة عن بعضها البعض بمقدار الدور T_0. أسوة بالمعادلة (٥-٧)، تُعطى (٥-١٧) في المجال الزمني بالعلاقة:

$$\tilde{u}[n] = -b\,\tilde{u}[n - T_0] \qquad (١٨-٥)$$

أي أن أية عينة ضمن الإشارة المتبقية يمكن استقراؤها من العينة التي تبعد عنها بمقدار T_0، ويكون مقدار الترابط بين العينتين ممثّلاً بالموسط b.



الشكل ٥-١٠: بنية المرمِّز بعد إضافة الاستقراء طويل الأمد (الجزء الأعلى)، ومنحى الإشارة المتبقية (الجزء الأدنى).

يمكن استخلاص الموسطين T_0 و b عن طريق مرشح تحليلي يعالج الإشارة المتبقية الناتجة عن خطوة الاستقراء قصير الأمد، بعد ذلك، يُستخدم الموسطان لتغذية مرشح عكسي، يقوم بتعديل الإشارة بحيث يزول تأثير النمط الدوري منها، وهذا يقود إلى إشارة أشد انبساطاً، كما يبين الجزء الأسفل من الشكل ٥-١٠).

لا بد في هذا السياق من التنويه إلى أن عملية التحليل المتعلقة بإيجاد الموسطين T_0 و b تكون أكثر فعالية إذا طُبّقت على أجزاء متعاقبة ضمن المقتطع الكلامي، فعلى سبيل المثال يُنجز الاستقراء طويل الأمد في نظم GSM و UMTS على مقتطعات

جزئية طول كل منها 5 ms، ما يعني استخلاص 4 قيم لكلٍّ من T_0 و b ضمن المقتطع الكلامي الواحد بطول 20 ms. هذا ويفيد استخلاص أكثر من قيمة للدور الأساسي محاكاة التغيرات التي تطرأ عليه أثناء الكلام، كما يتيح محاكاة شريحة أكبر من المتكلمين، متباينة العمر والجنس.

٥-٢-٤-٢ تمثيل الإشارة المتبقية بطرق متقدمة

انطلق النموذج المبسط في الشكل ٥-٧ من أن إشارة التحريض تكون ناتجة إما عن إشارة ضجيجية أو عن متتالية دورية من النبضات، وفي هذا تبسيطٌ شديدٌ للواقع، إذ أن إشارة التحريض في الحالات الواقعية تمثِّل مزيجاً من الإشارات الدورية والضجيجية. إضافة إلى ذلك، لا تنشأُ إشارة التحريض بمعزِل عن مرشح جهاز النطق، وإنما تخضع لعوامل تأثيرٍ متبادل معه، يجعلها أكثر تعقيداً من كونها مجرد متتالية نبضات أو إشارة ضجيجية، وهذا -كما ذكرنا- يغفله النموذج المبسط.
من جانب آخر، يبين الشكل ٥-١٠ أن الإشارة المتبقية d_{LTP}، التي تمثل قيمة تقريبية لإشارة التحريض، ما تزال تُظهر نوعاً من المنحى الدوري، وهذا يستدعي معالجةً إضافية لها، لتكون أنسبَ لعملية النقل، ومُختزلةً بدرجة أكبر.
وقد طُوِّرَتْ تقنيات وخوارزميات عديدة للتغلب على هاتين النقطتين، نعرض في ما يلي لبعضٍ منها.

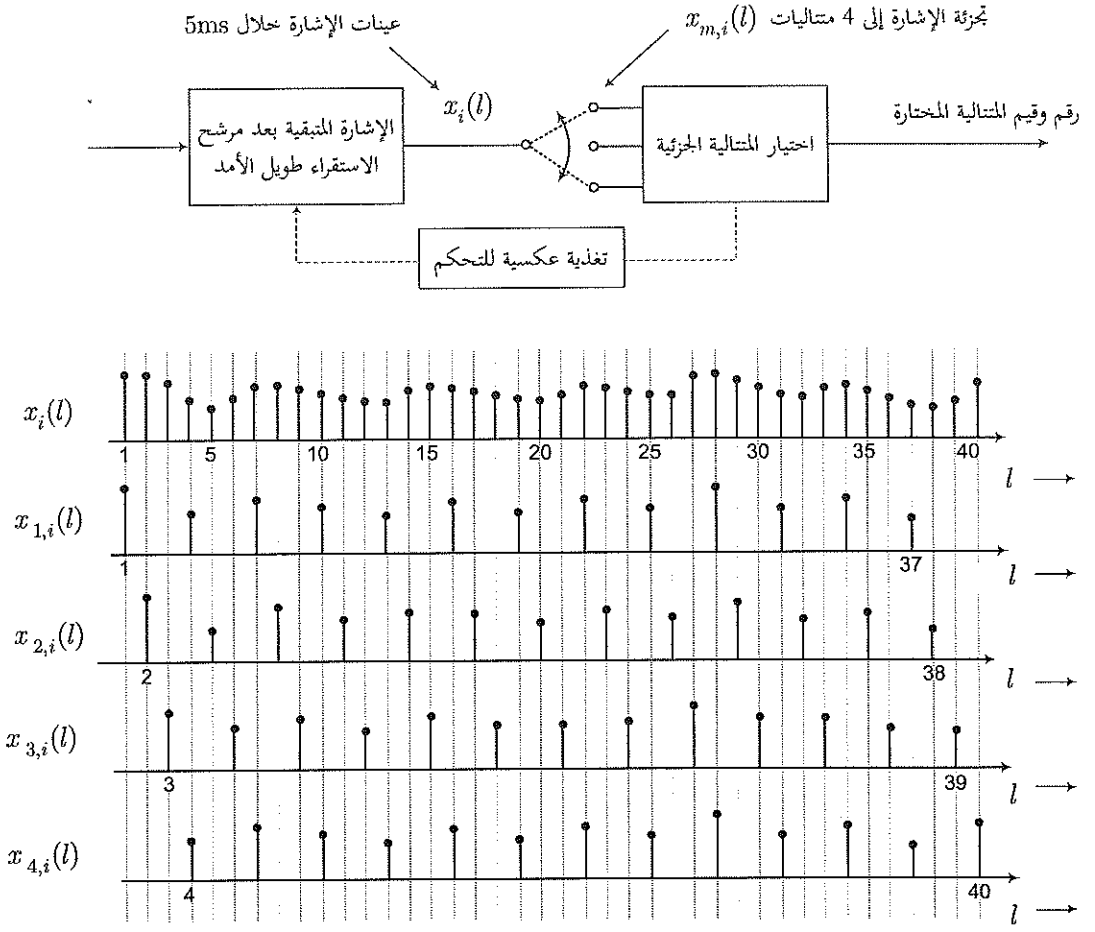
أولاً: تقنية "التحريض النبضي المنتظم" "Regular Pulse Excitation (RPE)"

تُستخدم هذه التقنية في نظام GSM لتوفير ترميزٍ للإشارة بمعدلٍ مقداره 13 kbps، الذي يُعرف باسم "معدل النقل الكامل" "Full Rate (FR)". وتستند هذه التقنية من ناحية المبدأ إلى ما بينته عدة دراسات من أن جودة الإشارة الكلامية المولّدة في المستقبل لا تتطلب بالضرورة توفُّر كل عينات الإشارة المتبقية d_{LTP}، فبعض هذه العينات أهم من بعضها الآخر، خصوصاً تلك الغنية بطاقة الإشارة الكلامية (انظر في ذلك [٦]). لذا تقتصر هذه التقنية على إرسال جزء من الإشارة المتبقية (انظر الشكل ٥-١١)، حيث تجري في خطوة أولى تجزئة متتالية العينات الممثلة للإشارة d_{LTP} إلى أربع متتاليات جزئية، تتولد كلٌّ منها عن طريق تجاوز عينتين على نحوٍ منتظم، مع تغيير رقم العينة الأولى. وبمراعاة أن الإشارة d_{LTP} تنتُج لكل 5 ms على حدة، وأنها تشمل 40 عينة، يقود هذا الإجراء إلى 13 عينة لكل متتالية جزئية، كما هو موضح في الشكل ٥-١١، حيث يشير الرمز $x_{m,i}(l)$ إلى كل متتالية جزئية، كما يدل i على رقم المقتطع الكلامي الجزئي، و m على رقم المتتالية، و l على رقم العينة ضمن المتتالية. يسهل من الشكل قراءة أن الإشارة الجزئية الأولى تتكون من العينات $\{1,4,7,\cdots,34,37\}$، وأن الثانية تشمل العينات $\{2,5,8,\cdots,35,38\}$، وهكذا.
بعد الحصول على المتتاليات الجزئية، تُحسب طاقة كلٍّ منها وفق العلاقة:

$$E_{m,i}=\sum_{l=1}^{13} x_{m,i}^2[l] \qquad (٥-١٩)$$

ثم تُنتقى المتتالية $x_{m,i}(l)$ ذات الطاقة الأعظم وتُرسل قيمها إلى المستقبل، في حين تُهمل المتتاليات الأخرى. يؤدي هذا المبدأ

إلى خفض مقدار المعلومات التي تُرسل لتمثيل الإشارة المتبقية على نحوٍ فعال، دون أن يكون لذلك أثر ملحوظ على نوعية الإشارة المولَّدة في المستقبل. هذا ولا ترسل مطالات العينات الـ 13 كقيمٍ مطلقة، وإنما مقيسةً إلى مطال العينة ذات القيمة الأعظم. إضافة إلى ذلك، يكفي إرسال رقم السلسلة المختارة m، الذي يحتاج إلى بتين فقط لتمثيله، إذ يتيح ذلك توليد "الإشارة المتبقية" في المستقبل دون أي لَبْس. ننوه أخيراً إلى أن المستقبل يضيف عند توليد الإشارة قيمة "0" لكل عينة جرى تجاوزها، ما يقود مرةً أخرى إلى إشارة مؤلفة من 40 عينة لكل مقتطع جزئي.



الشكل ٥-١١: تجزئة الإشارة المتبقية الناتجة عن خطوات الاستقراء وفق تقنية التحريض النبضي المنتظم (RPE).

استناداً إلى ما سبق، يمكن حساب مقدار أو درجة ضغط المعلومات في حالة معدل النقل الكامل في نظام GSM، فكما سبق التنويه، يبلغ طول المقتطع الكلامي 20 ms، وهذا يوافق 160 عينة من الإشارة الكلامية أو الصوتية. وإذا كانت كل عينة من الإشارة تُمثَّل بـ 13 بتاً، فإن تمثيل المقتطع الكلامي كاملاً يتطلب 2080 بتاً، وهذا يكافئ معدل دفق للمعلومات الأصلية مقداره 104 kbps. أما إجراء الاستقراء، فيقود إلى تمثيل المقتطع الكلامي وفق التفاصيل التي يعطيها الجدول ٥-١، أي أن

عدد البتات اللازمة لكل مقتطع هو 260 بتاً فقط، ما يكافئ معدل دفق مقداره $260\,\text{bit}/20\,\text{ms} = 13\,\text{kbps}$ ، ودرجة ضغط مقدارها $104/13 = 8$.

اسم الموسط	عدد البتات اللازمة لتمثيله	مرات التمثيل ضمن المقطع	مجموع البتات ضمن المقطع
ثمانية معاملات للإستقراء قصير الأمد LAR	36	1	36
معامل الربح b	2	4	8
الدور الأساسي T_0	7	4	28
رقم المتتالية الجزئية m	2	4	8
القيمة العظمى ضمن المتتالية الجزئية	6	4	24
مطالات العينات (13 عينة)	3x13	4	156
المجموع			**260**

الجدول ٥-١: البتات اللازمة لتمثيل مقتطع كلامي بطول 20 ms وفق معدل النقل الكامل.

هناك ملاحظة يجب التنويه إليها في سياق قراءة الجدول، وهي أنَّ خرج خطوة التحليل يتكون من ثمانية موسطات يُطلق عليها اسم "معاملات الارتداد" "Reflection Coefficients"، تمثل فيزيائياً مقدار الطاقة المرتد عند التقاء أنبوبين مختلفين ضمن سلسلة الأنابيب الاسطوانية الممثلة لتجاويف الأنبوب الصوتي أو جهاز النطق (انظرالشكل ٥-٦). تتراوح قيم هذه المعاملات بين (1-) و(1)، وإذا أرسلت هذه القيم إلى فاك الترميز في المستقبل، يمكن استخدامها في مرشح التركيب لتوليد الصوت. غير أن هذه المعاملات تتصف بسلبيةٍ لا يمكن إغفالها، وهي أن أي خطأ ينتج عن تكميتها قبل الإرسال يؤدي إلى تغيرات واضحة في الإشارة الكلامية المركبة. لذا يستعاض عن إرسالها كقيمة مطلقة بقيمٍ لوغاريتمية مماثلةٍ لها تسمى "Log Area Ratio (LAR)"، وهذه القيم ترسل مُكَمَّاةً وممثلة بـ $\{6,6,5,5,4,4,3,3\}$ بتاً على التوالي (انظر [٦] و[٨]).

ثانياً: تقنية "الاستقراء الخطي المحرَّض بالمتتاليات" "Code Excited Linear Prediction (CELP)"

تنحو هذه التقنية منحىً مختلفاً من ناحية اختيار الإشارة المتبقية بعد خطوة الاستقراء، إذ يتضمن المرمز الذي يعتمد هذه التقنية خطوة تحليلٍ إضافية، ترمي إلى اختيارٍ أمثلَ للإشارة المتبقية –كمُمَثِّلٍ عن إشارة التحريض– من بين عدد كبير من المتتاليات المحفوظة في ذاكرة المرمز. تُنتقى هذه المتتاليات بحيث يكون الترابط المتبادل بينها ضعيفاً، ويكون طول كل منها مساوياً لطول المقتطع الجزئي الذي يخضع للتحليل أثناء خطوة الاستقراء طويل الأمد، أي 40 عينة في نظام GSM.

يجري انتقاء المتتالية المثلى وفق الخطوات المبينة في الشكل ٥-١٢، وهي:

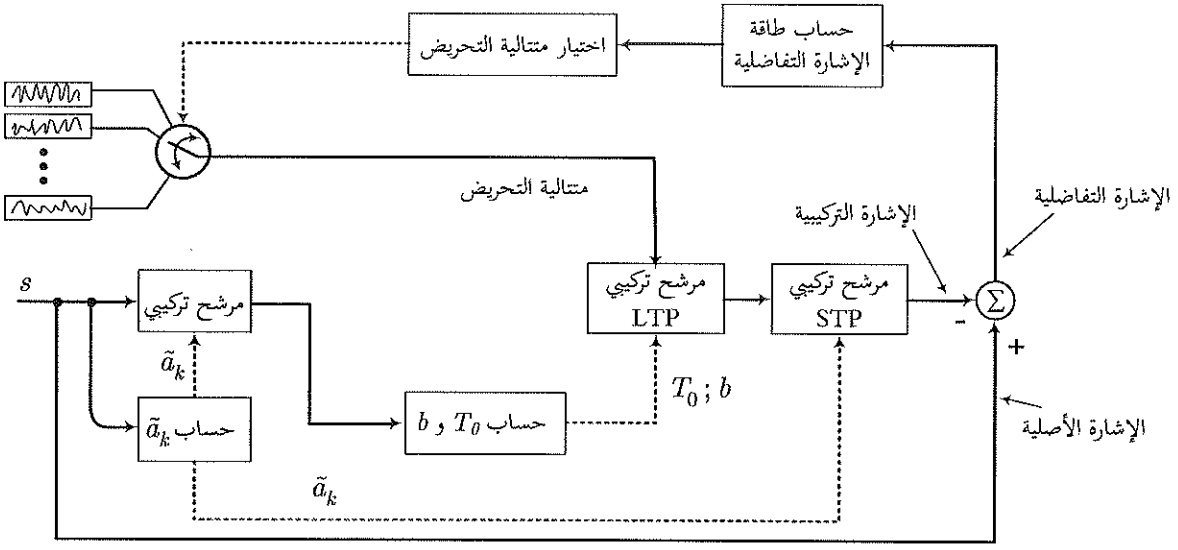
١) تُنجز بدايةً خطوات تحليل الإشارة الكلامية الأصلية، باستخدام الاستقراء قصير الأمد والاستقراء طويل الأمد، يقود ذلك إلى المعاملات $\tilde{\alpha}_k$ ، وإلى الموسطات T_0 و b.

٢) يجري بعد ذلك توليد نسخة صنعية من الإشارة الكلامية باستخدام الموسطات المشتقة في الخطوة الأولى، غير أنه عوضاً عن استخدام الإشارة الناتجة عن المرشح $A_{LTP}(z)$ في الشكل ٥-١٠ كإشارة تحريض، تُنتَقى واحدة من الإشارات المحفوظة في ذاكرة المرمز لتغذية المرشح التركيبي المُولِّد للإشارة.

٣) تقارن بعد ذلك الإشارة المركبة أو المولدة صنعياً مع الإشارة الأصلية، وتحسب الإشارة التفاضلية بينهما.

٤) تُكرر الخطوتان الأخيرتان لكل الإشارات المحفوظة في ذاكرة المرمز، التي يبلغ عددها 1024 متتالية في نظام GSM. بعد ذلك تُنتقى الإشارة المتبقية ذات مقدار الطاقة الأدنى كإشارة تحريض مُثلى.

٥) يُرسل رقم الإشارة أو المتتالية المختارة – أي رقمها المتسلسل ضمن الجدول – إلى المستقبل، وهذا يتطلب إرسال 10 بتات فقط. ونظراً لأن المستقبل يحفظ في ذاكرته نفس جدول إشارات التحريض، لا تكون هناك أية صعوبة في التعرف على الإشارة المنتقاة.



الشكل ٥-١٢: نموذج توضيحي مبسَّط لمبدأ الاستقراء الخطي المحرَّض بالمتتاليات.

يتطلب مبدأ CELP الكثير من العمليات الحسابية لإنجازه، خصوصاً لتغذية المرشح التركيبي بـ 1024 إشارة ومقارنة النتائج، وهذا يمثل عبئاً حسابياً كبيراً على الذارات الخاصة بمعالجة الإشارة. لذا طور الباحثون خوارزميات متقدمة ترمي الى توليد متتاليات ذات خصائص وبُنىً جبرية مناسبة، تتيح إنجاز العمليات الحسابية بفعالية أكبر. وقد قاد ذلك إلى إصدارات مطورة للمبدأ العام الذي شرحناه، من أهمها:

- تقنية "Vector Sum Excited Linear Prediction (VSELP)" التي تُستخدم في مرمزات GSM التي توفر معدل النقل النصفي "Half Rate (HR)".

- تقنية "Algebraic Code Excited Linear Prediction (ACELP)"، وهي الصيغة التي اعتمدتها المواصفات المعيارية لمرمزات GSM ذات "معدل النقل الكامل المحسن" "Enhanced Full Rate (EFR)" ولنظام UMTS ضمن ما يعرف بتقنية الترميز المتكيف (انظر الفقرة التالية).

هذا ويمكن الرجوع إلى [٤] و[٨] للوقوف على التفاصيل الدقيقة المتعلقة بهذه التحسينات.

نشير أيضاً إلى تعبيرٍ آخر يستخدم للدلالة على المبدأ الموضح في الشكل ٥-١٢. فنظراً لأن الإشارة الكلامية تولَّدُ أو "تُركَّبُ" في المرسل على نحوٍ كامل، وتُستخدم أثناء خطوات التحليل لاختيار إشارة التحريض المثالية، يُطلق على هذا المبدأ اسم "التحليل عن طريق التركيب" "Analysis by Synthesis (ABS)"، أي تحليل الإشارة باستخدام نتيجة تركيبها أو توليدها صنعياً.

يمثل "المرمز المتكيف ذو معدلات النقل المتعددة" "Adaptive Multi Rate (AMR) Coder" استخداماً عملياً مهماً لتقنية ACELP، فقد جرى اعتماده لترميز الإشارة في الإصدارات المتقدمة لنظامي GSM و UMTS نظام UMTS، لذا نعرض في ما يلي لأهم مميزاته.

عند توليد نسخة صنعية للإشارة باستخدام الموسطات التي يجري التوصل إليها ضمن خطوات الاستقراء والتحليل، تكون الإشارة الناتجة مشوبةً ببعض التشويه، نظراً لأن الموسطات تُفضي إلى نسخة تقريبية للإشارة الأصلية. لذا يمكن القول بأن خطوات ضغط الإشارة تؤدي إلى تشويهٍ في بنيتها.

إضافةً إلى ذلك، تتعرض الموسطات عند إرسالها عبر قناة الانتشار أو القناة الراديوية إلى تغيُّرٍ في قيمها بسبب ظروف الانتشار غير المثالية. لذا تخضع الإشارة النهائية لتشويهٍ مركَّب أو تراكمي، يختلف مقداره باختلاف درجة الضغط أثناء عملية ترميز الكلام، وحسب نوعية قناة الانتشار، أي أن ضغط الإشارة بدرجة كبيرة يؤدي إلى إشارة صنعية ذات جودة مقبولة، إذا كانت ظروف الانتشار مناسبةً، كما أن أي ضغطٍ للإشارة، ولو بدرجة قليلة، يفضي إلى إشارة مبهمة، عند كون ظروف الانتشار غير مناسبة.

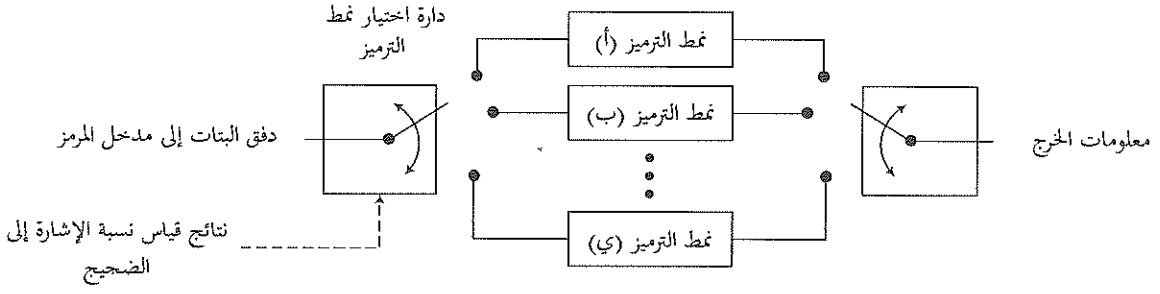
يُستثمر هذا التأثير المتبادل بين درجة ضغط المعلومات وظروف الانتشار في المرمزات التي تعتمد مبدأ "الترميز المتكيف"، "Adaptive Multi Rate Coding (AMR-Coding)" الذي يُتيح ترميز الإشارة الكلامية باستخدام أنماط ترميزٍ مختلفة وفق تقنية ACELP، وعلى نحوٍ متكيف مع نوعية قناة الانتشار، ما يقود إلى درجات اختزال متباينة.

من الممكن تلخيص مبدأ عمل هذا المرمِّز على النحو التالي (انظر الشكل ٥-١٣):

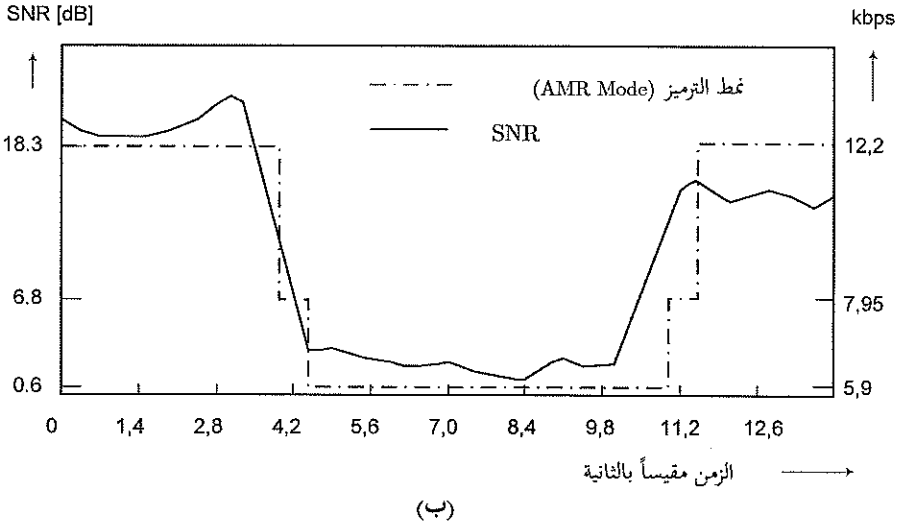
١) يُجري كل من طرفي الاتصال (المحطة الثابتة والوحدة المتحركة) قياساً دورياً لنسبة الاشارة إلى الضجيج، وذلك بهدف تحديد أو تقدير جودة أو رداءة ظروف الانتشار.

٢) استناداً إلى نتائج القياس، يوعز كل طرفٍ إلى الآخر باختيار نمط الترميز الأكثر ملاءمة لظروف الانتشار (الجزء (أ) من الشكل ٥-١٣)، فإذا كانت درجة التخميد ومقدار التداخل بين الرموز قليلين (انظر الفصل ٣) فإن ذلك يعني أن القناة

لا تشوِّه الإشارة كثيراً، ومن ثم يكون التشوه الذي يصيب الموسطات المُرسلة مقبولاً، ما يتيح استخدام نمط ترميز ذي عامل ضغطٍ مرتفعٍ. أما إذا كانت ظروف انتشار الإشارة سيئة، فهذا يعني أن التشوه الذي سيصيب الموسطات عند انتقالها إلى المستقبل سيزيد من حدة أو درجة التشوه الإجمالية، ما يقتضي استخدام أو اختيار نمط ترميز بمعدل ضغطٍ منخفض. يُعلم الطرف المرسل الطرف الآخر أيضاً بنمط الترميز المستخدم من قِبَله.



(أ)



(ب)

الشكل ٥-١٣: مبدأ عمل المرمز المتكيف. (الجزء (ب) مقتبس عن [٢١] بتصرف).

٣) بناءً على المعلومات السابقة (جودة القناة ونمط الترميز الذي يستخدمه الطرف الآخر)، يختار الطرف المستقبل نمط الترميز المناسب. هذا ويكون الإيعاز بتغيير نمط الترميز ملزماً للطرف الآخر، إذا كانت المحطة الثابتة هي التي أرسلته، أما إذا كان الإيعاز صادراً عن الوحدة المتحركة، فإن الخيار أو القرار يكون متروكاً للمحطة الثابتة في اتباع الإيعاز أو تجاهله. يعني ذلك أن تقنية AMR تتيح مرونةً في استخدام أنماط الترميز، إذ من الممكن أن يتباين نمط الترميز في المسار الصاعد عن النمط المستخدم في المسار الهابط.

تُعرِّف المواصفات المعيارية عتبات محددة لنسبة الإشارة إلى الضجيج SNR، التي يجب على المرمز أن ينتقل من نمط ترميزٍ إلى آخر عند بلوغها. ويعطي الجزء (ب) من الشكل ٥-١٣ مثالاً عن ذلك، حيث يبين كيف يتغير نمط الترميز بدلالة الزمن تبعاً لجودة القناة. يدل الخط المتقطع في الشكل على العتبات التي يُوجب تجاوزُها التغيير، فعلى سبيل المثال، إذا انخفض مقدار SNR (الخط المتصل) عن 18.3 dB، وجب الانتقال من نمط الترميز بمعدل 12.2 kbps إلى النمط ذي معدل 7.95 kbps. وهذا الانتقال المستمر، يقود إلى التكيف مع ظروف الإنتشار والحفاظ على أفضل نوعية ممكنة للإشارة.

سبق الذكر بأن الترميز المتكيف هو الذي يحكُمُ ترميز المنبع في الإصدارات المتقدمة لنظامي GSM و UMTS، وهو يتيح تمثيل الإشارة الكلامية بمعدلات تتراوح بين 4.75 kbps و 12.2 kbps في حالة المعدل الكامل، وبين 4.75 kbps و 7.95 kbps في حالة المعدل النصفي. وننوه مرة أخرى إلى أن ترميز المنبع يُنجز لكل نمطٍ باستخدام تقنية ACELP. هذا وسنتطرق لتفاصيل أخرى متعلقة بالترميز المتكيف لاحقاً.

٥-٢-٥ الإرسال المتقطع

عند إجراء أي اتصال هاتفي يكون كلٌّ من طرفي الاتصال مستمعاً في آنٍ ومتكلماً في آنٍ اخر، ما يعني أن كلاً من الطرفين يكون صامتاً خلال ما يقارب 50% من مدة الاتصال. وأثناء المُدَدِ الزمنية المكافئة للصمت، لا توجد إشارة كلامية ذات معلومات محددة يجب نقلها إلى الطرف الآخر، ولا يلتقط ميكروفون الجهاز إلا أصوات الضجيج الصادرة عن محيط الطرف المستمع (الصامت)، والتي يشار إليها بـ "Background Noise".

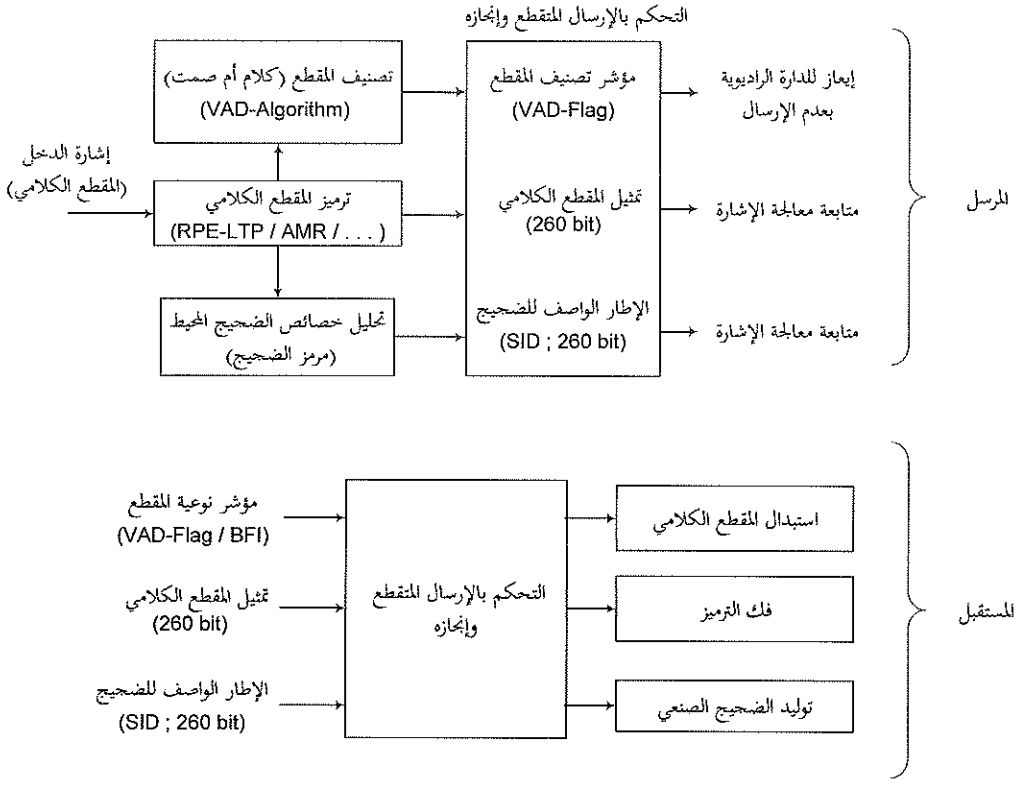
تهدف "تقنية الإرسال المتقطع" "Discontinuous Transmission (DTX)" إلى استثمار هذه الظاهرة لزيادة كفاءة نظام الاتصال. فمبدأ هذه التقنية –كما يدل اسمها– هو عدم إرسال إشارة راديوية من جهاز الطرف المستمع طوال مدة صمته، وفي ذلك فائدتان أساسيتان:

١) التقليل من استهلاك الطاقة في الوحدة المتحركة، وهذا يزيد في طول مدة استخدام "وحدة ادخار الطاقة أو البطارية" "Battery"، ويقلل من الحاجة إلى إعادة شحنها.

٢) خفض مستوى التداخل والتشويش في الشبكة، إذ أن الإقلال من إرسال الإشارات الراديوية يؤدي إلى انخفاضٍ في مقدار نسبة التشويش إلى الإشارة ضمن مناطق التغذية، وهذا من جانبه يؤدي إلى زيادة في سعة الشبكة.

تتطلب آلية أو تقنية الإرسال المتقطع وظائف إضافية ضمن وحدات ترميز الكلام في المرسل والمستقبل (انظر الشكل ٥-١٤)، ففي طرف الإرسال يجب بدايةً تصنيف المقتطع الكلامي إلى "مقتطع صمت" أو "مقتطع كلام منطوق"، ويتحقق ذلك من خلال "كاشف النشاط الكلامي" "Voice Activity Detector (VAD)"، الذي يحدد عن طريق تحليل وحساب الطاقة ضمن المدة المكافئة للمقتطع الكلامي (20 ms)، ما إذا كان هذا المقتطع يحمل معلومات كلامية، أم أنه يحوي على معلوماتٍ تمثل ضوضاءَ أو ضجيجَ محيطِ المستمع. ويجري تقرير ما إذا كان المقتطع "كلامياً" عن طريق تحليل خصائصه كإشارة صوتية،

واستخلاص مقدار الطاقة التي يحملها، ومقدار تغير هذه الطاقة من مقتطع إلى آخر، ثم مقارنة النتيجة بعتبة معينة (انظر لتفاصيل ذلك [٧] و[١٠] و[١١]). فإذا تبين نتيجةً للمقارنة أن المقتطع يحوي معلوماتٍ كلامية، أُختيرت قيمةُ "1" لمؤشرٍ خاص بذلك يسمى "مؤشر تصنيف المقتطع" "VAD–Flag"، أما إذا أفادت نتيجة التحليل بأن المقتطع يمثل ضجيجاً من المحيط فحسب، فإن قيمة المؤشر تكون صفراً (VAD-Flag = 0)، وهذا يمثّل إيعازاً للدارة الراديوية بعدم الإرسال.



الشكل ٥-١٤: الإجراءات المتعلقة بالإرسال المتقطع في المرسل والمستقبل.

من جانبٍ آخر، بينت تجارب كثيرة أن توقف الإرسال تماماً أثناء صمت طرفٍ من طرفي الكلام يوحي للطرف الآخر بأن الاتصال قد انقطع، إذ أن المتكلم يكون مستمعاً لما يلتقطه ميكروفون الطرف الآخر، وهذا الميكروفون يلتقط دوماً إشارةً تمثل إما الضجيج المحيط مضافاً إليها الإشارة الكلامية (أثناء الحديث)، أو إشارة الضجيج فقط (أثناء الصمت). فإذا انقطع الارسال أثناء مُدد الصمت، تنقطع إشارة الضجيج أيضاً، ما يقود إلى سكون تام بين المقتطعات الكلامية، وإلى انطباعٍ لدى الطرف المستمع بأن الاتصال قد انقطع تماماً.

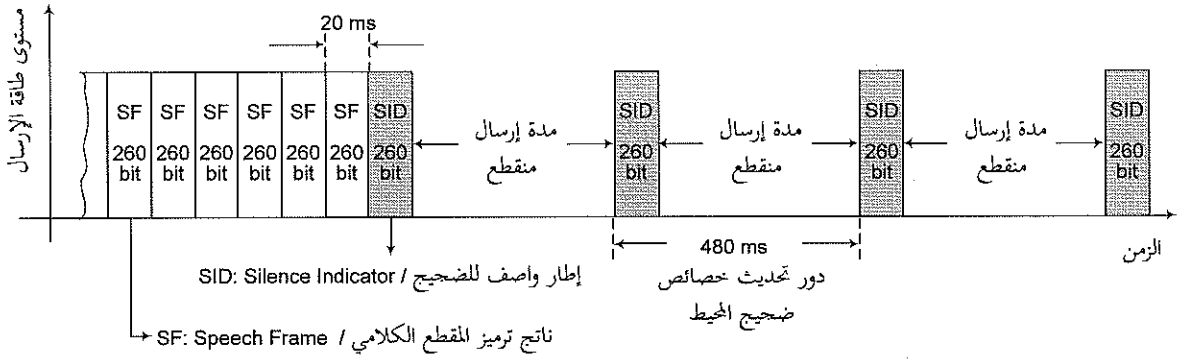
لذا، هناك دارة تحليل خاصة في المرسل تعرف باسم "مرمِّز الضجيج" "Background Noise Encoder"، تَستخلص من مرمز الكلام موسطاتٍ تصف طبيعة الضجيج ضمن المقتطع الكلامي الحالي، والتي تتغير حسب مكان وحركة المستخدم. فالضجيج المحيط في حالة كون المستخدم مسافراً يتنقل بسيارته، يختلف عن الضجيج ضمن مصنعٍ يحوي آلات كهربائية عاملة، ويختلف

أيضاً عن الضجيج ضمن غرفة مغلقة. لذا يجب تمييز طبيعة الضوضاء المحيطة، وترميزها أسوةً بالكلام نفسه، أي أنها تُمَثَّل بـ 260 بتاً أيضاً، غير أنها لا تُشغل كلها بمعلومات ذات دلالة، وإنما يكون بعضها مشغولاً بقيمةٍ ثابتة تساوي "0". هذا ويختلف عدد البتات ذات القيمة الثابتة حسب نوع الترميز المستخدم وحسب إصدار المواصفات، ويُطلق على مجموعة المعلومات الممثلة للمقتطع الصوتي في هذه الحالة اسم " الإطار الواصف للضجيج" "Silence Descriptor Frame (SID)"، لتمييزها عن المعلومات الواصفة لمقتطع كلامي.

تُستخدم المعلومات الواصفة للضجيج لتوليد ضجيجٍ صنعي في المستقبل، يحاكي الذي يصدر عن محيط طرف الارسال. وهذا الضجيج الصنعي يكون بديلاً عن الإشارة الصوتية أثناء مُدد الصمت، ليوهم المستمع باستمرارية الاتصال حتى أثناء مُدَد انقطاع إرسال جهاز الطرف الآخر. تُعرف دارة توليد الضجيج باسم "مولد الضجيج الصنعي" ويدل التعبير الانكليزي الخاص بها "Comfort Noise Generator" على أثر هذا الضجيج، وهو توفير اتصال ذي استمرارية وجودة مريحة للمستخدم.

هناك ملاحظة أخرى مهمة في هذا السياق، ففي حال تبيَّن أن الإطار مبهم، يستعيض المستقبل عن المعلومات الممثلة له بمعلومات الإطار السابق. يُسمى الإطار المبهم في هذه الحالة اصطلاحاً بـ "Bad Frame"، كما يُدَلُّ على ذلك بمؤشر خاص هو "Bad Frame Indicator (BFI)"، يُستخدم للإيعاز باستبدال الإطار (انظر الشكل ٥-١٤).

استكمالاً لشرح آلية الإرسال المتقطع، يوضح الشكل ٥-١٥ كيفية تبدل مستوى طاقة الإرسال بدلالة الزمن. فإذا جرى تصنيف مقتطع كلامي بأنه بداية فترة صمت، يُرسَلُ الإطار الواصف للضجيج (SID) مرة واحدة، ثم يوعز للقسم الراديوي بإيقاف الإرسال، ولما كانت مدة الصمت قد تطول، يجب تحديث المعلومات الواصفة للضجيج دورياً، حيث يبلغ مقدار دور التحديث 480 ms.



الشكل ٥-١٥: توضيح لمبدأ الإرسال المتقطع.

ختاماً لهذا الجزء من الفصل ننوه إلى أننا لم نعرض لكل تفاصيل الدارات المضطلعة بترميز الإشارة الكلامية، إذ تشمل النظم الحقيقية مكوناتٍ أخرى ومرشحات إضافية، تهدف إلى جعل الإشارة أكثر توافقاً مع استجابة الأذن البشرية لطيف الإشارة الكلامية، ويمكن الرجوع إلى تفاصيل ذلك في [٥]-[٩].

٥-٣ ترميز القناة

بيَّنا في البحث السابق الملامح العامة والأساسية لاختزال حجم المعلومات الممثلة للإشارة الكلامية، واتضح من النقاش أن الهدف من هذا الإجراء هو عزل كل ما هو ليس بضروري ضمن الإشارة، والاقتصار على أهم أجزائها أو مكوناتها، التي تتيح -في حال وصولها إلى المستقبل على نحوٍ صحيح- توليد نسخة قريبة جداً من الإشارة الأصلية.

بالرغم من أن هذا المبدأ يقود إلى تحسين درجة استثمار موارد الشبكة، إلا أنه يجعل المعلومات المرسلة ذات حساسية مفرطة لأي تأثير سلبي للقناة. فبما أن المعلومات تكون خاليةً من أي فائض، تكون مركزة جداً أيضاً، وهذا يعني أن أي تغيّر طفيف في نسبة الإشارة إلى الضجيج قد يؤدي إلى أخطاءٍ فادحة في مطال وطور الإشارة، ما يجعل استخلاصها في المستقبل صعباً أو غيرَ ممكن. لذا، يجب أن تشمل خطوات معالجة الإشارة تدابير وقائية، تتيح كشف وتصحيح الأخطاء الناجمة عن نقل المعلومات عبر قناة الاتصال. وهذه التدابير، مع الخوارزميات المرتبطة بها، تندرج ضمن مصطلح شامل هو "ترميز القناة" "Channel Coding".

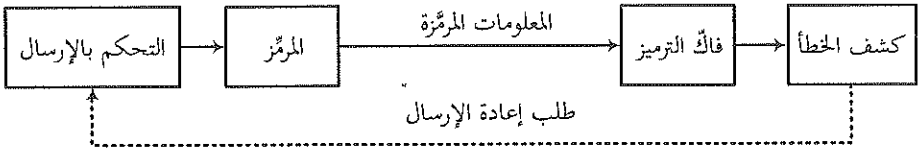
إن المبدأ المشترك لمختلف آليات ترميز القناة هو إضافة "فائضٍ من المعلومات أو حشو" "Redundancy" إلى سلسلة المعطيات الإثنانية، قبل إرسالها، وذلك وفق خوارزميات مخصصة لهذا الغرض، ومعروفةٍ لدى المستقبل أيضاً. وبعد الإرسال، يُستخدم هذا الحشو في جهاز الاستقبال، مع الخوارزميات المعروفة، إما لكشف وقوع خطأ أثناء النقل، أو لكشف الخطأ وتصحيحه أيضاً. يعني ذلك أن آليات الترميز تتباين من حيث غرضها، فمنها ما هو مخصص لرصد الأخطاء فقط، ومنها ما هو أكثر تعقيداً ويتيح -إضافة إلى كشف الأخطاء- تصحيحها واستعادة المعلومات الأصلية بدرجة كبيرة من الدقة.
يقود هذا التباين إلى تصنيف "آليات التحكم بأخطاء النقل" "Error Control Mechanisms" إلى الصنفين الرئيسيين التاليين:

١) "التصحيح اللاحق للخطأ" "Backward Error Correction (BEC)": حين يكتشف المستقبل عن طريق أحد طرق كشف الخطأ، ك"فحص التكافؤ" "Parity-Check" على سبيل المثال، وجود أخطاء في نسخة المعلومات المستقبَلة، يُهمِل هذه النسخة، ويطلب من المرسل إعادة إرسال المعلومات من جديد (الجزء (أ) من الشكل ٥-١٦).
تعرف هذه الآلية أيضاً بـ "الطلب الآلي لتكرار الإرسال" "Automatic Repeat Request(ARQ)"، وتقتصر على كشف الخطأ دون أية إجراءات تالية لتصحيحه، إذ يتحقق التصحيح بالإرسال اللاحق أو المُكَرَّر للمعلومات. وتستخدم هذه الآلية على نحوٍ أساسي عند تبادل المعطيات بتقنيات "تبديل أو توجيه الرزم" "Packet Switching"، حيث تتيح طبيعة الخدمات المقدمة عبر هذه التقنيات الانتظار لإعادة إرسال المعلومات (انظر [٢٧] للتفاصيل المتعلقة بهذه الآلية).

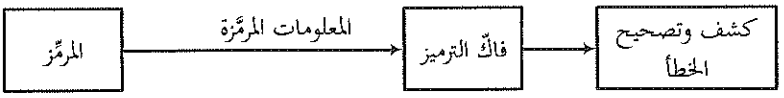
٢) "التصحيح بالترميز الاستباقي" "Forward Error Correction(FEC)": تتضمن هذه الآلية تحضيراً مسبقاً للمعلومات قبل الإرسال، يأخذ بعين الاعتبار طبيعة الأخطاء التي من الممكن أن تطرأ على الإشارة. ويتجلى هذا التحضير في استخدام خوارزميات متقدمة لتغيير بنية الإشارة، تتيح للمستقبل، إضافةً إلى كشف الأخطاء الناجمة عن عملية الإرسال، تصحيح قدرٍ كبير منها (الجزء (ب) من الشكل ٥-١٦).

تتميز الخوارزميات المستخدمة للترميز الاستباقي بأنها تستند إلى إدراكٍ مسبقٍ لطبيعة التشويه الذي من الممكن أن يطرأ على الإشارة. أي أن الترميز يقود إلى تزويد الإشارة بآلية كشف وتصحيح الأخطاء قبل وقوعها، وقبل مباشرة الإرسال، وهذا ما يشير إليه تعبير "استباقي" "Forward" في هذا السياق.

إضافة إلى الصنفين السابقين، جرى في السنوات الأخيرة تطوير تقنيات هجينة، تُعرف باسم "Hybrid-ARQ (HARQ)"، وتُستخدم في أنظمة الجيل الثالث المتقدمة والمحسنة [٢٣].



(أ): "التصحيح اللاحق للخطأ" "Backward Error Correction"



(ب): "التصحيح بالترميز الاستباقي للخطأ" "Forward Error Correction(FEC)"

الشكل ٥-١٦: التصنيف الأساسي لطرق كشف وتصحيح أخطاء النقل.

نقتصر في ما يلي على نقاش تقنيات الترميز الاستباقي، فهي المستخدمة حصراً في حالة الخدمات القائمة على تبديل الدارات، كالاتصال الصوتي التقليدي والرسائل النصية القصيرة، والتي مازالت تمثل الخدمات الأساسية ضمن شبكات الاتصالات.

٥-٣-١ التصحيح بالترميز الاستباقي

تستند المبادئ العامة للترميز الإستباقي إلى ما أسس له "شانون" "Shannon" في أبحاثه، فقد ساد الاعتقاد قبل هذه الأبحاث أنَّ وجودَ التشويش في قناة الاتصال يحول دون إنجاز عملية إرسال المعلومات واستقبالها بدون أخطاء، غير أن دراسات شانون بدَّدت هذا الاعتقاد وبيَّنت أن وجود التشويش في القناة يحدُّ من معدل نقل المعلومات، غير أنه لا يُحتِّم زيادة معدل الأخطاء. وقد كان الاستنباط الأساسي من أبحاثه هو التالي: "إذا كانت قناة الاتصال تتميز بسعة عظمة مقدارها C، مقيسة بعدد التات المنقولة في الثانية الواحدة bits/s (bps)، وإذا كان معدل إرسال المعلومات R أقلَّ من C، فإنه من الممكن تصميم خوارزمية لكشف وتصحيح الخطأ (أي آلية ترميزٍ للقناة)، تتيح إنجاز عملية الإرسال بدون أية أخطاء، أو بمعدل يقرُبُ جداً من الصفر". بيَّن شانون بذلك إمكانية وجود ترميزٍ أمثلَ للقناة، غير أنه لم يتطرق لتفاصيل آليات أو خوارزميات الترميز، وهذا دفع بالكثير من الباحثين إلى محاولة ابتكار طرق متقدمة للترميز، وقد أثمرت أبحاثهم تقنياتِ وخوارزمياتِ ترميزٍ متنوعة، تتيح رصد أخطاء

النقل وكشفها بدرجة عالية من الفعالية. وما زالت زيادة كفاءة وفعالية هذه التقنيات محط اهتمام الكثير من فرق البحث والتطوير.

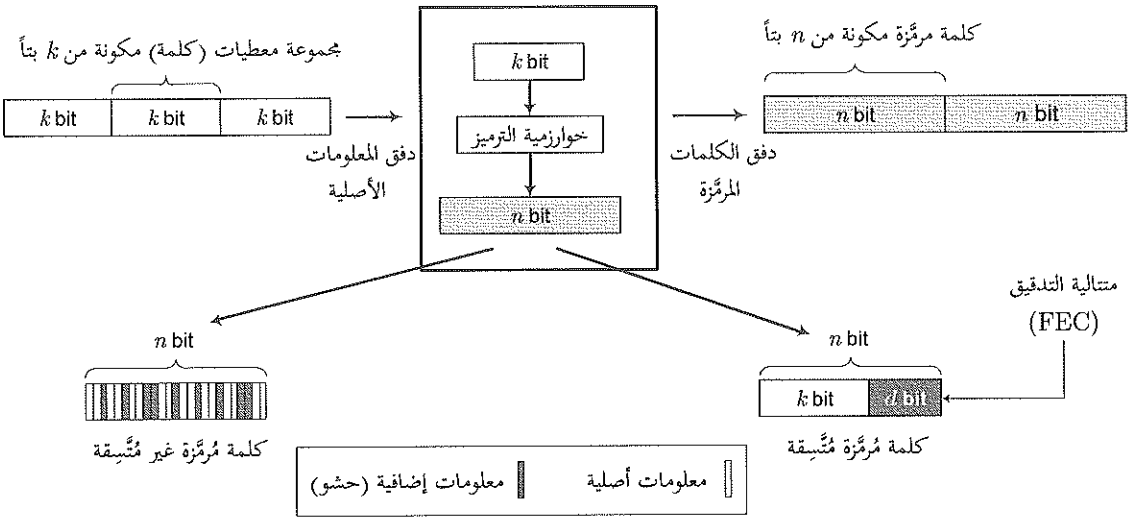
لا بد قبل بيان مبادئ الترميز الاستباقي من التنبيه إلى ما يلي:

- تمثل إضافة أية معلوماتٍ إلى الإشارة المُختزلة –من ناحية المبدأ– إجراءاً عكسياً لما تهدف إليه خطوات ترميز المنبع، إذ أن نقل المعلومات المُضافة عبر قناة الاتصال يؤدي إلى تَرَدٍّ في فعالية استثمار موارد الشبكة، وإلى زيادةٍ في كلفة نقل المعلومات، سواء من ناحية القنوات الترددية التي تُشغل، أو من ناحية الطاقة التي تتطلبها عملية النقل. غير أن هذا الإجراء –كما أسلفنا– لا بد منه لضمان جودة الاتصال.
- تتميز الخوارزميات المستخدمة في إجراءات ترميز القناة بتنوعها وتباينها، وقد جرى تطوير هذه الخوارزميات لتكون متكيفة مع طبيعة التأثير السلبي لطيفٍ واسعٍ من قنوات الانتشار. لذا يمكن فهمُ إجرائيات ترميز القناة على أنها "توليفٌ للإشارة وتغييرٌ في بنيتها، لجعلها متوافقةً مع الخصائص المميِّزة لقناة الانتشار".

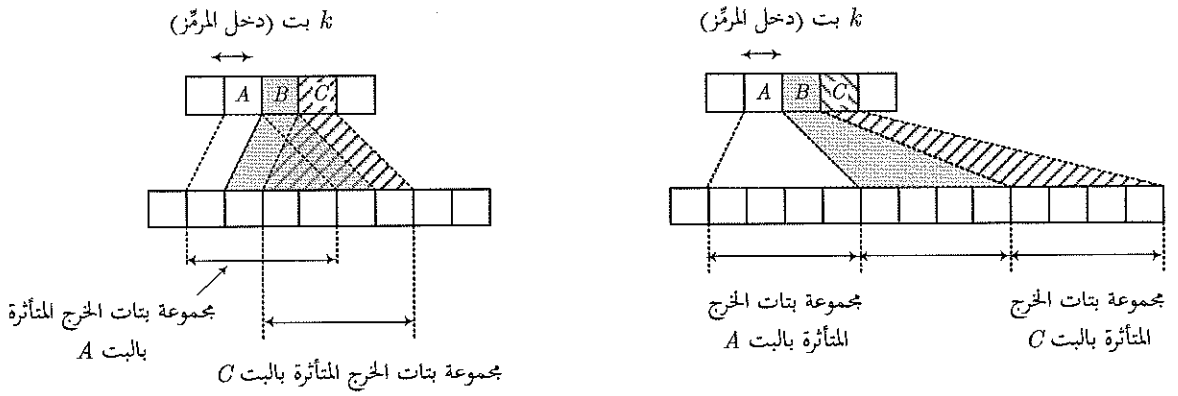
تضاف المعلومات ضمن إجراءات ترميز القناة وفق المبدأ المبين في الشكل ٥-١٧، حيث تُجزَّأُ معلومات الدخل إلى مجموعات متتابعة، يتألف كلٌ منها من k بتاً، وتعرف اصطلاحاً باسم "كلمة" "Word"، في إشارة إلى مشابهة تكوينها من عدة بتات لتكوين الكلمة من عدة حروف. بعد ذلك، يكوّن المرمز لكل كلمةِ دخلٍ كلمةَ خرجٍ مقابلة، تتألف من n بتاً، ويكون الفرق بين طول كلمة الخرج وكلمة الدخل هو عدد بتات الحشو المضافة وفق خوارزمية الترميز. ويقاس مقدار الحشو في المعلومات المرمَّزة بالنسبة $R_c = k/n$، التي تعرف بـ "معدل الترميز" "Coding Rate".

تقود بعض أصناف الترميز إلى كلمات مرمزة يتألف كل منها من حقلين، يشمل الأول المعلومات الأصلية كلها، يليه حقلٌ يضم المعلومات الإضافية. توصف الكلمة المرمزة في هذه الحالة بأنها "كلمة مرمزة متَّسِقة" "Systematic Code Word"، كما يطلق على بتات الحشو أو الفائض اسم "متتالية التدقيق" "Frame Check Sequence (FCS)".

تتباين طرق الترميز الاستباقي من ناحية الخوارزميات المستخدمة لتعديل المعلومات الأصلية، حيث يمكن التمييز بين "الترميز الانفرادي لمجموعات أو كلمات الدخل" (أو اختصاراً: ترميز المجموعات) "Block Coding"، و"ترميز التلاف أو الطي" "Convolutional Coding" (الشكل ٥-١٨). ففي حالة ترميز المجموعات، يجري ترميز سلسلة المعطيات لكل كلمةِ دخلٍ على حدة، كما هو موضح في الجزء (أ) من الشكل ٥-١٨ بافتراض أن الكلمة تتألف من بت واحد. ونقرأ من الشكل أن خرج المرمز في أية لحظة يتأثر أو يرتبط بكلمةِ دخلٍ واحدة فقط، هي دخل المرمز الآني حصراً. على خلاف ذلك، يعتمد مرمز الطي أو التلاف على معلومات الدخل الآنية وعلى سابقاتها أيضاً (الجزء (ب) من الشكل). فكما هو مبيَّن، يرتبط خرج المرمز بالبت الحالي إضافة إلى ثلاثة بتات سابقة. لذا يمكن اعتبار المرمزِ ذا ذاكرة يشار لطولها L بتعبير "أمد التأثير أو الأمد المقيِّد" "Constraint Length"، ويُقصد بالتقييد في هذا السياق أن خرج المرمز يبقى متعلقاً (أي مقيَّداً) بقيم عددٍ مقداره L من كلماتِ الدخل.



الشكل ٥-١٧: المبدأ العام للترميزالاستباقي.



الشكل ٥-١٨: طرق الترميز الاستباقي.

تعرض الفقرات التالية الخطوط العريضة لصنفي الترميز، وغاية العرض هي التعريف بدلالات العلاقات الجبرية التي تستخدمها المواصفات المعيارية لوصف خصائص الترميز المُوصى باتباعه.

٥-٣-١-١ ترميز المجموعات

هناك العديد من آليات الترميز التي تستند إلى مبدأ ترميز المجموعات المنفردة، غير أن ما يهمنا في سياق العرض هو تلك الخوارزميات المستخدمة في نظم الاتصالات الخلوية، والتي يعتمد جُلُّها على مبدأ "تدقيق الفائض الحِلَقي" أو "تدقيق الفائض

الدَّوَّار" "Cyclic Redundancy Check"، الذي يعتبر من أوسع طرق كشف الخطأ شيوعاً، وأكثرها فعالية، وتستند هذه الآلية من حيث المبدأ إلى الشكل ٥-١٧، غير أنها تتميز بأن إجراء الترميز يقود إلى كلماتٍ مرمَّزة "حِلَقيَّة" البنية، أي أن إزاحة أية كلمة مرمَّزة بمقدار بت واحد، تقود إلى كلمةٍ مرمَّزة أخرى، وهذه هي العلة في اختيار تعبير "Cyclic" للدلالة عليها[١].
هذا ويُشار إلى نمط مرمِّز المجموعات عادةً بالرمز (n,k)، حيث يدل k على عدد البتات ضمن كل مجموعةِ دخلٍ، و n على عدد بتات الكلمة المرمَّزة.

يكمن جوهر عملية الترميز إذن في اختيار متتالية التدقيق (FCS) على نحو مناسب، بحيث يقود إجراء الترميز إلى كلمات ذات بُنىً رياضية تتيح كشف وتصحيح الأخطاء. ويَسْهُلُ تتبع خطوات أو إجراءات الترميز إذا مُثِّلت متتاليات المعلومات عند كلٍّ من دخل وخرج المرمِّز بكثيرات حدودٍ لمتغير اعتباري أو افتراضي ندل عليه بـ X، بحيث يُعَبَّرُ عن ترتيب كل بت بأُسِّ المتغير، كما يُعبَّرُ عن قيمته الاثنانية بثابتٍ يُضرب بالحد الموافق لترتيبه ضمن كثير الحدود. وهذا التمثيل يتيح ربط خطوات الترميز بعمليات حسابية جبرية كما سنبين لاحقاً. ننوه أيضاً إلى أننا سنستخدم كلاً من الرمزين $x[i]$ و x_i بنفس المعنى، أي للدلالة على البت أو الخانة رقم i ضمن المتتالية $x = \{\cdots, x_{i-1}, x_i, x_{i+1}\cdots\}$.

إذا دللنا على الكلمة المُرمزة بـ $c = \{c_0, c_1, \cdots, c_{n-1}\}$، بحيث تمثل c_i قيمة الخانة ذات الترتيب i، فإن كثير الحدود الذي يمثل هذه الكلمة يكون من الدرجة $n-1$ ويوافق:

$$c(X) = c_0 + c_1 X^1 + c_2 X^2 + \cdots + c_{n-1} X^{n-1} \qquad (٢٠-٥)$$

يمكن على النحو نفسه تمثيل كلمة الدخل $m = \{m_0, m_1, \cdots, m_{k-1}\}$ بكثير الحدود التالي:

$$m(X) = m_0 + m_1 X^1 + m_2 X^2 + \cdots + m_{k-1} X^{k-1} \qquad (٢١-٥)$$

من الممكن البرهان على أن تغيير متتالية الدخل الذي ينشأ عن أي ترميز حلقي يمكن أن يوصف جبرياً بالعلاقة ([١] و [١٤] و [٢٧]):

$$c(X) = m(X)\, g(X) \qquad (٢٢-٥)$$

حيث يدل $g(X)$ على كثير حدودٍ يعرف باسم "دالة توليد الترميز" "Generator Polynomial"، ويتميز بالخصائص التالية:

١) درجة $g(X)$ لأي مرمّز بنمط (n,k) هي $n-k$، أي:

$$g(X) = g_0 + g_1 X^1 + g_2 X^2 + \cdots + g_{n-k} X^{n-k} \qquad (٢٣-٥)$$

[١] من أنواع ترميز المجموعات أيضاً ترميز Hamming، وترميز Reed-Solomon، وترميز Golay، وكلها معروفة بأسماء مبتكريها.

٢) كل المعاملات g_i ذات قيم اثنانية ("0" أو "1")، غير أن أيّاً من الحدين g_0 و g_{n-k} (الأول والأخير) لا يساوي صفراً، أي أن $g_0 = g_{n-k} = 1$. هذا يعني أن العلاقة السابقة تساوي دائماً:

$$g(X) = 1 + \sum_{i=1}^{n-k-1} g_i X^i + X^{n-k} \qquad (٢٤-٥)$$

٣) لا تمثل أية متتالية مؤلفة من n بتاً كلمة مرمَّزة صالحة إلا إذا كان كثير الحدود الممثل لها $c(X)$ قابلاً للقسمة على $g(X)$ دون أي باق، أي بدون أية حدود عدا حاصل القسمة.

٤) من الممكن الحصول على الكلمة المرمَّزة c وفق البنية المتَّسِقة، أي بشغل الخانات الأعلى رتبةً بمتتالية الدخل m (انظر الشكل ٥-١٧) وفقاً للخطوات التالية، التي تُنجز وفق المقاس الإثناني (Modulo 2) (انظر اشتقاق هذه الخطوات والبرهان عليها في [١٣] و[١٤]):

٤-١) يضرب كثير الحدود $m(X)$ بالحد X^{n-k}.

٤-٢) تجري بعد ذلك قسمة ناتج الضرب من الخطوة الأولى على دالة الترميز $g(X)$، وهذا يقود إلى باقي القسمة $R(X)$ وفق العلاقة:

$$\frac{X^{n-k} m(X)}{g(X)} = q(X) + \frac{R(X)}{g(X)} \qquad (٢٥-٥)$$

يمثِّل حاصل القسمة $q(X)$ كثيرَ حدودٍ لا تتجاوز درجته $k-1$، كما يمثل باقي القسمة $R(X)$ كثيرَ حدودٍ لا تتجاوز درجته $n-k-1$.

٤-٣) يُهمل حاصل القسمة $q(X)$، ثم يُجمع باقي القسمة $R(X)$ إلى كثير الحدود $m(X)$ (بعد الإزاحة)، وهذا يقود إلى $c(X)$، أي:

$$c(X) = R(X) + X^{n-k} m(X) \qquad (٢٦-٥)$$

هذا ونكرر التنويه إلى أن كل إجراءات الجمع والضرب والقسمة تُنجز وفق المقاس الإثناني (Modulo 2).

تبين الخطوات السابقة أن تحديد متتالية التدقيق FCS يتلخص عملياً في إجراء قسمة كثير الحدود الممثل للمعلومات، بعد إزاحته بـ $n-k$ من الخانات، على كثير الحدود $g(X)$، الذي يكون معروفاً ومحدداً مسبقاً.

لتوضيح ذلك نفترض وجود مرمِّزٍ من النمط $(12, 8)$، وأن مجموعة الدخل المكونة من ثمانية خانات أو بتات هي "11100110". يقود ذلك إلى كثير حدودٍ من الدرجة $k-1 = 7$، هو:

$$m(X) = X + X^2 + X^5 + X^6 + X^7 \qquad (٢٧-٥)$$

لنفترض أيضاً أن $g(X)$ معطى بالعلاقة:

$$g(X) = 1 + X^3 + X^4 \qquad (٢٨-٥)$$

عند إجراء الخطوة الأولى والثانية وفق ما ذُكِر أعلاه نحصل على:

$$\begin{aligned} \frac{X^4 m(X)}{g(X)} &= \frac{X^5 + X^6 + X^9 + X^{10} + X^{11}}{1 + X^3 + X^4} \\ &= (X + X^2 + X^4 + X^5 + X^7) + \frac{X + X^2}{1 + X^3 + X^4} \end{aligned} \qquad (٢٩-٥)$$

نقرأ من هذه المعادلة أن:

$$R(X) = X + X^2 \qquad (٣٠-٥)$$

وبما أن عدد البتات التي يجب إضافتها هو 4، ولِعِلْمنا بأن $R(x)$ من الدرجة $n - k - 1$ (أي الثالثة)، يمكن بسهولة استنباط بتات الحشو، ما يقود إلى FCS = 0110. بذلك نحصل على الكلمة المرمَّزة وهي "111001100110".

بعد إرسال الكلمة المرمَّزَة إلى المستقبل، يجري كشف الخطأ بقسمة الكلمة المرمزة على $g(X)$، المعروف -كما ذكرنا- لدى المستقبل أيضاً، فإذا جرى الإرسال دون خطأ، كان باقي القسمة صفراً، وإلا دلَّ وجود باقٍ على حدوث خطأ أثناء الإرسال، ويجري تحديد موضع الخطأ ضمن الكلمة المرمزة وفقاً لخوارزميات جبرية محددة، يمكن الرجوع إليها في [١] و[١٣] و[١٤].

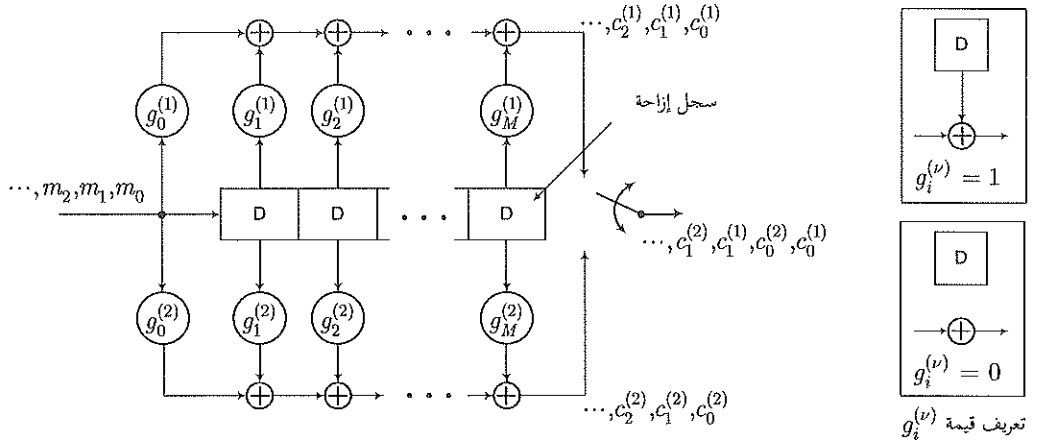
٥-٣-١-٢ ترميز الطي

ينحو ترميز الطي منحىً مختلفاً من ناحية آلية اشتقاق الكلمات المرمزة، ويمكن تلخيص مبادئ هذه الآلية استناداً إلى الشكل٥-١٩، الذي يوضح البنية النموذجية لمرمِّز الطي. يُشار إلى هذه البنية بنمط المرمِّز (n, k, L)، الذي يشمل الموسطات التالية:

١) عدد المداخل k، ويغلب ضمن استخدامات الاتصالات الخلوية أن يكون مرمز الطي ذا مدخلٍ واحدٍ فقط.

٢) عدد المخارج n، حيث يكون المرمز في الغالب ذا مخرجين، غير أن هناك حالات ترميزٍ يصل فيها عدد المخارج إلى خمسة.

٣) أمد التأثير أو الأمد المقيِّد L، وهو –كما أسلفنا– عدد البتات التي تؤثر على قيمة البت الآنية عند كل مخرج، ويرتبط أمد التأثير بعدد سجلات الإزاحة M بالعلاقة $L = M + 1$.



الشكل٥-١٩:البنية النموذجية لمرمز الطي.

نقرأ من الشكل٥-١٩ أن القيمة الآنية لإشارة كلٍّ من المخرجين، والتي نشير إليها بـ $c^{(\nu)}[i]$ (أو اختصاراً بـ $c_i^{(\nu)}$ كما في الشكل)، تنتج عن جمع القيمة الآنية لإشارة الدخل $m[i]$، إلى قيم الدخل السابقة، وذلك باستخدام معامل ترجيحٍ لكل قيمة ندل عليه بـ$g_i^{(\nu)}$. وكما يبين الجزء الأيمن من الشكل، يدل كلٌّ من معاملات الترجيح على وجود (أو عدم وجود) ربطٍ بين سجل الإزاحة i وبين دارة الجمع في المخرج ν، لذا تكون قيم هذه المعاملات إثنانية. فعلى سبيل المثال، تكون قيمة المعامل $g_3^{(2)}$ تساوي "1"، إذا كانت قيمة البت في سجل الإزاحة رقم 3 ضمن القيم التي تصوغ قيمة البت عند المخرج 2، وإلا فإن هذه القيمة تكون "0". هذا وندل على معاملات الترجيح عند كل مخرج بالمتتالية $g^{(\nu)} = \{g_0^{(\nu)}, g_1^{(\nu)}, \ldots\}$.

يتيح ما سبق كتابة القيمة الآنية لكلٍّ مخرج بالعلاقة:

$$c_i^{(\nu)} = c^{(\nu)}[i] = g_i^{(\nu)}\, m[i] + g_{i-1}^{(\nu)}\, m[i-1] + \cdots + g_M^{(\nu)}\, m[i-M] \qquad (٣١-٥)$$

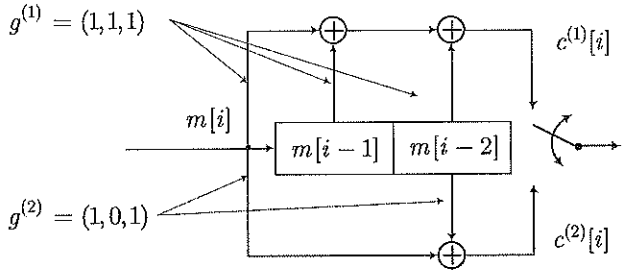
من الممكن تمثيل إجراءات ترميز الطي بطرق وأساليب مختلفة، إلا أننا نقتصر في ما يلي على طريقة التمثيل المفضلة من قبل مهندسي الاتصالات، والمتداولة في المواصفات المعيارية. ولتبسيط العرض الرياضي، نتابع النقاش استناداً إلى المرمز في الشكل٥-٢٠، ذي النمط $(2,1,3)$، والذي تقود بنيته إلى معاملات الترجيح $g^{(1)} = \{1,1,1\}$ و $g^{(2)} = \{1,0,1\}$.

نقرأ من الشكل وجود مخرجين للمرمز ومدخلٍ واحد، أي أن معدل الترميز هو $R_c = 1/2$. كذلك يشمل المرمز سِجِلَّيْ إزاحة بسعة بت واحد لكل منهما، ما يقود إلى أمد التأثير $L = M + 1 = 3$. ننوه في هذا الموضع إلى أن بعض المصادر تأخذ بعين الاعتبار وجود مخرجين للمرمز، وتدل لذلك على أمد التأثير بـ $L = n(M+1)$.

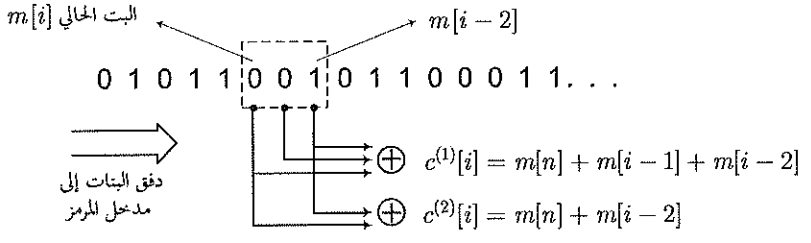
تبين بنية المرمز أيضاً أن معاملات الترجيح تُعطى بالمتتاليتين $g^{(1)} = \{1,1,1\}$ و $g^{(2)} = \{1,0,1\}$، حيث تمثِّل قيمةُ المخرج الأعلى $c^{(1)}[i]$ مجموع كلٍّ من قيمة البت الحالي $m[i]$، وقيمة البت السابق $m[i-1]$، أي المؤخّر بمدة بت واحد، وقيمة البت السابق بخانتين $m[i-2]$. أما قيمة المخرج الأدنى $c^{(2)}[i]$، فتساوي قيمة البت الحالي $m[i]$، مجموعاً إليها قيمة البت السابق بخانتين $m[i-2]$. لذا تُعطى علاقة المخرج بالمدخل -باستخدام المقاس الإثناني- بالمعادلة:

$$\begin{aligned} c^{(1)}[i] &= m[i] + m[i-1] + m[i-2] \\ c^{(2)}[i] &= m[i] + m[i-2] \end{aligned} \qquad (٣٢-٥)$$

يؤكد الجزء الأدنى من الشكل٥-٢٠ أيضاً على أن إجراء الترميز يؤثر على دفق البتات المتعاقبة، وليس على مجموعات منفصلة من البتات، ويبين أن إزاحة سلسلة المعلومات لبت واحد تؤدي إلى تغييرٍ ضمن "نافذة المعطيات" التي يعتمد عليها المرمز لحساب إشارتي الخرج.



(أ)



(ب)

الشكل٥-٢٠: مرمز طي بسيط. (أ) بنية المرمز، (ب) توضيح لعلاقة بتات الخرج مع بت الدخل.

تُوضح المعادلة السابقة كيفية جمع عينة المتتالية الحالية مع سابقاتها للحصول على إشارة الخرج، غير أننا ما زلنا بحاجة إلى علاقة أكثر شمولاً، تمثل تابع نقل للمرمِّز، وتتضمن جميع خصائصه.

للحصول على مثل هذه العلاقة نفترض أن متتالية المعلومات عند مدخل هذا المرمز تتكون من بت وحيد بقيمة "1"، يقود هذا البت بعد المرور بسجلات الإزاحة، مع مراعاة أن القيمة الاستهلالية أو الابتدائية لكل سجل تكون صفراً، إلى المتتالية

$c^{(1)} = \{1,1,1\}$ عند المخرج الأول (الأعلى في الشكل)، وإلى المتتالية $c^{(2)} = \{1,0,1\}$ عند المخرج الثاني. وعند مقارنة كلٍّ من $c^{(1)}$ بـ $g^{(1)}$، و $c^{(2)}$ بـ $g^{(2)}$، نجد تطابقاً تاماً، ما يعني أن $g^{(1)}$، و $g^{(2)}$ تمثلان في هذه الحالة -أي عند اقتصار متتالية الدخل على بت واحد فقط- الاستجابة النبضية (Impulse Response) لكلٍّ من مخرجي المرمز.

من جانب آخر، يمكن كتابة العلاقة (٥-٣٢) على النحو التالي:

$$\begin{aligned} c^{(1)}[i] &= g_0^{(1)}\, m[i] + g_1^{(1)}\, m[i-1] + g_2^{(1)}\, m[i-2] = \sum_{j=0}^{2} g_i^{(1)}\, m[i-j] \\ c^{(2)}[i] &= g_0^{(2)}\, m[i] + g_2^{(1)}\, m[i-1] + g_2^{(2)}\, m[i-2] = \sum_{j=0}^{2} g_i^{(2)}\, m[i-j] \end{aligned} \qquad (٥-٣٣)$$

وتعميم هذه العلاقة، مع مراعاة (٥-٣١)، يقود إلى علاقة شاملة، تربط بين $c_i^{(\nu)}$ و $m[i]$ و $g_i^{(\nu)}$:

$$c^{(\nu)}[i] = \sum_{j=0}^{M} g_i^{(\nu)}\, m[i-j] \qquad (٥-٣٤)$$

تمثل هذه المعادلة علاقة "تلاف" أو "طي" "Convolution" بين المتتالية $g^{(\nu)}$ (الاستجابة النبضية للمرمز) ومتتالية الدخل، وهذه هي العلة في اختيار اسم "ترميز التلاف او الطي" للدلالة على آلية عمل هذا النوع من المرمزات.

لتسهل المعالجة الجبرية لآليات الترميز، نتبع نفس الطريقة التي استخدمناها في حالة ترميز المجموعات، وهي تمثيل متتاليات الدخل والخرج بكثيرات حدودٍ للمتغير X، على غرار المعدلات (٥-٢٠) و (٥-٢١). وبما أن المتتاليتين $g^{(1)}$ و $g^{(2)}$ كافيتان لتحديد خرج أي متتالية دخلٍ وفق العلاقة (٥-٣٣)، فإن كثير الحدود الذي يمثلها يطلق عليه أيضاً اسم "دالة توليد الترميز". هذا ومن الممكن أن يُؤوَّل التمثيل بكثيرات الحدود على أنه تحويلٌ "Transformation" من المجال الزمني إلى مجال المتغير X. ونظراً لأن علاقات التلاف في المجال الزمني تقود إلى علاقات ضربٍ أو جداءٍ في مجالِ "متغيرِ التحويل"، فإن ذلك يقود إلى المعادلة:

$$c^{(\nu)}(X) = g^{(\nu)}(X)\, m(X) \qquad (٥-٣٥)$$

التي تتيح طريقة تمثيلٍ مشابهة لتلك التي اعتمدناها في حالة ترميز CRC، مع اختلافٍ وحيد، وهو أن درجة كثير الحدود تتحدد بعدد سجلات الإزاحة. ففي حالة المثال السابق تُعطى دالتا توليدِ الترميز بالعلاقة:

$$\begin{aligned} g^{(1)}(X) &= 1 + X + X^2 \\ g^{(2)}(X) &= 1 + X^2 \end{aligned} \qquad (٥-٣٦)$$

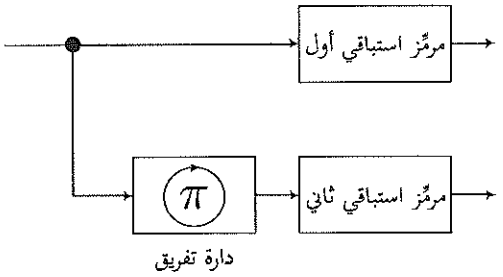
ولا ننسى أن نشير مرة أخرى إلى أن كل العمليات الجبرية في المعادلات السابقة تجري بدلالة المقاس الإثنائي (Modulo 2).

لقد كان الهدف الأساسي من البحثين التمهيديين عن طرق الترميز تعريف القارئ بدلالات المعادلات (٥-٢٢) و (٥-٢٣) لترميز المجموعات، و(٥-٣٥) و (٥-٣٦) لترميز الطي، إذ تَستخدم المواصفات المعيارية هذه العلاقات الجبرية للدلالة على أنماط الترميز الواجب اتباعها، والتي سنشرح أمثلةً عنها في فقرات لاحقة.

٥-٣-٢ ترميز Turbo

إضافةً إلى صِنفَي الترميز الاستباقي الأساسيين، ابتكر فريق من الباحثين في عام ١٩٩٣ صنفاً هجيناً، يعتمد استخدام أكثر من تقنية ترميزٍ على نحوٍ متعاقبٍ أو متتالي، ما يتيح إنجاز الترميز بفعالية أكبر، ويقود إلى معدل دفقٍ يقارب كثيراً الحد الأعظم لسعة القناة C، المعرَّف بقانون شانون-هارتلي ([٢٤]). أُطلق على هذا الأسلوب من الترميز اسم "ترميز توربو" "Turbo Coding"، وسنلتزم في ما يلي بهذا الإسم عوضاً عن أي مقابل باللغة العربية، لخصوصية التعبير المستخدم. فرغم أن كلمة Turbo تستند في جذرها إلى الكلمة اليونانية "خلطٍ أو تركيب"، إلا أن استخدام أي مصطلحٍ بديل، مثل "الترميز المركب" أو "الترميز فائق الفعالية"، لن يشمل دلالات التعبير الأصلي.

يتكون مرمز Turbo – من ناحية المبدأ- من مرمزين اثنين، موصولين على التوازي، ومفصولين بدارة تفريق (الشكل ٥-٢١). من الممكن لكلٍّ من المرمِّزين أن يمثل أياً من مرمزات التصحيح الاستباقي المعروفة، أما دارة التفريق فتقود إلى مرور المعلومات الأصلية عبر المرمز الأدنى بترتيبٍ مختلف (انظر البحث ٥-٤ للتفاصيل)، ما يزيد من حصانة الترميز من أخطاء البت التي تكون مجتمعة ومتابعة ضمن الدفق الرزمي وتقود إلى ما يعرف بالأخطاء الجماعية أو الرزمية (سنناقشها لاحقاً). ويلقى هذا الصنف من الترميز اهتماماً متزايداً، ويُستخدم في نظام UMTS منذ إصداره الأساسي أو الأولي.



الشكل ٥-٢١: مبدأ ترميز توربو.

٥-٣-٣ أمثلة على آليات ترميز القناة في نظام GSM

تعتمد إجراءات ترميز القناة في نظام GSM مزيجاً من آليَّتي ترميز المجموعات وترميز الطي، وذلك تبعاً لطبيعة القناة الاعتبارية ولأهميتها من ناحية التحكم بمُجريات الاتصال. ولما كان من المتعذر ذكر آليات الترميز لكل قناة، نكتفي بعرض بعض الأمثلة، ونحيل القارئ إلى [١٨] و [٢٠] للتفاصيل المتعلقة بجميع القنوات.

٥-٣-٣-١ ترميز القناة الخاص بالإشارة الكلامية ذات المعدل الكامل

تتفاوت البتات الممثلة للمقتطع الكلامي الناتج عن إجراء ترميز المنبع في أهميتها وتأثيرها على جودة الكلام، حيث بينت اختبارات كثيرة أن أي خطأ يصيب بعض هذه البتات يجعل الكلام مبهماً، بينما يبقى الكلام مفهوماً عند إصابة بعضها الآخر بعوارض التشويش. لذا تصنّف المواصفات المعيارية هذه البتات ضمن ثلاث فئات، أهمها الفئة المسماة "Class 1a"، والمكونة من 50 بتاً، تتلوها الفئة "Class 1b"، التي تشمل 132 بتاً، أما البتات المتبقية، وعددها 78 بتاً، فهي الأقل أهميةً، وتُدرج ضمن الفئة "Class 2". تتجلى أهمية الفئة الأولى في حقيقةِ أنه إذا اكتُشف المستقبل أي خطأ ضمنها، فإنه يتجاهل المقتطع الكلامي كله، ويجري توليد الإشارة الكلامية الممثلة لهذا المقتطع (20 ms) باستخدام تقنيات "استيفاء" "Interpolation" خاصة ومتقدمة استناداً إلى المقتطعات الكلامية المجاورة.

نظراً لهذا التباين في الأهمية، يجري ترميز الفئات الثلاثة بآليات مختلفة وفقاً لما يوضحه الشكل ٥-٢٢ والشكل ٥-٢٣، حيث يُلخص الشكل ٥-٢٢ مجمل خطوات الترميز، بينما يُعطي الشكل ٥-٢٣ بعض التفاصيل المتعلقة بترتيب البتات بعد كلّ خطوة.

تتلخص الخطوات في ما يلي:

١) تخضع الفئة الأهم (Class 1a)، والتي تشمل البتات $\{d_0,\cdots,d_{49}\}$ لترميز مجموعات، يقود إلى إضافة ثلاثة بتات كمتتالية تدقيق (FCS). ويُستخدم لتحقيق ذلك كثير الحدود التالي [١٨]:

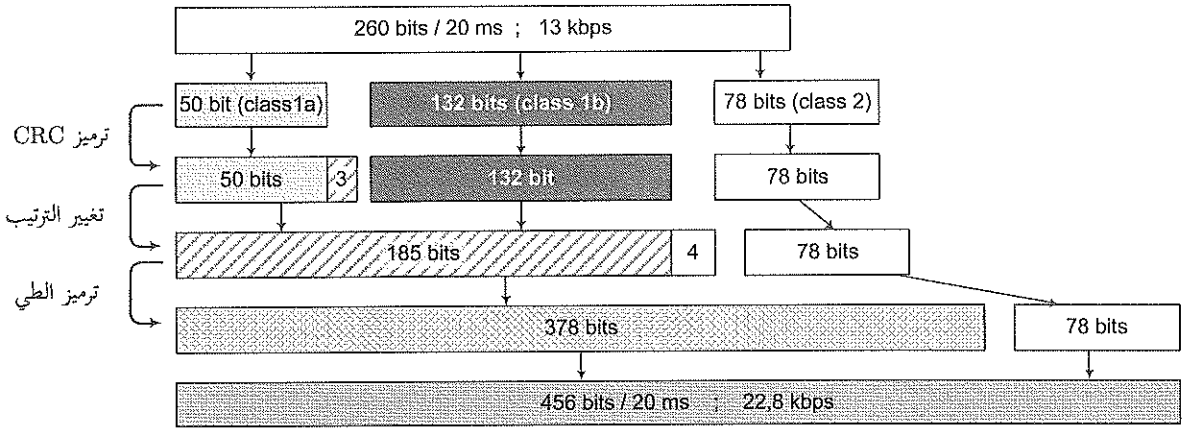
$$g_{CRC}(X)=1+X+X^3 \qquad (٣٧-٥)$$

تُعرف هذه البتات باسم "بتات التكافؤ" "Parity Bits" ويُرمز لها في الشكل ٥-٢٣ بـ $\{p_0,p_1,p_2\}$.

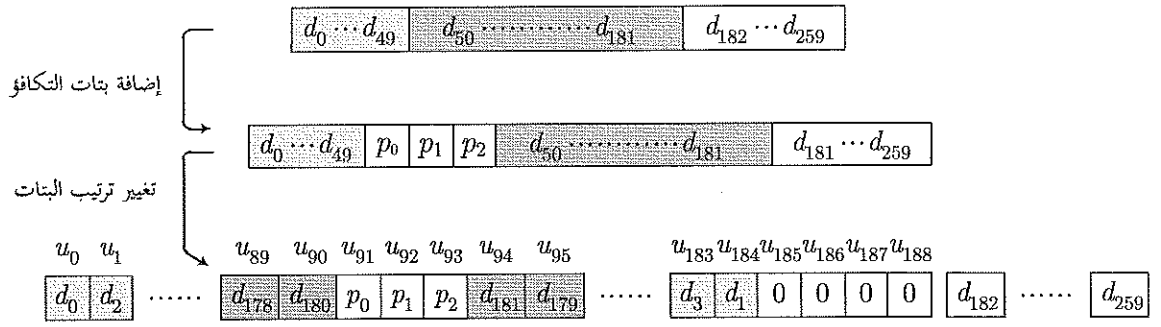
٢) بعد ذلك تُضاف إلى ناتج الخطوة الأولى بتاتُ الفئة الثانية (Class 1b)، مع "حاشية" "Tail Bits" لها تشمل 4 بتات بقيمة "0". يقود ذلك إلى متتالية مؤلفة من 189 بتاً ($[50+3]+[132+4]$)، نشير إليها بـ u_k، حيث $k=1,\cdots,189$.

٣) يجري بعد ذلك تغييرٌ في ترتيب البتات وفق العلاقة (٥-٣٨) المبينة لاحقاً، حيث يؤدي ذلك إلى جعل البتات ذات الترتيب الزوجي $\{d_0,d_2,\cdots,d_{180}\}$ في بداية المجموعة، والبتات ذات الترتيب الفردي $\{d_{181},d_{179},\cdots,d_1\}$ (بعد عكس تسلسلها) في نهايتها، تعقبها بتات الحاشية الأربعة $\{d_{185},\cdots,d_{188}\}$. أما بتات التكافؤ الثلاثة $\{p_0,p_1,p_2\}$ فتُحشر في وسط المجموعة، كما هو مبين في الشكل ٥-٢٣.

$$\begin{aligned} u_k &= d_{2k}, && k=0,1,\cdots,90,\\ u_{184-k} &= d_{2k+1}, && k=0,1,\cdots,90,\\ u_k &= 0, && k=185,186,187,188, \end{aligned} \qquad (٣٨-٥)$$



الشكل ٥-٢٢: الخطوات الأساسية لترميز قناة الإشارة الكلامية في نظام GSM.



الشكل ٥-٢٣: تغيير ترتيب البتات قبل خطوة ترميز الطي.

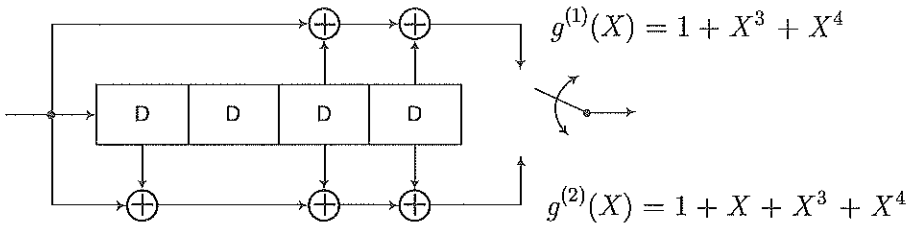
٤) تخضع المجموعة بالترتيب الذي ذكرناه لترميز طيٍّ بمعدل $R_c = 1/2$، وذلك باستخدام دارة الترميز التي يوضحها الشكل ٥-٢٤، والتي تكافئ جبرياً كثيري الحدود التاليين:

$$\begin{aligned} g^{(1)}(X) &= 1 + X^3 + X^4 \\ g^{(2)}(X) &= 1 + X + X^3 + X^4 \end{aligned} \qquad (٣٩-٥)$$

وينتج عن هذا الإجراء مجموعة مضاعفة من البتات عددها $(189 \times 2 = 378)$ بتاً.

٥) تضاف إلى هذه المجموعة الفئة الثالثة من المعلومات الأصلية (Class 2)، والمؤلفة من 78 بتاً، ما يقود إلى مجموعة نهائية مؤلفة من 456 بتاً.

نلحظ من الخطوات السابقة أن أهم البتات (فئة Class 1a) تخضع لترميز مجموعات ثم لترميز طي، بينما تخضع الفئة التي تليها في الأهمية (فئة Class 1b) لترميز طي فقط، أما البتات المتبقية، فلا تخضع لأي ترميز.



الشكل ٥-٢٤: مرمز الطي المستخدم في حالة ترميز الإشارة الكلامية في نظام GSM.

نخلص مما سبق أيضاً إلى أن كل مقتطع كلامي يمثَّل بعد خطوة ترميز القناة بـ 456 بتاً، ما يوافق معدل دفقٍ مقداره 22.8 kbps. يُعرف هذا المعدل اصطلاحاً باسم "معدل الدفق الإجمالي" "Gross Bit Rate"، لتمييزه عن معدل المعلومات بعد خطوة ترميز المنبع، المعروف باسم "معدل الدفق الصافي" "Net Bit Rate". ويُمثل الفرق بين المعدلين مقدار المعلومات الفائضة التي تُضيفها خطوة ترميز القناة إلى الإشارة المطلوب نقلها (196 بتاً لكل 20 ms في المثال الحالي).

٥-٣-٣-٢ ترميز القناة في حالة معدلات النقل المتعددة بتقنية AMR

عرضنا في بحثٍ سابق لأهم ملامح تقنية الترميز المتكيف AMR، ونبين في هذا الموضع أن أسلوب ترميز القناة له دور مهم في المرونة التي تتيحها هذه التقنية.

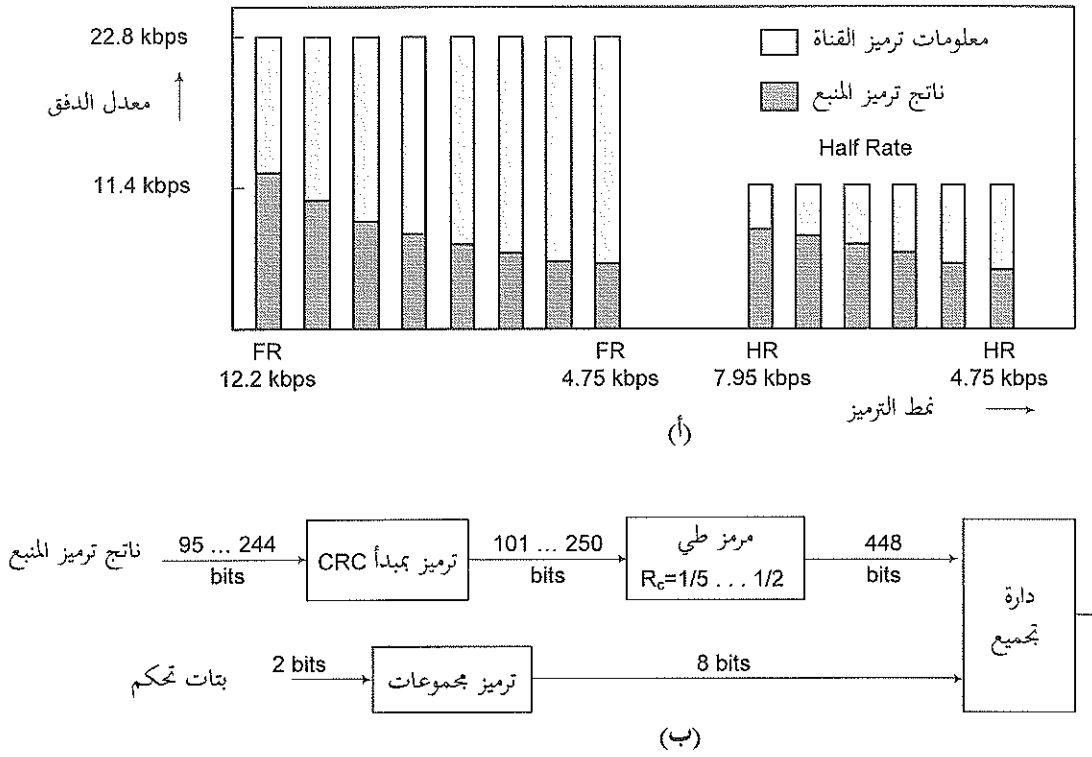
تتطلب خطوات معالجة الإشارة التي تتلو ترميز القناة معدلَ دفقٍ إجماليٍّ محدد، مقداره 22.8 kbps للإشارة ذات المعدل الكامل، و11.4 kbps للنقل بالمعدل النصفي. وهذا يحدد قيمة عظمى ثابتة لعدد البتات الممثلة لـ 20 ms، وهي 456 بتاً أو 228 بتاً. لذا، يجب أن يكون مجموع بتات المعلومات الأساسية (الناتجة عن ترميز المنبع) والبتات التي تُضاف كحشوٍ ضمن إجراءات ترميز القناة ثابتاً، أي أن ترميز المنبع وترميز القناة يتقاسمان عدد البتات المتاح.

يوضح الجزء (أ) من الشكل ٥-٢٥ هذا المفهوم، حيث يبين توزع أو "تقاسم" البتات في حالة كلٍّ من أنماط الترميز المختلفة التي تعرفها المواصفات المعيارية، وهي ثمانية للنقل بالمعدل الكامل، وستة للنقل بالمعدل النصفي. ويؤكد الشكل على أن المرونة في اختيار نمط ترميز المنبع، تكون على حساب الحصانة التي يُضيفها ترميز القناة على المعلومات.

يعطي الجدول ٥-٢ بعض التفاصيل الإضافية المتعلقة بأنماط الترميز بالمعدل الكامل. وأهم ما يبرزه هذا الجدول هو معدل ترميز التلاف المستخدم في حالة معدلات ترميز المنبع المنخفضة، والذي يصل إلى 1/5، ما يدل بوضوح أن المعلومات بهذه المعدلات تحظى بحصانة كبيرة جداً.

بعد هذا البيان يمكن استنباط بعض الفوائد التي يتيحها استخدام تقنية الترميز المتكيف، ومن أهمها:

١) عندما تتحسن ظروف انتشار الإشارة، تقل الحاجة إلى التحصين، وهذا يقود النظام إلى اختيار نمطٍ ترميز ذي معدل ضغط منخفض، ما يعني أن نوعية الإشارة الكلامية تتحسن أيضاً. ولولا هذه المرونة، لوجب على النظام الحفاظ على الترميز الذي يوفر حصانة قصوى للمعلومات.



الشكل ٥-٢٥: ترميز القناة المتكيف (تقنية AMR).

	معدل التدفق عند مدخل مرمز القناة (kbps)							
اسم الموسط	4.75	5.15	5.9	6.7	7.4	7.95	10.2	12.2
عدد البتات ضمن المقطع الكلامي	95	103	118	134	184	159	204	244
عدد البتات من فئة "Class 1a"	39	49	55	55	61	75	65	81
عدد البتات من فئة "Class 1b"	56	54	63	79	87	84	139	163
معدل ترميز مرمّز الطي	1/5	1/5	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2
عدد البتات عند مخرج مرمز الطي	535	565	520	576	474	513	642	508
البتات المُستثناة (بعد ترميز الطي)	87	117	72	128	26	65	194	60
بتات التحكم (مع ترميزها)	8	8	8	8	8	8	8	8
عدد البتات النهائي	456	456	456	456	456	456	456	456

الجدول ٥-٢: تفاصيل ترميز القناة لأنماط النقل بالمعدل الكامل وفق تقنية AMR.

٢) تتيح تقنية AMR إنجاز تخطيط الشبكة باعتماد قيمٍ متدنية لجودة القناة، فكما يبين الجدول ٥-٢، يكون تحصين الإشارة في حالة معدلات النقل المنخفضة مُحكماً ويعتمد على درجات ترميز مرتفعة. لذا، من الممكن لمهندس التخطيط أن يعتمد على إمكانيات النظام المتقدمة لكشف وتصحيح أخطاء النقل ضمن ظروف انتشار سيئة. وإنجاز التخطيط على هذا النحو له أبعاد اقتصادية مهمة، إذ يقود إلى خفض عدد المحطات، وزيادة سعة الشبكة بالموارد المتاحة.

٥-٣-٣-٣ ترميز القناة الخاصة بنقل المعطيات بمعدل 9.6 kbps

يوفر نظام GSM عدة قنوات اعتبارية تتيح نقل المعطيات (Data) بمعدلات نقل مختلفة، تتراوح بين 2,4 kbps و 9.6 kbps (انظر الفصل ٤). وخلافاً للمقتطعات المجتزأة من إشارة كلامية، لا يمكن -في حالة دفق المعطيات- تحديد أهمية مميزة لبعض البتات دون غيرها، لذا، لا يمكن تطبيق "ترميز القناة" على النحو الذي شرحناه في ما سبق، بل يجب ترميز وتحصين بتات الدفق كلها بنفس الدرجة. هذا ويجدر التنويه إلى أننا تقنية التوجيه المستخدمة لنقل المعطيات في نظام GSM التقليدي هي "تبديل الدارات" وليس "تبديل الرزم".

كمثالٍ على آلية الترميز لقنوات نقل المعطيات، نعرض في ما يلي لخطوات الترميز الخاص بمعدل النقل 9.6 kbps، وأهمها:

١) تستقبل دارة الإرسال دفق المعلومات بمعدل لا يتجاوز 9.6 kbps، وتجري بدايةً إضافة بعض بتات التحكم، وذلك وفقاً لمواصفات معيارٍ خاص صادر عن الاتحاد العالمي للإتصالات، يُعرف باسم ITU-T v.110، ويحكُمُ بنية المعطيات المتبادلة مع الأجهزة الطرفية، مثل جهاز الفاكس "Fax Machine" وآلات الطباعة الرقمية "Digital Printer"، التي صُمِّم نظام GSM لتبادل المعلومات معها أيضاً.

تؤدي هذه الإضافة إلى دفقٍ جديد بمعدل 12 kbps، تُجزَّأ المعطيات بعد ذلك وترسل إلى المرمز في صيغة مجموعات، يتألف كلٌ منها من 60 بتاً تمثل 5 ms.

٢) يجمَع المرمز أربع مجموعات معطياتٍ متتالية، تكوِّن 240 بتاً وتكافئ 20 ms، ندل عليها بـ $\{d_0, d_1, \cdots, d_{239}\}$، ثم تضاف حاشية مؤلفة من 4 بتات بقيمة "0". يقود ذلك إلى مجموعة مؤلفة من 244 بتاً، تخضع لترميز طيٍّ بمعدل $R_C = 1/2$، وباستخدام كثيري الحدود المعرَّفين بالعلاقة (٥-٣٩).

٣) ينتج عن الخطوة السابقة مجموعة مرمَّزة مؤلفة من 488 بتاً $\{c_0, c_1, \cdots, c_{478}\}$، يجري استثناء أو محوُ بعض البتات منها، وذلك بهدف ملاءمة معدل النقل لخطوات لاحقة ضمن سلسلة معالجة الإشارة.

يبلغ عدد البتات التي تُستثنى من المجموعة 32 بتاً، ويعرف هذا الإجراء باسم "استثناء" "Puncturing"، وقد اخترنا تعبير "استثناء" للدلالة عليه، لأن الترجمة الحرفية للمصطلح الانكليزي هي "تثقيب" ولا تدل على المقصود منه.

يُنجز الاستثناء وفقاً للقاعدة التالية:

$$c_{deleted} = c(11 + 15j) \quad , \quad j = 0, \cdots, 31 \qquad (٥-٤٠)$$

أي أن البتات التي تُستثنى أو تُمحى من المجموعة هي $\{c_{11}, c_{26}, c_{41}, \cdots\}$. وهذه البتات تُعامَلُ كأخطاء في فاكّ الترميز ضمن دارات المستقبل، وذلك في سياق إجراءات خوارزمية Viterbi.

تقود الخطوات السابقة إلى مجموعة مؤلفة من 456 بتاً، تمثل مدة زمنية مقدارها 20 ms، وهذا يطابق تماماً ناتج ترميز القناة في حالة الإشارة الكلامية. أي أن معدل الدفق يرتفع من معدل صافٍ بمقدار 9.6 kbps إلى معدل إجمالي مقداره 22,8 kbps.

٥-٣-٣-٤ ترميز القناة الخاص بقناة SACCH

تختلف درجة الترميز وتعقيده في حالة قنوات التحكم تبعاً لأهمية القناة والمعلومات التي تحملها في سياق الاتصال. فالمعلومات الخاصة بأهم بيانات الشبكة، كتلك التي تحملها قناة BCCH على سبيل المثال، والتي يحتاجها كل المشتركين ضمن الخلية، ولا يمكن مباشرة أي اتصال من دونها، يجب أن تحظى بحصانةٍ أعلى من تلك الخاصة بالتحكم باتصال مشتركٍ واحدٍ فقط.
يتجلى التباين في تعقيد الترميز المطبق لكل من قنوات التحكم في درجة كثيرات الحدود المستخدمة ضمن خوارزميات الترميز، وفي عدد البتات التي تضاف إلى المعلومات. لتوضيح ذلك، نعرض في ما يلي -باختصارٍ شديد- لإجراءات ترميز القناة المقترنة SACCH، والتي تستخدم لتبادل نتائج قياسات جودة القناة.

١) تصل المعلومات الخاصة بهذه القناة إلى المرمز في صيغة مجموعات تشمل كل منها 184 بتاً، ويجري ترميزٌ أولي للمعلومات باستخدام آلية CRC وكثير الحدود التالي:

$$g_{CRC}(X) = (1 + X^3 + X^{17})(1 + X^{23}) \qquad (٤١-٥)$$

يؤدي هذا الترميز إلى توليد 40 بتاً، تُضاف كـ "بتات تكافؤ" أو متتالية تدقيق إلى مجموعة المعلومات، ما يُفضي إلى 224 بتاً. ويُعرف الترميز الموصوف بالعلاقة السابقة بـ"ترميز Fire" نسبةً إلى مبتكره (Philippe Fire).
نلفت النظر في هذا السياق إلى أن درجة كثير الحدود المستخدم هي 40، وهذا يقود إلى طولٍ مميز لمتتالية التدقيق (40 بتاً)، يفوق بأضعاف كثيرة طول متتالية التدقيق للإشارة الكلامية. وهذا يعني أن مقدار الحصانة التي تزود بها هذه القناة أعلى بكثير من تلك التي تحظى بها الإشارة الكلامية.

٢) تُضاف في خطوة تالية حاشية تشمل أربعة أصفار إلى المجموعة، ما يقود إلى 228 بتاً.

٣) يعقب ذلك ترميز المجموعة الكاملة (228 بتاً) باستخدام مرمز طي بمعدل $R_C = 1/2$. ويُنجز هذا الترميز وفق كثيري الحدود اللذين سبق ذكرهما في (٥-٣٩)، ما يقود إلى 456 بتاً، وهو المعدل المناسب لخطوات معالجة الإشارة التالية، ونلحظ أنه متطابق في حالات الترميز التي ذكرناها كلها.

٥-٣-٣-٥ ترميز القناة الخاص بقناة RACH

عرضنا في الشكل ٤-١٤ بنية رزمة طلب النفاذ العشوائي (Random Access Burt)، وأشرنا إلى أن المعلومات الأساسية ضمن هذه الرزمة تتألف من 8 بتات موزعة على حقلين اثنين: يدل الأول منهما على سبب طلب النفاذ، أي أن الشبكة تقرأ

من هذا الحقل دافع المشترك للولوج إلى الشبكة، والذي قد يكون الإجابة على طلب نداء، أو تحديث المعلومات عت مكان الوجود، أو إصدار مكالمة، أو غير ذلك مما يستدعي تخصيص قناة راديوية خاصة للمشترك. أما الحقل الثاني فيحوي رقماً عشوائياً يُستخدم لتنسيق نفاذ أكثر من مشترك، ويمثل بديلاً عن هوية الوحدة المتحركة، التي لا تكون معروفة للشبكة عند لحظة طلب الولوج. نوهنا أيضاً إلى أن طول كلٍّ من الحقلين ضمن البتات الثمانية يتفاوت تبعاً لإصدار GSM المعتمد في الشبكة (2-5 بتات لرقم العشوائي، و 3-6 لسبب الولوج).

يُنجز ترميز رسالة طلب النفاذ وفق ما يلي (انظر الشكل ٥-٢٦):

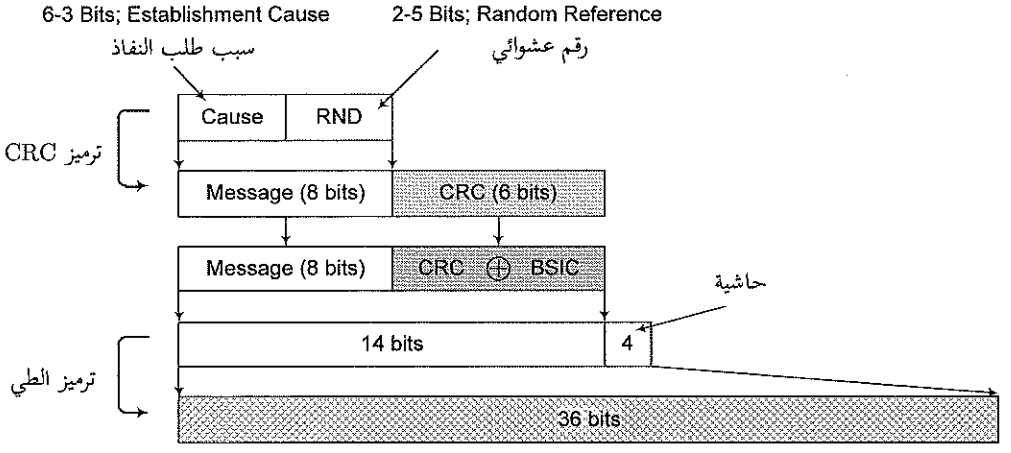
١) في خطوة أولى، تجري إضافة متتالية تدقيق مؤلفة من 6 بتات، وفق المعادلة

$$g_{CRC}(X) = 1 + X + X^2 + X^3 + X^5 + X^6 \qquad (٥-٤٢)$$

٢) لا يمكن للوحدة المتحركة أن تطلب النفاذ إلى الشبكة قبل أن تكون قد أكملت إجراءات تسجيلها وقرأت المعلومات الخاصة بالنظام، وكنا أشرنا إلى أن هوية المحطة الثابتة (BSIC) تكون جزءاً من هذه المعلومات، وهذه الهوية تتكون من 6 بتات. يؤخذ هذا الرقم ويُجمع بتدوين Modulo 2 إلى بتات متتالية التدقيق. بذلك تكون رسالة طلب النفاذ مُتضمِّنة معلومات واضحة تدل على المحطة المعنية بالطلب، فإذا أُستقبِلت الرسالة لسببٍ ما من قبل محطة أخرى، يمكن للمحطة التي وصلتها الرسالة بعد مقارنة رقم BSIC الذي تحمله الرسالة برقمها الخاص معرفة أنها غير معنية بالطلب.

٣) بعد ذلك، تجري إضافة حاشية بطول 4 بتات للرسالة، ما يقود إلى 18 بتاً.

٤) تخضع المتتالية الناتجة عن إضافة الحاشية لترميز طي أو تلاف بمعدل $R_c = 1/2$، وهذا بدوره يقود إلى 36 بتاً، وهذه المتتالية هي التي تشغل حقل المعلومات في الرزمة الراديوية (انظر الشكل ٤-١٤).



الشكل ٥-٢٦: خطوات ترميز القناة في حالة رسالة طلب النفاذ العشوائي.

كانت هذه بعض اللمحات عن ترميز القنوات التقليدية في نظام GSM، وقد اقتصرنا على عرض بعض القنوات فقط لتوضيح المبادئ الأساسية. وكما سبق الذكر، يوفر المصدران [١٨] و [٢٠] تفاصيل كاملة عن كثيرات الحدود المستخدمة لكل صنف من القنوات، إضافة إلى تفاصيل دقيقة أخرى تتعلق بكل إجراءات الترميز.

٥-٣-٤ ترميز القناة في حالة المعطيات الرزمية

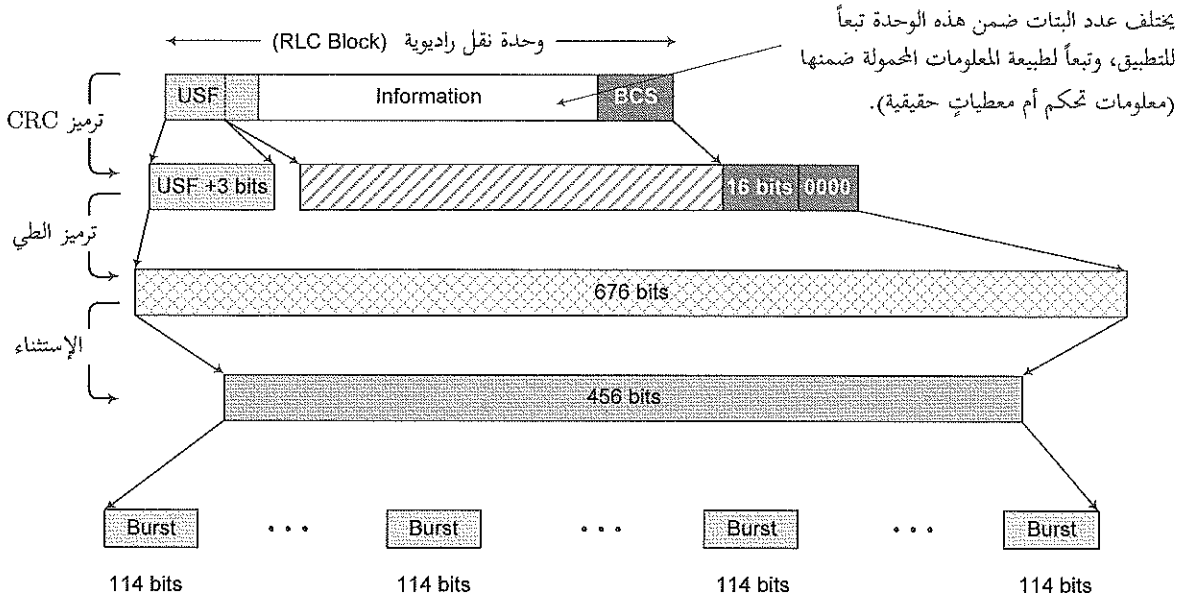
كانت إتاحة تبادل المعطيات بمعدلات تفوق ما يتيحه نظام GSM التقليدي من أهم الأغراض التي صمِّم لأجلها نظام GPRS. وقد عرضنا في البحث ٤-٧ لمبدأ التخصيص الديناميكي للقنوات الفيزيائية (Dynamic Channel Allocation)، الذي يمثل الآلية الأولى لتحقيق هذا الغرض، عن طريق تخصيص أكثر من حيز زمني لنقل المعطيات الخاصة بالمشترك نفسه.

أما الآلية الثانية التي يصب استخدامها في الوصول إلى معدلات نقل مرتفعة فهي الإستفادة من المرونة التي تتيحها آليات ترميز القناة التي عرضناها، وإضافة أنماط ترميز خاصة بالمعطيات الرزمية، تتفاوت في مستوى الحصانة التي توفرها من أغراض القناة، وتُنتقى على نحوٍ ديناميكي متكيف مع شروط الانتشار أو جودة القناة. يتيح هذا الانتقاء المتكيف زيادة عدد بتات الحشو أو الفائض الخاص بالترميز عندما يكون مستوى الإشارة إلى الضجيج منخفضاً، أو خفض عدد هذه البتات عندما تسمح نوعية أو جودة القناة بذلك، بحيث يُستثمر مقدارٌ أكبر من السعة المتاحة ضمن الرزم الراديوية لنقل المعلومات. وهذا المبدأ يماثل أو يشابه الآليات التي يستند إليها المرمز المتكيف الخاص بالإشارة الكلامية (AMR).

شملت التحسينات المتعلقة بنظام GPRS أربعة أنماطٍ ترميزٍ جديدة، خاصة بالمعطيات الرزمية، تعرف باسم جامعٍ لها هو "Coding Schemes"، ويُشار إليها اختصاراً بـ "CS-1,...., CS-4".
تعتمد هذه الأنماط على نفس الآليات أو المبادئ التي ذكرناها لغاية الآن، مثل تدقيق الفائض الدوار وترميز التلاف والاستثناء، وتقود إلى معدلاتِ نقلٍ مختلفة بسبب التباين في كيفية استخدام هذه الآليات ضمن كلٍّ من أنماط الترميز الأربعة. لتوضيح ذلك، نعرض في ما يلي لخطوات الترميز الخاصة بالنمط CS-3، ثم نذكر الاختلافات الخاصة بالأنماط الأخرى.

١) ننطلق في نقاشنا من دفق المعطيات عند بلوغ طبقة MAC، حيث تجري تجزئة الدفق الوارد من الطبقة التي تعلوها (طبقة RLC) إلى وحدات جزئية أو مقتطعات (Segments)، الطول الأعظمي لكل منها هو 307 بتاً، يشمل 16 بتاً على الأقل كمعلوماتِ تحكمٍ خاصةٍ ببادئةِ RLC، إضافة إلى ثلاثة بتات احتياطية، أي شاغرة ولا تحمل معلومات مهمة (انظر الشكل ٥-٢٧). هذا ويختلف عدد بتات المعلومات ضمن هذه الوحدة تبعاً للتطبيق، وتبعاً لكون وحدة RLC-PDU تحمل معلومات تحكم أم معطياتٍ فعلية. لذا نلتزم في ما يلي بعرض الوحدة التي تحمل معلومات فعلية بأكبر سعة ممكنة.

٢) يُضاف إلى هذه الوحدة بادئةُ طبقةِ تنسيق النفاذ (MAC-Header)، والتي يبلغ طولها 8 بتات، تلعب ثلاثة منها دوراً مهماً في آليات النفاذ، ويُشار إليها بـ "Uplink State Flow (USF)"، ويمكن الرجوع إلى تفاصيل بنيتها ودورها في [١٥]. بذلك نحصل على وحدة معطيات بطول إجمالي مقداره 315 بتاً.



الشكل ٥-٢٧: خطوات ترميز القناة وفق النمط CS-3.

٣) تصل هذه الوحدة إلى مرمز القناة الذي يجري في خطوة أولى ترميزاً لبتات حقل USF باستخدام آلية الفائض الدوار (CRC)، ما يقود إلى إضافة 3 بتات كحمايةٍ لهذا الحقل (أي أن ترميز هذه البتات يجري بمعدل مقداره $R_c = 1/2$).

٤) في خطوة تالية، تجري إضافة متتالية تدقيق بطول 16 بتاً، يعقبها إضافة حاشية مؤلفة من 4 بتات بقيمة "0" لكل منها. وهذه الحاشية تفيد في إرجاع المرمز إلى وضعه الاستهلالي بعد ترميز كلٍّ من وحدات المعطيات المتتابعة.

٥) تقود هذه الإضافات إلى مجموعة معطيات بطول إجمالي مقداره $(315 + 3 + 16 + 4 = 338)$ بتاً، تخضع في خطوة تالية لترميز تلاف أو طي بمعدل $R_c = 1/2$، ما يقود إلى مضاعفة عدد البتات لتبلغ 676 بتاً.

٦) كنا قد ذكرنا في البحث٤-٧ عند التعريف ببنية الرابط الراديوي أن وحدة المعلومات الناتجة عن طبقة RLC-MAC، (أي وحدة RLC-Block) يجب أن تُحمَل بعد معالجتها على أربعة رزم راديوية متتابعة، وهذه الرزم تتيح سعة مقدارها $(114 \times 4 = 456)$ بتاً. لذا يجري استثناء 220 بتاً من ناتج ترميز التلاف، ما يقود إلى 456 بتاً، توزع على أربعة أحياز زمنية.

ترسل هذه الرزم الأربعة إلى الشبكة ضمن مدة زمنية مقدارها 20 ms، لذا يمكن حساب معدل نقل المعطيات الصافي الذي يتيحه هذا النمط من الترميز عن طريق مراعاة عدد بتات المعلومات الأصلية، وهي كما ذكرنا 307 يُستثنى منها 16 بتاً كبادئة لطبقة RLC، و 3 بتات احتياطية، وهذا يقود إلى 288 بتاً. بمراعاة هذه المعطيات يكون معدل نقل المعلومات الصافي لهذا النمط هو 14.4 kbps (228bit/ 20ms).

ننوه في هذا السياق إلى أن الكثير من المصادر تذكر معدل النقل الإجمالي، أي عدد البتات في وحدة المعلومات بعد إضافة

البادئة الخاصة بطبقة MAC، واستثناء بتات حقل USF. وهذا يقود إلى $(312 = 3 - 8 + 307)$ بتاً، ومن ثم يكون معدل نقل المعلومات الإجمالي هو 15.6 kbps (312bit/ 20ms). تذكر بعض المراجع أيضاً معدلاً إجمالياً لترميز التلاف، أي بعد إجراء الاستثناء، ويعني ذلك في المثال الذي ذكرناه أن معدل الترميز يكون $R_c = 338/(676 - 220) \approx 3/4$.

تختلف أنماط الترميز الأخرى عما ذكرناه في ما يلي (انظر الجدول ٥-٣) :

١) يختلف طول وحدة المعلومات التي ترد إلى المرمز، أي بعد طبقة MAC، حيث يتراوح هذا الطول (باستثناء حقل USF) بين 181 و428 بتاً.

٢) يتفاوت طول متتالية التدقيق التي تضاف قبل عملية ترميز الطي.

٣) يختلف عدد البتات التي يجري استثناؤها كي يكون خرج أو ناتج ترميز الطي ملائماً لأربعة رزم راديوية.

٤) لا تخضع المعلومات ضمن الإجراءات الخاصة بالنمط CS-4 لترميز الطي بتاتاً.

٥) لا يجري ترميزٌ أوّلي لحقل USF في حالة النمط CS-1.

نمط الترميز	معدل الترميز	عدد البتات الإجمالي	بتات متتالية التدقيق	بتات ترميز USF	بتات الحاشية	البتات بعد ترميز الطي	عدد بتات الاستثناء	معدل النقل الإجمالي (kbps)	معدل النقل الصافي (kbps)
CS-1	1/2	181	40	3	4	456	0	9.05	8
CS-2	$\approx 2/3$	268	16	6	4	588	132	13.4	12
CS-3	$\approx 3/4$	312	16	6	4	676	220	15.6	14.4
CS-4	1	428	16	12	0	456*	--	21.4	20

* لا يوجد ترميز طي في حالة CS-4

الجدول ٥-٣: تفاصيل أنماط الترميز في نظام GPRS.

تقود هذه الاختلافات إلى معدلات النقل المعطاة في العمودين الأخيرين من اليمين ضمن الجدول ٥-٣، وهذه المعدلات توافق استخدام حيز زمني واحد لنقل المعلومات. وعند تخصيصٍ أكثر من حيز زمني للمشترك الواحد، يتضاعف معدل النقل، حيث يمكن من الناحية النظرية الوصول إلى معدل 160 kbps كمعدل نقل صاف، أو إلى 171.2 kbps كمعدل نقل إجمالي.
هذا ولا بد من التنويه إلى أن معدلات النقل المذكورة تمثل قيماً نظرية لأكثر من سبب، فمن ناحية أولى، ما زالت الأجهزة المتوفرة غير قادرة على استخدام 8 أحياز زمنية في الوقت نفسه، وذلك لاعتبارات تقنية مختلفة. ومن ناحية أخرى، لا يمكن الوصول إلى القيم النظرية إلا باستخدام نمط CS-4، أي بدون أي ترميز تلاف، واستخدام مثل هذا النمط يتطلب ظروف انتشار شبه مثالية، وهو ما يصعب توفره على أرض الواقع (انظر [١٥] و [١٦] لقراءة المزيد عن تفاصيل هذه الأنماط).

ختاماً لهذا البحث نسوق بعض الملاحظات المتعلقة بترميز القناة في نظام EDGE:

- لا يتضمن نظام EDGE تعديلات جذرية على بنية الرابط الراديوي المستخدمة في نظامي GSM التقليدي ونظام GPRS، ويقتصر التغيير الأهم الذي يشمله هذا النظام –مقارنةً بـ GPRS– على إتاحة استخدام نظام متقدم للتعديل الرقمي هو "التبديل الثُماني للطور" "8-PSK"، الذي يقود إلى "كفاءة طيفية" "Spectrum Efficiency" أعلى بثلاث مرات من الكفاءة الطيفية التي يتيحها نظام GPRS.
- لا تختلف آليات أو مبادئ الترميز في نظام EDGE عن تلك التي عرضناها في الأبحاث السابقة، غير أنه استحدثت أنماط ترميز إضافية تتيح استثمار تقنية التعديل الرقمي الجديدة، وصار من الممكن استخدام كلٍّ من نمط التعديل الرقمي ونمط ترميز القناة للدلالة على نمط الترميز الإجمالي الذي تخضع له المعلومات. لذا يتيح نظام EDGE تسعة "أنماط ترميزٍ وتعديل" "Modulation and Coding Scheme (MCS)" مختلفة، تشابه الأربعة الأولى منها تقريباً أنماط الترميز الخاصة بنظام GPRS الأساسي ولكن مع بعض التعديلات الطفيفة. أما الأنماط الأخرى، فتعتمد نظام التعديل الرقمي 8-PSK، إضافة إلى معدلات ترميز مختلفة، ما يتيح الوصول بمعدل النقل عند استخدام حيز زمني واحد إلى 59.2 kbps (انظر الجدول ٥-٤)، وهذا بدوره يقود إلى معدل نقلٍ أقصى مقداره من الناحية النظرية 473.6 kbps (انظر [١٧] و [١٨] لتفاصيل أنماط الترميز، و [١٩] لتفاصيل التعديل الرقمي).

نمط التعديل الرقمي	معدل النقل الإجمالي (kbps)	نمط الترميز والتعديل	نمط التعديل الرقمي	معدل النقل الإجمالي (kbps)	نمط الترميز والتعديل
8-PSK	22.4	MCS-5	GMSK	8.80	MCS-1
8-PSK	29.6	MCS-6	GMSK	11.2	MCS-2
8-PSK	44.8	MCS-7	GMSK	14.8	MCS-3
8-PSK	54.4	MCS-8	GMSK	17.6	MCS-4
8-PSK	59.2	MCS-9			

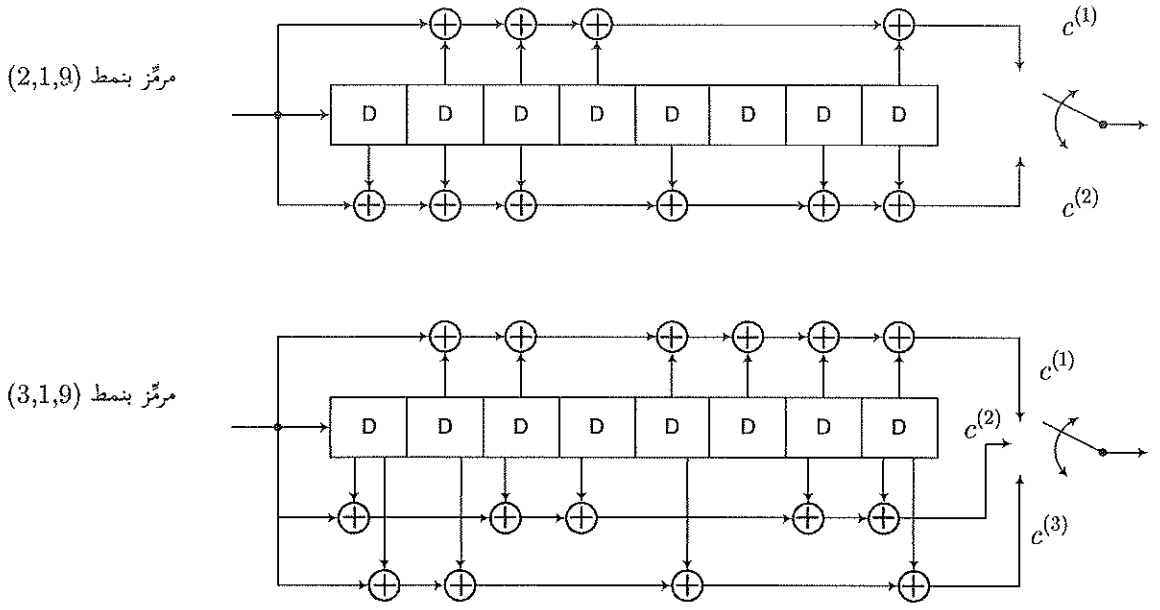
الجدول ٥-٤: أنماط الترميز والتعديل في نظام EDGE.

٥-٣-٥ ترميز القناة في نظام UMTS

يتشارك الترميز في نظام UMTS المبادىء نفسها التي عرضناها لنظام GSM، حيث يُستخدم الترميز الاستباقي (FEC) بنوعيه، أي ترميز المجموعات وترميز الطي، لتحصين المعلومات من عوارض النقل بين المرسل والمستقبل.

يتميز ترميز القناة في نظام UMTS ، مقارنةً بـ GSM، بمايلي:

١) تنوعٌ أكثر من ناحية درجة تعقيد إجراءات الترميز، وهذا التعقيد مَقُودٌ بتنوع الخدمات ومعدلات النقل التي يوفرها النظام. فعلى سبيل المثال، يبين الشكل ٥-٢٨ بنية مرمزات الطي المستخدمة في حالة UMTS، حيث يساوي معدل الترميز 1/2 لبعض القنوات، فيُستخدم المرمز في الجزء الأعلى من الشكل، وقد يساوي أيضاً 1/3 في حالة القنوات ذات الأهمية الخاصة، مايستدعي استخدام المرمز في الجزء الأدنى من الشكل.



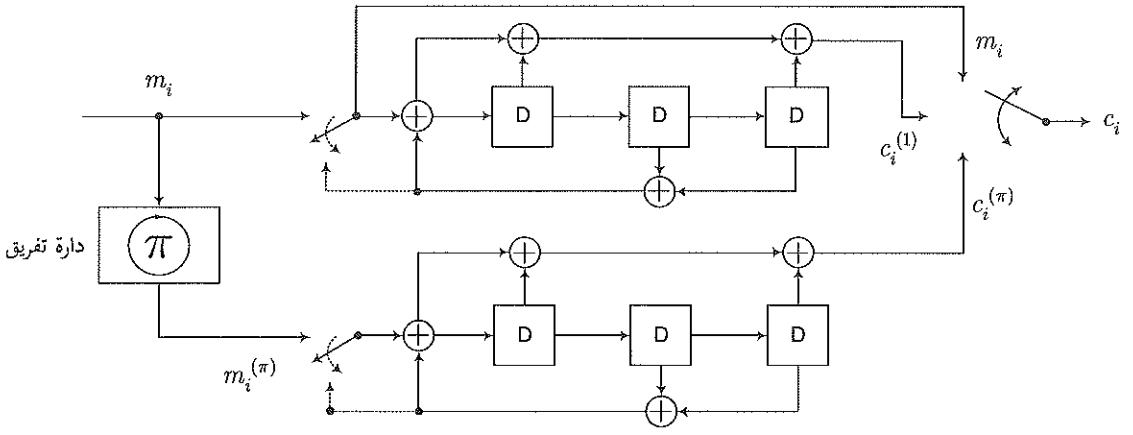
الشكل ٥-٢٨: بنية مرمزات الطي المستخدمة في نظام UMTS.

٢) نقرأ من الشكل أيضاً أن أمد التاثير هو $L = M + 1 = 9$. لذا، إذا كان طول متتالية المعلومات المطلوب ترميزها هو L_m ، فإن المرمز بمعدل 1/2 يقود إلى كلمة مرمزة بطول $L_c = 2L_m + 16$ ، كما يقود المرمز بمعدل 1/3 إلى كلمة مرمزة بطول $L_c = 3L_m + 24$.

٣) في حالة القنوات التي تتيح دفق معلومات مرتفع، يستخدم نظام UMTS ترميز Turbo. ويتألف المرمز في هذه الحالة من مرمِّزَي طي، موصولين على التوازي، يشمل كل منهما ثلاثة سجلات إزاحة، إضافة إلى دارة تفريق (الشكل ٥-٢٩). تقود هذه الدارة إلى تغييرٍ في ترتيب المعلومات المراد ترميزها، وذلك قبل خضوعها لترميز الطي في الجزء الأدنى من المرمز. وهذا الإجراء يزيد من حصانة المعلومات، ويتيح نقلها بمعدلات دفقٍ مرتفعة، وبمعدل خطأ منخفض يصل إلى $\mathrm{BER} = 10^{-6}$ ، حتى في ظروف انتشار حرجة. هذا ويكون خرج المعلومات في هذا المرمز وفق الترتيب التالي:

$$c = \{m_1, c_1^{(1)}, c_1^{(\pi)}, m_2, c_2^{(1)}, c_2^{(\pi)}, m_3, c_3^{(1)}, c_3^{(\pi)}, \cdots\} \qquad (٥-٤٣)$$

يجدر التنويه في هذا السياق، إلى أن معدل الترميز الحقيقي للمرمز المستخدم لا يساوي 1/3 تماماً كما يوحي الشكل ٥-٢٩، يرجع ذلك إلى طبيعة عمل دارة التفريق المعقدة نوعاً ما، والتي تقود إلى معدل ترميز أقل من ذلك بقليل [١٨].



الشكل ٥-٢٩: بنية مرمز توربو المستخدم في نظام UMTS.

٥-٣-٦ الربح الناجم عن ترميز القناة

يُعرَّف "ربح ترميز القناة" "Coding Gain" بأنه مقدار الانخفاض في نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR، الذي يتيح الترميز اعتماده للمحافظة على قيمة معطاة لنسبة الخطأ في البت BER، والتي نرمز لها بـ P_b.

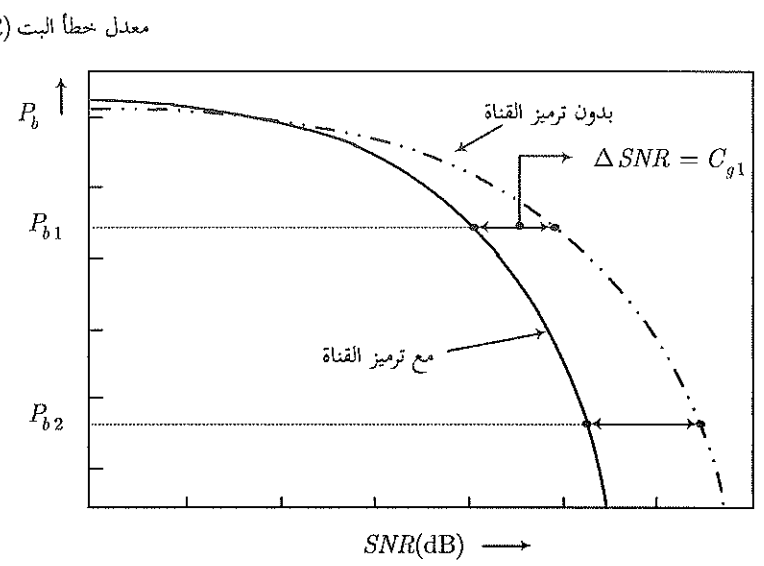
يوضح الشكل ٥-٣٠ هذا التعريف، حيث يصف -من ناحية المبدأ- نسبة الخطأ بدلالة SNR، وذلك عند نقل المعلومات عبر قناةٍ تحت تأثير ضجيج غاوسي.

يمثل المنحنى المتقطع نسبة الخطأ في نظامٍ ما بدون ترميز، كما يمثل المنحنى المستمر نسبة الخطأ —في نفس النظام- عند استخدام تقنيات الترميز. نقرأ من الشكل على سبيل المثال، أن الترميز يقود إلى خفض نسبة الإشارة إلى الضجيج المطلوبة للحفاظ على قيمة معدل الخطأ P_{b1}، مقيسةً بـ dB، بمقدار C_{g1}. هذا يعني أنه من الممكن إرسال المعلومات عبر القناة بمقدارٍ أقل من الطاقة، دون أن يؤثر ذلك على أداء النظام.

من الممكن أيضاً قراءة إيجابيات الترميز على نحوٍ آخر، إذ يبين الشكل أنه إذا كان مقدار SNR ثابتاً، فإن معدل الخطأ في حالة الترميز يكون أقل بكثير من معدل الخطأ عند إرسال المعلومات بدون ترميز.

يتراوح مقدار الربح الذي يمكن الوصول إليه تبعاً لنوعية الترميز المستخدم، ولطبيعة الضجيج ومقداره، إذ يساوي الربح 2 dB في حالة ترميز المجموعات ، كما من الممكن أن يصل إلى 9 dB عند استخدام مرمز تلافٍ أو طي ذي كفاءة عالية.

يجدر التنويه أيضاً إلى أن المرمزات التي تكون مصممة للعمل في بيئة انتشار ذات مستوى مرتفعٍ للضجيج، قد تقود إلى ربحٍ سلبي، أي إلى ارتفاع في معدل خطأ البت، عند استخدامها في بيئةٍ ذات قيم منخفضة لـ SNR، وهذا مبينٌ في الشكل أيضاً. يرجع ذلك إلى أن مقدار فائض المعلومات (الحشو) الذي يضاف في حالة الترميز المتقدم يكون كبيراً جداً، وهذه المعلومات الإضافية تكون عرضةً للخطأ مثل المعلومات الأصلية، ومن ثم ترتفع قيمة P_b عند قيم SNR الضئيلة، لأن نسبة الخطأ في مثل هذه البيئة تكون –في حالة إرسال المعلومات دون ترميز– قليلةً أصلاً. لذا، ورغم أن الترميز يوفر عند أية قيمة لـ SNR إمكانية كشف الخطأ وتصحيحه، إلا أن هذا الربح يكون في حالة قيم SNR الصغيرة أقل من الزيادة في مقدار P_b [١٤].



الشكل ٥-٣٠: توضيح لمبدأ ربح ترميز القناة.

٥-٣-٧ ملاحظات حول كفاءة الترميز

ننوه في ختام البحث المتعلق بالترميز إلى بعض النقاط المتعلقة بأداء المرمز وهي:

١) تقود زيادة أمد التأثير L إلى ترميزٍ أقوى وتحصينٍ أفضل للمعلومات، يتجلى في تحسينٍ ملموسٍ في ربح الترميز وإمكانيات تعديل الخطأ في المستقبل. غير أن ذلك يقود من جهة أخرى إلى مرمزات أكثر تعقيداً، وإلى عبءٍ حسابي أعلى عند إنجاز خطوات الترميز، ما يُفضي بدوره إلى وقتٍ أطول لمعالجة الإشارة وتأخيرٍ في اكتمال الإشارة المستقبلة وجاهزيتها للاستخدام.

٢) تزداد كفاءة المرمِّز عند خفض معدل الترميز R_c، لأن ذلك يعني زيادةً في كمية المعلومات الفائضة، غير أن الجانب السلبي لزيادة حصانة المعلومات هو تردي قيمة الكفاءة الطيفية بسبب ازدياد كمية المعلومات التي تُرسل عبر القناة.

٣) بناءً على ما سبق، يجب أن يجري اختيار الصيغة النهائية لتقنية ونمط الترميز استناداً إلى محاكمة دقيقة لكل المعطيات والمواصفات الفنية المطلوبة، وإلى مقايضة مدروسة بين فوائد وسلبيات كل صيغة من الناحية التقنية و الاقتصادية.

٥-٤ التفريق

في كثيرٍ من الأحيان، لا تكون البتات التي تتعرض لخطأ ما أثناء عملية النقل مبعثرة أو متفرقة، بل تظهر في هيئة مجموعاتٍ أو "رزم"، يتألف كلٌّ منها من العديد من البتات المتعاقبة، التي يتباين عددها وفقاً لطبيعة وسبب الخفوت الذي يؤدي إلى الخطأ. فعلى سبيل المثال، عندما يمر المستقبل في منطقة خفوتٍ ناشئة عن بناء ضخم أو هضبة صغيرة، تكون أبعاد هذه المنطقة- مقيسةٍ بالطول المكافئ لمدة البت- كبيرة نسبياً، ما يعني أن تجاوزها يستغرق وقتاً ملحوظاً، وهذا بدوره يؤدي إلى أن قيمة الإشارة المستقبلة تكون أقل من حساسية المستقبل خلال مدة زمنية تكافئ طول عددٍ من البتات، وليس بتاً واحداً، وهذه الحقيقة هي التي تبرر تسمية هذا الصنف من الأخطاء بـ "الأخطاء الجماعية أو الرُّزَميَّة" "Bursty Errors".

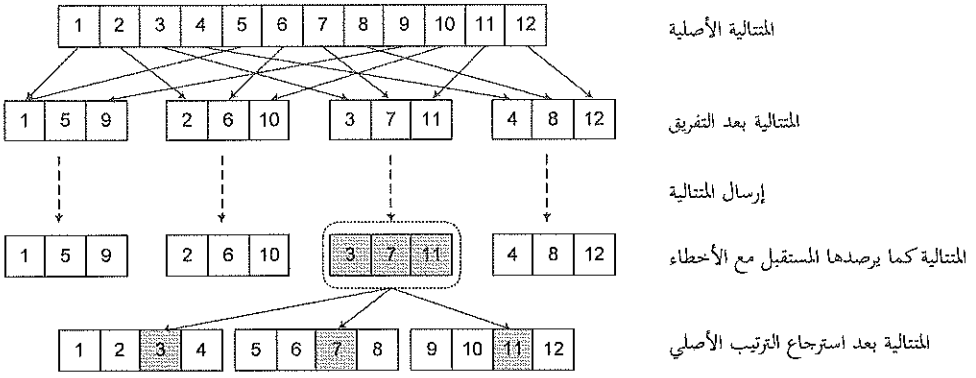
من جانبٍ آخر، لا يمكن لتقنيات ترميز القناة التي عرضنا لمبادئها أن تكشف وتصحح الأخطاء الرُّزمية على نحوٍ فعال، فهي مصممة لتجاوز الأخطاء ذات الطبيعة العشوائية، أو الأخطاء المبعثرة، التي من الممكن أن تتألف إما من بتات فردية أو من عددٍ قليلٍ من البتات المتجاورة (انظر في ذلك [١] و[١٢] و[١٣]). لذا لا يمكن تخفيف نسبة أخطاء النقل بالاعتماد على تقنيات ترميز القناة فقط، بل يجب مراعاة ما ذكرناه من طبيعة هذه الأخطاء، وقصور تقنيات الترميز، وهذا هو الهدف الأساسي من استخدام تقنيات أو آليات "التفريق" "Interleaving".

يقود إجراء التفريق إلى فصل البتات المتعاقبة ضمن سلسلة المعلومات، بحيث يجري إرسالها وفق ترتيبٍ أو تسلسلٍ مغايرٍ لترتيبها الأصلي. ومن الممكن أن يُفسَّر أو يُؤوَّل هذا الإجراء على أنه محاولةٌ لجعل الترابط الإحصائي بين بتَّيْنِ متتابعين عند رصدهما في المستقبل ضعيفاً جداً، أو معدوماً في الحالة المثالية، بحيث لا يتأثر هذان البتَّان بعوارض القناة أو وسط الانتشار على نحوٍ متشابه أو متقارب، ما يعني أن احتمال خضوع كليهما لعارض خفوتٍ مشترك يكون ضئيلاً جداً. ولا شك أن ذلك يتطلب أن يكون الفاصل الزمني بينهما أطول من المدة المتوسطة للخفوت.

تتجلى إيجابيات آلية التفريق من المثال المبسط التالي:

لنفترض أن المعلومات المراد إرسالها تُجزَّأ إلى مقتطعات يتألف كل منهامن 3 بتات، ولنفترض أن المعلومات تشمل 12 بتاً. فإذا أصاب خطأٌ نقلٍ ما 3 بتات متتالية، أي مقتطعاً كاملاً، قاد ذلك إلى أن يكون المقتطع كله مبهماً، وإلى نسبة خطأ لهذا المقتطع تكافئ 100%.

يصعب في هذه الحالة على تقنيات كشف وتصحيح الأخطاء استرجاع المعلومات الأصلية. أما إذا جرى تفريق البتات المتجاورة أو المتعاقبة عن بعضها قبل عملية الإرسال، كما هو مبين في الشكل ٥-٣١، فإن الخطأ الذي يصيب 3 بتات يخضع للتفريق عند إجراء العملية العكسية في المستقبل، ما يقود إلى خفض نسبة الخطأ، بحيث تصبح 25% لكل مقتطع، وهذا يتيح المجال لتقنيات ترميز القناة أن تكون فعالةً أكثر وناجعة في استرجاع المعلومات الأصلية .



الشكل ٥-٣١: مثال مبسط يوضح مبدأ التفريق.

صحيحٌ أن التفريق يقود في هذه الحالة إلى أن تكون كل المقتطعات مصابةً بنسبةٍ من الخطأ، إلا أن استرجاع المعلومات الأصلية من كلٍّ منها يكون ممكناً نظراً لنسبة الخطأ الضئيلة ولكون الأخطاء مبعثرة. أما في الحالة الأولى، أي بدون إجراء التفريق، فإن المقتطع المتضرر لا يكون قابلاً للاسترجاع إطلاقاً.

يُستثمر مبدأ التفريق بأكثر من وجهٍ ضمن نظم الاتصالات الخلوية، هذا ما توضحه الفقرات التالية من خلال عرض أهم التقنيات المتعلقة بذلك.

٥-٤-١ آليات التفريق في نظام GSM

تُستخدم في نظام GSM آليات متعددة للتفريق، وتتباين هذه الآليات في تفاصيلها تبعاً لنوع القناة الاعتبارية. لذا نذكر في ما يلي أمثلةً منتقاة لإجراءات التفريق، وهي كافية لتعريف القارئ بالمبادئ الأساسية.

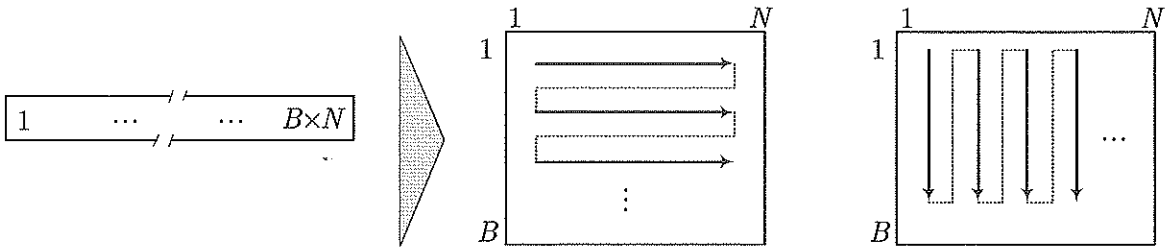
٥-٤-١-١ التفريق في حالة نقل الإشارة الكلامية

تفريق المجموعات

يبين الشكل ٥-٣٢ أبسط آليات التفريق، التي تعرف باسم "تفريق المجموعات" "Block or Matrix Interleaving". تنطلق هذه الآلية من وجود متتالية من البتات مكونة من $B \times N$ بتاً، تُجزَّأ إلى مجموعاتٍ طول كل منها N، بحيث يمكن تمثيل المعلومات كمصفوفة ثنائية الأبعاد مؤلفة من B سطراً و N عموداً.

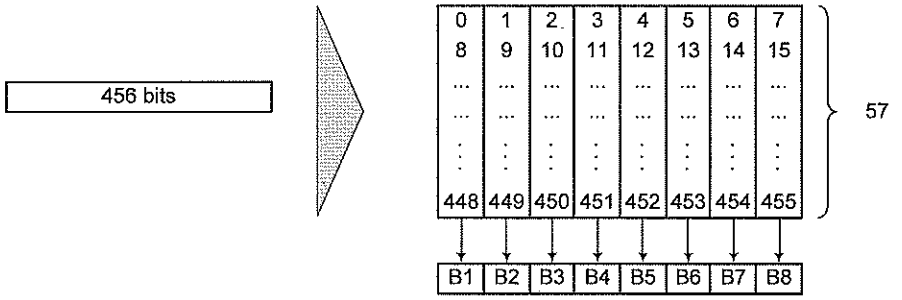
عندما ترد المعلومات إلى الدارات الخاصة بإنجاز التفريق، تُحفظ بعد تجزئتها في "ذاكرة مؤقتة" "Buffer"، ويجري الحفظ وفق ترتيب ورودها سطراً تلو الآخر. بعد ذلك يُنجز التفريق بإرسال المعلومات وفق ترتيبٍ مختلف، حيث تُقرأ المعلومات من الصوان عموداً تلو الآخر. يقود ذلك إلى مباعدة كل بتين متتابعين أو متجاورين بمقدار B من الخانات، لذا تعرف B أيضاً باسم "درجة أو مرتبة التفريق" "Interleaving Degree". هذا وتجري استعادة الترتيب الأصلي للبتات من خلال إجراءٍ مماثلٍ في المستقبل.

تساعد تقنية تفريق المجموعات على تحسين أداءِ كشفِ وتصحيحِ الأخطاء المبعثرة والعشوائية، فكما تبين من المثال في الشكل ٥-٣١، إذا أصاب الخطأ M بتاً متتالياً، أي إذا نشأ خطأٌ رُزَمي بطول M، وتحققت العلاقة $M \leq B$ ، فإن البتات الخاطئة سوف تتوزع أو تتفرق على مجموعة من الخانات عددها $B \times N$ ، وهذا يعني أن ترميز القناة المستخدم يجب أن يكون قادراً أو مصمماً لتصحيح بت واحد في كل مجموعة طولها N بتاً أو أقل.



الشكل ٥-٣٢: آلية تفريق المجموعات.

تُنجز هذه الخطوة في نظام GSM على النحو المبين في الشكل ٥-٣٤، حيث يُجزَّأ ناتج ترميز القناة لكل مقتطع كلامي (456 بتاً) إلى ثماني مجموعات، تضم كل منها 57 بتاً.



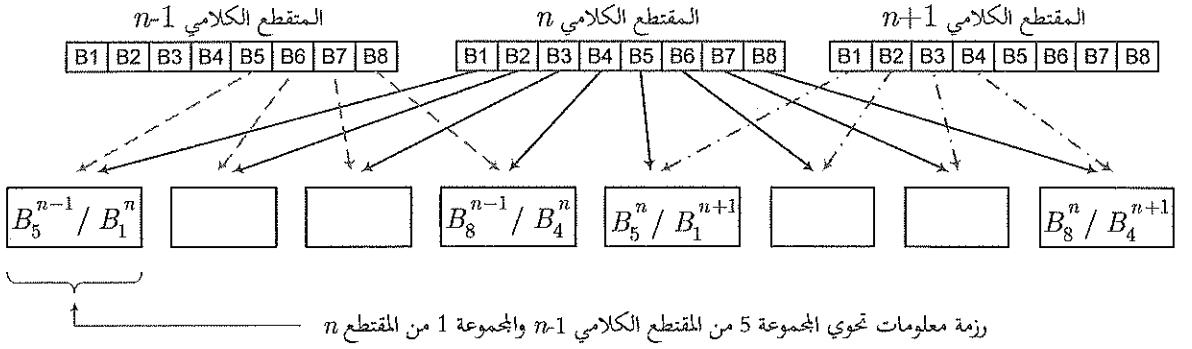
الشكل ٥-٣٣: تفريق المجموعات في نظام GSM.

التفريق الخارجي

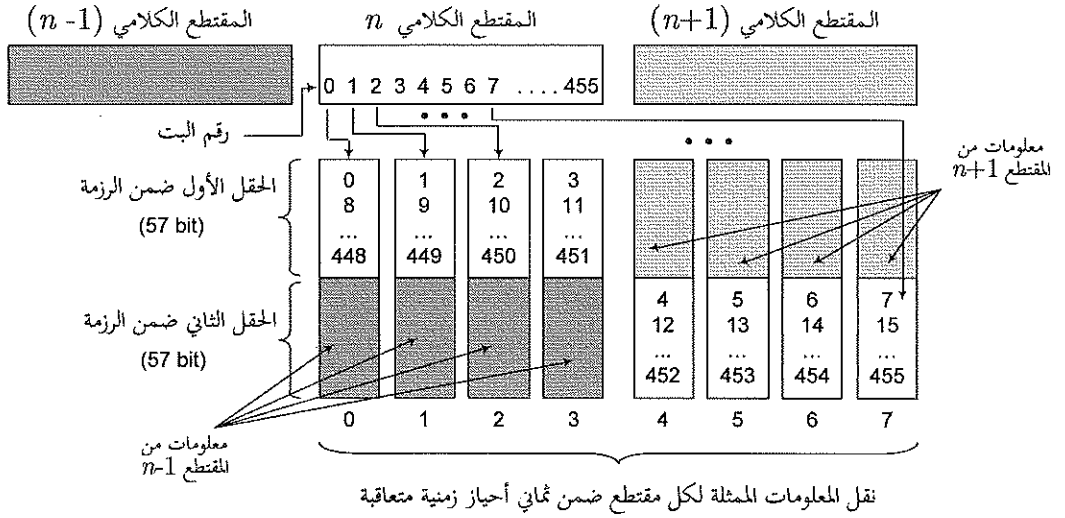
إضافة إلى تفريق المجموعات، يعتمد نظام GSM على آلية إضافية، تهدف إلى توزيع المعلومات الخاصة بالمقتطع الكلامي الواحد على أكثر من رزمة معلومات. تعرف هذه الآلية باسم "Inter-burst Interleaving"، أو "Diagonal Interleaving"، ونشير إليها في ما يلي بتعبير "التفريق الخارجي"، في دلالة على توزيع المعلومات على رزمٍ مختلفة (ستتضح هذه الدلالة على نحوٍ أفضل لاحقاً).

يُعرف عدد الرزم التي توزَّع عليها المعلومات بـ "أَمَد التفريق" "Interleaving Depth"، وهو مُقيَّدٌ بمقدار التأخير الذي يُسمح به أو يمكن تقبُّله أثناء إرسال المعلومات وتجميعها.

يوضح الشكل ٥-٣٤ هذه الخطوة كما تُطبَّق في نظام GSM. ولفهم تفاصيل هذا الشكل نذكِّر ببنية رزمة المعلومات التي تضم 114 بتاً من المعلومات، موزعة على حقلين، يتألف كل منهما من 57 بتاً (انظر الشكل ٢-٩).



(أ)



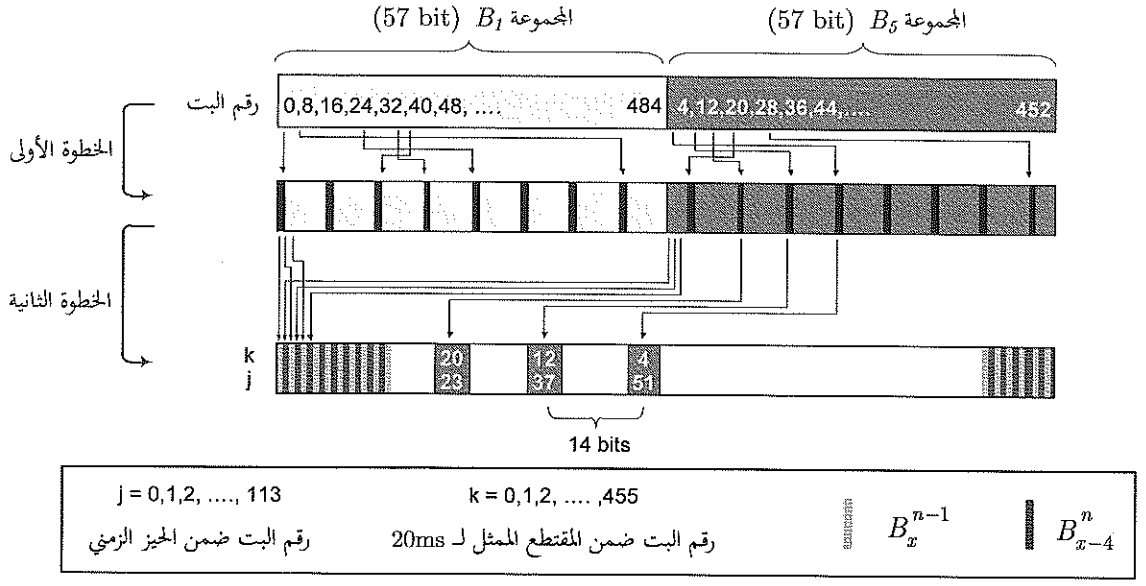
(ب)

الشكل ٥-٣٤: التفريق الخارجي في نظام GSM.

بعد تفريق المجموعات والحصول على المجموعات الثمانية الممثلة لكل مقتطع، تُحمل أو تُنْقل كلٌّ من هذه المجموعات ضمن رزمةِ معلوماتٍ مختلفة، أي يجري توزيع أو تفريق البتات الممثلة لكل مقتطع كلامي على ثماني رزم متعاقبة (الشكل ٥-٣٤). هذا وتَشغَلُ كل مجموعة (57 بتاً) حقلاً واحداً من الحقلين المتاحين ضمن كل رزمة، أما الحقل الثاني، فيُشْغَلُ بالمعلومات الخاصة بمقتطع كلامي مجاور. بذلك تكون المعلومات التي تحملها كل رزمة تخص مقتطعين كلاميين مختلفين.

التفريق الداخلي

بهدف تزويد المعلومات بحصانة أعلى من عوارض النقل، يستخدم نظام GSM آلية تفريق ثالثة، تقود إلى تغيير ترتيب البتات ضمن الرزمة الواحدة، لذا نُشير إليها باسم "التفريق الداخلي" "Intra–burst Interleaving" (انظر الشكل ٥-٣٥).



الشكل ٥-٣٥: التفريق الداخلي.

تُنجز هذه الآلية وفق ما يلي:

١) تجري بدايةً إعادة توزيع البتات ضمن كل حقلٍ، بحيث تكون البتات المؤثرة ضمن ذاكرة مرمز الطي، بعيدة عن بعضها.

٢) بعد ذلك يُغيَّر ترتيب البتات مرة ثانية، بحيث يصبح كل حقلٍ محتوياً على معلومات مقتطعين كلاميين، على أن تحتل بتات المقتطع الأول الترتيب الفرادي وبتات المقتطع الآخر الترتيب الزوجي، ضمن الحقل نفسه.

من الممكن صياغة هذه الآلية التفريق رياضياً على النحو التالي:

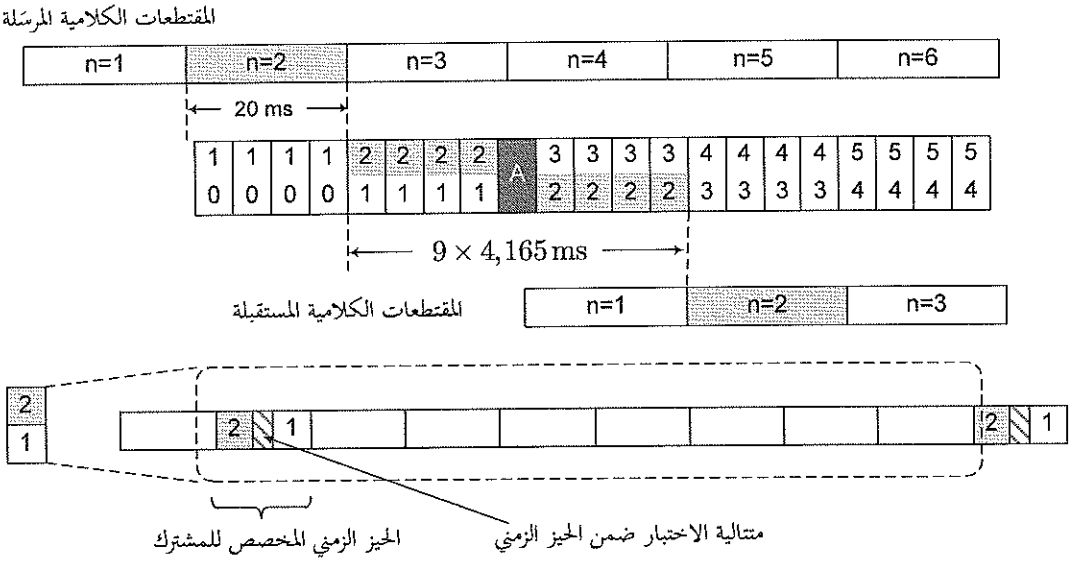
$$\begin{aligned} B &= B_0 + 4n + (k \bmod 8) \\ j &= 2\left((49k) \bmod 57\right) + \left((k \bmod 8) \operatorname{div} 4\right) \end{aligned} \qquad (٥-٤٤)$$

حيث يشير الرمز B إلى رقم الحيز الزمني، و j إلى موضع أو رقم البت ضمن الحيز، و k إلى ترتيب البت بعد ترميز القناة، و n إلى رقم المقتطع الكلامي. تؤكد العلاقة السابقة ما يلي:

- يدل الحد الثاني $(4n)$ من العلاقة الأولى على أن المعلومات الخاصة بمقتطع كلاميٍّ جديد تبدأ بعد 4 أحياز زمنية.
- يُبرز الحد $(k \bmod 8)$ أثر التفريق الخارجي، أي توزيع البتات على ثماني رزم متتابعة.
- يمثل الحد الأول من العلاقة الثانية آلية أو إجراء التفريق الداخلي، ويشير العدد 2 في هذا السياق إلى شَغْل كل ثاني بت ضمن الحيز الزمني.
- يتخذ الحد الثاني القيم "0" أو"1"، وهذا يضمن أن تَشغَلَ بتات المقتطع الواحد الخانات ذات الترتيب الزوجي في أول أربعة أحياز، والخانات ذات الترتيب الفردي في الأحياز الأربعة التالية.

التأخير الناجم عن إجراء التفريق

يؤدي نقل معلومات المقتطع الكلامي الواحد ضمن رزم مختلفة إلى تأخيرٍ في اكتمال توفر المعلومات لدى المستقبل لمتابعة معالجتها. ومن الممكن -استناداً إلى الشكل ٥-٣٦- تقدير التأخير الذي ينجم عن آلية التفريق، مع مراعاة ما يلي:



الشكل ٥-٣٦: التأخير الذي ينجم عن التفريق.

- لا يبدأ إرسال الحيز الزمني الأول، والذي يحتوي على أول مجموعة من المقتطع الكلامي، إلا بعد استكمال توزيع كل البتات الممثلة للمقتطع.
- تُرسل المعلومات الخاصة بمشتركٍ ما في واحدٍ من ثمانية أحيازٍ ضمن الإطار الزمني
- يمثل الشكل جزءاً محدداً من الإطار المتعدد، بحيث يشمل هذا الجزء الإطار الخاص بقناة SACCH (الرمز A في الشكل). واختيار هذا الجزء من الإطار المتعدد يتيح توضيح مقدار التأخير الأعظمي.

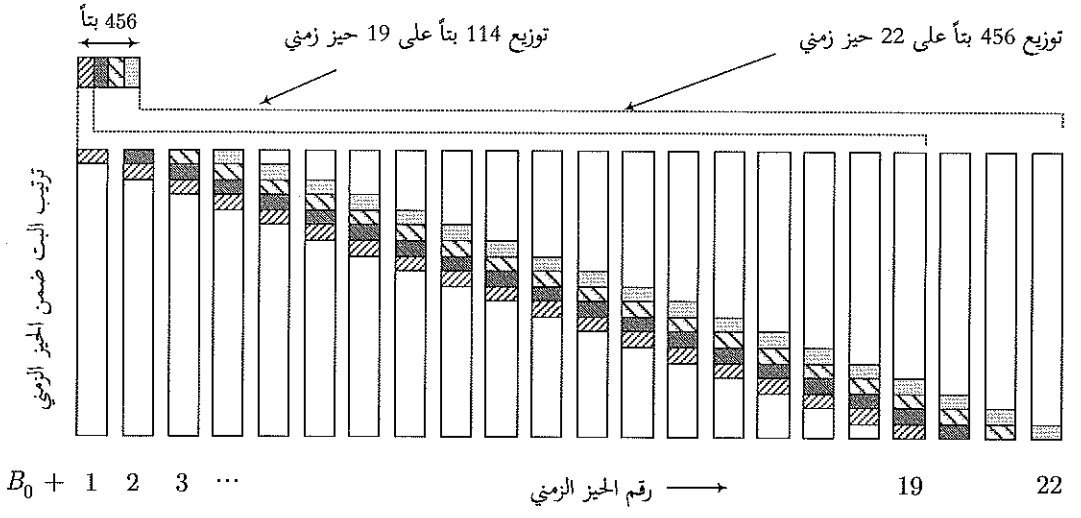
- لا يمكن للمستقبل أن يبدأ خطوات فك الترميز إلا بعد استقبال كل البتات الخاصة بمقتطع كلاميٍّ ما.

بمراعاة هذه النقاط، يسهل حساب التأخير الناجم عن التفريق، والذي يساوي 37,5 ms تقريباً. ولحساب التأخير الإجمالي، يجب إضافة تأخير ترميز المنبع في المرسل (20 ms)، وفك الترميز في المستقبل (20 ms)، إضافةً إلى التأخير الناشئ عن الوقت الذي يتطلبه إنجاز العمليات الحسابية الخاصة بخطوات معالجة الإشارة. كما يجب أيضاً مراعاة انتشار الإشارة الراديوية بسرعة متناهية.

هذا وتُحدد المواصفات المعيارية التأخير الإجمالي المقبول بـ 72 ms تقريباً لكل مسار من مسارَي الإتصال [٢٢]، وهذا الرقم يمثل تأخيراً مقبولاً جداً إذا ما قورن بما دلّت عليه تجارب عديدة، من أن جودة الإتصال الهاتفي تكون مُرضية ما لم يتجاوز التأخير الإجمالي 200 ms للمسارَين معاً.

٥-٤-١-٢ التفريق في حالة نقل المعطيات

يكون مقدار التأخير المقبول في حالة نقل المعطيات أكبر مما يمكن تقبُّله في حالة تبادل الإشارة الكلامية، إذ يمثل الاتصال الهاتفي "تطبيقاً فورِيَّ الإدراك" "Real Time Application"، بينما تنتفي هذه الخاصية عن تبادل المعطيات. لذا، يمكن استخدام أمدٍ أطولَ للتفريق، ما يؤدي إلى بعثرة البتات على مدة زمنية أطول، ومن ثم إلى ربحٍ ترميزٍ أكبر. لتوضيح ذلك، نذكر في ما يلي ملامح آلية التفريق في حالة قناة تبادل المعطيات بمعدل 9,6 kbps (الشكل ٥-٣٧).



الشكل ٥-٣٧: مبدأ التفريق لقناة تبادل المعطيات بمعدل 9,6 kbps.

سبق البيان عند نقاش ترميز هذه القناة أن الناتج عن هذا الإجراء متتاليةٌ مؤلفة من 456 بتاً لكل 20 ms. تخضع هذه المتتالية في خطوةٍ أولى للتجزئة إلى أربعة مجموعات، بطول 114 بتاً لكل منها. يعقب ذلك تفريق أو توزيع بتات كل مجموعة جزئية وفق

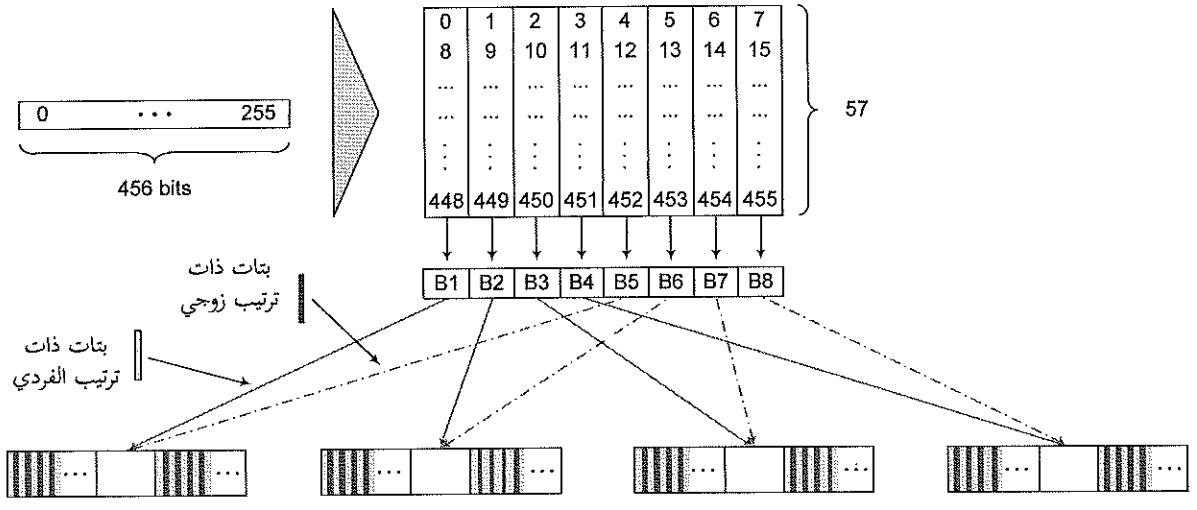
آلية التفريق الخارجي على 19 حيزاً زمنياً متتالياً، بحيث تبدأ كل مجموعة جزئية ضمن حيز زمني جديد. يقود ذلك إلى توزيع بتات المتتالية الكاملة على 22 حيزاً زمنياً متتابعاً، كما هو موضح في الشكل ٥-٣٧. وهذا التفريق يقود إلى تأخيرٍ يبلغ مقداره 93 ms، بعد أخذ الحيز الخاص بقناة SACCH بعين الاعتبار. توضح هذه القيمة (عند مقارنتها بـ 37,5 ms من الفقرة السابقة) الفرق الكبير بين تأخير قناة الإشارة الكلامية والتأخير الذي يرافق تبادل المعطيات.

إضافة إلى التوزيع على الأحياز الزمنية، تخضع المعلومات ضمن كل حيز لعملية بعثرة، أي لإجراءِ تفريقٍ داخلي، يمكن الرجوع إلى تفاصيلها في المواصفات المعيارية [١٨].

٥-٤-١-٣ التفريق الخاص بقنوات التحكم

تختلف وتتباين إجراءات التفريق من قناة تحكم إلى أخرى، وذلك وفق إجراءات الترميز التي تسبق التفريق، ووفق التأخير الذي يمكن تقبله للمعلومات التي تحملها هذه القناة. وكمثالٍ على ذلك ، نعرض لإجراءات التفريق الخاصة بقناة SACCH.

ذكرنا في البحث ٥-٣-٣-٤ أن ترميز هذه القناة يقود إلى 456 بتاً، تخضع هذه البتات لإجراء تفريق المجموعات على نحوٍ مماثلٍ أو مشابه لما عرضناه في حالة الإشارة الكلامية، ما يقود إلى ثماني مجموعات يشمل كلٌ منها 57 بتاً. في خطوة تالية، تخضع هذه المجموعات لإجراء تفريق خارجي، حيث توزع على أربع رزم راديوية متتابعة، بحيث تشغل بتات المجموعات الأربعة الأولى الخانات ذات الترتيب الفردي في الرزم الراديوية، بينما تشغل بتات المجموعات الأربعة التالية البتات ذات الترتيب الزوجي ضمن الرزم الراديوية نفسها (انظر الشكل ٥-٣٨). يعني ذلك أن أمد التفريق لهذه القناة هو 4.

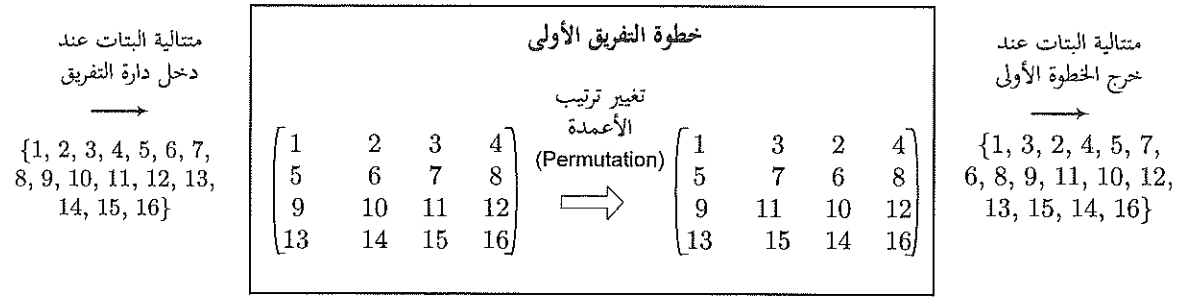


الشكل ٥-٣٨: مبدأ التفريق لقناة SACCH.

٥-٤-٢ التفريق في نظام UMTS

لا تختلف آلية التفريق في نظام UMTS جذرياً عما عرضناه، إذ يشمل خطوتين أساسيتين، يجري في أولاهما تفريق الوحدة الأساسية الحاملة للمعلومات، والمسماة "Transport Block" وفق آلية "تفريق المجموعات"، وهذا يقود إلى مصفوفة يتراوح عدد أعمدتها بين واحدٍ وثمانية، وذلك تبعاً للمدة الزمنية التي يجب أن تُرسل وحدة المعلومات ضمنها، والتي تتراوح تبعاً لنوع التطبيق وخدمة الاتصال المتاحة.

يجري ضمن هذه الخطوة أيضاً -في حال كون المصفوفة مكونة من أربعة أو ثمانية أعمدة- تغييرٌ أو تبديلٌ لترتيب الأعمدة، وهذا الإجراء يُعرف اصطلاحاً باسم "Permutation" (انظر الشكل ٥-٣٩). فعلى سبيل المثال، إذا كان عدد الأعمدة أربعة، فإن بتات كل من العمودين 2 و 3 تتبادل مواقعها ضمن المصفوفة. بعبارةٍ أخرى، يُستعاض عن إجراء التفريق الداخلي في حالة GSM بتبديلٍ متكررٍ لترتيب الأعمدة ضمن المصفوفات التي يقود إليها تفريق المجموعات.



الشكل ٥-٣٩: توضيح لمبدأ تغيير ترتيب الأعمدة ضمن إجراء التفريق في نظام UMTS.

بعد خطوة التفريق الأولى، يجري توزيع وحدات المعلومات على القنوات الفيزيائية، ثم تُمَرَّرُ معلومات كل قناة فيزيائية عبر دارة تفريق ثانية، تقود إلى مصفوفة عدد أعمدتها ثابت ويساوي 30، أما عدد أسطرها، فيتبع طول متتالية البتات الممثلة لمقتطع القناة الفيزيائية. وإذا لم يمتلئ السطر الأخير من المصفوفة، فإن الخانات المتبقية تُملأ أو تُشغل بمعلومات وهمية. تخضع هذه المصفوفة أيضاً إلى تبديل في ترتيب أعمدتها وفق خوارزمية محددة (انظر [٢٣])، وذلك قبل قراءة المعلومات منها لإنجاز خطوات المعالجة التالية.

٥-٥ التعمية

يلي خطوة تفريق المعلومات، كما يبين الشكل ٥-١، إجراء "التعمية" "Encryption"، الذي يهدف إلى توفير تبادلٍ آمنٍ للمعلومات بين طرفي الاتصال، يضمن الحفاظ على خصوصيتها. وننوه في هذا الموضع إلى الفرق بين مصطلح التعمية ومصطلح التشفير، إذ أن إنجاز التعمية (ضمان الحفاظ على خصوصية المعلومات) يمكن أن يتحقق بأكثر من آلية، وإحدى هذه الآليات

هو إجراء "التشفير" "Ciphering" المستخدم في نظم الاتصالات الخلوية. بعبارةٍ أخرى، تمثل التعمية هدفاً يمكن الوصول إليه عن طريق التشفير.

تقود التعمية إلى تغييرٍ في بنية المعلومات المتبادلة، وذلك باستخدام "مفتاح تعميةٍ أو تشفير" "Ciphering Key" لا يكون معروفاً إلا لطرفي الاتصال المعنيين بفحواها. وننبّه في هذا الموضع إلى أن التعمية تُعنى بحماية المعلومات ضمن المجال الذي تكون فيه عرضةً للالتقاط من قِبَلِ أطرافٍ خارجية، دون قدرة مشغل الشبكة على الحيلولة دون ذلك. وهذا المجال هو –في حالة الاتصالات الخلوية– المنفذ أو الرابط الراديوي بين الوحدة المتحركة والمحطة الثابتة التي تغذيها، والذي يمثل جزءاً مفتوحاً ضمن مسار المعلومات، لا يمكن لمشغل الشبكة أن يتحكم بمن يحاول النفاذ إليه. لذا يدل تعبير التعمية في سياق نقاشنا على توفير أمن المعلومات ضمن المنفذ الراديوي حصراً.

تتميز خوارزميات التعمية بأنها لا تضيف أية بتات جديدة إلى سلسلة المعلومات قيد المعالجة، ما يعني أن معدل دفق المعلومات قبل وبعد إجراء التعمية لا يتغير. ففي حالة المعلومات في نظام GSM، يكون دخل وخرج المعلومات عند إجراء التعمية ثابتاً وهو 456 بتاً لكل 20 ms.

يتطلب فهم آلية التعمية إلماماً بمكونات الشبكة وبنيتها، لذا نحيل عرض تفاصيل هذه الآلية إلى الفصل ٦.

٥–٦ تكوين الرزم الراديوية

تمثل الإشارة الناتجة عن عملية التعمية المعلومات الخاصة بكل مشترك، أي المعلومات الأساسية المحصنة بالحشو الذي يتيح كشف وتصحيح الأخطاء الناجمة عن عملية الإرسال. لذا لا تشمل هذه الإشارة أياً من المعلومات الخاصة بالتحكم بأداء الشبكة، ولا تلك الضرورية لتوفير التنسيق الذي يتيح ولوج عدد كبير من المشتركين في آن واحد. فعلى سبيل المثال، لو رجعنا إلى الشكل ٤–١٠ الذي يوضح بنية الرزمة الخاصة بالمعلومات، وقارنا هذه البنية بتفاصيل إجراءات ترميز القناة، لوجدنا أن الخطوات أو الآليات التي سبق شرحها لا تُعنى بسلسلة الاختبار، ولا بمتتاليات الحاشية أو بتات التحكم الأخرى، وإنما تقتصر حصراً على المعلومات "المعمّاة أو المشفرة"، التي تشغل حقلي المعلومات في الرزمة. لذا، ترمي الخطوة التالية في سلسلة معالجة الإشارة إلى صوغِ البنية النهائية للرُّزَم، بأنواعها المختلفة المبينة في الشكل ٤–٤، لذا يُطلق على هذه الخطوة اسم "تكوين الرزم الراديوية" "Burst Forming".

من الممكن تفسير إجراء تكوين الرزم من منظور آخر، فحيث أن الرزم التي تتشكل بعد هذا الإجراء هي المعلومات التي تَشغل القنوات الفيزيائية، يمكن اعتبار هذه الخطوة تحويلاً لمعلومات القنوات الاعتبارية إلى الصيغة التي تحملها القنوات الفيزيائية، أو تجاوزاً "تحويل القنوات الاعتبارية إلى قنوات فيزيائية".

ننوه في هذا السياق أيضاً إلى أن خطوة صوغ الإشارة النهائية تشمل في نظام UMTS إجراءات "نثر الطيف والبعثرة"، كما هو مشارٌ إليه في الشكل ٥–١.

٥-٧ تعديل أو تضمين الإشارة[1]

أشرنا في مقدمة هذا الفصل إلى أننا نفترض إلمام القارئ بأسس ومبادئ التعديل الرقمي بأنواعه، لذا نتجاوز في هذا الموضع مبادئ وتفاصيل تقنيات التعديل، ونكتفي بتقرير بعض النقاط الأساسية التي تهم المهندس من الناحية العملية.

تتيح طرق التضمين المختلفة خياراتٍ متعددة لمطوري نظم الاتصالات، لذا يكمن التحدي الحقيقي أثناء تصميم نظامٍ ما في اختيار نمط أو طريقة التضمين الأنسب لتحقيق الشروط والمواصفات الفنية المطلوبة على أفضل وجه ممكن. ويَحكُمُ ترجيح خيارٍ على غيره واحدةٌ أو أكثر من الخصائص التالية لنظم التضمين:

١) **"الكفاءة الطيفية" "Spectrum Efficiency"**: توضحت في أكثر من موضع أهمية الترددات كمصدر فيزيائي للنظام، وبما أن خطوة التضمين هي التي تحوّل الإشارة من رقمية، تشغل حيزاً محدوداً من "النطاق الترددي الأساسي" "Baseband"، إلى إشارة تمثيلية تشغل مجالاً معيناً من الطيف الترددي المخصص للنظام "RF-Band" ، فإن الكفاءة الطيفية تلعب دوراً مهماً جداً في اختيار طريقة التضمين.

تُعرَّف الكفاءة الطيفية η_{Mod} لأي نمط تضمين بأنها نسبة معدل دفق أو إرسال المعلومات المحمولة على الإشارة الراديوية R_b ، مقيسة بالوحدة bits/s (bps)، إلى المجال الترددي أو النطاق الطيفي الذي تشغله الإشارة B_c ، مقيساً بـ Hz:

$$\eta_{Mod} = \frac{R_b}{B_c} \qquad (٤٥-٥)$$

وكلما ارتفع مقدار الكفاءة، زادت كمية المعلومات التي يتيح نمط التعديل نقلها ضمن كل وحدة ترددية، أي ضمن مجال عرضه 1 Hz، ما يعني أن عرض المجال الضروري لتلبية أو توفير خدمات الاتصال يكون أضيق. يقود ذلك بدوره إلى زيادة سعة الشبكة، مقيسةً إما بعدد المشتركين الذين يمكن توفير الخدمات لهم، أو بكمية المعطيات التي تتيح الشبكة تبادلها. وزيادة السعة هذه تساعد على تحقيق أحد أهم الأهداف المنشودة من خطوة التصميم، وهو تقليص تكاليف إنشاء وتشغيل الشبكة.

من ناحيةٍ أخرى، تقود الكفاءة الطيفية العالية إلى مواصفات سهلة التحقيق من ناحية دارات الترشيح في المرسل والمستقبل، ما يؤدي أيضاً إلى خفضٍ إضافي في تكاليف الإنشاء والتنفيذ.

٢) **"كفاءة الاستطاعة" "Power Efficiency"**: يدل هذا الموسط على مقدار الاستطاعة اللازمة لنقل المعلومات بمعدَّل خطأٍ لا يتجاوز عتبةً محددة، ويمكن مقارنة أنماط التضمين المختلفة من حيث الكفاءة عن طريق حساب معدل الخطأ BER بدلالة E_b/N_0 . وكلما صغر مقدار هذه الاستطاعة، ازدادت كفاءة النظام.

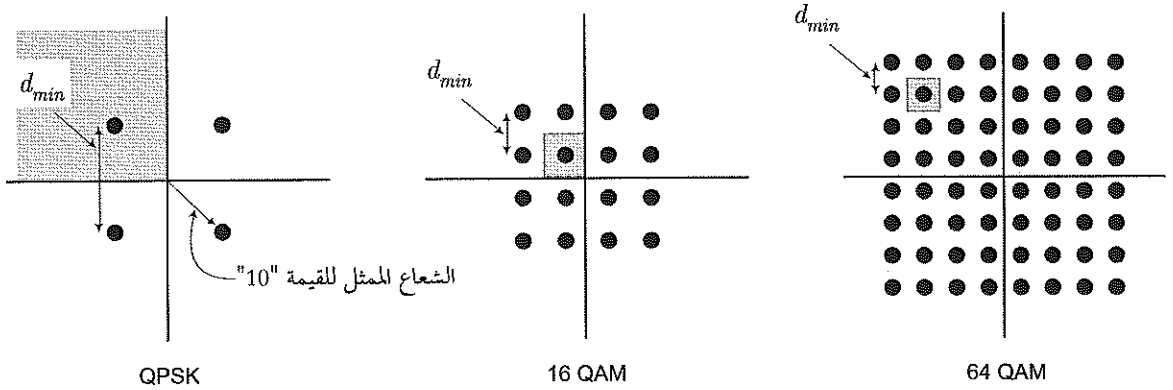
---

[1] سبق التنويه إلى أننا سنستخدم في ما يلي مصطلحي "التعديل" و "التضمين" للدلالة على تعبير "Modulation"، وأن تعبير "تضمين" هو الأدق من الناحية التقنية.

٣) **حصانة نمط التضمين من عوارض التشويش:** من الممكن تقدير حصانة أسلوب التضمين عن طريق التمثيل الشعاعي للقيم المحتملة لمطال وطور إشارة الحامل (الشكل ٥-٤٠). ومن المعلوم أنه كلما ازدادت درجة نمط التضمين، نقصت حصانته، حيث يتضاءل المجال الذي يمكن للمطال والطور التراوح ضمنه، دون أن يؤدي ذلك إلى لبسٍ عند فك التعديل. فكما يوضح الشكل، كلما ازدادت الكفاءة الطيفية بتمثيلِ عددٍ أكبر من البتات بمطالٍ وطورٍ محددين للإشارة المعدَّلة، تقاربت النقاط الممثلة للقيم الشعاعية من بعضها، وسَهُلَ ظهور قيم مبهمة بينها. على عكس ذلك، كلما زادت المسافة بين القيم الشعاعية، ازدادت حصانة النظام ضد التشويش.

يتضح من ذلك أن هناك تعارضاً بين الكفاءة الطيفية والحصانة ضد التشويش، فتحقيق كفاءة عالية يكون إيجابياً من ناحية استثمار المجال الترددي، غير أنه يكون مكلفاً من جانب آخر، إذ يستوجب استخدام أساليب متقدمة لترميز القناة، ما يعني بدوره عبئاً حسابياً أعلى ضمن خطوات معالجة الإشارة.

٤) **الحصانة من الخفوت الانتقائي:** أشرنا في البحث ٣-٢-٢ إلى أنه إذا كان عرض النطاق التردد B_c الذي تشغله الإشارة أكبر من نطاق ترابط القناة فإن الخفوت المهيمن يكون انتقائياً، ومن ثم تكون حساسية الإشارة تجاه التداخل بين الرموز مرتفعة. لذا، يجب مقارنة الموسطين السابقين (B_c و B_{coh})، وتحليل ارتباطهما ببعضهما عند اختيار نمط التضمين. فعلى سبيل المثال، إذا كانت معطيات التصميم تحتِّم القبول بنمط تضمين يقود إلى قيمة كبيرة نسبياً لـ B_c، وثَبُتَ من خلال دراسة طبيعة القناة أنها ذات خفوت انتقائي، فإن ذلك يعني أن مطوري النظام يجب أن يصبوا اهتمامهم أيضاً على طرق فعالة لتسوية الإشارة، أو أية تقنيات أخرى لتجاوز سلبيات الخفوت.



الشكل ٥-٤٠: توضيح لحساسية نمط الضمين تجاه التشويش.

٥) **سعة تَغَيُّر مطال الإشارة الراديوية المُعدَّلة:** تمثل دارات تضخيم الطاقة صنفاً من أعلى مكونات الأجهزة الالكترونية ثمناً، فكلما ارتفعت كفاءة المضخم من ناحية مجاله الديناميكي وأدائه الخطي، ازداد وغلى ثمنه. لذا، تمثّل طرق التضمين

التي تؤدي إلى إشارة راديوية ذات مطال محدود التغير، ويتراوح ضمن مجال ضئيل نسبياً، وسيلةً ناجعة وفعالة لخفضِ التكاليف المرتبطة بالأجهزة. إضافة إلى ما سبق، تسمح نظم التضمين التي تؤدي إلى إشارةٍ ثابتةِ المطال تقريباً باستخدام "مضخمات غير خطية" "Nonlinear Amplifiers" ذات مردودٍ كبير، ما يعني أن عمر وحدات تخزين الطاقة في هذه الحالة يكون أطول بدرجة ملحوظة.

٦) **التشويش على القنوات الترددية المجاورة:** سبق البيان في الفصل ٢ إلى أن طيف الإشارة المعدَّلة يكون في كثير من الأحيان أعرض من نطاق القناة الترددية المتاحة، ما يؤدي إلى تشويشٍ على القنوات الترددية المجاورة، وهذا يزيد من كلفة دارات الترشيح في المستقبل، ويُحتِّم استخدام طرق متقدمة لمعالجة الإشارة.
لذا تكون الحاجة ملحة إلى نمط تضمين يقود إلى تركيزٍ كبيرٍ للطاقة ضمن أضيقِ نطاقٍ ممكن، وإلى غلافٍ للإشارة –في المجال الطيفي– ذي انحدارٍ جانبيٍّ شديد. يُسهِّل ذلك أيضاً الالتزام بمواصفات القوالب الطيفية (Spectrum Masks) المعيارية، المُتضمنة في التوصيات المُلزمة (انظر الشكل ٢-٦)، كما يتيح استخدام مرشحات معتدلة التكاليف.

تعرض الفقرات التالية –في ظل ما سبق من المفاهيم والمبادئ– الخطوط العريضة لطرق التضمين في نظامَي GSM و UMTS.
وقع الاختيار على تقنية "Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK)" كنمطِ تضمينٍ في نظام GSM نظراً لما يلي:

١) يتمتع هذا النمط من التضمين بكفاءة طيفية عالية.

٢) تتمثل المعلومات –وفق تقنية GMSK– بمقدارٍ تفاضلي لتغير طور الإشارة، أي أن المطال لا يحمل أي جزء من المعلومات. لذا تتيح هذه التقنية حصانة عالية من التشويش، إذ أن معظم عوارض التشويش، كالخفوت مثلاً، تَقود إلى تغيُّرٍ في مطال الإشارة.

٣) تتميز إشارة GMSK بمطالٍ ثابت، ما يتيح استخدام مضخمات غير خطية.

٤) يتميز غلاف الاشارة المعدلة وفق GMSK بتركيزٍ واضحٍ للطاقة حول التردد المركزي للقناة، ما يعني أن التشويش على القنوات المجاورة يكون ضئيلاً.

من جانبٍ آخر، تبدي تقنية GMSK بعض المساوىء والعيوب، من أهمها:

١) يقود هذا النمط من التضمين إلى مقدارٍ ملحوظٍ من التداخل بين الرموز، لذا يتطلب نظام GSM تقنياتِ تسويةٍ متقدمة.

٢) كفاءة الطاقة لهذا النمط أقل من غيرها (QPSK على سبيل المثال).

لقد صُمِّم نظام GSM لتقديم خدمات الاتصال الصوتي بالدرجة الاولى، إذ لم يكن تبادل المعطيات شأناً ذا أولوية كبيرة حين طُوِّر الإصدار الأولي لهذا النظام. لذا رُوعِيَ أن يكون تبادل المعطيات متاحاً، لكن بمعدل ضئيل لا يتجاوز 9,6 kbps، وباعتماد تقنية تبديل الدارات. غير أن الحاجة دعت فيما بعد إلى إدخال تحسيناتٍ تتيح تبادل المعطيات بمعدلات أعلى، وقد دفع ذلك إلى استخدام نظم تضمين أخرى أكثر ملاءمةً لهذه الحاجة.

يتجلى ذلك على سبيل المثال في التحسين الذي قاد إلى نظام EDGE، الذي لا يختلف عن نظام GSM التقليدي من ناحية خطوات معالجة الإشارة إلا في نمط التضمين المستخدم، حيث تعتمد تقنية EDGE تضمين الإشارة بنمط 8-PSK، ما يقود إلى كفاءة طيفية أعلى وإلى معدل نقلٍ للمعطيات يفوق ما يمكن أن تقدمه تقنية GMSK بثلاثة أضعاف. أما ثمن هذا التحسين، فهو حصانةٌ أقلمن التشويش، حيث أن الإشارة التمثيلية المعدَّلة وفق نظام GMSK ذات مطالٍ ثابت، ويمثل تغيرُ طور الإشارة من لحظة إلى أخرى بتاً واحداً (مقدار التغير هو إما $\pi/2+$ أو $\pi/2-$)، أما في حالة 8-PSK، فإن الإشارة المعدلة التمثيلية تحتمل ثماني قيمٍ مختلفة للطور، ما يعني أن الحصانة من التشويش تكون أقل، وأن توفير المعدلات المرتفعة للمعطيات، بدرجة مقبولة من الدقة، يتطلب ظروف انتشار جيدة ومستوىً منخفضاً للتشويش.

أتاحت القفزة الهائلة من ناحية عرض القناة المتاح في نظام UMTS (25 ضعفاً مقارنة مع GSM) نقلاً للمعطيات بمعدلاتٍ أعلى بكثير، لذا كان استخدام نمط التضمين QPSK في الإصدار الأولي للنظام كافياً من ناحية الكفاءة الطيفية، ومناسباً من ناحية الحصانة من التشويش. غير أن التطور المتسارع في مجال تطبيقات الاتصالات الخلوية دفع إلى ضرورة توفر معدلات نقلٍ أعلى من تلك التي كانت مقبولة وكافية في الإصدار الأولي للنظام، وقد قاد ذلك إلى تحسيناتٍ عديدة ضمن خطوات معالجة الإشارة، كان من أهمها الانتقال إلى نمط التضمين 16-QAM، المتاح ابتداءً من الإصدار الخامس للنظام (Release 5)، الذي يصف تقنية "High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)"، ويوفر معدلات نقلٍ تصل من الناحية النظرية إلى 14.4 Mbps. تبعت ذلك تحسينات أخرى شملت إدخال أنماط تعديل ذات كفاءة طيفية أعلى (64-QAM على سبيل المثال) واستخدم نظم هوائيات متقدمة، وهذا أتاح الوصول إلى معدلات دفق تقارب –وقد تتجاوز– 100 Mbps. وما زال التطور يدفع باتجاه استخدام نظم تضمينٍ أعقدَ وأعلى كفاءةً تلبيةً للحاجة المتزايدة إلى سرعاتِ نقلٍ أعلى للمعلومات.

كانت هذه بعض الملامح الأساسية التي تتعلق بنظم التعديل أو التضمين، ومن الممكن للقارىء المهتم الرجوع إلى [٢٥] لتفصيل واف عن طرق التعديل الرقمي، وسلبيات وإيجابيات كلٍّ منها.

ختاماً لهذا الفصل، ننوه إلى أن الإشارة تخضع في المستقبل لإجراءاتِ معالجةٍ عكسيةِ التسلسلِ والغرض مقارنةً بالشكل ٥-١، إذ يمثل فك التعديل الراديوي الخطوة الأولى في المستقبل، كما يمثل التحويل إلى إشارة تمثيلية الخطوة الأخيرة. كذلك يقابل كلَّ إجراءِ ترميزٍ في المرسل، إجراءٌ معاكسٌ في المستقبل. ونكتفي في هذا الموضع بالإشارة إلى الخطوات التي تتطلب تقنيات ومبادئ خاصة لم نعرض لها في سياق خطوات المعالجة في المرسل، وهذه الخطوات هي:

١) إذا كان المستقبل مزوداً بهوائيات تتيح استخدام إحدى طرق التباين المختلفة، فإن الإشارة التمثيلية المستقبلة تمر عبر خطوات التجميع المناسبة (انظر البحث٣-٣-٢).

٢) نظراً لأهمية التغلب على ظاهرة التداخل بين الرموز، تمر الإشارة في المستقبل إما عبر دارة تسوية (في حالة GSM)، أو عبر مستقبل متعدد المسالك (في حالة UMTS).

٣) تستلزم إجراءات فك ترميز القناة خوارزمية Viterbi (انظر مبادئ هذه الخوارزمية في [١] و [٢]).

٨-٥ مراجع مختارة

B. Sklar, "Digital communications: Fundamentals and Applications", Prentice-Hall PTR, 2001. [١]

A.F. Molisch, "Wireless communications", John Wiley & Sons, 2011. [٢]

3GPP TS Specifications 46.010, "Full rate speech; Transcoding". [٣]

3GPP TS Specifications 26.071, "AMR speech CODEC; General description". [٤]

Th. F. Quatieri, "Discrete-Time Speech Signal Processing, Principles and Practice", Prentice-Hall PTR, 2002. [٥]

W. C. Chu, "Speech Coding Algorithms", John Wiley & Sons, 2003. [٦]

A. M. Kondoz, "Digital Speech Coding for Low Bit Rate Communication Systems", John Wiley & Sons, 2004. [٧]

R. G. Goldberg and L. Riek, "A Practical Handbook of Speech Coders", CRC Press LLC, 2000. [٨]

L. R. Rabiner and R. W. Schafer, "Introduction to Digital Speech Processing", Now Publishers Inc., 2007. [٩]

3GPP TS Specifications 46.031, "Discontinuous Transmission (DTX) for full rate speech traffic channels". [١٠]

3GPP TS Specifications 46.032, "Voice Activity Detector (VAD) for full rate speech traffic channels". [١١]

J. C. Moreira, P.G. Farell, "Essentials of Error-Control Coding", John Wiley & Sons, 2006. [١٢]

M. Schwartz, "Mobile Wireless Communications", Cambridge University Press, Cambridge, 2005. [١٣]

A. Goldsmith, 'Wireless Commuications', Cambridge University Press, Cambridge, 2005. [١٤]

G. Heine and H. Sagkob, "GPRS: Gateway to Third Generation Mobile Networks", Artech House Inc., 2003. [١٥]

E. Seurre et. al, "GPRS for Mobile Internet", Artech House Inc., 2003. [١٦]

E. Seurre et. al, "EDGE for Mobile Internet", Artech House Inc. 2003. [١٧]

3GPP TS Specifications 45.003, "Radio Access Network; Channel coding". [١٨]

3GPP TS Specifications 45.004, "Radio Access Network; Modulation". [١٩]

J. Eberspächer, et al, "GSM – Architecture, Protocols and Services", John Wiley & Sons, 2009. [٢٠]

[٢١] F. Hillebrand, "GSM and UMTS: The Creation of Global Mobile Communication", John Wiley & Sons, 2001.

[٢٢] 3GPP TS Specifications 43.050, "Transmission planning aspects of the speech service in the GSM Public Land Mobile Network (PLMN) system".

[٢٣] 3GPP TS Specifications 25.212, "Multiplexing and channel coding (FDD)".

[٢٤] C. Berrou, et al, "Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo Codes", IEEE Proceedings of the Int. Conf. on Communications (ICC 93), vol. 2, pp. 1064-1070.

[٢٥] F. Xiong,"Digital Modulation Techniques", Artech House, 2000.

[٢٦] رضوان قسطنطين، "الاتصالات الرقمية"، منشورات جامعة دمشق، ٢٠٠٥.

[٢٧] اتصالات المعطيات والحواسيب، الجمعية العربية السورية للمعلوماتية، دمشق، ٢٠٠٦.

[٢٨] سمير شريف استيتية، "الأصوات اللغوية – رؤية عضوية ونطقية وفيزيائية"، دار وائل للنشر، عمان، ٢٠٠٢.

[٢٩] منصور بن محمد الغامدي، "الصوتيات العربية"، مكتبة التوبة، الرياض، ٢٠٠٠.

٦

بنية الشبكة ومكوناتها الأساسية

يحمل تعبير "بنية الشبكة" "Network Architecture" دلالاتٍ متعددة، إذ يشير إلى المكونات الأساسية التي يجب توفرها ضمن الشبكة كي تكون مؤهلة لتقديم خدمات الاتصالات وفق المعايير المعتمدة عالمياً، كما يدل –من ناحية أخرى– على الهيكلية النموذجية التي ترتبط وتتشابك وفقها مكونات الشبكة المختلفة، وعلى الوظائف الأساسية لكلٍّ من هذه المكونات.

نناقش في هذا الفصل البنية النموذجية لشبكات الاتصالات الخلوية، وذلك من منظورٍ وظيفي. ونعني بذلك أنَّ ورودَ أي عنصرٍ من عناصر الشبكة –ضمن أيٍّ من البُنى التي سنعرض لها– يدل على وجوب توفُّرِ المهام الوظيفية المُمَثَّلة بهذا العنصر، في الموقع المحدد ضمن البُنية المعنية، وذلك بغض النظر عن تكوين هذا العنصر فيزيائياً وعن عدد مرات توفره في الشبكة. إضافة إلى ذلك، يشمل المنظور الوظيفي أيضاً تحديداً وتوصيفاً لـ"الروابط البينية" "Interfaces" التي تُكوِّن البنية التحتية لتبادل المعلومات بين عناصر الشبكة المختلفة، والتي يُمثِّلُ كلٌّ منها –أي الروابط– بما يلي: "نقطة ربط بيني" "Reference Point" تحدد عناصر الشبكة التي يربطها الرابط البيني ببعضها، ومجموعة بروتوكولاتٍ تحكُمُ وتنظُمُ تبادلَ المعلومات عبر هذا الرابط، ومواصفات فنية للوسط الحامل للمعلومات على هذا الرابط، فقد يكون هذا الوسط "كابلاً محورياً" "Coaxial Cable"أو "ليفاً ضوئياً" "Optical Fiber"، أو غير ذلك من وسائط نقل الإشارة.

عند مقارنة البنية النموذجية لشبكات الاتصال الخلوية وفق الإصدارات الأولى بالبُنى التي تعتمدها الشبكات في الوقت الحاضر، نجد بوناً شاسعاً، يتجلى في اختلافات نوعية تمسُّ معظمَ أجزاء الشبكة. فقد أضيفت مكونات خاصة بإتاحة خدمات متقدمة، كما طرأت تعديلاتٌ على بعض عناصر الشبكة، سواءً من ناحية المهام أو من ناحية البنية الفيزيائية، وذلك لتحسين كفاءة تقديم الخدمات واستثمار الموارد المتاحة. كذلك أُدرجت مكونات جديدة إلى الشبكة بُغية استيعاب التقنيات الحديثة لمعالجة ونقل المعلومات التقليدية (كالإشارة الكلامية والمعطيات المُتبادلة بتقنية تبديل الدارات) أو المعطيات الرُّزمية. لذا، والتزاماً بالإطار المرسوم لهذا الكتاب، نقتصر في هذا الفصل على نقاش مهام أهم مكونات الشبكة، وباعتماد بنيةٍ مبسطة، تتيح للقارئ الإلمام بالدور الأساس لكُلٍّ من هذه المكونات.

نلفت النظر في هذا السياق إلى أمرٍ آخر مهم، وهو أن الجهاتِ المعنية بوضع المواصفات المعيارية (3GPP) تتبنى التطورات التقنية التي تُثبت جدارتها للاستخدام على مستوىً عالمي من خلال إقرار هذه التطورات ضمن إصدارات متتابعة، حيث يُشار إلى كل "إصدار" "Release" برقمٍ خاص يميزه عن غيره. ولما كان العرض في هذا الفصل يتمحور حول مكونات الشبكة الأساسية، سيكون النقاش مستنداً إلى هيكلية الشبكة وفق الإصدار المعروف باسم "3GPP Release 99"، أو اختصاراً "Rel-99"، والذي يشمل نظام GSM والتحسينات المُلحقة به (GPRS; EDGE)، إضافةً إلى البنية الأساسية لنظام UMTS. ولا يعني الاقتصار على عرض هذا الإصدار أيَّ تقييدٍ لعمومية وشمولية المبادئ التي سنطرحها، ولا من صلاحيتها، كما أن بنية هذا الإصدار هي الأمثل من ناحية العرض المنهجي، إذ تتيح بياناً واضحاً لخطوات تطور الشبكة. هذا ومن الممكن للقارئ المهتم بأحدث الإصدارات الرجوع إلى صفحة 3GPP الرئيسية [١] للاطلاع على التفاصيل الدقيقة لكلٍّ من الإصدارات.

يجدر التنويه أيضاً إلى أن مشغلي الشبكات، ومصنعي الأجهزة الخاصة بها، يتمتعون بمرونة تامة من حيث كيفية وتوقيت إدراج الخدمات والتقنيات الحديثة، إذ ليس من المعقول أن يُصارَ إلى تحديثٍ جذري لشبكةٍ قائمة مع كل إصدار. لذا يجري تحديث الشبكات وتطويرها وفقَ خُططٍ ومشاريعَ قد تستغرق سنواتٍ لإكمال إنجازها، وتحكمُها القدرات الاستثمارية لمشغلي الشبكات، والاستراتيجيات التقنية والتسويقية، وحاجات ومتطلبات المشتركين. هذا ومن الممكن أن تُنفَّذ الكثير من تحسينات الشبكة عن طريق تحديثٍ للبرمجيات التي تحكم عمل بعض المكونات، إلا أن بعض التحسينات الجذرية يتطلب استبدال بعض العناصر الأساسية.

بعد هذه الفقرات التمهيدية، نستهل أبحاث هذا الفصل بعرضٍ مختصرٍ لأجزاء الشبكة الرئيسية، بغية التعريف ببعض المصطلحات الأساسية، كما ننوه إلى أن استخدامنا للمصطلحات العربية للدلالة على مكونات الشبكة المختلفة، هو من باب التوضيح حصراً، ويهدف إلى ترسيخ المعلومات الأساسية المرتبطة بكل من التعابير المتداولة. ونرى لزاماً علينا في هذا الموضع أن ننصح القارئ مرةً أخرى بأن يعتاد استخدام المصطلحات الانكليزية، فهي الوحيدة المعتمدة من قبل الهيئات الناظمة لقطاع الاتصالات، كما أنها الوحيدة المتداولة في الأوساط الأكاديمية والعاملة في تطوير أو تشغيل الشبكات.

٦-١ التقسيم الوظيفي للشبكة

تتصف بنية شبكات الاتصالات بالتنوع التقني والوظيفي، إذ تتضمن تقنياتٍ مختلفة لتبديلِ الدارات (Circuit-Switching) وتوجيه الرزم (Packet-Switching/Routing)، إضافة إلى منظومات "نقلٍ أو تراسلٍ" "Transmission" متعددة. كما تتصل الشبكة بكلٍّ من "شبكة الهاتف الثابت العمومية (التقليدية)" "Public Switched Telephone Network (PSTN)"، و"شبكة الهاتف الرقمية (شبكة الخدمات المتكاملة)" "Integrated Services Digital Network (ISDN)"، و"الشبكة العمومية لتبادل المعطيات" "Public Data Network (PDN)"، وشبكات خلويةٍ أخرى. نشير في هذا السياق إلى أن المصطلح الجامع المعتمد للدلالة على شبكة اتصال خلوية هو "Public Land Mobile Network (PLMN)"، أي "الشبكة

العمومية (الأرضية) لاتصالات التجوال"، ويُستخدم تعبير "الأرضية" في هذا المصطلح لتمييز الشبكات التي تعتمد محطاتٍ ثابتة (أرضية) للتغذية عن "شبكات الأقمار الصناعية للاتصال" "Mobile Satellite Networks".
تشمل الشبكة أيضاً الأجهزة الخاصة بتوفير الخدمات غير التقليدية، مثل خدمات البريد الصوتي، والنصوص أو الرسائل القصيرة، والخدمات ذات الطابع الترفيهي، إذ تتطلب كلٌّ من هذه الخدمات تجهيزات خاصة، وقواعد معطيات وبيانات ذات سعات كبيرة.

انطلاقاً من هذا التنوع، يجري تقسيم الشبكة إلى أجزاءَ أو شبكاتٍ فرعية، يختص كلٌّ منها بعناوين وظيفية محددة، وذلك وفق ما يلي (انظرالشكل ٦-١):

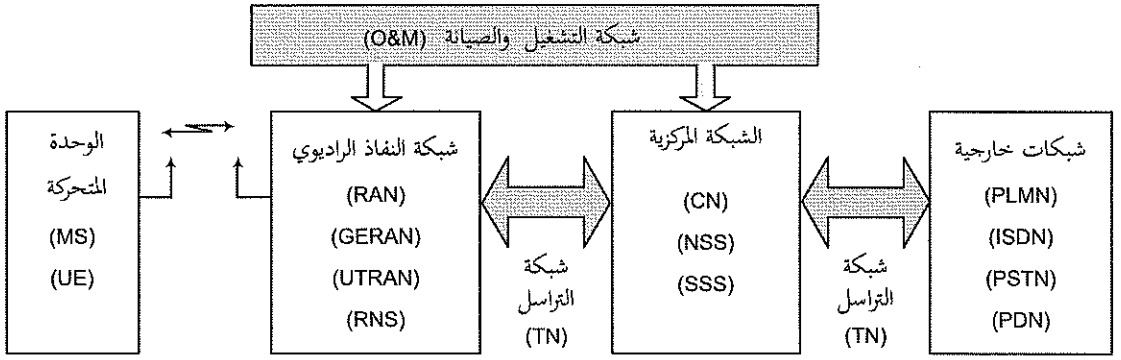
١) "الوحدة المتحركة" "Mobile Station (MS)" أو "User Equipment (UE)": تشمل هذه الوحدة الجهاز و"شريحة أو بطاقة الاشتراك" "Subscriber Identity Module (SIM)"، وأهم وظائف هذه الوحدة إتاحةُ التواصل مع الشبكة، والاستفادة من خدماتها. هذا ويُستخدم مصطلح "Mobile Station" في نظام GSM، أما نظام UMTS والنظم المتفرعة عنه فتعتمد مصطلح "User Equipment".

٢) "شبكة النفاذ الراديوي" "Radio Access Network (RAN)": يلعب هذا الجزء من الشبكة دور صلة الوصل بين المستخدم، ممثَّلاً بالوحدة المتحركة، والمقاسم المركزية. ويكتسب اسمه من كونه يُعتبر وسيلة "نفاذ" المشترك إلى خدمات الشبكة، ولأنه يشمل كل المحطات الثابتة التي تعتمد أنظمة الإرسال والاستقبال الراديوي. لذا، يعرف هذا الجزء أيضاً بأسماء أخرى مثل "شبكة المحطات الثابتة" "Base Station System (BSS)"، أو "الشبكة الراديوية" "Radio network (RN)". كما أدى استخدام تقنيات تعددِ نفاذٍ مختلفة في نظامي GSM و UMTS إلى اختلافِ الجيل الأول من المحطات الثابتة بين النظامين، لذا، شاع استخدام تعبير "GSM/EDGE–RAN (GERAN)" للدلالة على شبكة النفاذ في نظام GSM/EDGE، ومصطلح "UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)" للدلالة على القسم الراديوي في نظام UMTS.

٣) "الشبكة المركزية" "Core Network (CN)": تتكون الشبكة المركزية من مجموعة "مراكز التبديل أو المقاسم" "Switching Centers" التي تتولى اختيار مسارات المكالمات باعتماد تقنية "تبديل الدارات" التقليدية، والموجهات "Routers" المعنية بتوجيه رزم المعطيات بين مكونات الشبكة المختلفة. كما تشمل الشبكة المركزية "قواعد المعطيات" "Data Bases" الضرورية لتنسيق وإدارة ولوج المشتركين إلى خدمات الشبكة المتعددة. ننوه في هذا السياق إلى أن تعبير "مركز التبديل" هو الذي يدل على الوحدة الوظيفية المعنية باختيار وتبديل الدارات التي تُحمل عليها المعلومات الممثلة للمكالمات، بينما يدل مصطلح "المقسم"، الموروث من بنية شبكة الهاتف الثابت التقليدية، على منظومة التجهيزات التي تكون في موقع مركزي ضمن الشبكة، يشمل ذلك مركز التبديل وغيره من الوحدات الوظيفية الأخرى. ونظراً لشيوع استخدام تعبير "المقسم"، سنستخدم في ما يلي المصطلحين بنفس المعنى، إلا في المواضع التي تستدعي تمييزاً لمركز التبديل عن غيره من مكونات المقسم الأخرى.

يشير تعبير "المركزية" في الاسم الدال على هذا الجزء من الشبكة على أهميته المميزة، حيث لا يمكن إتمام أي اتصال أو الاستفادة من أيٍّ من خدمات الشبكة دونه، كما أن خدمة الاتصال التقليدية (أي الاتصال الهاتفي)، والمزايا الأساسية مثل ميزة الانتظار، والاتصال متعدد الأطراف، والإعلام عن مكالمة فائتة، والحجب، وخدمات الفوترة، تُوَفَّرُ وتُنجَزُ كلها من قِبل برمجيات خاصة ضمن نظام تشغيل المقاسم. يضاف إلى ذلك الدور الذي تقوم به المقاسم والموجِّهات كصلةِ وصلٍ مع الشبكات التي تمثل "العالم الخارجي" بالنسبة إلى الشبكة. لذا، لا غرابة في اعتبار هذا الجزء "نواة الشبكة"، ومركزها الذي تتمحور أجزاء الشبكة الأخرى حوله.

لقد أُصطلِح على اعتبار الشبكة المركزية مؤلفةً من جزأين مستقلين، يشمل الأول المقاسم والتجهيزات التي تتولى تقديم الخدمات التقليدية، ويُعرف باسم "نطاق أو قسم تبديل الدارات" "Circuit Switched Domain (CS-Domain)"، أما الجزء الثاني فيشمل الأجهزة التي تتيح تبادل المعطيات الرزمية باعتماد تقنيات توجيه الرزم (مثل منظومة بروتوكولات TCP/IP)، ويُعرف باسم "نطاق أو قسم توجيه الرزم" "Packet Switched Domain (PS-Domain)". و يتيح هذا الفصلُ أو التصنيف مرونةً أكبر في تطوير كل جزء على حدة، ووضوحاً في الفصل بين مهام المكونات المختلفة ضمن كلٍّ من الجزأين.



الشكل ٦-١: الأجزاء الفرعية الأساسية للشبكة.

٤) تمتد شبكة الاتصالات على مساحات جغرافية واسعة، فقد تبعد المحطات الثابتة عن بعضها أو عن نقاط ربطها مع الشبكة المركزية عشرات الكيلومترات، كما تكون المقاسم (مراكز التبديل) والموجهات الرئيسية موجودة في مدن رئيسية منتقاة، تفصلها عن بعضها مسافات شاسعة أيضاً. يؤدي ذلك إلى أن ربط مكونات الشبكة مع بعضها البعض يتطلب خطوط نقلٍ طويلة ومتشعبة، ومنظوماتٍ تعتمد تقنياتِ تراسلٍ مختلفة.

تؤلف خطوط النقل هذه مع التجهيزات الخاصة بها "شبكة التراسل" "Transmission Network (TN)"، التي تعتبرُ شبكةً موازيةً للشبكة الأصلية، وجزءاً مستقلاً من ناحية مهامه.

هذا وننوه إلى أننا نستخدم مُصطلَحَي "تراسل" "Transmission" و "نقل" "Transport" للدلالة على المعنى ذاته.

٥) لابد للشبكة من منظومةٍ تتولى مهام إدارة وتنسيق عمل كل مكوِّن من مكونات الشبكة، وتشمل تجهيزاتٍ وبرمجياتٍ خاصة بمراقبة ورصد الأعطال ضمن الشبكة، ومتابعة أداء عناصرها المختلفة، وتنسيق الإجراءات الواجب اتباعها في حال ظهور أي عطل أو قصور في الأداء. يُعرف مجموع هذه التجهيزات والبرمجيات باسم "منظومة إدارة الشبكة" أو "منظومة تشغيل وصيانة الشبكة" "Operation Support System (OSS)".

نولي اهتمامنا في ما يلي من أبحاث كلاً من الوحدة المتحركة وشبكة النفاذ والشبكة المركزية، أما شبكة التراسل ومنظومة التشغيل والصيانة فلا تقعان ضمن الإطار المرسوم لهذا الفصل.

هذا وتتطلب المتابعة المثلى للتفاصيل التي سنناقشها إلماماً وافياً بنظام التعريف بالمشترِك، لذا، نخصص البحث التالي لبيان أهم معالم هذا النظام ذي الدور الأساسي في تحقيق مرونةِ تقديمِ خدمات الاتصال للمشترك، حتى أثناء تنقله وتجواله.

٦-٢ نظام التعريف بالمشترك

يتألف نظام التعريف بالمشترك من مجموعة من الأرقام وقواعد المعطيات التي تتيح تحديد هويةِ ورقمِ ومكان وجود المشترك، إضافة إلى الجهاز الذي يستخدمه، على نحوٍ دائم. تسمح هذه الأرقام وقواعد المعطيات بمتابعة المشترك عند تنقله جغرافياً، وبإدارة ولوجه إلى الشبكة، كما تُعتبر من أهم ما تعتمد عليه آليات التحكم بخطوات اتصالات المشترك.
نلفت الانتباه إلى أننا نستخدم تعبيري "المتابعة" و"الإدارة" في هذا السياق من منظور تقني بحت، أي من وجهة نظر مكوِّنات الشبكة وتجهيزاتها، أما التعامل مع المشترك من وجهة نظر قانونية وتسويقية، فهو مسؤوليةٌ تضطلع بها أقسامٌ خاصة ضمن الشركة المُشغِّلة للشبكة، مثل قسم خدمة الزبائن، وقسم التسويق. وهذا الصنف من المتابعة والإدارة هو الذي يُعنى باسم وعنوان وقيود المشترك، ويتطلب أنظمةً وبرمجياتٍ خاصة، لاتندرج ضمن أبحاث هذا الفصل.

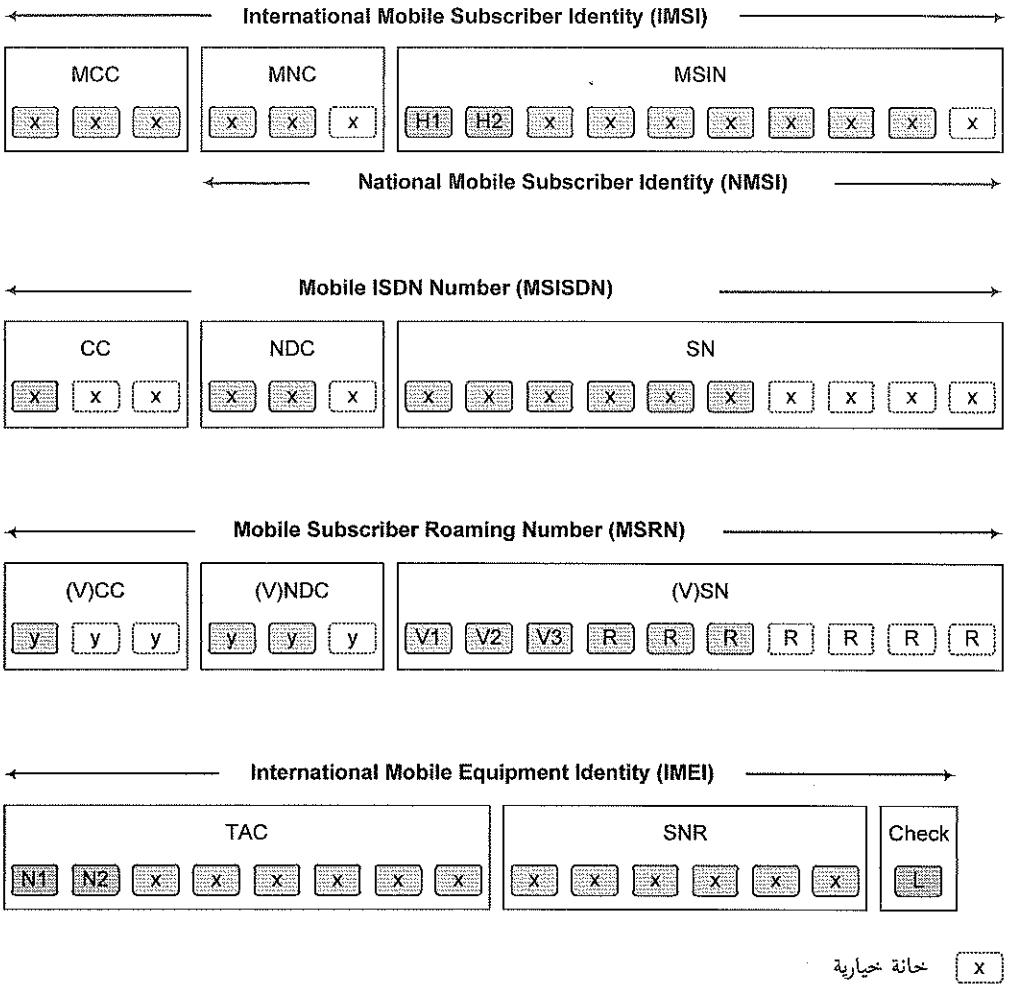
٦-٢-١ الأرقام الدالة على المشترك وهويته

تعتمد النظم الخلوية على مجموعة من الأرقام الفريدة، التي تتيح تعريف المشترك على نحوٍ لا لبس فيه، وهذه الأرقام هي (انظر الشكل ٦-٢):

١) "هوية المشترك (الدولية)" "International Mobile Subscriber Identity (IMSI)": يمثل هذا الرقم القيدَ الأساسي المتعلق بالمشترك، وهو رقمٌ فريدٌ، ليس ضمن الشبكة التي يكتتب فيها المشترك فحسب، وإنما على مستوىً عالميٍّ أيضاً، فرقم IMSI لا يمكن أن يتشارك فيه اثنان، حتى لو كانا مكتَتِبَيْن في شبكتين متباعدتين جغرافياً ومختلفتين إدارياً، وهذا ما يشير إليه تعبير "International" ضمن المصطلح التقني.

يتألف هذا الرقم من ثلاثة حقول، تحوي المعلومات الآتية (انظر التفاصيل في [٢]):

- "الرمز القطري" "Mobile Country Code (MCC)": يدل هذا الحقل المؤلف من ثلاث خانات على القطر الذي تقدم الشبكة خدماتها ضمنه، وهو –على سبيل المثال– 417 لسوريا، و 602 لمصر، و 420 للسعودية. يشرف على تخصيص هذا الرمز وإدارة التوصياتِ والجداولَ الخاصة به، والتي تعرف بسلسلة التوصيات ITU-E.212 [٣]، "قطاعُ التقييس ضمن الاتحاد الدولي للاتصالات" "ITU-Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)".



الشكل ٦-٢: أهم الأرقام الدالة على المشترك والوحدة المتحركة.

- "رمز الشبكة المحلي" "Mobile National Code (MNC)": نظراً لتعدد الشبكات ضمن القطر الواحد، يتيح حقل MNC التمييز بين الشبكات الفاعلة ضمن الحدود الجغرافية لدولةٍ ما. يتألف هذا الحقل من خانتين أو ثلاثة، تبعاً للمنطقة الجغرافية. وتكون الهيئة الناظمة لقطاع الاتصالات ضمن كل قطر مسؤولةً عن تخصيص هذه الأرقام، وهي

أيضاً المخولة بإبلاغها للاتحاد الدولي للاتصالات، الذي يتولى مهام تحديث اللوائح والجداول المتعلقة بها، وتعميمها عالمياً ضمن الإصدارات والوثائق المعتمدة.

يُمنَح هذا الرقم على نحوٍ تسلسلي، فهو مثلاً 01 لشركة Syriatel، و 02 لشركة MTN Syria، المرخص لهما بتقديم الخدمات في سوريا. وإذا كثر عدد الشبكات ضمن الدولة الواحدة إلى حدٍ يتجاوز 99، يُعَيَّن رمزٌ قطري إضافي للبلد، حتى يظل نظام الترقيم فريداً. وهذه هي الحال في الهند على سبيل المثال، حيث يوجد 99 شبكة مختلفة، معرفة على الرمز القطري 404، و 86 شبكة معرفة على الرمز القطري 405 [٣].

- "هوية المشترك ضمن الشبكة " "Mobile Subscriber Identity Number (MSIN)": يتكون هذا الحقل من تسع أو عشرة خانات، تبعاً لعدد خانات حقل MNC. يدل هذا الحقل على هوية المشترك المحلية ضمن الشبكة، ويُمنح من قبل المشغِّل.

يتيح الحقلان MNC و MSIN مجتَمِعَيْن تمييزَ المشترك ضمن القطر الواحد على نحوٍ فريد، لذا يُعرف الرمز المقابل لهما باسم "هوية المشترك القطرية" "National Mobile Subscriber Identity (NMSI)" (انظر الشكل ٦-٢).

عندما يكتتب شخصٌ ما في شبكة اتصالات، يحصل على الشريحة التي تخوله الولوج إلى الشبكة، وتكون هوية المشترك IMSI محفوظةً في ذاكرة الشريحة، وتبقى محفوظة فيها على نحوٍ دائم، ما يعني أن الشريحة المزوَّدة بهذا الرقم هي التي تُمثِّل المشترك من منظور المكونات الفيزيائية للشبكة، أما التفاصيل الأخرى المتعلقة به، مثل اسمه وعنوانه، فهي جزءٌ من مسؤوليات قسم خدمة الزبائن كما ذكرنا، الذي يتكفل بالإدارة المنهجية لهذه المعلومات من وجهة نظر قانونية وتسويقية.

ننوه أيضاً إل أن الشبكة التي يكتتب بها المشترك وتمنحه شريحة الاشتراك تعرف باسم "شبكة الاكتتاب" أو "شبكة الاشتراك"، ويُشار إليها مجازاً بتعبير "الشبكة الأم" "Home Network".

٢) "هوية المشترك المؤقتة" "Temporary Mobile Subscriber Identity (TMSI)": يقتضي الحفاظ على خصوصية المشترك عدم إرسال المعلومات الخاصة به والدالة على هويته عبر الرابط الراديوي، ذلك أن هذا الرابط يمثل جزءاً مفتوحاً ضمن هيكلية أو بنيان الشبكة (أي غير خاص بالمعنى الإداري أو القانوني)، ولا يمكن للمشغل أن يتحكم بمن يلج إليه، وهو المنفذ الذي يمكن للهواة والمتطفلين التنصت من خلاله على الإشارة اللاسلكية. لذا، بذل مصممو أنظمة الاتصالات الخلوية جهداً مميزاً عند تحديد تسلسل خطوات إنشاء وإجراء الاتصالات المختلفة، والمعلومات المتبادلة في كل خطوة، بحيث لا تكون هناك حاجة إلى تبادل هوية المشترك (IMSI) إلا في حالات ضرورية أو استثنائية. أما في غالب الحالات، فإن هذه الهوية يُستعاض عنها بهوية مؤقتة، تخصصها الشبكة للمشترك ضمن آليات محددة (انظر [٢])، وذات بنية تختلف من مشغلٍ إلى آخر (انظر [٥]).

هذه الهوية ذات صلاحية مؤقتة، إذ يجري تحديثها عند انتقال المشترك عندما يبدل المشترك "منطقة وجوده" (سيرد تعريفها في البحث ٦-٧). فإذا مُنح المشترك هويةً مؤقتةً جديدةً، أُرسِل رقمها إلى الوحدة المتحركة، حيث يُحفظ في ذاكرة الشريحة كي يُستخدم أثناء إجراء الاتصالات كبديل عن رقم IMSI الحقيقي طيلة مدة بقاء المشترك ضمن منطقة جغرافية محددة.

٣) "هوية المشترك المؤقتة الخاصة بتبادل المعطيات (الرزمية)" "P-TMSI": يؤدي هذا الرقم دوراً مشابهاً لدور الهوية المؤقتة TMSI، إلا أنه يُستخدم للحفاظ على سرية هوية المشترك عند تبادل المعطيات الرزمية، ويمنح أو يخصص من قبل الموجّه الذي يوجد المشترك ضمن منطقة خدمته. هذا وقد يتساءل القارئ عن الغرض من تعريف هذا الرقم مع توفر رقم TMSI، يكمن الجواب على ذلك في أن مكونات الشبكة الخاصة بخدمات تبادل المعطيات أُدخلت بحيث تكون قادرةً على تقديم الخدمات على نحوٍ مستقل تماماً عن الشبكة التقليدية، وبحيث تعتمد خطوات أو آليات الاتصالات المختلفة على المعلومات المتاحة لمكونات تبادل المعطيات حصراً.

٤) "رقم هاتف المشترك" "Mobile Subscriber ISDN Number (MSISDN)": هذا هو رقم الهاتف الفعلي للمشترك، الذي يتداوله ويتبادله مع من يود التواصل معهم، والذي يُمَيَّزُ به عن غيره. فهو بذلك مختلف جذرياً عن رقم هوية المشترك IMSI، ففي حين يمثِّل رقم IMSI رقماً إدارياً، يدل MSISDN على رقمٍ خَدَمي، وهو الرقم المستخدم للاتصال بالمشترك.

عند الاكتتاب أو الاشتراك، يُمنح المشترك الشريحة، ثم يجري ربط رقم الهاتف MSISDN بهوية المشترك IMSI، بحيث يصبح الرقمان مقترنين، ويتيحان تحديد المشترك المطلوب على نحوٍ فريد.

يتألف رقم MSISDN من ثلاثة حقول هي (انظر الشكل ٦-٢):

- "المفتاح الدولي" "Country Code (CC)": يدل هذا الرقم على البلد أو القطر الذي تقدم الشبكة خدماتها ضمنه، ويتألف من واحدة إلى ثلاث خانات، فهو على سبيل المثال 963 لسوريا، و 20 لمصر. ويشرف على تخصيص وإدارة هذا الرقم الاتحاد الدولي للاتصالات، وهناك جملة توصيات خاصة بذلك، مجموعة تحت الرمز ITU-E.164 [٤].
- "مفتاح الشبكة القطري" "National Destination Code (NDC)": يتيح هذا الحقل التمييز بين الشبكات المختلفة ضمن القطر الواحد، بحيث يسهل على مستخدمي الهاتف معرفة الشبكة المقصودة. ويتألف هذا الرقم من خانتين إلى ثلاثة.
- "رقم المشترك" "Subscriber Number (SN)": هذا الرقم هو الذي تخصصه الشبكة للمشترك، وعدد خاناته متغير، يحكمه عدد خانات حقل NDC، والعدد الكلي لخانات MSISDN، الذي لا يمكن أن يتجاوز 15 خانة. هذا ويجري تخصيص حقلي NDC و SN من قبل الشركات المشغلة والهيئات القطرية المعنية.

هناك بعض الملاحظات أو النقاط التي يجدر التنويه إليها، حتى تتجلى للقارئ فوائد أخرى من تعريف رقمين متباينين لكل من هوية المشترك ورقم هاتفه، منها:

أولاً: يتيح التفريق بين الرقمين مرونةً في تعديل خطط ترقيم شبكات الهواتف ضمن القطر الواحد، دون الحاجة إلى تغيير بطاقات الاشتراك "الشرائح"، فقد يقتضي نمو عدد المشتركين أو الترخيص لمشغلين جدد تغييرَ عدد الخانات ضمن حقل NDC أو حقل SN، وهذا التغيير يمكن أن يتم دون أن يستدعي أي تعديل على بطاقات المشتركين.

ثانياً: تسمح المواصفات المعيارية بربط هوية المشترك بأكثر من رقمٍ هاتفي، وهذا يتيح للمشترك تَملُّكَ أكثر من رقم MSISDN تحت رقم IMSI واحد، بحيث يمكن -على سبيل المثال- تخصيص رقم هاتف مهني أو وظيفي، مختلف عن الرقم المخصص للاستعمال الشخصي، أو تعيين رقم خاص بخدمات الاتصال الصوتية، وآخر لخدمات تبادل المعطيات.

ثالثاً: يتيح تداول رقم الهاتف الحفاظ على خصوصية المشترك أو هويته، ممثلة بـ IMSI.

٥) "رقم هاتف المشترك المؤقت" "Mobile Subscriber Roaming Number (MSRN)": يمثل هذا الرقم من الناحية العملية رقم الهاتف الذي تستخدمه الشبكة لتوجيه المكالمات الواردة إلى المشترك، وذلك أثناء تنقله بين مناطق الخدمة التابعة لمقاسم مختلفة. وقد يُفهم من المصطلح الإنكليزي لأول وهلة أن الرقم مرتبطٌ بتجوال المشترك بين شبكات مختلفة، إلا أن هذا مخالفٌ للواقع، لأن مصطلح "التجوال" "Roaming" يعني من منظور الشبكة تبديل نقطة النفاذ إليها نتيجة تنقل المشترك جغرافياً، وهذا المعنى العام يشمل أيضاً تبديل الخلية التي يوجد المشترك ضمن منطقة تغذيتها، باعتبارها -أي الخلية- النقطة التي تصل المشترك بالشبكة. لذا، لا يقتصر تعبير التجوال على ميزة النفاذ إلى شبكاتٍ خارجية، بل يشمل أيضاً الاستفادة غير المقيدة جغرافياً حتى من خدمات الشبكة الأم (Home Network). بذلك تكون إمكانية النفاذ إلى شبكات خارجية والاستفادة من خدماتها حالةً خاصةً من حالات التجوال، يُتيحها مشغلو الشبكات كميزةٍ أو خدمةٍ إضافية للمشترك. فإذا كان من الممكن استخدام خدمات شبكة أخرى ضمن القطر الواحد (في الأماكن التي لا تتوفر فيها تغطية الشبكة الأم على سبيل المثال) عُرفت هذه الميزة باسم "التجوال القطري" "National Roaming"، أما إذا كانت الشبكة المضيفة في قطر آخر فإن الميزة تُعرف باسم "التجوال الدولي" "International Roaming".

يُستخدم رقم MSRN إذن لتسهيل توجيه الاتصالات الواردة للمشترك، أياً كان مكانه، سواءً ضمن الشبكة الأم أو خارجها، غير أن ضرورته يسهل شرحها في حالة التجوال الدولي على وجه الخصوص، كما يبين المثال التالي:

لنفترض وجود مشترك سوري في بلدٍ آخر (بريطانيا على سبيل المثال)، فإذا كانت خدمة التجوال الدولي مُفَعَّلة أو متاحة لهذا المشترك، يكون أثناء وجوده في بلد الزيارة ضمن تغطية شبكة اتصالات بريطانية، وكما سيمر لاحقاً، تكون الشبكة السورية، أي الشبكة الأم، على علمٍ باسم الشبكة البريطانية وهويتها.

عند ورود اتصال لهذا المشترك من شبكة الهاتف الثابت مثلاً، تباشر الشبكة الأم توجيه الاتصال إلى المقسم الذي يوجد المشترك حالياً ضمن منطقة تغطيته، ويجري تحديد مسار المكالمة عبر تحليل رقم الهاتف المطلوب (MSISDN)، واشتقاق اسم الشبكة منه (أو رقم القطر ورقم الشبكة في حالة ورود الاتصال من خارج سوريا). فإذا اعتمدت آلية التوجيه على نتائج تحليل رقم MSISDN الأصلي، فإن المكالمة ستُوجَّهُ إلى سوريا، نظراً لأن المفتاح الدولي CC للرقم المطلوب هو 963، كونه سوري المنشأ، ما يعني أن المشترك لن يتلقى المكالمة. من جانبٍ آخر، لا يمكن استخدام رقم هوية المشترك IMSI لوجوب الحفاظ على خصوصيته من ناحية، ولأنه رقم إداري ضمن الشبكة الأم، وغير معروف لمقاسم الشبكات الأخرى، من ناحية أخرى.

لذا، لابد لتوجيه المكالمة توجيهاً صحيحاً من استبدال رقم المشترك MSISDN على نحوٍ مؤقت، برقمٍ آخر، يتيح للمقاسم

المختلفة توجيه مسار المكالمة في الوجهة الصحيحة. ومن الضروري أن يكون هذا الرقم دالاً على الشبكة البريطانية في حالة المثال الحالي، أي يتألف من مفتاح دولي CC ومفتاح قطري NDC يدلان على الشبكة التي يوجد المشترك ضمن منطقة تغطيتها في الوقت الراهن. لتحقيق ذلك، تُخصِّص "الشبكة المُضيفة" "Visited Network" رقماً بديلاً لكل مشترك، تبعاً للمقسم الذي يوجد المشترك حالياً ضمن منطقة خدمته، ويجري إبلاغ الشبكة الأم بهذا الرقم. فإذا وردت أية مكالمة لهذا المشترك، أمكن توجيهها إلى المقسم الصحيح.

يتميز رقم MSRN بالبنية ذاتها التي عرَّفناها لـ MSISDN، أي أنه يتألف من ثلاثة حقول هي CC و NDC و SN، تكون مشغولة بأرقامٍ دالةٍ على الشبكة التي يوجد ضمنها.

بقي أن نشير إلى أن خطوات توجيه المكالمات الواردة التي شرحناها تستخدم على النحو ذاته ضمن الشبكة الأم أيضاً، وفي ذلك توحيدٌ للآليات العامة للتحكم بالاتصالات، وتبسيطٌ للوحدات البرمجية التي تنجز هذه الآليات. وسنعرض لتفاصيل توجيه الاتصالات الواردة للمشترك في الفصل ٧.

٦) "هوية الجهاز المستخدَم" "International Mobile Equipment Identity (IMEI)": تُميِّز نظم الاتصالات الحديثة بين المشترك والجهاز أو الوحدة المتحركة التي يستخدمها، ويتيح هذا التمييز مرونةً في تطوير الخدمات المختلفة التي تقدمها الشبكة، خصوصاً وأن تطوير هذه الخدمات أو إمكانية استخدام التطبيقات المتطورة يكون مرتبطاً ارتباطاً مباشراً بإمكانيات وميزات الجهاز المستخدم. إضافة إلى ذلك، يتيح هذا التمييز –من الناحية الإدارية ومن ناحية خدمة الزبائن– الفصل بين صعوبات ومشاكل الاستخدام التي قد تطرأ بسبب عدم الاشتراك بالخدمة أو الميزة، وتلك التي تتعلق بإمكانيات الجهاز المستخدَم، والإعدادات التي يتطلبها هذا الجهاز للتوافق مع متطلبات الخدمة. هذا ونلفت النظر إلى أنه ليس لهوية الجهاز المستخدم –من الناحية الفعلية– أية علاقة مباشرة بهوية المشترك (IMSI) أو رقم هاتفه (MSISDN)، لذا لايمكن اعتبارها جزءاً من نظام التعريف بالمشترك. غير أننا ندرجها تجاوزاً ضمن هذا النظام، كونَ الجهاز والشريحة يمثلان طرف الاتصال مع الشبكة.

يميز رقم IMEI الجهاز أو الوحدة المتحركة على نحوٍ فريد، ويشمل الحقول التالية (انظر الشكل ٦-٢):

- "رمز النموذج" "Type allocation Code (TAC)": يدل الرقم في هذا الحقل على نوع الجهاز واسمه التسويقي، وعلى الشركة المصنعة، وعلى الجهة التي أشرفت على فحصه فنياً ومنحت ترخيص إطلاق الجهاز كمنتجٍ صالحٍ للتداول في الأسواق. وهذه الجهة، ممثَّلةً بالخانتين N1 و N2، تكون مخولة من قبل الجهات القطرية المعنية أو من قبل "رابطة أو ائتلاف مشغلي الشبكات الخلوية" "GSM Association" بإعطاء مثل هذه التراخيص، وفق شروط فحصٍ واختبارٍ دقيقة للأجهزة. أما نوع ونموذج الجهاز، فتدل عليه الخانات الستة المتبقية، التي تُحدَّدُ أيضاً من قبل الجهة المعنية بالترخيص، بالتعاون مع الجهة المصنعة.

- "الرقم التسلسلي" "Serial Number (SN)": يمثل هذا الرقم هوية كل جهازٍ كوحدة فيزيائية مستقلة أو فريدة ضمن سلسلة الإنتاج، ويميزه عن دونه من الأجهزة المطابقة من ناحية النموذج والاسم التسويقي.

- "خانة التدقيق" "Check Digit": يكمن الغرض من هذه الخانة في توفير آليةٍ للتأكد من صحة رقم IMEI عند تبادله بين أجزاء الشبكة، وتُحسب هذه الخانة بدلالة بقية الخانات وفق خوارزمية خاصة تعرف باسم "Luhn Formula".

إضافة إلى المعلومات السابقة، من الممكن أن تسأل الشبكة عن رقم أو نسخة الإصدار البرمجي الذي يحكُمُ عمل الجهاز، لذا يُرمز لهذه النسخة بخانتين عوضاً عن خانة التدقيق، وهذا يقود إلى الرقم الذي يعرف اصطلاحاً بـ IMEISV (انظر [٦] لكل ما يتعلق برقمي IMSI و IMESV من تفاصيل).

تُستخدم هوية الجهاز من قبل المشغل لتحديد الأجهزة الصالحة للاستخدام، وتمييزها عن تلك التي قد تسبب مشاكل فنية ضمن الشبكة، أو عن الأجهزة المسروقة. وهذا يتيح للمشغل رفض تقديم الخدمة للمشترك في حال وجود مشاكل فنية أو قانونية تتعلق بالجهاز الذي يستخدمه. تطلب الشبكة إرسال رقم IMEI ضمن المعلومات التي تتبادلها مع المشترك فور استخدام الجهاز، حيث يجري حفظ هذه الهوية في سجل خاص، سنتناوله بالتعليق والشرح لاحقاً في البحث ٦-٦-٥.

تمثل الأرقام التي ذكرناها أهم ما تتداوله الشبكة أثناء خطوات ولوج المشتركين إليها وخلال أطوار الإتصال المختلفة. وهناك أرقام أخرى تُستخدم في حالات خاصة، أو ذات طبيعة إدارية ضمن الشبكة، يمكن الرجوع إلى شرحٍ مفصلٍ لها في [٢].

٦-٢-٢ سجل مقر الاشتراك

عندما يحصل المشترك على الشريحة الخاصة به بعد اكتتابه أو اشتراكه بخدمات الشبكة، يجري تسجيل أو حفظ أهم المعلومات المتعلقة بنوع وطبيعة ومزايا اشتراكه في سجلٍّ خاص ضمن الشبكة. تشمل هذه المعلومات (أي معلومات الاشتراك أو الاكتتاب) على سبيل المثال رقم هوية المشترك (IMSI)، ورقم هاتفه (MSISDN)، وطبيعة اشتراكه (لاحق الدفع أو مسبق الدفع)، والخدمات المتاحة له.

يتمثل سجل الاكتتاب من الناحية الوظيفية بقاعدة معطيات ضخمة، تحوي المعلومات المتعلقة بكل مُشتركي الشبكة. أما من الناحية الواقعية فإن بيانات المشتركين تكون موزعة على عدة قواعد معطيات جزئية، يكون كل منها (غالباً) ملحقاً بمقسمٍ في موقع جغرافي مختلف. ولما كانت قاعدة المعطيات هذه ضمن مكونات الشبكة الأم، فقد أُصطلح على تسميتها "سجل مقر الاشتراك" "Home Location Register (HLR)".

يمثّل إجراءُ حفظِ المعلومات المتعلقة بالمشترك في سجل HLR تعريفاً للشبكة بهوية هذا المشترك، وإيعازاً لها بأنه مخوَّل بالولوج إلى الشبكة والاستفادة من خدماتها. وبدون توفر هذه المعلومات، لا يمكن للشبكة أن تعرف ما هي الأرقام التي يجب توجيه المكالمات منها أو إليها. ولما كانت أهم معلومات الاكتتاب محفوظةً على الشريحة التي يحصل عليها المشترك، فإن هذا الإجراء يمثل أيضاً ربطاً مباشراً بين الشريحة والشبكة، وهو الخطوة الأولى التي تتيح إمكانية تبادل المعلومات بين المشترك -مُمثلاً بالشريحة- ومكونات الشبكة المختلفة.

يتحقق الربط بين المشترك وقاعدة المعطيات الجزئية التي تحفظ القيود والبيانات الخاصة باشتراكه (أو بتعبيرٍ أدق بين بطاقة الاشتراك والسجل) عن طريق خانتين ضمن رقم المشترك MSIN، تدلّان على هوية قاعدة المعطيات ضمن الشبكة، أي هوية سجل HLR الذي يحوي معلومات المشترك)، وهاتان الخانتان هما H1 و H2 في الشكل ٦-٢. هذا يعني أنه عند الحاجة لمعرفة أية معلومات عن المشترك، يمكن الرجوع إلى هذا السجل لطلبها أو تحصيلها.
إضافةً إلى ذلك، يجب أن يتوفر ربطٌ واضحٌ بين رقم هاتف المشترك MSISDN وسجل HLR الذي يحوي بياناته، ويتحقق ذلك على أرض الواقع عن طريق توزيعٍ منهجي لأرقام MSISDN وربطها مع هويات الاشتراك IMSI، بحيث تكون كل أرقام MSISDN التي تتشارك أول خانتين ضمن حقل رقم المشترك SN (انظر بنية رقم MSISDN في الشكل ٦-٢)، مرتبطة بأرقام هويات معرفة على سجل HLR نفسه. بذلك يمكن الاستدلال من هاتين الخانتين على هوية سجل HLR.

تحفظ معلومات المشترك في سجل HLR ما دام اشتراك المستخدم قائماً، أي ما دامت الشريحة صالحة للاستخدام ضمن الشبكة، كما يحوي هذا السجل على معلومات أخرى مهمة، سنأتي على ذكر بعضٍ منها لاحقاً.

٦-٢-٣ سجل المقر الحالي

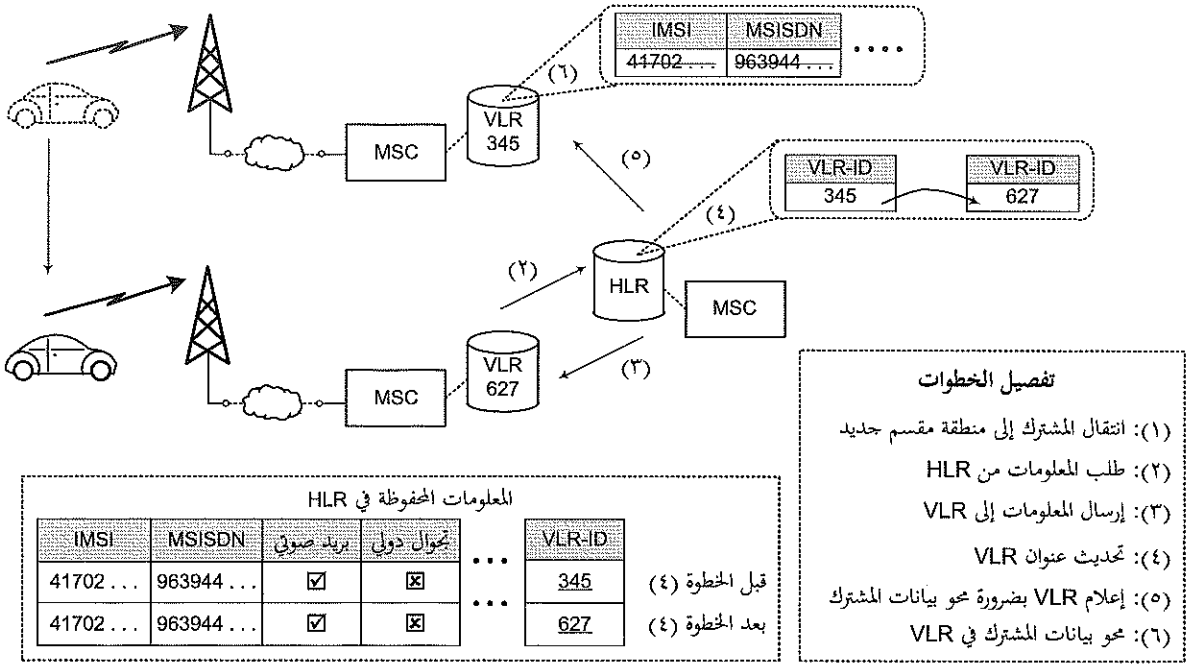
من المعلوم أن المكوّن الأساسي ضمن أية شبكة اتصالات هو مجموعة المقاسم، حيث يضطلع كل مقسم بمهام التحكم بعدد كبير من المكالمات وتوجيهها وتسييرها، كما يتيحُ خدماتِ الشبكة الإضافية لمجموعة المشتركين الموجودين ضمن منطقة جغرافية محددة، تعرف باسم "منطقة الخدمة" الخاصة بالمقسم.
هذا الدور الجوهري للمقسم مُشتركٌ بين شبكة الهاتف الثابت والشبكات الخلوية، إذ أن وجه الاختلاف الأساسي هو طبيعة نقطة نفاذ المشترك إلى كلٍّ من هذه الشبكات، فهذه النقطة تتمثل بـ"مقبس الهاتف" "Socket" في حالة الهاتف الثابت، وبالمنفذ الراديوي والمحطة الثابتة في حالة الهاتف الخلوي.

لا بد لأي مقسم عند توجيه اتصالٍ ما، سواءً من أو إلى متصلٍ موجودٍ ضمن منطقة خدمته، من أن تتوفر لديه معلومات كافية عن هذا المتصل. ولما كان غالب مشتركي خدمات الاتصالات الخلوية يتنقلون من مكانٍ إلى آخر بوتيرة عالية، فإنه من المُحال التنبؤ بالمشتركين الذين يجب على كل مقسم تزويدهم بالخدمات، ومن ثم تعريف المقسم بهم على نحوٍ مسبق، خصوصاً وأن منهم الزائر من خارج القطر أو الدولة.
لذا، تنحو نظم الاتصالات الخلوية منحىً آخر في هذا الصدد، حيث يُزوَّد كل مقسم ضمن الشبكة بسجلٍ أو قاعدة معطيات، وظيفتها حفظ المعلومات الخاصة بالمشتركين الموجودين ضمن منطقة خدمته، وذلك طيلة مدة وجودهم ضمن هذه المنطقة. ويجري الحصول على هذه المعلومات من خلال طلب نُسخةٍ عنها من سجل HLR، وذلك حال ولوج مشتركٍ ما منطقة الخدمة الخاصة بالمقسم "المُضيف". كما يجري أثناء إجراء تبادل المعلومات مع سجل HLR إعلام الأخير بهوية المقسم الذي طلب نسخة عن معلومات المشترك، كي يُعرف مكانه الحالي. ولما كانت المدة التي يقضيها المشترك ضمن منطقة خدمة مقسمٍ ما محدودة في الغالب، يمكن أن يُعتبر المشترك "زائراً" أو "ضيفاً" ضمن هذه المنطقة، وهذا ما يبرر اختيار مصطلح

"سجل المقر الحالي" "Visitor Location Register (VLR)" للدلالة على هذا السجل وعلى خصائصه الوظيفية.

يبين الشكل ٦-٣ مبدأ عمل هذا السجل الذي يتلخص في ما يلي:

عند ولوج مشتركٍ ما منطقة خدمة مقسمٍ معين، أي عند ولوجه منطقة تغذية ضمن محطة مرتبطة بهذا المقسم، يجري تحليل الرقم الدال على هويته، والذي يدل على الشبكة الأم لهذا المشترك، وعلى رقم سجل مقر الاكتتاب (HLR) ضمنها. بعد ذلك يجري طلب نسخة من المعلومات الخاصة بالمشترك من هذا السجل، حيث يجري حفظها في سجل أو قاعدة المعطيات ضمن المقسم الذي ولج المشترك منطقة خدمته. فإذا توفرت هذه النسخة، أمكن للمقسم المُضيف إنجاز عمليات التحكم باتصالات هذا المشترك وتوجيهها. من جانبٍ آخر، يطلب سجل HLR هوية سجل VLR الذي يوجد المشترك حالياً ضمن منطقة خدمته، ويحتفظ بهذه الهوية المُشار إليها بـ VLR-ID في الشكل، والتي تُعتبر معلومةً أساسية ضمن ما يحفظه الـ HLR عن كل مشترك، إذ تدل على مكان وجوده الحالي، ولا يمكن بدونها توجيه أي اتصال إلى هذا المشترك.



الشكل ٦-٣: مبدأ تبادل المعلومات بين سجل الاكتتاب (HLR) وسجل المقر المؤقت (VLR).

تبقَى -كما ذكرنا- المعلومات الخاصة بالمشترك والدالة عليه محفوظة ضمن سجل VLR طيلة مدة وجوده ضمن المنطقة التابعة للمقسم المُضيف، فإذا انتقل المشترك إلى منطقة تابعة لمقسمٍ آخر، طلب الـ VLR الجديد المعلومات من الـ HLR، الذي يزوده بها، ويُعلم الـ VLR القديم بأن المشترك قد غادر منطقته، وأنه يجب محوه من لائحة "الزوار أو الزائرين". يقوم الـ HLR أيضاً باستبدال هوية الـ VLR الجديد بهوية الـ VLR القديم، وذلك بغية متابعة أو تحديث المعلومات عن مقر وجود المشترك "المقر الحالي". بذلك يتحقق لدى الشبكة الأم (وتحديداً سجل HLR) معرفة دائمة بأحدث موقعٍ لوجود المشترك.

يجدر التنويه في سياق عرض مهام سجلَّي HLR و. VLR إلى ما يلي:

- يمثل مصطلح HLR وحدةً وظيفيةً ضمن الشبكة، وسبق التنويه إلى أنه يكون من الناحية الفيزيائية موزعاً على عدة قواعد معطيات، يكون كل منها في غالب الأحيان موجوداً أو ملحقاً بمقسمٍ في موقع جغرافي مختلف، ويحكم عدد هذه السجلات تطور عدد المشتركين ضمن الشبكة من ناحية، والتدابير الوقائية التي يتخذها مشغل الشبكة من ناحية أخرى، وذلك للحيلولة دون العجز عن تقديم الخدمات لعدد كبير من المشتركين، في حالة إصابة بعض المقاسم بأعطال فنية جسيمة.
- يختلف هذا الأمر من ناحية الـ VLR، إذ لابد من وجوده كقاعدة معطيات في كلٍّ من مقاسم الشبكة.
- لما كان سجل HLR يمثل عنصراً وظيفياً ضمن الشبكة، تكون آلية تبادل المعلومات التي شرحناها ملزمةً وواجبة الاتباع حتى إذا كان المشترك ضمن منطقة خدمة المقسم الذي يحوي سجل HLR، يعني ذلك أن إجراء تحصيل نسخة من معلومات المشترك من الـ HLR وإرسالها إلى الـ VLR تجري حتى ضمن المقسم الذي يحفظ بيانات المشترك الأساسية، وأن تبادل المعلومات يجري في هذه الحالة بين قاعدتي معطيات ملحقتين بالمقسم نفسه.

٦-٣ مكونات الشبكة الأساسية

بعد بيان التقسيم الوظيفي للشبكة وعرض أهم مبادئ نظام التعريف بالمشترك، ننتقل لنقاش كلِّ مكوِّنٍ من مكوناتها، مستعينين بالشكل ٦-٤ الذي يعرض نموذجاً مبسطاً لبنية الشبكة ومكوناتها الأساسية وفق الإصدار 3GPP-Release 99.

٦-٤ الوحدة المتحركة

تشمل الوحدة المتحركة من الناحية الفنية الدقيقة جزأين اثنين هما "شريحة الاشتراك" "Subscriber Identity Module (SIM)" و"الجهاز المتحرك" "Mobile Equipment (ME)". وقد اعتمدت المواصفات المعيارية مصطلح "Mobile Stations (MS)" للدلالة على الوحدة المتحركة في نظام GSM و تعبير "User Equipment (UE)" لنظام UMTS، غير أن استخدام المصطلح الخاص بنظام GSM، أي Mobile Station، قد غلب على معظم الأدبيات التي تُعنى بأنظمة الاتصالات، لذا لن نفرق في ما يلي بين التعبيرين، وقد حرصنا على استخدام تعبير "الوحدة المتحركة" باللغة العربية للخروج من أي لَبْس.

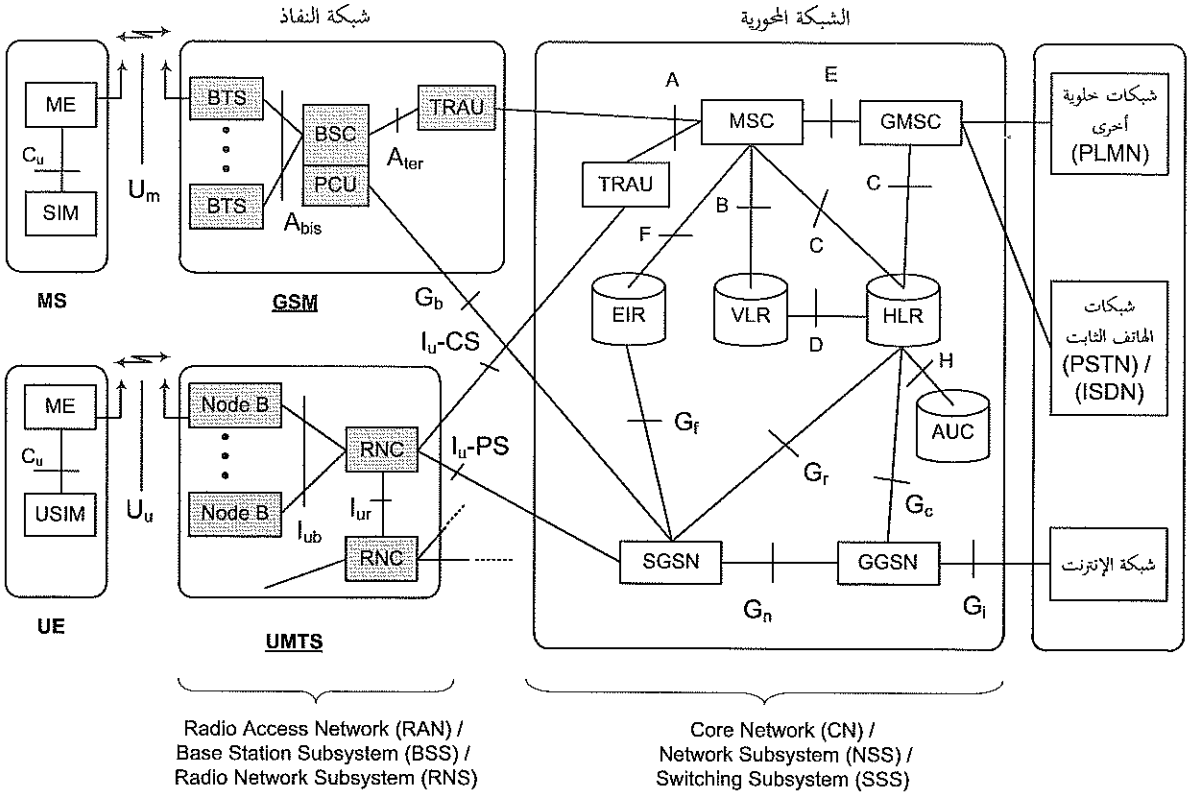
٦-٤-١ بنية الجهاز المتحرك

يعطي الشكل ٦-٥ تفاصيل بنية الجهاز المتحرك (ME) وفق التقسيم الوظيفي الذي تعتمده المواصفات المعيارية [٧]، ونقرأ من الشكل أن هذه البنية تشمل جزأين رئيسين هما "Mobile Termination (MT)" و "Terminal Equipment (TE)"، اللذين نختار مصطلَحَي "معالج البروتوكولات الطرفي" و"الجهاز الطرفي" للدلالة عليهما. يتباين هذان الجزءان من ناحية الوظائف المنوطة

بكل منهما، حيث تشمل وظائف MT ما يلي:

١) إرسال واستقبال الإشارة وفق خطوات المعالجة التي شرحناها في الفصل السابق (انظر الشكل ٥-١).

٢) التواصل مع الشبكة الراديوية وفق البروتوكولات الخاصة بها، وأهم ما تحكمُهُ هذه البروتوكولات هو "إدارة موارد الشبكة الراديوية" "Radio Resource Management (RR)" على أفضل وجه.

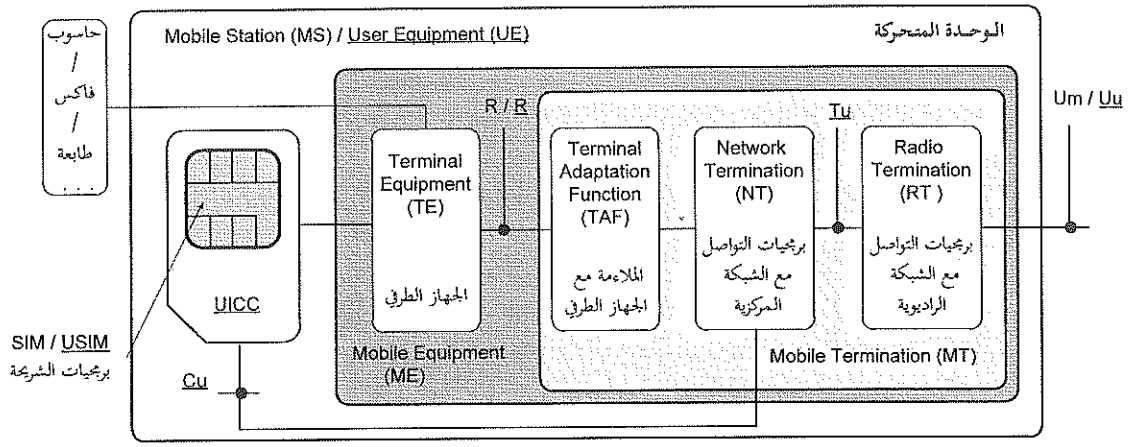


الشكل ٦-٤: البنية النموذجية المبسطة للشبكة وفق الإصدار 3GPP-Release 99.

٣) إنجاز الاتصال وفق بروتوكولات الشبكة المركزية، أي شبكة المقاسم، وهذه البروتوكولات تُعنى برسائل "التشوير" "Signaling" التي تحكم مباشرةً وإجراءَ وتحريرَ الاتصال "Call Control (CC)". تشمل هذه البوتوكولات أيضاً آليات متابعة حركة المشترك وتنقله من مكان إلى آخر، وإنجاز ما يتطلبه ذلك من تنسيقٍ مع المقاسم التي يتصل بها المشترك أثناء تنقله، وتبادل المعلومات التي من شأنها توفير استمرارية الاتصال وجودته. وهذه المهام الوظيفية الأخيرة تندرج تحت مصطلحٍ شاملٍ هو "Mobility Management (MM)"، الذي سنتطرق لبعض تفاصيله في الفصل ٧.

أما الجهاز الطرفي TE، فتشمل وظائفه التحكم بمكونات الجهاز التي تتيح التواصل مع المشترك، مثل لاقط الصوت، ولوحة المفاتيح، والشاشة، وغيرها. إضافة إلى ذلك، يُعنى هذا الجزء بتنسيق تبادل المعلومات مع التطبيقات المستخدمة لعرض واستقبال

المعطيات، مثل "المتصفح" "Browser" مثلاً، أو البرمجيات التي تتيح قراءة النصوص ومعالجة الصور. كما يَحكُمُ هذا الجزءُ التواصلَ مع أجهزة طرفية خارجية أخرى، من الممكن أن توصل بالوحدة المتحركة، مثل آلة تصوير رقمية، أو فاكس، أو طابعة، أو حاسوب ، أو غير ذلك.



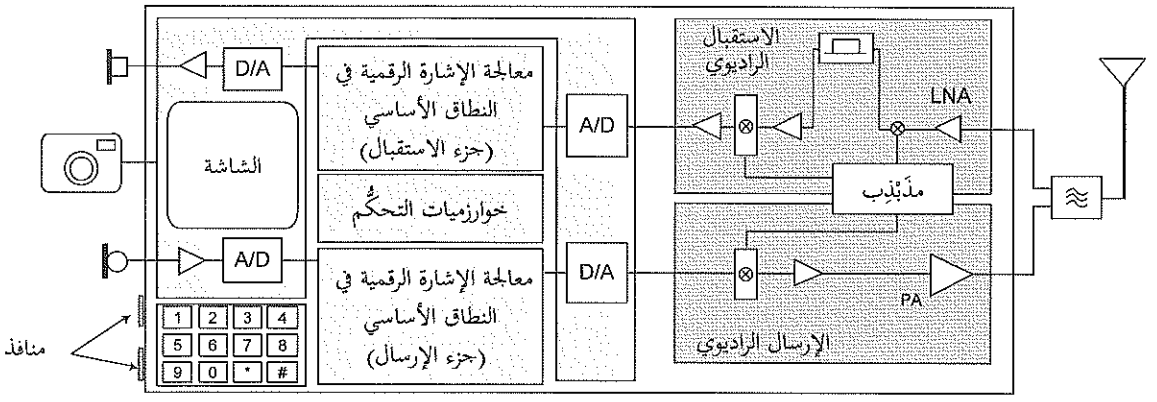
الشكل ٦-٥: بنية الوحدة المتحركة من الناحية الوظيفية (يدل الخط تحت الاختصار على أنه المُستخدَم في نظام UMTS).

يدل الشكل ٦-٥ أيضاً على أن التواصل مع أي جهاز طرفي أو وسيط، يقتضي التحكم بالدارات الخاصة به، كما يقتضي أيضاً تنسيق المعلومات وتحضيرها على نحوٍ ملائمٍ لهذه الأجهزة، ويوافق البروتوكولات الخاصة بها، وهذا ما يُعنى به "الملائم الطرفي" "Terminal Adaptation Function (TAF)".

يجدر في هذا السياق التأكيد على أن الشكل ٦-٥ يعرض لبنية الوحدة المتحركة من الناحية الوظيفية، أما من الناحية الفيزيائية، فتشمل الوحدة الأجزاء التي يتضمنها الشكل ٦-٦، الذي يعطي نموذجاً مبسطاً جداً لبنية جهاز الوحدة المتحركة (ME).
أهم الأجزاء الفيزيائية ضمن هذه البنية هي الدارات التي تُعنى بمعالجة الإشارة، و دارات الإرسال والاستقبال، التي تتضمن المكونات الخاصة بالتعديل أو التضمين الراديوي. تشمل البنية أيضاً المكونات الضرورية لعرض الإشارة (الشاشة والمذياع)، أو لاستقبالها (لاقط الصوت)، أو للتواصل مع المشترك أو المستخدم (لوحة المفاتيح). هذا وتتوزع المهام الوظيفية للوحدة (الشكل ٦-٥) على المكونات الفيزيائية (الشكل ٦-٦) وفق ما ترى الجهة المصنعة أنه الأنسب تسويقياً لكل نموذج.

إضافةً إلى تفاصيل البنيتين الوظيفية والفيزيائية تُعنى المواصفات المعيارية أيضاً بالتفاصيل المتعلقة بخصائص مرشحات الإرسال والاستقبال، التي تضمن التخفيف من آثار التشويش على القنوات الراديوية المجاورة، كما تعطي القيم العظمى للطاقة التي من الممكن للجهاز المتحرك بثها.
تختلف هذه الطاقة في مقدارها تبعاً لنوعية الجهاز، وللنظام، وللنطاق الترددي المستخدم (انظر [٨] لنظام GSM و [٩] لنظام UMTS)، وتتراوح في حالة نظام GSM بين 0.25W (24 dBm) و 8W (39 dBm)، أما في نظام UMTS، فإن القيم

المسموح بها تتراوح بين 0.126W (21 dBm) و 2W (33 dBm).



الشكل ٦-٦: بنية الوحدة المتحركة من الناحية الفيزيائية.

٦-٤-٢ شريحة الاشتراك

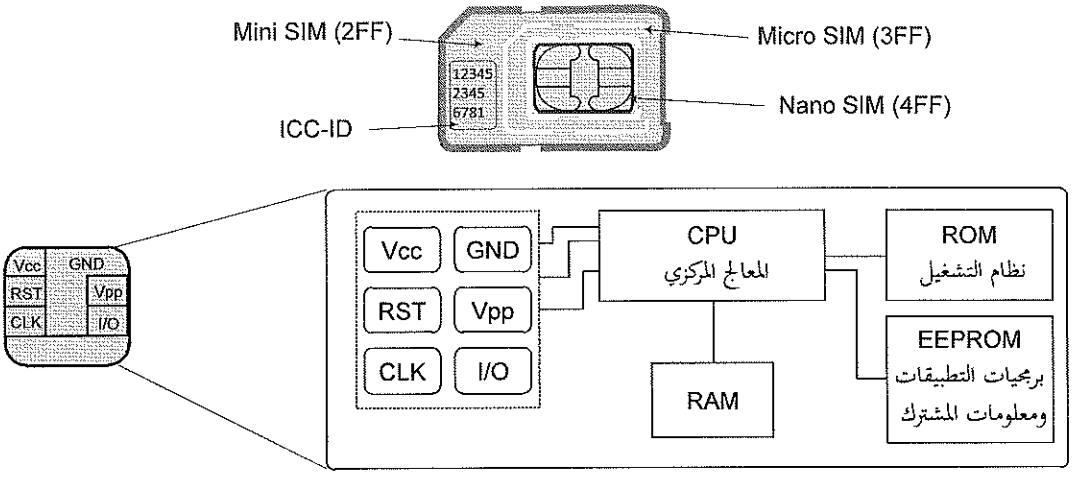
الجزء الثاني ضمن مكونات الوحدة المتحركة هو "شريحة الاشتراك" "Subscribes Identity Module (SIM)"، التي يحمل اسمها دلالة دقيقة على أنها تمثل الطرف الذي تتواصل معه الشبكة، إذ لا تتوفر للشبكة في الحالة الواقعية أية دراية أو معرفة باسم أو هوية مستخدمِ الوحدة المتحركة، ولا ببياناته الشخصية، فأهم ما تحتاج معرفتَه هو هوية الاشتراك (أي رقم IMSI)، ورقم الهاتف MSISDN المرتبط بهذه الهوية، والخدمات التي يُسمح لهذه الهوية بالإفادة منها. ولما كانت هذه الهوية محفوظة في الشريحة، فإن الأخيرة تمثل -اعتبارياً- طرف الاتصال الأول ضمن نظام الاتصالات، في حين تمثل الشبكة الطرف الآخر.

يدل مصطلح SIM ضمن نظام GSM على كلٍ من الشريحة المعدنية، والجزء البلاستيكي الحامل لها، وعلى البرمجيات "Software" التي تحكُمُ إنجاز التطبيقات المختلفة التي تكون الشريحة طرفاً فيها. وقد تطور هذا المصطلح مع ظهور نظام UMTS واكتسب معنىً مختلفاً، إذ صار يدل على البرمجيات فقط، لذا أدرجت المواصفات تعبيراً جديداً هو "UMTS-SIM (USIM)" لتمييز البرمجيات الخاصة بنظام UMTS عن تلك الخاصة بـ GSM [١٠]. أما الشريحة الفيزيائية فاكتسبت اسماً جديداً هو "Universal Integrated Circuit Card (UICC)". هذا وتتميز البرمجيات الخاصة بـ UMTS، أي USIM، بأنها أكثر تنوعاً من ناحية سبل التواصل مع الشبكة، كما أنها تكون شاملةً لكل ما يخص برمجيات نظام GSM، بحيث تضمن للمشترك إمكانية التواصل أو الاستفادة من خدمات الشبكة، حتى في المناطق التي لا تتوفر فيها تغذية كافية بخدمات UMTS. هذا وما زال مصطلح SIM هو الأغلب استخداماً للدلالة على الشريحة بما فيها لكلا النظامين، لذا نستخدمه في ما يلي للدلالة على الشريحة بجزأيها.

يجدر التنويه أيضاً إلى أن الجهة المعنية بوضع وتطوير المواصفات الفيزيائية والميكانيكية والكهربائية للشريحة هي "المنظمة الدولية

للتقييس" "International Organization for Standardization (ISO)"، بالتعاون مع "اللجنة العالمية للمواصفات الكهربائية" "International Electrotechnical Commission (IEC)"، حيث تُعنيان بإصدار سلسلة خاصة من التوصيات، تندرج تحت الرقم الشامل ISO/IEC 7816، وتضم خمسة عشر جزءاً تغطي كل ما يتعلق بالمواصفات الكهربائية والفيزيائية الخاصة بالبطاقات الالكترونية، والتي تندرج شرائح SIM ضمنها. أما البرمجيات، فتتولى هيئة 3GPP الإشراف على تطويرها وإدارة التوصيات الخاصة بها.

تتوفر الشريحة بثلاثة مقاسات مختلفة، أكثرها انتشاراً المقاس التقليدي المعروف باسم "Mini-SIM" (انظر الشكل ٦-٧)، أما المقاس الثاني فهو أصغر قليلاً ويكثر استخدامه في ما يُطلق عليه اسم "الهواتف الذكية" "Smart Phones"، واصطُلح على تسميته "Micro-SIM". هذا وقد بدأ حديثاً انتشار مقاس ثالث، يعرف باسم "Nano-SIM".



الشكل ٦-٧: بنية شريحة الاشتراك SIM.

تشابه الشريحة من ناحية بنيتها جهاز حاسوب صغير، إذ تشمل المكونات التالية:

- "وحدة معالجة مركزية" أو "معالج مركزي" "Central Processor Unit (CPU)": ينجز هذا المعالج عمليات الحساب والتحكم الخاصة بالتطبيقات المتاحة. ومن أكثر نماذج هذه الوحدة انتشاراً معالجٌ يشابه النموذج التقليدي 8051 بسعة 8 bit، ونموذجٌ مشابه لبنية 6805 بسعة 8 bit أيضاً. كما توجد بعض المعالجات بسعة 16 bit أو 32 bit، مخصصة لاستخدامات متقدمة أو لإصدارات مستقبلية.
- "ذاكرة مؤقتة" "Random Access Memory (RAM)": تتراوح سعة هذه الذاكرة بين 0.1 kByte و 4 kByte.
- "ذاكرة غير متلاشية قابلة للبرمجة والمحو" "Erasable Programmable Read Only Memory (EPROM)": تُحفظ في هذه الذاكرة المعلومات التي لا تُمحى إذا أُطفئ الجهاز، والتي تشمل البرمجيات المتعلقة بالخدمات والتطبيقات المتاحة من

قبل الشريحة، إضافة إلى المعلومات الشخصية مثل أرقام الهواتف والرسائل القصيرة. ويجري حفظ المعلومات في هذه الذاكرة وفق نظامِ ملفاتٍ ذي بنية هرمية محددة، تعطي المواصفات تفاصيله بكل دقة [١١].
تتراوح سعة هذه الذاكرة بين 16 kByte و 128 kByte، وهذه السعة هي التي تُقْرَن باسم الشريحة لتمييزها من ناحية نموذجها التسويقي. هذا ومن المتوقع أن تصل هذه السعة إلى 2 GByte في بعض البطاقات المستقبلية.

- "ذاكرة دائمة" "Read Only Memory (ROM)": تَحفظ هذه الذاكرة "الوحدات البرمجية" "Software Modules" الخاصة بنظام التشغيل الذي يحكم عمل الشريحة. ويجري دمج هذه الوحدات بالشريحة أثناء خطوات الإنتاج، وتتفاوت سعة هذه الذاكرة بين 40 kByte و 100 kByte. أما أوسع نظم التشغيل انتشاراً فهو نظامٌ يعتمد بيئة Java للبرمجة، ويتيح مرونة مميزة لتطوير التطبيقات.
- "منافذ الشريحة" "Input-Output Interfaces": تتمثل هذه المنافذ في نقاط الاتصال أو التماس مع الجهاز، والتي تشمل نقطة التأريض، ونقطة التغذية الكهربائية، ونقطة تزويد الشريحة بنبضات التزامن، ونقطة إعادة الضبط.

من أهم ما تحفظه الشريحة في الذاكرة الدائمة (ROM) والذاكرة القابلة للبرمجة (EPROM) الأرقام الضرورية لمباشرة وإتمام الاتصال بالشبكة، ومنها:

١) هوية المشترك (IMSI): سبق البيان أن هذا هو الرقم الأساسي الذي يُعرفُ به المشتركُ، ويميزه عن غيره، وهو محور كل ما تتبادله الشبكة من معطيات حول المشترك.
لا يتغير هذا الرقم أبداً، فإذا فُقِدَتِ الشريحةُ أو أصابها عطلٌ أو ضررٌ فيزيائي جسيم، واضطر المشترك إلى استصدار بطاقة أو شريحة جديدة من المشغل، فإن هذه الشريحة تكون مزودة برقم IMSI جديد. وهذا يعني من الناحية الفنية أن تبديل الشريحة يمثل تغييراً في هوية المشترك أيضاً، غير أن هذا التغيير يكون غير ملحوظٍ من طرف المشترك، لأن الذي يجري عملياً هو مَحْوُ رقم IMSI القديم من سجل HLR، وربطُ أو قَرْنُ كل المعلومات الخاصة بالمشترك، مثل رقم الهاتف والخدمات المتاحة وطبيعة الاشتراك، برقم IMSI الجديد.

٢) "رقم تسلسلي خاص بالشريحة" "Integrated Circuit Card Identifier (ICCID)": يميز هذا الرقم الشريحة الفيزيائية على نحوٍ فريد، ويكون مطبوعاً على البطاقة البلاستيكية بجانب الشريحة (انظر الشكل ٦-٧). ويرتبط هذا الرقم برقم IMSI عبر شيفرات خاصة، بحيث يمكن للمصنع أو للمشغل أن يعرف أيّاً من الرقمين انطلاقاً من الرقم الآخر.

٣) رقم هاتف المشترك (MSISDN): يُحفظ هذا الرقم في ذاكرة EPROM، ومن الممكن تغييره من قبل المشغِّل وفق إجراءات خاصة، إما بناءً على طلب المشترك، أو ضمن إجراءٍ أو مشروعٍ شامل لتعديل كل أرقام المشتركين ضمن الشبكة، مثل زيادة عدد خانات أرقام هواتف المشتركين.

٤) "رقم الولوج إلى الشريحة" "Personal Identification Number (PIN)": يتألف هذا الرقم من أربع إلى ثماني خانات، ويتيح للمستخدم وسيلةَ حمايةٍ تَحُوْل دون استخدام الآخرين لجهازه، أو الاتصال من رقمه دون علمه. فإذا كان إجراء

الحماية مُفعَّلاً، لا يمكن استخدام الشريحة أو قراءة أية معلومات منها دون إدخال هذا الرقم.
يُزَوَّد المشترك بهذا الرقم مع الشريحة عند الاكتتاب، وإذا أُدخل عدة مرات على نحوٍ خاطئ، يجري حجب الشريحة عن الاستخدام، ولا تعود مُتاحة لإجراء الاتصالات، إلى أن يجري التأكد من أنها ما زالت بحوزة الشخص المخوَّل باستخدامها. ويكون التأكد عن طريق رقم آخر، يعرف بـ "رقم تحرير الشريحة" "PIN Unlock Code (PUK)"، يُتيح تعريف واستخدام رقم PIN جديد. يحصل المشترك على هذا الرقم –أي PUK– عند الاكتتاب أيضاً، كما يمكن أن يطلبه من خدمة الزبائن عند الحاجة، وإذا جرت محاولة إدخال PUK على نحو خاطئ 10 مرات متتالية، فإن الشريحة تُقفل نهائياً، ويجب استبدالها في هذه الحالة.

٥) رقم خاص بإجراءات التوثُّق يعرف باسم "مفتاح التوثق" "Authentication Key (Ki)": يتألف هذا الرقم أو المفتاح من 128 خانة، ويُحفظ على الشريحة أثناء خطوات الإنتاج. يحفظ هذا الرقم فقط في البطاقة وفي "مركز التوثق" الذي سنعرض له لاحقاً، ولا يجري تبادله كرقم منفرد إطلاقاً، وإنما يُستخدم لأغراض التوثق والتعمية (انظر البحث ٦-٦-٤).

٦) رقم خاص بالولوج إلى الشريحة وتغيير بعض المعلومات ضمنها: يكون هذا الرقم معروفاً للمشغل حصراً، ويستخدم عند إجراء تعديلات على بعض التطبيقات، أو عند تغيير رقم MSISDN.

٧) أرقام خاصة بالمستخدم، مثل أرقام هواتف المعارف والأصدقاء.

٨) معلومات تُحفَظُ على الشريحة أو تُقْرأُ منها أثناء إجراء الاتصالات، وتتبدل من اتصالٍ إلى آخر: يجري حفظ هذه الأرقام من قبل المشغِّل –ممثلاً بتجهيزات الشبكة– وذلك للتحكم بـ "تسلسل خطوات الاتصال" "Calling Process". من الأمثلة على ذلك رقم TMSI، ورقم MSRN، وهوية الخلية التي يوجد المشترك ضمن نطاق تغذيتها، وهوية سجل المقر الحالي VLR، وكل المعلومات الخاصة بالخلية والتي يستقبلها المشترك عن طريق قناة BCCH، مثل ARFCN، وMCC، وMNC، ولائحة بالترددات المتاحة لإجراء عملية التسليم (Handover).

٩) خوارزميات التوثق والتعمية التي سنعرض نبذة عنها في بحثٍ لاحق.

لقد جرى تطوير برمجيات خاصة، تُزَوَّد بها الشريحة، وتتيح آلياتٍ متقدمة لتبادل المعلومات بين الجهاز المتحرك والشريحة، وتحكّماً أسهل بالتطبيقات التي تحتاج موسطات خاصة من قبل المستخدم. تُعرف هذه البرمجيات باسم "برمجيات الشريحة" "SIM-Toolkit (STK)"، وتمثل أيضاً البيئة البرمجية الخاصة بتطوير تطبيقات خاصة بالشرائح.
لقد اعتمدت الإصدارات الأولية لشرائح نظام GSM لغات برمجية تقليدية، مثل "لغة الآلة" "Assembly" ولغة C، كبيئة تطوير لهذه البرمجيات، وكان ذلك يقود إلى جعل مجموعة الأوامر المستخدمة لتخاطب الشريحة مع الجهاز مختلفة تبعاً للجهة المصنعة للشريحة، لذا عُرفَ هذا الصنف من البيئة البرمجية باسم "Native STK"، أي "البيئة الموافقة لبيئة الإنتاج الأصلية".
تُعتبر مثل هذه البيئات البرمجية اليوم في طور التلاشي، فقد تم تنسيقها من معظم خطوط إنتاج الشرائح.
هناك أيضاً بيئة برمجية أخرى، هي المهيمنة على الشرائح الحديثة، تعتمد لغة وبيئة Java لنظام التشغيل ولتطوير البرمجيات والتطبيقات، لذا تعرف البطاقات أو الشرائح المزودة بها باسم "Java Card".

تُعرف بيئة التطوير الخاصة بنظام GSM باسم "SIM Application Toolkit (SAT)"، أما البيئة الخاصة بنظام UMTS فقد أسمتها المواصفات المعيارية "UMTS SIM Application Toolkit (USAT)". هذا وتقدم التوصيات المعتمدة تفاصيل كاملة عن كل من البيئتين في [١٢] و [١٣].

٦-٥ شبكة النفاذ الراديوي

سبق البيان بأن شبكة النفاذ تمثل صلة الوصل بين الوحدة المتحركة والشبكة المركزية التي تتألف من المقاسم والموجهات الأساسية. تشمل هذه الشبكة الفرعية عدة مكونات مهمة نعرض لتفاصيلها في ما يلي.

٦-٥-١ المحطة الثابتة

تتميز "المحطة الثابتة" "Base Station (BS)" بكونها العنصر الذي يوفر انتشاراً جغرافياً واسعاً لخدمات الشبكة، وبأنها تمثل نقطة نفاذ المشترك إلى هذه الخدمات. ويدل تعبير "المحطة الثابتة" على وحدة وظيفية أو مكوّن وظيفي ضمن الشبكة، أما التجهيزات الفيزيائية "Hardware" والعتاد "Equipment" الذي ينجز هذه المهام، فيُعرف في نظام GSM باسم خاص هو "Base Transceiver Station (BTS)" وفي نظام UMTS باسم "Node B".

ترتبط المحطة الثابتة بالوحدات المتحركة عبر "الرابط الراديوي" "Radio Interface"، الذي يُرمز له بـ "U_m" في نظام GSM و بـ"U_u" في نظام UMTS. كما ترتبط المحطة من جانبِ الشبكة بـ "وحدة التحكم بالمحطات الثابتة" "Base Station Controller (BSC)" أو "Radio Network Controller (RNC)"، الذي يتولى التحكم بعدة محطات ضمن منطقة جغرافية معينة، والتنسيق بينها. هذا ويعرف الرابط من جهة جهاز التحكم بالمحطات بـ "A_{bis}" أو "I_{ub}"، تبعاً لنظام الشبكة (انظر الشكل ٦-٤).

من أهم الوظائف التي تضطلع بها أو تنجزها المحطة الثابتة ما يلي:

- معالجة الإشارة وفق الخطوات التي سبق بيانها في الفصل ٥.
- تغذية أو تغطية المنطقة الجغرافية الموافقة لخلية واحدة (أو أكثر) بالإشارة الراديوية التي تتيح الاستفادة من خدمات الشبكة.
- إجراء قياسات دورية لجودة الاتصال ولمستوى التشويش على الإشارة الراديوية، وإبلاغ عناصر الشبكة الأخرى بنتائج هذه القياسات، لاتخاذ التدابير الكفيلة بتحسين الأداء عند الضرورة.
- التواصل مع جهاز التحكم بالمحطات (BSC; RNC) لشغل موارد الشبكة بأفضل فعالية ممكنة.
- إنجاز البروتوكولات التي تحكم التواصل عبر الرابط الراديوي (U_m / U_u) وعبر الرابط مع الشبكة (A_{bis} / I_{ub}).

- معالجة الإشارة الراديوية المستقبلة من الوحدات المتحركة وتحويلها إلى رقمية وفق الخطوات العكسية لما في الشكل ٥-١.
- استقبال الإشارة الرقمية من الـ BSC أو الـ RNC وتحضيرها وفق الخطوات التي تناولها الفصل ٥ بالشرح، ثم بثها كإشارة راديوية تمثيلية إلى الوحدات المتحركة.
- إنجاز الإجراءات الخاصة بالتقنيات التي تستخدمها الشبكة لتحسين كفاءة النظام وأدائه، مثل"القفز الترددي"، و"الإرسال المتقطع"، و"التحكم بالاستطاعة".
- من مهام المحطة أيضاً ضمّ الإشارات الخاصة بعدة قنوات اعتبارية كي تتشارك بشَغْل قناة فيزيائية واحدة. وإذا كان النظام يعتمد تقنية TDMA لتعدد النفاذ (أي في حالة GSM)، يجري في المحطة أيضاً تجميع القنوات فيزيائية لتكوين الإطار الزمني المؤلف من ثمانية أحياز، كما تنجز المحطة هذه المهمة في المسار الصاعد على نحوٍ عكسي، حيث تجمع الإشارات الواردة من عدة مشتركين لصوغ الإطار الزمني والأطر المتعددة (انظر الفصل ٤). أما في نظام CDMA، فتقوم المحطة بإجراءات "البعثرة" "Scrambling" اللازمة لجمع الإشارات الخاصة بعدد من المشتركين ضمن إشارة واحدة.

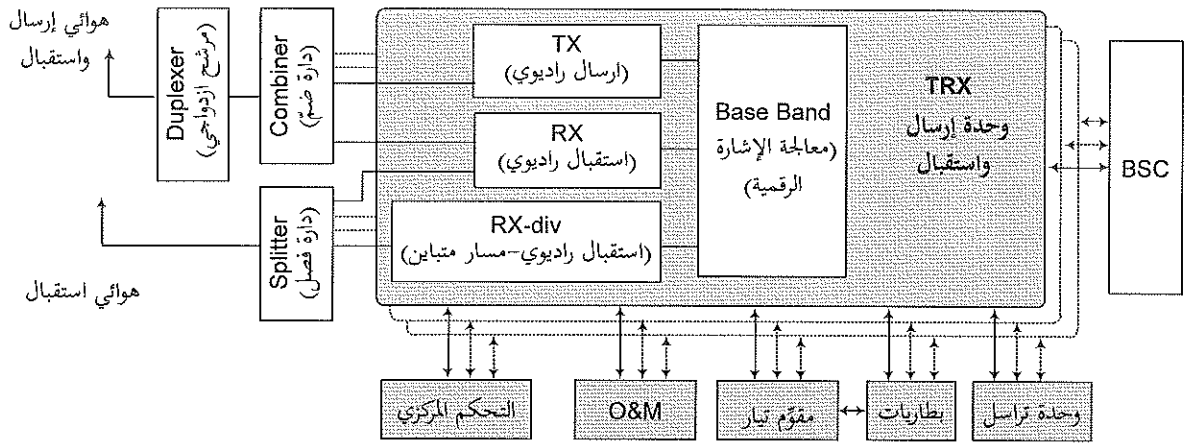
تعطي المواصفات المعيارية وصفاً دقيقاً لخصائص الإشارة الراديوية أو الرقمية عند مدخل أو مخرج كل مكوّن ضمن بنية المحطة الثابتة، غير أنها لا تبيِّن أية قيود تتعلق بشكلٍ وحجمٍ وسعةِ المحطة، لذا تتباين بنية المحطة بين مُنتِجٍ أو مُصَنِّعٍ وآخر، كما يوفر كل مُصَنِّعٍ لمشغلي الأجهزة محطاتٍ مختلفة من ناحية السعة ومكان الاستخدام، تعرف بأسماء تسويقية مختلفة. والذي يضمن حسن أداء هذه المحطات أو النماذج المختلفة هو المواصفات الصارمة والتفصيلية التي تشرح خطوات اختبار وفحص أداء هذه المحطات، كما أن التزام المصنعين بهذه المواصفات هو الذي يتيح عمل أي نموذج من المحطات مع الطيف الواسع من الوحدات المتحركة، والأجزاء الأخرى ضمن الشبكة، على أفضل وجه ممكن.

نعرض في ما يلي للعناصر أو المكونات الأساسية ضمن المحطة الثابتة على وجهٍ عام، دون التفصيل في تسلسل الخطوات وآليات إنجازها، ونبدأ بالمحطات الخاصة بنظام GSM ، التي تشمل المكونات الأساسية التالية (انظر الشكل ٦-٨):

- "وحدة الإرسال والاستقبال" "Transmit-Receive Unit (TRU)": يُدَلُّ على هذه الوحدة غالباً بأحد الرمزين TRU أو TRX، وقد يُدل عليها أيضاً بـالمصطلح "Carrier Unit (CU)" في دلالة على أنها الوحدة المسؤولة عن معالجة إشارة "الحامل الراديوي" "Carrier Frequency". تمثل هذه الوحدة أهم مكونات المحطة، فهي التي تتولى إنجاز خطوات معالجة الإشارة -في الاتجاهين- على نحوٍ كامل، أي ابتداءً من الإشارة التمثيلية المستقبلة من الوحدات المتحركة، وانتهاءً بالإشارة الرقمية التي ترسل إلى جهاز التحكم بالمحطات، وبالعكس.
  تُنجِز هذه الوحدة إجراءات معالجة الإشارة المتعلقة بقناة ترددية واحدة، ويكافئ ذلك ثماني قنوات فيزيائية ضمن الإطار الزمني (TDMA-Frame). لذا، من الممكن أن تَدعم هذه الوحدة إجراءات الاتصال لثمانية مشتركين في آن واحد، بافتراض أن كل الأحياز الزمنية على القناة الترددية متاحة لخدمات الاتصال. يعني ذلك أيضاً، أن عدد وحدات TRX هو الذي يحدد سعة المحطة الثابتة من حيث عدد المشتركين ضمن الخلية.

تتوزع مهام أي TRX الوظيفية على عدة أجزاء تشمل وحدة معالجة الإشارة في النطاق الأساسي، أي بعد فك التعديل في الاتجاه الصاعد، وقبل خطوة التضمين في المسار الهابط، كما تشمل أيضاً وحدتي الإرسال والاستقبال الراديوي. هذا وقد تكون الوحدة مزودة بمسارَي استقبالٍ لمعالجة الإشارة عند استخدام تقنية "التباين المكاني" (انظر البحث ٣-٣-٢)، وذلك لإتاحة فصلٍ بين إشارتي الإستقبال اللتين يلتقطهما هوائيا المحطة في هذه الحالة.

إضافةً إلى ما سبق، تتضمن وحدة التراسل جزءاً خاصاً بالإدارة والتحكم، ومنافذ متعددة تصلها بمكونات المحطة الأخرى.



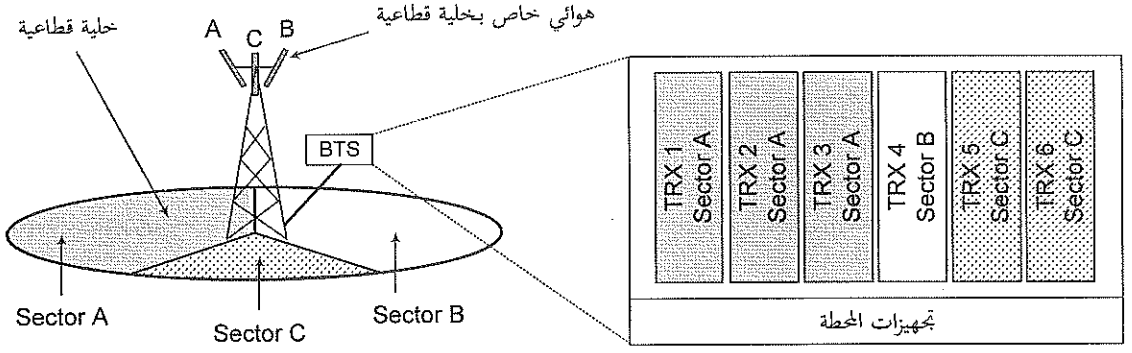
الشكل ٦-٨: البنية النموذجية للمحطة الثابتة في نظام GSM.

يتباين عدة وحدات التراسل في المحطة الثابتة تبعاً لعدد القنوات الترددية المتاحة في الخلية، وتبعاً لعدد الخلايا في موقع المحطة. وقد سبق أن أشرنا في الفصل ١ إلى أن المحطة الثابتة قد تحوي التجهيزات الخاصة بأكثر من خلية قطاعية، تلتقي كلها في موقع المحطة ، لذا يوافق عدد وحدات TRX في كل موقع مجموع القنوات الترددية المتاحة في كل خلايا الموقع، ويتراوح هذا العدد بين وحدةٍ واحدة لخلية وحيدة (في المناطق النائية على سبيل المثال)، و يصل إلى أكثر من 24 وحدة في موقعٍ يجمع ست خلايا قطاعية ضمن المدن أو المناطق المكتظة. هذا ويجري عند إدراج وحدة التراسل ضمن تجهيزات المحطة ربطٌ بين رقم هذه الوحدة وهوية الخلية التي تتبع لها أو تغذيها، كما تكون هذه الوحدة متصلة بالهوائي الخاص بالخلية المعنية.

يوضح الشكل ٦-٩ مثالاً على هذا الربط، وذلك لموقعِ محطةٍ ثابتة، تُغذي ثلاث خلايا قطاعية، ترتبط إحداها بثلاث وحدات تراسل (Sector A)، والثانية بوحدةٍ واحدة (Sector B)، والثالثة بوحدتي تراسل (Sector C).

- وحدة تحكم: تتولى هذه الوحدة إدارة وتنسيق مهام مكونات المحطة المختلفة، والتواصل فيما بينها، وإنجاز بروتوكولات التحكم بإجراءات الاتصال وأطواره المختلفة.
- جزء إرسال واستقبال المعلومات إلى ومن "مركز الصيانة والتشغيل" "Operation and Maintenance Center (OMC)": يجري في هذا الجزء رصد أية أعطال فنية ضمن تجهيزات المحطة وإعلام مركز الصيانة بذلك، كما يكون هذا الجزء موصولاً

بقسم التحكم المركزي الخاص بالمحطة لإتاحة تنفيذ الأوامر الواردة من مركز الصيانة والتشغيل.
ترسل المحطة عبر هذا الجزء أيضاً نتائج القياسات الدورية التي تجريها حول أداء كل جزء من أجزائها، إضافةً إلى إشارات أو معلوماتِ تحذيرٍ وإشعارٍ لمركز الصيانة في حالة ارتفاع درجة الحرارة، أو زيادة "العبء" "Load" على بعض أجزاء المحطة، أو انقطاع الكهرباء، أو غير ذلك من الحالات التي تتطلب إشعار مركز الصيانة بها.



الشكل ٦-٩: ربط وحدات الإرسال والاستقبال بخلايا الموقع المختلفة.

- وحدة الربط مع هوائيات المحطة: لا يمكن من الناحية العملية تزويد المحطة بعدد كبير من الهوائيات، لذا تُستخدم وحداتٌ ميكروية وآلياتٌ خاصة تتيح استثمار الهوائيات على نحوٍ اقتصادي. من هذه الوحدات "المرشح مزدوج الاتجاه" "Duplexer"، الذي يتيح فصل مسار الإشارة المستقبلة عن الإشارة المرسلة، ومن ثم استخدام الهوائي نفسه للإرسال والاستقبال في آن واحد.

- من الوحدات الضرورية أيضاً "دارة المزج أو الضم" "Combiner"، التي تتيح مزج إشارتين راديويتين، صادرتين عن مصدرين مختلفين، بترددين مختلفين، ودمجهما في إشارة واحدة، وذلك تحضيراً لإرسالها عبر الهوائي نفسه.

- تحوي المحطة كذلك "دارة الفصل" "Splitter"، التي تؤدي دوراً معاكساً لدور دارة المزج في جهة الاستقبال (المسار الصاعد)، إذ تتيح فصل الإشارة الراديوية المستقبلة إلى عدة إشارات جزئية، تتباين في تردد كل منها، كم تتولى توزيع هذه الإشارات على وحدات التراسل المختلفة.

- من أجزاء المحطة المهمة أيضاً نظام التزود بالطاقة، إذ يجري ذلك عادةً إما عن طريق التغذية المباشرة بالتيار المتناوب الذي يُحَوَّل إلى تيار مستمر عبر "مُقَوِّم تيارٍ" "Rectifier" خاص، أو عن طريق مولداتٍ كهربائية تعمل بالوقود، وذلك في المناطق النائية التي لا تتوفر فيها تغذية كهربائية. إضافة إلى ذلك، تحوي كل محطة مجموعة بطاريات تتيح استمرارية العمل عند انقطاع التغذية الكهربائية أو نفاذ الوقود. هذا وقد شهدت السنوات الأخيرة تركيزاً متزايداً على استخدام وسائل توليد الطاقة الصديقة للبيئة، مثل الخلايا الشمسية، والرياح و غيرها.

توصل المحطة الثابتة بجهاز التحكم بالمحطات، والذي قد يبعد موقعه عشرات الكيلومترات عن موقع المحطة، إما لاسلكياً باستخدام دارات ميكروية (Microwave) أو سلكياً (باستخدام كوابل محورية أو ألياف ضوئية أو غير ذلك من وسائط نقل الإشارة)، وذلك باعتماد أنظمة النقل والتراسل المتاحة في الموقع، مثل "Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH)"، أو "Digital Subscriber Line (xDSL)"، أو غيرها. فإذا كان الوصل لاسلكياً، وجب تحويل الإشارة إلى تمثيلية، وإرسالها مرة أخرى بمواصفات النظام الميكروي المستخدم، وهذا يستدعي وجود نظام تراسل ميكروي خاص. أما إذا كان الوصل سلكياً، فيجب توفر "مودم" "Modem" يحقق شروط الاتصال المنشودة.

كنا أشرنا إلى أن المحطة الثابتة في نظام UMTS تسمى Node B. تشابه بنية هذه المحطة من حيث المبدأ تلك الموضحة في الشكل ٦-٨، ويكمن وجه الاختلاف الأساسي في أن وحدة معالجة الإشارة الرقمية، والتي تُدعى اصطلاحاً "Channel Element (CE)"، تنجز خطوتي النشر وفك النشر الخاصتين بتقنية CDMA (انظر البحث ٢-٣). وهذه الوحدة هي التي تحدد سعة محطة Node B، مقابل عدد وحدات TRX في نظام GSM. هذا ولا يوجد تعريف توافقي أو معياري لهذه الوحدة، إذ تختلف تماماً من منتجٍ إلى آخر، لذا، نُعرض عن تفاصيل إضافية في هذا السياق، ونكتفي بالإشارة إلى أن تعبير CE يقترن بكمية دفقٍ أساسية يمكن للمحطة إرسالها واستقبالها، وهذه الكمية الأساسية تختلف من منتج لآخر.

٦-٥-٢ وحدة التحكم بالمحطات الثابتة

لنفترض أن مشتركاً ما بنظام GSM يستخدم هاتفه متنقلاً بسيارة سريعة ضمن منطقة التغذية الخاصة بمحطةٍ ثابتةٍ ما، أي ضمن النطاق الجغرافي الذي تمثله الخلية المرتبطة بهذه المحطة. ولنفترض أن اتصال هذا المشترك يَشْغَلُ حيزاً زمنياً على القناة الترددية f_{c1} . عندما يقترب هذا المشترك من طرف الخلية، بحيث تصبح الإشارة التي يستقبلها من المحطة الثابتة ضعيفة، يحاول النظام إتاحة إشارة محطة أخرى لمتابعة الاتصال، ويباشر بإجراءات تسليم المشترك من خلية إلى أخرى (Handover). وعند مباشرة عملية التسليم، لابد من تحديد المعلومات التالية:

أولاً: هوية المحطة المجاورة التي توفر أفضل إشارة من ناحية مستوى الإشارة إلى الضجيج (SNR)، والتي تتيح للمشترك أفضل جودة اتصالٍ ممكنة. وهذا يقتضي معرفة القنوات الراديوية المختلفة المستقبلة عند نقطة التسليم، ونسبة الإشارة إلى الضجيج الخاصة بكلٍ منها.

ثانياً: بعد تحديد القناة الترددية ذات الإشارة الأفضل، يجب تحليل سعة هذه القناة، واختبار وجود حيّزٍ زمني شاغر، يمكن أن يخصص للمشترك. إذ أن الخطوة السابقة تقود إلى قراءة المعلومات العامة عن القناة الترددية، والتي تكون محمولة ضمن قناة BCCH، ومعرفة قوة أو جودة الإشارة لقناة ترددية ما لا يعني بالضرورة وجود حيز زمني شاغر عليها. وفي حالة عدم وجود حيز شاغر ضمن الإطار المحمول على القناة ذات الإشارة الأفضل، يجب دراسة إمكانية شغل القناة التي تليها من ناحية جودة الإشارة، ثم التي تليها، وهكذا.

تمثل النقطتان السابقتان جزءاً من مهام "إدارة موارد الشبكة الراديوية" "Radio Resource Management (RR)"، وجَليٌّ أن المحطة الثابتة لا يمكن أن تنجز أياً من هذه الخطوات التحليلية، ولا يمكن أن تكون على دراية بالمعلومات المذكورة، وذلك بسبب ما يلي:

١) بيَّن البحث السابق أن مهام المحطة الثابتة الرئيسية تتمحور حول توفير نفاذ المشتركين إلى الشبكة بجودة واعتمادية أو وثوقية عاليتين، وهذا يتطلب التركيز على إجراءات الإرسال والاستقبال الراديوي، وعلى خطوات تحضير الإشارة للبث أو تحليلها بُعيد الاستقبال، وذلك لاستخلاص المعلومات الرقمية منها ومتابعة إرسالها إلى أجزاء الشبكة الأخرى. لذا، لا يشمل الإطار المرسوم لمهام المحطة الثابتة النقاط التي ذكرناها، فهذه النقاط ذات صبغة تنسيقية بحتة.

٢) إذا كان المشترك يتجول ضمن مساحة جغرافية واسعة، فقد ينتقل أثناء إجرائه للاتصال الواحد بين خلايا تابعة لمحطات ثابتة متعددة، ولو كانت الإجراءات التي سبق ذكرها تُنجز ضمن المحطة الثابتة، لوجب توفر قاعدة بيانات في كل محطة، تحوي المعلومات المتعلقة بعدد كبير من المحطات، وهذا غير ممكن عملياً ويزيد من تكاليف وأعباء تشغيل الشبكة.

٣) نظراً للطبيعة المتغيرة لأية شبكة من ناحية السعة وعدد المشتركين والترددات المتاحة للاستخدام، فإن الموارد المتاحة في كل محطة تكون عرضةً للتبديل والتغيير، تبعاً لتطور الشبكة وتبعاً لحاجات التخطيط. ولو كانت المعلومات السابقة محفوظة في كل محطة، لوجب تحديث قواعد البيانات الخاصة بمحطات كثيرة، عند أي تغييرٍ ضمن الشبكة، حتى لو شمل هذا التغيير محطة ثابتة واحدة فقط.

٤) إضافة إلى التغيير الذي يطال الموارد المتاحة، تَتَغيَّر درجة شغل القنوات الترددية في كل محطة بين لحظة وأخرى، تبعاً لعدد المستخدمين الآني في كل خلية، أي أن التنسيق بين المحطات المختلفة يقتضي معرفة عدد الأحياز الزمنية المشغولة على كل القنوات الترددية، وضمن كل المحطات المعنية بالتنسيق، على نحوٍ آني أو لحظي، وهذا ما لا يمكن لأي من المحطات الثابتة أن تحيط به.

يتضح مما سبق وجود حاجة ماسة لوحدة خاصة ضمن الشبكة، تتولى أو تضطلع بمهام التنسيق بين المحطات، وتدير تَشارُكَ المستخدمين بشغل الموارد الراديوية المتاحة. تُعرف هذه الوحدة باسم "وحدة التحكم بالمحطات الثابتة"، ويطلق عليها في نظام GSM اسم "Base Station Controller (BSC)"، وفي نظام UMTS "Radio Network Controller (RNC)". وعند تحليل مهام هذه الوحدة نجد أنها تمثل مقسماً خاصاً بالجزء الراديوي من الشبكة، يتولى مهام "التشبيك" "Networking" وتسيير أو "توجيه مسارات المكالمات" "Call Routing" من وإلى المحطات الثابتة المختلفة، إضافةً إلى إدارة خطوات وأطوار الاتصال ضمن شبكة النفاذ.

ترتبط وحدة التحكم، أي الـ BSC، بالمقسم عبر رابطٍ يعرف ضمن بنية GSM باسم "A-Interface (A-IF)"، ولا يمكن للوحدة أن ترتبط بأكثر من مقسم في آنٍ واحد. كما ترتبط بالموجه الرئيسي (SGSN، انظر التفصيل لاحقاً) ضمن قسم PS-Domain في الشبكة المركزية بالرابط G_b. أما من جانب الجزء الراديوي، فترتبط الوحدة بالمحطات الثابتة عبر الرابط

"A_{bis}-Interface"، ويُحدِّدُ سعة هذه الوحدة عدد المحطات الثابتة التي ترتبط بها، والذي قد يفوق 150 محطة، تبعاً لتوزيع وبنية الشبكة، وهيكليتها الطوبولوجية. هذا ولم يكن من الممكن في الإصدارات الأولية للنظام ان ترتبط المحطة الثابتة بأكثر من وحدة BSC، غير أن بعض التقنيات الحديثة باتت تتيح ذلك (يجمع هذه التقنيات مصطلح "BSC in Pool").

يسري ما ذكرناه على وحدة التحكم في نظام UMTS أيضاً، أي وحدة RNC، مع اختلاف أسماء الروابط، إذ ترتبط وحدة RNC بالمقسم عبر الرابط I_u-CS وبالموجه الرئيسي عبر الرابط I_u-PS،كما ترتبط بالمحطات الثابتة (Node B) عبر الرابط I_{ub}. هناك اختلافٌ آخر أيضاً، وهو أن نظام UMTS يتيح الوصل بين أكثر من وحدة RNC عبر الرابط I_{ur}، وهذا يتيح تنسيقاً إضافياً ومرونة عند إنجاز عملية التسليم، بينما لا يعرف نظام GSM أي رابطٍ مباشر بين وحدات BSC المختلفة (انظر [١٤]-[١٦]).

تشمل مهام وحدة التحكم ما يلي:

١) إدارة وتنسيق الخطوات والإجراءات المرتبطة بأطوار الاتصال المختلفة ("مباشرة الاتصال" "Call Setup" وإجراء الاتصال "Information Exchange" و"تحرير الاتصال" "Call Release")، وتُعنى وحدة التحكم بهذه الخطوات ضمن القسم الراديوي من الشبكة، أي أنها تتولى التحكم بالرسائل والأوامر الخاصة بذلك، والتي يجري تبادلها مع الوحدة المتحركة، مروراً بالمحطة الثابتة، التي يكون دورها في هذا السياق مقتصراً على نقل المعلومات إلى الوحدة المتحركة، أو تنفيذ إيعازات وحدة التحكم (سنناقش في الفصل ٧ أمثلة على ذلك).

٢) الإشراف على إدارة الموارد الفيزيائية في شبكة النفاذ الراديوي، من حيث تحديد القنوات الخاصة بالتشوير (Signaling) لكل اتصال، وتحديد القنوات الفيزيائية المتاحة في كل خلية وفي كل لحظة، ومن حيث توزيع القنوات الفيزيائية على المشتركين لتلبية احتياجاتهم المختلفة بأعلى مستوى ممكن من الفعالية.

٣) "تجميع أو ضم" "Multiplexing" الاتصالات الواردة من محطات ثابتة مختلفة، أي في اتجاه المسار الصاعد، وتحميلها ضمن القنوات المخصصة للتراسل مع المقسم، أما في جهة المسار الهابط، فتتولى الوحدة إنجاز إجراءات توزيع دفق المعلومات الوارد من المقسم على المحطات المختلفة. وهذه الإجراءات هي التي تبرر اعتبار هذه الوحدة "المقسم الخاص بالجزء الراديوي".

٤) التحكم بطاقة بث المحطة الثابتة والوحدة المتحركة، إذ يجب أن تكون طاقة البث في كلا الطرفين مقيدةً بعدم التشويش على محطات أخرى. وننوه في هذا السياق إلى أن قياس شدة الإشارة المستقبلة يجري من طرف المحطة الثابتة أو الوحدة المتحركة، ويُعلِم كلاهما وحدة التحكم بنتائج القياسات، وهذه الوحدة هي التي تصدر إيعاز خفضٍ أو رفعٍ مقدار طاقة البث، تبعاً للمعلومات المتوفرة من وعن المحطات المجاورة أيضاً، يعني ذلك أن دور المحطة والوحدة المتحركة يكون مقتصراً على إجراء القياسات وتنفيذ الإيعازات.

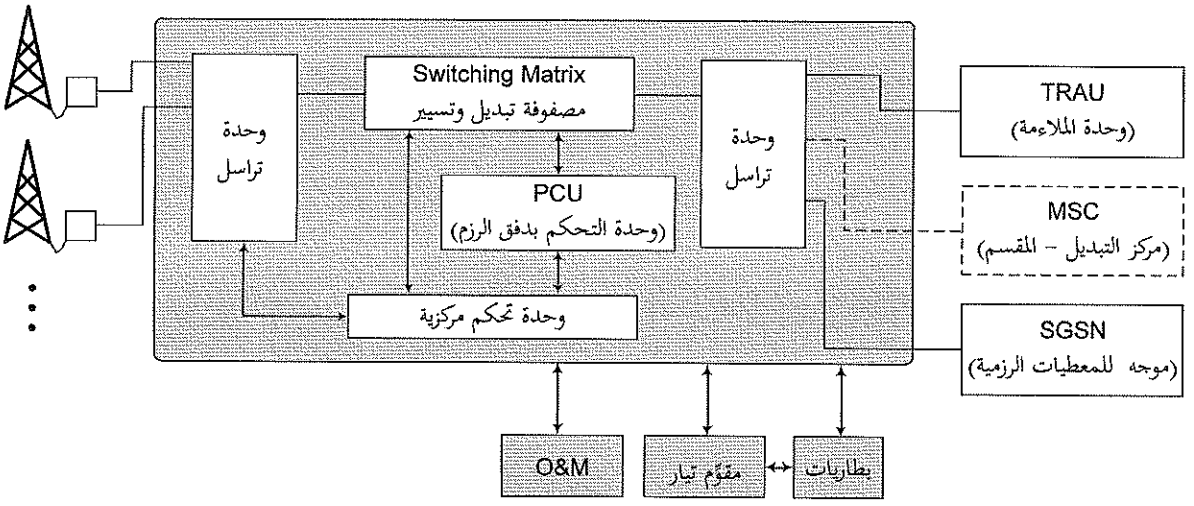
٥) تلعب وحدة التحكم دوراً مهماً في إطار تشغيل وصيانة الجزء الراديوي من الشبكة، فمعظم إجراءات التحكم تمر عبر هذه

الوحدة، إما كناقلٍ لها إلى المحطات الثابتة، أو كطرفٍ في تنفيذها. كما تكون هذه الوحدة معنية بتنسيق إجراءات التنفيذ في المحطات المختلفة.

٦) تنسيق النفاذ إلى الشبكة، فوحدة التحكم هي المعنية بقرار السماح لمشتركٍ ما بشغل قناة فيزيائية، وذلك تبعاً لتوفر أو عدم توفر قنوات شاغرة.

تتجلى المهام السابقة في البنية النموذجية لوحدة التحكم، والتي يعرضها الشكل ٦-١٠، إذ تشمل:

- مصفوفة تبديل تنجز مهام توزيع وتجميع المعلومات أو المعطيات الرزمية على مسارات الاتصالات من وإلى المحطات الثابتة.
- وحدات تحكم بالمنافذ الفيزيائية التي تصل الـ BSC بالمحطات الثابتة من جانب، وبمكونات الشبكة الأخرى من جانبٍ آخر. وترتبط الوحدة بالمحطات الثابتة وبالمكونات الأخرى إما بمنظومة ميكروويف، أو عبر تقنيات أخرى، وذلك تبعاً للبنية التحتية المتوفرة.
- وحدة تحكم مركزية، تدير عمل الوحدات الجزئية المختلفة، وتتولى التنسيق بينها.
- "وحدة تحكم بدفق الرزم" "Packet Control Unit (PCU)"، تتولى تنسيق الرزم إذا كانت المعلومات تمثل دفق معطيات (انظر البحث ٦-٥-٤).



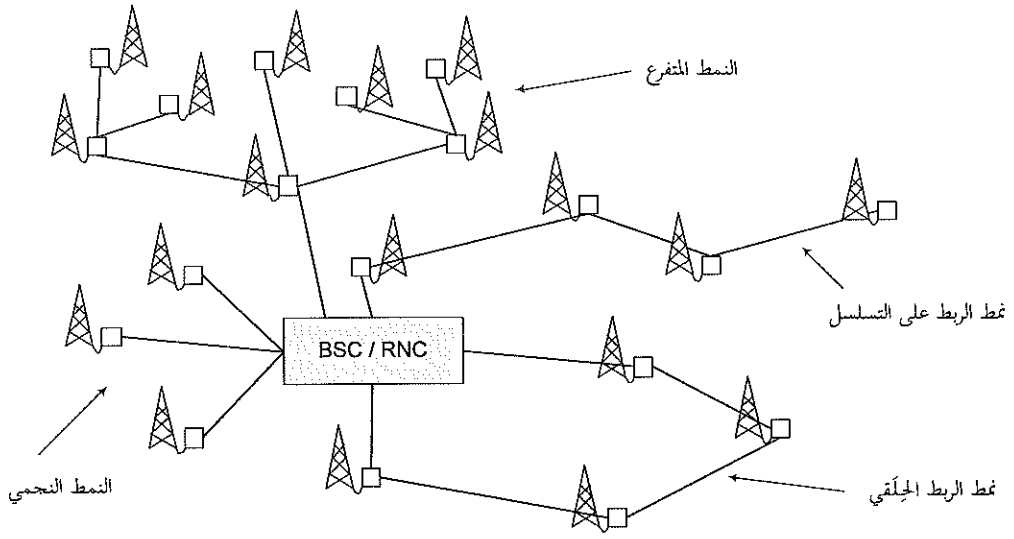
الشكل ٦-١٠: البنية النموذجية لوحدة التحكم (BSC).

- منفذ اتصال مع مركز التشغيل والصيانة المركزي.
- بطاريات ومقوم تيار لضمان تزويد الـ BSC بالطاقة.
- منافذ للربط مع مركز MSC وموجه SGSN، ووحدة TRAU (سيجري نقاش مهام هذه الوحدات في أبحاثٍ تالية).

تتشارك بنية الـ RNC مع بنية الـ BSC من ناحية المكونات الأساسية، وتختلف عنها بما يلي:

- عوضاً عن التحكم بالأحياز الزمنية ضمن إطار TDMA المعرف على كل قناة ترددية، تكون متتاليات النثر والبعثرة المستخدمة لتمييز المشتركين والمحطات هي مناط التحكم في حالة الـ RNC.
- لا تكون معالجة تبادل المعطيات الرزمية مركزة في وحدة مخصصة، وإنما تتوزع آلياتُ تنسيق تبادل المعطيات على عدة أجزاء ضمن كل من وحدة RNC والمحطة الثابتة.

يجري ربط أو تشبيك المحطات الثابتة بوحدة التحكم -عبر شبكة التراسل- وفق أكثر من مبدأ، ويقود ذلك إلى أنماط هندسية متعددة لهيكلية الشبكة (أي طوبولوجيات مختلفة)، يوضحها الشكل ٦-١١.



الشكل ٦-١١: الأنماط المختلفة لربط المحطات الثابتة بوحدة التحكم.

- أبسط هذه الأنماط هندسياً هو "النمط النجمي" "Star Configuration"، حيث تكون كل محطة متصلة بوحدة التحكم على نحوٍ مباشرٍ ومستقل عن المحطات الأخرى.
- أما النمط الآخر فهو "الربط على التسلسل" أو "نمط التسلسل" "Chain Configuration"، حيث يشكل عدد من المحطات سلسلةً يكون أحد طرفيها هو وحدة التحكم. تُنقل المعلومات في هذه الحالة من كلِّ محطة إلى الـ BSC/RNC، وذلك عبر عدد من المحطات الأخرى ضمن السلسلة، ويختلف عدد المحطات ضمن السلسلة تبعاً لمقتضيات التخطيط ووفق التوزع الجغرافي للمحطات الثابتة.
- النمط الثالث هو "النمط الحِلَقي" "Loop Configuration"، والذي يتميز بأن المحطات ووحدة التحكم تكون مرتبطة ببعضها عبرمسارِ معلوماتٍ مشترك، مكونةً بذلك حلقة مغلقة.

- من الممكن أيضاً ربط المحطات وفق مزيج من نمط التسلسل والنمط النجمي، حيث يقود ذلك إلى ما يعرف بـ "النمط المتفرِّع" "Tree Configuration"، كما هو مبين في الشكل ٦-١١.

تتباين الأنماط السابقة من ناحية إيجابياتها وسلبياتها، فعلى سبيل المثال: يتميز نمط الربط على التسلسل بأنه سهل من ناحية التنفيذ، وقليل التكاليف، إذ لا يحتاج إلى عتاد وتجهيزات معقدة، غير أنه سلبي من ناحية تأثير أي عطل فني يصيب نقطةً ما ضمن السلسلة، إذ يقود ذلك إلى انقطاع الاتصال مع كل النقاط التي تسبقها.
من جانبه، يتيح النمط الحلقي نوعاً من الحماية الإضافية، إذ يوفر مسارين ممكنين للوصول إلى وحدة التحكم، فإذا أصاب عطلٌ فني نقطةً ضمن الحلقة، أمكن الوصول إلى المحطات عبر المسار الآخر. غير أن هذه الناحية الإيجابية لها ثمنٌ وهو التكلفة الإضافية المرتبطة بهذا النمط.
أما النمط النجمي، فيُستخدم بكثرة في طور إنشاء الشبكة، وهو أسهل الأنماط لربط المحطات الموجودة في مناطق نائية بوحدة التحكم، إلا أنه مكلف من ناحية السعات والموارد التي يتطلبها نقل المعلومات من كل محطة، لأن كلاً من المحطات تكون متصلةً بنظام ميكروويف خاص بها، وتشغل "قناة تراسل (نقل) راديوية" "Microwave Link" خاصةً بها.
نظراً لهذا التباين في السلبيات والإيجابيات، يحكمُ اختيارَ نمط التشبيك في كل جزء من أجزاء الشبكة (نقصد بالجزء هنا المنطقة الجغرافية) السعةُ المتاحة ضمن شبكة التراسل، والتوزيع الجغرافي للمحطات، وبُعدُ المحطات عن بعضها البعض، وتقنيات التراسل المتاحة (ميكروويف، كبل ضوئي، ..). هذا وتُشبك وحدة التحكم بالمحطات التابعة لها غالباً وفق مزيج من الأنماط الثلاثة، خصوصاً إذا استحضرنا أن عدد المحطات الثابتة التي ترتبط بوحدة BSC/RNC قد يصل بضع مئاتٍ في كثيرٍ من الأحيان، ومن ثم يكون هناك مزيج معقد من المعطيات الخاصة بالسعات والتوزيع الجغرافي

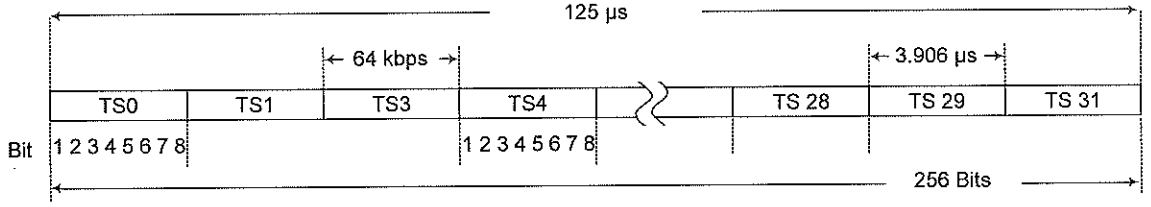
٦-٥-٣ وحدة فك الترميز وملاءمة الدفق

من الواضح والجلي أن خطوة ترميز الإشارة الكلامية (ترميز المنبع) التي تُنجز في الوحدة المتحركة (انظر الفصل ٥) يجب أن يقابلها خطوة عكسية في طرف الشبكة، فالإشارة المرمزة البحتة لا تكون مفهومة، لذا يجب تغذية مرشح تركيبي بالموسطات الممثِّلة للإشارة، وذلك لإعادة توليد نسخة مفهومة منها. تندرج خطوة فك الترميز من الناحية المنطقية ضمن المهام الوظيفية للمحطة الثابتة، إلا أن الواقع يختلف عن ذلك، إذ يجري فك الترميز في وحدة فيزيائية قائمة بذاتها "Stand-alone Unit" ومستقلة عن المحطة الثابتة.
تُعرف هذه الوحدة باسم "وحدة فك الترميز وملاءمة الدفق" "Transcoding and Rate Adaptation Unit (TRAU)" (سنشير لها اختصاراً بتعبير "وحدة الملاءمة")، وتكون -في أغلب الأحيان- موجودةً فيزيائياً في موقع المقسم. وترجع خلفية هذا الفصل الفيزيائي لهذه الوحدة عن المحطة الثابتة إلى القواعد التي تحكم نقل المعلومات بين نقاط الشبكة المختلفة، والتي نلخصها في السطور التالية.

لما كانت شبكات الاتصالات الخلوية مصممة لإتاحة إرسال واستقبال المكالمات أو المعطيات الرقمية من وإلى الشبكة الهاتفية

الثابتة أيضاً، وَجَبَ أن يجري تبادل المعلومات أو الإشارات بين مقسم الشبكة الخلوية ومقسم الشبكة الثابتة وفق البروتوكولات والخصائص الفنية للإشارة التي توافق وتلائم البنية التحتية المهيمنة على مقاسم الشبكات الهاتفية الثابتة، وعلى منافذ الربط بين هذه المقاسم. وهذه البنية المهيمنة تعتمد آليات "التضمين النبضي المرمَّز" "Pulse Code Modulation (PCM)" وبروتوكولات شبكة ISDN، حيث يخصص لكل اتصال حيزٌ زمني ضمن إطار PCM، المسمى معيارياً بإطار E1[1]، والذي يضم أو يجمع 32 قناةَ اتصالٍ وتشوير، وفق مبدأ "التجميع باقتسام الزمن" "Time Division Multiplexing" (الشكل ٦-١٢).

يشمل كل إطار E1 30 قناة اتصال، إضافة إلى قناةٍ لنقل معلومات التزامن، وأخرى خاصة بنقل معلومات التحكم وفق نظام التشوير "Signaling System No. 7 (SS7)". ويبلغ طول الإطار زمنياً 125 μsec، ما يعني أن الحيز الزمني المخصص لكل قناة هو $125\,\mu\text{sec}/32 = 3.9\,\mu\text{sec}$. يُشغل كل خير زمني بثماني خانات اثنانية (بتات)، لذا يضم الإطار 256 بتاً، تُنقل بمعدل دفقٍ إجمالي مقداره $256\text{bit}/125\,\mu\text{sec} = 2.048\text{Mbps}$، وتكون حصة كل قناة ضمن هذا المعدل 64 kbps.



الشكل ٦-١٢: البنية النموذجية لإطار E1.

يعني ذلك أن المعلومات الرقمية الممثلة لأي اتصال هاتفي، أو لأي دفقٍ للمعطيات، تُنقل بين مقاسم شبكة الهاتف الثابت بمعدل دفقٍ مقداره 64 kbps، لذا يجري إنجاز فك ترميز المنبع ضمن الجزء الثابت من شبكة الاتصالات الخلوية على نحوٍ يقود إلى إشارة رقمية لها المعدل ذاته.

من ناحيةٍ أخرى، إذا ورد اتصال إلى مشتركٍ ضمن الشبكة الخلوية، فإن الإشارة الكلامية يجب أن "تضغط" من 64 kbps إلى 13 kbps (في حالة الإشارة ذات المعدل الكامل)، وفق آليات ترميز المنبع التي سبق شرحها. إضافة إلى ما سبق، يجب ملاءمة دفق المعطيات إذا كان معتمداً تقنية تبديل أو توجيه الدارات، من المقدار الذي تتداوله الوحدة المتحركة، والذي يتراوح بين 2.4 kbps و 9.6 kbps، إلى 64 kbps، وبالعكس (انظر الفصل ٤).

تمثل النقطتان السابقتان، أي ضغط الإشارة (أو فك الضغط)، وملاءمة معدل دفق المعطيات، جوهرَ مهام وحدة الملاءمة TRAU، حيث يدل تعبير "Transcoding" على معالجة الإشارة الكلامية (الضغط وعكسه)، بينما يدل تعبير "Rate Adaptation" على مواءمة دفق المعطيات بين الجزء الراديوي والجزء الثابت من الشبكة.

يرجع سبب فصل وحدة الملاءمة عن المحطة الثابتة إلى إتاحة المجال لمشغلي الشبكات للتقليل من تكاليف تشغيل الشبكة،

[1] نكتفي في هذا السياق بذكر إطار E1 نظراً لكونه مهيمناً من ناحية انتشاره، وننوه إلى وجود أطرٍ معيارية أخرى تُستخدم في شبكة التراسل.

وخصوصاً تكاليف نقل المعلومات على شبكة التراسل بين المناطق الجغرافية البعيدة عن بعضها. فالبنية التحتية لشبكة التراسل والنقل تكون في كثيرٍ من الأحيان مستأجرة من الدولة أو مؤسسة الاتصالات الحكومية، أو من ينوب عنهما، ولا يقتصر تعبير "البنية التحتية" هنا على شبكة الكابلات النحاسية أو الألياف الضوئية فقط، بل يشمل أيضاً كل الترددات التي تُستخدم لنقل المعلومات عبر منظومات المايكروويف.

تقوم الجهة الحكومية بتأجير خطوط ومسارات النقل وفق تعرفة تتغير تبعاً للسعة المخصصة لكل مسار وللمسافة الفاصلة بين نقطتي التراسل وللوسط المادي المستخدم لنقل المعلومات (وصلة مايكروويف، خط سلكي، كبل أو ليف ضوئي، ...)، لذا تُعرف خطوط نقل المعلومات بـ "خطوط التراسل أو النقل المؤجرة" "Leased Lines". وهذا يعني أن تكاليف تشغيل الشبكة تنخفض عند استخدام أقل سعة ممكنة للتراسل بين نقاطٍ أو عقدٍ أو مكوناتِ الشبكة المتباعدة.

لتوضيح أبعاد هذا المفهوم نُذكِّر بأن عدد وحدات الارسال والاستقبال (TRX) في المحطة الثابتة الواحدة قد يتجاوز 24 وحدة، وأن كل وحدة تتيح 8 قنوات فيزيائية للاتصال والتحكم. هذا يعني أن المعلومات التي تُنقل بين المحطة (BTS) ووحدة التحكم (BSC) قد تخص ما يقارب من 200 قناة اتصالٍ وتشويرٍ. بدورها، تجمع وحدة التحكم دفق المعلومات من أكثر من 100 محطة، وإذا افترضنا أن متوسط عدد وحدات TRX في كل محطة هو 10، نجد أن سعة كل BSC تتجاوز بسهولة 1000 TRX، أي 8000 قناة فيزيائية (Time Slot). وإذا استحضرنا أن كل مقسم قد يجمع دفق المعلومات من العشرات من وحدات التحكم، يتضح لنا الكم الهائل لسعات التراسل التي يتطلبها نقل المعلومات بين أطراف أو مكونات الشبكة المختلفة. لذا، يجب تجميع هذه المعلومات على نحوٍ فعال للتقليل من سعات التراسل المطلوبة، وكما سبق الذكر، يتيح تأخير إجراء فك الترميز إلى ما بعد نقل المعلومات وسيلةً ناجحةً لتحقيق ذلك.

بعد بيان الحافز على التقليل من سعات التراسل المطلوبة، نعرض لإجراءات نقل المعلومات باستخدام وحدة الملاءمة:

١) بعد إنجاز خطوات فك التعديل الراديوي، وفك التعمية، وعزل ترميز القناة، نحصل في المحطة الثابتة على الإشارة الكلامية المرمَّزة، والتي توافق في حالة المعدل الكامل 260 bit لكل 20 ms، أي 13 kbps (انظر الفصل ٥).

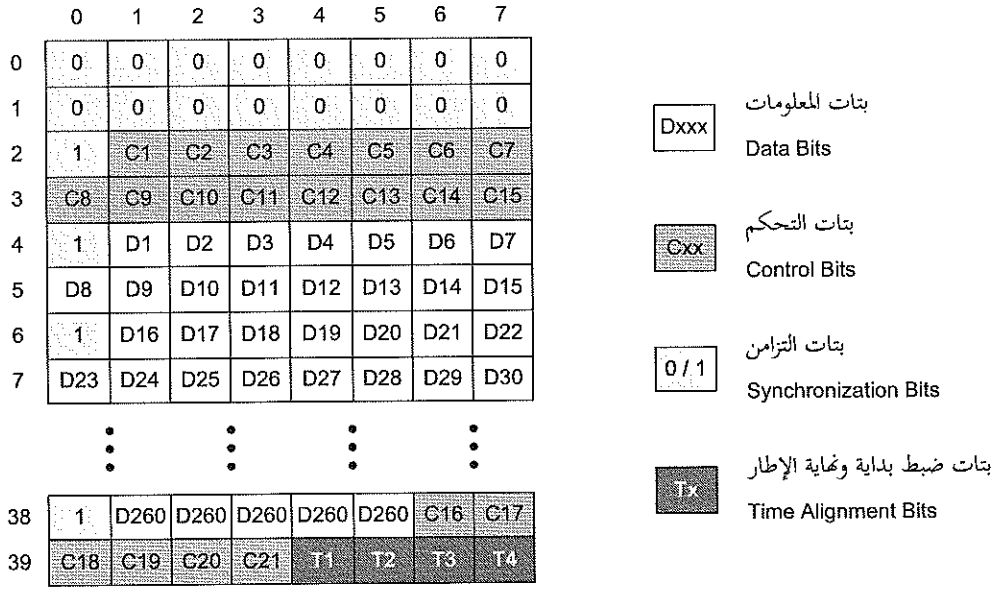
٢) تضاف إلى هذه الإشارة الأساسية معلومات خاصة بالتحكم، وفق ترتيبٍ محددٍ، يقود ذلك إلى ما يعرف بـ "إطار وحدة الملاءمة" "TRAU Frame"، الذي يبينه الشكل ٦-١٣، والذي تُصنَّف البتات ضمنه وظيفياً إلى ما يلي [١٧]:

- تمثل البتات المشار إليها بـ Dxxx المعلومات الأساسية، وهي 260 بتاً لكل 20 ms.
- تدل البتات المشار إليها بـ Cxx على "بتات تحكم" "Control Bits"، وتفي هذه البتات بأغراض متعددة، منها تمييز نوعية الإشارة (إشارة كلامية أم معطيات، معدل كامل أم نصفي، ...)، وبيان معدل ترميز الإشارة ضمن معدلات النقل المتكيف المتعددة (AMR)، والدلالة على نوعية وصلاحية الإطار المستقبَل من قبل المحطة (BFI)، والتحكم بالإرسال المتقطع، أي ما يكون مؤشراً لكون الإطار يحمل إشارة كلامية أم لا.
- يجري ضبط تزامن الإطار بين المحطة الثابتة BTS ووحدة الملاءمة TRAU باستخدام البتات في البايتين الأوليين

(2 Bytes)، والتي يتخذ كل منها القيمة "0"، بالإضافة إلى البت الأول من كل بايت فرديِّ الترتيب، والذي يتخذ (أي البت) قيمة ثابتة ("1") كما يبين الشكل.

- تُستخدم البتات المشار إليها ب Tx لضبط بداية ونهاية الإطار ضمن دفق المعلومات، ويطلق على هذا الإجراء اسم "Time Alignment".

ننوه في هذا السياق إلى أن ترتيب البتات ضمن الإطار، والمهام الوظيفية لكل منها، تكون مختلفة تبعاً لطبيعة المعلومات. فالإطار الذي يمثله الشكل ٦-١٣ هو إطار نقل الإشارة الكلامية، وهناك بُنىً أخرى لإطار الملاءمة خاصة بنقل معلومات التحكم والتشوير، أو بنقل المعطيات، أو بنقل المعلومات الممثلة لمقطع كلامي صامت. ومن الممكن الرجوع إلى تفاصيل بنية كل نوع من إطار وحدة الملاءمة في [١٧] و [١٨].

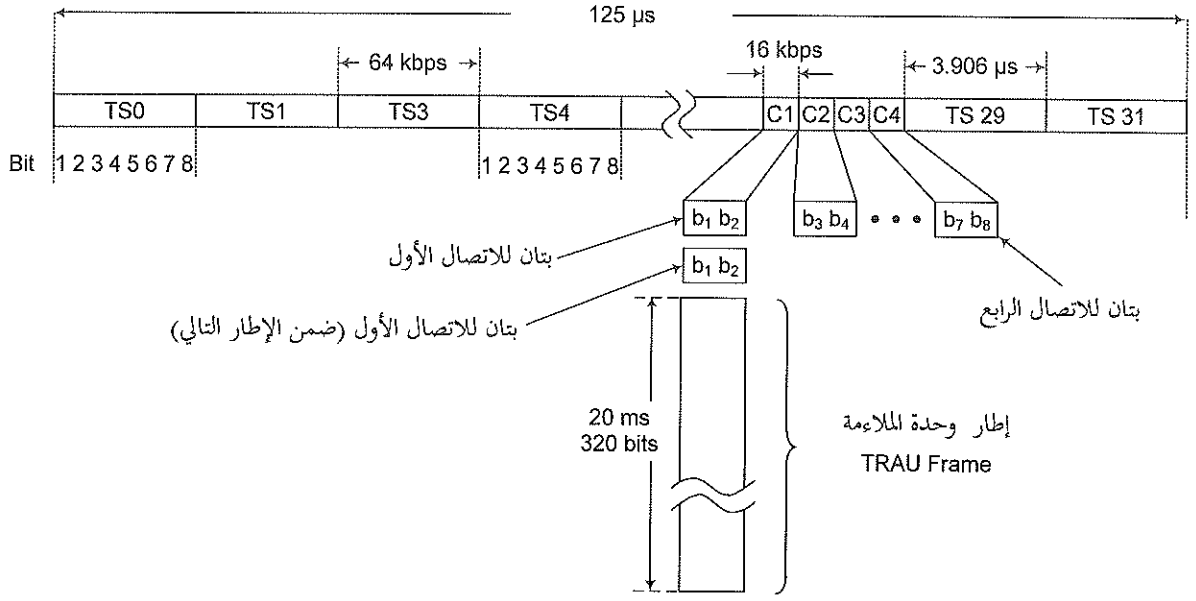


الشكل ٦-١٣: بنية إطار وحدة فك الترميز والملاءمة (TRAU Frame).

٣) يقود ما سبق إلى إطارٍ يحوي 320 بتاً ويمثل 20 ms، وهذا يكافئ معدل نقل مقداره 16 kbps. أي أن إضافة بتات التحكم إلى البتات الأصلية الممثِّلة لمقطع كلامي واحد تقود إلى رفع معدَّل تمثيل أو نقل المعلومات من 13 kbps إلى 16 kbps.

٤) يمثل إطارُ وحدة الملاءمة الوحدةَ الأساسية لنقل المعلومات بين المحطة الثابتة BTS ووحدة الملاءمة TRAU، التي تكون غالباً في موقع المقسم. ويجري نقل هذه الوحدة الأساسية باستخدام الإطار ذي النمط المعياري E1، حيث تتشارك 4 قنوات اتصال، كلٌّ منها بمعدل مقداره 16 kbps، بشَغْلِ حيز زمني واحد ضمن إطار E1. يوضح الشكل ٦-١٤ هذا المبدأ، حيث يُنقل ضمن كل حيز بتان من الإطار الممثل للاتصال الأول، يليهما بتان من الإطار الممثل للاتصال الثاني،

وهكذا. وتقوم المحطة بإجراء ضمٍ للمعلومات الممثلة للاتصالات الأربعة ضمن حيز زمني واحد، قبل إرسالها إلى وحدة التحكم.

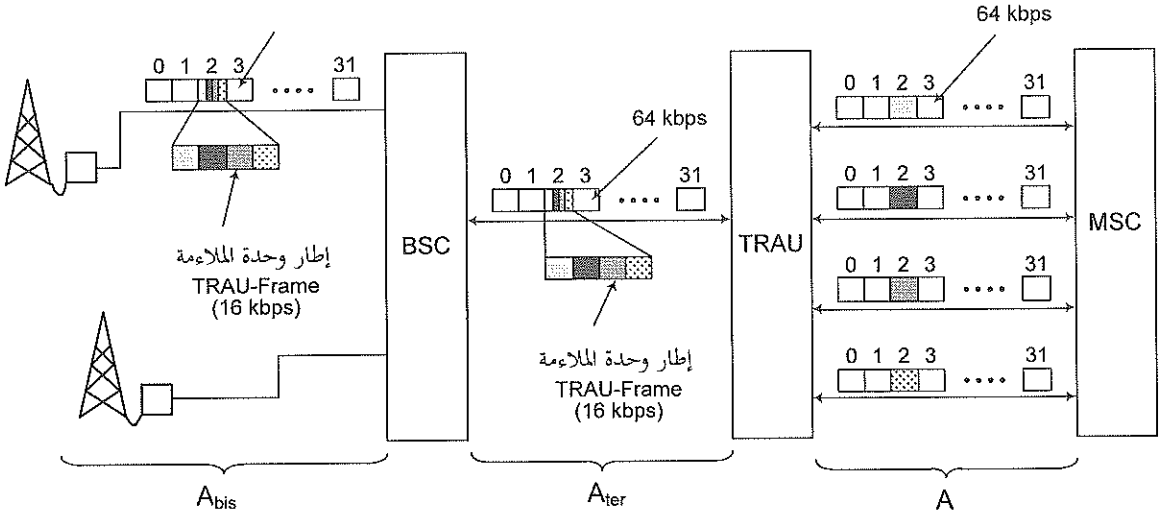


الشكل ٦-١٤: مبدأ شغل كل حيز زمني ضمن إطار E1 بأربعة اتصالات.

٥) أشرنا إلى أن وحدة الملاءمة تكون موجودة في غالب الأحيان في موقع المقسم (مركز التبديل)، فالمقسم هو النقطة المركزية التي يجب تحويل الإشارة فيها من مرمَّزة إلى إشارة رقمية مفهومة. لذا، ترسل وحدة التحكم BSC المعلومات إلى وحدة الملائمة TRAU، التي تقوم بفك ترميز الإشارة الكلامية (أو مواءمة معدل دفق المعطيات)، وهذا يؤدي إلى استخلاص 64 kbps من كل 16 kbps ضمن حيز زمني جزئي، أي استخلاص دفق المعلومات الممثل لأربعة اتصالات (انظر الشكل ٦-١٥). بعد ذلك، ترسل وحدة الملائمة هذه الاتصالات الأربعة إلى المقسم على أربعة أحياز زمنية منفصلة، بالمعدل الذي تقبله الشبكة المركزية (أي 64 kbps)، ويتولى المقسم تسيير أو توجيه هذه الاتصالات إلى جهاتها المنشودة.

٦) إذا كان دفق المعلومات يمثل معطياتٍ وليس إشارة كلامية، فإن الإجراءات أو الخطوات تكون مشابهة، حيث يجري في كل من المحطة ووحدة الملاءمة معالجة الدفق ليوائم أو يوافق المواصفات الفنية لدفق المعطيات في نظام ISDN، وفق المعيار المعروف بالرقم V.110 (انظر المواصفات المعيارية [١٩] و [٢٠]). وننوه هنا مرة أخرى إلى أن المقصود بالمعطيات في هذا السياق تلك التي يجري تبادلها وفق تقنية تبديل الدارات، وليس المعطيات الرزمية.

تقابل الخطوات التي ذكرناها خطوات عكسية في جهة المسار الهابط، أي عند ورود اتصالات من الشبكة إلى الوحدة المتحركة، بدءاً بالمقسم، مروراً بوحدة الملائمة، فوحدة التحكم، فالمحطة الثابتة.



الشكل ٦-١٥: مبدأ عمل وحدة الملاءمة.

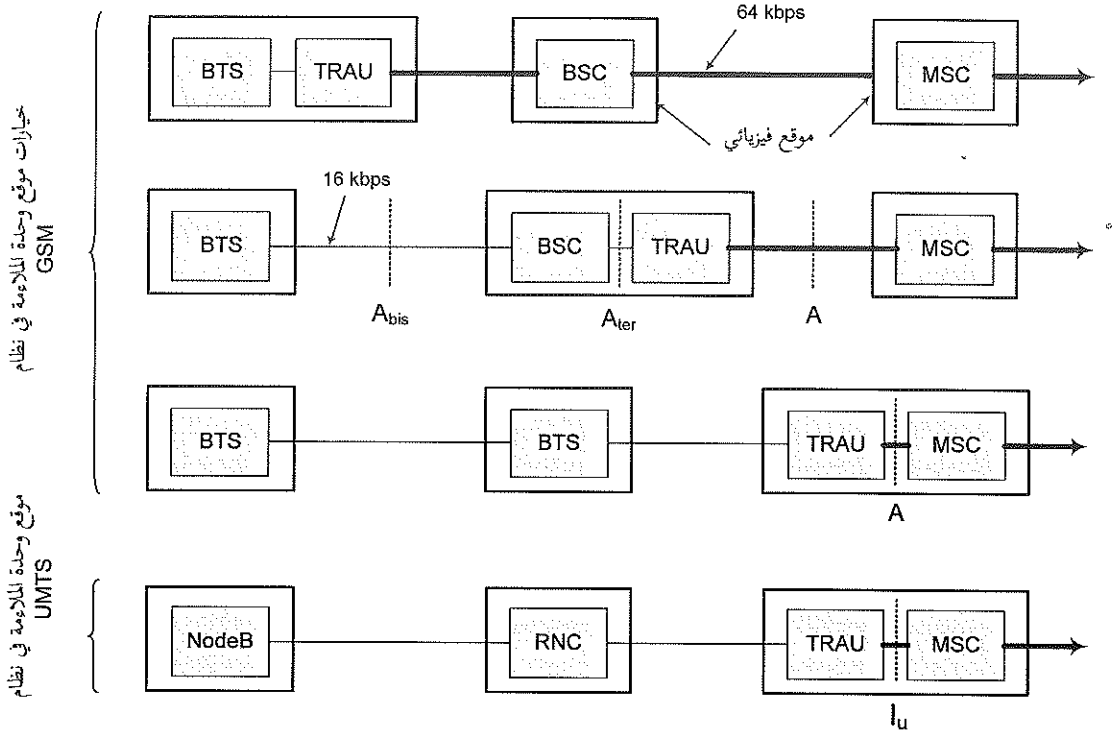
يوضح ما ذكرناه أن جوهر خفض تكاليف التشغيل يكمن في نقل المعلومات بين المحطة الثابتة والمقسم بمعدل منخفض مقداره 16 kbps، عوضاً عن 64 kbps، إذ يعني ذلك ضمنياً خفضاً للسعة التي تشغلها المعلومات على خطوط النقل المؤجرة بمقدار 75%. هذا ولا ينفي ما سبق إمكانية ربط وحدة الملائمة بأي جزء ضمن الشبكة (انظر الشكل ٦-١٦)، وفق مقتضيات التخطيط وإنشاء الشبكة، ووفق المعطيات الاقتصادية، إذ أن المواصفات المعيارية تتيح في حالة نظام GSM مرونة مطلقة في ذلك، غير أن هذه المرونة لم تكن مجدية على أرض الواقع، لذا جرى التخلي عنها في نظام UMTS.

ننوه في ختام نقاش وحدة الملاءمة إلى أن المواصفات المعيارية تشير إلى جزء الشبكة المكون من المحطات الثابتة ووحدة التحكم بتعبير "Base Station System (BSS)"، وهذا التعبير ذو دلالة وظيفية، أي أنه يدل على كل الوحدات الفيزيائية التي تتولى إنجاز المهام التي ذكرناها في الفقرات السابقة، لذا فهو يشمل وحدة الملائمة، حتى لو كانت موجودة في موقع المقسم.

مما تجدر الإشارة إليه أيضاً أن التطور الذي شهدته بنية الشبكة في الإصدارات الحديثة، خصوصاً بعد "الإصدار الرابع" "Release 4"، يتيح اعتماد بروتوكولات TCP/IP لنقل المعلومات حتى ضمن الشبكة الراديوية، وهذا بدوره سيقلل من ضرورة وأهمية وحدة الملاءمة، وقد يؤدي إلى إلغائها تماماً من بُنى الشبكات المستقبلية.

نختم هذا البحث بإشارةٍ مهمة من الناحية العملية، فقد عنيت المواصفات المعيارية لنظام GSM بشرح مستفيض ومسهب عن كل خصائص الروابط البينية ضمن الشبكة، إلا أنها تناولت بعض النقاط الخاصة بالرابط A_{bis} على نحوٍ مجملٍ، ودون بيان أدق التفاصيل، وهذا أتاح للمصنعين نوعاً من الحرية والمرونة في تصميم وتنفيذ المنتج النهائي. وبسبب هذه المرونة، يكون الربط بين كلٍ من الـ BTS والـ BSC والـ TRAU -بصيغته المُنفَّذة النهائية- تابعاً للجهة المصنعة (يُطلق على هذه الصفة تعبير "Proprietary"). والنتيجة الحتمية لذلك هي وجوب استخدام أجهزة الجزء الراديوي من الشبكة من مُصنِّعٍ واحد، أي أنه لا يمكن ربط محطة ثابتة من المصنِّع (أ) مع وحدة التحكم من المصنِّع (ب). لذا، نجد في الواقع أن أي شبكة تكون مقسمة إلى

أجزاء جغرافية، بحيث تكون الأجهزة الخاصة بالقسم الراديوي ضمن كل جزء من إنتاج المصنِّع نفسه، وهذا له أثر سلبي على تكاليف إنشاء الشبكات وتشغيلها، إذ يقلل من إمكانيات المساومة والتفاوض بشأن أسعار التجهيزات، كما أنه يفرض إجراءات خاصة على المشغل من ناحية توزيع موظفي الصيانة ومخازن أو مستودعات القطع البديلة. وقد جرى تجاوز هذه السلبية في نظم الاتصالات اللاحقة.



الشكل ٦-١٦: الأماكن المتاحة لموقع وحدة الملاءمة في نظامي GSM و UMTS.

٦-٥-٤ وحدة التحكم بالرزم

عرضنا في البحث ٤-٧ مبادئ تجزئة دفق المعطيات الرزمية كي يكون قابلاً للنقل عبر الرابط الراديوي، وبيَّنَّا أن هذه التجزئة لابد منها بسبب كون الرابط الراديوي مقيداً من ناحية تصميمه بالوحدة الأساسية لنقل المعلومات، وهي الرزمة الراديوية ضمن الحيز الزمني. فهذه الرزمة هي التي تُستخدم لنقل المعلومات، سواءً كانت تخص دفق معلومات يخضع لتبديل الدارات، أو دفقاً رزمياً.

بعد وصول المعلومات إلى المحطة الثابتة، تُنقل ضمن إطار وحدة الملاءمة (TRAU-Frame) إلى وحدة التحكم بالمحطات (BSC). بعد ذلك، يجب أن تتبع المعلومات الخاصة بشق الشبكة الذي يعتمد تقنية تبديل الدارات مسارها إلى المقسم، بينما تُقاد المعطيات الرزمية إلى الموجه الرئيسي في الشبكة المركزية، والذي يقابل المقسم أو مركز التبديل من حيث مهامه الأساسية.

تخضع المعلومات الخاصة بالمقسم لإجراء ملاءمة معدل الدفق وفق الشكل ٦-١٥، أما شق المعطيات الرزمية، فيجب أن يخضع لإجراءٍ آخر، يقود إلى تحويل بنية المعلومات من الصيغة التي يحملها إطار وحدة الملاءمة (TRAU-Frame) إلى صيغة رزمٍ تقليدية متتابعة، توافق بنيةُ كل منها حقول المعلومات والتحكم وفق بروتوكولات TCP/IP، فهذه هي الصيغة التي يمكن للموجه التعاطي معها. يعني ذلك أنه يجب إنجاز الإجراءات العكسية لما شرحناه في البحث ٤-٧.

أما في حالة استقبال معطيات رُزمية من شبكات خارجية، فإن الدفق يجب أن يحوَّل أيضاً إلى صيغة موائمة لإطار وحدة الملاءمة، أي أن تغيير بنية دفق المعطيات إجراءٌ مطلوب في الاتجاهين.

تمثل هذه الإجراءات -أي تغيير بنية المعطيات- الوظيفة الرئيسية لـ "وحدة التحكم بالرزم" "Packet Control Unit (PCU)". وهذه الوحدة هي العنصر الأساسي الذي أدرج ضمن شبكة النفاذ لإتاحة خدمات المعطيات الرزمية.

تُدمج هذه الوحدة عادةً كبرمجيات إضافية ضمن وحدة التحكم (BSC)، وتُمثل -من ناحية البنية الوظيفية للشبكة- الجُزءَ الذي يتصل بقسم PS-Domain من الشبكة المركزية (انظر الشكل ٦-٤). هذا وتسمح المواصفات المعيارية دمج وحدة التحكم بالرزم بالمحطة الثابتة أو بالموجه الرئيسي، ولكلٍّ من هذه الخيارات سلبياته وإيجابياته (انظر [٢١])، إلا أن دمجها بوحدة BSC هو الخيار الذي أثبت جدارته من الناحية العملية.

هذا وتنتفي الحاجة إلى هذه الوحدة في نظام UMTS، لأنها تكون مدمجة وظيفياً ضمن خطوات معالجة الإشارة في المحطة الثابتة (NodeB) ووحدة التحكم (RNC).

٦-٦ الشبكة المركزية

أشرنا في بداية هذا الفصل إلى أن تعبير الشبكة المركزية "Core Network" يُستخدم للدلالة على مجوعة المقاسم (Switches) والموجهات (Routers) ضمن الشبكة، وعلى قواعد البيانات الضرورية لتنسيق وإدارة ولوج المشتركين إليها. يشمل هذا التعبير أيضاً كل الأجهزة التي تدعم أياً من الخدمات المتاحة أو تساهم في توفيرها وإدارتها. لذا يضم هذا الجزء من الشبكة كلاً من سجل الـ HLR وسجل الـ VLR، كما يضم سجل أجهزة المشتركين ومركز التوثق (سنبين مهامهما لاحقاً) وكل ما يُعنى بحساب استهلاك المشتركين لموارد الشبكة، وتصدير الفواتير ("نظام الفوترة" "Billing System"). إضافةً إلى ذلك، تندرج ضمن تعبير الشبكة المركزية كل التجهيزات الخاصة بتوفير خدمة الخطوط مسبقة الدفع ("شبكة الخدمات الذكية" أو "الشبكة الذكية" "Intelligent Network (IN)")، و"خدمة الرسائل النصية القصيرة" "Short Message Service (SMS)"، و"خدمة البريد الصوتي" "Voice Mail Service (VMS)"، وغيرها من الخدمات، سواءً ذات الطابع الخَدَمي أو الإعلامي أو الترفيهي، والتي يُطلق عليها مصطلح "الخدمات الإضافية" "Value Added Services (VAS)" كاسمٍ جامع لها.

نؤكد في هذا الموضع على ما سبق التنويه إليه من أن البنية التي نناقشها في هذا الفصل هي بنية الإصدار "Release 99" وفق الشكل ٦-٤، والتي ما زالت مهيمنة على كثير من الشبكات في العالم. وقد خضعت هذه البنية لتعديلات جذرية في إصدارات لاحقة، حيث غَلَبَ التوجه إلى اعتماد تقنية توجيه الرزم كتقنية وحيدة لتبادل المعلومات والمعطيات ضمن الشبكة، وهذا التوجه

له ميزات كبيرة من الناحية الاقتصادية والتشغيلية، وسيؤدي إلى تقلص أهمية تقنيات تبديل الدارات لصالح تبديل الرزم، وربما إلى زوالها بعد أمدٍ بعيد.

بعد هذا التوضيحات المهمة، نعرض في ما يلي لمكونات الشبكة المركزية، منوهين عند نقاش كلٍّ من هذه المكونات إلى جزء الشبكة الذي يُدرج ضمنه.

٦-٦-١ مركز التبديل

أشرنا في موضع سابق إلى أن تعبير "مركز التبديل" هو الذي يدل على الوحدة الوظيفية المعنية باختيار وتبديل الدارات التي تُحمل عليها المعلومات الممثلة للمكالمات، بينما يدل مصطلح "المقسم" "Switching Center (Switch)" -كما يُستخدم ضمن بنية شبكة الهاتف الثابت – على منظومة التجهيزات التي تكون في موقع مركزي ضمن الشبكة، إذ تشمل هذه المنظومة مركز التبديل وغيره من الوحدات الوظيفية الأخرى. وقد استخدمنا التعبيرين بنفس المعنى في الأبحاث السابقة، نظراً لشيوع استخدام تعبير "المقسم"، غير أننا سنستخدم في هذا البحث تعبير "مركز التبديل" لبيان المهام الوظيفية المنوطة حصراً به.

لقد طُوِّر مركز التبديل الخاص بالشبكات الخلوية انطلاقاً من المقاسم التي تعتمد تقنية ISDN لشبكة الهواتف الثابتة، وهذا ما يبرر اختيار تعبير أو مصطلح "مركز تبديل خدمات التجوال" "Mobile Switching Center (MSC)" للدلالة على هذه الوحدة الوظيفية ضمن الشبكة، إذ يدل التعبير ضمنياً أنها تعتمد تقنيات التبديل التقليدية، ولكن مع إضافات خاصة بطبيعة الميزة الأساسية التي تقدمها الشبكة الخلوية وهي التجوال أو التنقل.

تشغل تجهيزات مركز التبديل من الناحية الواقعية مساحاتٍ تكافئ عشرات الأمتار المربعة، وتتألف من قوائم عديدة "Racks"، يحوي كل منها العديد من البطاقات الحاملة لدارات الكترونية غاية في التعقيد "Boards". ولا عجب في ضخامة وكمية هذه التجهيزات، فمركز التبديل الواحد قد يكون مصمماً لإدارة وتنسيق المكالمات الخاصة بما يفوق مليون مشترك بكثير، وتتطلب عمليات التبديل والتسيير المتعلقة بذلك طاقة حاسوبية كبيرة ودارات تحكم متقدمة جداً.

٦-٦-١-١ مهام مركز التبديل الرئيسية

يتولى مركز التبديل مهام التنسيق المتعلقة بكل ما له علاقة بأطوار الاتصال المختلفة، ففي طور التحضير للاتصال يُعنى مركز التبديل بالتحقق من هوية الطرف المُتصِل وكونه مخولاً باستخدام خدمات الشبكة، كما يُنجز الإجراءات الخاصة بالحصول على المعلومات الضرورية عن الرقم المُتَّصَل به، وذلك لتسيير أو توجيه المكالمة إليه. يشمل ذلك معرفة مكانه الحالي، والاستعلام عن كونه قادراً حالياً على استقبال المكالمة أم لا، فقد يكون الجهاز مُطفأً أو خارج نطاق التغطية. بعد ذلك، أي أثناء طور تبادل المعلومات، يشرف مركز التبديل على الإجراءات الكفيلة بتتبع حركة طرفي الاتصال، وضمان استمرارية الاتصال، والحفاظ على نوعيةِ وجودةِ اتصالٍ مرضية، تتوافق مع معايير الأداء المعتمدة ضمن الشبكة.

ينجز مركز التبديل مهامه بالتوافق مع شبكة النفاذ، وبالأخص وحدة التحكم BSC/RNC. فعلى سبيل المثال، يتولى مركز التبديل تحديد نوع القناة الاعتبارية التي يجب أن تخصص لكل مشترك ضمن كل طورٍ من أطوار الاتصال، كما يحدد اللحظة الزمنية التي يجب أن تخصص فيها القناة الفيزيائية، ومدة هذا التخصيص، غير أن مركز التبديل لا يحدد قناةً بعينها (أي رقم الحيز الزمني ومقدار التردد الحامل للقناة الراديوية في حالة نظام GSM، أو رقم متتالية الترميز في حالة UMTS)، إذ أن تحديد واختيار القناة يقع ضمن مسؤوليات وحدة التحكم.

تشمل آليات التحكم ضمن مركز التبديل كل مسارات الاتصال التي تقع ضمن منطقة خدمته، وتتباين هذه المسارات من ناحية وحدات التحكم والمحطات الثابتة التي تكون مصدر أو هدف الاتصال. ومن الممكن أن يكون أحد طرفي الاتصال موجوداً ضمن منطقة خدمة مركز تبديل آخر، لذا يتحكم مركز التبديل في هذه الحالة فقط بالمسارات المتصلة به على نحوٍ مباشر. إضافة إلى ما سبق، قد لا يكون أيٌّ من طرفي الاتصال ضمن منطقة خدمة مركز التبديل، فيكون دوره في هذه الحالة مقتصراً على "تمرير" المعلومات المتبادلة بين مركزي تبديل آخرين، دون إجراء أية معالجة لهذه المعلومات، ويُسمى مركز التبديل في هذه الحالة " مقسم عبور" "Transit Switch".

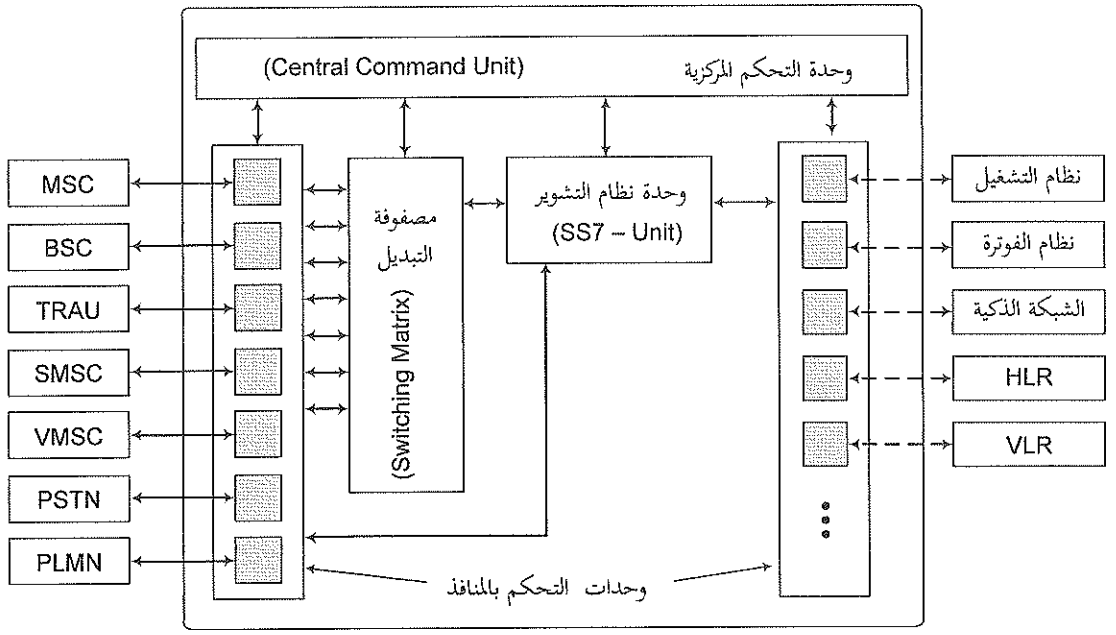
من مهام مركز التبديل أيضاً تدوين تفاصيل كل اتصالٍ كان طرفاً فيه أو جرى بمشاركةٍ منه، وإصدار هذه التفاصيل ضمن تقريرٍ بصيغة ملف إلكتروني يعرف باسم "سجل تفاصيل المكالمة " "Call Data Record (CDR)". يحوي هذا التقرير (CDR) كل دقائق وتفاصيل أي إجراء يتضمن استخدام موردٍ من موارد الشبكة، بغض النظر عن طبيعة الخدمة (مكالمة هاتفية، رسالة نصية قصيرة، رسالة صوتية، خدمة ترفيهية، ...). ففي حالة المكالمة الهاتفية تشمل التفاصيل رقم المتصِّل والمتَّصَلِ به، ومدة المكالمة، ولحظتي بدايتها وانتهائها، وهوية المحطة الثابتة (IMEI) المستخدَمة من قبل المشترك، وهوية الخلية التي جرى ضمنها الاتصال، وغير ذلك من التفاصيل. وهذا التقرير هو الذي يعتمده "نظام الفوترة" "Billing System" لحساب تكاليف المكالمة.

٦-٦-١-٢ بنية مركز التبديل

يتألف مركز التبديل على نحوٍ مبسطٍ جداً من الوحدات الرئيسية التالية (انظر الشكل ٦-١٧):

١) "مصفوفة التبديل" "Switching Matrix": تُعرف هذه الوحدة أيضاً باسم "شبكة الربط" أو "وحدة التشبيك" "Switching Network"، وتمثل نواة مركز التبديل، إذ تضم دارات التشبيك التي تتيح الربط بين طرفي الاتصال عن طريق وصل دارةِ دخلٍ محددة مع دارة خرجٍ محددة أيضاً.
يمثل هذا الجزء العنصر الأساسي الذي يميز أو يحدد تقنية التبديل المستخدمة، كما يحدد سعة مركز التبديل

٢) "وحدات التحكم بمنافذ الدخل والخرج" "Interface Cards (Boards)": تحكُمُ هذه الوحدات تبادل المعلومات عبر المنافذ التي تربط المقسم بوحدات التحكم والملاءمة ضمن شبكة النفاذ، وبمراكز التبديل الأخرى ضمن الشبكة المركزية، وبالتجهيزات الخاصة بالخدمات الإضافية، وبالشبكات الخارجية.



الشكل ٦-١٧: بنية مبسطة لمركز التبديل (MSC).

٣) "وحدة نظام التشوير" "SS7-Unit" أو "SS7-Coupler": يتطلب ربط عدد كبيرٍ من المشتركين ببعضهم البعض إجراءات كثيرةٍ معقدة، تبدأ من سؤال مركز التبديل عن هوية المشترك، ثم إدارة إجراءات التوثق، ثم إدارة خطوات الولوج إلى الشبكة. بعد ذلك، يجب على مركز التبديل التواصلُ مع سجلي VLR و HLR للاستفسار عن صلاحيات ومكان طرف الاتصال الآخر. يتبع هذه الإجراءات خطواتٍ خاصة بتحليل رقم MSRN الخاص بالرقم المطلوب، حتى يجري اختيار أفضل مسارٍ لتسيير أو توجيه المكالمة إليه، أي اختيار المقسم التالي ضمن مسار الاتصال، أو وحدة التحكم التي يقع الطرف المتَّصَلُ به ضمن منطقة خدمتها.

تتطلب كل الخطوات السابقة تبادل إشاراتِ تشويرٍ عديدة مع أطرافٍ مختلفة ضمن الشبكة أو خارجها، ومن الجلي والواضح أن مجموع هذه الرسائل لعشرات أو مئات الآلاف من المتصلين أو المتَّصَل بهم يكوِّن كمّاً هائلاً وضخماً من أوامر التحكم، التي يجب التنسيق بينها وإدارتها وتحليلها. تُعنى بهذه المهمة وحدة التحكم بنظام التشوير، التي تتمثل في دارات ذات طاقة حسابية هائلة، إضافة إلى وحداتٍ برمجية مختلفة وموزعة على عدة وحدات فيزيائية ضمن المقسم.

٤) "وحدة التنسيق المركزية" "Central Command Unit": تتولى هذه الوحدة مهام التنسيق المعقدة جداً بين مكونات مركز التبديل المختلفة، وإدارة تبادل المعلومات بين الوحدات البرمجية "Software Modules" الموزعة على هذه المكونات.

٥) يشمل مركز التبديل وحدات متعددة أخرى مثل "وحدة الملائمة مع الشبكة الثابتة" "Interworking Function (IWF)"، التي تتيح تحويل الإشارات الواردة من الشبكة الراديوية إلى نمطٍ وصيغة من الممكن لأجهزة الفاكس ومثيلاتها فهمها وقبولها، والوحدات البرمجية التي تنسق عمل المقسم مع الشبكة الذكية الخاصة بخدمات الخطوط مسبقة الدفع، والمنافذ الخاصة

بالتخاطب مع نظام الفوترة أو مركز التشغيل والصيانة، وغيرها. هذا وتختلف هذه الوحدات الإضافية تبعاً لنوع مركز التبديل وسعته وطاقته والجهة المصنعة، لذا يتعذر سردها جميعها.

٦-٦-١-٣ مركز التبديل الخاص بالولوج إلى الشبكة

عند ورود اتصالٍ لمشتركٍ ما ضمن الشبكة، يجب على مركز التبديل المعني بتسيير الاتصال معرفة مكان هذا المشترك، فقد يكون موجوداً في شبكةٍ أخرى وضمن قطرٍ مختلف. وهذا يتطلب تبادل رسائل تشوير خاصة مع سجل HLR وطلب هوية سجل VLR الذي يوجد المشترك حالياً ضمن منطقة خدمته. يُطلق على الإجراء الأخير، أي سؤال سجل HLR عن مكان المشترك الحالي، تعبير "HLR-Interrogation"، كما يُعرف مركز التبديل الذي يُجري هذا الإستفسار اصطلاحاً باسم "بوابة الشبكة" أو "مقسم الولوج إلى الشبكة" "Gateway MSC (GMSC)".

تحمل هذه التسمية خلفية تاريخية ترتبط بشبكات الهاتف الثابت، إذ كان المقسم الذي يستقبل المكالمات الواردة من خارج الشبكة يمثل صلة الوصل مع الشبكات الأخرى، كما كان يتميز بسِعةٍ وبرمجيات خاصة. أما في نظم الاتصالات الخلوية الحديثة، فمن الممكن لأي مركز تبديل أن يتواصل مع سجل HLR للاستفسار عن مكان المشترك ذي الرقم المطلوب، ولا يتطلب هذا الإجراء أية وحدات برمجية إضافية، فكل إشارات التشوير الخاصة به تكون في العادة مشمولة بنظام التشغيل الأساسي. غير أن التسمية التاريخية ما زالت تُستخدم حين يكون مركز التبديل ذا اتصال مباشر مع أيٍّ من الشبكات الأخرى.

٦-٦-٢ الموجهات الخاصة بتبادل المعطيات الرزمية

قبل مناقشة مهام الموجهات الأساسية نذكر القارئ ببعض المفاهيم الأساسية المتعلقة بتقنيات تبديل الدارات وتوجيه الرزم، وذلك لبيان دلالات بعض المصطلحات العامة عند استخدامها في سياق نقاش بنية الشبكات الخلوية.

يكمن الفارق الجوهري والأساسي بين نقل المعلومات بتبديل الدارات ونقلها بتوجيه الرزم في طريقة استثمار موارد الشبكة، ففي حالة الاتصالات الخلوية التقليدية يتكوَّن مسار المعلومات من حيز زمني معرَّف على الرابط الراديوي، ثم حيز زمني بمعدل نقلٍ مقداره 16 kbps على الرابط بين المحطة الثابتة ووحدة التحكم، ثم حيز زمني بمعدل نقلٍ مقداره 64 kbps على الرابط بين وحدة الملاءمة ومركز التبديل، ثم حيز زمني بمعدل نقلٍ مقداره 64 kbps بين مركز التبديل الذي يرتبط به طرف الاتصال الأول ومركز التبديل الآخر الذي يرتبط به طرف الاتصال الثاني، ثم حيز زمني أيضاً بين مركز التبديل الآخر وطرف الاتصال الثاني. ويمثِّل تسلسل هذه الأحياز الزمنية ما نشير إليه بمصطلح "دارة" "Circuit" يشغلها الاتصال.

أثناء طور إنشاء المكالمة، يجري تخصيص حيز زمني محدد على كلٍّ من الروابط التي ذكرناها ضمن مسار المكالمة، بحيث تكون الدارة التي يكونها تسلسل الأحياز الزمنية خاصة باتصال المشترك الحالي وتُشغل حصرياً بالمعلومات التي يتبادلها. فعلى سبيل المثال، من الممكن أن تتكون الدارة الخاصة بمكالمة المشترك الحالية من الحيز الزمني رقم x ضمن إطار TDMA، والحيز رقم y

على الرابط A_{bis}، والحيز رقم z على الرابط A_{ter}، والحيز رقم w على الرابط A. فيكون كلٌّ من هذه الأحياز مخصصاً لهذه المكالمة في الوقت الحالي، ومن ثم تكون الدارة المتكونة من هذه الأحياز مشغولة حصرياً من قبل المشترك، لا يشاركه فيها أي مشترك آخر، وذلك بغض النظر عن طبيعة المعلومات التي تُنقل على هذه الدارة، وبغض النظر عن غزارة تدفقها، أو معدل النقل الذي قد يكون كافياً لنقلها. وكنا قد بَيَّنا أن تفاوت معدلات النقل يقود من الناحية العملية إلى تفاوتٍ في درجة التحصين من عوارض القناة، مع بقاء معدل النقل الإجمالي ثابتاً (انظر بحث ترميز القناة في الفصل ٥).

بعد تحديد مسار المكالمة من مركز التبديل إلى طرف الاتصال الآخر، يجري تعيين الوحدات الفيزيائية (BSC, BTS, ..) التي يجب أن تمر عبرها المكالمة إلى الطرف المتَّصَل به، كما يجري تعيين أو تحديد الأحياز الزمنية على المسار بين مركز التبديل والوحدة المتحركة الأخرى. وهذه الأحياز تكون مختلفة في ترقيمها وترتيبها ضمن كلٍّ من الروابط، فإذا وردت المكالمة إلى مركز التبديل عبر الحيز w كما ذكرنا، فإنها تصدر عنه عبر منفذٍ آخر، وتُحمل أو تُنقل على حيزٍ زمني ذي رقم مختلف عن w (k على سبيل المثال)، ولا يكون الرقم w مساوياً لـ k إلا على سبيل المصادفة. كذلك، تكون أرقام الأحياز الزمنية التي تُستخدم على الروابط من مركز التبديل إلى المشترك الآخر، والتي تكوِّن جزء الدارة الثاني، مختلفة عن تلك التي ذكرناها لجزء الدارة من المتَّصِل إلى المقسم (x و y و z).

انطلاقاً من ذلك، يحمل مصطلحا "تبديل الدارات" "Circuit Switching" و "الاتصال" "Call" الدلالات التالية:

- إن نقل مسار المكالمة من حيزٍ زمني إلى حيز زمني آخر هو ما يدل عليه تعبير "تبديل" أو "تحويل" عند الإشارة إلى مركز التبديل التقليدي وطريقة عمله، فيكون المقصود بتعبير "تبديل الدارات" تبديل أرقام الأحياز الزمنية التي تؤلف الدارة التي تحمل معلومات الاتصال، والتي تبقى محجوزة أو مخصصة للاتصال المذكور حتى إنهاء المكالمة، ولا يجري "تحريرها" "Release" كموارد فيزيائية صالحة لاستخدام طرف اتصال آخر إلا بعد إنهاء المكالمة.
- يدل تعبير "اتصال" أو "مكالمة" "Call" بمعناه التقليدي على الخدمة التي توفرها الشبكة، وهي حجز دارة معينة للمشترك، يمكنه أن يشغلها حصرياً على نحوٍ مؤقت لتبادل المعلومات مع طرفٍ آخر. لذا يرتبط تعبير "اتصال" أيضاً بمدة معينة ومحددة ومتواصلة.

أما تقنية توجيه الرزم، فتنحو منحىً آخر من ناحية مبادئ عملها، إذ تعتمد على اختيار المسار الأنسب لكل رزمة من رزم المعطيات، وفقاً للموارد الفيزيائية المتاحة، وتبعاً لما تراه أجهزة التوجيه (Routers) مناسباً لكلٍّ من هذه الرزم. لذا لا تتبع الرزم المختلفة في بعض الأحيان المسار نفسه، ولا يجري حجزٌ لأية أحياز زمنية محددة ومعرَّفة لكل منها، وإنما يجري تحديد مسار مناسبٍ لها، وتتشارك كل رزمة السعةَ المتاحة على هذا المسار مع رزمٍ أخرى متبادلة ضمن نقاط الشبكة المختلفة.
انطلاقاً من هذا المبدأ، يفقد تعبير "اتصال" معناه التقليدي المرتبط به، ولا يعود صالحاً للاستخدام في حالة تبادل المعطيات الرزمية. إذ ليس هناك في حالة تبادل المعطيات دارةٌ بالمعنى التقليدي الذي عرَّفناه، ولا يوجد أيضاً طرفا اتصال متكافئين على النحو الذي تعرفه الخدمات الهاتفية، بل إرسالٌ للمعلومات من طرفٍ إلى آخر، على نحوٍ غير متناظر من ناحية كمّ المعلومات ومن ناحية طبيعتها. فعلى سبيل المثال، عندما يطلب مشترك تحميل مقطع صوتي من الشبكة، فإن المعلومات التي يستقبلها

تفوق بكثيرٍ المعلومات التي أرسلها بصيغة طلبِ تحميل. إضافةً إلى ما سبق، لا يرتبط إجراء تبادل المعطيات بوقت محدد، إذ يتبع كمّ المعلومات والسعات المتاحة لنقلها، وقد ينقطع إجراء تبادل المعلومات أو المعطيات لأسباب فنية مختلفة، ثم تجري متابعته في وقت لاحق.

بسبب ما سبق، غلب في نظم الاتصالات الرزمية استخدام تعبير "جلسة (تبادل معطيات)" "Session" للدلالة على إجراءات تبادل المعطيات، وهذا ما يدل عليه مصطلح "اتصال رُزَمي"، الذي نستخدمه كمرادف لهذه الكلمة.

مما يميز خدمات الاتصال الرزمية أيضاً أنها تتيح للمشترك استخدام أكثر من تطبيق في الوقت نفسه، لذا تمثِّل الرزم التي يستقبلها المشترك أو تصدر عنه أجزاءَ معلوماتٍ ضمن أكثر من سياق اتصال. فعلى سبيل المثال، قد يستقبل المشترك رزمةً في سياق تصفحه للانترنت، يتلوها رزمة تُستقبل في سياق تحميل ملفٍّ صوتي، ثم رزمةٌ في سياق "تخاطبٍ نصّي" "Chat"، وهكذا. لذا، يمثل دفق المعلومات الخاص بكل تطبيق سياقَ اتصالٍ رزمي مستقل بذاته، رغم كون مسار المعلومات الخاصة ببعض هذه التطبيقات هو نفسه.

لإبراز هذا المفهوم، يستخدم تعبير "سياق" "Context" للدلالة على صفات وخصائص التطبيق الذي أُنشِئ الاتصال لأجله، ولما كان تبادل المعطيات يجري وفق أحد بروتوكولات التحكم بالرزم (Internet Protocol (IP), X.25, ...)، والتي يشملها التعبير الجامع "Packet Data Protocol (PDP)"، فقد اصطلح على تسمية السياق بـ "PDP-Context". هذا ونستخدم تعبير "سياق الاتصال الرزمي" أو اختصاراً "سياق رزمي" كمقابل لهذا التعبير، يعني ذلك أن كلمة "اتصال رزمي" أو "جلسة" (Session) تدل على الاتصال نفسه، بينما يدل تعبير "سياق الاتصال الرزمي" (PDP-Context) على الصفات والخصائص المميزة لهذا الاتصال عن غيره، مثل نوع الشبكة التي يجري تبادل المعطيات معها (IP, FR, ..)، والتطبيق المَعْني بالمعلومات، وتفاصيل جودة الخدمة.

بعد هذا التعريف المختصر ببعض المصطلحات، نعرض لأهم مكونات الشبكة المركزية الخاصة بتبادل المعطيات.

ذكرنا في ما سبق أنه عندما جرى توسيع نطاق الخدمات الخلوية لتشمل تبادل المعطيات الرزمية، لم تتطلب بنية الشبكة الجديدة أي استعاضة عن مكونات الشبكة الأصلية بمكونات بديلة، وإنما شملت التغييرات "إحلال" مكونات جديدة إضافية ضمن بنية الشبكة الأساسية، تعمل على نحوٍ مستقل. لذا، توصف المكوّنات الخاصة بخدمات تبادل المعطيات (GPRS) بأنها تؤلف "شبكة موازية" للشبكة الأساسية، أو "شبكة ذات طابع إحلالي" "Overlay Network"، كما توصف التجهيزات المُضافة إلى بنية الشبكة التقليدية بأنها مكوّنات "داعمة" لخدمات تبادل المعطيات. يفسر هذا المفهوم اختيار مصطلح "GPRS Support Node (GSN)"، أي "العقدة الداعمة لخدمات GPRS"، للدلالة علي الموجهات الأساسية التي أضيفت إلى الشبكة المركزية كنُواةٍ للنطاق أو القسم الخاص بتبادل المعطيات (PS-Domain).

يشمل نطاق PS-Domain موجّهين أساسيين ذَوَيْ سعاتٍ عالية. يمثل الأول منهما العنصر الأساسي المقابل لمركز التبديل التقليدي في جزء CS-Domain من الشبكة، ويُعرف باسم "Serving GPRS Support Node (SGSN)". يتولى هذا الموجه تجميع المعطيات الرزمية الواردة من المشتركين عبر شبكة النفاذ الراديوي، ويقوم بتوجيه هذه المعطيات إلى شبكات تبادل

المعطيات الخارجية المناسبة، كما يقوم -في الجهة العكسية- باستقبال دفق المعطيات الوارد من شبكات أخرى وتوجيه المعطيات الخاصة بكل مشترك إلى وجهتها الصحيحة، ممثَّلةً بوحدة التحكم بالمحطات ومن ثم المحطة الثابتة. هذا ولا نرى فائدةً من أية ترجمة حرفية لاسم هذا العنصر من الشبكة، لذا نركز على كونه موجهاً، وأنه العنصر الأساسي الذي يخدم المشتركين ضمن مساحة جغرافية معينة، ونختار تعبير "موجه الرزم الرئيسي" أو "موجه SGSN" للدلالة عليه.

يمثل الموجه الثاني الأساسي نقطة الوصل بين شبكة GPRS والشبكات الخارجية، ويتولى مهام اختيار الوجهة الصحيحة للمعطيات الصادرة عن الشبكة أو الواردة إليها. ونعني بالوجهة الصحيحة هنا إما شبكةً خارجيةً محددة (في حالة إرسال المعطيات) أو موجه SGSN الذي يوجد المشترك ضمن منطقة خدمته (في حالة استقبال معطيات خاصة بهذا المشترك من شبكات خارجية). يُعرف هذا الموجه باسم " Gateway GPRS Support Node (GGSN)" ونختار تعبير "موجه العبور" أو "موجه GGSN" للدلالة عليه.

٦-٦-٢-١ موجه SGSN

يلعب هذا الموجه دوراً محورياً ضمن الشبكة، إذ يتولى استقبال المعطيات الرزمية من المشتركين ضمن منطقة خدمته، وتجميعها وفق وجهاتها المقصودة، ثم إرسالها إلى موجه العبور المناسب (GGSN)، مزودةً بما تحتاجه من معلومات التحكم. كذلك، يستقبل هذا الموجه المعلومات الواردة من موجه العبور (أي المعلومات من الشبكات الخارجية) ويوزعها على وحدات التحكم المرتبطة به، كي تتابع مسارها إلى المحطات الثابتة المقصودة. إضافة إلى ما سبق، يُعنى هذا الموجه بمهامَّ تشابهُ وظائفَ سجل VLR، حيث يتولى متابعة انتقال المشترك من منطقة إلى أخرى، ويرصد مكان وجوده الحالي. لذا يتصل هذا الموجه بسجل HLR عبر الرابط G_r، كي يُتاح تبادل كل المعلومات الخاصة بالمشترك والحصول على أهم القيود والبيانات المتعلقة به.

من مهام SGSN المميَّزة أيضاً، الإشراف على التنسيق بين اتصالات المشترك المختلفة، أو بالأحرى السياقات الرزمية المختلفة للمشترك (PDP-Contexts)، فقد يرغب المشترك باستخدام أكثر من تطبيق في الوقت نفسه، ما يقود إلى أكثر من سياقٍ رزمي، يجب إنشاء كلٍّ منها وإدارتها وربطها بالتطبيقات المختلفة. كذلك، تتطلب التطبيقات المختلفة حجز موارد فيزيائية مناسبة، واختيار القنوات الاعتبارية الضرورية للتحكم بالاتصالات المختلفة.

يتولى هذا الموجه أيضاً مسؤولية تعمية دفق المعطيات (انظر فصل التعمية لاحقاً) وجمع وتحضير المعلومات الخاصة بالفوترة، أي التي تصف كيفية ومدة حجز واستهلاك موارد الشبكة، أو كمية المعطيات التي جرى تبادلها مع المشترك.

تشابه بنية هذا الموجه من حيث المكونات الأساسية بنية مركز التبديل (MSC)، إلا أنه يختلف عنه من ناحية التقنية التي تعتمدها مصفوفة التبديل، ومن ناحية البنية الفيزيائية للمنافذ، حيث تكون الأخيرة موافقةً لما يتطلبه نقل المعطيات الرزمية.

٦-٦-٢-٢ موجه GGSN

تكمن المهمة الأساسية لهذا الموجه في أنه يمثل نقطة الوصل بين شبكة GPRS والشبكات الخارجية، التي قد تكون شبكة المعطيات العامة PDN، أو شبكة GPRS أخرى، أو شبكة تبادل معطيات خاصة. لذا فهو يتولى مهامّ تتعلق بإدارة الولوج إلى

الشبكة سواء من منظور الشبكات الأخرى (أي تخويل هذه الشبكات بإرسال معطيات إلى مشترك ما، أو طلب معلومات عنه) أو من منظور المشترك، حيث يدير هذا الموجه العناوين التي يحق للمشتركين الاتصال بها.

مما يميز هذا الموجه عن موجه SGSN أيضاً، أنه لا يتغير مع تغير موقع المشترك. فإذا كان المشترك قد باشر أو أنشأ اتصالاً ما، ثم تجوّل ضمن مناطق جغرافية متباعدة، فإن هذا التجوال قد يؤدي إلى تغيير الموجه SGSN، تبعاً للمنطقة الجغرافية التي يغطيها كل من الموجهات الرئيسية المتوفرة. أما موجه العبور فيبقى ثابتاً كصلة وصل بين المشترك والشبكات الخارجية، وهذا مهم جداً ضمن آليات التحكم بالاتصالات الواردة، حيث يتيح عزلاً تاماً لما يحدث ضمن الشبكة تجاه الشبكات الخارجية. فأي اتصالٍ يرد إلى المشترك، يكون مزوداً بعنوان IP محدد، وهذا العنوان يكون محفوظاً في موجه العبور، فإذا وردت أية رزمة معلومات خاصة بهذا العنوان، تولى موجه العبور إرسالها إلى موجه SGSN المناسب، أي أن توجيه المعلومات للمشترك من منظور الشبكات الخارجية لا يتطلب معرفة مكان هذا المشترك.

نظراً لمحدودية عناوين IP المتوفرة لشبكة ما، والتي لا يمكن أن تساوي عدد المشتركين، يجري تخصيص عنوان IP لكل مشترك عند الحاجة وعلى نحوٍ مؤقت، بحيث " يُحَرَّرُ" هذا العنوان عند انتهاء اتصال المشترك. يعرف هذا المبدأ بـ "التخصيص الديناميكي لعناوين الشبكة" "Dynamic IP Addressing"، والذي يتولى مهمة تخصيص هذه العناوين هو موجه GGSN، إما بنفسه إذا كان مجهزاً بالبرمجيات المناسبة، أو بالتنسيق مع جهاز ضمن الشبكة، مجهز بالبرمجيات الخاصة بما يُعرف بـ "بروتوكول التجهيز الديناميكي للمضيف" "Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)" (انظر [٢١] و [٢٢] لتفاصيل ذلك). ننوه أيضاً إلى أن موجه GGSN يجمع المعلومات الخاصة باستهلاك المشترك لأية مواردَ فيزيائية ضمن شبكات أخرى (في حالة التجوال مثلاً)، وهذه المعلومات تُجمع لأغراض الفوترة.

يمثل الموجهان اللذان ذكرناهما، بالإضافة إلى وحدة PCU، العناصر الأساسية ضمن شبكة GPRS. ولا شك أن الشبكات على أرض الواقع تحوي عناصر أخرى سواء لتقديم خدمات متقدمة، أو لتوفير بنية تحتية متكاملة تحقق ضوابط ومتطلبات أمن المعلومات للشبكات الحديثة، غير أننا نكتفي بهذا القدر من العرض، ونحيل القارئ إلى [٢١]-[٢٣] للمزيد من التفاصيل.

٦-٦-٣ سجل HLR وسجل VLR

سبق شرح مهام هذين السجلين في معرِض نقاش نظام التعريف بالمشترك (البحث ٦-٢)، لذا نكتفي بالإشارة إلى ما يلي:

- يُعتبر سجل HLR عنصراً مُشتركاً بين قسمي الشبكة المركزية (CS-Domain و PS-Domain)، فرُغم أن المواصفات المعيارية تعرِّف سجلاً خاصاً بخدمات تبادل المعطيات الرزمية باسم "GPRS Register (GR)"، إلا أن المعلومات الخاصة بهذا السجل تضاف عملياً إلى مجموع البيانات التي يحفظها سجل HLR. ويجري تبادل هذه المعلومات مع SGSN عند الحاجة عن طريق الرابط G_r.

أما سجل VLR فليس له مقابل مباشر ضمن قسم PS-Domain، نظراً لأن منطقة خدمة المقسم تكون مختلفة تماماً عن

منطقة خدمة الموجه SGSN، كما أن عدد المقاسم لا يكون مساوياً لعدد الموجهات. لذا يشمل كل موجه SGSN جزءاً وظيفياً يكافئ سجل VLR من ناحية مهامه.

- لا تقتصر المعلومات التي تُحفظ في كلٍّ من السجلين على ما ذكرناه في سياق أبحاث هذا الفصل، بل تتضمن بياناتٍ أخرى كثيرة، ذات صبغة إدارية أو تشغيلية (انظر [٢٤]).
- يكون كلا السجلين ملحقاً من الناحية الفيزيائية بمركز التبديل. لذا يشمل مصطلح "مقسم" في سياق استخدامه ضمن هذا الكتاب كل الوحدات الوظيفية الموجودة في موقع مركز التبديل، ومن ضمنها سجل HLR وسجل VLR.

٦-٦-٤ مركز التَّوَثُّق

لم تكن شبكات الاتصال الخلوية من الجيل الأول آمنةً من منظورٍ فني، بل كان مشتركوها يشتكون من ثغراتٍ في التصميم، تتيح للمتطفلين والعابثين استغلال هويات المشتركين، والتلاعب ببياناتهم. فعلى سبيل المثال، كانت هواتف الجيل الأول تتبادل هويتها أو رقم اشتراكها مع المحطة الثابتة على نحوٍ صريحٍ، أي دون تعمية، وكان ذلك يمكِّن بعض هواة الاحتيال من التقاط هذه الهوية أثناء بثها عبر الرابط الراديوي، لذا كان من السهل "استنساخ" هوية المشترك "Cloning" وإعادة برمجة جهازٍ آخر باستخدام الهوية المُستنسَخَة، ومن ثم استخدام الجهاز المُبَرمَجِ لإجراء مكالمات هاتفية على حساب المشترك الأصلي الذي سُرقت هوية جهازه.

من الثغرات الأخرى التي كان يسهل استغلالها عدم خضوع المكالمات الهاتفية لأي نوعٍ من إجراءات "التعمية" "Encryption"، لذا كانت المكالمات عرضةً للتنصت "Interception (Tapping)"، وما كان على الراغب بذلك إلا توليف مستقبلٍ راديوي على التردد المستخدم للاتصال.

دفعت هذه الثغرات وغيرها مطوري نظام GSM والأنظمة التي تلته لبذل جهودٍ حثيثة لتفادي هذا القصور في أمن المعلومات. وقد أثمرت هذه الجهود منظومةً متقدمة للحفاظ على أمن معلومات المشترك، تشمل آلياتٍ وخوارزمياتٍ خاصة وفعالة. ولتسهيل إدارة وتنسيق إجراءات أمن المعلومات لعددٍ كبيرٍ من المشتركين، أُدرج عنصرٌ إضافي ضمن بنية الشبكة، هو "مركز التَّوَثُّق" "Authentication Center (AUC)". ولفهم دور هذا المركز ضمن منظومة أمن المعلومات، نعرض في الفقرات التالية لأهم أغراض هذه المنظومة.

٦-٦-٤-١ الحفاظ على سرية هوية المشترك

يُطلق على هذا المفهوم باللغة الانكليزية تعبير "Anonymity"، وترمي الإجراءات المتعلقة بذلك إلى جعل التعرف على هوية المشترك -من خلال التنصت على رسائل التحكم والتشوير المتبادلة على الرابط الراديوي- غير ممكن. ولا يتحقق هذا المطلب إلا عن طريق تفادي إرسال رقم IMSI الحقيقي عبر الرابط الراديوي، لذا، يستخدم المشغل عوضاً عن الهوية الحقيقية رقم الهوية المؤقت TMSI، وهذا الرقم يُمنح من قبل سجل VLR الذي يوجد المشترك ضمن منطقة خدمته.

تتميز الهوية المؤقتة بأنها ذات صلاحية زمنية وجغرافية محدودة، إذ تتبدل كلما تغيرت "منطقة وجود المشترك" (يُقصد بذلك مجموعة محددة من الخلايا يتحكم بها BSC/RNC واحد، وسنأتي على تفصيل ذلك عند عرض البنية الجغرافية للشبكة). فحين ترصد الوحدة المتحركة أثناء تنقلها تغيراً في رقم منطقة الوجود، تُعلم سجل VLR بذلك، كما تعلمه برقم TMSI القديم ورقم منطقة الوجود الأخيرة. يقوم سجل VLR بناءً على ذلك بتخصيص رقم هوية مؤقت جديد TMSI، ويرسل هذا الرقم بصيغة معمَّاة (مشفرة) إلى الوحدة المتحركة لاستخدامها في إجراءات الاتصالات المختلفة. بذلك تكون هوية المشترك محمية من طريقين: الأول هو كون الرقم المستخدم ذا صلاحية مؤقتة، ولا يمثل الهوية الحقيقية، والثاني هو التعمية.

يستخدم رقم TMSI عند نداء المشترك، وفي معظم ما تتبادله الشبكة مع المشترك من معلومات، ويجدر التنويه إلى وجود حالات خاصة قليلة، تتطلب إرسال الهوية الحقيقية للمشترك، ودون تعمية. ينطبق ذلك على سبيل المثال عند إعادة تشغيل الجهاز بعد إطفائه مدة طويلة والانتقال إلى منطقة خدمةٍ مقسمٍ جديد، إذ لا تكون هوية الجهاز معروفةً لسجل VLR في هذه الحالة، كما يجب إكمال إجراءات الولوج إلى الشبكة، قبل منح الوحدة المتحركة هوية مؤقتة. من هذه الحالات الضرورية أيضاً وجود خلل أو عطلٍ فني في قاعدة البيانات، يحُول دون معرفة رقم TMSI الخاص بالمشترك.

ليس لمركز التوثق دور مباشر في تخصيص أو إدارة هوية المشترك المؤقتة، وقد عرضنا مبدأ استخدام هذه الهوية في هذا الموضع لأنه يصب في أغراض منظومة الحفاظ على أمن معلومات المشترك، والتي تمثل مهام مركز التوثق جزءاً منها.

٦-٦-٤-٢ التحقق من هوية المشترك

تحفظ الشريحة في ذاكرتها الدائمة رقماً فريداً لكل مشترك يسمى "مفتاح التَّوَثُّق" "Authorization Key (Ki)". وعند إدراج المشترك ضمن الشبكة، يُحفظ هذا الرقم أيضاً في مركز التوثق AUC، ويُقْرن برقم IMSI. يمثل هذا الرقم (Ki) محور إجراءات أمن المعلومات التي تنجز أو تنفذ ضمن الشبكة، فكل الخوارزميات الخاصة بآليات التوثق والتعمية تعتمد على هذا الرقم كموسطٍ مميِّزٍ للمشترك، لذا يجري الحفاظ على سريته بعناية بالغة، ولا يجري تبادله بين طرفي الاتصال بتاتاً.

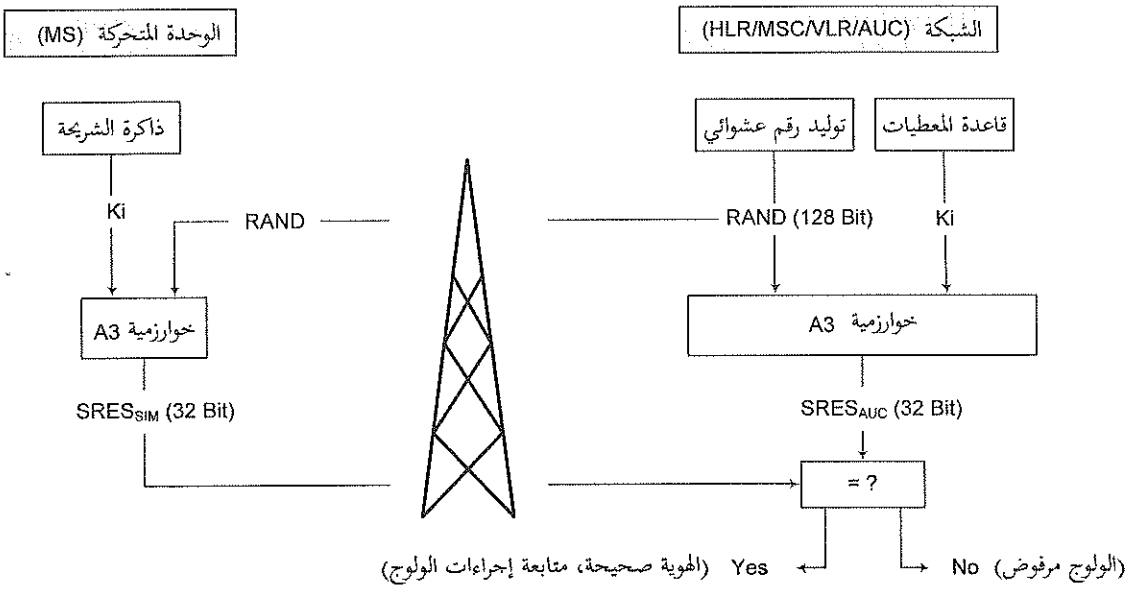
تُنجز خطوات التوثق من هوية المشترك باستخدام خوارزمية خاصة تُدعى خوارزمية A3 "A3-Algorithm"، تُنجز في كلٍّ من طرفي الاتصال (الشبكة والوحدة المتحركة) على نحوٍ منفصل. ونسرد في ما يلي خطوات استخدام هذه الخوارزمية مع تبسيط شديد، حيث نعرض لتفاصيل إجراءات الولوج إلى الشبكة لاحقاً.

من الممكن إجمال هذه الخطوات كم يلي(الشكل ٦-١٨):

١) عندما يرصد سجل HLR طلباً من رقم IMSI محدد للولوج إلى الشبكة، يرسل السجل إيعازاً إلى مركز التوثق للتحقق من هوية هذا الرقم، ويُرفق بهذا الإيعاز الرقم المعني.

٢) يستخدم مركز AUC رقم IMSI المُرفق لتحديد مفتاح التوثق Ki الخاص بهذا الرقم، والمحفوظ في قاعدة المعطيات ضمن

المركز. وقد سبق الذكر بأن هذا المفتاح يكون فريداً لكل مشترك، لذا يقترن بكل رقم IMSI مفتاحٌ واحد فقط، على نحوٍ لا لبس فيه.



الشكل ٦-١٨: خطوات إجراءات التوثق.

٣) يجري في مركز التوثق أيضاً توليدُ رقم عشوائي بطول 128 بتاً، يشار إليه اختصاراً بـ "RAND".

٤) يُستخدَم –ضمن مركز التوثق AUC– كلٌّ من رقم التوثق Ki والرقم العشوائي RAND كَدَخْلٍ لخوارزمية التوثق A3، المحفوظة كوحدة برمجية ضمن المركز، وهذا يقود إلى رقمٍ خرجٍ يُعرف باسم "Signed Response (SRES)"، أي "الإجابة المؤَثَّقة" (سنشرح دلالة هذه التسمية لاحقاً). يتألف هذا الرقم من 32 خانة، ونرمز له اختصاراً بـ $SRES_{AUC}$، في إشارة إلى نسخته التي تُحسب في مركز AUC.

٥) يُرسَل رقم $SRES_{AUC}$ مع الرقم العشوائي RAND إلى سجل HLR، الذي يرسلهما بدوره إلى سجل VLR. بدوره يحتفظ سجل VLR برقم $SRES_{AUC}$ ويرسل الرقم العشوائي RAND إلى الوحدة المتحركة التي طلبت الولوج إلى الشبكة، مع طلبٍ بتأكيد هويتها.

٦) تستخدم الوحدة المتحركة رقم Ki المحفوظ في ذاكرة الشريحة، إضافةً إلى الرقم العشوائي RAND الذي تستقبله من الشبكة، كدخلٍ لخوارزمية A3 المحفوظة في ذاكرة الشريحة أيضاً، ما يقود إلى رقمِ إجابةٍ من طرف الشريحة، ندل عليه بـ $SRES_{SIM}$.

٧) يُرسَل رقم $SRES_{SIM}$ إلى المقسم الذي يحتفظ برقم $SRES_{AUC}$ الناتج عن تنفيذ الخوارزمية في مركز AUC، حيث يُجري

المقسم مقارنةً بين الرقمين، فإذا تطابقا، كان ذلك دليلاً على أن مفتاح Ki المحفوظ في ذاكرة الشريحة مطابقٌ لمفتاح Ki المحفوظ في مركز التوثق، وهذا يفيد التحقق من أن رقم IMSI قد أُرسِلَ إلى الشبكة من قِبَل الشريحة الحقيقية المخوّلة باستخدام الشبكة، وليس من جهةٍ قد استنسخته أو حصلت عليه عن طريق الاحتيال.

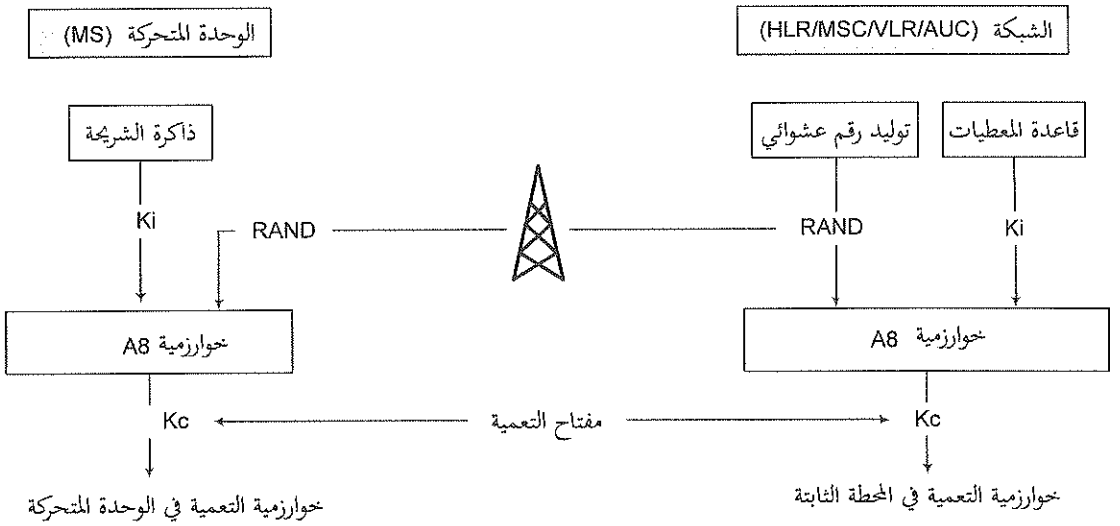
نلفت النظر إلى أنه لم يجر إرسال مفتاح Ki عبر الرابط الراديوي خلال الخطوات السابقة كلها، كما لم يجر تبادله بين أيٍّ من مكونات الشبكة، فهو متوفِّرٌ في مركز AUC وفي الشريحة فقط، وهذا يؤكد على خصوصية هذا الرقم وسريته.
كذلك تبين الخطوات السابقة أن جوهر إجراء التوثق هو الحصول على قيمة صحيحة للرقم SRES في طرف الوحدة المتحركة، وذلك باستخدام الخوارزمية A3 والدَّخْلِ المعرَّف من قبل الشبكة وهو الرقم RAND. لذا، يُشار إلى الرقم العشوائي RAND بتعبير "اختبار" "Challenge" كما يُشار إلى الجواب المستخلص باسم " الإجابة الموثقة"، أي الإجابة الصحيحة عن سؤال الاختبار وهو قيمة RAND)، وهذه هي دلالة تعبير "Signed Response"، وهي التي تبرر تسمية الآلية السابقة باسم "Challenge-Response Mechanism".
نؤكد أيضاً على أن الرقم العشوائي RAND يكون فريداً لكل ولوجٍ إلى الشبكة، أي لكل إجراء تحققٍ من الهوية. لذا، لا يتيح التنصت إليه عبر الرابط الراديوي واستخلاصه أية إمكانية لمحاولة ولوجٍ لاحقة، لأن صلاحيته مقيَّدة بالاستخدام لمرة واحدة فقط.

ننوه ختاماً إلى أن آليات التوثق التي عرضناها تسري أيضاً عند طلب الولوج إلى نطاق PS-Domain الخاص بتبادل المعطيات، باستثناء أن خوارزمية التوثق A3 تنجز في الموجه SGSN وليس في المقسم.

٦-٦-٤-٣ الحفاظ على خصوصية معلومات المشترك

تحتاج إجراءات التعمية التي سنشرحها لاحقاً إلى مفتاحٍ يُستخدم لتعديل المعلومات المتبادلة عبر الرابط الراديوي، وجعلها مبهمة للمتنصتين. ويجب أن يكون هذا المفتاح فريداً أو جديداً لكل اتصال، بحيث لا يمكن استخدامه إلا مرةً واحدة. لذا، تتزامن مع إجراءات حساب رقم SRES في مركز التوثق والوحدة المتحركة، إجراءات توليد "مفتاح التعمية" "Ciphering Key (Kc)"، كي يستخدمه طرفا الاتصال أثناء متابعة خطوات تبادل المعلومات.

يجري توليد هذا المفتاح باستخدام مفتاح التوثق Ki والرقم العشوائي RAND كدخلٍ لخوارزمية أخرى، تعرف باسم "خوارزمية A8" "A8-Algorithm"، التي تقود إلى المفتاح Kc المؤلف من 64 خانة. وعلى نحوٍ مشابه لما ذكرناه في خطوات التوثق، تستخدم الوحدة المتحركة الرقم العشوائي RAND ورقم التوثق Ki والخوارزمية A8، المحفوظة أيضاً في ذاكرة الشريحة لتوليد نسخةٍ خاصة بها من مفتاح التعمية (الشكل ٦-١٩). نتيجة لهذا الإجراء، تتوفر نسختان من هذا المفتاح، واحدة في الوحدة المتحركة، وأخرى في المحطة الثابتة، ترسل إليها عبر المقسم من قبل مركز AUC. تُستخدم هاتان النسختان لتعمية المعلومات في طرف الإرسال، أو لفك التعمية في طرف الاستقبال، وذلك وفق آلياتٍ نعرض لها في فقرات لاحقة.



الشكل ٦-١٩: خطوات توليد مفتاح التعمية.

ننوه في هذا الموضع إلى أن الشكل ٦-١٨ و الشكل ٦-١٩ يعرضان مبدأ التوثق ومبدأ توليد مفتاح Kc على نحوٍ صحيح، غير أنهما يمثلان تبسيطاً لكيفية تبادل الأرقام بين مركز التوثُّق ومكونات الشبكة الأخرى، إذ أن هذا التبادل يجري في الواقع على النحو الذي يلخصه الشكل ٦-٢٠:

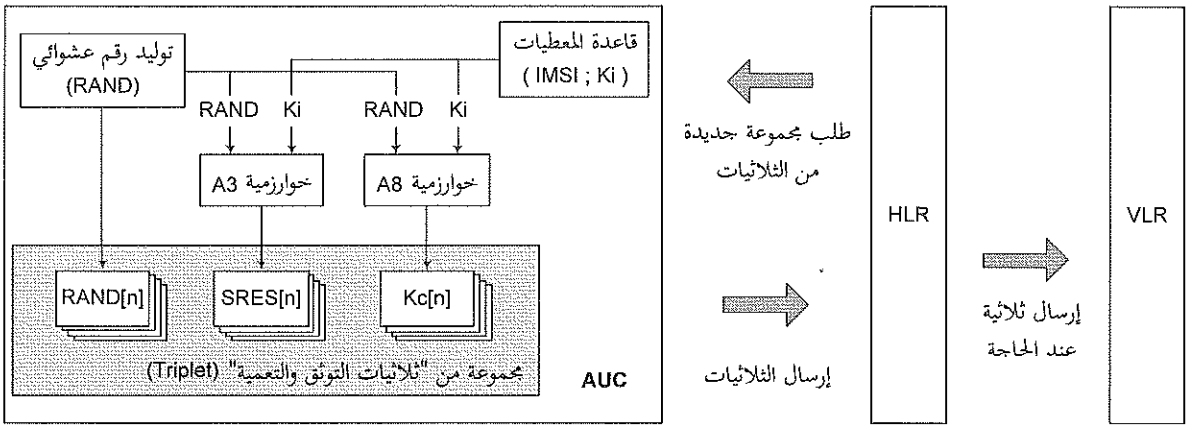
١) عندما يُدرج اسم مشترك جديد في سجل HLR، يطلب هذا السجل من مركز التوثق AUC توليد مجموعةٍ من أرقام RAND و SRES و Kc خاصة بهذا المشترك، يمكن استخدامها عند الطلب أو الحاجة. وتحفظ هذه الأرقام كمجموعات ثلاثية، تسمى كل منها "ثلاثية التوثق والتعمية " "Triplet"، وتكون مقترنة مع رقم IMSI الذي جرى توليدها لأجله. تكون كل ثلاثية ناتجة عن استخدام الرقم العشوائي نفسه، وتُميَّز عن غيرها بقرينة خاصة، لذا يشار لكل ثلاثية ضمن المجموعة بالرمز {RAND[n], SRES[n], Kc[n]}.

٢) عندما يرد طلب من المقسم وسجل VLR لإجراء التوثق من هوية رقم IMSI معين، يرسل سجل HLR ثلاثيةً إلى سجل VLR لاستخدامها في إجراءات التوثق والتعمية، كما يرصد HLR عدد الثلاثيات التي ما زالت متوفرة لهذا الرقم. فإذا تبين أن هذه الثلاثيات قد نفدت، يطلب سجل HLR من مركز AUC توليد مجموعة ثلاثياتٍ جديدة، كي تكون جاهزة عند الطلب مرة أخرى.

٣) نظراً لتشارك خوارزميتي A3 و A8 بموسطات الدخل ذاتها (RAND, Ki) فإنهما تدمجان في خوارزمية مشتركة تُعرف باسم "Comp 128"، تكون متوفرة للتنفيذ في وحدة برمجية خاصة.

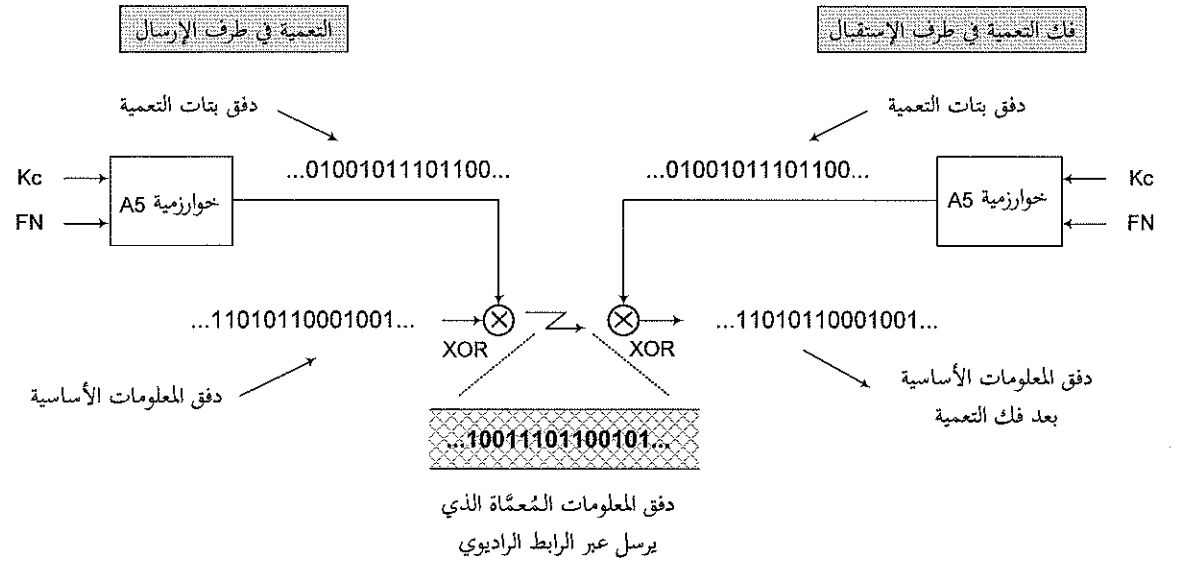
بعد بيان مبادئ توليد مفتاح التعمية نعرض لكيفية استخدامه بشيءٍ من التفصيل، وقد كنَّا أشرنا في الفصل ٥ إلى أن خطوة التعمية تتلو خطوة ترميز القناة في المرسل، أما في المستقبل، فهي تتلو خطوة فك التعديل الراديوي. سبق التنويه كذلك بأن هذه

الخطوة تشمل كلاً من معلومات المشترك ومعلومات التحكم، وذلك حتى تخضع كل الأرقام الخاصة بالمشترك، مثل هويته المؤقتة TMSI، للتعمية أيضاً، ما يزيد من فاعلية الحفاظ على خصوصية وسرية المتصل.



الشكل ٦-٢٠: توليد ثلاثيات التوثق والتعمية.

تُنجز خطوات التعمية في كلٍ من الوحدة المتحركة والمحطة الثابتة، وذلك باستخدام مفتاح التعمية Kc وخوارزمية خاصة تعرف باسم "خوارزمية A5" "A5-Algorithm". ويعتمد مبدأ التعمية على تغيير دفق بتات المعلومات الأساسية باستخدام دفقٍ من بتات التعمية (انظر الشكل ٦-٢١)، بحيث يُستخدم بتٌ من دفق التعمية لتغيير بتٍ من المعلومات بتطبيق عملية "الخيار المقصور" "XOR-Operation". يؤدي هذا الإجراء إلى دفقٍ جديدٍ مُبْهمٍ، دون تغيير في معدل نقل المعلومات.



الشكل ٦-٢١: خطوات التعمية وفكها عند تبادل المعلومات عبر الرابط الراديوي.

يمثل دفق بتات التعمية خرجَ الخوارزمية A5 عند استخدام كلٍّ من مفتاح التعمية Kc (الذي يُولَّد لكل اتصال) ورقم إطار TDMA الحالي ضمن الإطار الأعظمي (Hyperframe) كدخلٍ لها. وقد كنا أشرنا في الفصل ٤ إلى أن رقم الإطار (FN) يتراوح بين "0" و"207150648" ويحتاج إلى 22 بتاً لتمثيله، كما أن هذا الرقم لا يتكرر إلى بعد مدة مقدارها ثلاث ساعات ونصف تقريباً. ولما كانت المحطة الثابتة تبثُّ رقم الإطار FN ضمن معلومات قناة التزامن (SCH)، يكون هذا الرقم متاحاً للوحدة المتحركة على نحوٍ دائم.

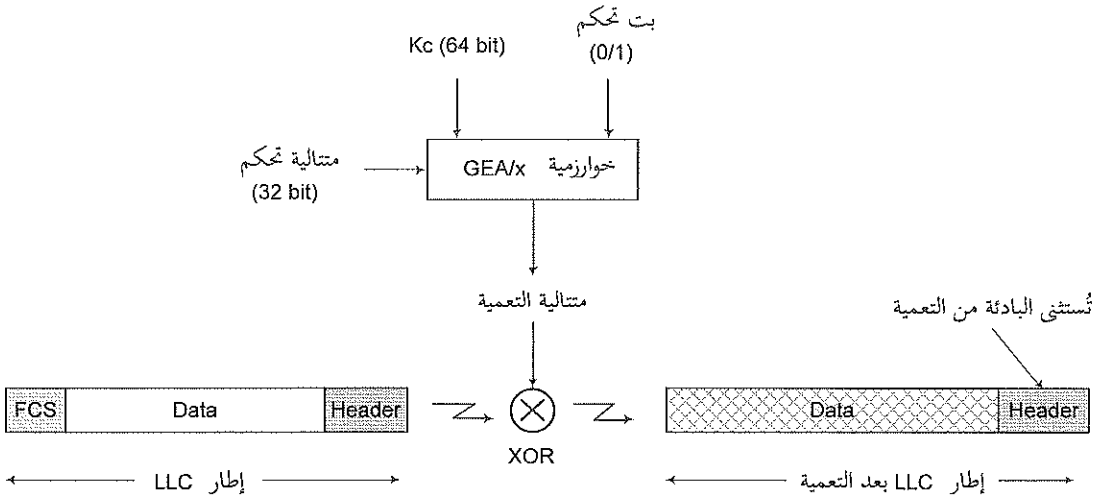
بعد تطبيق عملية الخيار المقصور يرسل دفق المعلومات أو البتات المعمّى إلى طرف الاستقبال، حيث يجري فك التعمية على نحوٍ مشابه، أي باستخدام دفق بتات التعمية المُولَّد في طرف الاستقبال، وعملية XOR مع دفق البتات المستقبَل.

مما لاشكَّ فيه أن إجراء التعمية يتطلب تزامناً دقيقاً بين طرفي الاتصال، ويتحقق ذلك من خلال تفعيل إجراءات التعمية في طرفي الاتصال فور توفر مفتاح التعمية، أي قبل استقبال أول دفقٍ مُعمَّى، بحيث يتاح الوقت لتحقيق تزامنٍ دقيق، وضبطٍ محكمٍ لرقم الإطار بين طرفي الاتصال. هذا ويجب التنويه إلى أن خوارزمية التعمية تنجز من قبل الجهاز المتحرك ME وليس من قبل الشريحة، إذ أن خطوات معالجة الإشارة التي تقود إلى تكوين دفق المعلومات، تنجَز ضمن دارات هذا الجهاز، وليس ضمن الشريحة.

تجدر الإشارة في هذا السياق أيضاً إلى وجود أكثر من إصدارٍ لخوارزمية التعمية، تتباين من حيث تعقيدها ودرجة الحصانة التي توفرها. فالإصدار التقليدي لهذه الخوارزمية معروفٌ باسم "A5/1"، وهو الذي استُخدم في أوربا وأمريكا خلال السنوات الأولى لانتشار نظام GSM. بعد ذلك طُوِّرت صيغة ضعيفة جداً من هذه الخوارزمية، تعرف بالرمز "A5/2"، كي تستخدم في بلادٍ أخرى خاضعة لحظرٍ على تصدير التقنيات المتقدمة. أما أحدث إصدارٍ للخوارزمية فقد قادت إليه جهود مهندسي التصميم ضمن مشروع تطوير الجيل الثالث للاتصالات الخلوية. يعرف هذا الإصدار باسم "A5/3"، وهو المستخدم حالياً في أوروبا وأمريكا.

لا تختلف إجراءات تعمية المعطيات الرزمية من ناحية المبدأ العام عما شرحناه، حيث تتلخص نقاط التباين الجديرة بالذكر في ما يلي:

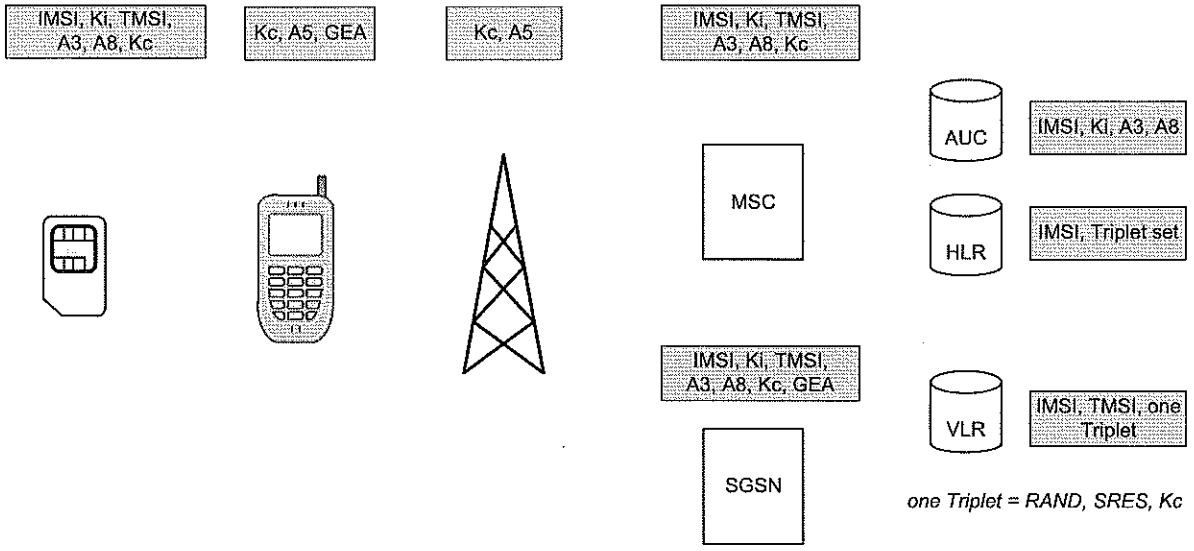
- تعتبر طبقة "Logical Link Control (LLC)" هي المسؤولة عن تأمين مسارٍ آمنٍ لتبادل المعطيات بين الوحدة المتحركة والشبكة (انظر الفصل٤)، لذا تنفَّذ إجراءات التعمية ضمن البروتوكولات الخاصة بهذه الطبقة. ولما كانت هذه البروتوكولات تنجز في الوحدة المتحركة وفي الموجه SGSN فقط، أي دون أي مساهمة من قبل المحطة الثابتة أو وحدة التحكم BSC، فإن إجراءات التعمية في حالة تبادل المعطيات لا تنجز في المحطة الثابتة –كما سبق– وإنما في الموجه SGSN.
- تُعرف الخوارزمية الخاصة بترميز المعطيات باسمٍ عام هو "GPRS Encryption Algorithm (GEA)"، ولا يُستخدم حالياً إلا إصدار واحد منها. تَستخدم هذه الخوارزمية عوضاً عن رقم الإطار FN في الشكل ٦-٢١ متتاليةً يجري توليدها وفق بعض الآليات الخاصة (انظر [٢٥])، أما المبدأ العام للتعمية فلا يتغير كما يوضح الشكل ٦-٢٢.



الشكل ٦-٢٢: إجراءات التعمية في حالة تبادل المعطيات الرزمية.

نلفت نظر القارئ أخيراً إلى أن إجراءات التوثق والتعمية اكتسبت بعض التحسينات ضمن نظام UMTS وصارت أكثر إحكاماً ودقة، غير أن هذه التحسينات عُنيت فقط ببعض التفاصيل ولم تقُد إلى تغييرٍ جذري في الآليات والخطوات التي ذكرناها، والتي بقيت مشتركة بين النظامين. لذا نكتفي بما عرضناه من المبادئ الأساسية ونحيل القارئ المهتم بالمزيد من المعلومات إلى [٢٦].

تلخيصاً لما سردناه، يعرض الشكل ٦-٢٣ توزيعاً مجملاً للمهام المتعلقة بأمن معلومات المشترك وهويته على مكونات الشبكة.



الشكل ٦-٢٣: توزع الأرقام والخوارزميات الخاصة بآليات أمن المعلومات على مكونات الشبكة المختلفة.

٦-٦-٥ سجل أجهزة المشتركين

تبين من خلال نقاش بحث التعمية أن الحفاظ على خصوصية هوية المشترك واتصالاته مثّل محوراً هاماً من المحاور التي عُنِيَ مطورو نظم الاتصالات الخلوية بها. ولم يقتصر اهتمام مهندسي التطوير على أمن المعلومات الخاصة بالمشترك، بل شمل أيضاً الأجهزة التي يستخدمها، خصوصاً وأن هذه الأجهزة كانت باهظة الثمن في بدايات انتشار الشبكات الخلوية.
كان هذا الاهتمام هو الحافز لتطوير "سجل أجهزة المشتركين" "Equipment Identity Register (EIR)" كوحدةٍ وظيفية جديدة ضمن الشبكة.

يمثل هذا السجل قاعدة معطيات تشمل رقم IMEI لكل وحدة متحركة مستخدمة حالياً أو سبق استخدامُها ضمن الشبكة (انظر الشكل ٦-٢ لبنية رقم IMEI). وتصنف الأرقام المحفوظة في هذا السجل ضمن ثلاث قوائم هي:

١) "القائمة البيضاء" "White List": وتتضمن الأجهزة المستخدمة حالياً ضمن الشبكة، والمخولة باستخدام خدماتها دون أي قيد، والخالية من أية مشاكل فنية أو قانونية.

٢) "القائمة السوداء" "Black List": تشمل هذه القائمة الأجهزة التي ثبت من خلال استخدامٍ سابقٍ لها أنها تسبب مشاكل تقنية، والأجهزة المُنتجة من قبل مُصنِّعين لا يلتزمون بالمواصفات الفنية الضرورية والموافقة للتوصيات المعيارية. إضافةً إلى ذلك، إذا فقد مشتركٌ ما جهازه، أو سرق هذا الجهاز منه، يمكنه أن يتصل بالمشغل لإعلامه عن رقم IMEI الخاص بهذا الجهاز[1]. بدوره، يُدرج المشغل رقم الجهاز المفقود أو المسروق ضمن اللائحة السوداء. وهذا الإدراج أو التدوين يُمكن استثماره على النحو التالي: عندما يطلب جهازٌ ما الولوج إلى الشبكة، يرسل المقسم ضمن خطواتِ مباشرة الاتصال أمراً إلى سجل EIR، يطلب من خلاله التحقق من صلاحية الجهاز. يتضمن هذا الأمر رقم IMEI الخاص بالجهاز المعني كموسطٍ، ما يتيح مقارنة هذا الرقم مع الأرقام المسجلة في قوائم EIR. فإذا تبين أن هذا الجهاز مدرج ضمن القائمة السوداء، يُرسل إيعازٌ للمقسم بذلك، ومن ثم يُرفض طلب الولوج إلى الشبكة.

٣) "القائمة الرمادية" "Gray List": تتضمن هذه القائمة أرقام الأجهزة التي يجب مراقبة أدائها بسبب وجود ملاحظاتٍ فنية أو قانونية تتعلق بها.

يتيح سجل EIR من خلال القوائم التي ذكرناها آلياتٍ إضافية للمشغل، تمكنه من التأكد من سلامة الأجهزة التي تلج إلى الشبكة فنياً وقانونياً. فمن الممكن أن تشمل القائمة السوداء أو الرمادية أيضاً أجهزة ذات منشأ محددٍ يُحظر التعامل معه (دولة محددة أو شركة مصنِّعة بعينها)، أو كل الأجهزة ضمن نموذجٍ أو خطِ إنتاجٍ معين، أو أرقام IMI التي هناك شكٌ بأنها مستنسخة أو وهمية، كما يمكن استخدام هذا السجل لمراقبة الاتصالات الصادرة عن جهازٍ معين بدوافع أمنية.

---

[1] يمكن لكل مستخدم أن يعرف رقم IMEI الخاص بالوحدة المتحركة عن طريق إدخال الرمز #06#*، إذ يؤدي هذا الرمز إلى ظهور الرقم على الشاشة.

لا يُعتبر استخدام EIR أمراً ملزماً للمشغل من الناحية التقنية، أي أن سجل EIR يمثل عنصراً خيارياً ضمن مكونات الشبكة. لذا يحكُمُ وجودَه ضمن بنية الشبكة سياسةُ المشغل أو الجهةُ الناظمة لقطاع الاتصالات، فعلى سبيل المثال، تُلزِم الجهات المعنية في بريطانيا كل مشغلي شبكات الاتصالات باستخدامه، كما توجِبُ استخدام "سجل مركزي" "Central EIR" يجمع القوائم من كل المشغلين في بريطانيا ويمكن لكل مشغل التواصل معه عند التحقق من هوية جهازٍ ما، بحيث إذا سرق جهازٌ من شبكة اتصالات محددة، أمكن حظرُه ضمن كل الشبكات الفاعلة. هذا ولا تتبّع كل البلدان هذه السياسة المتقدمة، حيث يترك القرار في كثير من الأحيان للمشغل.

٦-٧ البنية الجغرافية للشبكة

لما كان التنقل المتكرّر من خلية إلى أخرى خلال مُدَدٍ زمنية قصيرة سمةً غالبةً على مستخدمي نظم الاتصالات الخلوية، كانت المتابعة المستمرة لهوية ورقم الخلية التي يوجد فيها المشترك، وتحديث هذه الهوية في كلٍّ من سجل HLR وسجل VLR أمراً يتطلب كمّاً هائلاً من رسائل التحكم الواجب تبادلها بين عناصر الشبكة المختلفة، فعدد المشتركين في الشبكة الواحدة قد يبلغ عشرات الملايين، وقد تكون الشبكة الراديوية مكونةً من آلاف المحطات الثابتة، وهذا يعني أن متابعة مكان كل مشترك -مع احتمال تنقله بين عدة محطات خلال مدة وجيزة- يتطلب عشرات الملايين من رسائل التحكم في كل لحظة، وهذا يستنفد موارد الشبكة على نحوٍ غير ضروري، ودون طائلٍ يذكر.

لتجاوز هذا الأمر، تعتمد شبكة الاتصالات الخلوية بنيةً هرمية خاصة لوصف هيكلية الشبكة من الناحية الجغرافية، وهذه البنية تتيح مرونةً مميزة في تحديد موقع المشترك، وتسمح بالاقتصار على أقل كمٍّ ممكنٍ من المعلومات التي يجب تبادلها بين مكونات الشبكة، ما يحفظ موارد الشبكة من الاستخدام غير الفعال.

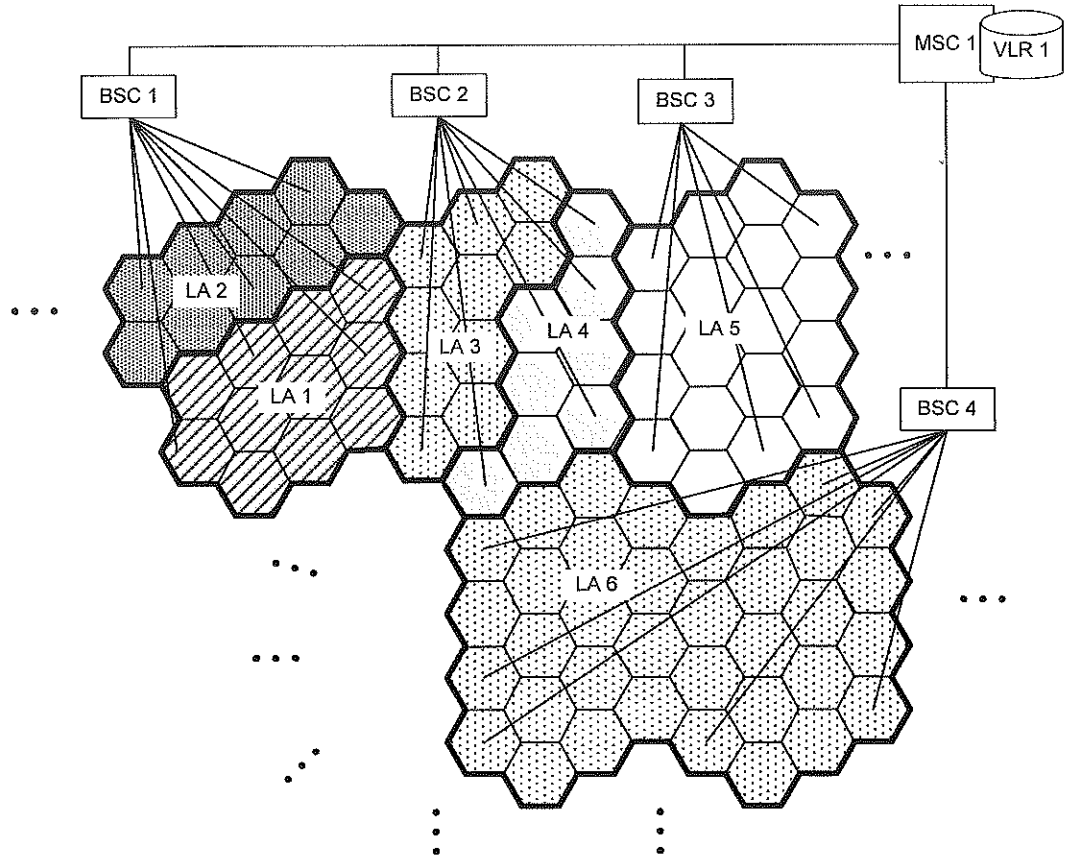
تتكون بنية الشبكة من الناحية الجغرافية مما يلي:

١) "الخلية" "Cell": وهي أصغر وحدةٍ ضمن هذه البنية، وكنا قد أشرنا في الفصل ١ إلى أن الخلية لا تعني الموقع الفيزيائي الذي توجد فيه التجهيزات، وإنما النطاق أو الحيز الجغرافي الذي يغذيه هوائي بثٍّ منفرد، باستخدام قنوات راديوية محددة ومخصصة. وقد أوضحنا في ما سبق من هذا الفصل أن الموقع الفيزيائي الواحد قد يحوي التجهيزات الخاصة بأكثر من خلية قطاعية (انظر الشكل ٦-٩).

٢) "منطقة وجود المشترك (منطقة الوجود)[١]" "Location Area (LA)": تشمل كل منطقة وجودٍ عدداً من الخلايا التي تتبع لوحدة تحكم BSC / RNC منفردة، ويحكمُ عدد الخلايا ضمن كل منطقة وجود ضروراتُ تخطيط الشبكة والتوزع الجغرافي للخلايا. وقد سبقت الإشارة إلى أن وحدة التحكم قد تكون مسؤولة عن إدارة الموارد والتنسيق لأكثر من 100 محطة، لذا قد تشمل وحدةٌ واحدة عدةَ مناطقَ وجود (انظر الشكل ٦-٢٤). فعلى سبيل المثال، قد يكون نطاقُ التحكم الخاص

[١] أعرضنا عن استخدام تعبير "منطقة التواجد"، فالوجد هو الحب الشديد، وتواجد فلانٌ: أظهر من نفسه الوجد (انظر [٢٧]).

بوحدة تحكم معينة شاملاً خلايا عديدة موزعة على قريتين نائيتين، وعلى مدينة صغيرة، وهذا التوزيع الجغرافي يقود من الناحية المنطقية والعملية إلى اعتماد ثلاثة "مناطق وجود"، تشمل الأولى والثانية كلاً من القريتين، وتغطي الثالثة المدينة الصغيرة. وإذا كانت المدينة كبيرةً وممتدة جغرافياً على مساحات شاسعة، فمن الممكن تقسيم المساحة التي تغطيها إلى مناطق وجودٍ متعددة.



الشكل ٦-٢٤: توضيحٌ لمفهوم منطقة الوجود.

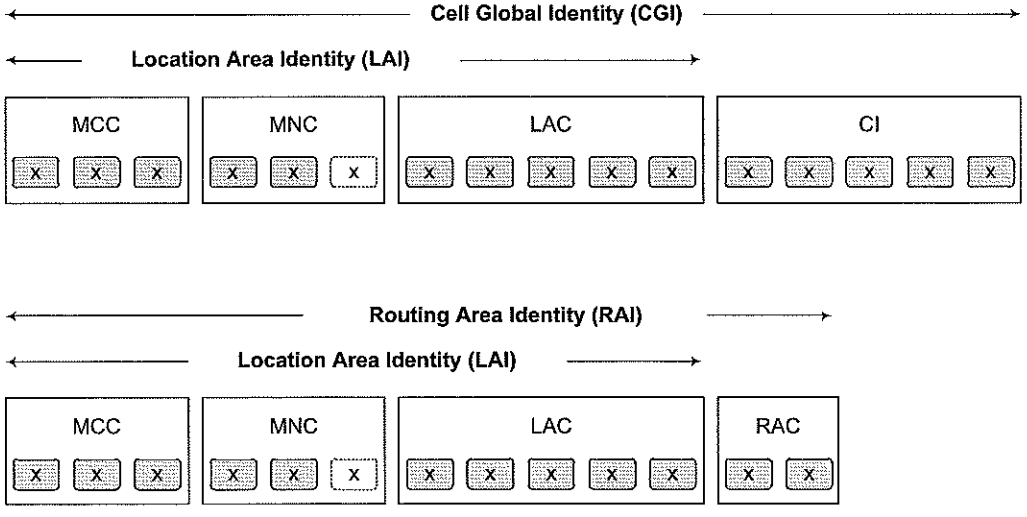
تتميز كل منطقة وجود (LA) برمز خاص، يُشار إليه بـ "رقم منطقة الوجود" "Location Area Identity (LAI)"، وهذا الرقم يجعل المنطقة فريدةً، ليس على صعيد الشبكة فقط، وإنما على صعيدٍ عالمي أيضاً. إذ يتألف هذا الرقم من ثلاثة حقول، يحوي الحقل الأول الرمز القطري MCC، كما يحوي الحقل الثاني رمز الشبكة المحلي MNC، وقد سبق بيان ماهية هذين الرقمين في سياق شرح بنية رقم المشترك IMSI (انظر الشكل ٦-٢). أما الحقل الثالث فيحوي رقماً مؤلفاً من خمس خانات على الأكثر، تكوّن ما يعرف بـ "رمز منطقة الوجود" "Location Area Code (LAC)" (تُشغل هذه الخانات بأرقامٍ وفق نظام الترقيم السداسي عشر، وتمثل ثمانيّتين (2 Bytes) على التسلسل، وهذا يسمح بتعريف 65536 منطقة وجود ضمن الشبكة الواحدة.

تبثُّ كل محطة ثابتة رقم LAI الخاص بالمنطقة التي تتبع لها ضمن معلومات القناة العامة BCCH على نحوٍ دوري. وحين تلج وحدة متحركة منطقة تغذية هذه المحطة، تقرأ هذا الرقم وتحفظه في ذاكرة الشريحة، كما تبلِّغ سجل VLR بهذا الرقم لحفظه كمعلومةٍ أساسية تدل على موقع المشترك الحالي، وهذا يجعل الشبكة على دراية مستمرة وفي حالة متابعةٍ دائمة لموقع الوحدة الجغرافي. فإذا انتقلت الوحدة إلى خلية أخرى، ورصدت تبايناً بين رقم LAI الذي تستقبله وذاك المحفوظ في الشريحة، طلبت -أي الوحدة- من سجل VLR تحديث رقم منطقة الوجود LAI، يُعرف هذا الإجراء باسم "تحديث رقم منطقة الوجود" "Location Update (LU)"، وسنعرض له بتفصيل وافٍ في الفصل ٧.

عندما يرد اتصال إلى المشترك، يسأل المقسمُ بدايةً سجل HLR عن رقم VLR الذي يوجد المشترك ضمن منطقة خدمته، فإذا وُجِّه الاتصال إلى المقسم المعني، يستفهم الأخير من سجل VLR عن رقم LAI الخاص بالمشترك، ومن ثم تصدرُ رسالة نداءٍ للمشترك "Paging" ضمن هذه المنطقة، أي أن رسالة النداء تُبَثُّ من قبل كل المحطات الثابتة ضمن منطقة الوجود المعنية. ولما كانت رسالة النداء مقترنةً برقمٍ يدل على هوية المشترك (IMSI / TMSI)، فإن الوحدة المتحركة المطلوبة تستطيع معرفة أنها معنية بالنداء، فإذا أجابت الوحدة على رسالة النداء، عرفت وحدة التحكم (BSC/RNC) الخلية التي يوجد ضمنها المشترك، وباشرت بمتابعة خطوات الاتصال مع المحطة التي تغذي هذه الخلية بالذات.

تتميز كل خلية ضمن منطقة الوجود برقمٍ خاص بها يعرف باسم "هوية أو رقم الخلية" "Cell Identity (CI)"، ويتألف من خمس خاناتٍ تمثِّلْنَ ثمانيتين بترميزٍ سداسي عشر (مثل رقم LAC). ويجري اختيار كلٍّ من رقمي LAC و CI وفق نظامٍ أو خطةٍ يحددها المشغل.

يقود ضمُّ الرقمين -أي CI و LAI- إلى رقمٍ فريدٍ للخلية، يميزها عن سواها على صعيدٍ عالمي. لذا يدعى هذا الرقم "رمز الخلية العالمي" "Cell Global Identity (CGI)" (انظر الجزء الأعلى من الشكل ٦-٢٥).



الشكل ٦-٢٥: الأرقام الدالة على بنية الشبكة الجغرافية.

نشير في هذا السياق أيضاً إلى أن تمييز الخلية ضمن الموقع الواحد، أي عند تَشَارُكِ عدة خلايا الموقعَ نفسه، يكون استناداً إلى رقم BSIC، الذي سبق بيان فحواه في الفصل ٤، وانظر كذلك الشكل ٦-٩.

٣) "منطقة توجيه الرزم" "Routing Area (RA)": تشابه هذه المنطقةُ "منطقةَ وجود المشترك"، وتُعرَّف لأغراض تبادل المعطيات الرزمية، حيث تُبَثُّ ضمنها إشارات نداء المشترك عند ورود اتصال رزمي خاص به. يخصص لكل منطقة رقم فريد هو "رقم منطقة توجيه الرزم" "Routing Area Identity (RAI)"، الذي يبين الجزء الأدنى من الشكل ٦-٢٥ بنيته. يتضح من هذه البنية أن رقم منطقة التوجيه يتكون من رقم منطقة الوجود LAI، مزيداً إليه خانتان للدلالة على "رمز منطقة التوجيه" "Routing Area Code (RAC)"، وهذا يعني أن منطقة توجيه الرزم تكوِّن دائماً وحدة جغرافية ضمن منطقة وجود المشترك، بحيث تتألف منطقة الوجود من عدة مناطق لتوجيه الرزم.
يحفظ رقم منطقة توجيه الرزم RAI في الموجّه SGSN، وعندما يغير المشترك مكانه إلى منطقة توجيه جديدة، يُرسَل رقم RAI الجديد إلى سجل HLR كي يزود به جهاز SGSN عند الحاجة.

٤) "منطقة خدمة مركز التبديل (المقسم)" "MSC Service Area": تتكون هذه المنطقة من جميع الخلايا المرتبطة بوحدات التحكم بالمحطات (BSC/RNC) التي تتبع للمقسم نفسه. ولما كان كل مقسم مجهزاً أو مرفقاً بسجل VLR مستقل، فإن هذه المنطقة تعرف أيضاً بـ "منطقة خدمة سجل VLR" "VLR Service Area".

٥) "منطقة خدمة الشبكة" "PLMN Service Area": يدل هذا التعبير على كل مناطق خدمة المقاسم التابعة لشبكة معينة ضمن دولةٍ أو قطر ما.

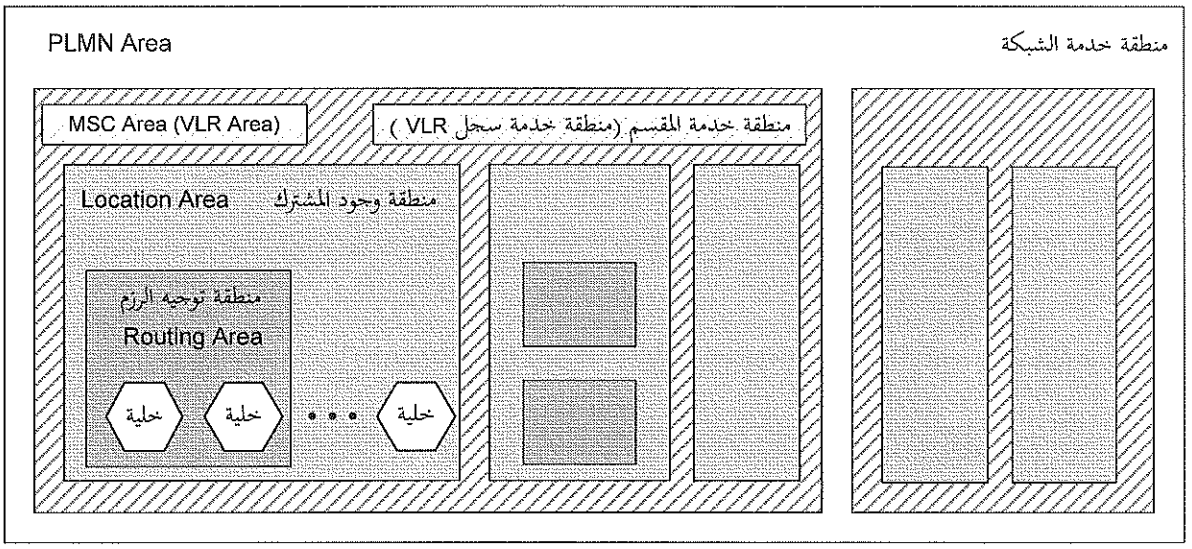
يقود هذا التقسيم الجغرافي للشبكة إلى بنية تراتبية أو هرمية (انظر الشكل ٦-٢٦)، أصغر وحداتها هي الخلية، وأوسعها جغرافياً هي منطقة تغطية أو خدمة الشبكة.

تتيح هذه البنية خفضاً ملحوظاً في كمِّ إشارات التحكم ضمن الشبكة، والاقتصار على أهم المعلومات الخاصة بمتابعة مكان وجود المشترك. فسجل HLR يحتفظ فقط بهوية سجل VLR الذي يوجد المشترك ضمن منطقة خدمته، ولا يجري تغيير هذه الهوية إلا إذا انتقل المشترك من منطقة خدمة مقسم إلى منطقة خدمة مقسم آخر، واحتمال حدوث ذلك لا شك أقل بكثير من احتمال تغيير الخلية. بدوره يحتفظ سجل VLR برقم منطقة وجود المشترك LAI، وهذا الرقم يتغير بوتيرةٍ أقل من تلك الخاصة برقم الخلية، ما يعني أن إرسال رسالة تشوير لإبلاغ سجل VLR بتغيير رقم منطقة الوجود LAI لا يكون إلا عندما ينتقل المشترك من الحيز الجغرافي المعرَّف بمجموعة خلايا منطقةِ وجودٍ معينة، إلى حيزٍ جغرافي آخر، وهكذا.

نشير أخيراً إلى أن متابعة موقع وجود المشترك، والإجراءات المتعلقة بذلك، تندرج ضمن مهامٍ وظيفيةٍ يجمعها عنوانٌ شامل هو "إدارة موقع المشترك" "Location Management".

بذلك نكون قد عرضنا لأهم مكونات الشبكة، والتي تتيح استخدام خدمات الشبكة الأساسية (كالمكالمات الصوتية وتبادل

المعطيات). وكما ذكرنا من قبل، تشمل الشبكة المركزية من الناحية الواقعية تجهيزاتٍ أخرى مختلفة، غير أن نقاشها أو شرح مهامها يخرج عن الإطار المرسوم لهذا الكتاب.



الشكل ٦-٢٦: بنية الشبكة من الناحية الجغرافية.

٦-٨ مراجع مختارة

[١] http://www.3gpp.org/releases

[٢] 3GPP Specifications TS 23.003, "Numbering, addressing and identification".

[٣] International Telecommunication Union, "Recommendation ITU-T E.212; The international identification plan for public networks and subscriptions", 2008.

[٤] International Telecommunication Union, "Recommendation ITU-T E.164; Assigned Country Codes", 2011.

[٥] 3GPP Specifications TS 43.020, "Security related network functions".

[٦] GSM Association, Official Document TS.06, "IMEI Allocation and Approval Guidelines", 2011.

[٧] 3GPP Specifications TS 27.001, "General on Terminal Adaptation Functions (TAF) for Mobile Stations (MS)".

[٨] 3GPP Specifications TS 45.005, "Radio Transmission and Reception".

[٩] 3GPP Specifications TS 25.101, "UE radio transmission and reception (FDD)".

3GPP Specifications TS 31.102, "Characteristics of the USIM Application". [١٠]

3GPP Specifications TS 11.11, "Specification of the Subscriber Identity Module Mobile Equipment (SIM - ME) interface". [١١]

3GPP Specifications TS 31.111, "USIM Application Toolkit (USAT)". [١٢]

3GPP Specifications TS 43.119, "Subscriber Identity Module Application Programming Interface (SIM API) for Java Card". [١٣]

J. Eberspächer, et.al. "GSM – Architecture, Protocols and Services", John Wiley, 2009. [١٤]

B. Walke, "UMTS The fundamentals", John Wiley, 2003. [١٥]

J. Korhonen, "Introduction to 3G Mobile Communications", Artech House Inc., 2003. [١٦]

3GPP Specifications TS 48.060, "In-band control of remote transcoders and rate adaptors for full rate traffic channels". [١٧]

3GPP Specifications TS 48.061, "In-band control of remote transcoders and rate adaptors for halfrate traffic channels". [١٨]

3GPP Specifications TS 48.020, "Rate adaption on the Base Station System - Mobile-services Switching Centre (BSS - MSC) interface". [١٩]

3GPP Specifications TS 29.007, "General requirements on interworking between the Public Land Mobile Network (PLMN) and the Integrated Services Digital Network (ISDN) or Public Switched Telephone Network (PSTN)". [٢٠]

E. Seurre et. al, "GPRS for Mobile Internet", Artech House Inc., 2003. [٢١]

G. Heine and H. Sagkob, "GPRS: Gateway to Third Generation Mobile Networks", Artech House Inc., 2003. [٢٢]

R. J. Bates, "GPRS: General Packet Radio Service", McGraw Hill, 2002. [٢٣]

G. Heine, "GSM Networks: Protocols, Terminology, and Implementation", Artech House, 1999. [٢٤]

3GPP Specifications TS 44.064, "Mobile Station - Serving GPRS Support Node (MS-SGSN); Logical Link Control (LLC) layer specification". [٢٥]

3GPP Specifications TS 23.002, "3G Security; Security architecture". [٢٦]

"نحو إتقان الكتابة العلمية باللغة العربية"، د. مكي الحسني، مطبوعات مجمع اللغة العربية بدمشق، ٢٠١١. [٢٧]

٧

مبادئ وآليات التحكم بخطوات الاتصالات

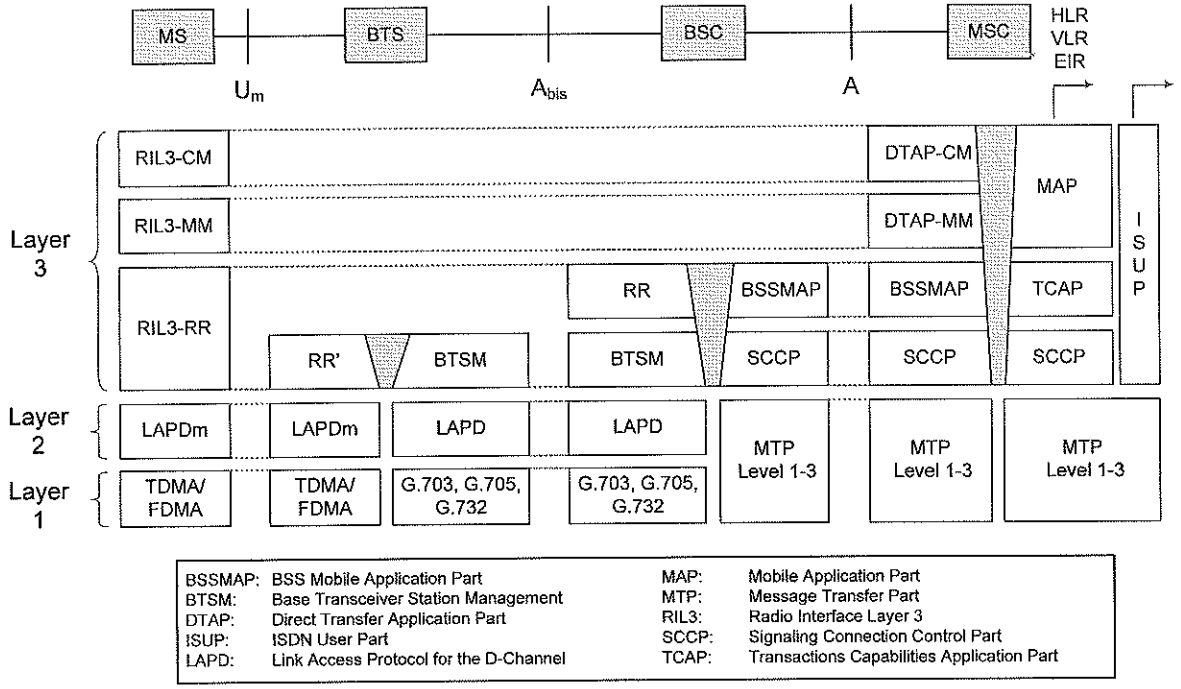
لابد لكل اتصالٍ من آلياتٍ محددةٍ تحكُمُ تسلسل الخطوات المتعلقة بأطواره المختلفة، بدءاً من خطوة إنشاء الاتصال وانتهاءً بتحرير القنوات الفيزيائية بعد الفراغ من تبادل المعلومات بين طرفي الاتصال. وهذه الآليات تتطلب تبادل رسائل تحكم عديدة ومختلفة بين عناصر الشبكة التي تكون طرفاً في أيٍّ من خطوات الاتصال المختلفة، ويكون الغرض المشترك لكل هذه الرسائل إتاحةَ نقلٍ موثوقٍ للمعلومات بين أطراف الاتصال، مع استثمارٍ أمثلَ لموارد الشبكة.
يجري تبادل الرسائل بين عناصر أو مكونات الشبكة وفق قواعدَ محكمةٍ، تنْظمُ ترتيب هذه الرسائل، وبنية كلٍّ منها، والمهام المنوطة بها. ويُطلق على مجموع هذه الرسائل وعلى القواعد الحاكمة لتبادلها، وعلى أنماط استخدامها، تعبيرٌ أو مصطلحٌ جامعٌ هو "بروتوكول" "Protocol".

يتميز موضوع بروتوكولات التحكم بتشعبه وبكونه يتضمن الكثير من المفاهيم والمبادئ التجريدية والاصطلاحية، ولـمَّا كان هدف هذا الفصل تعريف القارئ بخطوات إنجاز الاتصالات ضمن الشبكة، سيكون عرض المبادئ التجريدية مقتضباً، وقد نتجاوزه عند إمكانية توضيح الخطوات على نحو مبسطٍ وعملي. ننطلق كذلك في عرضنا من أن القارئ ملمٌّ بالبنية الطبقية لبروتوكولات التحكم وفق نموذج "Open Systems Interconnection Model (OSI)"، كما نقتصر على أهم معالم وخصائص تبادل رسائل التحكم في نظام GSM. وقد اخترنا الاقتصار على رسائل هذا النظام والاكتفاء بعرض بعض حالات الاتصال الخاصة بخدمات المكالمات الهاتفية، كي نتيح أكبر مساحة ممكنة لشرح ونقاش التفاصيل التي تفيد في ترسيخ ما تضمنته الفصول السابقة من مفاهيم.

من جانبٍ آخر، نؤكد على أن المبادئ التي سنطرحها عامةٌ تخضع لها خدمات الاتصالات المختلفة (مثل خدمة الرسائل النصية القصيرة أو خدمة تبادل المعطيات الرزمية)، كما أنها مشتركة بين نظم الاتصالات المختلفة، ما يعني أن الأمثلة التي سنعرضها مشابهةٌ في جوهرها للإجراءات المماثلة في نظام UMTS أو غيره، لذا تتيح التفاصيل التي نسوقها تيسيرَ دراسةٍ وفهمِ أمثلةٍ كثيرة أخرى لتسلسل إجراءات الاتصال.

٧-١ منظومة بروتوكولات التحكم في نظام GSM

تمهيداً لنقاش أهم الأمثلة على تسلسل خطوات الاتصال نعرض في هذا البحث لبنية منظومة بروتوكولات التحكم في نظام GSM، والتي يبينها الشكل ٧-١. تشمل هذه المنظومة بروتوكولات عديدة، يختلف تسلسلها التراتبي أو الهرمي تبعاً للرابط الذي تحكُمُ تبادلَ الرسائل عليه، ويلحظ القارئ أننا تجاوزنا عن بيان تفاصيل الرابط A_{ter} بين وحدة التحكم (BSC) ووحدة الملاءمة (TRAU)، وذلك بغية تبسيط النقاش.



الشكل ٧-١: منظومة بروتوكولات التحكم لنظام GSM.

تتباين بروتوكولات التحكم من حيث أغراضها والخدمات التي تقدمها تبعاً للرابط البيني الذي تُعنى بتنسيق تبادل المعلومات بين طرفيه، وذلك وفق تفصيلٍ تبينه الفقرات التالية.

٧-١-١ الرابط الراديوي

يمثل الرابط الراديوي المنفذ الوحيد للمشترِك إلى خدمات الشبكة، وقد ناقشنا في أكثر من موضع ضمن الفصول السابقة الأهمية الجوهرية لهذا الرابط من ناحية بنية الشبكة ومعايير أدائها. وحتى يتسنى لأيةِ وحدةٍ متحركةِ التواصل مع محطاتٍ ثابتة مُنتَجةً من قبل شركاتٍ مصنِّعةٍ مختلفة، بغض النظر عن "النموذج التسويقي" "Model Type" للوحدة، أو "الميزات" "Features" التي

تتمتع بها ، وجَبَ وضع معايير دقيقة لهذا الرابط، تأخذ بعين الاعتبار كل التفاصيل المتعلقة به. وتسهيلاً لتنسيق إجراءات التطوير والتحسين المتعلقة بالنظام، جرى توزيع مهام هذا الرابط ضمن ثلاث طبقات بروتوكولية (انظر الشكل ٧-١)، نعرض في ما يلي لأهم خصائصها.

٧-١-١-١ "الطبقة المادية أو الفيزيائية" "Physical Layer"

يُشار إلى هذه الطبقة غالباً بتعبير "الطبقة الأولى" "Layer 1"، في دلالةٍ على ترتيبها ضمن البنيان الطبقي للبروتوكولات، ويدل اسمها على مهامها، إذ تشمل تعريفاً دقيقاً لبنية القنوات الفيزيائية التي تُحمل عليها المعلومات المتبادلة بين المحطة الثابتة والوحدة المتحركة، إضافةً إلى وصفٍ مفصَّلٍ لخصائص الإشارة الراديوية التي تُحمل عليها المعلومات.

من الأمثلة على النقاط التي تُعنى هذه الطبقة بتعريفها ما يلي:

- الخطوات التي يجب اتباعها عند معالجة الإشارة وتحضيرها للبث الراديوي، مثل "ترميز المنبع" "Source Coding"، و"ترميز القناة" "Channel Coding"، وآليات "التفريق" "Interleaving"، والتعديل الراديوي الذي ينقل الإشارة من صيغة رقمية ضمن "النطاق الأساسي" "Baseband" إلى صيغة تمثيلية ضمن "النطاق الراديوي" "Radio Frequency Band" المُخَصَّصِ للنظام. يُضاف إلى ذلك -في حالة نظام UMTS- كل ما يتعلق بخطوات "نثر الطيف" "Spreading"، وخصائص سلاسل أو متتاليات الترميز والبعثرة المتاحة للاستخدام، وقد عرضنا لتفاصيل معالجة الإشارة في الفصل ٥.
- مقدار الاستطاعة التي يُسمح لكلٍّ من المحطة والوحدة المتحركة بثها، وذلك لخفض مستوى التشويش ضمن الشبكة.
- خصائص القنوات الفيزيائية الحاملة للمعلومات، أي القنوات الترددية المتاحة، والتقسيم الزمني على هذه الترددات، أي تعريف "الحيز الزمني" "Time Slot" و"إطار تعدد النفاذ" "TDMA Frame"، والتراتب الهرمي للأطر المتعددة، وغير ذلك من تفاصيل بنية الرابط الراديوي.
- آليات توزيع القنوات الاعتبارية على القنوات الفيزيائية، وكيفية ترتيب إرسال هذه القنوات ضمن الأنماط والنماذج التي شرحنا أهم معالمها في الفصل ٤. وننوه في هذا الموضع إلى أن هذه الطبقة -أي الطبقة الأولى- تُعنى بالقنوات الاعتبارية كوحداتِ معلومات، أما تعريف مضمون وفحوى المعلومات التي تحملها هذه الوحدات فإنه ينضوي تحت مهام طبقة التحكم أو الطبقة الثالثة، التي سنعرض لها لاحقاً.

٧-١-١-٢ "طبقة حماية المعلومات" "Data Link Layer"

هذه هي "الطبقة الثانية" "Layer 2" ضمن البنيان الطبقي لبروتوكولات الرابط الراديوي، ونشير إليها في هذا السياق بتعبير "طبقة حماية المعلومات" للتأكيد على جوهر مهامها الوظيفية الذي يتمحور حول توفيرِ تبادلٍ موثوقٍ للمعلومات بين طرفي الاتصال، وهما في هذه الحالة المحطة الثابتة والوحدة المتحركة.

يحكُمُ إنجاز مهام هذه الطبقة بروتوكول "Link Access Protocol on the D Channel_modified (LAPDm)"، الذي طُوِّرت صيغته الأصلية المسماة "Link Access Protocol on the D Channel (LAPD)" كجُزءٍ من منظومة البروتوكولات الخاصة بنظام ISDN. وقد كان الغرض الأساسي من تطوير صيغة البروتوكول الأصلية (أي LAPD) إتاحةَ التبادل الموثوق لمعلومات التشوير بين جهاز الهاتف الثابت والمقسم الذي يصله بالشبكة المركزية. ونظراً لأن هذا البرتوكول قد أثبت كفاءته ومرونته، فقد تقرر استخدامه بين المحطة الثابتة ووحدة التحكم، أي على الرابط A_{bis} كما سيمر لاحقاً. وبغية تحقيق توافقٍ بين آليات تبادل المعلومات ضمن الطبقة الثانية، فقد تقرر استخدام هذا البروتوكول للرابط الراديوي أيضاً، بعد إدخال بعض التعديلات عليه، وهذا ما تشير إليه القرينة m كاختصارٍ لتعبير "modified".

من أهم ما يُعنى به هذا البرتوكول وظيفياً النقل الموثوق لرسائل التشوير التي ترد من الطبقة الثالثة. حيث تجري تجزئة هذه الرسائل إلى مُقتطعاتٍ (Segments) تُرسل ضمن وحداتِ معلوماتٍ متتابعة، تُعرف كلٌّ منها اصطلاحاً باسم "إطار" "Frame"، كما يجري تزويد هذه الوحدات بحقولِ تحكم إضافية، يمكن استخدامها لكشف أخطاء النقل.

يتيح بروتوكول LAPDm أيضاً استخدام آلياتٍ خاصة لطلب "إقرارٍ" "Acknowledgement" من الطرف المعني باستقبال أُطُرِ المعلومات، يؤكد وصولها واستلامها وفق الترتيب الصحيح. لذا يجري التمييز بين نمطين مختلفين من خدمات النقل التي يقدمها هذا البرتوكول: الأول هو نمط "خدمة نقل المعلومات مع إقرارٍ باستلامها" "Acknowledged Operation"، والذي تُسمِّيه بعض المصادر باسم "Multiple Frame Operation"، أما الثاني فهو "خدمة نقل المعلومات بدون إقرار" "Unacknowledged Operation". ففي حالة النقل مع الإقرار، تُرسَل رسائل الطبقة الثالثة -بعد تجزئتها- ضمن أُطُرٍ متتابعة، ويُزوَّدُ كل إطارٍ برقمٍ تسلسلي فريدٍ، يميزه عن غيره، ما يتيح التوثق من وصول الأطر وفق الترتيب الصحيح. إضافة إلى ذلك، يتيح هذا النمط آليات أخرى لـ "كشف أخطاء النقل" "Error Detection" ولـ "التحكم بوتيرة إرسال المعلومات" "Flow Control". أما في حالة إرسال المعلومات بدون إقرار، فتقتصر آليات التحكم على تلك المتعلقة بكشف أخطاء النقل، وإخطار الطبقة الثالثة بتعرض وحدة المعلومات (الإطار) لأخطاءٍ تُعيقُ التعرفَ عليها في طرف الاستقبال.

من مهام هذا البروتوكول أيضاً تنسيق تبديل القنوات المخصصة (Dedicated Channels) عند انتقال الوحدة المتحركة بين الخلايا أثناء إجراء التسليم (Handover)، وذلك على نحوٍ يضمن عدم انقطاع الاتصال. ففي لحظةٍ ما أثناء خطوات تسليم المشترك من مجال تغذية محطة إلى مجال تغذية محطة أخرى (Handover) يجب أن تتوقف الوحدة المتحركة عن استخدام أية قناة محمولة على تردد المحطة التي تغادر منطقة تغذيتها، والمباشرة باستخدام القنوات الاعتبارية المتاحة من المحطة الجديدة، على التردد الجديد. وهذا يقتضي تنسيقاً دقيقاً لتبادل معلومات التحكم ضمن الشبكة، وفق آلياتٍ يتيحها هذا البروتوكول، بحيث لا يقود هذا الانقطاع إلى أي تَدَنٍّ في جودة الاتصال.

يتيح بروتوكول LAPDm بُنَىً مختلفة لأُطُرِ المعلومات التي تحمل الرسائل، وتتباين هذه البُنى تبعاً للرسائل التي تحملها، ونمط نقل المعلومات المُعتمد. وسنعرض لأهم خصائص هذه البنى في موضعٍ لاحق.

٧-١-١-٣ "طبقة إدارة موارد وخدمات الشبكة" "Network Layer"

تُعرف هذه الطبقة باسم "الطبقة الثالثة للرابط الراديوي" "Radio Interface Layer 3 (RIL3)"، كما تشير إليها معظم المصادر اختصاراً بتعبير "الطبقة الثالثة"، ويدل التعبير العربي الذي اخترناه للدلالة عليها (أي طبقة إدارة موارد وخدمات الشبكة) على أهم وظائفها، إذ تُعنى بروتوكولات هذه الطبقة بكل ما يمكن أن يندرج تحت مُسمّى أو عنوان "التحكم"، وذلك بغية تنسيق تقديم الخدمات للمشتركين على نحوٍ يفي بمتطلبات المواصفات المعيارية من ناحية كفاءة الخدمات، ويَستثمر –في الوقت نفسه– موارد الشبكة بأعلى فعالية ممكنة.

ونظراً لوجود طيفٍ واسعٍ ومتباينٍ من مهام التنسيق والتحكم ضمن الشبكة، فقد اصطُلح على تصنيف هذه المهام ضمن ثلاث مجموعات وظيفية مختلفة، تُمثِّلُ كلٌ منها بـ "طبقة جزئية أو مستوي وظيفي" "Sublayer" ضمن الطبقة الثالثة. وهذه المجموعات الوظيفية هي:

١) **"إدارة الموارد الراديوية" "Radio Resource Management (RR)"**: تشمل هذه المجموعة كل ما يصب في استثمارٍ فعالٍ للموارد المتاحة على الرابط الراديوي، ومن أهم الأمثلة على الوظائف المتعلقة بذلك:

- اختيار القنوات الاعتبارية المناسبة لحمل رسائل التحكم.
- تنسيق إجراءات القياسات الدورية لجودة القناة والإشارة، وإدارة تبادل نتائج هذه القياسات، التي تُحمل على قناة SACCH بين الوحدة المتحركة والمحطة الثابتة (انظر الشكل ٤-٣٠).
- تجميع وصياغة المعلومات العامة عن النظام وعن الخلية، وترتيب هذه المعلومات ضمن بُنى الرسائل الخاصة بحملها (System Information Messages)، وفق ما تُعرِّفه المواصفات المعيارية في هذا الصدد. وقد سبقت الإشارة إلى أمثلةٍ عن هذه الرسائل في الفصل ٤.
- تخصيص القنوات الفيزيائية للمشتركين عند حاجة الشبكة إلى تبادل المعلومات معهم، أو عندما يطلب أحدهم ذلك.
- تنسيق إجراءات تسليم المشترك من خلية إلى أخرى، بما في ذلك اختيار القناة الفيزيائية المناسبة في الخلية الجديدة، وتحرير القناة الفيزيائية في الخلية القديمة، وتحديد اللحظة المناسبة التي يجب أن يجري التسليم عندها.
- إدارة إجراءات التعمية عند الحاجة، فتعمية المعلومات إجراءٌ خياري للمشغل، يمكن تفعيله تبعاً للسياسة المتبعة من ناحية حفظ خصوصية معلومات المشترك. وتكون بروتوكولات هذه الطبقة الجزئية (RR) هي المسؤولة عن إصدار الأمر بالتعمية، أما التنفيذ، فيجري ضمن الطبقة الأولى (الطبقة المادية) أثناء خطوات معالجة الإشارة.
- الإشراف على الإجراءات التي تُعنى بتقنيات تحسين جودة الإشارة على الرابط الراديوي ورفع فعالية استثمار الموارد المتاحة، مثل "القفز الترددي" "Frequency Hopping" و"الإرسال المتقطع" "Discontinuous Transmission"، وكذلك ميزة "التحكم بالطاقة" "Power Control"، و"تقديم إرسال الوحدة المتحركة" "Timing Advance".
- تنسيق إجراءات النفاذ العشوائي إلى الشبكة، والإشراف على آليات تحقيق تزامن الوحدة المتحركة مع المحطة الثابتة.

٢) **"إدارة التجوال (تنقل المشترك)" "Mobility Management (MM)"**: يُقصد بتعبير التجوال في هذا الموضع تنقل المشترك وحركته، وهذا يعني أن هذه الطبقة الجزئية تشمل كل المهام الداعمة لتيسير خدمات الشبكة للمشترك، بغض النظر عن مكانه. من الأمثلة على ذلك:

- إنجاز إجراءات المتابعة الدقيقة لمكان المشترك، بغية تسهيل تزويده بخدمات الاتصالات. فالخطوات التي شرحناها عند نقاش الشكل ٦-٣، والتي تضمن أن يكون سجل HLR على دراية دائمة بهوية سجل VLR الذي يوجد المشترك ضمن منطقة خدمته، وكذلك إجراءات تحديث رقم منطقة وجود المشترك (Location Update)، والتي تجعل سجل VLR على دراية مستمرة بمجموعة الخلايا التي يوجد المشترك ضمن منطقة تغذية إحداها، تندرج كلها -أي الإجراءات- تحت اسم عامٍ هو "متابعة مكان المشترك" "Localization of the MS"، وتقع وظيفياً ضمن مسؤوليات إدارة التجوال (MM).
- مما تشمله هذه المجموعة الوظيفية أيضاً إدارة الخطوات التي تَتْبَعُ تفعيل أو تشغيل الجهاز، والتي سنعرض لها لاحقاً.
- بعد تفعيل أو تشغيل جهاز المشترك، سواء ضمن الشبكة الأم أو ضمن شبكة خارجية، يجب التوثق من هوية المشترك، والتحقق من صلاحية الوحدة المتحركة للاستخدام ضمن الشبكة الحالية. وهذه الإجراءات لا تتعلق باتصال معين، وليست مرتبطةً بتخصيص مواردَ محددة للمشترك، وإنما تندرج ضمن المهام المرتبطة بالخطوات التحضيرية لتزويد المشترك بخدمات الاتصال، بغض النظر عن مكان وجوده، لذا تقع أيضاً ضمن مهام إدارة التجوال.
- سبق أن نوَّهنا إلى وجود آليات خاصة تجعل تبادل هوية المشترك الحقيقية (IMSI) عبر الرابط الراديوي نادراً ومُقتصراً على حالاتٍ استثنائية، وتتيح استخدام هوية بديلة تدل على المشترك على نحوٍ مؤقت. وهذه الآليات تقع أيضاً ضمن المجال الوظيفي لإدارة التجوال.

٣) **"إدارة خدمات الاتصال" "Connection Management (CM)"**: يدل تعبير "خدمات الاتصال" على أصناف الاتصالات التي من الممكن للمشترك أن يكون طرفاً فيها، إذ لا تقتصر خدمات شبكات الاتصالات الحديثة على المكالمات الهاتفية التقليدية، بل تتعداها لتشمل خدماتٍ أخرى، مثل خدمة إرسال واستقبال النصوص القصيرة، و"خدمة البريد الصوتي" "Voice Mail (VM)"، و"اختيار نغمة رنين الهاتف" "Ring back Ton (RBT)"، و"تحويل المكالمات إلى أرقام بديلة" "Call Forwarding"، وخدمات تبادل المعطيات كإرسال نصوصٍ إلى جهاز الفاكس، وغيرها من الأمثلة التي يتعذر حصرها. ومن البدهي أن كلاً من هذه الخدمات يتطلب آلياتِ تحكم مختلفة، كما تتباين هذه الخدمات من حيث تسلسل الخطوات عند إنجازها، ومن ناحية المكونات الفيزيائية التي يجب تبادل معلومات التشوير والتحكم معها. لذا يجري تصنيف المهام الوظيفية ضمن المفهوم العام لإدارة خدمات الاتصال إلى آليات التحكم بالاتصالات التقليدية "Call Control (CC)"، وآليات التحكم بالرسائل النصية القصيرة "SMS Control"، وآليات التحكم بالخدمات الإضافية "Supplementary Services Support".

مما يجدر التنويه إليه في هذا الموضع، ويدل عليه الشكل ٧-١ هو أن البرتوكولات الخاصة بالمستويَيْن الوظيفيين MM

و CM غير معرَّفة على الرابط بين المحطة الثابتة (BTS) ووحدة التحكم (BSC)، أي أن الآليات المرتبطة بهما تُدار من قبل مركز التبديل والوحدة المتحركة فقط. وهذا يعني أن الرسائل الخاصة بهذه البروتوكولات لا تجري قراءتها أو تحليلها ضمن شبكة النفاذ، وأن دور المحطة الثابتة ووحدة التحكم يقتصر على نقل هذه الرسائل فقط، دون أية مشاركة في تفسير مضمونها وفحواها أو إنجاز المهام المتعلقة بها.

يوضح الشكل ٧-١ أيضاً لماذا يقع المستوى الوظيفي RR تحت مُستوَيَيْ MM و CM، ذلك أن أية رسالة متعلقة بإدارة الاتصال أو متابعة مكان المشترك يجب أن تُنقل إلى الوحدة المتحركة على قناة فيزيائية مُتاحة، وهذه القناة يجب تخصيصها من قبل بروتوكولات RR. لذا، يجب أن تتاح بدايةً وسيلة نقل راديوية لنقل هذه الرسائل، وهذا الإتاحة تمثِّل خدمةَ نقلٍ توفرها طبقة RR للطبقات الوظيفية الجزئية التي تعلوها، وذلك وفق المفهوم العام للبنية الطبقية لبروتوكولات الاتصالات.

٧-١-١-٤ بنية رسائل التحكم التي تُتَداوَل على الرابط الراديوي

يتطلب فهم آليات توجيه رسائل التحكم توضيحاً للوسائل التي تتيحها بُنى هذه الرسائل لعنونة أو تحديد المكونات الوظيفية المختلفة ضمن الشبكة، المقصودة أو المعنية بهذه الرسائل، وهذا يُلزمنا التطرقَ لأهم هذه البُنى، والحقول المكونة لها، مع تعمُّد الاقتصار على ما هو أساسي وضروري. لذا نناقش بدايةً البنية العامة لرسائل الطبقة الثالثة، ثم ننتقل بعدها لبعض تفاصيل رسائل الطبقة الثانية.

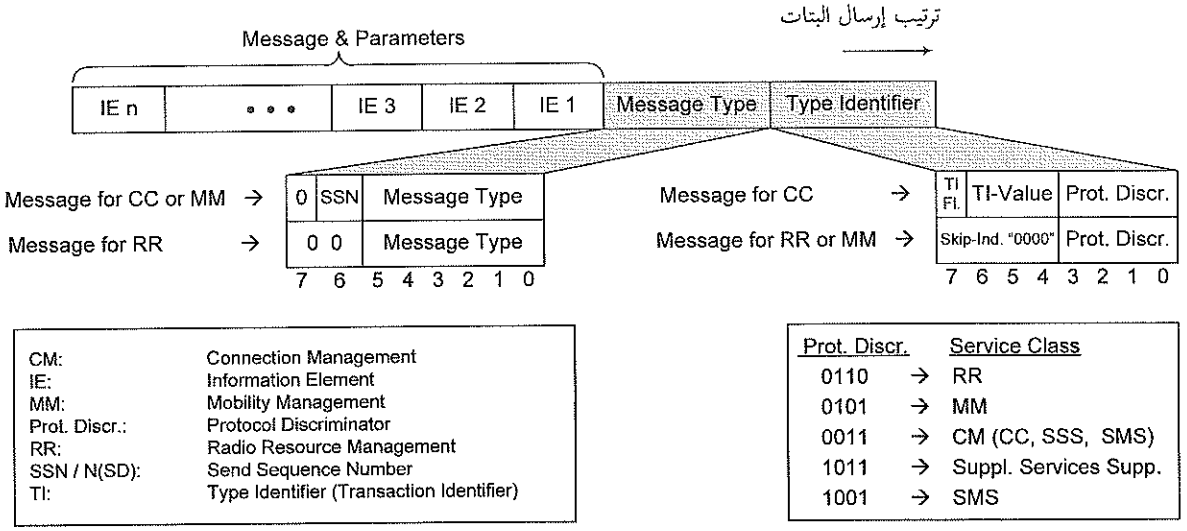
تتشارك رسائل الطبقة الثالثة بالبنية النموذجية التي يوضحها الشكل ٧-٢، وكنا أشرنا في الفصل ٤ إلى أن رسائل التحكم الأساسية تتألف من مجموعةٍ من "وحدات المعلومات" "Information Elements (IE)"، التي تتباين في عددها وطول كلٍّ منها، تبعاً للرسالة وفحواها والموسطات الضرورية للتحكم بإنجاز الإجراءات المتعلقة بها. تشمل كلُّ رسالةٍ أيضاً حقلي عنونة وتحكم، يُشار إليهما بـ "Type Identifier" و "Message Type"، ويشملان عدة حقول جزئية تحمل المعلومات التالية:

١) يُطلق على الحقل الجزئي الأول ضمن الرسالة اسم "Protocol Discriminator"، أي حقل تمييز البروتوكول. ويتألف هذا الحقل من 4 بتات تدل على المجموعة الوظيفية ضمن الطبقة الثالثة التي صدرت عنها الرسالة، وذلك وفق الجدول الذي يتضمنه الشكل ٧-٢. فعلى سبيل المثال، تدل القيمة "0110" على أن الرسالة صادرة عن بروتوكولات التحكم بالموارد الراديوية (RR)، أما القيمة "0101" فتدل على أن الرسالة معنية بإحدى مهام بروتوكولات إدارة التجوال (MM)، وهكذا.

٢) يُعرف الحقل الجزئي الثاني باسم "Type Identifier (TI)" أو "Transaction Identifier"، ويتيح التمييز بين أكثر من اتصالٍ موازٍ قائمٍ بين الوحدة المتحركة والشبكة. لتوضيح ذلك، نفترض أن مشتركاً ما يحاور مشتركاً آخر في موضوع معين، ودعت الحاجة إلى استدعاء طرفٍ ثالث لنقاش الموضوع، أي إلى إنشاء "اتصال متعدد الأطراف" "Call Conference". يتطلب إنشاء هذا الاتصال إرسال رسالة من الوحدة المتحركة إلى مركز التبديل MSC، إخطاراً له بالرغبة بمباشرة اتصال إضافي مع طرف ثالث، وبعد إرسال هذه الرسالة، يجري طلب الرقم لإطلاق إجراءات إنشاء الاتصال. يتلو ذلك بدءُ

المكالمة مع الطرف الجديد، وإبلاغه أنه مدعوٌّ للمشاركة في اتصالٍ أو مكالمةٍ مع طرف ثالث ينتظر، وبعد الموافقة تجري العودةُ إلى المشترك الثاني الذي كان قد وُضع في حالة انتظار، وذلك لضمه مرة أخرى إلى الاتصال. وبعد إتمام هذه الإجراءات التحضيرية، يمكن مباشرةُ الكلام مرة أخرى.

يجب أن تجري كل هذه الخطوات التحضيرية على نحوٍ موازٍ للاتصال الأصلي القائم، وهذا يعني أن معلومات التحكم المتبادلة تكون متعلقة بأكثر من "سياق اتصالٍ" قائم، ونستخدم تعبير سياق في هذا الموضع كي يكون واضحاً أن التحكم في مثل هذه الحالات لا يقتصر على خطوات الاتصال بعينها، بل يشمل كل ما من شأنه التحضير للإتصال، أو تغيير مواصفاته التي تميزه، كما يمكن لأكثر من سياقٍ أن يكون قائماً مع المشترك ذاته.



الشكل ٧-٢: البنية النموذجية لرسائل الطبقة الثالثة على الرابط الراديوي.

تكون رسائل التحكم إذاً متعلقةً بأكثر من سياق، لذا، يُخَصُّ كلٌّ من هذه السياقات برقم TI مختلف، بحيث تكون مكونات الشبكة المختلفة قادرةً على فصل رسائل التحكم تبعاً للسياق المعني بها.

يتألف حقل TI من موسطين، يُسمى الأول "TI-Value"، ويشغل ثلاث خانات، ويمثل رقم السياق أو الإجراء المعني برسالة التحكم. ولا يجري التنسيق بين أكثر من اتصال أو سياقٍ موازٍ إلا من قبل المجموعة الوظيفية CC (مجموعة بروتوكولات التحكم بالاتصال)، لذا لا يكون لحقل TI-Value أي معنى في حالة الرسائل المتعلقة بـ MM أو RR، وإذا كانت الرسالة خاصةً بأحد مهام MM أو RR، أُستعيض عن هذا الحقل بأربعة أصفار، وأُطلق عليه اسمٌ آخر اسم خاص هو "Skip Indicator".

أما الموسط الثاني (TI-Flag)، فيشغل خانة واحدة فقط، تحوي "مؤشراً" "Flag" يدل على الطرف الذي أرسل الرسالة، وتكون قيمته "0" إذا كانت الرسالة مُرسلةً إلى الطرف الذي بادر بإنشاء سياق التحكم، و "1" إذا كانت مُرسلةً من قِبله (انظر للتفاصيل [١] و [٢]).

٣) يدل حقل "Message Type" على الرسالة نفسها، ويحمل مضمونها والغرض منها. وتعرِّف المواصفات المعيارية مجموعة محددة من الرسائل، مصنفة وفق المجموعة الوظيفية التي تنتمي إليها، تتيح تحديد الغرض من كل رسالة دون لبس.

لتوضيح ذلك، يعرض الجدول ٧-١ أمثلة على رسائل إدارة الموارد الراديوية (RR)، وإدارة التجوال (MM)، وإدارة الاتصالات (CC)، على التوالي. فعلى سبيل المثال، إذا كانت الرسالة تتضمن أمراً من الشبكة للوحدة بتفعيل إجراءات التعمية، يكون مضمون الرسالة "Ciphering mode command" ويكون رمزها (أي قيمة حقل Message Type) "00110101"، أما إذا كانت الرسالة تحمل طلباً من الشبكة للوحدة بمباشرة إجراءات التوثق، فيكون مضمون الرسالة "Authentication request"، ورمزها "0x010010" (انظر [٢] لتفاصيل قيمة الخانة x).

مضمون الرسالة	جهة الإرسال	رمز الرسالة
أمثلة عن رسائل التحكم بالموارد الراديوية (Radio Resource Management)		
Immediate assignment	N → MS	00111111
Ciphering mode command	N → MS	00110101
Assignment command	N → MS	00101110
Handover command	N → MS	00101011
Channel request	MS → N	variable
Paging request, type 1/2/3	N → MS	00100xxx
System information, type 1/2/3/4	N → MS	00011xxx
Measurement report	MS → N	00010101
أمثلة عن رسائل التحكم بإدارة التجوال (Mobility Management)		
IMSI detach indication	MS → N	0x000001
Location updating request	MS → N	0x001000
Authentication request	N → MS	0x010010
Identity request	N → MS	0x001000
Identity response	MS → N	0x001001
TMSI reallocation command	N → MS	0x001010
CM service request	MS → N	0x100100
أمثلة عن رسائل التحكم بأطوار الاتصال (Call Control)		
Alerting	N → MS	0x000001
Connect	N ↔ MS	0x000111
Setup	N ↔ MS	0x000101
Modify complete	N ↔ MS	0x011111
Modify reject	N ↔ MS	0x010011
Disconnect	N ↔ MS	0x100101
Release	N ↔ MS	0x101101
Congestion control	N ↔ MS	0x111001

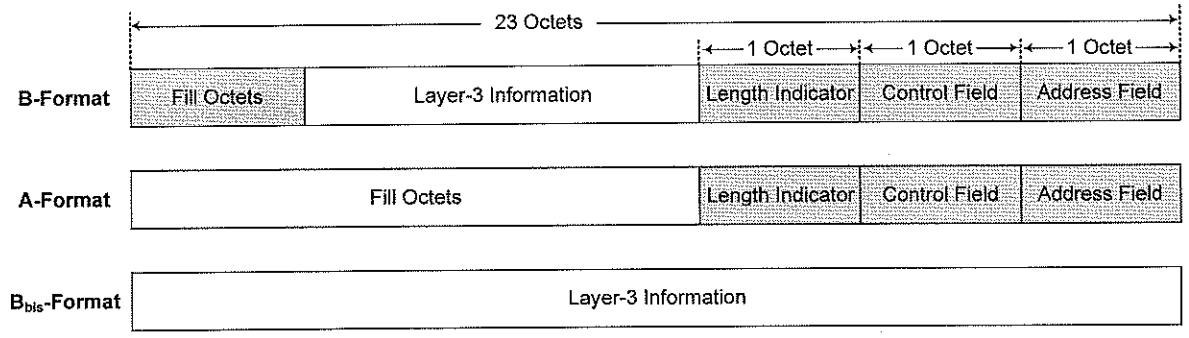
الجدول ٧-١: أمثلة عن رسائل رسائل التحكم من الطبقة الثالثة، والمتبادلة عبر الرابط الراديوي.

٤) تحمل بعض الرسائل، إضافةً إلى مضمونها الأساسي الموضَّح في الجدول ٧-١، معلوماتٍ ضرورية أخرى، تعتبر جزءاً من فحواها، وتندرج ضمن وحدة المعلومات (IE). فعلى سبيل المثال، يتطلب إنجاز بعض أوامر التحكم معرفة هوية المشترك (IMSI) أو هويته المؤقتة (TMSI)، أو رقم هاتفه (MSISDN)، أو رقم منطقة الوجود (LAI)، أو غير ذلك. وهذه المعلومات أساسية لاكتمال المعنى المقصود من الرسالة، ولتحديد الطرف المعني بها، لذا تكون متضمنة في حقل "Message & Parameters"، الذي يختلف طوله وفقاً لنوع الرسالة. وهناك تفاصيل كثيرة متعلقة بذلك، نتجاوز عن ذكرها في هذا الموضع، ويمكن الرجوع إليها في [١] و [٢].

ننتقل الآن إلى رسائل الطبقة الثانية، أي رسائل بروتوكول LAPDm. وكنا أشرنا إلى أن كل رسالة صادرة عن هذه الطبقة، أو مُصاغةً وفق بروتوكول LAPDm تُسمى "إطاراً" "Frame".

تختلف بنية الإطار الحامل للرسالة تبعاً لفحوى الرسالة ومضمونها، وللمجموعة الوظيفية ضمن الطبقة الثالثة التي أصدرتها، كما تختلف هذه البنية تبعاً للهدف من الإطار المتبادل، ولنمط النقل المستخدم لإرسال الرسالة (مع إقرار أو بدون إقرار)، وأهم البُنى التي تُعرِّفها المواصفات المعيارية ثلاثةٌ يبينها الشكل ٧-٣ وهي:

١) بنيةُ "B-Format": تُعتبر هذه البنية الأكثر استخداماً لنقل رسائل الطبقة الثالثة وحملها على القنوات الاعتبارية المُخصصة (SDCCH, FACCH, SACCH). ونقرأ من الشكل ٧-٣ أن بروتوكول LAPDm يضيف إلى الرسائل التي ترد من الطبقة الثالثة "حقلَ عنونةٍ" "Address Field"، و"حقلَ تحكُّمٍ" "Control Field"، وحقلاً ثالثاً يدل على طول الرسالة "Length Indicator"، وذلك بطول بايتٍ واحدٍ "Byte/Octet" لكلٍّ من هذه الحقول. كما يُلحِقُ البروتوكول بالرسالة حقلَ حشوٍ "Fill Octets" لضمان موافقة طول الإطار الإجمالي لما تفرضه المواصفات المعيارية، وهو 23 بايتاً (سنعرض لتفاصيل هذه البنية لاحقاً).



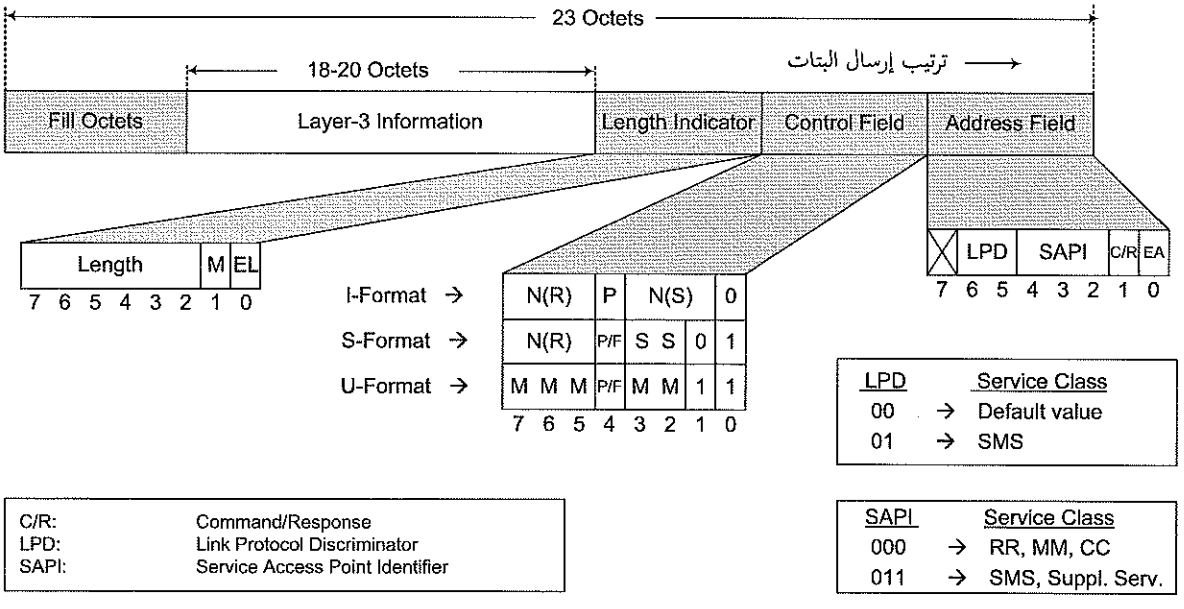
الشكل ٧-٣: أهم بُنى الأطر المتبادلة وفق بروتوكول LAPDm.

٢) بنيةُ "A-Format": تُستخدم هذه البنية عندما لا يشمل مضمون الإطار أية رسالة من الطبقة الثالثة، أي عندما يكون مقتصراً على معلومات إشعارٍ أو إبلاغٍ باستلام أوامرَ، أو تنفيذها. ويملأ حقل المعلومات في هذه الحالة بمتتالية بتات وهمية أو بتات حشو.

٣) بنيةُ "B_{bis}-Format": تتميز هذه البنية بعدم تضمنها أية حقول تحكم أوعنونة، وتُستخدم عند إرسال معلومات تشويرٍ من الطبقة الثالثة إلى مشتركي الشبكة، دون الحاجة إلى إرسال أي إشعارٍ باستلامها. وتختلف هذه البنية عن بنية A-Format في أن الرسائل التي ترسل باستخدام بنية A-Format تكون مخصصة لمشترك واحد، ومحمولة على القنوات الاعتبارية المخصصة له، بينما تُستخدم بنية B_{bis}-Format للرسائل المُرسلة من الشبكة إلى مشتركين عديدين، أي في جهة المسار الهابط حصراً، مثل تلك التي تُحمل على قنوات BCCH و PCH.

نظراً لأهميتها المميزة، نناقش في ما يلي –على نحوٍ مُجملٍ– البنية التفصيلية للأطر الأكثر استخداماً (بنية B-Format)، والتي يعرضها الشكل ٧-٤. وتشمل هذه البنية حقولاً جزئية وخاناتِ تحكمٍ عديدة، نكتفي بشرح أهمها ونُحيل القارئ المهتم بكامل التفاصيل المتعلقة بها إلى [١] و [٢].

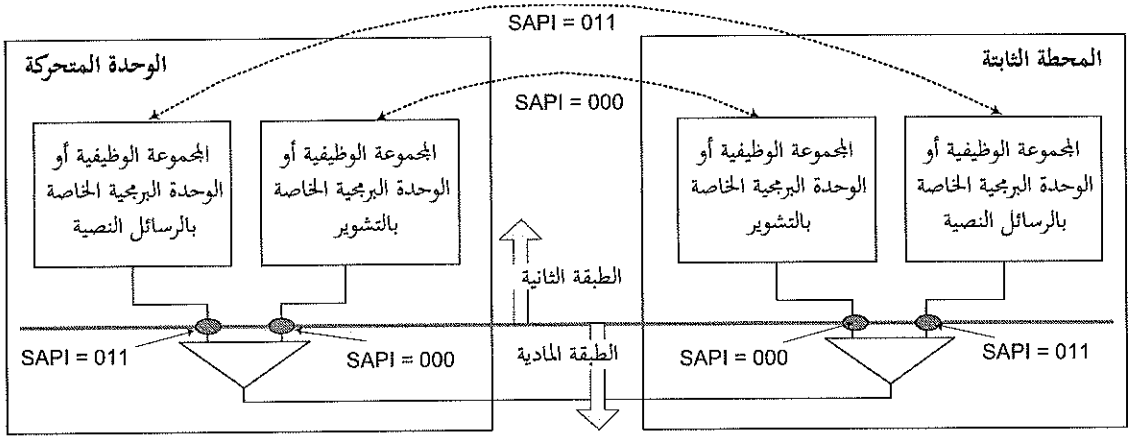
١) يدل البت المشار إليه بـ "C/R" في حقل العنونة على ماهية الرسالة التي يحملها الإطار، أي على كونها أمراً "Command" أو جواباً "Response"، وعلى الجهة التي أصدرت الأمر. فإذا كانت الرسالة تحمل أمراً من الشبكة للوحدة المتحركة، تكون قيمة هذا البت في جهة الوحدة المتحركة "1"، وتجيب الوحدة المتحركة في هذه الحالة بإطارٍ قيمة خانة C/R ضمنه هي "1". أما إذا كان الإطار يمثل أو يحمل رسالة طلبٍ من الوحدة المتحركة إلى المحطة الثابتة، فإن قيمة هذا البت تكون "0"، ويكون جواب المحطة بـ "0" أيضاً. بتعبيرٍ آخر، تكون قيمة هذا البت "1" إذا كانت الرسالة أمراً من طرف المحطة الثابتة، أو جواباً من طرف الوحدة المتحركة، و"0" إذا كانت الرسالة أمراً من طرف الوحدة المتحركة أو جواباً من طرف المحطة الثابتة.



الشكل ٧-٤: البنية النموذجية لإطار B-Frame، الذي يمثل رسائل الطبقة الثانية على الرابط الراديوي.

٢) قد لا تكون المعلومات التي تُمَرَّر من الطبقة الثالثة تمثل رسائل تحكم، رغم أنها تُنقل على واحدةٍ من القنوات الاعتبارية المخصصة لمهام تنسيق الاتصالات. ولعلَّ أبرزَ مثالٍ على ذلك هو الرسائل النصية القصيرة (Short Messages)، التي لا تُحمل على قنوات نقل المعلومات (TCH)، وإنما على قنوات التحكم المخصصة (DCCH)، وتحديداً قناة (SDCCH)، عندما تكون هذه القناة شاغرةً. لذا يجب تمييز مضمون وأغراض الرسالة، وهذا ما تتيحه الخانات الثلاثة التي تمثل الحقل الجزئي SAPI، حيث تكون قيمة هذه الخانات "000" في حالة رسائل التحكم والتشوير، أو "011" إذا كانت المعلومات التي يحملها الإطار تمثل رسالةً نصيةً قصيرة، أو معلومات أخرى خاصة بخدمات إضافية (Supplementary Services)، ويمثّل هذا آليةً فعالةً لتحديد مصدر ووجهة الوحدة أو المجموعة الوظيفية المعنية بالرسالة.

نشير في هذا السياق إلى أن الحروف SAPI تمثل اختصاراً لتعبير "Service Access Point Identifier (SAPI)"، الذي يدل على "رقم نقطة النفاذ إلى المجموعة الوظيفية"، ويتيح التمييز بين عدة مجموعات وظيفية يتيحها بروتوكول معين، كما يدل تعبير " نقطة النفاذ" على نقطة الربط بين طبقتين بروتوكوليتين، أي على النقطة التي يجري فيها تسليم رسالة من طبقة بروتوكولية إلى طبقة أخرى، أو من مستوي وظيفي إلى مستوي وظيفي آخر. لتوضيح ذلك، يبين الشكل ٧-٥ ترقيم الوحدات الوظيفية المحتملة باستخدام قيمتين لـ SAPI، على النحو الذي شرحناه.



الشكل ٧-٥: تعريف أرقام النفاذ إلى الوحدات الوظيفية (SAPI) ضمن الطبقة الثانية على الرابط الراديوي.

٣) تحوي الخانتان 5 و 6 من حقل العنونة (في الشكل ٧-٤) على مؤشرٍ يدل على أن الرسالة تخص خدمة الرسالة القصيرة دون غيرها من الخدمات الإضافية، لذا يُسمى هذا الحقل الجزئي "Link Protocol Discriminator (LPD)".

٤) يدل حقل التحكم (Control Field) على نمط الخدمة التي يقدمها إطار LAPDm الحالي (أي مع الإقرار أو بدون إقرار)، وتتيح الخانات المختلفة آلياتٍ خاصة لمتابعة إجراءات تبادل المعلومات، تبعاً لنمط تبادلها. ويمكن الرجوع إلى تفاصيل هذه الآليات وقيم الخانات في [٢]، حيث نكتفي في هذا الموضع بالإشارة إلى أن بنية هذا الحقل تحدد تسمية الإطار، وتميِّز صنف الرسالة، وذلك على النحو الآتي (انظر الشكل ٧-٤):

٤-١) تُستخدم البنية الأولى المُسماة "I-Format" عندما يُرفِق الطرفُ المرسل رسالةَ الطبقة الثالثة بطلب إقرار، أو عندما يرسل الطرف المستقبل إقراراً بالاستلام، أي أن هذه البنية تستخدم عند تبادل الرسائل مع الإقرار (Acknowledged Mode). وتعتمد آلية التحقق من وصول الرسائل المتبادلة وفق هذا النمط على حقلي N(S) وN(R)، حيث يحمل حقل N(S) رقم الإطار المُرسل، بينما يدل الحقل N(R)، والذي يُرفِقُه طرف الاستقبال، على رقم الإطار الذي تمَّ استلامه بنجاح.

٤-٢) تُستخدم البنية الثانية المعروفة باسم "S-Format" في حالة كون الإطار يحمل إشعاراً باستلام رسالةٍ أو بتنفيذ أمرٍ، أي لتبادل الأوامر مع الإقرار أيضاً (Acknowledged Mode)، غير أن الإطار لا يكون حاملاً لرسالة من الطبقة الثالثة، ويقتصر مضمونه على معلومات الإشعار فقط. ولما كان الأمر كذلك، لا تكون هناك حاجة لأن يرفق طرف الإرسال رقم N(S)، إذ يُستعاض عنه بحقل SS الذي يدل على مضمون أو نوع الرسالة[1]. ومن أهم الرسائل التي يحملها الإطار ذو بنيةِ S-Format ما يلي:

- "Receive Ready (RR)": تمثل هذه الرسالة إقراراً باستلام إطارِ I-Frame، كما تدل على أن طرف الاستقبال جاهز لاستقبال أطرٍ أخرى من هذا النمط (أي I-Frame).
- "Receive Not Ready (RNR)": تمثل هذه الرسالة إقراراً باستلام إطارِ I-Frame، ولكن مع عدم الجاهزية لاستقبال أطرٍ لاحقة.
- "Reject (REJ)": يُعلِم طرفُ الاستقبال طرفَ الإرسال بهذه الرسالة أن إطار I- Frame الذي جرى استقباله قد رُفض، وهذا يعني ضمنياً طلباً بإعادة إرسال الإطار.

٤-٣) تستخدم البنية الثالثة "U-Format" لتبادل رسائل الطبقة الثالثة دون إقرار (Unacknowledged Mode). لذا لا تتضمن هذه البنية أياً من الحقلين N(S) و N(R)، وإنما حقلاً بديلاً (MMM في الشكل ٤-٧) يدل على مضمون الرسالة. وأهم الرسائل التي يحملها هذا النمط هي:

- "Set Asynchronous Balanced Mode (SABM)": تستخدم هذه الرسالة لبدء تبادل الرسائل بين طرفي الإرسال والاستقبال، ولإعلام طرف الاستقبال بأن نمط تبادل المعلومات هو النمط المتكافئ، أي أن كلاً من طرفي الاتصال يمكن أن يباشر إرسال أية معلومات عندما يشاء، وأن كليهما مخولٌ أيضاً بإنهاء الاتصال، وأن الطرف المستقبل لأية رسالة هو المعني بتقييم ومعالجة أخطاء النقل.
- "Unnumbered Acknowledged (UA)": تحمل هذه الرسالة إشعاراً باستلام الإطار الذي يحمل رسالة SABM، وتتميز بأنها لا تحمل رقماً تسلسلياً لأن الهدف منها هو إخطار طرف الإرسال بالجاهزية لمتابعة تبادل الرسائل.

---

[1] تستخدم مراجع عديدة تعبير "Message Type/FrameType" للدلالة على كلٍّ من نوع الإطار، وصنف الرسالة، لذا يجب تحري المعنى المقصود من سياق النص.

- "Unnumbered Information (UI)": يدل مضمون الإطار في هذه الحالة على أن الرسالة تتضمن معلومات لا تحتاج إلى أي إقرارٍ أو إشعارٍ بالاستلام.
- "Disconnect (DISC)": يُستخدم هذا الإطار لإنهاء تبادل الرسائل بين طرفي الاتصال، ويمثّل هذا الإطار مع رسالة SABM زوجاً متلازماً من الرسائل، أي أن كل اتصالٍ أو تبادلٍ للمعلومات بنمط الإقرار يجب أن يبتدئ برسالة SABM وأن يُختتم برسالة DISC.

توضيحاً لاستخدام البنى المختلفة للأطر، يعرض الشكل ٧-٦ مثالاً على تسلسل تبادل هذه الأطر في حالة تبادل رسائل التحكم مع الإقرار (الجزء (أ)) أو بدونه (الجزء (ب)).

٥) يُحَدَّد الطولُ الأقصى لإطار LAPDm بـ 23 بايتاً، وهذا يعني أن الرسالة من الطبقة الثالثة يجب أن لا تتجاوز 20 بايتاً، إذا كانت مُصاغة وفق بنية B-Format (انظر الشكل ٧-٤). فإذا تجاوز طول الرسالة هذا الحد، تجري تجزئة الرسالة إلى مقتطعات (Segments) متتابعة، ويُستخدم حقل "Length Indicator" لإعلام طرف الاستقبال بالطول الكلي أو الإجمالي للرسالة، كما تدل خانة M في هذا الحقل على وجوب انتظار أُطرٍ أخرى تحمل أجزاء الرسالة المتبقية. من جانبٍ آخر، إذا كان طول رسالة الطبقة الثالثة أقل من 20 بايتاً، يستخدم حقل خاص "Fill Octets" لإتمامها ببتاتٍ حشو.

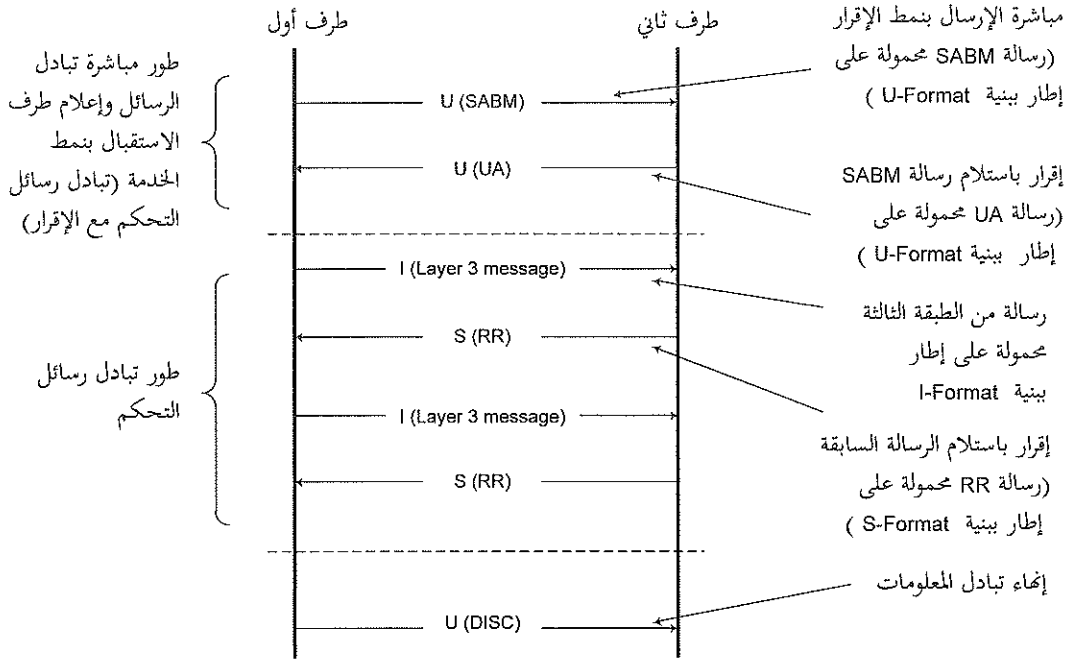
٦) ليست كل حقول التحكم التي يضيفها بروتوكول LAPDm إلى رسالة الطبقة الثالثة مُلزمة، حتى ضمن بنية B-Format، إذ يتباين عدد هذه الحقول تبعاً لصنف الرسالة والقناة الاعتبارية التي ستحملها، ومن الأمثلة على ذلك ما يلي:

٦-١) يضاف للأطر التي تُحمل على قناتي BCCH والقنوات العامة CCCH فقط حقل (Length Indicator) بطول بايت واحد، وهذا يعني أن طول رسالة الطبقة الثالثة يمكن أن يصل إلى 22 بايتاً في هذه الحالة.

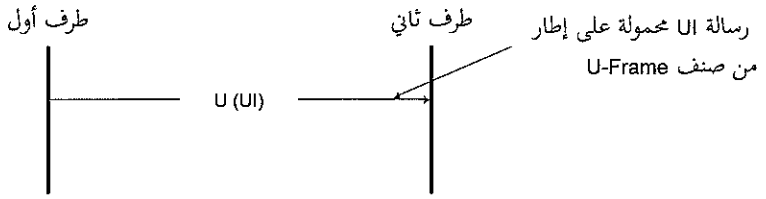
٦-٢) في حالة الأطر التي تُستخدم لنقل المعلومات على قنوات (SDCCH, SACCH, FACCH) تضاف حقول التحكم الثلاثة. لذا يمكن للرسائل التي تحمل على قناة FACCH أو قناة SDCCH أن تكون بطول 20 بايتاً، أما في حالة المعلومات على قناة SACCH فإن طول رسالة الطبقة الثالثة لا يتجاوز أصلاً 18 بايتاً، لذا يُستثمر البايتان المتبقيان في هذه الحالة لإرسال المعلومات المتعلقة بالتحكم بطاقة البث، وبتقديم توقيت الإرسال، ويُضاف هذان البايتان في سياق خطوات معالجة الإشارة ضمن الطبقة الأولى.

ننوه أخيراً إلى خطوات ترميز القناة التي تخضع لها رسائل التحكم قبل إرسالها عبر الرابط الراديوي. فبعد صياغة رسائل الطبقة الثانية وفق الإطار الذي شرحنا بنيته، تخضع الرسالة بدايةً لترميز مجموعاتٍ (CRC-Coding) وفق المعادلة (٥-٤١)، ما يؤدي إلى إضافة 40 بتاً إلى الرسالة. بعد ذلك، تضاف 4 بتات كحاشية. ولما كان طول الرسالة هو 23 بايتاً، أي 184 بتاً، فإن الخطوات التي ذكرناها تقود إلى 228 بتاً.

في خطوة تالية، تخضع الرسالة الإجمالية إلى ترميز طي (Convolutional Coding) بمعدل $R_c = 1/2$، ما يقود إلى مضاعفة عدد البتات، فنحصل بذلك على 456 بتاً. ولما كانت الرزمة الراديوية الواحدة (Burst) قادرةً على نقل 114 بتاً فقط، تحتاج كل رسالة إلى أربعة رزم راديوية متتالية لنقلها، وهذا ما كنا دللنا عليه في الفصل ٤ بتعبير "رزمة رباعية".



(أ)



(ب)

الشكل ٧-٦: تسلسل تبادل الأطر وفق بروتوكول LAPDm في حالتي تبادل رسائل التحكم مع الإقرار أو بدونه.

٧-١-٢ الرابط بين المحطة الثابتة ووحدة التحكم

يتولى هذا الرابط نقل المعلومات بين المحطة الثابتة BTS ووحدة التحكم BSC، ويشمل الطبقات البروتوكولية التالية:

٧-١-٢-١ "الطبقة المادية" "Physical Layer"

يعتمد هذا الرابط من ناحية الطبقة المادية (أي الطبقة الأولى على هذا الرابط) على إطار E1 المعياري، وذلك لنقل معلومات

ومعطيات المشتركين، إضافة إلى معلومات تحكم أخرى. ونوه إلى أن كثيرين من مصنعي ومنتجي التجهيزات يتجهون إلى اعتماد تقنيات النقل التي تدعم مجموعات بروتوكولات TCP/IP، كبديلٍ عن إطار E1 التقليدي، كما تعتمد الاصدارات الحديثة هذا التوجه.

٧-١-٢-٢ "طبقة حماية المعلومات" "Data Link Layer"

يَحْكُمُ آلياتِ معالجةِ المعلومات ضمن هذه الطبقة (الطبقة الثانية) بروتوكول LAPD، وقد ذكرنا أن هذا البروتوكول هو الذي تطور عنه بروتوكول LAPDm، لذا فهو يقدم خدمات نقلٍ مشابهة لتلك التي عرضناها عند نقاش الرابط الراديوي، والتي تُصنَّف على نحوٍ أساسيٍ إلى خدمة نقلٍ مع الاقرار أو بدونه، وسوف نعرض لتفاصيل بنية رسائل LAPD لاحقاً.

٧-١-٢-٣ طبقة التحكم بالموارد الراديوية ووحدات الإرسال والاستقبال

ذكرنا في الفصل ٦ أن وحدة التحكم BSC هي التي تُعنى بتنسيق شَغل الموارد الراديوية، يتضح ذلك من وجود المجموعة الوظيفية RR ضمن طبقة التحكم على هذا الرابط (أي ضمن الطبقة الثالثة، انظر الشكل ٧-١)، حيث تتولى هذه المجموعة تبادل الرسائل مع الوحدة المتحركة مباشرة. إضافةً إلى ذلك، تتولى وحدة BSC الإشراف على توجيه الاتصالات الواردة من أو الصادرة عن المحطات الثابتة المرتبطة بها، لذا، يوجد بروتوكولِ تحكمٍ وإدارةٍ خاص، ينظُمُ آلياتِ التحكم وتبادل المعلومات بين وحدة التحكم والمحطة الثابتة، وهذا البرتوكول يعرف باسم "Base Transceiver Station Management (BTSM)".

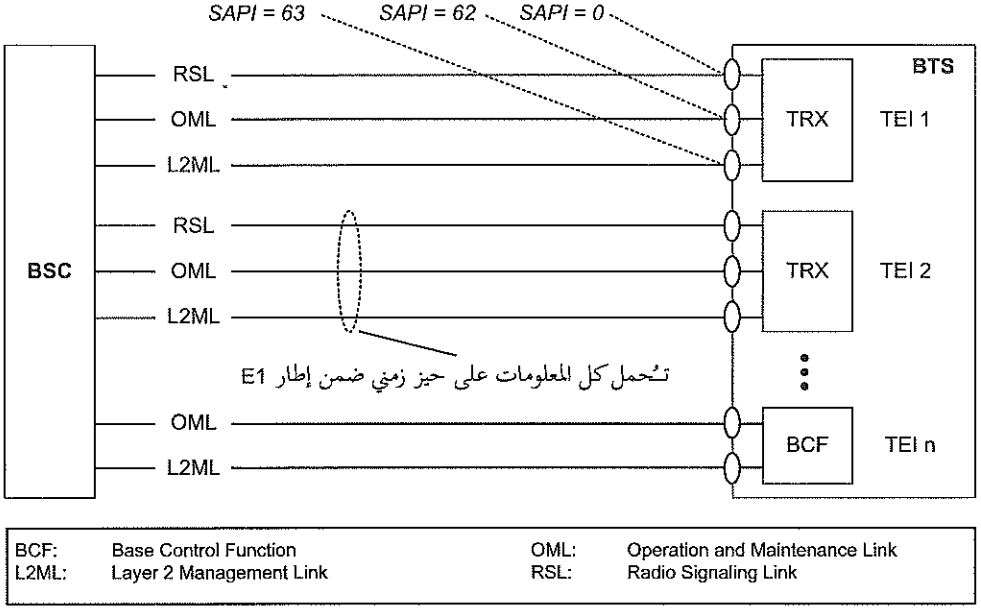
يوضح الشكل ٧-١ أن بروتوكول BTSM هو الوحيد -ضمن الطبقة الثالثة- الذي يُستخدم لتخاطب وحدة التحكم مع المحطة الثابتة، أي أن كل الرسائل التي تحملها أطر LAPD تصدر عن هذا البروتوكول، لذا يجري توزيع وظائفه وفقاً لبنيةٍ نموذجية للمحطة الثابتة يبينها الشكل ٧-٧. تدل هذه البنية على أن المحطة الثابتة تتألف من وحدات إرسال واستقبال (TRX) إضافة إلى "وحدة تحكم مشتركة" "Base Control Function (BCF)"، ما يعني أن وظائف التحكم تتمحور حول هذه الوحدات. من جانبٍ آخر، لا تقتصر وظائف التحكم على إدارة تبادل المعلومات بين وحدة TRX والوحدة المتحركة، أو بين وحدة TRX ووحدة التحكم BSC، بل تشمل أيضاً التحكم بوحدة الإرسال والاستقبال من منظور تشغيل وصيانة الشبكة، أي كوحدة فيزيائية عرضة للأعطال وذات عبءٍ محدود يجب مراقبته.

لتحقيق أو إنجاز كل أغراض التحكم، يعتمد بروتوكول BTSM على التمييز بين سياقاتِ تحكم مختلفة، تتشارك حيزاً زمنياً ضمن إطار E1 كقناةٍ فيزيائيةٍ حاملة أو ناقلة لها، وتختلف من حيث مضامينها وأغراضها، وذلك وفق ما يلي:

١) تعتبر كل وحدةِ TRX -من منظور BSC- "وحدةً طرفيةً" "Terminal Equipment (TE)" مستقلة عن غيرها ويمكن خصها بمعلوماتِ تحكمٍ خاصة. يُميز كلُّ وحدةٍ رقم خاص هو "Terminal Equipment Identity (TEI)"، يمكن استخدامه في حقول العنونة التي يتيحها بروتوكول LAPD الحامل لرسائل التحكم (سيرد تفصيل ذلك لاحقاً).

٢) بغية التمييز بين مضامين التحكم المختلفة، والمتعلقة بنفس وحدة الإرسال والاستقبال، جرى اعتماد ثلاثة سياقاتٍ أساسية مختلفة لكل وحدةٍ وهي:

٢-١) سياق التحكم الخاص بإدارة الاتصالات على الرابط الراديوي: يُعنى هذا السياق برسائل التحكم المتعلقة بتبادل المعلومات بين مكونات الشبكة، ويُعرف باسم "Radio Signaling Link (RSL)"، كما يتميز برقمٍ خاص هو SAPI=0.



الشكل ٧-٧: البنية النموذجية للمحطة الثابتة وفق بروتوكول BTSM.

٢-٢) سياق التحكم الخاص بتشغيل وصيانة الشبكة: تكون منظومات الصيانة والتشغيل متوفرة عادةً في موقع وحدة التحكم، حيث يمكن اكتساب نظرة شمولية على أداء كل المحطات الواقعة ضمن منطقة إدارة هذه الوحدة، لذا يجب جمع المعلومات المتعلقة بأداء وأعطال كل المحطات في موقع وحدة التحكم، كما يجب إرسال الأوامر إلى وحدات TRX المختلفة من قِبَل وحدة التحكم أيضاً. تمثِّلُ مجموعةُ رسائلِ التحكم هذه مساقَ تحكمٍ خاص يعرف باسم "Operation and Maintenance Link (OML)"، ويميزه الرقم SAPI=62.

٢-٣) سياق التحكم الخاص بإدارة تبادل المعلومات ضمن الطبقة الثانية: تتطلب خدمات النقل الموثوق للمعلومات وفق بروتوكول LAPD آليات خاصة لصياغة حقول التحكم ضمن الأطر التي تحمل رسائل التحكم، حيث يجب على كل من طرفي الاتصال –وحدة TRX ووحدة التحكم– التدقيق في أرقام الأطر للتأكد من تسلسلها الصحيح، وكذلك حساب متتاليات التدقيق وتحليلها بغية معالجة أخطاء النقل المحتملة، وغير ذلك من الخطوات التي يجري التحكم بها عبر سياق خاص يعرف باسم "Layer 2 Management Link (L2ML)".

يتيح تعريف وصلات التحكم المختلفة استخدام القناة الفيزيائية ذاتها لتبادل كل أصناف رسائل التحكم، حيث يمكن لطرف الاستقبال دائماً التعرف على أنه المعني بالرسالة من خلال رقم TEI، وعلى مضمون أوسياق الرسالة من خلال SAPI.

تتوزع مهام بروتوكول BTSM على نواحٍ وظيفية متعددة (انظر [١٠])، يعنينا منها بوجه خاص تلك المتعلقة بإدارة الموارد الفيزيائية المتاحة ضمن الشبكة الراديوية والتي تتمثل بالقنوات التي تتيحها وحدات الإرسال والاستقبال في كل محطة. تعرف هذه المجموعة الوظيفية باسم "Traffic Management"، وتُرسَل الرسائل المتعلقة بها ضمن سياق التحكم الخاص بإدارة الاتصالات (RSL)، وهذه الرسائل يمكن تصنيفها ضمن أربعة مجموعات:

١) "Radio Link Layer Management (RLM)": تشمل هذه المجموعة رسائل التحكم بإنشاءِ وتعديلِ وتبديلِ وإنهاء سياقات التحكم من الطبقة الثانية على الرابط الراديوي. وتتميز هذه الرسائل بأنها تُمَرَّر من قبل المحطة الثابتة على نحوٍ "خفي" "Transparent"، أي أن هذه الرسائل يجري تبادلها بين وحدة التحكم والوحدة المتحركة ولا تكون المحطة معنية بقراءتها وتحليلها.

٢) "Dedicated Channels Management": تضم المجموعة الثانية الرسائل المتعلقة بالآليات المرتبطة بقنوات التحكم المخصصة (DCCH)، أي التي تعنى باتصال مشترك واحد، مثل التعمية على سبيل المثال، وتبادل نتائج القياسات الدورية لجودة القناة، والتحكم بالطاقة، والتسليم من خلية إلى أخرى، وغيرها.

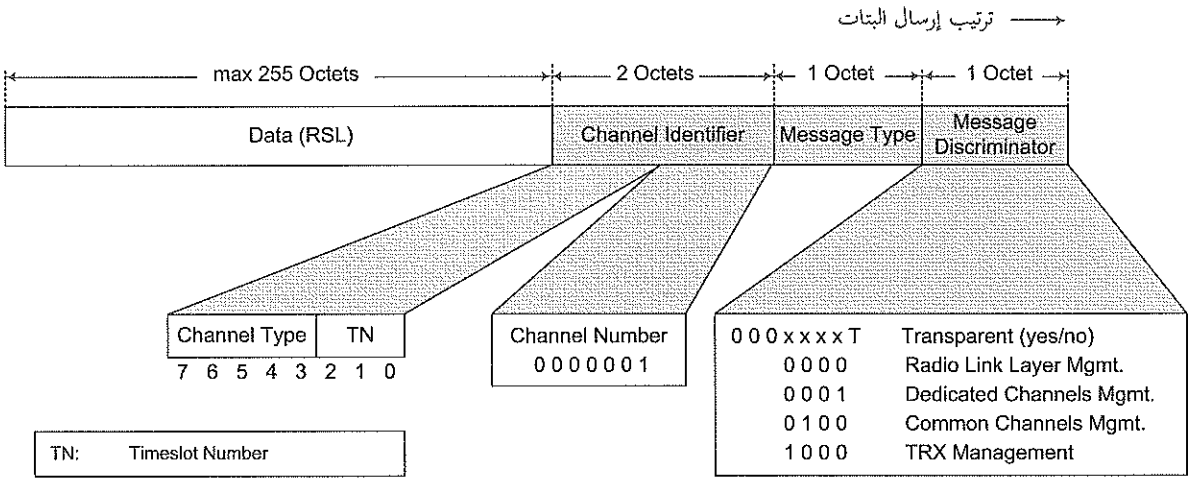
٣) "Common Channels Management": تُعنى مجموعة الرسائل الثالثة بمهام التحكم التي تشمل مشتركين عديدين، وتُنقل على قنوات التحكم العامة (CCCH)، مثل طلب النفاذ إلى الشبكة على قناة RACH، ورسائل النداء PCH، وصياغة المعلومات التي تُبث على قناة BCCH.

٤) "TRX Management": تتمحور رسائل المجموعة الرابعة حول التحكم بوحدات الإرسال والاستقبال الشاغرة، ويدل على ذلك الاسم الدال عليها. هذا ونذكّر بأن البنية النموذجية للمحطة الثابتة (الشكل ٧-٧)، وآليات العنونة ضمن رسائل LAPD، تتيح توجيه الرسائل لكل TRX على حدة.

٧-١-٢-٤ بنية رسائل التحكم على الرابط A_{bis}

بنية رسائل الطبقة الثالثة

تتشابه رسائل الطبقة الثالثة (طبقة BTSM) في بنيتها الأساسية، غير أنها تتباين من ناحية حقول التحكم تبعاً للمجموعة الوظيفية التي تنتمي إليها، وفي ذلك تفصيلٌ يمكن الرجوع إليه في [٢] و [١٢]. وكمثالٍ على هذه البنية يعرض الشكل ٧-٨ لأهم معالم الرسائل الخاصة بمجموعة TRX Management، والتي يجري تداولها باستخدام سياق التحكم الخاص بإدارة الاتصالات (RSL). تتميز هذه البنية بالحقول التالية:



الشكل ٧-٨: البنية النموذجية لرسائل BTSM الخاصة بالمجموعة الوظيفية .Traffic Mgmt، والمتداولة ضمن سياق RSL.

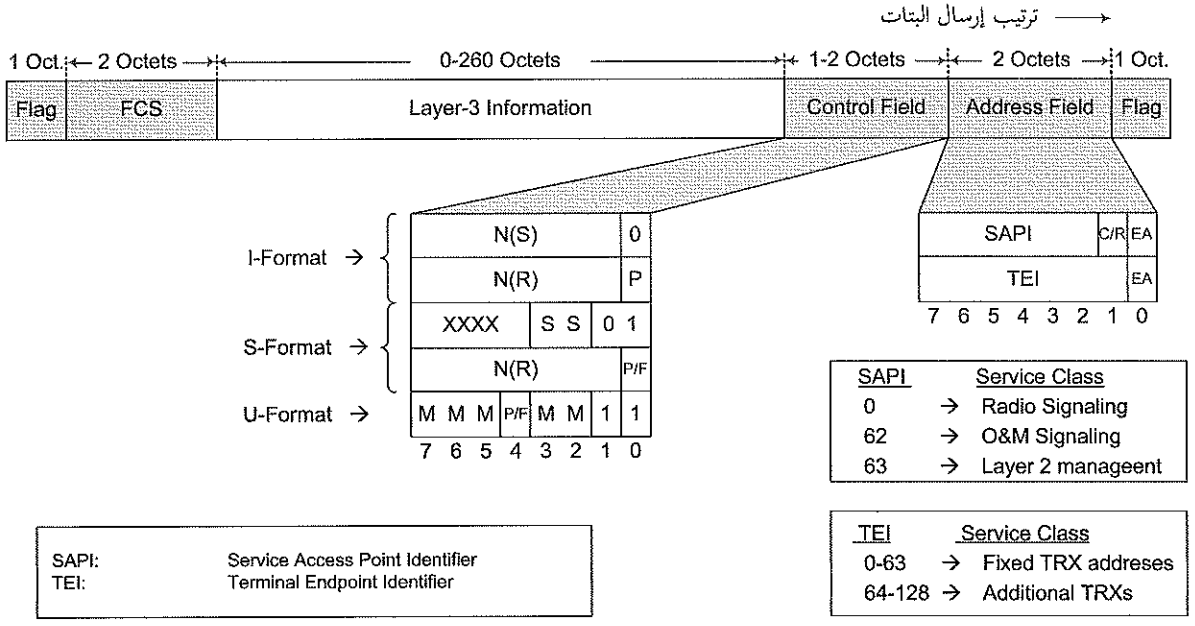
- "Message Discriminator": يدل هذا الحقل على المجموعة الوظيفية من المجموعات الأربعة التي أشرنا إليها في الفقرات السابقة)، والتي تنتمي إليها الرسالة. إضافة إلى ذلك يحوي هذا الحقل مؤشراً يعرف باسم "Transparency Flag" (T في الشكل) يبين كيفية معالجة الرسالة ضمن المحطة الثابتة، فإذا كانت قيمة هذا المؤشر "1" تكون الرسالة خفية من منظور المحطة الثابتة، وتقوم فقط بتمريرها بين طرفي الاتصال (الوحدة المتحركة ووحدة التحكم).
- "Message Type": يحوي هذا الحقل مضمون الرسالة الفعلي أو الإجراء المطلوب، ويمكن الرجوع إلى [١٢] لسردٍ كاملٍ وتفصيلي للرسائل المحتملة.
- "Channel Identifier": يدل هذا الحقل على رقم الحيز الزمني المعني بالرسالة وعلى نمط شغل هذا الحيز (انظر الفصل ٤)، كما تستعين المحطة الثابتة بقيمة هذا الحقل لمعرفة قناة التحكم التي يجب إرسال الرسالة ضمنها على الرابط الراديوي، والتي من الممكن أن تكون SACCH أو SDCCH أو غيرها. هذا ولا يشتمل هذا الحقل أية معلومات عن التردد، حيث تكون المعلومات المتعلقة بالتردد متضمن في حقل TEI ضمن حقول التحكم الخاصة بالطبقة الثانية، أي ضمن حقل التحكم في إطار LAPD.

بنية رسائل الطبقة الثانية

عرضنا –عند نقاش الرابط الراديوي– لبنية رسائل بروتوكول LAPDm على نحوٍ تفصيلي (انظر الشكل ٧-٤)، وهذه البنية تشابه على نحو كبير بنية الأطر التي يتداولها بروتوكول LAPD، لذا نشير فقط إلى بعض النقاط المميِّزة بين البنيتين (انظر الشكل ٧-٩):

- يحوي إطار LAPD على حقلين طرفيين يدلان على بداية ونهاية الإطار.

- يحوي حقل العنونة على رقم TEI الذي يدل على وحدة الارسال والاستقبال المعنية بالرسالة، وكما ذكرنا سابقاً، يتيح حقل SAPI أيضاً التمييز بين سياقات الاتصال المختلفة.
- يشمل الإطار حقلَ كشفٍ للأخطاء يحوي متتالية تدقيق FCS، تضاف ضمن إجراءات توفير النقل الموثوق للمعلومات ضمن الآليات التي تنجزها بروتوكولات الطبقة الثانية.



الشكل ٧-٩: البنية النموذجية لأطر رسائل الطبقة الثانية على الرابط A_{bis}، وفق بروتوكول LAPD.

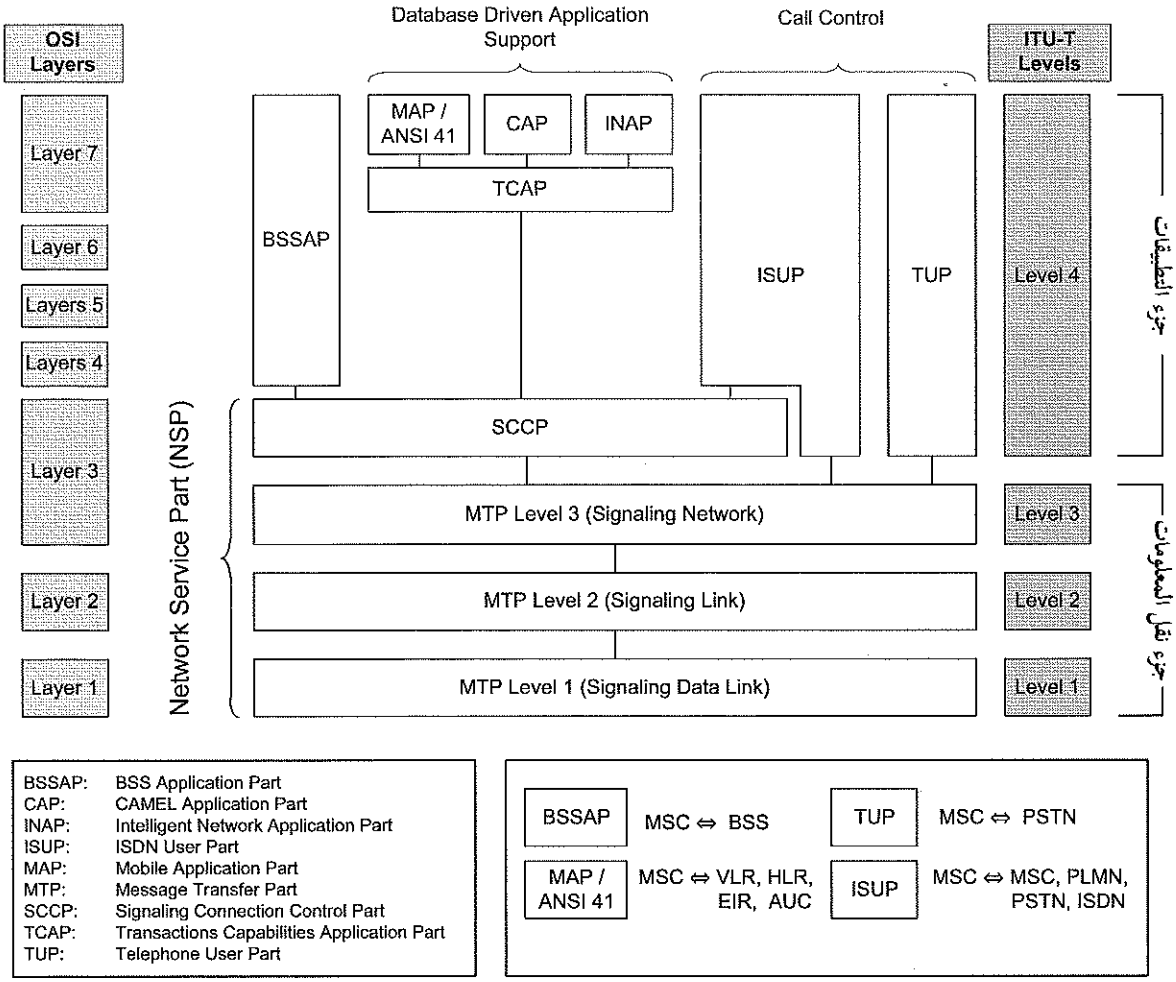
٧-١-٣ الرابط بين وحدة التحكم ومركز التبديل

اعتمدت شبكات الاتصالات الهاتفية منذ سبعينيات القرن الماضي مجموعةً من البروتوكولات، تعرفُ باسمٍ جامعٍ هو "نظام التشوير رقم 7" "Signaling System Nr. 7 (SS7)"، أساساً لتبادل معلومات التحكم ضمن الشبكة، أي بين جهاز الهاتف الثابت والمقسم الذي يصله بالشبكة، وبين المقاسم المختلفة، على اختلاف سعاتها وأدوارها.

وعندما طُوِّرت نظم الاتصالات الخلوية، لم يكن هناك بدٌ من اعتماد نظام SS7 كنظامِ تشويرٍ للمقاسم، إذ كان هذا هو الشرط الأساسي لإتاحة تواصل المقاسم المركزية ضمن الشبكة الخلوية، مع مقاسم الشبكة التقليدية، وبدون هذا التواصل تكون تكاليف الاتصالات بين هذه الشبكات باهظة ومكلفة جداً، لأنها تتطلب في هذه الحالة تجهيزاتٍ وبرمجيات خاصة لتحقيق التوافق بين عناصرها المختلفة. لذا، جرى اعتماد نظام SS7 كقاعدة أساسية لنظام التشوير بين المقاسم، وأضيفت تحسينات خاصة تناسب الخدمات الجديدة التي توفرها الشبكة، كما أدرجت تعديلات تمس اتصال الشبكة المركزية بشبكة النفاذ.

٧-١-٣-١ البنية العامة لنظام التشوير SS7

يتألف نظام SS7 من عدة بروتوكولات ضمن بنية طبقية، يُعنى كلٌّ منها بمهامَّ وظيفية محددة (انظر الشكل ٧-١٠). ومن الممكن تصنيف مجموعة البروتوكولات هذه ضمن جزأين أساسيين: جزءٌ يُعنى بنقل معلومات التشوير والتحكم على نحوٍ موثوق، وجزءٌ آخر يُعرِّف القواعد الحاكمة لخطوات الاتصالات، أي مجموعة الرسائل التي يجري تبادلها بين عناصر الشبكة، وبنية هذه الرسائل، وتسلسلها، وآليات التحكم الخاصة بكلٍ منها.



الشكل ٧-١٠: البنية الطبقية لمجموعة بروتوكولات SS7.

يسمى الجزء الأول "قسم أو جزء نقل رسائل التحكم" "Message Transfer Part (MTP)"، ويُعنى -كما يدل الاسم- بإجراءات وآليات نقل رسائل التشوير، أما الجزء الآخر فنطلق عليه اصطلاحاً اسم "جزء التطبيقات" "User Parts (UP)"، ويشمل الجزء المسؤول عن صياغة الرسائل وإدارة خطوات تبادل المعلومات. يشابه هذا الاختيار للتسمية -مجازياً- اعتبارَ جزء

التطبيقات مستخدِماً لخدمات النقل الموثوق للمعلومات التي يقدمها الجزء الأدنى ضمن البنية الطبقية، وهذا هو سبب إطلاق تعبير "User" على كلٍّ من البروتوكولات في الجزء الأعلى.
ننوه في هذا السياق أيضاً إلى أن الغرض الأساسي من رسائل التحكم هو إتاحة تقديم خدمات الاتصال المختلفة للمشترك، وتفاوت هذه الخدمات يعني أيضاً تفاوتاً في آليات التحكم المتعلقة بها والرسائل الضرورية لإنجاز أو تنفيذ هذه الآليات، لذا يكون جزء التطبيقات مقسماً إلى مجموعات وظيفية تختص كل منها بخدماتٍ محددة، كما تكوّن هذه المجموعات أجزاءً مستقلة تتميز باسم الخدمات التي تُعنى بها، فهناك جزء خاص بخدمات ISDN يعرف باسم "ISDN User Part (ISUP)" ، وجزء خاص بخدمات تجوال المشترك هو "Mobile Application Part (MAP)"، وهكذا.

لم يجر تصميم وتطوير نظام التشوير SS7 كمجموعة بروتوكولاتٍ دفعةً واحدة، بل وصل هذا النظام إلى صيغته الحالية أو إصداره الحالي بعد تحسيناتٍ وإضافاتٍ عديدة، واكبَتْ تطور تقانات التبديل ونقل المعلومات التي تعتمدها المقاسم، وكذلك النقلات النوعية التي عرفها قطاع الخدمات التي تقدمها شبكات الاتصالات. بسبب ذلك، نجد أن جزء التطبيقات في الهيكلية التي يوضحها الشكل ٧-١٠ مؤلف من وحدات أو مجموعات تركيبية، فعلى سبيل المثال، توفر البروتوكولات المجموعة في الجزء المسمى "Telephone User Part (TUP)" آليات التشوير المتعلقة بخدمات الاتصالات الهاتفية التقليدية التي تعتمد تقانات التبديل التمثيلية، بينما يشمل جزء ISUP الإضافات الضرورية للتحكم بالخدمات التي يوفرها نظام الخدمات الرقمية المتكاملة. نقرأ من الشكل أيضاً وجود مجموعة أو وحدة باسم "جزء خدمات التجوال" "Mobile Application Part (MAP)"، وقد أضيفت هذه الوحدة لجعل نظام التشوير ملائماً أو متكيفاً مع الخدمات التي توفرها نظم الاتصالات الخلوية، كما نجد أيضاً وحدة تركيبية باسم "Intelligent Network Application Part (INAP)"، تُعنى بمتطلبات التشوير الخاصة بخدمات الشبكات الذكية، سواء ضمن شبكات الهاتف الثابت (مثل خدمات البطاقات المدفوعة وخدمات التصويت) أو الشبكات الخلوية (مثل خدمة الخطوط مسبقة الدفع).

بعد هذه الفقرات التمهيدية، نعرض في ما يلي لأهم بروتوكولات نظام SS7 مع الاقتصار على ما هو ضروري لمتابعة الأمثلة عن خطوات الاتصالات المختلفة، والتي سنناقشها في البحث ٧-٣.

٧-١-٣-٢ جزء نقل رسائل التحكم (MTP)

يتألف هذا الجزء من ثلاثة "مستويات وظيفية" "Functional Levels"، يعرِّف الأدنى منها (MTP Level 1) الخصائص والمواصفات الفنية (أي المواصفات الفيزيائية والكهربائية) لوسط النقل المادي الذي تُحْمَل عليه رسائل التحكم. وقد كان الوسط المادي المهيمن إطار E1 المعياري المحمول على كابلات نحاسية أو محورية، غير أن التطور التقني يدفع باتجاه اعتماد بروتوكولات TCP/IP لنقل المعطيات والمعلومات بأصنافها المختلفة، حتى تلك المتعلقة بالتشوير، وهناك عدد من البروتوكولات المعرَّفة خصيصاً لذلك، والتي تُجمع تحت اسم "Signaling Transport (SIGTRAN)" (انظر [٣]).

يوفر المستوى الوظيفي الثاني ضمن جزء نقل الرسائل (MTP Level 2) نقلاً موثوقاً للرسائل بين عنصرين متجاورين ضمن

مسار نقل الرسالة من مصدرها إلى وجهتها النهائية (يُشار إلى ذلك بتعبير "Point-to-Point"). لذا يتضمن هذا المستوي الوظيفي آليات خاصة لتزويد وحدات المعلومات الواردة من الطبقات التي تعلوه بمتتاليات تدقيق وأرقام تسلسلٍ تتيح التأكد من وصول كل وحدة إلى هدفها ضمن التسلسل والترتيب الأصلي، وطلب إعادة إرسالها في حالة وقوع أخطاء.
كذلك تتيح الآليات المتوفرة في هذا المستوي الوظيفي مراقبة حالة الوصلات الفيزيائية بين طرف الإرسال والاستقبال والخاصة بنقل رسائل التشوير، وذلك من ناحية "العبء" "Load" الذي تحمله ومن ناحية خلوها من أية انقطاعات أو أعطال فنية.

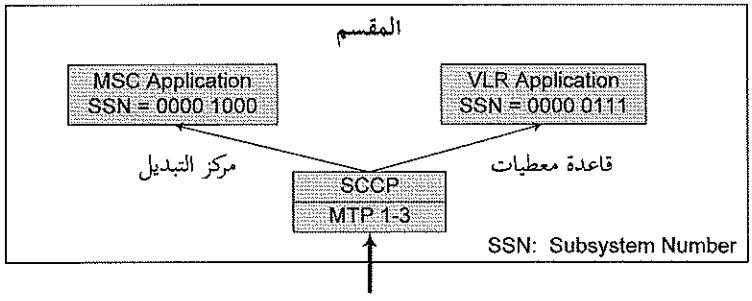
أما المستوي الوظيفي الثالث ضمن جزء النقل (MTP Level 3) فَيُعنى بتأمين المسار الكامل لنقل رسائل التشوير من نقطة صدروها إلى وجهتها النهائية، وليس بين نقطتين متجاورتين فقط (يُشار إلى ذلك بتعبير "End-to-End"). لذا يجري ضمن هذا المستوي الوظيفي تزويد وحدات المعلومات برقم أو هوية عنصر الشبكة المقصود بالرسالة، وهذا العنصر قد لا يكون ضمن الشبكة ذاتها التي صدرت ضمنها رسالة التشوير، فقد تكون الرسالة موجهةً على سبيل المثال من مقسمٍ في شبكة ما، إلى مقسمٍ في شبكة أخرى خارجية (أي في قطرٍ مختلف) وغير مرتبطة بالشبكة الأولى على أي نحوٍ مباشر.
هذا ويجري تمييز عناصر أي شبكة عن طريق رقمٍ فريد لكل منها، فمن منظور نظام SS7، يُعتبر كل عنصرٍ فاعلٍ ضمن الشبكة إما مصدراً لرسائل التشوير أو هدفاً لها، لذا يُعرف باسمٍ شاملٍ هو "نقطة تشوير" "Signaling Point (SP)"، وتنفرد كل نقطة تشوير برقمٍ خاص هو "رمز نقطة التشوير" "Signaling Point Code (SPC)"، على نحوٍ يشابه من ناحية المبدأ عنوان IP الخاص بأي جهاز ضمن شبكات نقل وتبادل المعطيات.
يتألف رمز نقطة التشوير من 14 خانة (24 خانة في النظام الأمريكي) موزعة على ثلاثة حقول وفق نظام عالمي متبع، وتوصيات ملزمة صادرة عن ITU-T. (انظر [٣] و[٤]). يدل الحقل الأول (3 خانات) على منطقة جغرافية ضمن توزيعٍ خاص يتألف من 6 مناطق جغرافية مختلفة (Zones)، فعلى سبيل المثال تشغل أوروبا الرقم 2 وأفريقيا الرقم 6 وآسيا الرقم 4، وهكذا. أما الحقل الثاني، فيدل على بلدٍ أو قطرٍ ضمن المنطقة الجغرافية، أو على شبكةٍ محددة كبيرة، ويؤلف الحقلان معاً ما يعرف بـ "Signaling Area and Network Code (SANC)". أما الحقل الثالث، فيحوي ثلاث خانات تدل على رقم نقطة الإشارة SPC ضمن SANC. يُطلق على هذه البنية لرمز نقطة الإشارة اسم "الرمز العالمي لنقطة التشوير" "International Signaling Point Code (ISPC)"، ويختص هذا الرقم بنقاط تشوير محورية تمثل صلة الوصل بين الشبكة وشبكات أخرى، وتعرف اصطلاحاً باسم "نقاط عبور" "Gateways"، وهذه النقاط هي التي تخضع لنظام الترقيم الدولي، أما النقاط الخاصة بعناصر ومكونات الشبكة الأخرى والتي قد يتغير عددها ومكانها، فتخضع لنظامِ ترقيمٍ قطريٍّ موازٍ، تكون الهيئة الناظمة لقطاع الاتصالات هي المسؤولة عنه. ويسمى الرقم المخصص وفق هذا النظام "الرمز القطري لنقطة الإشارة" "National Signaling Point Code (NSPC)".

٧-١-٣-٣ جزء التحكم بمسارات التشوير (SCCP)

لم تكن المقاسم قديماً تحوي وحدات وظيفية متعددة، لذا كان رقم نقطة التشوير (SPC) يكفي لتحديد مصدر ووجهة رسالة التشوير على نحوٍ لا لبس فيه، غير أن تطور شبكات الاتصالات قاد إلى وجود مكونات فيزيائية ضمن الشبكة، تمثِّل أكثرَ من

وحدةٍ وظيفيةٍ مستقلة، حيث تكون هذه الوحدات الوظيفية مُدمجةً فيزيائياً كمنظومةٍ تجهيزات واحدة، وموزعة وظيفياً ضمن مكونات هذه المنظومة إما كوحدات برمجية خاصة، أو كقاعدة بيانات، أو ك "بطاقاتٍ تحمل دارات الكترونية" "Boards" ذات مهام محددة. فعلى سبيل المثال، يكون سجل VLR، المتمثل بقاعدة معطيات قائمة بذاتها من الناحية الاعتبارية والوظيفية، مدمجاً دائماً مع تجهيزات المقسم، التي تحوي أيضاً مركز التبديل MSC كوحدة وظيفية أخرى. من الأمثلة على ذلك أيضاً وجود سجل HLR ومركز التوثق AUC كوحدتين وظيفتين مدمجتين مع مركز التبديل ضمن منظومةٍ تجهيزات واحدة.

لا يقدم جزء نقل المعلومات (MTP) آليات مناسبة لتمييز هذه الوحدات الوظيفية المختلفة ضمن الموقع الفيزيائي المشترك، إذ يتطلب ذلك مستويين من العنونة، وهذا دفع إلى إضافة بروتوكول خاص ضمن بنية نظام SS7، يتيح مثل هذه الآليات، ويعرف باسم "جزء التحكم بمسارات التشوير" "Signaling Connection Control Part (SCCP)".
يقدم هذا الجزء أو البروتوكول خدمات عنونة متقدمة تتيح مرونة عالية من ناحية توجيه الرسائل والتحكم بمساراتها، إضافةً إلى إجراءات خاصة تتعلق بالنقل الموثوق لرسائل التشوير. وأهم ما يعنينا لمتابعة الأبحاث اللاحقة في هذا الفصل هو آلية تمييز الوحدات الوظيفية ضمن الشبكة، والتي يوضحها الشكل ٧-١١. تستند هذه الآلية إلى حقلٍ يضيفه بروتوكول SCCP إلى الرسالة قبل أن تُمرر إلى طبقة MTP3، يُعرف باسم "رقم الوحدة الوظيفية" "Subsystem Number (SSN)" ويكوّن جزءاً من حقل العنونة العام. يتألف هذا الحقل من 8 بتات تتخذ قيماً محددة ومُعرَّفة من قبل الجهات المعنية بالمواصفات المعيارية (انظر [٥] و[٦])، ويسرد الجدول ٧-٢ بعضاً منها. ننوه في هذا الموضع أيضاً إلى أن بروتوكول SCCP قد طوِّر بعد تطوير قسم MTP، وقد عُنِيَ عند تطويره بأن يكون مكملاً من ناحية الخدمات التي يقدمها للمستوى الوظيفي MTP3، وبحيث يكون مجموع الخدمات التي تقدمها بروتوكولات MTP3 و SCCP مكافئاً لما تقدمه الطبقة الثالثة ضمن نموذج OSI المعياري (انظر الشكل ٧-١٠).



الشكل ٧-١١: آلية تمييز الوحدات الوظيفية عن طريق رقم SSN.

إضافةً إلى ما سبق، يتيح بروتوكول SCCP آلياتٍ لتوجيه رسائل التشوير إلى هدفها المنشود باستخدام عناوين اعتبارية، وذلك عن طريقة تحويل أو ترجمة هذه العناوين إلى رموزٍ أو أرقامٍ لنقاط التشوير المقصودة أو المعنية. يُعرف العنوان الاعتباري في هذه الحالة باسم "Global Title (GT)"، كما تعرف هذه الآلية بـ "Global Title Translation (GTT)" (انظر [٣] للتفاصيل).

Subsystem Number (SSN)	الوحدة الوظيفية	Subsystem Number (SSN)	الوحدة الوظيفية
0000 0110	HLR	0000 0011	ISUP
0000 0111	VLR	0000 1010	AUC
0000 1000	MSC	1000 1110	RANAP
0000 1001	EIR	1001 0101	SGSN
0000 1010	AUC	1111 1011	BSC
0000 0101	MAP	1111 1110	BSSAP

الجدول ٧-٢: أرقام SSN المستخدمة للتمييز بين الوحدات الوظيفية المختلفة وفق بروتوكول SCCP.

٧-١-٣-٤ جزء التحكم بسياق التخاطب بين نقاط التأشير (TCAP)

تتيح بروتوكولات الجزء المسمى "Transaction Capabilities Application Part (TCAP)" إنجاز إجراءاتِ التخاطب بين مراكز التبديل وقواعد المعطيات أو الوحدات الوظيفية الأخرى ضمن الشبكة، وذلك عندما تكون رسائل التحكم لا تتعلق بتنفيذ خطوات الاتصال بعينها. فعلى سبيل المثال، عند استخدام رقم خدماتٍ موحد ضمن الشبكة، مثل الأرقام الرباعية التي تتيحها بعض الشركات لزبائنها بغرض الاستفسار أو الإبلاغ عن أعطال معينة، يتيح بروتوكول TCAP سؤال المقسمِ لقاعدةِ معطياتٍ مركزية عن الرقم الفعلي الذي يجب توجيه رسائل التشوير إليه. فالرقم الرباعي يكون موحداً ضمن القطر، غير أن مركز الخدمات قد يكون موزعاً على أكثر من مدينة، كما يمكن أن يكون هناك مركز مخصص للاستفسارات الطارئة ليلاً، لذا تختلف الوجهة التي يجب توجيه المكالمات إليها تبعاً للوقت وتبعاً لمصدر المكالمة، واستناداً إلى معطيات أخرى، وهذه الوجهات يجب الاستفسار عنها من قاعدة بيانات خاصة. تُعتبر إجراءات الاستفسار في هذه الحالة ضرورية لإنجاز خطوات الاتصال، غير أنها لا تمس الخطوات بعينها، ولا الآليات التي تحكم تسلسلها، فهذه الآليات تكون معرفة ضمن وحدات بروتوكولية أخرى. من الأمثلة الأخرى على استخدام TCAP الإجراءات التي تتيح التخاطب بين سجلات الشبكة المختلفة، فإذا كان المشترك في شبكة مختلفة عن شبكته الأم، وطلب سجل VLR المضيف من سجل HLR معلومات معينة، فإن هذا الطلب يجري باستخدام آليات تخاطب محددة تتيحها وتديرها البروتوكولات ضمن جزء أو تطبيق TCAP.

يتيح بروتوكول TCAP أيضاً آليات طلب نقطة تأشيرٍ ما من نقطة تأشير أخرى القيام ببعض الإجراءات المتعلقة بإنجاز الاتصال، وذلك وفق قواعدَ محددة نتجاوز عن تفاصيلها في هذا السياق (انظر [٣]).

٧-١-٣-٥ جزء التحكم بخدمات ISDN (ISUP)

يُعنى جزء التطبيق الخاص بخدمات ISDN والمسمى "ISDN User Part (ISUP)" بآليات التحكم بأطوار وخطوات الاتصال المختلفة، إضافة إلى معالجة الرسائل المتعلقة بالخدمات الإضافية التي توفرها شبكة الخدمات الرقمية المتكاملة (ISDN)، مثل

"الاتصال متعدد الأطراف" "Conference Call" أو "تحويل المكالمات إلى رقم بديل" "Call Forwarding".
تُستخدم بروتوكولات ISUP في حالات الشبكة الهاتفية الثابتة لتبادل إشارات التشوير إما بين نقطة نفاذ المشترك والمقسم الأول الذي يصل هذه النقطة بالشبكة المركزية، أو بين مقاسم الشبكة، أو بين مقاسم الشبكة ومقاسم الشبكات الخارجية. أما في حالة الشبكات الخلوية ، فليس للمشترك –ممثلاً بالوحدة المتحركة– صلة مباشرة مع الشبكة المركزية، إذ يصل إليها عبر شبكة النفاذ، لذا تقتصر مهام ISUP في حالة الشبكات الخلوية على تبادل رسائل التشوير إما بين مقاسم الشبكة الواحدة، أو مع نقاط العبور (Gateways) الواقعة ضمن الشبكات الخارجية.

يُنجِز جزء ISUP آليات أو إجراءات التحكم بالاتصالات من خلال مجموعةٍ من رسائل التشوير المحددة والمعرفة ضمن التوصيات المعتمدة، وبغية التوضيح، نعرض لأهم هذه الرسائل على نحوٍ انتقائي:

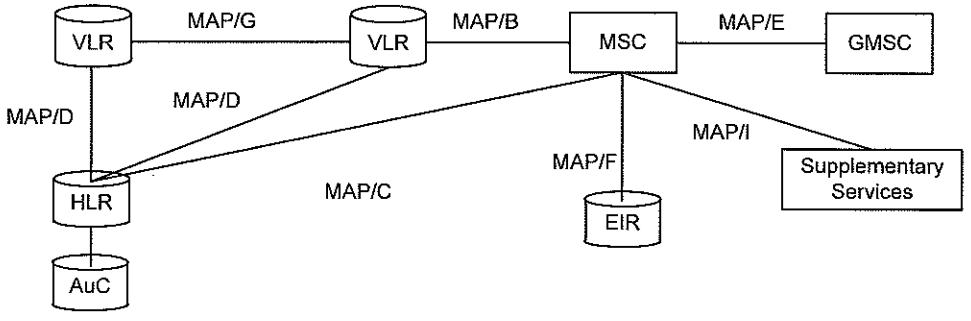
- "Initial Address Message (IAM)": هذه هي الرسالة الأولى التي يوجهها مركز التبديل إلى المقسم المجاور أو التالي ضمن مسار الاتصال، ويكمن الغرض من هذه الرسالة في طلب تخصيص أو حجز دارةٍ (أي قناة فيزيائية متمثلة بحيز زمني على الرابط بين المقسمين) وذلك لإتاحة تبادل المعلومات الخاصة بالاتصال.
تُنقل هذه الرسالة على وحدة نقل رسائل التشوير (سنشرح بنيتها لاحقاً)، ويتضمن حقل المعلومات في هذه الرسالة موسطات عديدة أهمها: رقم المتصل ورقم المتَّصَل به، ومعلومات تتعلق بالخدمات الإضافية مثل حجب رقم المتصل أو تحويل المكالمات، ومعلومات تصف الموارد الفيزيائية التي يتطلبها الاتصال.
- "Address Complete (ACM)": بعد استلام رسالة IAM، يجيب المقسم المتَّصَل به برسالة ACM للإشعار باكتمال استلام رسالة IAM، وتحمل رسالة ACM كل الموسطات الضرورية لمتابعة خطوات الاتصال (انظر [٢] و[٣]).
- "Answer Message (ANM)": يرسل المقسم المتَّصَل به هذه الرسالة لإعلام المقسم المتَّصِل بأن المشترك المطلوب قد قبل المكالمة أو الاتصال.
- "Release (REL)": ترسَل هذه الرسالة من أحد المقسمين لمباشرة إنهاء المكالمة، ولا يجري تحرير الدارة وتصنيفها على أنها شاغرة (Idle) إلا بعد استلام رسالة Release Complete التي تؤكد انتهاء إجراءات إنهاء المكالمة.
- "Release Complete (RLC)": ترسل هذه الرسالة للإشعار بإتمام أو اكتمال تحرير الدارة التي كان يشغلها الاتصال.
- "Subsequent Address Message (SAM)": إذا لم تكن المعلومات أو الموسطات المتعلقة بالاتصال قابلة للنقل ضمن رسالة IAM واحدة، من الممكن أن تُتبع برسالة متممة أو أكثر.

٧-١-٣-٦ جزء التحكم بخدمات التجوال (MAP)

أضيف جزء "Mobile Application Part (MAP)" إلى بنية SS7 الأساسية استجابةً لمتطلبات الشبكات الخلوية، لذا تتمحور الأغراض الأساسية لرسائل التشوير التي يشملها هذا الجزء حول إتاحة خدمات الشبكة للمشترك، بغض النظر عن مكان

وجوده الحالي، وهذا يتطلب دون شك تبادل الكثير من المعلومات بين المقسم وسجلي VLR و HLR، وبين هذين السجلين وسجلات شبكاتٍ أخرى، وذلك لتحقيق متابعة دقيقة لمكان المشترك. يعتمد هذا التبادل لرسائل التشوير بالدرجة الأولى على بروتوكول MAP. كذلك تتطلب خطوات التوثق من هوية المشترك والتأكد من كون جهازه مخولاً للاستخدام ضمن الشبكة، تبادلاً للمعلومات بين المقسم وسجل EIR ومركز التوثق AUC، حيث يُستخدم بروتوكول MAP لإنجاز ذلك. مما يتيحه جزء MAP أيضاً تفعيل بعض الخدمات أو إلغائها أو تعديل بعض خصائصها من قبل المشترك نفسه، وذلك من أي مكان وفي أي وقت. وهذه الإجراءات تتطلب أيضاً تبادلاً للمعلومات بين المقسم الذي يوجد المشترك ضمن منطقة خدمته، وسجل HLR، وبين سجل HLR وقواعد بيانات أخرى ضمن الشبكة، ذات صلة بالخدمات التي يود المشترك إدخال التعديلات عليها.
إضافة إلى ما سبق، تتطلب إجراءات تحديث رقم منطقة الوجود (Location Update) وإجراءات التسليم (Handover)، تبادل معلومات تحكم خاصة، تندرج كلها ضمن ما يشمله جزء MAP.

يجري تبادل رسائل MAP على نحوٍ رئيسي بين عناصر الشبكة الموضحة في الشكل ٧-١٢، وتتباين هذه الرسائل من ناحية بنيتها وفحواها، تبعاً للرابط الذي تنقل عليه. لذا يُشار إلى مجموعة الرسائل الخاصة بكل رابط بتعبير MAP/n، حيث يدل n على الرابط المعني بها.
ننوه أخيراً إلى أن إصدار هذا البروتوكول المعتمد في الولايات المتحدة، يُشار إليه بـ "ANSI-41-MAP".



الشكل ٧-١٢: تواصل مكونات الشبكة عبر صيغ متباينة لبروتوكول MAP.

٧-١-٣-٧ جزء التحكم بشبكة النفاذ (BSSAP)

من الإضافات التي اقتضتها بنية الشبكة الخلوية، توفير إمكانية تبادل رسائل التشوير بين المقسم وشبكة النفاذ، وهذا ما يتيحه "جزء التحكم بشبكة النفاذ " "BSS Application Part (BSSAP)". ويختلف هذا الجزء عن MAP في كونه مخصصاً لتبادل إشارات التشوير بين العناصر المساهمة في إنجاز خطوات المكالمات، كالمقسم ووحدة التحكم، وليس بين جزء مشارك في إنجاز الاتصال وقواعد بيانات داعمة له، لذلك لا يحتاج هذا الجزء إلى خدمات TCAP، التي تكون مطلوبةً فقط في حال كون رسائل التحكم لا تتعلق بتنفيذ خطوات الاتصال بعينها.

تتباين الرسائل التي يتبادلها المقسم مع شبكة النفاذ من ناحية وجهتها النهائية، فهناك رسائل تكون موجهة لوحدة التحكم، وأخرى تكون وجهتها النهائية الوحدة المتحركة، ويكون دور شبكة النفاذ (المحطة الثابتة ووحدة التحكم) مقتصراً على نقلها دون قراءة أو تحليل فحواها، أي أنها تمرر عبر شبكة النفاذ على نحوٍ خفي (Transparent)، ونظراً لهذا التباين وما يترتب عليه من اختلافٍ في كُنْهِ ومهام الرسائل المتبادلة مع المقسم، يُصَنف جزء التخاطب مع شبكة النفاذ إلى قسمين وظيفين:

- الأول هو "BSS Mobile Application Part (BSSMAP)"، ويشمل رسائل التشوير المتبادلة مع وحدة التحكم (BSC)، وهذه الرسائل تُعنى على نحوٍ رئيسي بتنسيق عمل وحدات التحكم من ناحية الموارد الفيزيائية الموزَّعة والمتاحة، بالإضافة إلى إجراءات التسليم (Handover)، وكل ما يتعلق بخطوات الاتصال عندما تكون أكثر من وحدة تحكم طرفاً فيه ومشاركة في إنجازه.
- أما الجزء الثاني فيعرف باسم "Direct Transfer Application Part (DTAP)"، أي جزء التخاطب المباشر مع الوحدة المتحركة، ويشمل هذا الجزء الكثير من وظائف التحكم بالمكالمات (Call Management)، ومتابعة مكان وجود المشترك (Mobility Management). لذا يُعرف جزء DTAP أيضاً باسم " المستوي الوظيفي الثالث لنظام GSM " أو "GSM-L3"، فالرسائل الصادرة عنه توجّه إلى طبقة التحكم من منظور الوحدة المتحركة، أي RIL-3، وبالعكس.

هذا ويجري تمييز الرسائل المخصصة لكلٍّ من الجزأين عن طريق مؤشرٍ خاص ضمن جزء العنونة.

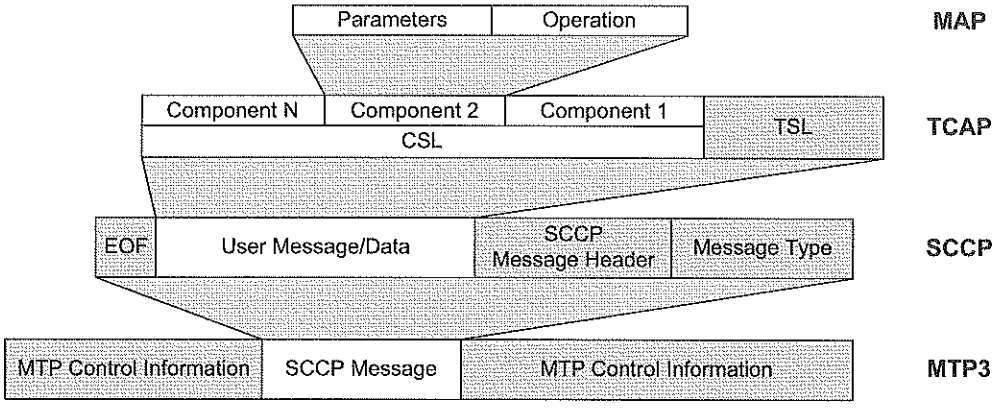
٧-١-٣-٨ بنية رسائل التحكم وفق نظام SS7

يُطلق على وحدات المعلومات التي تُتَبادل في نظام SS7 اسم "وحدة التشوير" "Signaling Unit (SU)"، وهناك أكثر من صنف لهذه الوحدات، فمنها ما يستخدم لنقل معلومات التشوير التي ترد من جزء التطبيقات، وتسمى في هذه الحالة "وحدات رسائل التشوير" "Message Signaling Unit (MSU)"، ومنها ما يستخدم لأغراض إدارية تخص مراقبة الوضع الفني للوصلات الفيزيائية المستخدمة لنقل رسائل التشوير، ومنها ما يخدم غير ذلك من الأغراض. وتختلف بنية وحدات التشوير تبعاً لمهامها الوظيفية، وفق تفصيلٍ يخرج عن إطار هذا الفصل، لذا نقتصر في هذا الموضع على عرض أهم ما يميز بنية الوحدات التي تحمل معلومات تشوير في متنها ، أي MSU، ونحيل المهتم بالتفاصيل إلى [٣].

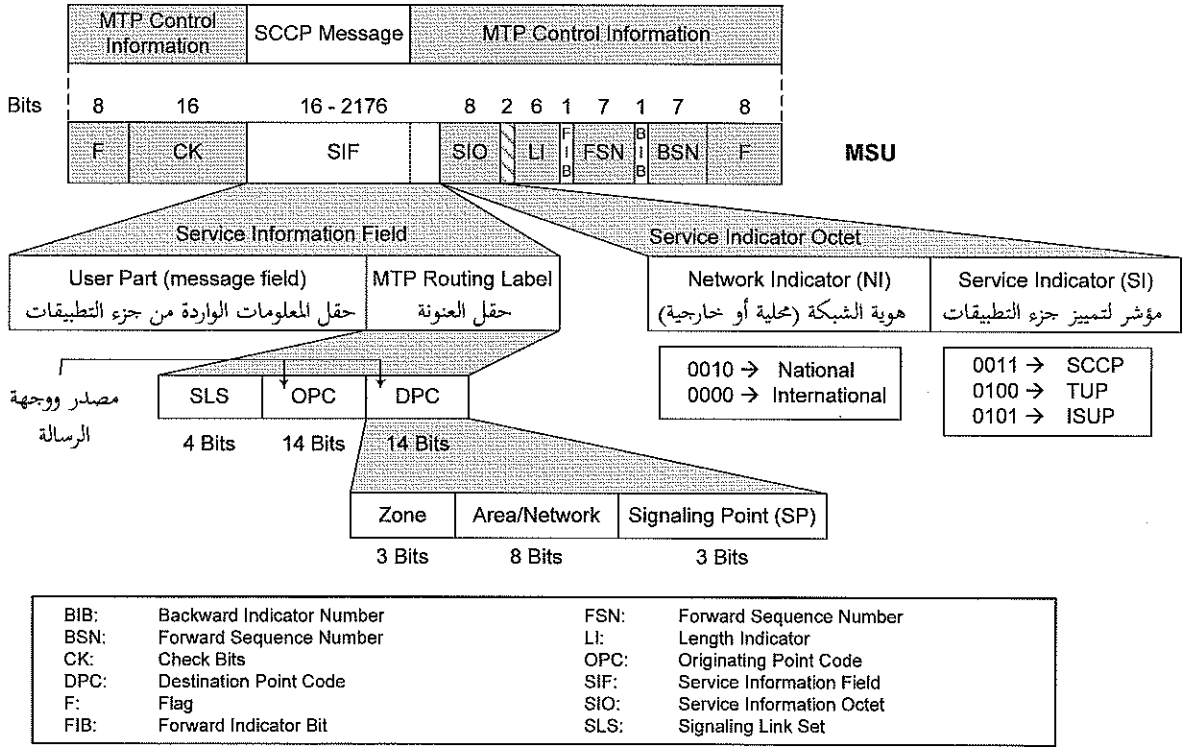
تُمَرَّر معلومات التشوير ضمن البنيان الطبقي لمنظومة البروتوكولات من طبقة إلى التي تليها، حيث تضيف كل طبقة حقول تحكم خاصة بها وبخدمات النقل التي تقدمها، لذا تكون رسائل الطبقات العليا "مُغَلَّفةً" "Encapsulated" ضمن رسائل الطبقات الدنيا، كما يوضح الشكل ٧-١٣ في حالة كون بروتوكول SCCP هو المستخدم (يبين الشكل ٧-١٠ أن أجزاء التطبيقات التي تعلو جزء النقل مباشرةً هي ISUP أو TUP أو SCCP، لذا يمثل الشكل ٧-١٣ حالة خاصة).

عند تمرير الرسائل إلى المستوي الوظيفي MTP3 ، تجري تجزئتها إلى مقتطعات (Segments)، تتباين في طولها تبعاً لمصدر الرسالة ومهامها، كما تجري إضافة معلومات تحكم خاصة بهذا المستوي على طرفي كل مقتطع. بعد ذلك، تمرر وحدات

المعلومات الناتجة إلى المستوى الوظيفي MTP2 الذي يضيف بدوره حقول تحكم أخرى خاصة بآليات النقل الموثوق للرسائل. يقود ذلك إلى الصيغة النهائية لوحدات رسائل المعلومات (MSU) التي يبينها الشكل ٧-١٤ على نحوٍ عام.



الشكل ٧-١٣: تغليف رسائل الطبقات العليا ضمن رسائل الطبقات الدنيا.



الشكل ٧-١٤: البنية النموذجية لوحدات رسائل التشوير (Message Sigaling Unit).

تتطلب متابعة هذا الفصل فهماً لِكُنْه المعلومات التي يحملها "حقل رسائل التطبيق" "Service Information Field (SIF)" و"حقل تمييز التطبيق" "Service Information Octet (SIO)"، لذا نقتصر على الإشارة إليهما، أما تفاصيل الحقول الأخرى فيمكن الرجوع إليها في [٢] و[٣].

يحمل حقل SIF رسائل التشوير الواردة من جزء التطبيق (أو المحمولة إليه)، إضافةً إلى حقل عنونةٍ يشمل رقم نقطة التشوير لعنصر أو مكوّن الشبكة الذي صدرت عنه رسالة التشوير "Originating Point Code (OPC)" ، ورقم نقطة التشوير المقصودة بالرسالة "Destination Point Code (DPC)"، ورقم الوصلة التي تُحمل عليها معلومات التشوير "Signaling Link Set (SLS)".

أما حقل تمييز التطبيق (SIO) فيشمل حقلين جزئيين، يدل الأول منهما على التطبيق المعني برسالة التشوير (أي مصدر ووجهة الرسالة)، ويعرف باسم "مؤشر التطبيق" "Service Indicator (SI)"، فعلى سبيل المثال، تكون قيمة هذا الحقل "0101" إذا كانت رسالة التحكم صدرت عن أو موجهةً إلى ISUP، كما تكون القيمة "0011" إذا كان التطبيق المعني بالرسالة هو SCCP (انظر الجدول ضمن الشكل ٧-١٤). أما الحقل الجزئي الثاني المسمى "Network Indicator (NI)" فيدل على نوع الشبكة المعنية بالرسالة (محلية أو خارجية)، فإذا كان هدف الرسالة هو شبكة قطرية محلية ، تكون قيمة NI "0010"، أما إذا كانت الشبكة خارجية، فتكون قيمة NI "0000".

٧-٢ أحوال الوحدة المتحركة من ناحية ارتباطها بالشبكة

تمهيداً لتفصيل خطوات الولوج إلى الشبكة وتسلسل إجراءات إنشاء الاتصال، نعرض بدايةً للأحوال المختلفة التي تعرِّف "وضع أو حال" ارتباط الوحدة المتحركة بالشبكة، إذ يمكن التمييز بين ما يلي:

١) "حال (أو وضع) الانفكاك التام عن الشبكة" "Detached Mode": يكون الجهاز في هذه الحالة غير مرتبط بالشبكة إطلاقاً، كأن يكون مطفأً تماماً، أو يحوي شريحة غير مفعَّلة أو غير معرَّفة على النظام (جديدة مثلاً)، أو لاغية الصلاحية.
لا يمكن للشبكة في هذه الحالة أن ترسل للجهاز أية رسالة نداء، كما لا يمكن للجهاز –من جانبه– الإجابة على أية رسالة نداء. يكون الجهاز أيضاً عاجزاً عن إخطار الشبكة بأي تغييرٍ في رقم المنطقة التي يوجد فيها (LAI)، ومن ثم تكون إمكانية متابعة حركته غير متاحة إطلاقاً. وبما أن الشريحة هي التي تمثل طرف المشترك من منظور الشبكة، وتُمَيَّزُ عن غيرها بهويتها (أي رقم IMSI)، يُطلق على هذه الحال اصطلاحاً تعبير "IMSI-Detached"، أي حالة "الانفكاك التام عن الشبكة" أو عدم الارتباط بها.

٢) "حال (أو وضع) الارتباط بالشبكة" "Attached Mode":يكون الجهاز في هذا الوضع مُفَعَّلاً أو مُشَغَّلاً، ويحوي شريحةً صالحةً للاستخدام، وقد جرى مسبقاً إعلام الشبكة بمكان وجوده.
يُطلق على هذه الحالة اصطلاحاً تعبير "IMSI-Attached"، في دلالةٍ على ارتباط الشريحة بالشبكة، حيث يكون بإمكان الشبكة توجيه رسالة نداءٍ إلى المشترك، كما تكون الوحدة المتحركة أثناء تنقلها من مكان إلى آخر قادرةً على إعلام الشبكة

بأي تغيير يطرأ على رقم منطقة وجودها. من الممكن أيضاً التمييز -في حال الارتباط بالشبكة- بين الوضعين التاليين:

٢-١) "حالة السكون" "Idle Mode": يعني ذلك عدم مشاركة الوحدة المتحركة في أي نوعٍ من أنواع الاتصالات التي من الممكن أن تكون قائمة مع الشبكة، حيث يكون نشاط الوحدة المتحركة في هذه الحالة مقتصراً على الاستماع إلى قناة البث العامة BCCH من الخلية الحالية (أي التي توجد الوحدة ضمن مجال تغذيتها) ومن الخلايا المجاورة، وتحليل المعلومات التي تحملها هذه القنوات، وتقييم نوعية الإشارة التي تَحمِل كلاً منها. ويكون الهدف أو الغرض من هذا التقييم التأكد من أن الوحدة متصلة أو مرتبطة بالشبكة عن طريق أفضل خلية من ناحية جودة الإشارة. فإذا تبين نتيجةً للتقييم وجود قناةٍ أخرى ذات إشارة راديوية أفضل، تنتقل الوحدة المتحركة للإستماع إلى القناة الأفضل، ويعني ذلك ضمنياً أو اعتبارياً أن الوحدة المتحركة تبدّل الخلية التي من الممكن أن تنفذ إلى الشبكة عبرها، وهذا التبديل يُسمَّى اصطلاحاً "تجوال المشترك ضمن الشبكة" "Roaming" أو اختصاراً "التجوال"، وهذا هو المعنى الأوسع والأشمل لهذه الميزة.

يجب على الوحدة أيضاً -حتى في حالة السكون أو عدم المشاركة بأي اتصال- إخطار الشبكة بأي تغيير يطرأ على مكان وجودها، ويجري إخطار الشبكة عملياً بهذا التغيير عندما يطرأ أي تغيّر على رقم منطقة الوجود (LAI). لذا، عندما تكتشف الوحدة أنها ولجت منطقةً ذات رقم LAI مختلف، تنتقل على نحوٍ مؤقت إلى "الحالة النشطة" (انظر الفقرات التالية) وتخبر الشبكة بتغير مكانها، ثم تعود إلى حالة السكون مرة أخرى.

لا تخصص الشبكة للوحدة المتحركة - أثناء حالة السكون- أية قناة مخصصة (Dedicated Channel)، غير أن الوحدة تكون في حالة استماعٍ مستمرٍّ لقناة النداء (PCH)، وذلك تحسباً لورود نداءٍ خاص بها من طرف الشبكة.

٢-٢) "حالة النشاط أو الفاعلية" "Active Mode": تكون الوحدة المتحركة فاعلة إذا جرى تخصيص أيٍّ من القنوات الاعتبارية لها، حيث تُمثِّل في هذه الحالة -من منظور الشبكة- طرفاً تتواصل الشبكة معه. ولا تقتضي حالة النشاط بالضرورة أن تكون الوحدة مشاركة في اتصال معين، إذ يكفي تخصيص أيٍّ من قنوات التحكم لهذه الوحدة دون غيرها حتى تنتقل إلى حالة النشاط. فعلى سبيل المثال، عندما تُعلم الوحدة الشبكة بتغيير مكان وجودها، يُخصص لها قناة لإرسال هذه المعلومات، وهذا يجري في أغلب الأحيان على نحوٍ خفيٍّ عن المستخدم (Transparent)، ودون أن يشعر به، لذا تكون الوحدة في هذه الحالة قد انتقلت إلى الحالة النشطة على نحوٍ مؤقت، ثم رجعت إلى حالة السكون بعد إتمام إجراء الإبلاغ. من الأمثلة الأخرى على ذلك أيضاً، استلام المشترك لرسالة نصية قصيرة، حيث يخصص له في هذه الحالة قناة SDCCH لحمل الرسالة إليه.

٧-٣ أمثلة على تسلسل خطوات النفاذ إلى الشبكة وإجراءات الاتصال

تمثل الحالات الثلاثة التي ذكرناها الإطار العام الذي يحدد قابلية وجاهزية الوحدة المتحركة للتواصل مع الشبكة، لذا تتطلب إجراءاتٌ مباشرةٌ أي اتصال أو إنهائه انتقالَ الوحدة المتحركة من حالةٍ من هذه الحالات إلى أخرى. ومما لا شك فيه أن حالات

وأوضاع واحتمالات تسلسل إجراءات الاتصالات التي يتيحها نظام GSM أو غيره، متعددة ومتنوعة جداً، وقد تكون أحياناً غايةً في التعقيد. فعلى سبيل المثال، قد تكون الوحدة مشغولةً باتصال قائم مع الشبكة، ثم تطرأ ضرورة تغيير الخلية، أي إطلاق وإنجاز إجراءات التسليم (Handover) أثناء الاتصال، وهذا يقتضي تخصيص موارد جديدة ضمن الشبكة، وتفعيل إجراءات تحكمٍ وتبادلٍ للمعلومات مع مكوناتٍ مختلفةٍ ضمنها. كذلك، قد يتزامن وصول رسالة قصيرة إلى المشترك مع وجود اتصال قائم، أو قد يقرر المشترك أثناء اتصاله مشاركةَ طرفٍ ثالث في الاتصال.

هناك إذاً حالات كثيرة معقدة، غير أنه من الممكن تحليل هذه الحالات إلى خطوات أو مجموعاتٍ جزئية، فكل اتصال يمر بأطوارٍ مختلفة، العديدُ منها مشتركٌ بين أصناف الاتصال المختلفة. لتوضيح ذلك، نناقش الأطوار التي يشملها ورود اتصالٍ إلى المشترك، ونوضح لكلٍّ منها وجه التشابه مع حالات اتصالٍ أخرى. يمكن إجمال هذه الأطوار كما يلي:

١) توجيه رسالة نداء للمشترك في حالة ورود اتصال: هذا طورٍ أساسي في حالة الاتصال الوارد فقط، لذا فهو يسقط في حالات اتصالٍ أخرى مثل الاتصال الصادر أو أثناء إجراء التسليم.

٢) طلب المشترك النفاذ إلى الشبكة مع بيان سبب النفاذ: يُعتبر هذا الإجراء طوراً مشتركاً في كلّ حالات الاتصال التي تتطلب توفر قناة اتصال مخصصة للمشترك. فعلى سبيل المثال يمثل هذا الطور أولى الأطوار في حالة إصدار مكالمة، أو تحديث رقم منطقة الوجود، أو غير ذلك من حالات طلب النفاذ.

٣) تخصيص قناة تحكم للمشترك لتبادل الرسائل الخاصة بإنشاء الاتصال والتحضير له: يتبع هذا الطور في غالب الأحيان إجراءاتِ طلب النفاذ.

٤) طلب الخدمة من الشبكة: بعد تخصيص الشبكة لقناة تحكم لتبادل المعلومات، يجري في هذا الطور إعلام الشبكة بتفاصيل الخدمة المطلوبة (أي نوع الاتصال، ووجهته، ...). وهذا الطور ضروري كي تتمكن الشبكة من تحديد الموارد الفيزيائية التي يتطلبها إنجاز الخدمة المرغوبة.

٥) التوثق من هوية المشترك: يمثل هذا الطور إجراءً خيارياً لمشغل الشبكة، إذ يمكن تفعيله تبعاً لسياسة المشغل، غير أن كافة مشغلي الشبكات يعتبرونه إجراءً ملزماً وأساسياً. هذا ويمكن لهذا الطور أن يسقط في بعض حالات الاتصال، مثل إجراءات عملية الانتقال من خلية إلى أخرى أثناء اتصال قائم، إذ يكون التحقق من الهوية قد جرى عند مباشرة الاتصال.

٦) تفعيل التعمية: يعتبر تفعيل التعمية – من الناحية النظرية– إجراءً خيارياً أيضاً، غير أنه أساسيٌ من منظور كافة مشغلي الشبكات. ويسقط هذا الإجراء في بعض الحالات أيضاً (أثناء عملية التسليم على سبيل المثال، إذ يكون أُنجز ضمن خطوات الاتصال الأولى).

٧) التحقق من جواز استخدام الوحدة المتحركة: هذا إجراءٌ خياري أيضاً.

٨) تخصيص قناة TCH لتبادل المعلومات الفعلية إجراء الاتصال: قد يسقط هذا الطور عندما يكون هدف النفاذ إلى الشبكة هو إرسال رسالة نصية قصيرة على سبيل المثال.

٩) تنبيه الطرف المتصل به وإنشاء دارة اتصال كاملة معه.

١٠) تبادل المعلومات بين طرفي الاتصال.

١١) إنهاء الاتصال وتحرير الموارد الفيزيائية.

يتيح جمع الخطوات الخاصة ببعض هذه الأطوار في مجموعات جزئية تُدرَسُ كل منهن على حدة، فهماً أيسرَ لحالات الاتصال المعقدة. هذا ما سنبينه في الفقرات التالية، التي نناقش فيها بعضاً من أطوار إنجاز الاتصالات، إضافةً إلى الخطوات المتعلقة ببعض حالات الاتصال العامة. وننوه قبل عرض الحالات المختلفة إلى النقاط المنهجية التالية التي سنلتزم بها أثناء النقاش:

١) ندلُّ أثناء شرحنا على كل رسالةٍ باسمها، ونقرن الاسم بالمجموعة الوظيفية التي تنتمي إليها، وبالبروتوكول الذي صدرت عنه. فعلى سبيل المثال، نعني بـ (RIL3-RR; CHANNEL REQUEST) أن اسم الرسالة المُتبادلة هو CHANNEL REQUEST، وأنها صدرت عن المجموعة الوظيفية RR، ضمن بروتوكولات الطبقة الثالثة RIL3. وإذا كان تبادل الرسالة يجري عبر الرابط الراديوي، نذكر في سياق الشرح أيضاً اسم القناة الاعتبارية التي تحملها، وكيفية تخصيص هذه القناة.

٢) نَذكُرُ كل رسالةٍ باسمها الانكليزي المُعتمد، دون مقابلٍ باللغة العربية، وسيجري في معرض النقاش توضيح الغرض الوظيفي من كل رسالة.

٣) نستخدم تعبير "مركز التبديل" للدلالة على MSC كوحدة وظيفية، كما نستخدم تعبير "مقسم" عند الإشارة إلى MSC/VLR أو إلى MSC/VLR/HLR كجزءٍ وظيفي متكامل.

٤) سيلحظ القارئ تكراراً متعدداً لنصوص بعض الخطوات التي تمثل أطواراً مشتركة بين أكثر من حالة اتصال، وقد اخترنا هذا التكرار حتى تَسهُلَ على القارئ متابعة كل مثالٍ على حدة، وحتى تترسخ الخطوات الجزئية التي يمر ضمنها كل اتصال.
كما سيجد القارئ أيضاً تذكيراً ببعض الإجراءات التي شُرحت في فصولٍ سابقة، وذلك بغية إتاحةِ الربط بين المفاهيم والمبادئ التي ذكرت سابقاً على نحوٍ شامل وجامع، والتطبيق العملي لها ضمن إجراءات الاتصال.

٧-٣-١ خطوات اختيار التردد وتحقيق التزامن

قبل مباشرة أي اتصال، وقبل الارتباط بأية خلية، يجب أن تكون الوحدة المتحركة قد فُعِّلت أو شُغِّلت، وتوافقت ترددياً وزمنياً مع الخلية ذات الإشارة الأنسب للاستقبال ضمن الشبكات المتاحة. ونستعمل تعبير الشبكة المتاحة في هذا الموضع للدلالة على أننا نعني الحالة العامة، وهي وجود المشترك في بلدٍ أو قطرٍ خارجي، ووجود عدة شبكات متاحة للاستخدام.
يتطلب اختيار الخلية الأنسب عدة خطوات، كنا قد عرضنا لها على نحوٍ مقتضب في الفصل ٤، ونعرضها هنا مرةً أخرى، مع بعض التوسع، نظراً لأهميتها في سياق هذا الفصل.

يُطلق على مجموعة الخطوات المتعلقة باختيار الشبكة والخلية الأنسب تعبيراتٌ متعددة، منها "Initial Mobile Acquisition" و"Cell Selection" و"Mobile Initialization"، وتشمل هذه الخطوات ما يلي:

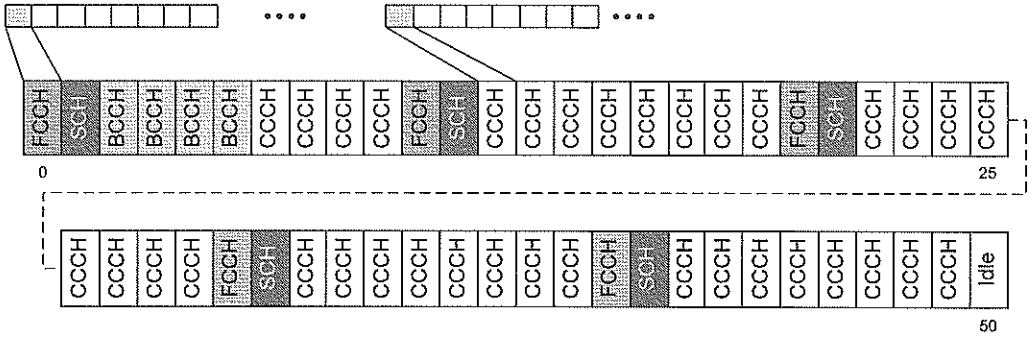
١) يقود تشغيل الجهاز (أي الضغط على المفتاح المخصص) إلى تفعيل الوحدات البرمجية المحفوظة في ذاكرة الجهاز الدائمة، والتي تُنجز خطوات "إقلاع الجهاز" "Boot-On" ضمن بروتوكولات نظام التشغيل.

٢) يُجري الجهاز مسحاً لكل القنوات الراديوية ضمن المجالات أو النطاقات الترددية التي صُمِّمَ الجهاز لاستخدامها، كما يقوم بقياس الاستطاعة الوسطية للإشارة المستقبلة على كلٍّ من هذه القنوات. فإذا كان الجهاز مصمماً ليكون متوافقاً مع كلٍّ من نظام GSM الأساسي (P-GSM) ونظام GSM المُوَسَّع (E-GSM) والنظام المُزاح ترددياً (DCS-1800)، فإن ذلك يعني أن الجهاز يقيس الاستطاعة الوسطية لـ 174 قناة ترددية ضمن نظامي P-GSM و E-GSM، إضافةً إلى 374 قناة ترددية ضمن نظام GSM-1800 [٨]. هذا ويتطلب حساب الاستطاعة الوسطية لإشارة كلٍ من هذه الحوامل الترددية قياس 5 قيمٍ أو عينات على الأقل لمطال إشارة كلٍ منها، ثم حساب القيم الوسطية لمربع القيم المقيسة، مع وجوب أن تكون هذه العينات أو القيم متفرقة زمنياً ضمن مدةٍ مقدارها 3-5 sec، تبعاً لنوع الجهاز [٩]. هذا ولا يعني ما ذكرناه وجوب إجراء قياسٍ 5 عينات لـ 548 حاملٍ ترددي، إذ من غير المحتمل أن يكون الجهاز في منطقة جغرافية يَستقبل فيها الإشارة من كل القنوات المعرفة على هذه النظم، لذا تحتفظ الوحدة المتحركة عادةً بمجموعة من الترددات التي جرى استخدامها خلال آخر مدة زمنية قبل إطفائها (30-40 قناة راديوية)، وذلك بغية تسهيل وتسريع اختيار القناة الأنسب بعد إعادة التفعيل. يجري حفظ هذه الترددات في ذاكرة الشريحة، بحيث تكون متوفرة حتى إذا استبدل المشترك جهازه أثناء انفكاكه عن الشبكة، فإذا شُغِّلت الوحدة المتحركة، أُعطيت الترددات المحفوظة أولوية أثناء عملية البحث عن الخلية الأنسب. يجري في العادة

٣) بعد إجراء القياسات، يجري ترتيب القنوات الترددية وفقاً لقوة الإشارة المستقبلة، أي من الأقوى إلى الأضعف، وتكون بروتوكولات الطبقة المادية (الطبقة الأولى) هي المسؤولة عن تنسيق وإجراء القياسات، أما تقييم النتائج وما يترتب عليها من خطوات، فيجري ضمن مجموعة RR الوظيفية (الطبقة الثالثة). لذا يجري تبادل لائحة القنوات الترددية مع الطبقة البرتوكولية الثالثة، التي توعز إلى الطبقة المادية بـ "ضبط" "Tune" مرشح الاستقبال على التردد ذي القيمة الأنسب للإشارة المستقبلة.

٤) تتمثل الخطوة التالية في البحث عن رزمة ضبط التردد (Frequency Burst)، التي تُحمل على قناة FCCH. وضبط التردد ضروري في سياق خطوات اختيار الخلية، لأن قراءة المعلومات الأساسية عن النظام تتطلب قراءة قناة BCCH على نحوٍ دقيقٍ، وهذا بدوره يستوجب أن يكون تردد الوحدة المتحركة موافقاً تماماً لتردد المحطة الثابتة، ولا يكفي لتحقيق ذلك إجراء التوليف الأولي الذي ذكرناه لسببين: الأول هو أن التردد الذي يُوَلِّد في الوحدة المتحركة يعتمد على دقة المذبذب المُستخدم (Local Oszillator)، والتي لا تكون مثالية، والثاني هو التغير الذي يطرأ على تردد الإشارة الراديوية نتيجة تحرك المستقبل أو أيٍّ من الأجسام ضمن وسط الانتشار، وذلك وفقاً لظاهرة دوبلر (Doppler Effect).

تُحمل قناةُ FCCH على التردد ذاته الذي يحمل قناة BCCH، ويتكرر ورورد الحيز الزمني الذي يحمل رزمة ضبط التردد في كل واحدٍ من 10 أُطُرٍ زمنية (TDMA-Frames) ضمن الإطار المتعدد (Multiframe) الخاص بقنوات التحكم (أو بعد 11 إطار عند ورود الحيز الشاغر (Idle Frame)، (انظر للتفاصيل الفصل ٤ والشكل ٧-١٥ الذي يمثل تكراراً لما يوضحه الشكل ٤-١٨)، وقد كنا ذكرنا في الفصل ٤ أن رزمة ضبط التردد تحمل بتاتٍ تمثّل إشارة جيبية صرفة، لذا تُجري بروتوكولات الطبقة الأولى بحثاً عن نمط البتات الذي يقود -بعد فك التعديل- لمثل هذه الإشارة. وتتضمن الآليات الخاصة بذلك التقاط هذه الإشارة وتقييمها ضمن 9 أحياز زمنية متتابعة، يحمل كلٌّ منها رزمة ضبط التردد [٩].



الشكل ٧-١٥: ترتيب القنوات الاعتبارية وفق نمط التوزيع *CC4* في المسار الهابط.

بعد حساب قيمة تردد الإشارة الجيبية، يجري ضبط أو توليف مرشح الاستقبال على ترددٍ يقل عن تردد هذه الإشارة بمقدار 67.7 kHz (انظر الشكل ٤-١١).

إذا لم تنجح الوحدة المتحركة في التقاط إشارة جيبية، تنتقل إلى تردد الإشارة التالية من حيث قوتها، وذلك وفق الترتيب الذي قادت إليه خطوة قياس الإشارات على الترددات المختلفة، فإذا لم تجد إشارةً جيبيةً مرة أخرى، تابعت البحث على تردد الإشارة التي تلي من ناحية القوة، وهكذا.

٥) بعد اكتمال إجراء ضبط التردد، يجب على الوحدة المتحركة ضبط تزامنها مع المحطة الثابتة، فضبط التردد يقود إلى توافق وتيرة تكرر البتات ضمن دفق المعلومات المستَقبَل، وهذا يجعل الفارق الزمني الفاصل بين بتين متجاورين موافقاً للفاصل الذي تُرسَلُ وفقه المعلومات من المحطة الثابتة. غير أن ذلك لا يكفي لقراءة وتفسير المعلومات الرقمية المستقبلة، لأن القراءة الصحيحة لهذه المعلومات تتطلب معرفة بداية ونهاية كل إطار وحيز زمني ضمن دفق البتات، وكذلك معرفة رقم الإطار المستقبَل ضمن الإطار المتعدد. لذا تُجري الوحدة المتحركة بحثاً عن رزمة ضبط التزامن ضمن الإشارة المستقبلة.
يكون ترتيب الحيز الزمني الذي يحمل معلومات قناة التزامن تالياً للحيز الزمني الخاص بقناة ضبط التردد (انظر الشكل ٧-١٥)، أي أن الفاصل بينهما هو 8 أحياز زمنية، لذا يسهل على الوحدة المتحركة تحديده، وقراءة رزمة المعلومات التي يحملها.

تحمل هذه الرزمة –كما أشرنا في الفصل ٤– سلسلة اختبارٍ أو تزامنٍ مؤلفةً من 64 بتاً، وتكون مشتركة لكل المحطات الثابتة ضمن شبكة ما، كما تكون معروفة للوحدة المتحركة، حيث تتميز كلٌّ من السلاسل المتاحة ضمن النظام برقم يميزها عن غيرها، ويجري بثه ضمن معلومات قناة BCCH، (انظر الشرح الخاص برزمة التزامن في البحث ٤-٤-٢-١). لذا، من الممكن حساب معامل الترابط الإحصائي (Correlation Coefficient) بين المتتالية المحفوظة في ذاكرة الوحدة، والمتتالية المستقبلة ضمن رزمة ضبط التزامن، بدلالة الإزاحة الزمنية بين السلسلتين، ومن ثم تحديد القيمة العظمى لهذا المعامل، والتي تتيح تحديد البداية الصحيحة للسلسلة ضمن تتابع البتات التي تحملها الرزمة المُستقبَلة. فإذا تحددت بداية السلسلة، أمكن تحديد بداية الحيز الزمني.

بعد ذلك تجري قراءة فحوى هذه الرزمة الراديوية، والذي يشمل الرقم المختزل للإطار (RFN) بطول 19 بتاً، ورمز هوية المحطة BSIC، بطول 6 بتات، والذي يتكون بدوره من رقم المحطة ضمن المنطقة الجغرافية (BCC) وهوية الشبكة (NCC)، بطول ٣ بتات لكلٍّ منهما (انظر الفصل ٤).

يُستخدم رقم RFN لتحديد ترتيب الإطار ضمن الإطار الأعظمي (Hyperframe)، كما تُستخدم متتالية محددة في وسط رزمة التزامن لمعايرة المؤقت الخاص بأرباع البت (QN)، والذي يمكن استخدامه مع مؤقتات أخرى (رقم الحيز الزمني (TN)، ورقم الإطار (FN)، ورقم البت (BN) ضمن الحيز) لضبط تزامن الوحدة مع المحطة على نحوٍ دقيق، وذلك وفق الآليات التي سبق شرحها في الفصل ٤.

هذا ويجب أن تُستكمل إجراءات التزامن مع حامل قناة BCCH خلال 0.5 sec، كما يجب أن تُستكمل إجراءات قراءة المعلومات من القناة خلال 1.9 sec (انظر [٩]).

٦) بعد توافق الوحدة المتحركة مع المحطة الثابتة ترددياً وزمنياً، تنتقل الوحدة إلى البحث عن قناة BCCH مرة أخرى كي تقرأ منها المعلومات المتعلقة بالنظام، وبالميزات المتاحة ضمنه، وبالموسطات التي يجب استخدامها أثناء تبادل المعلومات مع المحطة. ومن أهم المعلومات التي تحملها هذه القناة لائحة المحطات الثابتة المجاورة، مع ترددات قنوات BCCH الخاصة بها، ورقم منطقة الوجود الخاص بالمحطة أو الخلية، والمقدار الأدنى المقبول للإشارة المستقبلة، كي تحقق جودة الإرسال والاستقبال التوافق مع المعايير المعتمدة. إضافة إلى ما سبق تُجري الوحدة المتحركة حساباً لمعيار تحميد الإشارة (C1) الذي يدل على جودة الإشارة المستقبلة (انظر الفصل ٤). فإذا كانت استطاعة هذه الإشارة تقلُّ عن المقدار الأدنى المطلوب (الذي جرت قراءته)، تنتقل الوحدة إلى التردد التالي، وهكذا.

مما تقرؤه الوحدة المتحركة أيضاً موسطات خاصة تدل على كون الخلية متاحة لولوج أي مشترك أم فئة محدودة فقط، وكذلك معلومات تبين الأولوية التي تتميز بها الخلية من ناحية وجوب شَغْلِها بالمشتركين، لتخفيف العبء عن الخلايا المجاورة، وفي ذلك تفصيلٌ كثيرٌ يخرج عرضه عن سياق نقاشنا.

إذا كانت كل الشروط المتعلقة بالنفاذ إلى الشبكة محققة، تعتبر الوحدة المتحركة أن الخلية التي قرأت المعلومات عنها هي الأنسب للارتباط بالشبكة والنفاذ إليها، ويجري إيعازٌ من طبقات التحكم (RR) بإبقاء مرشحات الاستقبال موافقة للتردد

الذي جرى اختياره. يُطلق على هذا الإجراء مصطلح "Camping on the Cell"، وهو تعبيرٌ مجازي يُقصد به أن الوحدة "حطت رحلها" ضمن الخلية المُختارة.

كانت هذه أهم الخطوات التي تتبع تشغيل الجهاز، وهناك بعض النقاط التوضيحية الأخرى المرتبطة بهذه الخطوات والتي تجدر الإشارة إليها:

- لم يجر ضمن كل ما عرضناه أي إرسالٍ للمعلومات من طرف الوحدة المتحركة إلى الشبكة، ما يعني أن الخطوات السابقة تقود إلى اختيار الوحدة المتحركة لقناة BCCH، دون إعلام الشبكة بأنها -أي الوحدة- ضمن منطقة تغذية هذه الخلية. فإذا كان الجهاز مطفأً وفُعِّلَ بعد مدة طويلة نسبياً، وفي بلد مختلف، يجب إتْبَاعُ الإجراءات السابقة بإجراءٍ آخر يُعرف باسم "تسجيل مكان وجود الوحدة المتحركة" "Location Registration"، ويُشار إليه اختصاراً بتعبير "Registration". يمثل هذا الإجراء حالةً خاصة من إجراءات "تحديث رقم منطقة الوجود" "Location Update"، التي سنتناولها بالتفصيل لاحقاً.

- تتيح الوحدات المتحركة للمستخدم تحديد كيفية اختيار الشبكة الأنسب بعد التفعيل، حيث يُمكن له "اختيار شبكة محددة على نحوٍ قسري" "Manual Network Selection"، كما يمكن اعتماد "الخيار التلقائي" "Automatic Selection"، الذي تختار الوحدة المتحركة بموجبه الشبكة ذات الإشارة الأفضل. ووفقاً للاختيار المعتمد تختلف الخطوات التي ذكرناها على نحوٍ طفيف.

- بعد إتمام إجراءات اختيار الخلية وتسجيل مكان الوجود، تنتقل الوحدة المتحركة من حالة IMSI-Detached إلى حالة السكون (Idle)، وتبقى في هذه الحالة إلى أن تكون طرفاً في اتصال مع الشبكة، أو تُجري تحديثاً لرقم منطقة وجودها. ولا يعني وصف الوحدة المتحركة بتعبير (Idle) أنها ساكنة فعلاً، إذ تنجز أثناء هذه الحالة الإجراءات التالية:

  - الإنصات المستمر لقناة النداء، وذلك لرصد أية مكالمة واردة خاصة بها.

  - إجراء قياسات مستمرة لقوة الإشارة المستقبلة من الخلية الحالية ومن الخلايا المجاورة (6 على الأقل)، فإذا تبين نتيجةً للقياسات أن إشارة خلية مجاورة صارت هي الأفضل، تقوم الوحدة المتحركة بما يسمى بـ "Cell Reselection"، أي إعادة اختيار الخلية، أو اختيار خلية بديلة[1]. وإذا تبين أيضاً بعد قراءة المعلومات من قناة BCCH الخاصة بالخلية الجديدة أنها تقع ضمن منطقة وجود جديدة، قاد اختيار الخلية الجديدة إلى إطلاق إجراءات تحديث رقم منطقة الوجود، (انظر البحث الخاص بذلك). هذا ويرتبط اختيار الخلية البديلة بقياساتٍ خاصة لقوة الإشارة، كما يتطلب تحقق شرطٍ محدد يُعرف باسم "C2-Criterion"، يمكن الرجوع إلى التفاصيل المتعلقة به في [١٠].

[1] أشرنا سابقاً في هذا الفصل إلى أن هذا الإجراء يعرف أيضاً باسم Roaming.

٧-٣-٢ طلب النفاذ العشوائي وتخصيص قناة فيزيائية

كنا أشرنا في الفصل ٤ إلى مبادئ طلب النفاذ العشوائي وتنسيق ولوج أو نفاذ أكثر من مشترك اعتماداً على الآليات التي يقدمها بروتوكول S-ALOHA، ونشرح في ما يلي خطوات طلب النفاذ من ناحية رسائل التحكم التي تتبادلها مكونات الشبكة فيما بينها ومع الوحدة المتحركة (انظر الشكل ٧-١٦).

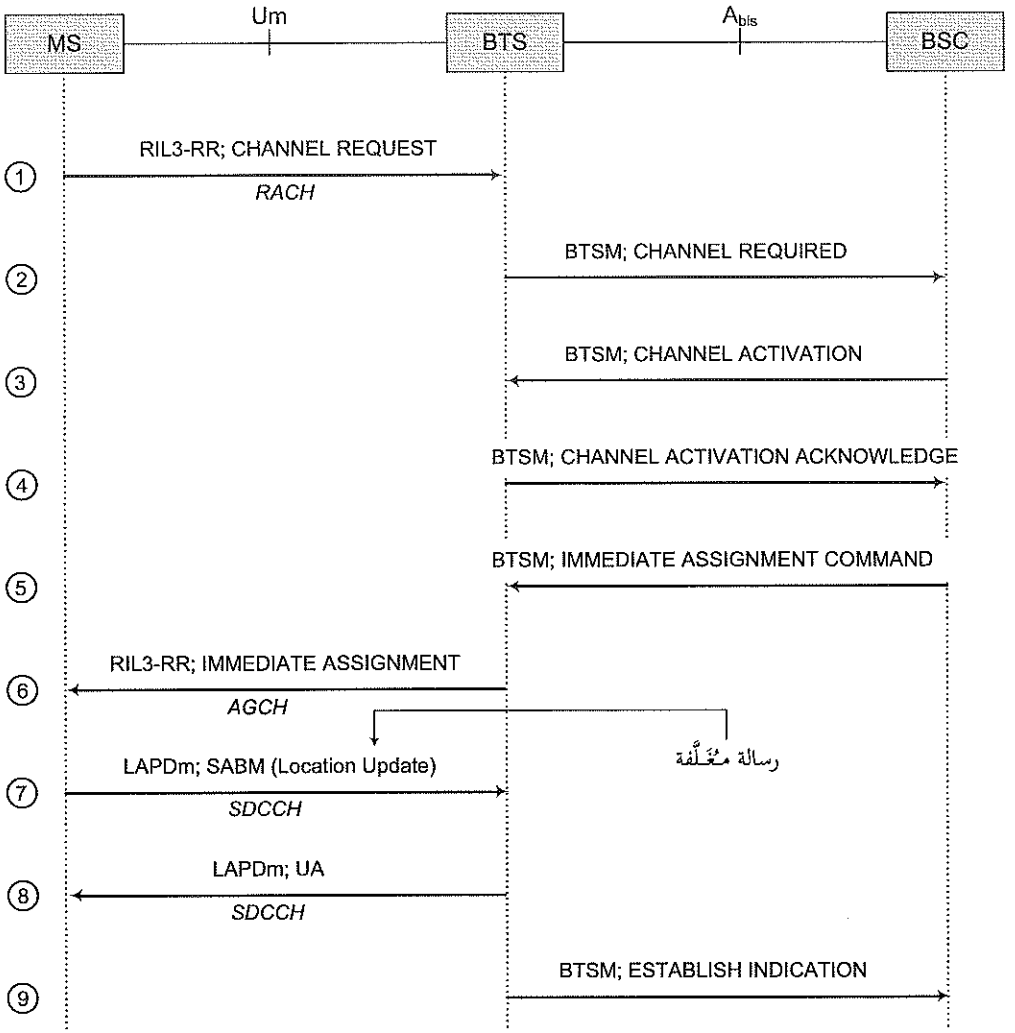
١) عند رغبة أي مشترك في إجراء اتصالٍ ما أو النفاذ إلى الشبكة، يجب أن يحصل على قناة تحكم مخصصة من صنف SDCCH، فهذه القناة هي التي تُستخدم لتبادل معلومات التحكم الأساسية أثناء طور إنشاء الاتصال، لذا تطلب الوحدة المتحركة من الشبكة عبر رسالة (RIL3-RR; CHANNEL REQUEST) تخصيص قناةٍ لها.
تستخدم الوحدة المتحركة قناة RACH لإرسال طلبها، وقد يكون من الضروري تكرار إرسال الطلب في حالة وجود تعارضٍ مع مشتركين آخرين يطلبون النفاذ في الوقت نفسه (انظر الفصل ٤ لتفاصيل تنسيق ولوج المشتركين).
تحوي الرسالة التي يرسلها المشترك حقلاً يدل على سبب طلب النفاذ من الشبكة، مثل "تحديث رقم منطقة الوجود" "Location Update" أو "مكالمة صادرة" "Mobile Originating Call (MOC)"، وحقلاً يحوي رقماً عشوائياً، يُستخدم كهوية للوحدة المتحركة التي صدرت الرسالة عنها (انظر الشكل ٤-١٤). هذا ونُذكِّرُ بأن سبب طلب النفاذ يفيد في تحديد أولوية الاتصال، ولا يمثل وصفاً شاملا للخدمة التي يطلبها المشترك، إذ يأتي ذلك لاحقاً.

٢) لما كانت وحدة التحكم هي المسؤولة عن إدارة الموارد الراديوية (المحطة الثابتة ليست مخولة بتخصيص القنوات الفيزيائية) يجري تمرير طلب النفاذ إلى وحدة التحكم BSC وذلك عبر رسالة (BTSM; CHANNEL REQUIRED)، ويكون استلام هذه الرسالة إيذاناً لوحدة التحكم بأن المحطة الثابتة قد استلمت طلباً للنفاذ.
تكون رسالة (BTSM; CHANNEL REQUIRED) حاملة لمعلومات عديدة، منها سبب طلب النفاذ، وموسطاً يدل على المدة التي تطلبها وصول الرسالة من الوحدة المتحركة، ويُستخدم من قبل وحدة التحكم لحساب القيمة المناسبة لمقدار "تقديم توقيت الإرسال" "Timing Advance"، والتي يجب على الوحدة المتحركة أن تلتزم بها.

٣) في حال توفر قناة فيزيائية شاغرة، تقوم وحدة التحكم بإصدار أمر إلى المحطة الثابتة بتفعيل قناةٍ فيزيائية راديوية تحدِّد وحدة التحكم خصائصها بدقة، وتُخصص هذه القناة الفيزيائية لحمل معلومات قناة اعتبارية هي في غالب الأحيان قناة SDCCH. يجري الطلب عن طريق رسالة (BTSM; CHANNEL ACTIVATION) التي تحمل تفاصيل عديدة أهمها (انظر [١٢]):

- رقم القناة "Channel Number": يدل هذا الرقم على رقم الحيز الزمني الحامل للقناة.
- نمط التفعيل: يُقصد بالنمط هنا نوعية تخصيص القناة، فإذا كان هذا التخصيص أولياً، أي يجري لأول مرة أثناء الاتصال الحالي، فإنه يُعرف باسم "Immediate Assignment"، أما إذا كان التخصيص يشمل خص المشترك بقناة TCH لتبادل المعلومات الفعلية، وذلك بعد استكمال إجراءات التحضير باستخدام قناة SDCCH، أو تخصيص قناة TCH جديدة أثناء عملية التسليم، فإن التعبير المستخدم هو "Channel Assignment".

- نوع القناة "Channel Mode": يحدد هذا الموسط صنف القناة الاعتبارية المخصصة، وذلك تبعاً لنمط الاتصال، فقد يجري تخصيص قناة تحكم (SDCCH/4, SDCCH/8, ...) أو قناة معلومات لحمل إشارة كلامية (TCH/F, TCH/H)، أو قناة لتبادل المعطيات.



الشكل ٧-١٦: خطوات طلب النفاذ العشوائي وتخصيص الموارد الراديوية لمباشرة الاتصال.

- طاقة الإرسال المطلوبة من طرف المحطة (BTS-Power) ومن طرف الوحدة المتحركة (MS-Power): تُعلم وحدة التحكم المحطة الثابتة بالطاقة المناسبة لبثها، وبمقدار الطاقة التي يجب أن يُطلب من الوحدة المتحركة الالتزام به.

بعد تفعيل القناة تصبح المحطة قادرة على إرسال معلومات تحكم خاصة على قناة SACCH، التي تكون مقترنة بقناة SDCCH، كما تصير قادرة على استقبال نتائج القياسات الدورية.

٤) بعد تفعيل القناة، ترسل المحطة الثابتة إلى وحدة التحكم رسالةً للإعلام بإتمام تفعيل القناة، وهذه الرسالة هي (BTSM; CHANNEL ACTIVATION AKNOWLEDGEMENT).

٥) ترسل وحدة التحكم رسالة (BTSM; IMMEDIATE ASSIGNMENT COMMAND) تطلب فيها من المحطة الثابتة تخصيص القناة التي جرى تفعيلها للوحدة المتحركة المعنية، وإعلام هذه الوحدة بذلك عن طريق توجيه رسالة IMMEDIATE ASSIGNMENT إليها.

٦) ترسل المحطة الثابتة رسالة (RIL3-RR; IMMEDIATE ASSIGNMENT) إلى الوحدة المتحركة المعنية، تُعلمها بها بكل التفاصيل المتعلقة بالقناة التي خصصت، والتي نفترض أنها قناة SDCCH. وتُحمل هذه الرسالة على قناة إجابة طلب النفاذ AGCH. وهذه القناة التي جرى تخصيصها، أي قناة SDDCH، هي التي تُستخدم لمتابعة تبادل رسائل التحكم مع مركز التبديل وشبكة النفاذ، وذلك إلى أن يجري تخصيص قناة TCH لتبادل المعلومات الفعلية (في حال كان طلب النفاذ هو إصدار أو استقبال مكالمة).

٧) ما جرى تبادله لغاية الآن هو رسائل تتعلق بتعريف القناة التي ستستخدم لنقل رسائل التحكم، لذا يجب في خطوة تالية مباشرةً تعريفِ السياق الخاص بالاتصال بين الوحدة المتحركة والمحطة الثابتة، وذلك كي يتاح تمييز هذا السياق عن غيره باستخدام آليات العنونة التي يعتمدها بروتوكول LAPDm (انظر الشكل ٧-٤ والشكل ٧-٥).

ترسل الوحدة المتحركة لهذا الغرض رسالة (LAPDm; SABM) على قناة SDCCH، وتكون هذه الرسالة هي الأولى التي تتوجه بها إلى المحطة الثابتة، لتعريف سياق الاتصال الحالي ولمباشرة نمط تبادل المعلومات مع الإقرار (انظر الشكل ٧-٦).

تحمل رسالة SABM طلب الوحدة الفعلي، الذي يحدد سبب طلب النفاذ إلى الشبكة، والذي نفترض أنه تحديث رقم منطقة الوجود. يتمثل الطلب في هذه الحالة برسالة (RIL3-MM; LOCATION UPDATE REQUEST)، التي تصدر عن المجموعة الوظيفية الخاصة بإدارة التجوال (MM)، أي عن الطبقة الثالثة، وتكون هذه الرسالة مغلَّفة (Encapsulated) ضمن رسالة SABM.

تـُرفق الوحدة بهذه الرسالة رقم IMSI، وصنف تحديث رقم منطقة الوجود (سنبين الأصناف المختلفة لاحقاً)، إضافة إلى تفاصيل أخرى.

٨) ترسل المحطة الثابتة للوحدة المتحركة ضمن رسالة (LAPDm; UA) إقراراً باستلام الرسالة السابقة، وإعلاماً لها بأن مسار الاتصال الموثوق قد جرى إنشاؤه.

٩) بعد استلام رسالة SABM، تُمرِّر المحطة الثابتة طلب الوحدة المتحركة إلى وحدة التحكم عبر رسالةٍ هي (BTSM; ESTABLISH INDICATION). تحمل هذه الرسالة طلباً لوحدة التحكم بتعريف سياقٍ خاص للاتصال بين المحطة ووحدة التحكم، وذلك كي يكتمل مسار تبادل المعلومات المعرّف لهذا الاتصال بين الوحدةالمتحركة ووحدة التحكم، حيث أن التعريف الذي جرى في الخطوة رقم ٧ شمل سياق الاتصال لغاية المحطة فقط.

تمثل هذه الرسالة أيضاً ايعازاً إلى وحدة التحكم بإرسال فحوى رسالة الطبقة الثالثة المذكورة في الخطوة رقم ٧، والتي تكون

مغلفة، إلى مركز التبديل عند الحاجة، أي أن هذه الرسالة تحمل إلى مركز التبديل تعريفاً بالخدمة التي تطلبها الوحدة المتحركة، لذا تُعرف هذه الخطوة أيضاً باسم "خطوة طلب الخدمة" "Service Request".

بذلك تكون خطوات تخصيص الموارد الراديوية للاتصال وتعريف سياقٍ خاص به قد اكتملت، أي أن مسار تبادل المعلومات على الرابط الراديوي يكون قد تحدد من ناحية القناة الفيزيائية ومن ناحية الصلة الموضوعية، لذا يُطلق على الخطوات السابقة تعبير "RR Connection Setup".

٧-٣-٣ التوثق وتفعيل التعمية

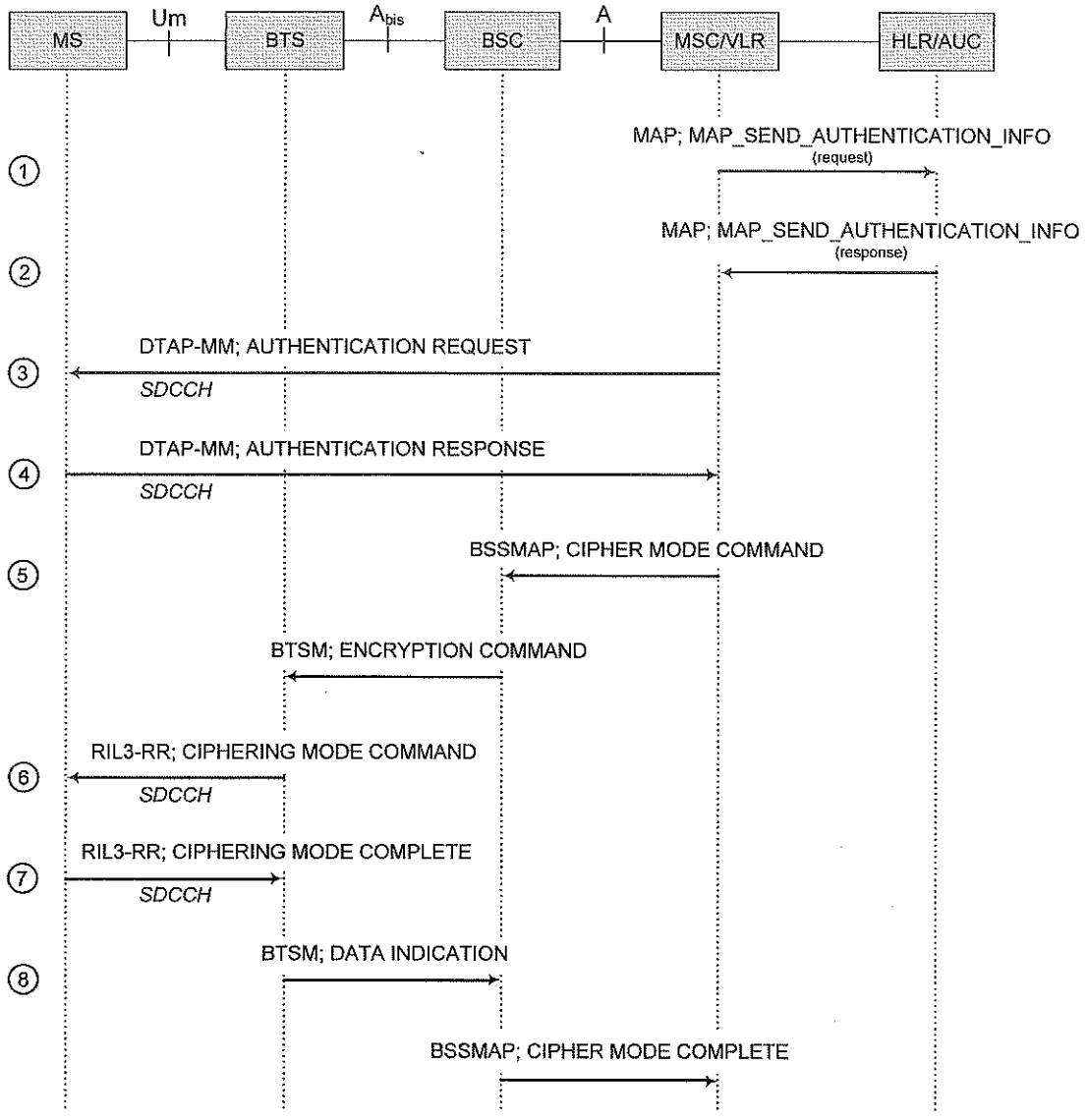
تعتبر إجراءات التوثق والتعمية جزءاً من تسلسل الخطوات التي يتطلبها كلّ من تحديث رقم منطقة وجود المشترك، أو إنشاء الاتصال (المقصود بالإنشاء هنا الخطوات المتعلقة إما بالتحضير لاستقبال مكالمة واردة أو لإصدار مكالمة)، وأهم التفاصيل المرتبطة بذلك هي (انظر الشكل ٧-١٧):

١) يرسل سجل VLR رسالة (MAP; MAP_SEND_AUTHENTICATION_INFO) إلى سجل HLR، يطلب فيها موسطات أو معاملات التوثق الخاصة بهوية المشترك (IMSI).
يرسل سجل HLR هذا الطلب بدوره إلى مركز التوثق (AUC)، الذي يستخلص -اعتماداً على هوية المشترك- رقم Ki المقترن بهذه الهوية، والذي يقرؤه من قاعدة البيانات التي يتضمنها هذا المركز.
بعد ذلك يجري في مركز AUC توليد رقم عشوائي RAND، ويُستخدم هذا الرقم مع رقم Ki كدخلٍ لخوارزميات A3 وA8، أو لخوارزمية COMP 128، وذلك للحصول على رقم إجابة (SRES)، ومفتاح تعمية (Kc) (انظر الفصل ٦).
بذلك يكتمل توليد ثلاثيةِ توثق وتعمية (Triplet)، مؤلفة من (RAND, SRES, Kc)، وذلك ضمن مركز التوثق، الذي يرسلها بدوره إلى سجل HLR.

٢) يرسل سجل HLR الثلاثية المولّدة إلى سجل VLR ضمن رسالة (MAP; SEND_AUTHENTICATION_INFO)، وتمثل هذه الرسالة إجابةً (response) على الرسالة الأولى.
هذا وننوه إلى أن نظام GSM يسمح لسجل VLR بطلب أكثر من ثلاثية توثيق على نحوٍ مسبق (خمسة على الأكثر)، حتى لا يجري طلبها عند كل محاولة اتصال. فإذا كان قد سبق تسجيل المشترك في سجل VLR وجرى طلبُ ثلاثياتٍ له، وكان السجل ما زال لم يستخدمها كلها، فإنه يستخدم واحدةً منها. أما إذا لم يكن لدى السجل ثلاثيات خاصة بالمشترك، أو كان عددها قد شارف على النفاد، فإن السجل VLR يرسل طلبه مرفقاً بعدد الثلاثيات التي يحتاجها. وهذا يعني أن الخطوة الأولى تكون غير ضرورية عند توفر هذه الثلاثيات لسجل VLR.

٣) يرسل سجل VLR إلى مركز التبديل MSC رسالة تتضمن إيعازاً بأن على الشريحة أن تبرهن وثوقيتها، ويرفِق السجل مع هذا الطلب الرقم العشوائي RAND، بينما يحتفظ برقم SRES، وبمفتاح التعمية Kc.
بناءً على ذلك، يرسل المقسم إلى الوحدة المتحركة MS رسالة (DTAP-MM; AUTHENTICATION REQUEST)،

متضمنة الرقم العشوائي RAND، الذي تستخدمه لحساب نسخة خاصة بها من SRES و Kc، (انظر الشكل ٦-١٩). هذا وتُرسل رسالة (DTAP-MM; AUTHENTICATION REQUEST) عبر الرابط A_{bis} بحيث تكون مغلَّفة أو متضمنة في رسالة (BTSM; DATA REQUEST)، كما تُستخدم قناة SDCCH التي تكون قد خُصصت سابقاً لحمل الرسالة على الرابط الراديوي.



الشكل ٧-١٧: تسلسل خطوات التوثق والتعمية.

٤) ترسل الوحدة المتحركة نسختها من SRES إلى المقسم برسالة (DTAP-MM; AUTHENTICATION RESPONSE)، وباستخدام قناة SDCCH. وبعد استلام الرسالة، يمررها المقسم إلى سجل VLR الذي يُجري مقارنة بين

النسخة التي أرسلها مركز التوثق، وتلك التي أرسلتها الوحدة المتحركة. فإذا كانتا متطابقتين، تُعتبر الشريحة قد اجتازت اختبار التوثق، أما في حالة عدم التطابق، فإن المقسم يرسل رسالة رفضٍ (DTAP-MM; AUTHENTICATION REJECT) إلى الوحدة المتحركة، وذلك بغية إيقاف كل إجراءات التشوير. هذا ونفترض في الخطوات التالية أن نتيجة اختبار التطابق إيجابية.

٥) يطلب المقسم من المحطة الثابتة تفعيل إجراءات التعمية الخاصة بقناة الاتصال، وذلك باستخدام رسالة (BSSMAP; CIPHER MODE COMMAND)، وتحمل هذه الرسالة مفتاح التعمية Kc الذي سبق حسابه في مركز التوثق وإرساله إلى المقسم.

٦) تستخلص المحطة الثابتة مفتاح التعمية من الرسالة، ثم ترسل أمراً إلى الوحدة المتحركة بتفعيل التعمية على قناة المسار الصاعد. والرسالة التي تُستخدم لذلك هي (RIL3-RR; CIPHERING MODE COMMAND)، وتُحمل على قناة SDCCH.

٧) تستخدم الوحدة المتحركة مفتاح التعمية Kc الذي جرى توليده أثناء إجراءات التوثق، كما ترسل إقراراً (Confirmation) باستلام إيعاز التعمية.

٨) تُرسل المحطة الثابتة -بعد أن تفعّل إجراء التعمية على المسار الهابط- رسالةً إلى المقسم تبلغه فيها بأن إجراءات تفعيل التعمية قد نُفِّذت، ويُحمل هذا الإبلاغ أو الإعلام على الرابط A_{bis} في رسالة (BTSM; DATA INDICATION)، وعلى الرابط A ضمن الرسالة (BSSMAP; CIPHER MODE COMPLETE).

ملاحظات إضافية:

- من الممكن تفعيل إجراءات التوثق عند كل تحديثٍ لرقم منطقة وجود المشترك، وعند كل طلب ولوج إلى الشبكة، أو طلبٍ لخدمة من الخدمات. ولا شك أن هذا الإجراء يتطلب مواردَ من الشبكة لتبادل معلومات التحكم، كما يعني أيضاً وقتاً إضافياً لإنجاز إجراءات طلب الخدمة من الشبكة. كذلك يمكن تفعيل إجراءات التعمية في الشبكة بحيث تخضع لها كل المعلومات التي يتبادلها المشترك مع الشبكة عبر المنفذ الراديوي، وذلك بعد استكمال إجراء التوثق. غير أن كلاً من هذين الإجراءين (التوثق والتعمية) يمثل إجراءً خيارياً يخضع لما تقرره سياسة مشغل الشبكة، فمن الممكن تجاوز إجراءات التوثق ضمن الشبكة، كما من الممكن عدم تفعيل التعمية على الإطلاق. وتوجد موسطات خاصة بذلك يمكن أن تُستخدم للتحكم بنظام تشغيل مكونات الشبكة.

- في حالة فشل اختبار التوثق وكانت الإجراءات مستندة إلى رقم TMSI، أي أن المشترك كان ضمن منطقة وجود لم يبدلها ويحاول فقط إجراء اتصال جديد، فإن الشبكة تطلب -في محاولةٍ جديدة- أن تُنجز إجراءات التوثق باعتماد رقم IMSI الحقيقي، وتطلب من الوحدة المتحركة إرساله. فإذا جرت محاولة التوثق باعتماد الهوية الحقيقية (IMSI) ولم يكن اختبار تطابق رقمَيْ SRES ناجحاً، ترسل الشبكة رسالة رفضٍ للتوثق (AUTHENTICATION REJECT) وتمحو كلاً من

رقم TMSI ورقم LAI ورقم Kc من سجل VLR، كما تضع إشارة مميزة على رقم IMSI المعني تشير إلى أنه في وضع (IDLE NO IMSI). وفي هذا الوضع، لا يُسمح لهذا الرقم إلا بقراءة قناة BCCH وبإصدار مكالمات طارئة، ما يعني حجب الشريحة عن الاستخدام.

ولما كان من الممكن -أحياناً- حدوث أخطاء في تبادل المعلومات، أو أن تكون الوحدات البرمجية ضمن نظم تشغيل المكونات المختلفة للشبكة ما زالت تحوي أخطاءً في خوارزمياتها، يوجد مُوسِطٌ خاص في المقسم يتيح تفعيل آلياتٍ أكثر مرونةً في التعامل مع مثل هذه الحالة. وعند تفعيل هذه الآليات، فإن المقسم لا يرسل الرسالة التي تؤدي إلى حجب الشريحة (AUTHENTICATION REJECT)، بل يستعيض عنها برسالة بديلة، مفادها بأن محاولة الولوج إلى الشبكة غير ناجحة. وهذه الرسالة تختلف تبعاً للسبب الذي استدعى محاولة الولوج. من الأمثلة على ذلك:

- تـُرسل رسالة (IMSI UNKNOWN IN VLR) في حالة كان المشترك قد حاول النفاذ لإصدار أو مباشرة مكالمة (Mobile Originating. Call).
- تـُرسل رسالة (PLMN Not ALLOWED) في حالة كان إجراء التوثق مرتبطاً بتحديث رقم منطقة الوجود.
- عندما يحاول أحدٌ طلبَ مشترك آخر، ويكون الطرف المطلوب هو الذي فشلت محاولة التوثق الخاصة به، لا تـُرسل أية رسالة، وإنما تظهر فقط إشارة انقطاع محاولة الاتصال.

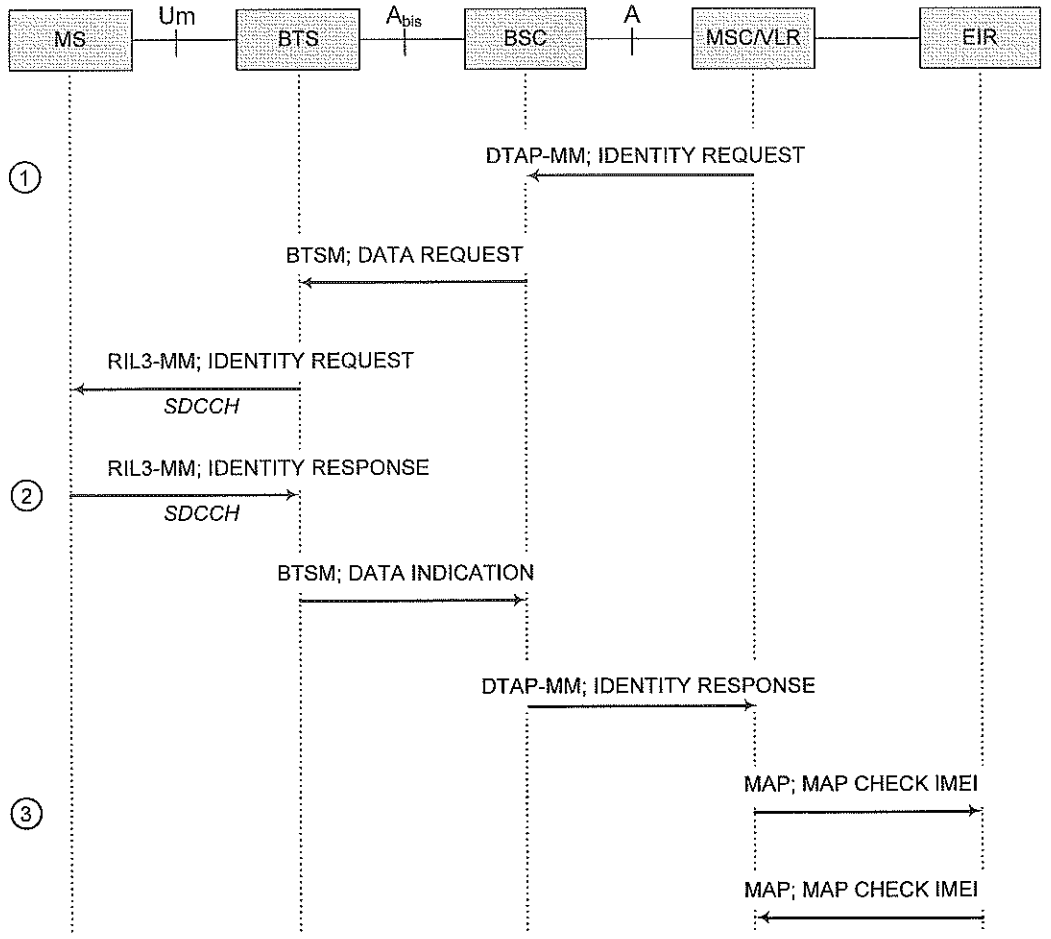
٧-٣-٤ التحقق من جواز استخدام الوحدة المتحركة

يكمن الهدف الأساسي من اختبار جواز استخدام الوحدة المتحركة في قراءة رقمها التسلسلي (IMEI)، ومقارنته باللوائح التي يحفظها سجل EIR، والتأكد من عدم وجود ملاحظات فنية أو قانونية تحول دون الإستفادة من خدمات الشبكة عبر استخدام الجهاز المعني. وقد سبق التنويه إلى أن اختبار وضع الجهاز أو الوحدة المتحركة إجراء اختياري، يتبع سياسة المشغل والقوانين الناظمة ضمن الدولة التي توجد فيها الشبكة. لذا، لا تمثل هذه الخطوات جزءاً ملزماً من خطوات الولوج أو النفاذ إلى الشبكة.

يُنجز إجراء التحقق من وضع الجهاز بعد خطوة التعمية، كي تكون رسائل التشوير التي تحمل هوية الجهاز مُعمَّاة، ومن ثم الحفاظ على خصوصية المعلومات الخاصة بالمشترك وجهازه، وأبرز الخطوات ضمن هذا الإجراء ما يلي (انظر الشكل ٧-١٨):

١) يرسل مركز التبديل MSC طلباً إلى الوحدة المتحركة سائلاً إياها تزويده برقم IMEI، ويوجَّه هذا الطلب ضمن رسالة (DTAP-MM; IDENTITY REQUEST)، وتتضمن هذه الرسالة حقلاً يبين أن المعلومات المطلوبة هي IMEI، إذ من الممكن أيضاً استخدام الرسالة نفسها لطلب هوية المشترك (IMSI). تمرر هذه الرسالة إلى الوحدة المتحركة على نحوٍ خفي، وقد نوهنا إلى أن رسائل DTAP تتميز بأنها لا تُقرأ ضمن شبكة النفاذ.

توجَّه رسالة DTAP إلى وحدة التحكم BSC، ومنها إلى المحطة الثابتة عبر رسالة (BTSM; DATA REQUEST). وبدورها، تنقل المحطة الثابتة هذا الطلب عبر رسالة (RIL3-MM; IDENTITY REQUEST) إلى الوحدة المتحركة.



الشكل ٧-١٨: تسلسل خطوات التحقق من وضع الجهاز المستخدم للاتصال.

٢) تجيب الوحدة المتحركة الطلب برسالة (RIL3-MM; IDENTITY RESPONSE)، التي تزوّد عبرها الشبكة برقم IMEI المطلوب. وتمرَّر هذه الرسالة عبر شبكة النفاذ على نحوٍ خفي (Transparent) مرة أخرى، أي عبر رسالة (BTSM; DATA INDICATION) من المحطة الثابتة إلى وحدة التحكم، ورسالة (DTAP-MM; IDENTITY RESPONSE) من وحدة التحكم إلى مركز التبديل.

٣) يرسل مركز التبديل إلى سجل EIR رسالة (MAP; CHECK IMEI)، التي تعني للسجل وجوب مقارنة رقم IMEI الذي يكون مقترناً بالرسالة كموسطٍ باللوائح الثلاثة التي تكون موجودة ضمن قاعدة البيانات أو المعطيات الخاصة به.
وتبعاً لما تقود إليه المقارنة، يُعيد EIR لمركز التبديل واحدة من حالات ثلاثة محتملة، وهي: الجهاز ضمن اللائحة البيضاء، أو الرمادية، أو السوداء، وذلك ضمن رسالة MAP خاصة (MAP; CHECK IMEI)، تتضمن نتائج المقارنة.
إذا كان الجهاز ضمن اللائحة السوداء، يقوم مركز التبديل بإيقاف أو قطع خطوات الاتصال، أما إذا كان الجهاز ضمن اللائحة الرمادية، فالأمر متروكٌ للمشغل وسياسته.

٧-٣-٥ تحديث رقم منطقة الوجود

لا يمكن للشبكة أن توجه مكالمةً واردة للمشترك "Mobile Terminating Call (MTC)" دون معرفة مكان وجوده الحالي، أي رقم منطقة الوجود (LAI) التي يوجد المشترك ضمن مجال تغذية إحدى الخلايا التي تنتمي إليها.
يجري حفظ رقم LAI في موضعين ضمن الشبكة هما سجل VLR الذي يوجد المشترك ضمن منطقة خدمته، وذاكرة الشريحة SIM، وهناك ثلاث حالات مختلفة تتطلب تحديثاً لرقم منطقة وجود المشترك، لذا يجري التمييز بين ما يلي:

- **تحديث رقم منطقة الوجود الاعتيادي:** يكون ذلك عند ولوج المشترك منطقة تغذية خليةٍ ما، ضمن منطقة وجودٍ مختلفة وذات رقم LAI لا يتطابق مع ذاك الذي تحفظه الشريحة في ذاكرتها. يُعرف هذا الإجراء باسم "التحديث القسري لرقم منطقة وجود المشترك" "Forced Registration" أو "Location-Update Type Normal".

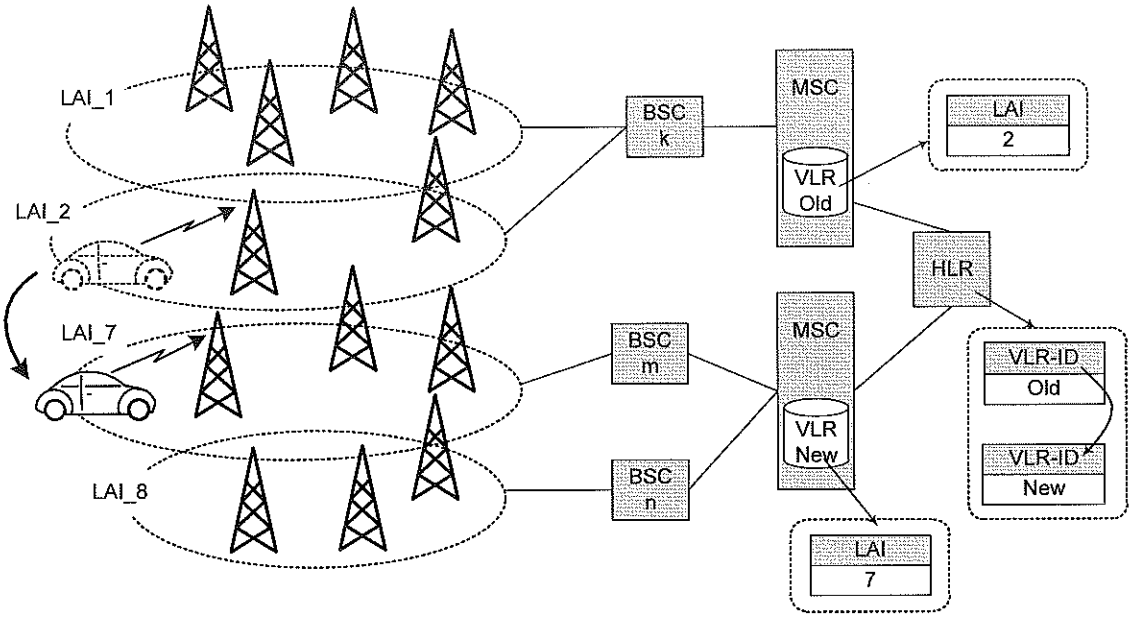
- **التحديث الدوري لرقم منطقة الوجود:** عندما يُطفئ المشترك جهازه، يقود ذلك إلى انفكاك الارتباط القائم بين الشريحة والشبكة، وانتقال حال الشريحة إلى وضع "IMSI-Detached". يتيح نظام GSM لمثل هذه الحالة إجراءً خيارياً للمشغل، يُعرف باسم "IMSI-Detach"، يقتضي بإرسال رسالة إشعار من الوحدة المتحركة إلى سجل VLR وذلك لإعلامه بأن الوحدة ستكون في حالة انفكاك عن الشبكة ولا يمكن لها أن تستقبل أية مكالمات واردة. بعد استلام هذه الرسالة، يرفق سجل VLR رقم IMSI الخاص بالمشترك بعلامةٍ أو إشارةٍ تدل على أنه خارج نطاق التغطية أو لا يمكن الوصول إليه، كما يُعلَمُ سجل HLR بهذا الوضع الذي يقود إلى الرفض المباشر لأية مكالمة واردة إلى المشترك، دون إطلاق أية رسالة نداء إليه، حفاظاً على موارد الشبكة من الاستخدام غير المجدي.

لمَّا كان إجراء IMSI-Detach خيارياً وغير ملزم للمشغل، أمكن إطفاء الوحدة المتحركة دون تنفيذه، وهذا يقود إلى حالاتٍ يكون فيها الجهاز مطفأً دون أن يكون سجل HLR على دراية بذلك. من الممكن أيضاً أن تتعرض بعض المعلومات المتعلقة بالمشترك للضياع عند تبادلها بين شبكات مختلفة مثلاً، أو أن يمر المشترك بمنطقة لا تتوفر فيها تغذيةٌ بالإشارة الراديوية، وهذا يؤدي أيضاً إلى عدم معرفة سجل HLR بالوضع الحالي للمشترك من ناحية ارتباطه بشبكة ما. لذا، وتفادياً لإرسال رسائل نداء إلى المشترك دون طائل، تُفَعِّل بعض الشبكات ميزة التحديث الدوري لمكان الوجود. وهذا يؤدي إلى إنجاز أو تنفيذ الخطوات التي سنشرحها في الفقرات التالية على نحوٍ دوري، بغض النظر عن تحرك المشترك أو ولوجه منطقةَ وجود جديدة.

تقرأ الوحدة المتحركة من المعلومات العامة التي تحملها قناة BCCH ما إذا كانت ميزة التحديث الدوري مُستخدمة في الشبكة أم لا، ومن ثمَّ تلتزم الوحدات المتحركة بالتحديث الدوري إذا كانت الميزة مُفعَّلة. كما تحمل قناة BCCH أيضاً معلومات دقيقة عن الدور أو المدة الزمنية التي تفصل بين تحديثٍ وآخر، والتي تتمثل في قيمة مؤقت خاص هو T3212، وهذه المدة الزمنية يحددها المشغل وفق ما يراه مناسباً، وتتراوح بين 6 دقائق و25.5 ساعة.

- **تحديث رقم منطقة الوجود عند تشغيل الوحدة المتحركة:** يقصد بذلك أن إجراءات تحديث رقم LAI تُنجز مع إجراءات تشغيل الوحدة التي عرضناها سابقاً، ويقود ذلك إلى تسجيل ارتباط المشترك بالشبكة عن طريق إعلام سجل VLR بالرقم الذي تقرؤه الوحدة من قناة BCCH.

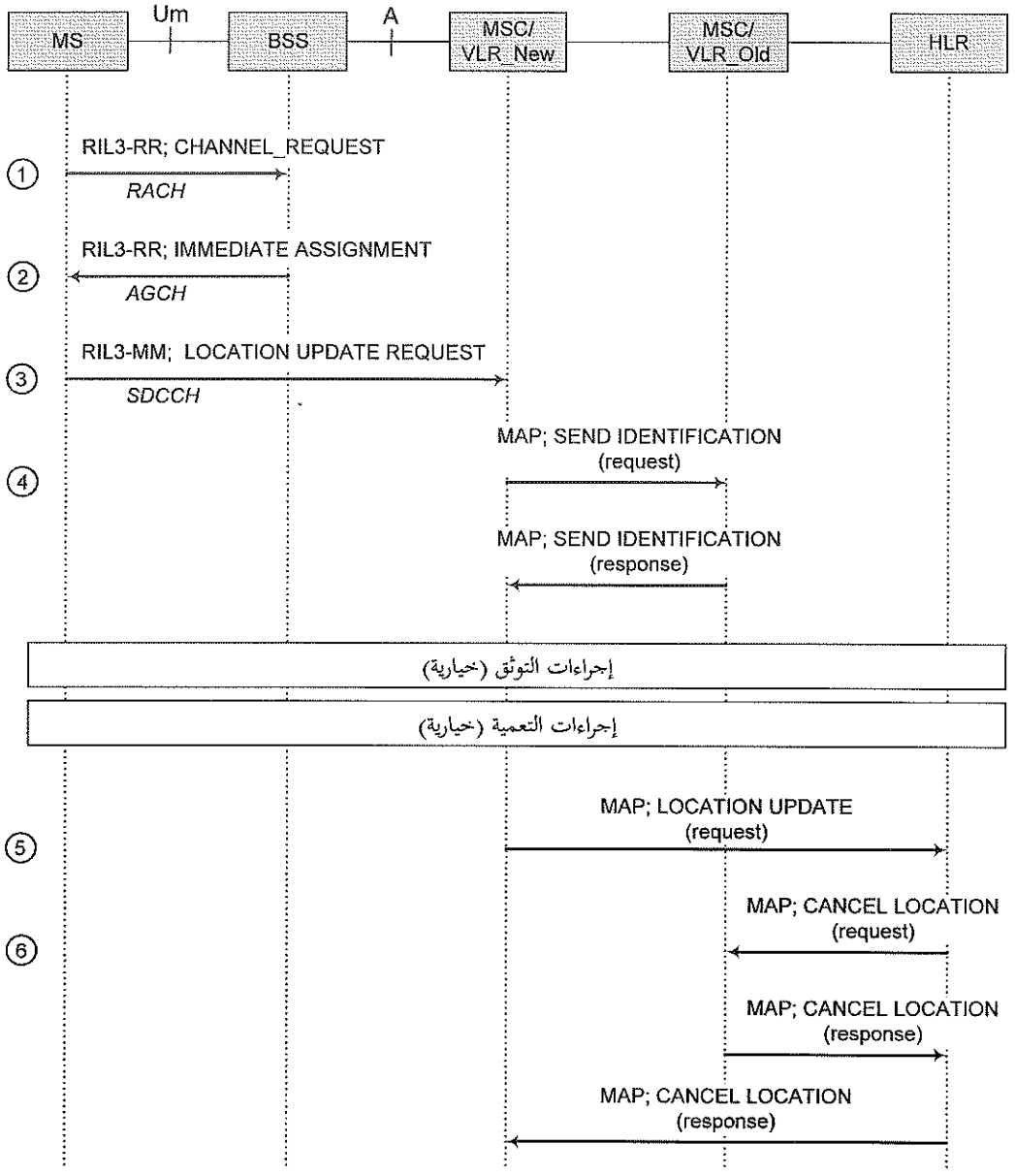
نفترض في الحالة التالية التي نعرض الخطوات المتعلقة بها أن المشترك يلج أثناء تحركه منطقة وجودٍ جديدة، تابعة لسجل VLR مختلف، ندل عليه بـ VLR-New، وذلك لتمييزه عن السجل VLR-Old، الذي كان المشترك مسجلاً ضمن منطقة خدمته. ونفترض أن المشترك يلج منطقة السجل الجديد من خلال انتقاله من منطقة LAI_2 التابعة لـ BSC_m إلى المنطقة ذات الرقم LAI_7 التابعة لـ BSC_m كما هو موضح في الشكل ٧-١٩.



الشكل ٧-١٩: مثال على تغيير منطقة وجود المشترك.

يقود انتقال المشترك في هذه الحالة إلى الخطوات التي يبينها الشكل ٧-٢٠ والتتمات الملحقة به. وقد اخترنا أن نوزع الخطوات على أكثر من شكل جزئي كي تسهُل على القارئ متابعة النص الشارح لكلٍّ من الإجراءات.

١) تتابع الوحدة المتحركة أثناء تحركها –على نحوٍ مستمر– قيمة رقم منطقة الوجود، الذي تقرؤه من المعلومات العامة عن الشبكة التي تُرسل على قناة BCCH على نحوٍ دوري. وتُجري الوحدة مقارنة بين رقم LAI الذي تبثه الشبكة، والرقم المحفوظ في ذاكرة الشريحة، وعند وجود تباين بينهما، ترسل الوحدة رسالة (RIL3-RR; CHANNEL REQUEST) على قناة RACH، تطلب فيها تخصيص قناة SDCCH، وكما سبق البيان عند شرح خطوات طلب النفاذ، تحوي الرسالة حقلاً يدل على سبب طلب تخصيص القناة، وهو في هذه الحالة إجراء تحديثٍ لمكان أو منطقة الوجود (LU).



الشكل ٧-٢٠: خطوات تحديث رقم منطقة الوجود.

٢) بعد استلام رسالة طلب النفاذ، تخصص شبكة النفاذ قناةَ SDCCH للوحدة المتحركة، وتعلم المحطةُ الوحدةَ المتحركة بهذا التخصيص عن طريق إرسال رسالة (RIL3-RR; IMMEDIATE ASSIGNMENT) على قناة AGCH. وهذه القناة المخصصة، أي SDCCH، هي التي تستخدمها الوحدة في الخطوات التالية للتواصل مع الشبكة.

ننوه في هذا الموضع إلى أن تبادل كلا الرسالتين السابقتين يجري ضمن الخطوات المتعلقة بطلب النفاذ للشبكة، والتي شرحناها في البحث السابق. كما ننوه إلى أننا اختصرنا كلاً من المحطة الثابتة BTS ووحدة التحكم BSC بتعبير BSS.

٣) باستخدام القناة التي جرى تخصيصها، ترسل الوحدة رسالة (RIL3-MM; LOCATION UPDATING REQUEST) إلى مركز التبديل، عبر شبكة النفاذ، وذلك لإعلامه بالخدمة المطلوبة. وسبق أن أشرنا إلى أن رسائل بروتوكول DTAP تتيح تبادل رسائل التحكم بين الشبكة المركزية والوحدة المتحركة، وينحصر دور شبكة النفاذ في هذه الحالة في كونها ناقلاً وسيطاً لهذه الرسائل، وغير معنية بقراءة ما تتضمنه من إجراءات.

تكون الرسالة مرفقةً بهوية الوحدة المتحركة (من الممكن أن تكون TMSI عند توفرها، وهذا ما نفترضه في هذا المثال) وبرقم منطقة الوجود الحالية (LAI).

تنقل شبكة النفاذ BSS هذا الطلب إلى مركز التبديل، ويقود ذلك إلى تفعيل أو تعريف سياق اتصال باستخدام بروتوكول SCCP، هذا إذا لم تكن الوحدة نشطة أو منخرطة باتصال قائم مع الشبكة. وهذا الإجراء ضروري كما ذكرنا، كي يتاح للشبكة التمييز بين أكثر من اتصال موازٍ يتعلق بالوحدة ذاتها، فإجراء تحديث رقم منطقة الوجود قد يكون ضرورياً أثناء إجراء المشترك لمكالمةٍ ما أثناء حركته ضمن الشبكة.

يُعلِم مركز التبديل MSC سجل VLR_New بأن وحدةً متحركةً قد طلبت خدمةً من خدمات الشبكة، وتتضمن الرسالة التي يرسلها مركز التبديل هوية الوحدة المتحركة (من الممكن أن تكون TMSI عند توفرها، وهذا ما افترضناه في هذا المثال)، إضافةً إلى رقم LAI القديم، الذي كانت الوحدة مسجلة ضمن المنطقة التي يدل عليها.

يمثل الطلبُ (DTAP-MM; LOCATION UPDATING REQUEST) رسالةً من رسائل الطبقة الثالثة، تكون مُغلَّفة (Encapsulated) أو متضمنة ضمن الرسائل التالية:

- رسالة SABM من الطبقة الثانية على الرابط الراديوي U_m.
- رسالةُ ESTABLISH INDICATION ضمن بروتوكول BTSM على الرابط A_{bis}.
- رسالة (BSSMAP; COMPLETE L3 INFORMATION) على الرابط A بين شبكة النفاذ ومركز التبديل.

٤) يجري في سجل VLR_New تحليلٌ لرقم LAI الذي أُرسل مع رسالة (LOCATION UPDATING REQUEST)، كما يُستنبط من الرسالة أن رقم TMSI –الذي أُرفق بها أيضاً– مسجلٌ في سجل مختلف هو VLR_Old، وأنه يجب تسجيل المشترك ضمن منطقة خدمة VLR_New. ولإنجاز ذلك، يجب أن تكون هوية المشترك الحقيقية (IMSI) معروفة، لأن الهوية المؤقتة (TMSI) تُخصص من قبل كل VLR للمشتركين ضمن منطقة خدمته حصراً، لذا لا يمكن لسجل VLR الجديد الاعتماد على هوية جرى تخصيصها من قبل سجل مختلف (VLR_Old في هذه الحالة).

لذا، يُجري سجل VLR_New اشتقاقاً لهوية VLR_Old باستخدام رقم LAI الذي أُرفق بالرسالة، كما يطلب سجل VLR_New الجديد من السجل القديم VLR_Old إرسال رقم الهوية الحقيقي IMSI الموافق لرقم الهوية المؤقت TMSI، ويجري هذا الطلب باستخدام رسالة (MAP; MAP_SEND_IDENTIFICATION)، التي يرسل السجل القديم إقراراً باستلامها مع رقم IMSI المطلوب.

إذا كانت إجراءات التوثق والتعمية مُفعَّلة ضمن الشبكة، فإنها تُنجز في هذا الموضع من تسلسل الخطوات، على النحو الذي سبق بيانه.

٥) عند هذه اللحظة، يكون سجل VLR_New جاهزاً لإبلاغ سجل HLR بأن المشترك صار ضمن منطقة خدمته، وأنه يجب محوُ البيانات المتعلقة به من سجل VLR-Old. لذا، يقوم سجل VLR_New بتخصيص رقم هاتف مؤقت للمشترك (MSRN)، كما يطلب من سجل HLR تحديث المعلومات الخاصة به، وتُستخدم لهذا الطلب رسالةُ (MAP; MAP_UPDATE_LOCATION)، التي تحمل طيها المعلومات التي يحتاجها HLR، وهي عنوان أو رقم مركز التبديل الذي يوجد المشترك ضمن خدمته الآن، ورقم أو هوية سجل VLR الجديد، ورقم MSRN الذي يمكن استخدامه لتوجيه المكالمات الواردة للمشترك.

٦) بعد ذلك، يطلب سجل HLR من سجل VLR_Old مَحْوَ البيانات والقيود المرتبطة برقم IMSI المعني، فإذا استلم سجل VLR_Old الرسالة، أرسل إقراراً باستلامها وتنفيذها.

٧) بعد أن يقرن سجل HLR المعلومات التي وصلته من سجل VLR_New (MSRN, VLR_New-Id, ...) برقم IMSI المدرج ضمن لوائحه، يرسل نسخةً عن المعلومات الخاصة بالرقم المعني إلى سجل VLR الجديد. تشمل هذه المعلومات على سبيل المثال رقم الهاتف MSISDN، والخدمات المتاحة لهذا الرقم، ولائحة بالخدمات والميزات المدفوعة التي يحق للمشترك الإستفادة منها.

تُستخدم لهذا الغرض رسالة (MAP; MAP_INSERT_SUBSCRIBER_DATA)، التي يرسل سجل VLR الجديد إقراراً باستلامها.

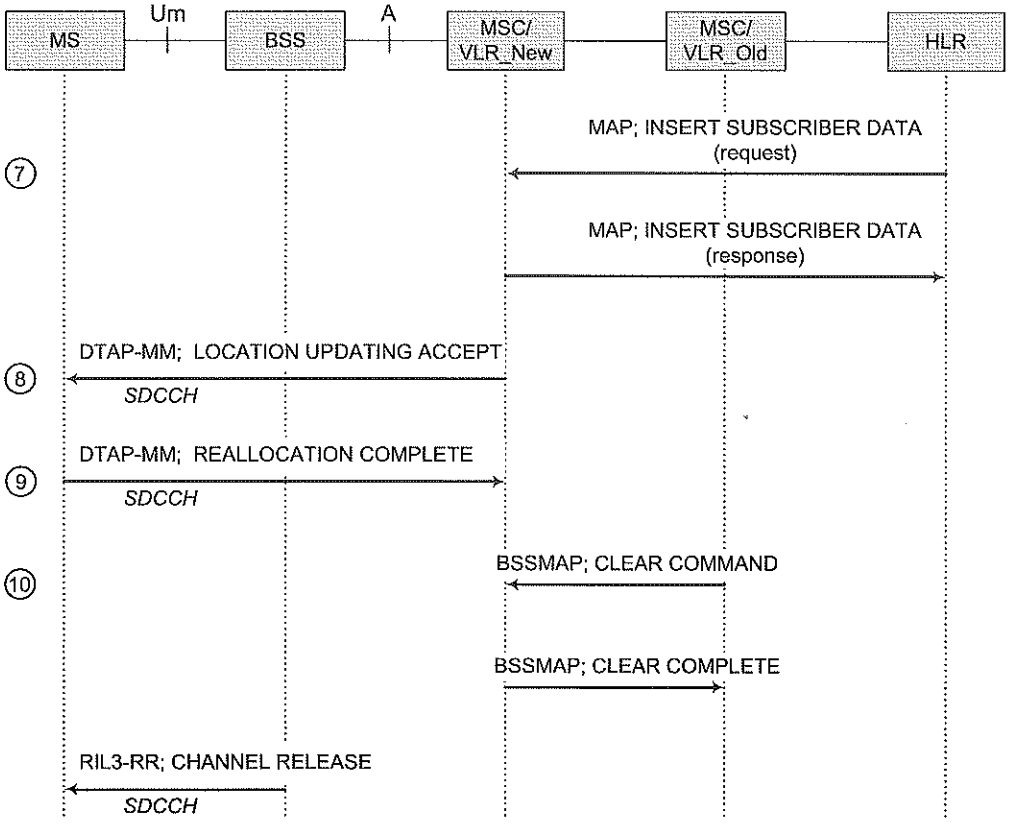
٨) عند هذه اللحظة تكون إجراءات إعلام HLR وسجل VLR القديم بأن المشترك ضمن منطقة خدمة VLR جديد قد أُستكملت، وما يتبقى هو أن يجري إعلام الوحدة المتحركة بذلك.

يخصص سجل VLR الجديد رقم هويةٍ مؤقتٍ جديد للمشترك (TMSI)، كما يقوم بإرسال هذه الهوية مرفقةً برقم منطقة الوجود LAI إلى الوحدة المتحركة. وتُستخدم لذلك رسالة (DTAP-MM; LOCATION UPDATE ACCEPT).

تكون هذه الرسالة متضمنةً في رسائل الطبقات الدنيا التالية:

- رسالةُ (BTSM; DATA REQUEST) على الرابط A_{bis}.
- رسالة (SCCP; DATA FORM 1) على الرابط A (انظر [٢] و [٣] للوقوف على الرسائل التي يتيحها بروتوكول SCCP).

٩) بعد حفظ رقم TMSI ورقم LAI الجديدين في ذاكرة الشريحة، ترسل الوحدة المتحركة إقراراً أو إشعاراً لسجل VLR الجديد باستلام المعلومات، وذلك باستخدام رسالة (DTAP-MM; TMSI REALLOCATION COMPLETE). وهذه الرسالة تكون متضمنة في رسائلَ من الطبقة الثانية على النحو الذي ذكر في الخطوة السابقة.



تتمة الشكل ٧-٢٠: خطوات تحديث رقم منطقة الوجود.

١٠) بعد اكتمال الإجراءات السابقة تنتفي الحاجة لمتابعة تخصيص القناة SDCCH، لذا يبادر المقسم إلى إرسال رسالة (BSSMAP; CLEAR COMMAND) إلى شبكة النفاذ إيعازاً بانتفاء الحاجة إلى الموارد التي جرى تخصيصها، وبناءً على ذلك ، ترسل شبكة النفاذ إقراراً باستلام الرسالة وتنفيذها، كما ترسل إلى الوحدة المتحركة رسالةً تعلمها بتحرير القناة التي كانت مخصصة لها، وهذه الرسالة هي (RIL3-RR; CHANNEL RELEASE)، التي تمثل آخر ما تنقله قناة SDCCH التي جرى تخصيصها لإنجاز إجراءات تحديث رقم منطقة الوجود.

ملاحظات إضافية

- تضمنت الخطوتان ٨ و٩ تغييراً لهوية المشترك المؤقتة TMSI، التي يخصصها سجل VLR وتكون صالحةً فقط ضمن منطقة وجودٍ محددة، ومن ثم تتغير عند كل تغييرٍ يطرأ من ناحية منطقة الوجود. هذه الحالة هي الاعتيادية وفق متطلبات حفظ خصوصية المشترك، وتفي بغرض الحيلولة دون إرسال رقم IMSI الحقيقي عبر المنفذ الراديوي. ومن الممكن التحقق من ذلك عن طريق دراسة تفاصيل الخطوات التي عرضناها والتأكد من أن تبادل رقم IMSI جرى فقط بين مكونات الشبكة المركزية.

إضافةً إلى هذا التغيير القسري للهوية المؤقتة، من الممكن للمشغل أن يُفَعِّل إجراءات حماية إضافية، تقضي مثلاً بإجراء تغييرٍ دوري للهوية المؤقتة، أو تزامناً مع كل انتقال من خلية إلى أخرى، أو غير ذلك من الحالات الاستثنائية.

يتيح النظام لهذا الغرض إنجاز عملية تغيير الهوية المؤقتة كإجراءٍ مستقل قائمٍ بذاته يُسمّى "TMSI Reallocation"، ويُترك الخيار عادةً للمشغل لتفعيله وفق الحاجة وتبعاً للسياسة المستخدمة .

تشابه الخطوات التي يتطلبها هذا الإجراء –من ناحية المبدأ– ما عرضناه، لذا نتجاوز عرض التفاصيل.

- تعريفٌ بإجراء "IMSI Attach": بعد انتقائها لقناة BCCH الأنسب من ناحية جودة الإشارة (انظر خطوات انتقاء الخلية)، يمكن للوحدة المتحركة –من الناحية النظرية– أن تبقى في وضعِ متابعةٍ لمعلومات القناة فقط، أي أن تكتفي بالاستماعِ للمعلومات العامة دون إعلام الشبكة بوجودها. فإذا أراد المشترك إنشاء اتصالٍ لأول مرة، يكون تسجيل الوحدة أو الشريحة ضمن سجل VLR جزءاً تحضيرياً وأساسياً من الخطوات في بداية الاتصال.

من جانبٍ آخر، يفضل مشغلو الشبكات ارتباط أي مشترك ممكن بالشبكة فور إمكانية ذلك، لأن وضع الارتباط بالشبكة يتيح توجيه الرسائل الواردة للمشترك على نحوٍ فوري، أما حالة الاستماع لمدة طويلة، أي الاكتفاء بتفعيل الوحدة المتحركة دون إجراء أي اتصال، فتقود في كثيرٍ من الأحيان إلى عدم معرفة الشبكة بالمكان الحالي لوجود المشترك. لذا يتيح النظام إجراءً يعرف باسم IMSI Attach، يقضي بأن يجري تسجيل مكان المشترك فور اعتماد خليةٍ مناسبة بعد إتمام الخطوات الخاصة باختيار الخلية، ويمثل إجراء IMSI Attach حالةً خاصة من حالات تحديث مكان المشترك.

ولما كان هذا الإجراء خيارياً للمشغل، فإن الوحدة المتحركة تنجزه فقط إذا كان إجراءً معتمداً ضمن الشبكة التي تلتقط إشارتها، وتعرف الوحدة ذلك عن طريق حقلٍ أو إشارة خاصة ضمن معلومات BCCH التي تقرؤها.

- تعريفٌ بإجراء "IMSI Detach": سبق عند التعريف بأغراض التحديث الدوري لرقم منطقة الوجود تنويهٌ إلى إجراء أو ميزة IMSI Detach، التي من الممكن للمشغل أن يفعلها بحيث يكون لزاماً على كل وحدة متحركة إبلاغ الشبكة عند إطفائها، كي تكون الشبكة على علمٍ بانفكاك الوحدة عنها، وحتى تتجنب الشبكة إرسال رسائل نداءٍ للمشترك دون طائل. يمثل هذا الإجراء من الناحية الإعتبارية إجراءً عكسياً لـ IMSI Attach.

- حول الفرق بين مصطلَحَيْ "Location Registration" و "Location Update": يدل هذان التعبيران أو المصطلحان على إجراءين متشابهين، يتشاركان في الغرض، وهو إعلام الشبكة بمكان المشترك، إضافةً إلى إجراء التوثق من هوية المشترك. ويكمن وجه الخلاف بين الإجراءين في ما يلي:

  - في حالة Location Registration يكون المشترك قد حاول الولوج أو النفاذ إلى الشبكة لأول مرة (في بلدٍ جديد مثلاً، أو بعد شراء بطاقة جديدة أو شريحة جديدة)، ويتطلب تسجيل مكان المشترك في هذه الحالة تزويد الشبكة بهوية المشترك الحقيقية (IMSI)، وذلك حتى تزوده الشبكة بدورها برقم هوية مؤقت (TMSI).

  - في حالة Location Update تكون الإجراءات مرتبطة بولوج متكررٍ إلى الشبكة، إما ضمن منطقة خدمة VLR جديدة، أو بعد إطفاء الوحدة المتحركة، أو بعد عبور منطقةٍ لا توجد فيها تغطية. ويجري تحديث رقم منطقة الوجود

في هذه الحالة باعتماد هوية TMSI المتوفرة لدى الشبكة. لذا يمكن القول بأن إجراء Location Registration يمثل إجراء Location Update للمرة الأولى.

٧-٣-٦ خطوات إصدار مكالمة إلى شبكة الهاتف الثابت

نعرض في ما يلي للخطوات المصاحبة للمكالمة الصادرة عن المشترك "Mobile Originating Call (MOC)"، أي لآليات التحكم المتعلقة بالطرف المتصِل. ونفترض أثناء عرضنا أن الطرف المتصل قد أتم إجراءات تسجيل مكانه أي أن الشبكة على علم بمنطقة وجوده، وأن سجل VLR الذي يوجد المشترك ضمن منطقة خدمته قد منحه أو خصّه بهوية مؤقتة (TMSI)، كما نفترض أن الرقم المطلوب يخصُّ مشتركاً ضمن شبكة ISDN للهاتف الثابت.

تبدأ إجراءات إصدار المكالمة بأن يختار المشترك المتصل رقم ISDN الخاص بالطرف المُتَّصَلِ به، ثم يُتبع ذلك بضغط مفتاح قبول الأرقام وإرسالها. يقود ذلك إلى إطلاق الخطوات التي يبينها الشكل ٧-٢١ وتتماته:

١) ترسل الوحدة رسالة (RIL3-RR; CHANNEL REQUEST) على قناة RACH، تطلب فيها تخصيص قناة SDCCH، وكما سبق البيان، تحوي الرسالة حقلاً يدل على سبب طلب تخصيص القناة، وهو في هذه الحالة إصدار مكالمة.

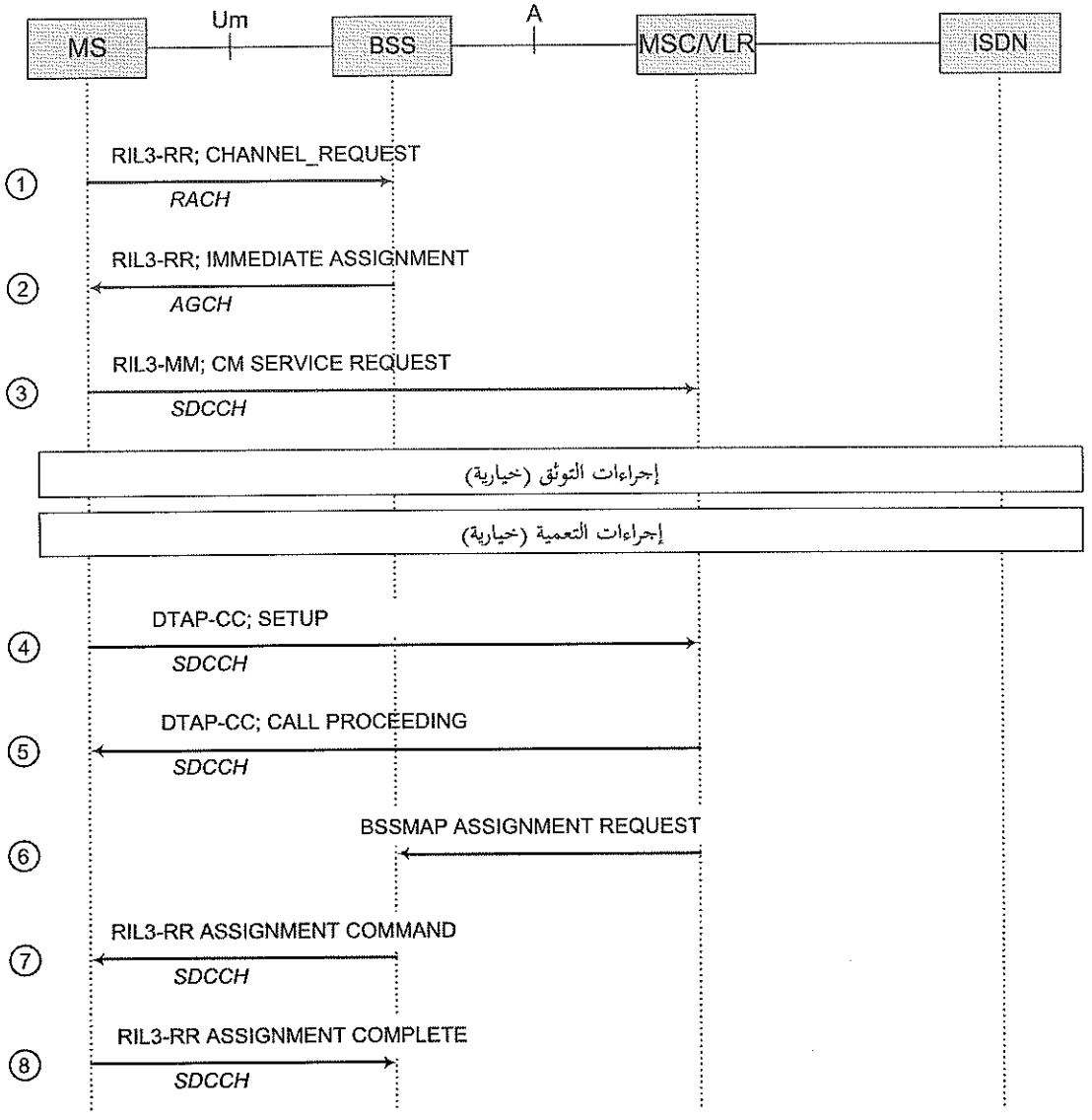
٢) بعد استلام رسالة طلب النفاذ، تخصص شبكة النفاذ قناةَ SDCCH للوحدة المتحركة، وتعلم المحطةُ الوحدةَ المتحركة بتخصيص القناة عن طريق إرسال رسالة (RIL3-RR; IMMEDIATE ASSIGNMENT) على قناة AGCH. وهذه القناة التي تُخصص، أي SDCCH، هي التي تستخدمها الوحدة في الخطوات التالية للتواصل مع الشبكة.
هذا ونكرر التنويه إلى أن تبادل كلا الرسالتين السابقتين يجري ضمن الخطوات المتعلقة بطلب النفاذ للشبكة، والتي شرحناها في الشكل ٧-١٦، إلا أننا جمعنا المحطة الثابتة BTS ووحدة التحكم BSC بتعبير BSS.

٣) باستخدام قناة SDCCH التي جرى تخصيصها، ترسل الوحدة رسالة (RIL3-MM; CM SERVICE REQUEST) إلى مركز التبديل، عبر شبكة النفاذ، وذلك لإعلامه بالخدمة المطلوبة. وسبق أن أشرنا إلى أن بروتوكولات الطبقة الثالثة تتيح تبادل رسائل التحكم بين الشبكة المركزية والوحدة المتحركة، وينحصر دور شبكة النفاذ في هذه الحالة في كونها ناقلاً وسيطاً لهذه الرسائل، وغير معنية بقراءة ما تتضمنه من إجراءات.

تمثل رسالة (CM SERVICE REQUEST) طلب الخدمة من الشبكة، كما أنها تحوي حقلاً يدل على سبب الاتصال (CM SERVICE TYPE)، وهذا السبب قد يكون إصدار مكالمة هاتفية، أو إرسال رسالة قصيرة، أو اتصالاً طارئاً، أو ما شابه. كما تكون الرسالة مرفقةً بهوية الوحدة المتحركة (من الممكن أن تكون TMSI عند توفرها، وهذا ما نفترضه في هذا المثال) وبرقم منطقة الوجود الحالية (LAI).

تنقل شبكة النفاذ BSS هذا الطلب إلى مركز التبديل، ويقود ذلك إلى تفعيل أو تعريف سياق اتصال باستخدام بروتوكول SCCP، هذا إذا لم تكن الوحدة نشطة أو منخرطة باتصال قائم مع الشبكة. وهذا الإجراء ضروري كما ذكرنا، كي يتاح

للشبكة التمييز بين أكثر من اتصال موازٍ يتعلق بالوحدة ذاتها، فإجراء تحديث رقم منطقة الوجود قد يكون ضرورياً أثناء إجراء المشترك لمكالمةٍ ما أثناء حركته ضمن الشبكة.



الشكل ٧-٢١: خطوات إصدار مكالمة إلى شبكة الهاتف الثابت.

يمثل الطلبُ (RIL3-MM; CM SERVICE REQUEST) رسالةً من الطبقة الثالثة، تكون مُغلَّفة (Encapsulated) أو متضمنة ضمن الرسائل التالية:

- رسالة SABM من الطبقة الثانية على الرابط الراديوي U_m.

- رسالة ESTABLISH INDICATION ضمن بروتوكول BTSM على الرابط A_{bis}.
- رسالة (SCCP; CONNECTION REQUEST) ورسالة (BSSMAP; COMPLETE L3 INFORMATION) على الرابط A بين شبكة النفاذ ومركز التبديل.

من الممكن أن تتبع الخطواتِ السابقةَ إجراءات التوثق والتعمية التي سبق شرحها، إذ أن هذه الإجراءات خيارية من ناحية المبدأ.

٤) ترسل الوحدة باستخدام قناة SDCCH رسالة (DTAP-CC; SETUP) إلى مركز التبديل طالبة مباشرة أو استهلال خطوات إصدار المكالمة، وتحوي رسالة SETUP الرقم المُتصل به إضافة إلى نوعية القناة التي ستستخدم لتبادل المعلومات. فعلى سبيل المثال، تناقش هذه الخطوات إصدار مكالمة هاتفية، وهذا يقتضي تحديد ما إذا كانت القناة التي ستستخدم هي قناة TCH/F (أي بمعدل كامل) أم TCH/H (أي بمعدل نصفي). أما لو كان سبب الاتصال هو الرغبة في تبادل المعطيات (رسالة فاكس مثلاً) فإن رسالة SETUP تحمل في هذه الحالة تحديداً لمعدل نقل المعطيات والذي يحدد بدوره نوع قناة TCH التي ستخصص للمشترك. وقد كنا أشرنا إلى أن تبادل المعطيات قد يجري باستخدام إحدى قنوات TCH المخصصة لذلك، والتي تتباين من حيث معدل نقل المعطيات المتاح (انظر الفصل ٤). هذا ويطلق على خصائص القناة التي تتيح نقل المعلومات أو تبادل المعطيات اسم "Bearer Capabilities".
نؤكد في هذا السياق على أن رسالة SETUP تصدر عن المجموعة الوظيفية Call Control ضمن الطبقة الثالثة، التي تكون مسؤولة عن التحكم بخصائص الاتصال.

بعد استلام رسالة SETUP، يطلب مركز التبديل من سجل VLR تزويده بالمعلومات الضرورية عن الميزات الخاصة بالمشترك، والتي تتطلبها معالجة الخطوات المتعلقة بالاتصال. فعلى سبيل المثال، قد يكون المشترك غير مخول بإجراء اتصالات دولية أو إلى خارج الشبكة الأم، وقد يكون المشترك غير مصرح له باستخدام بعض الخدمات. وهذه المعلومات تكون كلها جزءاً مما يُحفظ في سجل HLR ويملك سجل VLR نسخة عنه.

إذا تبين لسجل VLR أن متابعة إجراءات الاتصال غير ممكنة، يُعلم مركزَ التبديل MSC عن السبب وتتوقف الإجراءات عند هذه الخطوة، حيث يرسل مركز التبديل رسالة إلى الوحدة المتحركة لإعلامها بذلك، هذا ونفترض في بقية الخطوات ضمن هذا المثال أن الاتصال ممكن، لذا يرسل سجل VLR رسالة إلى مركز التبديل تحوي المعلومات المتعلقة بتفاصيل اشتراك الرقم الذي يرغب بإصدار الاتصال.

ننوه في هذا الموضع إلى أنه قد أُصطِلح على الإشارة إلى "الرقم المُتَّصِل" بتعبير "A-Party" أو "A-Number"، بينما يُدَلُّ على "الرقم المُتَّصَلِ به" بتعبير "B-Party" أو "B-Number".

٥) يرسل مركز التبديل MSC رسالة (DTAP-CC; CALL PROCEEDING) إلى الوحدة المتحركة لإعلامها بأن الاتصال قيد المتابعة والإنجاز، وتُحمل هذه الرسالة إلى الوحدة المتحركة على قناة SDCCH المخصصة، بينما تنقلها شبكة النفاذ على نحوٍ خفي (Transparent).

٦) يُرسل مركز التبديل رسالة (BSSMAP; ASSIGNMENT REQUEST) إلى وحدة التحكم BSC طالباً منها تخصيص قناة اتصال راديوية (TCH). وتتضمن هذه الرسالة حقولاً تدل على نوع القناة الراديوية المطلوبة (TCH/H, TCH/F)، ورقم الدارة التي ستحمل الاتصال على الرابط A (أي رقم الحيز الزمني ضمن إطار E1 الذي يربط بين وحدة التحكم BSC ومركز التبديل MSC).

٧) تخصص شبكة النفاذ (وتحديداً وحدة التحكم) قناةً راديوية، وترسل للوحدة المتحركة إعلاماً أو إشعاراً بذلك، مستخدمة قناة SDCCH ورسالة (RIL3-RR; ASSIGNMENT COMMAND). تحوي هذه الرسالة في متنها رقم الحيز الزمني الذي يمثل القناة الفيزيائية، والتردد، ومقدار استطاعة البث المطلوبة، ونمط القفز الترددي (في حال تفعيل هذه الميزة).

٨) تولّف أو تضبطُ (Tune) الوحدة المتحركة دارات الإرسال على تردد القناة التي جرى تخصيصها، وترسل على قناة SDCCH رسالة إشعارٍ بقبول التخصيص، وهذه الرسالة هي (RIL3-RR; ASSIGNMENT COMPLETE).

٩) تُجري شبكة النفاذ ربطاً بين القناة الراديوية والدارة على الرابط A بين وحدة التحكم BSC ومركز التبديل. واعتباراً من هذه اللحظة لا يكون هناك داعٍ لمتابعة تخصيص قناة SDCCH التي استخدمت في الخطوات السابقة لتبادل المعلومات المتعلقة بالتشوير وبالتحضير للاتصال، لذا تُلغي وحدة التحكم تخصيص هذه القناة، كما ترسل رسالة إلى مركز التبديل رسالةً هي (BSSMAP; ASSIGNMENT COMPLETE) تؤكد فيها أن إجراءات تخصيص قناة نقل راديوية (TCH) قد اكتملت.

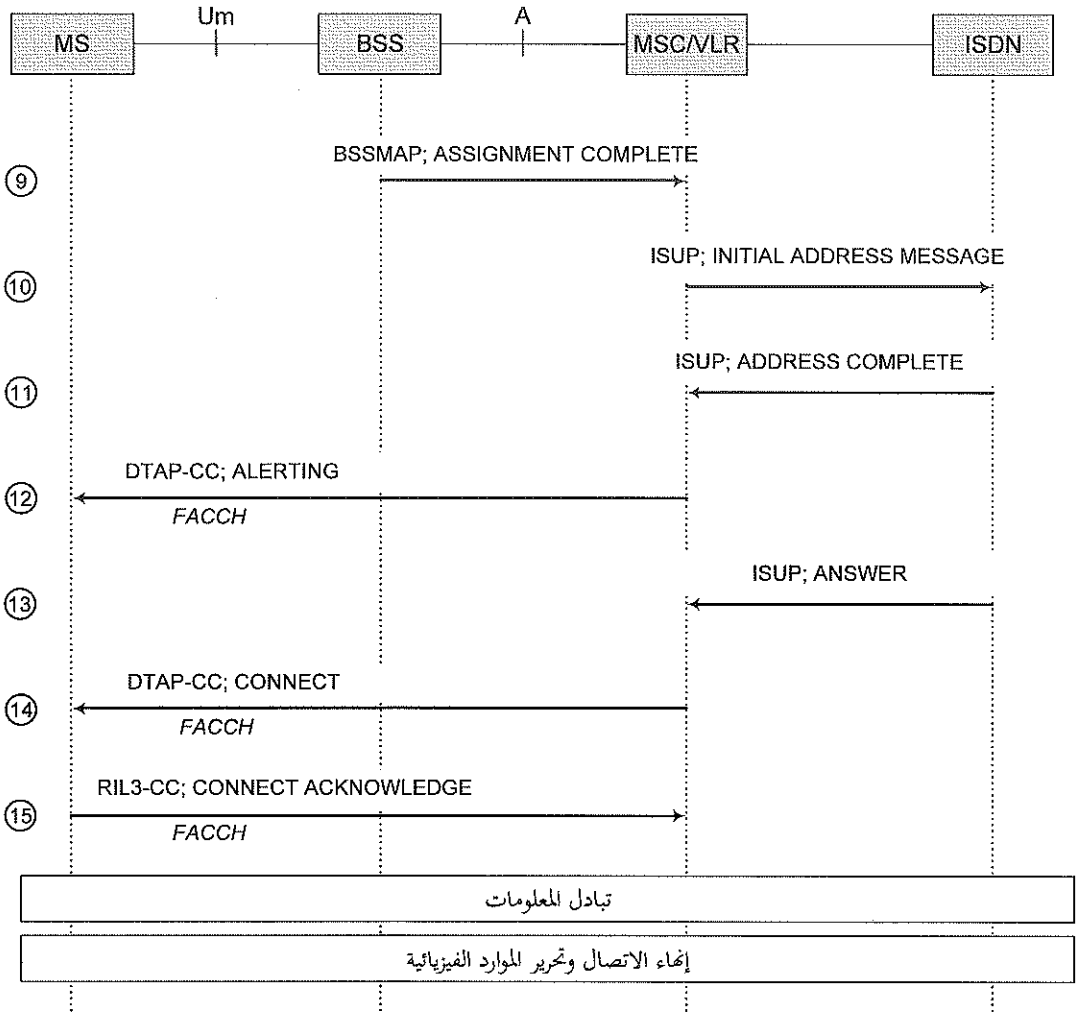
عند هذه اللحظة ، يكتمل إنشاء مسارٍ أو دارة لحمل معلومات الاتصال الهاتفي بين الوحدة المتحركة ومركز التبديل، غير أن المشترك يكون في هذه اللحظة ما زال يسمع صمتاً لأن الدارة إلى الرقم المطلوب لم تكتمل تماماً، إذ ما زال ذلك يتطلب تفعيل الدارة التي تربط بين مركز التبديل MSC ومقسم شبكة الهاتف الثابت.

١٠) يرسل مركز التبديل إلى المقسم المعني رسالة (ISUP; INITIAL ADDRESS MESSAGE) تحوي طلباً بإنشاءِ ربطٍ مع الشبكة، وتحمل هذه الرسالة رقم المشترك المطلوب (Dialed Digits)، إضافةً إلى بعض التفاصيل الأخرى، مثل رقم الدارة التي تربط بين المقسمين، والتي سيُحمل عليها الاتصال.

١١) تبعاً للمقسم النهائي الذي يرتبط الرقم المطلوب به، ينشئ مقسم ISDN مساراً قد يمر عبر أكثر من مقسم آخر، أي أن المسار قد يكون مؤلفاً من أكثر من مسار جزئي، وعند وصول ربط الدارة إلى المقسم الأخير الذي يربط رقم المشترك المطلوب على نحوٍ مباشر، تصدر إشارة الرنين (تولّد هذه الإشارة في المقسم المحلي الأخير). عند ذلك، تُعلِم شبكة ISDN مركزَ التبديل برسالة (ISUP; ADDRESS COMPLETE MESSAGE) أن رقم الهاتف المطلوب (B-Party) قد أُستلم على نحوٍ كامل، وأن دارة الاتصال قد فُعِّلت، وأن الهاتف المطلوب يُصدر إشارة الرنين إيذاناً بورود اتصال.

١٢) يُخبر مركزُ التبديل الوحدة المتحركة عن طريق رسالة (DTAP-CC; ALERTING) بأن الرقم المطلوب قد أُشعر بورود اتصال، ويجب الانتباه إلى أن هذه الرسالة تحمل على قناة FACCH، أي القناة المقترنة بقناة TCH التي جرى تخصيصها، حيث إن معلومات التحكم المرافقة لمجريات الاتصال أو الخطوات تُحمل على هذه القناة.

عند وصول الرسالة إلى الوحدة المتحركة، يسمع المشترك رنين هاتف المشترك المطلوب (ذكرنا أن مصدر الرنين هو في الغالب المقسم النهائي، ومن الممكن أيضاً أن يكون مصدر إشارة الرنين هو الهاتف ذاته، وذلك تبعاً لنظام التشوير ضمن شبكة الهاتف الثابت).



تتمة الشكل ٧-٢١: خطوات إصدار مكالمة إلى شبكة الهاتف الثابت.

١٣) عندما يرفع مشترك الهاتف الثابت السماعة "Off-Hock"، ترسل شبكة ISDN إشعاراً بذلك إلى مركز التبديل، عن طريق رسالة (ISUP; ANSWER). ويقود رفع السماعة في العادة إلى إطلاق الإجراءات المتعلقة بالفوترة، كما أن رفعَ المشترك للسماعة يعني إكمال الدارة أو المسار الفيزيائي للاتصال بين الرقم الطالب والرقم المطلوب (أي بين الوحدة المتحركة والهاتف الثابت).

١٤) يُعلِم مركز التبديل الوحدة المتحركة بأن مسار الاتصال قد اكتمل وأن الدارة أو الوصلة قد أنشئت بين طرفي الاتصال، وتحمل هذا الإشعار أو الإعلام رسالة (DTAP-CC; CONNECT)، التي تُحمل على قناة FCCH.

١٥) تُرسل الوحدة المتحركة إلى مركزَ التبديل رسالةَ (RIL3-CC; CONNECT ACKNOWLEDGE) التي تمثل إقراراً باستلام رسالة CONNECT، هذا ونذكر بأن رسائل الطبقة الثالثة والمتبادلة بين الوحدة المتحركة ومركز التبديل ترسَل مغلَّفةً ضمن رسائل من الطبقة الثانية، وتكون خفية لشبكة النفاذ (انظر الخطوة رقم ٣).

بعد اكتمال الخطوات السابقة يكون طور إنشاء الاتصال قد انتهى، ويبدأ طرفا الاتصال بتبادل الإشارة الكلامية التي تُحمل على قناة TCH التي تكون قد خصصت للمشترك، فإذا أغلق أحد الطرفين هاتفه، أُطلِقت إجراءات إنهاء الاتصال وتحرير الموارد الفيزيائية، وهذا ما تتناوله الفقرات التالية بالشرح.

٧-٣-٧ إنهاء الاتصال وتحرير الموارد الفيزيائية

عند إنهاء اتصالٍ ما، يجب على آليات التحكم ضمن الشبكة تحرير الموارد الفيزيائية التي كانت محجوزة أو مشغولة، وذلك حتى يكون تخصيصها لاتصالات أخرى ممكناً. هذا ومن الممكن إنهاء اتصالٍ ما إما بمبادرةٍ من طرف الوحدة المتحركة، أي عندما يغلق المشترك السماعة أو يضغط مفتاح إنهاء المكالمة، أو من طرف الشبكة ، وذلك عندما يُنهي أحد الطرفين الاتصال، فتقوم الشبكة أيضاً بإنهاء المكالمة في الطرف الآخر. فعلى سبيل المثال، إذا كانت المكالمة بين مشترك ضمن الشبكة الخلوية وطرفٍ آخر ضمن شبكة ISDN، وأنهى طرف الهاتف الثابت المكالمة، يجب أن يتولى مركز التبديل MSC الذي في طرف مشترك الهاتف الخلوي إنهاء المكالمة ضمن شبكة PLMN.

نفترض في مثالنا الحالي أن إنهاء الاتصال جرى بمبادرةٍ من الهاتف الثابت، ما يقود إلى الخطوات الموضحة في الشكل ٧-٢٢):

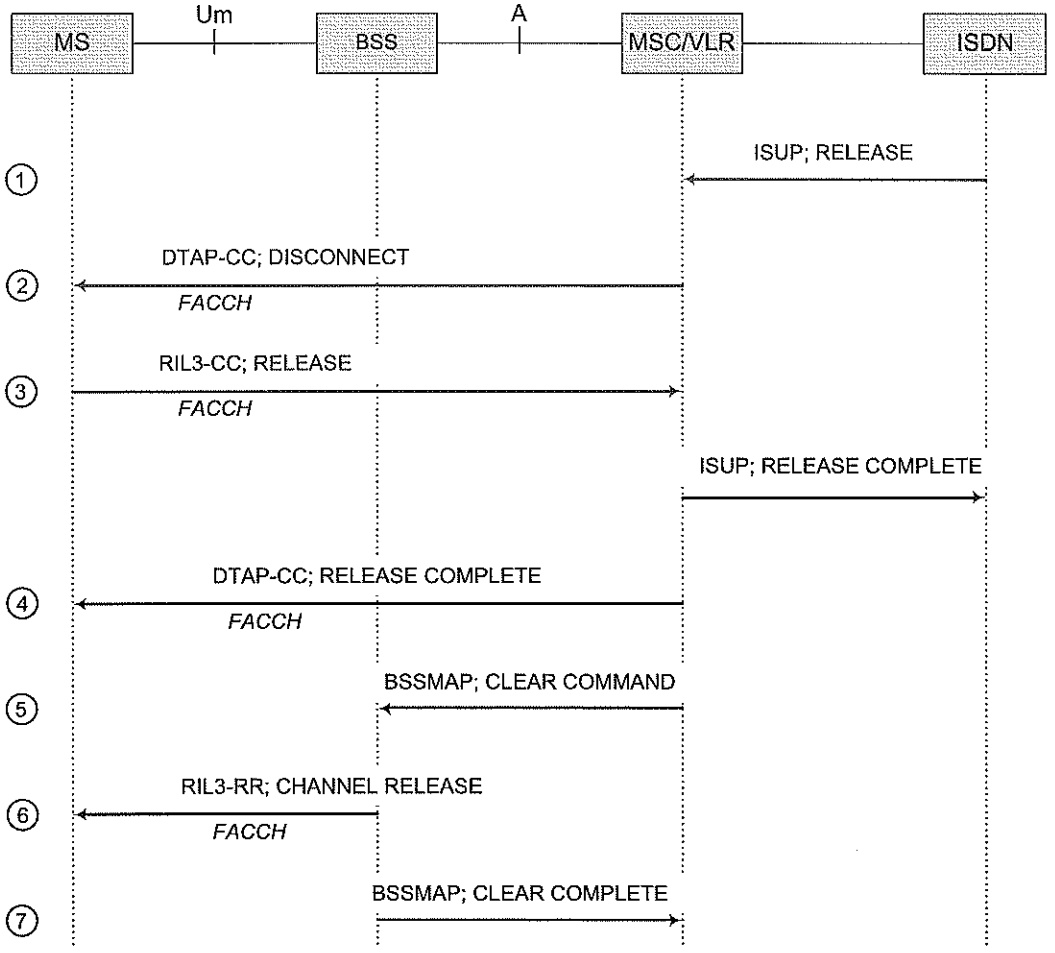
١) يتلقى مركز التبديل رسالة (ISUP; RELEASE) من شبكة ISDN، تحوي إشعاراً بوجوب إنهاء الاتصال وتحرير المسار أو الدارة بين طرفي الاتصال.

٢) يقود ذلك إلى إرسال رسالة (DTAP-CC; DISCONNECT) من مركز التبديل إلى الوحدة المتحركة (على قناة FACCH). تحمل هذه الرسالة طيها الأمر للوحدة إشعاراً بأن الاتصال سيُقطع وبأنه سيجري تحرير الموارد الفيزيائية المخصصة له. هذا ونذكر بأن كل رسائل DTAP المتبادلة بين الوحدة المتحركة ومركز التبديل ترسل مغلَّفة ضمن رسائل من الطبقة الثانية، وتكون خفية لشبكة النفاذ.

٣) تجيب الوحدة المتحركة برسالة (RIL3-CC; RELEASE)، التي تحمل إشعاراً بأنها جاهزة لانهاء الاتصال، وعند استلام هذه الرسالة، يقوم مركز التبديل بإنهاء أو بقطع مسار الاتصال القائم مع شبكة ISDN، ويُعلم المقسم المقابل في شبكة ISDN بأن إنهاء الاتصال من طرفه (أي في جهة الوحدة المتحركة) قد بوشر. يستخدم مركز التبديل لإرسال هذه المعلومات رسالة (ISUP; RELEASE COMPLETE).

٤) يُعلم مركز التبديل الوحدة المتحركة بأن إجراءات إنهاء الربط مع شبكة ISDN قد اكتملت، ويجري الإعلام باستخدام رسالة (DTAP-CC; RELEASE COMPLETE)، التي تقود إلى تحرير مسارات الاتصال في الطبقات الدنيا.

٥) يتبع ذلك تحرير القناة التي كانت مخصصة على الرابط A، أي بين مركز التبديل وشبكة النفاذ وذلك عن طريق رسالة (BSSMAP; CLEAR COMMAND).



الشكل ٧-٢٢: خطوات إنهاء الاتصال وتحرير الموارد الفيزيائية.

٦) بعد ذلك، يجب تحرير القناة الفيزيائية على على الرابط الراديوي، ولما كانت وحدة التحكم هي المعنية بهذا الإجراء، فإنها ترسل رسالة خاصة بذلك (على قناة FCCH)، وهذه الرسالة هي (RIL3-RR; CHANNEL RELEASE).

٧) في خطوة أخيرة، تخبر شبكةُ النفاذ مركزَ التبديل بأن كل الموارد الفيزيائية التي كانت مخصصة للاتصال قد جرى تحريرها، ويُحمل هذا الإشعار ضمن رسالة (BSSMAP; CLEAR COMPLETE).

٧-٣-٨ ورود اتصال إلى المستخدم

تعرض الخطوات التالية لتفاصيل ورود اتصالٍ من شبكة الهاتف الثابت (ISDN) إلى مشتركٍ ما (انظر الشكل ٧-٢٣ وتتماته):

١) يطلب مُستخدم الهاتف الثابت (A-Party) رقم MSISDN الخاص بمشترك الشبكة الخلوية (B-Party)، فيطلق ذلك إجراءات تحليل خانات الرقم المطلوب في مقسم شبكة ISDN.

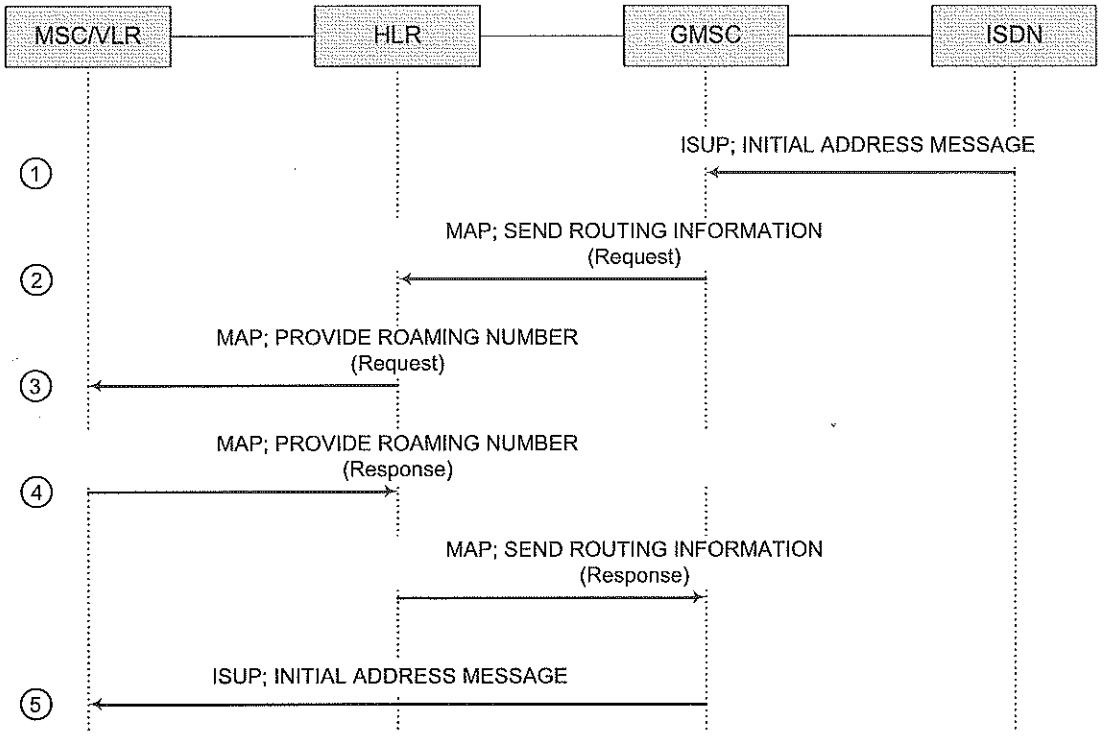
استناداً إلى حقل NDC ضمن رقم MSISDN المطلوب، يتبين للمقسم أن المُتَّصَلَ به رقمٌ ضمن الشبكة الخلوية، لذا يجري توجيه الاتصال إلى الشبكة المعنية، وتحديداً إلى مركز التبديل الذي يُعتبر صلة الوصل من طرف الشبكة الخلوية، وقد أشرنا في الفصل ٦ إلى أن هذا المركز يعرف باسم Gateway-MSC، واختصاراً بـ GMSC. يُحمل طلب الاتصال ضمن رسالة (ISUP; INITIAL ADDRESS MESSAGE)، ويكون رقم MSISDN المطلوب مرفقاً بها.

٢) يحتاج مركز GMSC بدوره إلى معلوماتٍ محددة عن مركز التبديل MSC الذي يوجد المشترك ضمن منطقة خدمته، وذلك حتى يتمكن من توجيه الاتصال إليه، لذا، يرسل GMSC إلى سجل HLR المعني طلباً بذلك. ويجري تحديد هوية هذا السجل عن طريق قراءة أول خانتين أو ثلاثة من حقل رقم المشترك (SN) ضمن رقم MSISDN (انظر الشكل ٦-٢)، الذي يدل عادةً على هوية سجل HLR الذي يحوي معلومات المشترك. وننوه هنا إلى أن مشغلي الشبكات يتبعون سياسة ربط الخانتين الأوليَـتَـيْن من رقم SN، بسجلٍ HLR محدد، على نحوٍ يشابه ارتباط رقم IMSI بسجل HLR المعني. ويطلق على هاتين الخانتين اسم "رقم السلسلة" "Series Number". فعلى سبيل المثال، يجري تسجيل كل المشتركين الذين تبدأ أرقام هواتفهم بالخانتين XY على سجل HLR الأول، وكل المشتركين ذوي الأرقام التي تبدأ بـ ZY في سجل HLR الثاني، وهكذا. ويُراعى أن يكون التوزيع موافقاً لتوزيع أرقام IMSI أيضاً، أي أن أرقام MSISDN تـُخصص لأرقام IMSI المُعرفة على نفس سجل HLR، بحيث يمكن تحديد هذا السجل دوماً إما عن طريق رقم IMSI، أو باستخدام رقم MSISDN.

يرسل مركز GMSC إلى سجل HLR رسالةً هي (MAP; SEND ROUTING INFORMATION)، وتمثل هذه الرسالة طلباً (REQUEST) بتزويد مركز GMSC بالمعلومات المتوفرة عن مكان المشترك، كما تكون حاملةً رقم MSISDN المعني.

تسمى هذه الخطوة مجازاً "HLR–Interrogation" في إشارةٍ إلى "مساءلة" سجل HLR عن مكان المشترك، ويُعتبر إجراء المساءلة مهمةً وظيفية مميـّزة لمركز GMSC عن غيره من مراكز التبديل ضمن الشبكة.

٣) يكون سجل HLR على درايةٍ برقم وهوية سجل VLR الذي كان المشترك ضمن منطقة خدمته عندما أجرى آخر تحديث لرقم منطقة الوجود، ويكون هذا السجل قد خصص رقم هاتفٍ مؤقت للمشترك (MSRN). فإذا استلم سجل HLR الطلب من مركز GMSC، أوعز إلى سجل VLR المعني بإرسال رقم الهاتف المؤقت الخاص بالمشترك، وذلك عن طريق رسالة هي (MAP; PROVIDE ROAMING NUMBER)، التي تحمل طيها رقم IMSI الخاص بالمشترك، وذلك كي يتمكن سجل VLR من إيجاد رقم الهاتف المطلوب.

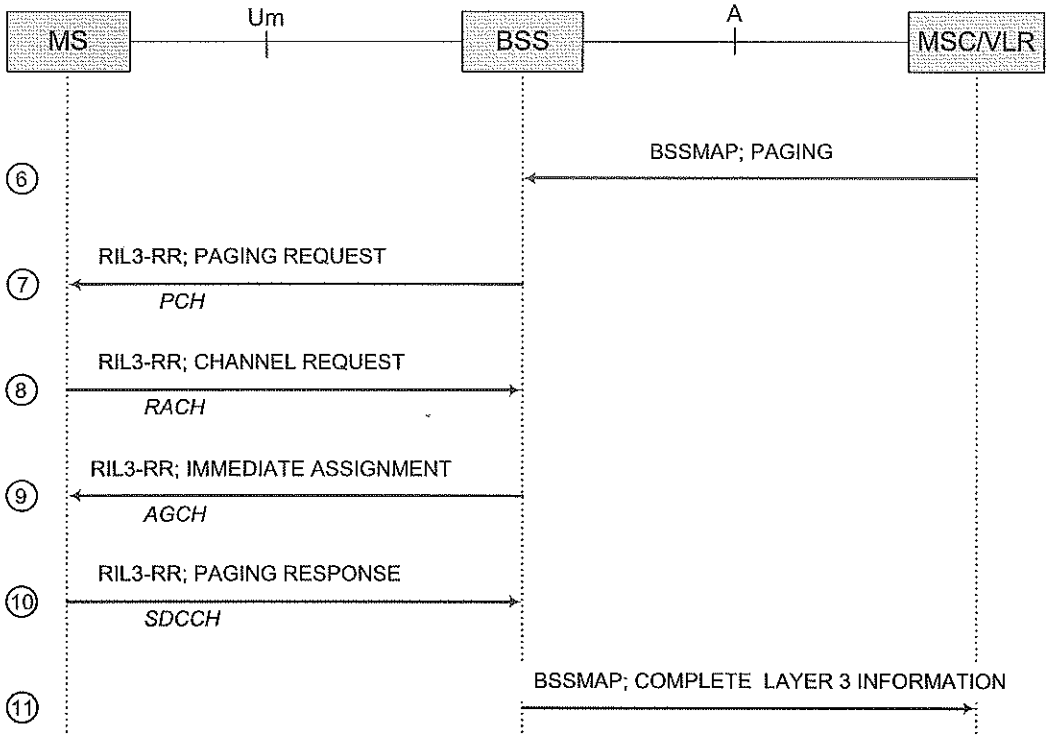


الشكل ٧-٢٣: خطوات ورود اتصال والإجابة عليه.

٤) يجيب سجل VLR الطلب برسالة (MAP; PROVIDE ROAMING NUMBER Response)، التي تحمل طيها رقم MSRN المطلوب. وسبق أن أشرنا إلى أن هذا الرقم يكون موافقاً للمكان وللقطر الذي يكون المشترك ضمنه، إذ أن سجل VLR المضيف هو الذي يخصصه. لذا يجب التنويه في هذا الموضع إلى أن تبادل المعلومات في هذا الموضع يكون بين سجل HLR في الشبكة الأم، وسجل VLR، سواء كان السجل المعني في شبكة مضيفة أو في الشبكة الأم.

٥) يُمرر سجل HLR رقم MSRN إلى مركز GMSC الذي طلبه (انظر الخطوة ٢)، وذلك باستخدام رسالة (MAP; SEND ROUTING INFORMATION). بدوره يستخدم مركز GMSC رقم MSRN لتحديد الوجهة المناسبة لمتابعة مسار الاتصال، فإذا تبين من تحليل حقلي CC و NDC أن المشترك ضمن الشبكة الأم، وُجِّهَ الاتصال إلى المقسم أو مركز التبديل المعني، وإذا تبين أن الحقلين يدلان على شبكةٍ في بلدٍ آخر، جرى توجيه الاتصال للوجهة المناسبة. يستخدم GMSC لمخاطبة مركز التبديل المعني رسالة (ISUP; INITIAL ADDRESS MESSAGE).

٦) عند وصول الرسالة إلى مركز التبديل الذي يوجد المشترك ضمن منطقة حدمته، يسأل المركزُ سجلَ VLR عن رقم منطقة وجود المشترك، وذلك لتحديد وحدة التحكم (BSC) التي يجب أن توجه رسالة النداء للمشترك. وبعد الحصول على رقم LAI، يرسل مركز التبديل رسالة (BSSMAP, Paging) إلى وحدة التحكم المعنية، طالباً منها إنجاز إجراء النداء. هذا وتحوي رسالة طلب النداء رقم IMSI (أو رقم TMSI في حال توفره)، إضافة إلى لائحة بالخلايا المعنية برسالة النداء.



تتمة الشكل ٧-٢٣: خطوات ورود اتصال والإجابة عليه.

٧) تبث وحدة التحكم BSC النداء باستخدام رسالة (RIL3-RR; PAGING REQUEST) على قناة النداء PCH، وننوه هنا إلى أننا استخدمنا تعبير "تبث" "Broadcast" وليس تعبير "ترسل" "Send" للإشارة إلى أن رسالة النداء لا توجه إلى وحدة متحركة بعينها، وإنما تبث في كل الخلايا ضمن منطقة الوجود المعنية.

٨) عندما تكتشف الوحدة المتحركة رقم IMSI (أو TMSI) الخاص بها ضمن رسالة النداء، تجيب برسالةٍ تطلب فيها تخصيص قناةٍ لها. وهذه الرسالة هي رسالة طلب النفاذ (RIL3-RR; CHANNEL REQUEST)، التي تُرسَل على قناة RACH. وقد يتطلب عبءُ الشبكة إرسال الرسالة أكثر من مرة، وفق آليات S–Aloha التي سبق شرحها.
تحوي الرسالة حقلاً يوضح سبب طلب النفاذ إلى الشبكة، وهو في هذه الحالة تلبية نداءٍ وارد.

٩) عندما تستلم وحدة التحكم رسالة CHANNEL REQUEST، تقوم بتخصيص قناة SDCCH، وترسل إشعاراً بهذا التخصيص ضمن رسالة (RIL3-RR; IMMEDIATE ASSIGNMENT) التي تحمل كل المعلومات المتعلقة بالقناة المخصصة (انظر إجراءات النفاذ العشوائي). هذا ويستمر تخاطب الوحدة المتحركة مع الشبكة باستخدام قناة SDCCH المخصصة، إلى أن تخصص قناة تبادل معلومات عادية (TCH) لها.

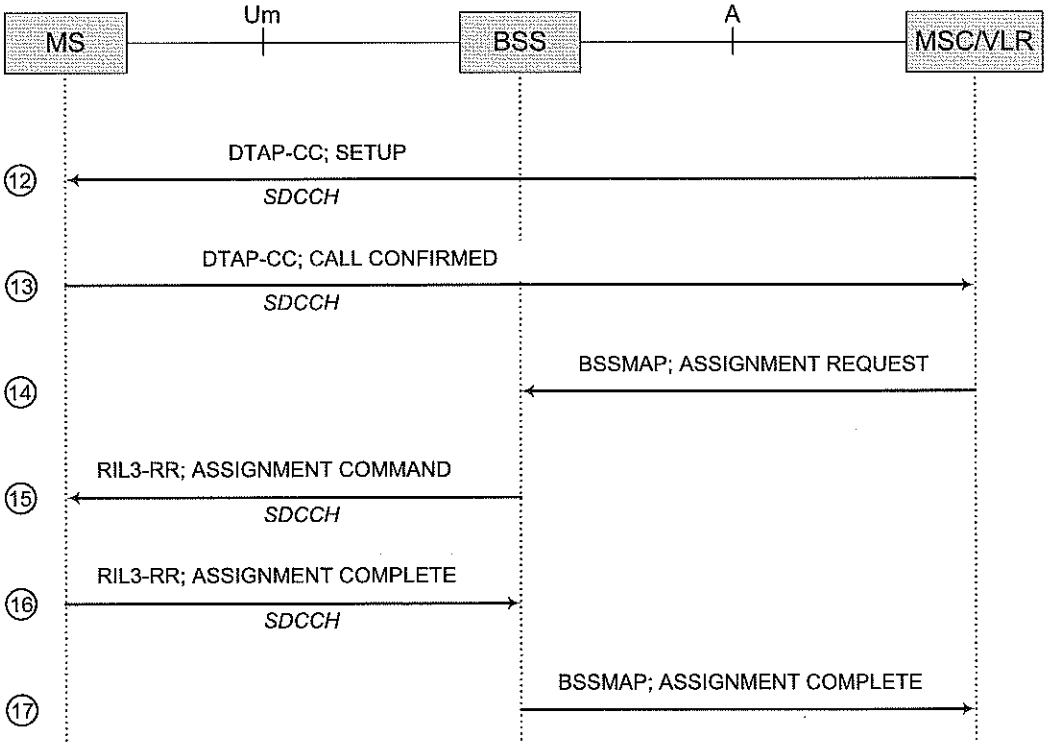
١٠) ترسل الوحدة المتحركة رسالة (RIL3-RR; PAGING RESPONSE) إلى شبكة النفاذ على قناة SDCCH. وتحمل هذه الرسالة هوية IMSI أو TMSI، إضافة إلى بعض المعلومات الخاصة بالوحدة المتحركة.

١١) بدورها ترسل وحدة التحكم BSC رسالة (BSSMAP; COMPLETE LAYER 3 INFORMATION) إلى مركز التبديل، تنقل ضمنها المعلومات التي أُستقبلت من المشترك. تمثل هذه الرسالة اكتمال الإجراءات المتعلقة بالنداء، والتي أُطلقت في الخطوة ٦.

من الممكن في هذا الموضع من تسلسل الخطوت إنجاز الإجراءات الخيارية (التوثق والتعمية) وفق ما شرحناه سابقاً.

١٢) يرسل مركز التبديل رسالة (DTAP-CC; SETUP) إلى الوحدة المتحركة، وذلك لمباشرة التحضير لاستقبال الاتصال، وتحمل هذه الرسالة خصائص القناة المطلوب تفعيلها لإجابة الاتصال (Bearer Capabilties)، إضافة إلى رقم الطرف المتصِل.

١٣) بعد استلام طلب SETUP، يجري في الوحدة اختبارٌ لتوافقها مع متطلبات الاتصال. فعلى سبيل المثال، إذا كان الاتصال الوارد خاصاً بمكالمة هاتفية، وكانت الشريحة موجودة حالياً في جهازٍ طرفي ليس مُعَدّاً لذلك (جهاز لوحي أو مودم) تعذر على الجهاز إجابة الاتصال. هذا ونفترض في هذا المثال أن متطلبات إجراء الاتصال محققة، لذا ترسل الوحدة المتحركة بعد الاختبار رسالة تؤكد فيها توافقها مع الاتصال وهذه الرسالة هي (DTAP-CC; CALL CONFIRMED).



تتمة الشكل ٧-٢٣: خطوات ورود اتصال والإجابة عليه.

١٤) يختار مركز التبديل، بعد استلام رسالة الإيجاب من الوحدة المتحركة، حيزاً زمنياً شاغراً على الرابط A (أي مع شبكة النفاذ)، كما يطلب من شبكة النفاذ عبر رسالة (BSSMAP; ASSIGNMENT REQUEST) تخصيص قناة راديوية لربطها بالقناة على الرابط A، وذلك لإتمام تعريف وتحديد المسار الفيزيائي (الدارة) التي ستحمل الاتصال. وتتضمن هذه الرسالة خصائص القناة المطلوبة، ورقم القناة التي خصصت على الرابط A.

١٥) بعد استلام الرسالة السابقة، تخصص شبكة النفاذ (وحدة التحكم تحديداً) قناة راديوية مناسبة، كما ترسل إلى الوحدة المتحركة رسالة (RIL3-RR; ASSIGNMENT COMMAND) على قناة SDCCH، تطلب منها توليف وضبط دارات الاستقبال على تردد القناة الفيزيائية التي خُصصت لإنجاز الاتصال.

١٦) تضبط الوحدة المتحركة داراتها، وترسل رسالة (RIL3-RR; ASSIGNMENT COMPLETE) إلى شبكة النفاذ لإعلامها بأن إجراءات التوافق مع القناة الراديوية قد اكتملت، وبعد إرسال هذه الرسالة تبدأ الوحدة المتحركة بتنبيه المشترك وإخطاره بورود اتصال، وذلك عن طريق الرنين. وابتداءً من هذه اللحظة، أي بعد تخصيص القناة الراديوية لتبادل المعلومات، تنتفي الحاجة لقناة SDCCH، لذا يجري تحريرها كي تكون متاحةً لمشتركين آخرين.

١٧) بعد استلام رسالة (RIL3-RR ASSIGNMENT COMPLETE)، تُجري شبكة النفاذ ربطاً بين القناة المعرّفة على الرابط A (أي باتجاه الشبكة المركزية) والقناة التي جرى تخصيصها على الرابط الراديوي، بحيث تكتمل الدارة التي سيحجزها الاتصال، ثم تُعلم مركز التبديل بإتمام الإجراء عن طريق رسالة (BSSMAP; ASSIGNMENT COMPLETE).
هذا ونفترض في هذا المثال أن تخصيص القناة الراديوية ممكن دون أية صعوبات، غير أنه من الممكن في الحالات الواقعية، وضمن شبكة كبيرة، ظهور بعض المعوقات، مثل عدم توفر قناة راديوية، أو أخطاء فنية في الوحدة المتحركة أو المحطة الثابتة. وفي حالة حصول ذلك، ترسل وحدة التحكم إلى مركز التبديل رسالةً بديلة عن رسالة الإقرار (RIL3-RR ASSIGNMENT COMPLETE) وهذه الرسالة هي (RIL3-RR ASSIGNMENT FAILURE).

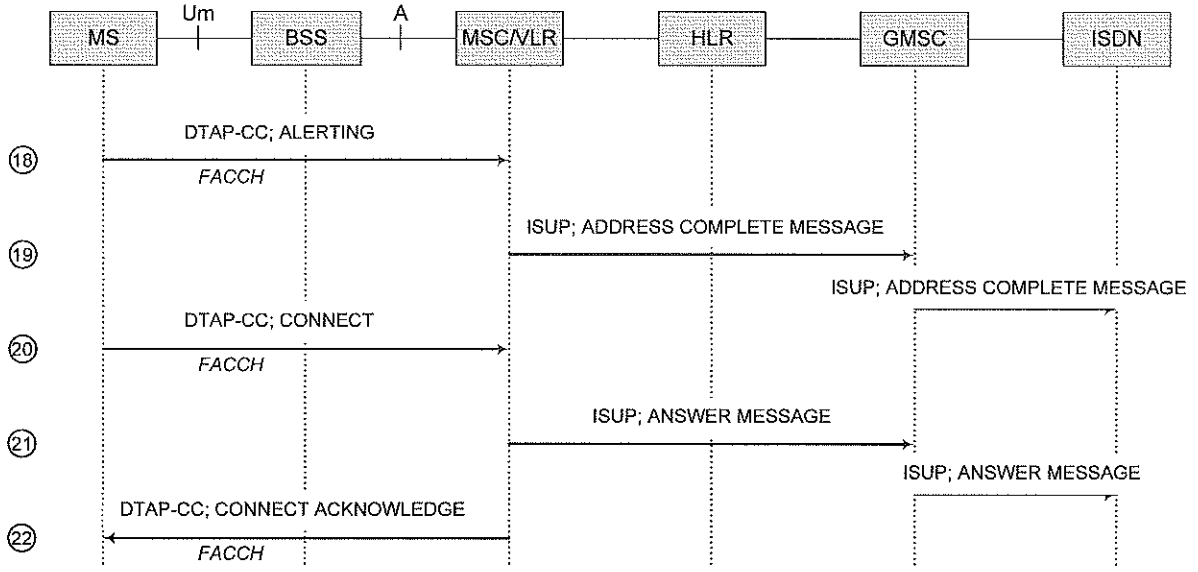
١٨) ذكرنا في الخطوة ١٦ أن الوحدة المتحركة تنبه المشترك بورود اتصال عن طريق الرنين، وفور بدء الرنين، تعلم الوحدة الشبكة بذلك عن طريق رسالة (DTAP-CC; ALERTING) التي تُرسَل إلى مركز التبديل. هذا وتُنقل هذه الرسالة على الرابط الراديوي باستخدام قناة FACCH، التي ترافق قناة TCH المخصصة.

١٩) بعد استلام إشعار الوحدة المتحركة، يولّد مركز التبديل MSC بدوره إشارةَ رنينٍ إخطاراً للطرف المتصِل بأن الرقم المطلوب قد أُعلم بالاتصال وأن الجهاز المعني يرن، كما يرسل مركز MSC رسالةً إلى شبكة ISDN إعلاماً لها بأنه أخطر الطرف الآخر. تُستخدم لهذا الغرض رسالة (ISUP; ADDRESS COMPLETE MESSAGE)، التي يتولى مقسم GMSC تمريرها إلى مقسم شبكة ISDN المعني.

هناك ثلاثة احتمالات لما يمكن أن يحدث بعد ذلك: الأول هو أن يرفض الرقم المطلوب المكالمة، والثاني هو أن يقبلها، والثالث هو أن لا يجيب. ونظراً لأن قناة TCH تكون محجوزة في هذه الأثناء، يطلق مركز التبديل مؤقتاً يضبط المدة الزمنية

للرنين، فإذا تجاوزت مدة الرنين المدة القصوى المتاحة والتي تتفاوت من مشغل لآخر، قُطعت خطوات الاتصال حفاظاً على موارد الشبكة، وأُعلمَ الطرف المتصِّل بذلك. هذا ونفترض في مثالنا أن المشترك المطلوب (B-Party) قد أجاب.

٢٠)إذا أجاب المشترك على الاتصال وضغط مفتاح القبول، تتوقف الوحدة المتحركة عن الرنين، وتعلم مركز التبديل MSC بذلك عن طريق رسالة (DTAP-CC; CONNECT).



تتمة الشكل ٧-٢٣: خطوات ورود اتصال والإجابة عليه.

٢١) بعد ذلك، يُوقف مركز التبديل أيضاً إشارة الرنين التي كان يطلقها، ويصل الدارة التي تربطه بشبكة الهاتف الثابت مع الدارة المتاحة في الشبكة الراديوية، كما يرسل رسالة (ISUP; ANSWER MESSAGE) إلى مقسم GMSC.

بدوره يرسل مركز GMSC رسالة (ISUP; ANSWER MESSAGE) إلى شبكة الهاتف الثابت، إشعاراً لها بأن الاتصال قد أُجيب.

بذلك يكون مسار الاتصال بين طرفي المكالمة (A–Party و B–Party) قد اكتمل تماماً، وهذا يُطلق إجراءات الفوترة.

٢٢) في خطوة أخيرة، يُعلم مركز التبديل الوحدة المتحركة باكتمال إجراءات الربط بينها وبين طرف الاتصال الآخر وذلك عن طريق رسالة (DTAP-CC; CONNECT ACKNOWLEDGE).

بعد اكتمال الخطوات السابقة يكون طور إنشاء الاتصال قد انتهى، ويبدأ طرفا الاتصال بتبادل المعلومات الفعلية (الحديث الهاتفي) على قناة TCH التي تكون قد خصصت للاتصال، فإذا أغلق أحد الطرفين هاتفه، أُطلِقت إجراءات إنهاء الاتصال وتحرير الموارد الفيزيائية، التي تقدم شرحها.

٧-٣-٩ إجراء التسليم

يمكن تعريف إجراء "التسليم" "Handover (HO)" بأنه التبديل التلقائي (الأوتوماتيكي) للقناة الفيزيائية الحاملة لاتصالٍ قائم، وذلك مواكبةً لحركة المشترك ولما تقتضيه هذه الحركة من تغيراتٍ في جودة الإشارة المستقبلة. من أوضح الأمثلة التي تبين أهمية هذا الإجراء، ما يحدث عندما يتحرك المشترك مبتعداً عن المحطة الثابتة التي تغذيه بالإشارة، إذ أن نتائج القياسات الدورية لجودة الإشارة تشير في مثل هذه الحالة إلى انخفاض تدريجي لقوة الإشارة المستقبلة من المحطة المغذية، وإلى ارتفاع تدريجي في قوة الإشارة المستقبلة من الخلايا المجاورة. يقود ذلك في لحظةٍ ما إلى أن يصبح مستوى الإشارة المستقبلة من المحطة المغذية غير كافٍ لمتابعة الاتصال بجودة مقبولة، ما يحتّم الانتقال إلى قناة فيزيائية بديلة، تبثها المحطة المغذية لخلية أخرى مجاورة.

ذكرنا في موضع سابق أن تبادل نتائج القياس الدوري للإشارة بين وحدة التحكم والمحطة الثابتة يقع ضمن مهام RR، وهذا يعني أن وحدة التحكم BSC تستقبل نتائج القياس من أكثر من محطة، ما يجعلها على درايةٍ بالقناة الفيزيائية الأنسب لانتقال المشترك، لذا تكون وحدة BSC في العادة هي الجهة التي تتخذ قرارَ مباشرة إجراءات التسليم، واللحظة المناسبة لهذه المباشرة. غير أن هناك بعض حالات التسليم أيضاً التي تستدعي أو تتطلب تنسيقاً من طرف مركز التبديل، وذلك عندما تكون المحطة المغذية الجديدة تابعةً لوحدة تحكم مختلفة أو لمنطقة خدمة مركز تبديلٍ مختلف.

تُصنَّف إجراءات التسليم وفقاً للدافع إليها أو تبعاً لنمطها من الناحية الطوبولوجية، فمن ناحية الدافع يمكن التمييز بين ما يلي:

١) "Rescue Handover": عندما تقل جودة الإشارة عن عتبة معينة، يتعذر الحفاظ على الاتصال قائماً، وقد يؤدي ذلك في إلى انقطاعه لوهلة. للحيلولة دون ذلك، يجري تحويل المكالمة إلى تردد مختلف في خلية أخرى. وهذه هي الدلالة التي يحملها اسم هذا النمط.

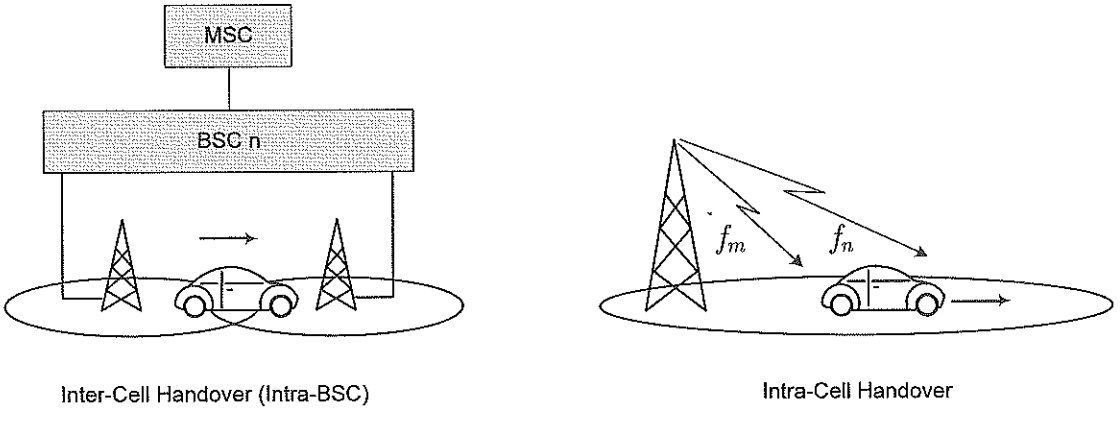
٢) "Confinement Handover": قد تدلُّ نتائج قياس مستوى التشويش ضمن الشبكة على أن الإشارات الصادرة عن محطة معينة تسبب تشويشاً مميزاً ضمن منطقة جغرافية محددة، لذا تحاول الشبكة في مثل هذه الحالة تحويل المكالمات من القنوات الراديوية التي تبثها هذه المحطة إلى قنوات راديوية بديلة، تصدر عن محطات مجاورة.

٣) "Traffic Handover" أو "Load Balancing": عندما يصبح عدد المشتركين ضمن خلية معينة كبيراً، تلجأ الشبكة إلى تحويل المشتركين الموجودين على طرف الخلية إلى خلايا مجاورة، وذلك كي يتاح لمشتركين ذوي أولوية خاصة النفاذ إلى الخلية واستخدام الموارد المتاحة (مثالُ ذلك أن يمر مشتركٌ بسيارته ضمن الخلية، ما يوجب منحه قناةً على نحوٍ مباشر للحيلولة دون انقطاع مكالمته).

أما من الناحية الطوبولوجية، فيكون التصنيف كما يلي (انظر الشكل ٧-٢٤):

١) هناك حالات خاصة تستدعي نقل المشترك من قناة راديوية إلى أخرى ضمن الخلية ذاتها. يعرف هذا النمط باسم "Intra-BTS Handover" أو "Intra-Cell Handover"، كما يُشار إليه أحياناً بتعبير "Subsequent Assignment".

٢) إذا قادت إجراءات التسليم إلى انتقال المشترك من خلية إلى أخرى ضمن منطقةِ تحكمِ وحدةِ BSC مشتركة، يكون الاسم الاصطلاحي لنمط التسليم في هذه الحالة هو "Inter-Cell Handover" في دلالة على تبديل الخلية. يوصف هذا النمط أيضاً بتعبير "Intra-BSC Handover"، للدلالة على أنه داخلي من منظور وحدة التحكم.

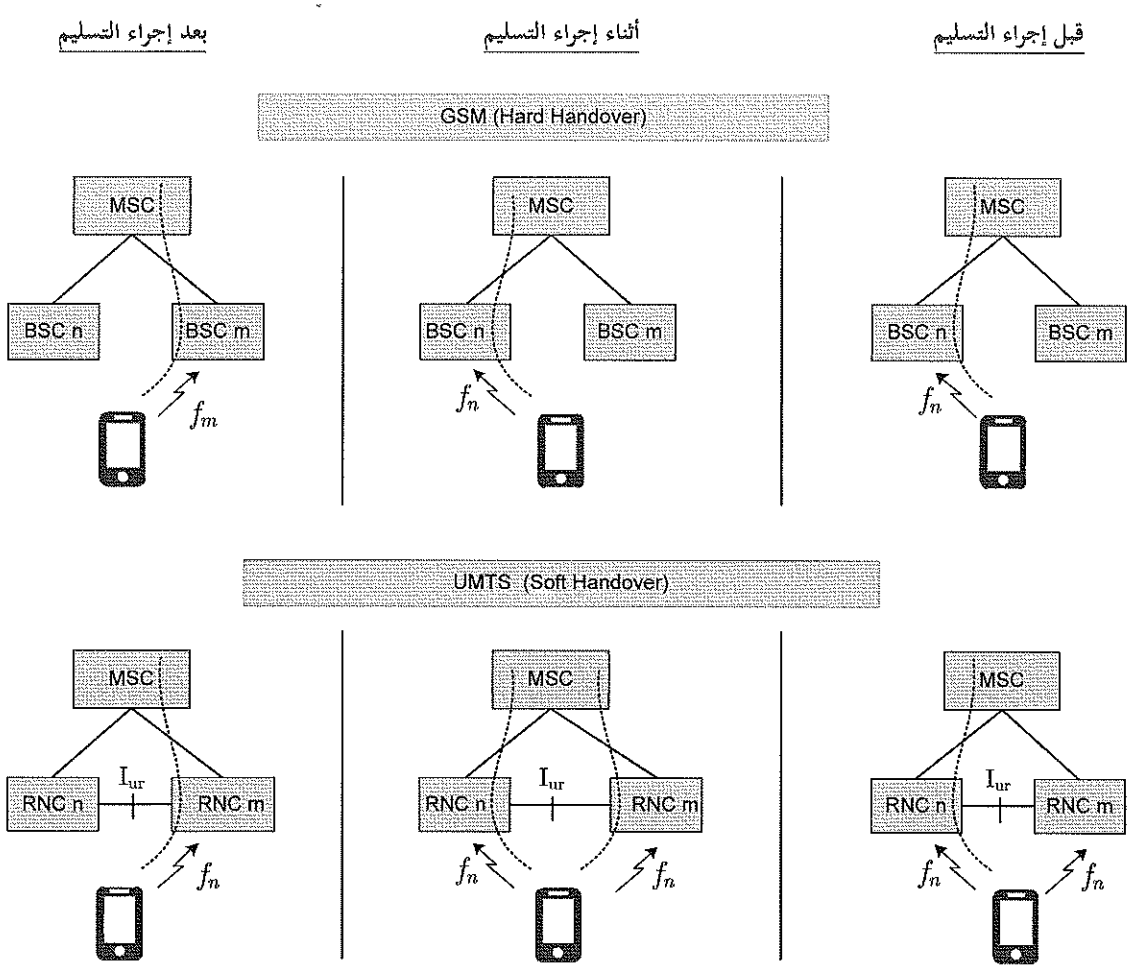


الشكل ٧-٢٤: أنماط إجراء التسليم من الناحية الطوبولوجية.

٣) إذا قادت عملية التسليم إلى استخدام المشترك لقناة راديوية جديدة في خلية تابعة لوحدة تحكم أخرى، فإن التسليم يوصف باسم "Inter-BSC Handover"، وإذا كانت وحدتا التحكم القديمة والجديدة تتبعان لمركز التبديل ذاته، فإن النمط يوصف أيضاً بـ "Intra-MSC Handover".

٤) عند انتقال المشترك إلى خلية تقع ضمن منطقة خدمة مركز تبديل مختلف، يكون التغيير قد شمل انتقالاً من وحدة BSC إلى أخرى أيضاً. يعرف نمط التسليم في هذه الحالة باسم "Inter-MSC Handover"، ويندرج تحته انتقال المشترك من شبكةٍ إلى أخرى.

إضافة إلى ما سبق، تختلف إجراءات التسليم من نظامٍ إلى آخر وذلك من ناحية استمرارية ارتباط المشترك بالشبكة أثناء إجراءات التسليم. فعلى سبيل المثال، لا يتيح نظام GSM سوى نوعاً واحداً من هذه الإجراءات، يُعرف باسم "Hard Handover" (انظر الشكل ٧-٢٥)، ويتميز بأن المشترك في أية لحظة يكون متصلاً بالشبكة عن طريق قناة فيزيائية واحدة، وحين ينتقل إلى قناة ترددية أخرى، يقود الانتقال إلى قطع الاتصال بالشبكة لمدة وجيزة جداً، تتراوح بين 100 ms و 200 ms، وذلك حتى تتمكن الوحدة المتحركة من توليف وضبط الدارات على التردد الجديد، وحتى تكتمل إجراءات التحكم المتعلقة بإنشاء مسار راديوي جديد مع الشبكة. يعني ذلك أن كل أنماط التسليم التي يبينها الشكل ٧-٢٤ تندرج -في نظام GSM- تحت مُسمَّى Hard Handover.



الشكل ٧-٢٥: توضيح للفرق بين نمطي Hard Handover و Soft Handover لإجراء التسليم.

خلافاً لذلك، يتيح نظام UMTS نوعاً إضافياً من إجراءات التسليم، فنظراً لأن الخلايا في هذا النظام قد تستخدم القناة الترددية ذاتها، وأن التباين بين المشتركين والخلايا يكون من خلال سلاسل الترميز والبعثرة، لا يغير المشترك عند الانتقال إلى

خلية جديدة القناة الترددية الحاملة لإشاراته[١]، وإنما يبدل متتاليات البعثرة، وهذا إجراءٌ يتعلق بمعالجة الإشارة ضمن النطاق الأساسي. لذا من الممكن أن يبقى المشترك محافظاً على اتصاله بالخلية التي سينتقل منها، وأن يُنشِأَ الاتصال مع الخلية الجديدة، بحيث يكون المشترك لمدة وجيزة متصلاً بأكثر من خلية في آنٍ واحد[٢]، وهذا يتيح للشبكة اختيار الإشارة الأفضل لمتابعة معالجتها. وإذا كان المشترك ينتقل من خلية ضمن منطقة RNC إلى منطقة وحدةِ RNC أخرى، أمكن لوحدتي التحكم التنسيق لمتابعة التحكم بالاتصال عن طريق تبادل المعلومات عبر الرابط Iur (انظر الشكل ٦-٤).

يُعرف هذا النمط من التسليم باسم "Soft Handover"، في دلالة على الانتقال التدريجي من خلية إلى أخرى. وهناك حالة خاصة من هذا النمط وهي أن تستقبل الوحدة المتحركة الاشارة من خليتين قطاعيتين في نفس الموقع، ما يقود إلى اتصالٍ آني بهاتين الخليتين تحت إدارة وحدة التحكم RNC المشتركة بينهما. يُدعى نمط التسليم وفق هذه الحالة بـ"Softer Handover".

تُنجزُ إجراءات التسليم ضمن ثلاثة أطوار أساسية:

١) اتخاذ قرار نقل المشترك إلى خلية أخرى: ذكرنا سابقاً أن وحدة التحكم BSC أو RNC هي المعنية في غالب الأحيان باتخاذ قرار إطلاق إجراءات التسليم، ويُبنى هذا القرار استناداً إلى إجراءات قياس متعددة وتفصيلية، تأخذ بعين الاعتبار بُعدَ المشترك عن المحطة الثابتة المغذية، وقوة الإشارة التي تستقبلها الوحدة المتحركة، ونسبة التشويش، وقوة الإشارة المستقبلة من محطات مجاورة. ويجري اتخاذ القرار بحيث يبقى المشترك في الخلية الجديدة أطولَ مدة ممكنة، لذا لا توافق لحظةُ الانتقال اللحظةَ التي تكون فيها الإشارتان المستقبلتان من الخلية الجديدة والقديمة متساويتان من ناحية القيمة أو الجودة، وإنما تجري عملية التسليم بعد أن تكون الإشارة المستقبلة من الخلية الجديدة قد صارت أفضل من الإشارة المستقبلة من الخلية القديمة بفارقٍ أو هامشٍ محدد يُعرف باسم "Handover Margin" (انظر الشكل ٧-٢٦)، وهذا يُجَنِّبُ الشبكة مشكلة تكرار انتقال المشترك من خلية إلى أخرى في المناطق الجغرافية الحدودية بين خليتين متجاورتين. فنظراً لتأرجح قيم الإشارة المستقبلة من كلٍّ من الخليتين، قد تتعاقب الإشارتان من ناحية القيمة المطلقة، بحيث تفضُلُ إحداهما الأخرى لوهلة، ثم ينعكس ترتيب الأفضلية بعد مسافة قصيرة، فلو كان قرار تسليم المشترك من خلية لأخرى يُبنى استناداً إلى كون إشارةٍ أقوى من أخرى بالمعنى المطلق، سيتكرر إجراء التسليم مراتٍ كثيرة تبعاً لحركة المشترك في المنطقة الحدودية بين الخليتين (تُعرف هذه الظاهرة تعرف اصطلاحاً بـ "Ping-Pong Handover")، وفي ذلك هدرٌ لموارد الشبكة المخصصة للتحكم.

٢) اختيار الخلية الجديدة: بعد اتخاذ قرار تسليم المشترك من خلية إلى أخرى، يجب على وحدة التحكم اختيار الخلية الأنسب. يجري ذلك استناداً إلى تحليل نتائج القياسات المتوفرة عن الخلايا المجاورة، وترتيبها وفق أفضليتها من ناحية قوة الإشارة المستقبلة ونسبة الإشارة إلى التشويش.

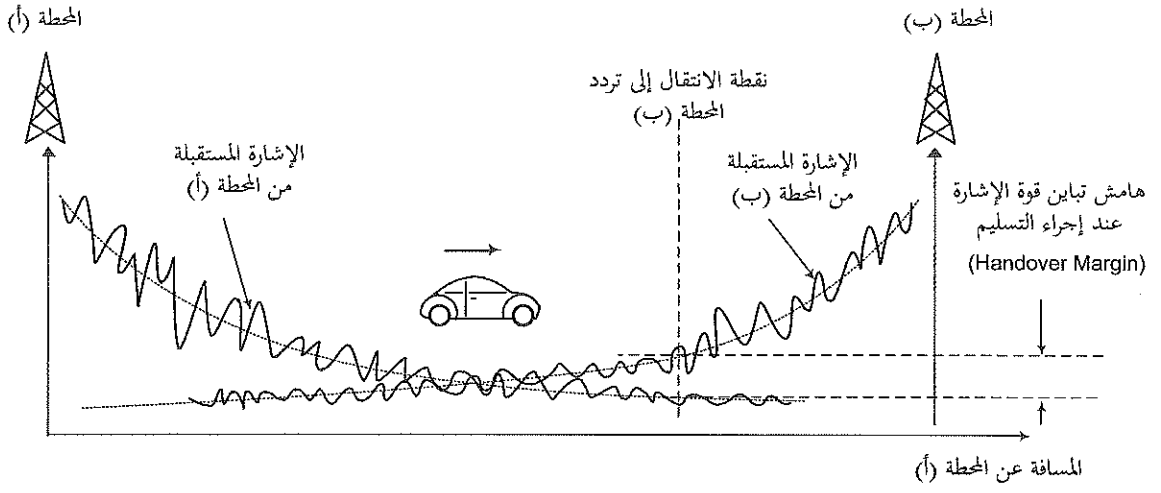
٣) اختيار القناة الفيزيائية المناسبة: يشمل ذلك ترتيب كل الأحياز الزمنية الشاغرة ضمن الخلية وفقاً لجودة الإشارة المتاحة عليها، ثم اختيار القناة الفيزيائية الأنسب من ناحية استثمار الموارد المتاحة.

---

[١] نفترض في هذا السياق توفر قناة واحدة للنظام بعرض 5MHz، أما إذا توفرت أكثر من قناة، فإن التسليم قد يعني الانتقال من قناة إلى أخرى.

[٢] تبيح المواصفات المعيارية الارتباط بـ 6 خلايا في آنٍ واحد.

هذا وتُنجز الإجراءات المتعددة ضمن الأطوار المختلفة وفق معايير رياضية دقيقة، يَخرج التفصيل المتعلق بها عن إطار هذا الفصل، ويمكن الرجوع إليها في [١٠] و [١٣].



الشكل ٧-٢٦: حول اختيار نقطة مباشرة إجراءات التسليم.

نعرض في ما يلي لخطوات إجراءات التسليم، ونختار كمثالٍ لنقاش المبادئ والأسس حالة انتقال المشترك من خلية ضمن منطقة تحكم وحدة BSC إلى خلية جديدة ضمن منطقة وحدة تحكمٍ مختلفة، أي أن نمط التسليم في المثال الذي نناقشه هو Inter-BSC. كذلك نفترض أن وحدتي التحكم المعنيتين تتبعان لمركز تبديلٍ مشترك، ما يعني أيضاً أن النمط من صنف Intra-MSC (انظر الشكل ٧-٢٤). يشمل إجراء التسليم في هذه الحالة الخطوات التالية (انظر الشكل ٧-٢٧ وتتمته):

١) سبق البيان في الفصل ٤ بأن الوحدة المتحركة تُجري قياسات دورية للإشارة التي تصلها من المحطة المغذية ولإشارات 6 محطات مجاورة على الأقل. ويجري إرسال نتائج هذه القياسات من الوحدة المتحركة إلى الشبكة كرسالةٍ من الطبقة الثالثة (انظر الشكل ٤-٣٠) باستخدام قناة SACCH، ووفق دورٍ مقداره 480 ms. تُحمل هذه القياسات ضمن رسالة (RIL3-RR; MEASUREMENT REPORT)، فاذا وصلت هذه الرسالة إلى المحطة الثابتة، مررتها الأخيرة إلى وحدة التحكم ضمن رسالة (BTSM; MEASUREMENT RESULT).

٢) إذا تبين لوحدة التحكم التي يقع المشترك حالياً ضمن نطاق إدارتها ، والتي نشير إليها بـ BSC-Old، وجوبُ أو ضرورةُ مباشرة إجراءات التسليم، تُرسل رسالة (BSSMAP;HANDOVER REQUIRED). إلى مركز التبديل MSC، مع اسم الخلية المرشحة لنقل المشترك إليها، والتي نفترض أنها تتبع وحدة تحكم أخرى. هذا ويجري إشراك مركز التبديل في الإجراءات لأن الخلية الجديدة تتبع لوحدة تحكم مختلفة، ما يتطلب تنسيقاً مباشراً من قبل مركز التبديل، إذ ليس هناك رابط مباشر بين وحدات التحكم في نظام GSM، كما أن وحدة التحكم لا تملك أن تدير استخدام موارد وحدة تحكم أخرى.

٣) بعد استلام الرسالة السابقة من وحدة التحكم، يبدأ مركز التبديل إجراءات نقل المشترك إلى وحدة التحكم الجديدة (BSC-New)، وذلك بتوجيه رسالة (BSSMAP; HANDOVER REQUEST) إليها. وتحمل هذه الرسالة مواصفات القناة الفيزيائية المطلوبة، تبعاً للخدمة التي يستخدمها المشترك حالياً.

٤) تطلب وحدة BSC-New من المحطة الثابتة التي جرى اختيارها لنقل المشترك إليها تفعيل قناة راديوية للمشترك، وذلك عبر رسالة (BTSM; CHANNEL ACTIVATION)، التي تمثل أيضاً إيذاناً للمحطة الجديدة بمباشرة إجراءات تسليم مشترك جديد إليها. وتحمل هذه الرسالة كل التفاصيل المتعلقة بالقناة التي يجب تفعيلها، ونمط إجراء التسليم، إضافة إلى رقمٍ يميز هذا الإجراء عن غيره ويعرف باسم "رمز إجراء التسليم" "Handover Reference Number (HRN)"، يفيد في تنسيق إجراءات التسليم المتعلقة بعدة مشتركين.

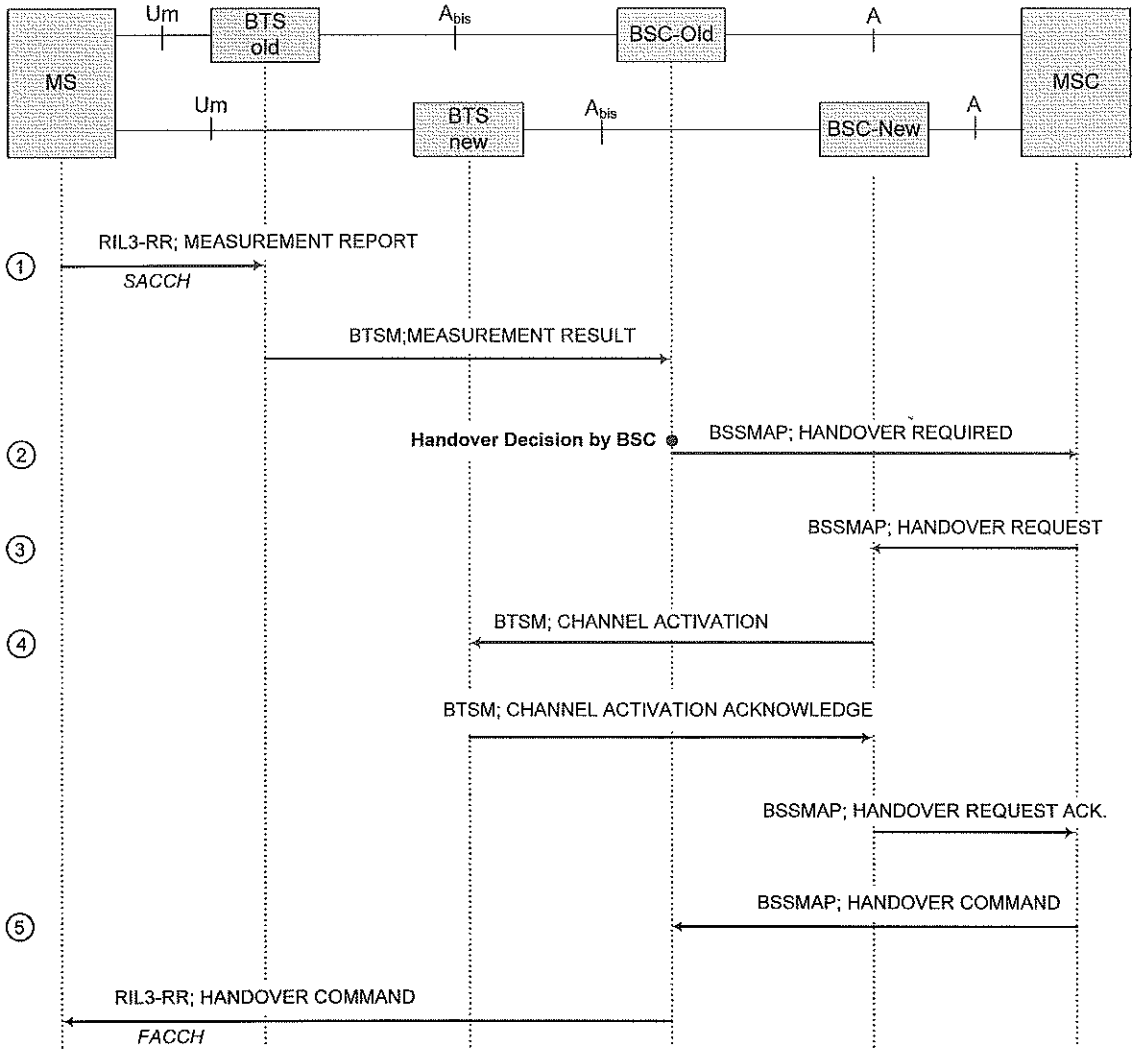
بعد استكمال إجراءات تخصيص القناة الفيزيائية، ترسل المحطة الثابتة الجديدة رسالةً إلى وحدة التحكم BSC-New لإعلامها بذلك (BTSM; CHANNEL ACTIVATION ACKNOWLEDGE)، وبدورها تُعلم وحدة التحكم مركزَ التبديل MSC باستلام طلب التسليم عبر رسالة (BSSMAP; HANDOVER REQUEST ACKNOWLEDGE). تحمل الرسالة طيها التفاصيل المتعلقة بالقناة المخصصة للمشترك، إضافةً إلى رمز إجراء التسليم HRN.

٥) يُعلم مركز التبديل وحدة التحكم القديمة BSC-Old عبر رسالة (BSSMAP; HANDOVER COMMAND) أنه صار من الممكن للوحدة المتحركة الانتقال إلى الخلية الجديدة، وأن الموارد الفيزيائية الضرورية لذلك قد جرى تخصيصها. بدورها تُرسل وحدة التحكم القديمة BSC-Old رسالة مشابهة (RIL3-RR; HANDOVER COMMAND) إلى الوحدة المتحركة، طالبةً منها توليف وضبط الدارات على القناة الجديدة. تتلقى الوحدة المتحركة عبر هذه الرسالة أيضاً رقم الإجراء HRN، هذا وتُحمل هذه الرسالة على قناة FACCH.

٦) بعد ضبط دارات الإرسال على القناة الجديدة، ترسل الوحدة المتحركة رسالة (RIL3-RR; HANDOVER ACCESS) إلى المحطة الثابتة الجديدة، على قناة FACCH الجديدة. وترفق بهذه الرسالة رمز الإجراء HRN، الذي يجري اختباره في المحطة الجديدة للتأكد من أن طلب الولوج صادر من الوحدة المتحركة المعنية، حيث سبق وأُخبرت المحطة برقم HRN في الخطوة ٤.

كذلك تخبر المحطة الثابتة الجديدة BTS-New وحدة التحكم الجديدة BSC-New بمقدار تأخير وصول إشارة الوحدة المتحركة، الذي تقرؤه من رزمة طلب النفاذ، وذلك عبر رسالة (BTSM; HANDOVER DETECTION). بدورها تمرر وحدة التحكم المعلومات إلى مركز التبديل باستخدام رسالة (BSSMAP; HANDOVER DETECT).

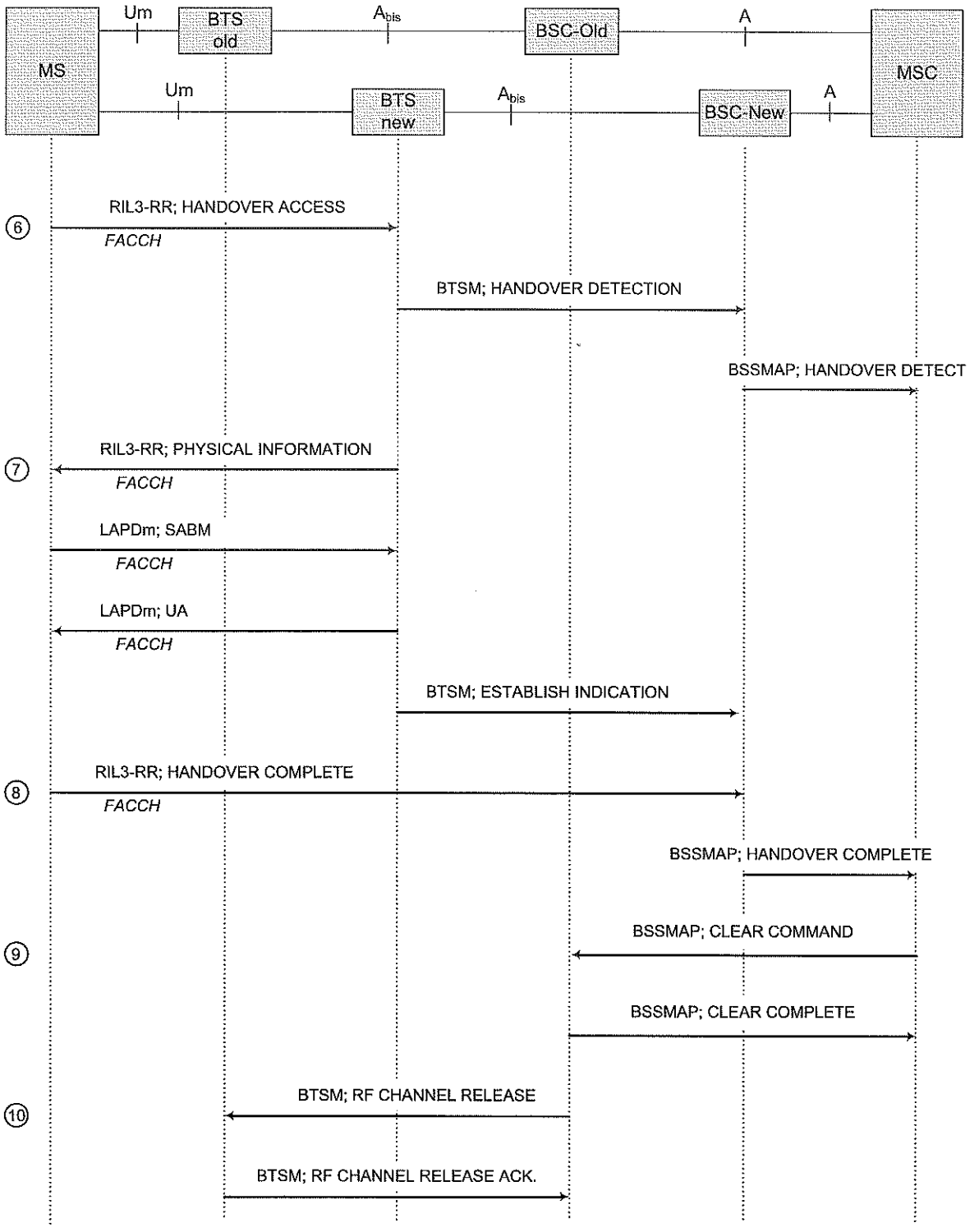
٧) بعد ذلك يجري تعريف سياق الاتصال الجديد، حيث ترسل BTS-New إلى الوحدة المتحركة التفاصيل المتعلقة بخصائص الإرسال والاستقبال ضمن الطبقة المادية، وذلك عن طريق رسالة (RIL3-RR; PHYSICAL INFORMATION). من هذه الخصائص مقدار تقديم الإرسال المطلوب، ومقدار طاقة البث، وغير ذلك من المعلومات المتعلقة بالإرسال والاستقبال على الرابط الراديوي.



الشكل ٧-٢٧: خطوات إجراء التسليم بنمط Inter-BSC Handover.

يتبع ذلك تبادل الرسائل التي تخصُّ تعريف سياق الاتصال مع كلٍّ من BTS-New و BSC-New على نحوٍ مشابه لما عرضناه في خطوات النفاذ العشوائي وتخصيص قناة فيزيائية. وتُستخدم لذلك رسالة (LAPDm; SABM) من قبل الوحدة المتحركة لمباشرة تبادل المعلومات بنمط الإقرار، والتي تجيب عليها المحطة الثابتة برسالة (LAPDm; UA) إقراراً باستلام رسالة SABM وإعلاماً بأن مسار الاتصال الموثوق بين الطرفين قد جرى إنشاؤه.

بعد استلام رسالة SABM، ترسل المحطة الثابتة رسالة (BTSM; ESTABLISH INDICATION) إلى وحدة التحكم. تحمل هذه الرسالة طلباً لوحدة التحكم بتعريف سياقٍ خاص للاتصال مع المحطة، وذلك كي يكتمل مسار تبادل المعلومات المعرّف لهذا الاتصال بين الوحدةالمتحركة ووحدة التحكم، حيث أن التعريف الذي جرى في الخطوة السابقة شمل سياق الاتصال لغاية المحطة فقط.



تابع الشكل ٧-٢٧: خطوات إجراء التسليم بنمط Inter-BSC Handover.

٨) بذلك تكون إجراءات التحضير للتواصل مع المحطة الثابتة الجديدة قد اكتملت، لذا ترسل الوحدة المتحركة رسالة (RIL3-RR; HANDOVER COMPLETE) إلى وحدة التحكم، بدورها تنقل وحدة BSC-New إشعار إتمام إجراءات التسليم إلى مركز التبديل، الذي يكون الآن أكيداً من أن التواصل عبر الرابط الراديوي متاحٌ وموثوق. ويجري ذلك باستخدام رسالة (BSSMAP; HANDOVER COMPLETE).

٩) يُجري مركز التبديل تحريراً للدارة التي كانت تربطه بـ BSC-Old (حيز زمني على إطار E1)، ويُنجَز ذلك بعد إرسال رسالة (BSSMAP; CLEAR COMMAND) من مركز التبديل إلى وحدة التحكم، التي تجيب برسالة إقرارٍ بإنجاز الأمر. يُفَعِّل مركز التبديل بعد تحرير الدارة مع وحدة التحكم القديمة دارةً جديدة تربطه بـ BSC-New.

١٠) في خطوة تالية، تطلب وحدة التحكم القديمة من المحطة الثابتة القديمة تحرير القنوات الراديوية التي كانت مخصصة في المحطة القديمة، أي قناة TCH وقناة SACCH المقترنة بها، وذلك عبر رسالة (BTSM; RF CHANNEL RELEASE)، فإذا تمَّ ذلك، أرسلت المحطة الثابتة إقراراً إلى وحدة التحكم عبر رسالة (.BTSM; RF CHANNEL RELEASE ACK).
بعد تحرير الموارد الفيزيائية واكتمال انتقال المشترك، تقرأ الوحدة المتحركة المعلومات الخاصة بالمحطة الجديدة من قناة SACCH الجديدة ، ومنها رقم منطقة الوجود الجديدة، ثم يمكن للمحطة مباشرةً إجراءات تحديث رقم منطقة الوجود LU.

بهذا المثال نكون قد استكملنا عرض الأمثلة التي اخترنا نقاشها في سياق شرح تسلسل خطوات إنجاز الاتصال.

ختاماً لهذا الفصل، نذكِّرُ بما سبقت الإشارة إليه من أن الأمثلة التي تناولناها تكفي لبيان المبادئ الأساسية التي تحكم تبادل المعلومات بين عناصر الشبكة المختلفة، وهذه المبادئ لا تختلف من ناحية الجوهر في حالة الخدمات الأخرى (كتبادل الرسائل النصية أو المعطيات الرزمية) أو حين تقديم خدمات الاتصال اعتماداً على نظام UMTS أو غيره، وإن اختلفت بعض التفاصيل.

٧-٤ مراجع مختارة

[١] 3GPP Specifications TS 44.008, "Mobile radio interface Layer 3 specification; Core network protocols".

[٢] G. Heine, "GSM Networks: Protocols, Terminology, and Implementation", Artech House, 1999.

[٣] L. Dryburgh, and J. Hewitt, "Signalling System No. 7 (SS7/C7): Protocol, Architecture, and Services", Cisco Press, 2004.

[٤] ITU-T Recommendation Q 708, "Assignment procedures for international signalling point codes".

[٥] 3GPP Specifications TS 23.003, "Numbering, addressing and identification".

ITU-T Recommendation Q.713, "Signalling Connection Control Part Formats and Codes". [٦]

3GPP Specifications TS 44.006, "Mobile Station-Base Station System (MS-BSS) interface; Data Link (DL) layer specification". [٧]

3GPP Specifications TS 45.005, "Radio transmission and reception". [٨]

S. K. Das, "Mobile Handset Design", John Wiley & Sons, 2010. [٩]

J. Eberspächer et al., "GSM – Architecture, Protocols and Services", John Wiley & Sons, 2010. [١٠]

3GPP Specifications TS 44.018, "Mobile radio interface layer 3 specification; Radio Resource Control (RRC) protocol". [١١]

3GPP Specifications TS 48.058, "Base Station Controller- Base Transceiver Station (BSC - BTS) interface; Layer 3 specifications". [١٢]

B. Walke, "Mobile Radio Networks: Networking and Protocols", John Wiley & Sons, 1999. [١٣]

خاتمة

ليس في وسع كتابٍ يعرضُ أسسَ ومبادئَ حقلٍ هندسيٍّ وتقني متجدد أن يحيط بكل مواضيعه وتفاصيله، خصوصاً إذا كان هذا الحقل يشهد وتيرةَ تطوّرٍ قلَّ نظيرها، لذا بُنِيَ اختيارُنا لمضامين وأبحاث الكتاب على القاعدة المعرفية التي يجب توفرها لدى خريج هندسة الاتصالات والمهندس المبتدئ، والتي يمكن الاعتماد عليها إما للتوسع في مجال الدراسة بحثاً وتخصصاً، أو لممارسة الحياة المهنية بأكبر قدرٍ ممكن من الاستعداد والنجاح. واستكمالاً للفائدة نلفتُ نظر القارئ إلى عناوين بعض المواضيع التي نرى لها أهمية مميزة من الناحية العملية، ولم يُتِحِ الإطارُ المرسوم للكتاب عرضَها ونقاشها. هذه العناوين هي:

- الخدمات التي تتيحها شبكات الاتصالات الخلوية (Mobile Communications Services).
- مبادئ عمل الشبكات الذكية (Intelligent Networks).
- مبادئ تخطيط الشبكات (Network Planning).
- أهم مؤشرات أداء الشبكات (Network Performance Indicators).

من جانب آخر، لا يخفى على أي متابع للمستجدات التقنية أن خدمات الجيل الرابع من الاتصالات صارت جزءاً أساسياً مما تقدمه العشرات من الشبكات المنتشرة على مستوى إقليمي وعالمي، وقد يثير هذا الواقع تساؤلاً حول جدوى اقتصار الكتاب على نقاش خدمات الاتصالات الأساسية أو التقليدية. ونحن نؤكد في هذا الصدد مرة أخرى بأن المفاهيم التي نُوقشت ضمن أبحاث الكتاب مشتركة بين كل أجيال نظم الاتصالات، بدءاً من الجيل الثاني وانتهاءً بالجيل الرابع أو ما سيليه. فالاختلافات الجوهرية بين هذه النظم لا تمس المبادئ الأساسية التي عرضنا لها، وإنما الطرق المتبعة لاستثمار هذه المبادئ وإنجازها على أرض الواقع، ولعل أفضل مثال على ذلك هو مبدأ النفاذ المتعدد الذي يمثل محور القفزات التقنية النوعية بين كل من الجيل الثاني والثالث والرابع، فمبدأ وأغراض تعدد النفاذ مشتركة بين النظم المختلفة، أما طريقة تحقيقه فهي المختلفة من جيلٍ لآخر.

إن إيصال هذا المفهوم إلى القراء ومن ثم المساهمة في إزالة التوجّس من القراءة المتعمقة للمصادر والمراجع العلمية الحديثة، يمثل واحداً من أهم مطالب الكتاب التي نرجو له أن يحققها، والله من وراء القصد.

مسرد بأهم المختصرات

المختصر	المصطلح التقني	الصفحة
3GPP	Third Generation Partnership Project	٢٢
3GPP2	Third Generation Partnership Project 2	٢٣
8PSK	8 Phase Shift Keying	٢١
ABS	Analysis by Synthesis	٢٣٩
ACELP	Algebraic Code Excited Linear Prediction	٢٣٩
ACM	Address Complete	٣٧٠
AGCH	Access Grant Channel	١٦٨
AMR	Adaptive Multi Rate	٢٣٩
ANM	Answer Message	٣٧٠
ARFCN	Absolute Radio Frequency Channel Number	٤١
ARQ	Automatic Repeat Request	٢٤٤
AUC	Authentication Center	٣٣٠
BCC	Base Station Color Code	١٦٤
BCCH	Broadcast Control Channel	١٥٨
BCF	Base Control Function	٣٦٠
BCH	Broadcast Channels	١٥٨
BCS	Block Check Sequence	٢٠٨
BEC	Backward Error Correction	٢٤٤
BER	Bit Error Rate	٢٩
BFI	Bad Frame Indicator	٢٤٣
BN	Bit Number	١٦٣
BPSK	Binary Phase Shift Keying	٥٧
BS	Base Station	٣٠٥
BSC	Base Station Controller	٣٠٥
BSIC	Base Station Identity Code	١٦٤
BSS	Base Station System	٢٨٧
BSS	Base Station System	٢٨٧

BSSMAP ..... BSS Mobile Application Part ٣٧٢
BTS ..... Base Transceiver Station ٣٠٥
BTSM ..... Base Transceiver Station Management ٣٦٠
CC ..... Country Code ٢٩٢
CCCH ..... Common Control Channels ١٦٤
CCH ..... Control Channels ٥
CDMA ..... Code Division Multiple Access ٥٢
CDMA-One ..... Code Division Multiple Access-Generation One ٢٠
CDR ..... Call Data Record ٣٢٣
CE ..... Channel Element ٣٠٩
CELP ..... Code Excited Linear Prediction ٢٣٧
CGI ..... Cell Global Identity ٣٤١
CI ..... Cell Identity ٣٤١
CM ..... Connection Management ٣٥٠
CN ..... Core Network ٢٨٧
CNIR ..... Carrier to Noise and Interference Ratio ٣٠
CPU ..... Central Processor Unit ٣٠٢
CS-Domain ..... Circuit Switched Domain ٢٨٨
CU ..... Carrier Unit ٣٠٦
D-AMPS ..... Digital Advanced Mobile Phone System ٢٠
DCA ..... Dynamic Channel Allocation ٢٠٤
DCCH ..... Dedicated Control Channels ١٦٨
DHCP ..... Dynamic Host Configuration Protocol ٣٢٩
DISC ..... Disconnect ٣٥٨
DPC ..... Destination Point Code ٣٧٤
DS-SS ..... Direct Sequence Spread Spectrum ٧١
DTAP ..... Direct Transfer Application Part ٣٧٢
DTX ..... Discontinuous Transmission ١٥٨
EDGE ..... Enhanced Data Rates for GSM Evolution ٢١
EFR ..... Enhanced Full Rate ٢٣٩
EGPRS ..... Enhanced GPRS ٢١
EIR ..... Equipment Identity Register ٣٣٨
EPROM ..... Erasable Programmable Read Only Memory ٣٠٢
ETSI ..... European Telecommunications Standards Institute ١٨
FACCH ..... Fast Associated Control Channel ١٧٠
FAX ..... Facsimile ٢٠
FCCH ..... Frequency Correction Channel ١٥٩

FCS..... Frame Check Sequence ٢٤٦
FDD..... Frequency Division Duplex ٣٧
FDMA..... Frequency Division Multiple Access ٣٩
FEC..... Forward Error Correction ٢٤٤
FH..... Frequency Hopping ١٥٨
FH-SS..... Frequency Hopping Spread Spectrum ٧١
FN..... Frame Number ١٦٣
FR..... Full Rate ٢٣٥
GEA..... GPRS Encryption Algorithm ٣٣٦
GERAN..... GSM/EDGE–RAN ٢٨٧
GMSC..... Gateway MSC ٣٢٥
GMSK..... Gaussian Minimum Shift Keying ٢٨١
GP..... Guard Period ١٥٠
GPRS..... General Packet Radio Services ٢٠
GR..... GPRS Register ٣٢٩
GSM..... Global System for Mobile Communications ١٦
GSN..... GPRS Support Node ٣٢٧
GT..... Global Title ٣٦٨
GTT..... Global Title Translation ٣٦٨
HARQ..... Hybrid-ARQ ٢٤٥
HLR..... Home Location Register ٢٩٥
HO..... Handover ٤١٠
HR..... Half Rate ٢٣٨
HRN..... Handover Reference Number ٤١٥
HSDPA..... High Speed Downlink Packet Access ٢٨٢
HSPA+..... High Speed Packet Access Evolution ٢٤
IAM..... Initial Address Message ٣٧٠
ICCID..... Integrated Circuit Card Identifier ٣٠٣
IE..... Information Elements ١٨٣
IEC..... International Electrotechnical Commission ٣٠٢
IMEI..... International Mobile Equipment identity ٢٩٤
IMSI..... International Mobile Subscriber Identity ٢٨٩
IMT-2000..... International Mobile Telecommunications 2000 ..... ٢٢
IN..... Intelligent Network ٣٢١
INAP..... Intelligent Network Application Part ٣٦٦
IP..... Internet Protocol ٢١
IS-136..... Interim Standard 136 ..... ٢٠

IS-54 ..... Interim Standard 54 ..... ٢٠
IS-95 ..... Interim Standard 95 ..... ٢٠
ISDN ..... Integrated Services Digital Network ٢١٥
ISI ..... Intersymbol Interference ١٠٨
ISO ..... International Organization for Standardization ٣٠٢
ISPC ..... International Signaling Point Code ٣٦٧
ISUP ..... ISDN User Part ٣٦٦
ITU ..... International Telecommunications Union ٥
ITU-T ..... ITU-Telecommunication Standardization Sector ٢٩٠
IWF ..... Interworking Function ٣٢٤
Kc ..... Ciphering Key ٣٣٣
Ki ..... Authentication Key ٣٠٤
L2ML ..... Layer 2 Management Link ٣٦١
LA ..... Location Area ٣٣٩
LAC ..... Location Area Code ٣٤٠
LAI ..... Location Area Identity ٣٤٠
LAPD ..... Link Access Protocol on the D Channel ٣٤٨
LAPDm ..... Link Access Protocol on the D Channel_modified ٣٤٨
LAR ..... Log Area Ratio ٢٣٧
LLC ..... Logical Link Control ٢٠٧
LO ..... Local Oscillator ١٦٠
LPD ..... Link Protocol Discriminator ٣٥٦
LTE ..... Long Term Evolution ٢٤
LU ..... Location Update ٣٤١
MAC ..... Medium Access Control ٢٠٧
MAP ..... Mobile Application Part ٣٦٦
MCC ..... Mobile Country Code ٢٩٠
MCS ..... Modulation and Coding Scheme ٢٦٥
MDS ..... Minimum Detectable Signal ٣٤
ME ..... Mobile Equipment ٢٩٨
MLSE ..... Maximum Likelihood Sequence Estimation ١٣٩
MM ..... Mobility Management ٢٩٩
MNC ..... Mobile National Code ٢٩٠
MOC ..... Mobile Originating Call ٣٨٢
MS ..... Mobile Station ٢٨٧
MSC ..... Mobile Switching Center ٣٢٢
MSIN ..... Mobile Subscriber Identity Number ٢٩١

MSISDN..... Mobile Subscriber ISDN Number ٢٩٢
MSRN ..... Mobile Subscriber Roaming Number ٢٩٣
MSU ..... Message Signaling Unit ٣٧٢
MT ..... Mobile Termination ٢٩٨
MTC ..... Mobile Terminating Call ٣٩٠
MTP..... Message Transfer Part ٣٦٥
NCC..... Network Color Code ١٦٤
NDC..... National Destination Code ٢٩٢
NI..... Network Indicator ٣٧٤
NMSI ..... National Mobile Subscriber identity ٢٩١
NSPC ..... National Signaling Point Code ٣٦٧
OFDM ..... Orthogonal Frequency Division Multiplexing ٢٤
OFDMA ..... Orthogonal Frequency Division Multiple Access ٨٣
OMC ..... Operation and Maintenance Center ٣٠٧
OML ..... Operation and Maintenance Link ٣٦١
OPC ..... Originating Point Code ٣٧٤
OSI ..... Open Systems Interconnection Model ٣٤٥
OSS ..... Operation Support System ٢٨٩
OVSF ..... Orthogonal Variable Spreading Factor..... ٧٣
PACCH..... Packet Associated Control Channel ٢٠٦
PAGCH..... Packet Access Grant Channel ٢٠٦
PBCCH ..... Packet Broadcast Control Channel ٢٠٥
PC ..... Power Control ٨٣
PCCCH ..... Packet Common Control Channel ٢٠٦
PCH ..... Paging Channel ١٦٥
PCM..... Pulse Code Modulation ٣١٥
PCU ..... Packet Control Unit ٣١٢
PDCCH..... Packet Data Control Channel ٢٠٥
PDCH..... Packet Data Channel ٢٠٥
PDH..... Plesiochronous Digital Hierarchy ٣٠٩
PDN..... Public Data Network ٢٨٦
PDP ..... Packet Data Protocol ٣٢٧
PDTCH..... Packet Data Traffic Channel ٢٠٥
PDU..... Protocol Data Unit ٢٠٧
PHS ..... Personal Handy Phone System ٢٠
PIN ..... Personal Identification Number ٣٠٣
PLMN..... Public Land Mobile Network ٢٨٦

PNCH ..... Packet Notification Channel ٢٠٦
PN-Codes ..... Pseudo Noise Codes ٧٩
PPCH ..... Packet Paging Channel ٢٠٦
PRACH ..... Packet Random Access Channel ٢٠٦
PS-Domain ..... Packet Switched Domain ٢٨٨
PSTN ..... Public Switched Telephone Network ٢٨٦
PTCCH ..... Packet Timing Advance Control Channel ٢٠٦
PUK ..... PIN Unlock Code ٣٠٤
QN ..... Quarter Bit Number ١٦٣
RA ..... Routing Area ٣٤٢
RAC ..... Routing Area Code ٣٤٢
RACH ..... Random Access Channel ١٦٥
RAI ..... Routing Area Identity ٣٤٢
RAM ..... Random Access Memory ٣٠٢
RAN ..... Radio Access Network ٢٨٧
RBT ..... Ring back Ton ٣٥٠
REJ ..... Reject ٣٥٧
REL ..... Release ٣٧٠
RF-Band ..... Radio Frequency Band ٣٠
RFN ..... Reduced Frame Number ١٦١
RIL3 ..... Radio Interface Layer 3 ..... ١٨٣
RLC ..... Radio Link Control ٢٠٧
RLM ..... Radio Link Layer Management ٣٦٢
RN ..... Radio network ٢٨٧
RNC ..... Radio Network Controller ٣٠٥
RNR ..... Receive Not Ready ٣٥٧
ROM ..... Read Only Memory ٣٠٣
RPE ..... Regular Pulse Excitation ٢٣٥
RR ..... Radio Resource Management ٢٩٩
RSL ..... Radio Signaling Link ٣٦١
SABM ..... Set Asynchronous Balanced Mode ٣٥٧
SACCH ..... Slow Associated Control Channel ١٦٩
SAM ..... Subsequent Address Message ٣٧٠
SANC ..... Signaling Area and Network Code ٣٦٧
SAPI ..... Service Access Point Identifier ٣٥٦
SAT ..... SIM Application Toolkit ٣٠٥
SCCP ..... Signaling Connection Control Part ٣٦٨

SCH ..... Synchronization Channel ١٦٠
SDCCH ..... Standalone Dedicated Control Channel ١٦٩
SGSN ..... Serving GPRS Support Node ٣٢٧
SI ..... Service Indicator ٣٧٤
SID ..... Silence Descriptor Frame ٢٤٣
SIF ..... Service Information Field ٣٧٤
SIGTRAN ..... Signaling Transport ٣٦٦
SIM ..... Subscriber Identity Module ٢٨٧
SIO ..... Service Information Octet ٣٧٤
SIR ..... Signal to Interference Ratio ٣٠
SLS ..... Signaling Link Set ٣٧٤
SMS ..... Short Message Service ٣٢١
SN ..... Subscriber Number ٢٩٢
SNIR ..... Signal to Noise and Interference Ratio ٢٩
SNR ..... Signal to Noise Ratio ٣٠
SP ..... Signaling Point ٣٦٧
SPC ..... Signaling Point Code ٣٦٧
SRES ..... Signed Response ٣٣٢
SS7 ..... Signaling System No. 7 ..... ٣١٥
SSN ..... Subsystem Number ٣٦٨
STK ..... SIM-Toolkit ٣٠٤
SU ..... Signaling Unit ٣٧٢
TA ..... Timing Advance ٨٢
TAC ..... Type allocation Code ٢٩٤
TAF ..... Terminal Adaptation Function ٣٠٠
TBF ..... Temporary Block Flow ٢٠٩
TCAP ..... Transaction Capabilities Application Part ٣٦٩
TCH ..... Traffic Channels ٥
TCP ..... Transmission Control Protocol ٢١
TDD ..... Time Division Duplex ٣٨
TDMA ..... Time Division Multiple Access ٤٦
TE ..... Terminal Equipment ٢٩٨
TEI ..... Terminal Equipment Identity ٣٦٠
TFI ..... Temporary Flow Identifier ٢٠٩
TI ..... Type Identifier ٣٥١
TMSI ..... Temporary Mobile Subscriber Identity ٢٩١
TN ..... Timeslot Number ١٦٣

TRAU ..... Transcoding and Rate Adaptation Unit ٣١٤
TRU ..... Transmit-Receive Unit ٣٠٦
TS ..... Time Slot ٤٦
TSC ..... Training Sequence Code ١٥٦
TUP ..... Telephone User Part ٣٦٦
UA ..... Unnumbered Acknowledged ٣٥٧
UE ..... User Equipment ٢٨٧
UI ..... Unnumbered Information ٣٥٨
UICC ..... Universal Integrated Circuit Card ٣٠١
UMTS ..... Universal Mobile Telecommunications Services ٢٣
UP ..... User Parts ٣٦٥
USAT ..... UMTS SIM Application Toolkit ٣٠٥
USF ..... Uplink State Flow ٢٦٢
USIM ..... UMTS-SIM ٣٠١
UTRAN ..... UMTS Terrestrial Radio Access Network ٢٨٧
VAD ..... Voice Activity Detector ٢٤١
VAS ..... Value Added Services ٣٢١
VLR ..... Visitor Location Register ٢٩٧
VM ..... Voice Mail ٣٥٠
VMS ..... Voice Mail Service ٣٢١
VSELP ..... Vector Sum Excited Linear Prediction ٢٣٨
WCDMA ..... Wideband Code Division Multiple Access ٥٢

مسرد بالمصطلحات الانكليزية

يعرض المسرد التالي لأهم المصطلحات التقنية الواردة في الكتاب، وللمعنى أو المقابل العربي الذي اخترناه للدلالة عليها. وقد نوّهنا في مقدمة الكتاب إلى منهجنا في اختيار واستخدام التعابير العربية، ونؤكد هنا على أهم سمات هذا المنهج وهي أننا لا نلتزم بالترجمة الحرفية للمصطلح الانكليزي، ونؤثر اختيار ما يدل على المعنى الوظيفي المقصود. لذا سيجد القارئ أن كثيراً من التعابير العربية تمثل "شرحاً" للمصطلح التقني وليس "ترجمةً" له.

نورد أيضاً مقابل كل مصطلح أرقام الصفحات التي حوت التعريف به أو نقاشاً مفصلاً عنه.

المعنى العربي	الصفحة	المصطلح الانكليزي
التبديل الثُماني للطور	٢١، ٢٦٥	8 Phase Shift Keying (8PSK)

A

خوارزمية التعمية	٣٣٥	A5-Algorithm
خوارزمية التوثق	٣٣٣	A8-Algorithm
الرقم الأساسي أو المرجعي للقناة الترددية	٤١	Absolute Radio Frequency Channel Number (ARFCN)
رزمة طلب النفاذ العشوائي	١٦٦	Access Burst
قناة قبول طلب النفاذ العشوائي	١٦٨	Access Grant Channel (AGCH)
خدمة نقل المعلومات مع إقرارٍ باستلامها	٣٤٨	Acknowledged Operation
إقرار	٣٤٨	Acknowledgement
حالة نشاط أو فاعلية الوحدة المتحركة	٣٧٥	Active Mode
المُسوّي المتكيّف	١١٠	Adaptive Equalizer
الترميز المتكيّف (ذو معدلات النقل المتعددة)	٢٣٩	Adaptive Multi Rate Coding
التعديل النبضي التفاضلي المتكيّف	٢١٦	Adaptive Pulse Code Modulation
حقل عنونة	٣٥٤	Address Field

تداخل القنوات المجاورة ..... ٢٨ ..... Adjacent Channel Interference
الرابط (المنفذ) الراديوي ..... ٣، ٨٥ ..... Air Interface
مُرَشِّح متعدد الأقطاب ..... ٢٢٥ ..... All-pole Filter
دارة تضخيم ..... ٢٧ ..... Amplifier
إشارة تمثيلية ..... ٢١٤ ..... Analogue Signal
التحليل عن طريق التركيب ..... ٢٣٩ ..... Analysis by Synthesis (ABS)
ربح الهوائي ..... ٨٦ ..... Antenna Gain
الرقم المُتَّصِل ..... ٣٩٩ ..... A-Number (A-Party)
لغة برمجة الآلة ..... ٣٠٤ ..... Assembly
حال (أو وضع) ارتباط الوحدة المتحركة بالشبكة ..... ٣٧٤، ٣٩٠ ..... Attached Mode
التخميد (الخُبُوُّ) ..... ٣، ٣٨ ..... Attenuation
مركز التَّوَثُّق ..... ٣٠٤، ٣٣٠ ..... Authentication Center (AUC)
مفتاح التَّوَثُّق ..... ٣٠٤، ٣٣١ ..... Authentication Key (Ki)
معامل الترابط الإحصائي الذاتي ..... ٧٢ ..... Autocorrelation Coefficient
الطلب الآلي لتكرار الإرسال ..... ٢٤٤ ..... Automatic Repeat Request(ARQ)

B

مرمِّز الضجيج ..... ٢٤٢ ..... Background Noise Encoder
التصحيح اللاحق للخطأ ..... ٢٤٤ ..... Backward Error Correction (BEC)
نظام محدود السعة بسبب عرض النطاق المتاح ..... ٦٧ ..... Bandwidth Limited Systems
وحدة تحكم مشتركة (ضمن المحطة الثابتة) ..... ٣٦٠ ..... Base Control Function (BCF)
المحطة الثابتة ..... ٢، ٣٠٥ ..... Base Station (BS)
رقم المحطة ضمن المنطقة الجغرافية ..... ١٦٤ ..... Base Station Color Code (BCC)
وحدة التحكم بالمحطات الثابتة ..... ٣٠٥، ٣١٠ ..... Base Station Controller (BSC)
رمز هوية المحطة ..... ١٦٤ ..... Base Station Identity Code (BSIC)
شبكة النفاذ (شبكة المحطات الثابتة) ..... ٢٨٧، ٣١٩ ..... Base Station System (BSS)
تجهيزات وعتاد المحطة الثابتة ..... ٢، ٣٠٥ ..... Base Transceiver Station (BTS)
النطاق الترددي الأساسي ..... ٣٠، ٢٧٩، ٣٤٧ ..... Baseband
الترددِ الدَّال على المحطة (المميِّز للمحطة) ..... ١٥٩ ..... Beacon Frequency
خصائص القناة الفيزيائية (الراديوية) ..... ٣٩٩ ..... Bearer Capabilities
نظام الفوترة ..... ٣٢١، ٣٢٣ ..... Billing System
التبديل الإثناني للطور ..... ٥٧ ..... Binary Phase Shift Keying (BPSK)
قيمة إثنانية ..... ٥٣ ..... Binary Value

Bit Error Rate (BER) ..... ٢٩ ..... معدل خطأ البت

Bit..... ٥٣ ..... بت

Block Check Sequence (BCS) ..... ٢٠٨ ..... متتالية تدقيق

Block Coding ..... ٢٤٦ ..... ترميز المجموعات (الترميز الانفرادي لكلمات الدخل)

Block or Matrix Interleaving ..... ٢٧٠ ..... تفريق المجموعات

B-Number (B-Party)..... ٣٩٩ ..... الرقم المُتَّصَلِ به

Boot-On..... ٣٧٨ ..... إقلاع الجهاز

Broadcast Channels (BCH)..... ١٥٨ ..... قنوات التحكم العامة

Broadcast Control Channel (BCCH) ..... ١٥٨ ..... قناة التحكم الحاملة للمعلومات العامة

Browser ..... ٣٠٠ ..... متصفح

BSS Application Part (BSSAP) ..... ٣٧١ ..... جزء التحكم بشبكة النفاذ (ضمن نظام SS7)

Buffer ..... ٢٧٠ ..... ذاكرة مؤقتة

Burst Forming ..... ٢١٥، ٢٧٨ ..... تكوين الرزم (الراديوية)

Burst Power Mask ..... ٤٩ ..... إطار (قالب) للإشارة المرسلة ضمن الرزمة الواحدة

Burst ..... ٤٨، ١٤٩ ..... رزمة معلومات راديوية (رزمة)

Bursty Errors ..... ٢٦٩ ..... أخطاء جماعية (رُزَميَّة)

C

Call Conference ..... ٣٥١ ..... اتصال متعدد الأطراف

Call Control (CC)..... ٢٩٩، ٣٥٠ ..... آليات التحكم بالاتصال

Call Data Record (CDR) ..... ٣٢٣ ..... سجل تفاصيل المكالمة

Call Establishment..... ١٥٨ ..... إنشاء الاتصال

Call Forwarding ..... ٣٥٠ ..... تحويل المكالمات إلى أرقام بديلة

Call Forwarding ..... ٣٧٠ ..... تحويل المكالمات إلى رقم بديل

Call Phases ..... ١٥٨ ..... أطوار الاتصال

Call Release ..... ١٥٨، ٤٠٢ ..... تحرير الاتصال

Call Routing ..... ٣١٠ ..... توجيه مسار المكالمة

Call Setup..... ٣١١ ..... إنشاء الاتصال

Calling Process ..... ٣٠٤ ..... تسلسل خطوات الاتصال

Carrier Frequency ..... ٣٠٦ ..... الحامل الراديوي

Carrier to Noise and Interference Ratio (CNIR) ..... ٣٠ ..... نسبة (قوة) إشارة الحامل إلى التشويش

Carrier Unit (CU)..... ٣٠٦ ..... وحدة إرسال واستقبال

القناة الراديوية الحاملة للمعلومات (الحامل الراديوي) ..... ٤ ..... Carrier Wave
رمز الخلية العالمي ..... ٣٤١ ..... Cell Global Identity (CGI)
هوية (رقم الخلية) ..... ٣٤١ ..... Cell Identity (CI)
موقع المحطة الثابتة ..... ١٣، ٣٠٨ ..... Cell Site
خلية ..... ٧، ١٣، ٣٣٩ ..... Cell
تردد مركزي (للقناة الراديوية) ..... ٤ ..... Center Frequency
وحدة التنسيق المركزية ..... ٣٢٤ ..... Central Command Unit
معالج مركزي (وحدة معالجة مركزية) ..... ٣٠٢ ..... Central Processor Unit (CPU)
نمط ربط المحطات الثابتة على التسلسل ..... ٣١٣ ..... Chain Configuration
ترميز القناة ..... ١٣٢، ٢١٤، ٢٤٤ ..... Channel Coding
نمط توزيع القنوات الاعتبارية على القنوات الفيزيائية ..... ١٧٢ ..... Channel Combination
الاستجابة النبضية للقناة ..... ١٣٧ ..... Channel Impulse Response
المتتاليات المميِّزة للقنوات الفيزيائية المختلفة ..... ٧٥ ..... Channelization Codes
تخاطبٍ نصّي ..... ٣٢٧ ..... Chat
خانة التدقيق ..... ٢٩٥ ..... Check Digit
نبضة الترميز (المستخدمة لنثر الطيف) ..... ٥٣، ٥٤ ..... Chip
مفتاح التعمية (التشفير) ..... ٢٧٨، ٣٣٣ ..... Ciphering Key (Kc)
التشفير ..... ٢٧٨ ..... Ciphering
نطاق (قسم) تبديل الدارات (ضمن الشبكة) ..... ٢٨٨ ..... Circuit Switched Domain (CS-Domain)
تبديل الدارات ..... ٢٠، ٣٢٦ ..... Circuit Switching
دارة ..... ٣٢٥ ..... Circuit
وحدة (نمط) تكرار الخلايا ..... ١٤، ١٥ ..... Cluster
كابل محوري ..... ٢٨٥ ..... Coaxial Cable
تداخل القناة المشتركة ..... ٢٨ ..... Co-channel Interference
النفاذ المتعدد (تعدد النفاذ) بتمييز متتاليات الترميز ..... ٥٢، ٥٤ ..... Code Division Multiple Access (CDMA)
الاستقراء الخطي المحرَّض بالمتتاليات ..... ٢٣٧ ..... Code Excited Linear Prediction (CELP)
متتالية ترميز (شيفرة) ..... ٥٤ ..... Code
ربح ترميز القناة ..... ٢٦٧ ..... Coding Gain
معدل الترميز ..... ٢٤٦ ..... Coding Rate
الترميز ..... ٢١٥ ..... Coding

الترميز ..... ٢١٥ ..... Coding

Combiner ..... ٣٠٨ ..... دارة مزج (ضم)

Comfort Noise Generator ..... ٢٤٣ ..... مولد الضجيج الصنعي

Common Control Channels (CCCH) ..... ١٦٤، ١٦٥ ..... قنوات التحكم المشتَرَكة

Comp 128 ..... ٣٣٤ ..... خوارزمية التوثق والتعمية

Complex Conjugate ..... ١١٧ ..... المرافق العقدي

Complex Numbers Notation ..... ١١٦ ..... التدوين العقدي

Conference Call ..... ٣٧٠ ..... اتصال متعدد الأطراف

Connection Management (CM) ..... ٣٥٠ ..... إدارة خدمات الاتصال

Constraint Length ..... ٢٤٦ ..... أمد التأثير (الأمد المقيّد)

Contention ..... ١٨٧ ..... تنازع (تنافس لشغل موارد الشبكة)

Context ..... ٣٢٧ ..... سياق

Control Bits ..... ٣١٦ ..... بتات تحكم

Control Channels (CCH) ..... ١٥٧ ..... قنوات التحكم

Control Channels ..... ١٤٩ ..... قنوات التحكم

Control Field ..... ٣٥٤ ..... حقلَ تحكُّمٍ

Control Information ..... ١٤٦ ..... معلومات تحكم

Convolution ..... ٢٢٥، ٢٥٣ ..... تلافّ (طَيّ)

Convolutional Coding ..... ٢٤٦، ٢٥٣ ..... ترميز التلافّ (الطيّ)

Core Network (CN) ..... ٢٨٧، ٣٢١ ..... الشبكة المركزية

Correlation Coefficient ..... ١١٧ ..... معامل الترابط الإحصائي

Country Code (CC) ..... ٢٩٢ ..... المفتاح الدولي

Cross Correlation ..... ٦٤ ..... الترابط الإحصائي المتبادل

Cyclic Redundancy Check ..... ٢٤٨ ..... تدقيق الفائض الحِلَقي (الفائض الدَّوَّار)

D

Data Base ..... ٢٨٧ ..... قاعدة معطيات

Data Communication Services ..... ٢٠ ..... خدمات تبادل المعطيات

Data Link Layer ..... ٢٠٧، ٣٤٧، ٣٦٠ ..... طبقة حماية المعلومات (المعطيات)

Data Rates ..... ٢٠ ..... معدلات نقلٍ (دفق)

Data ..... ١٥٤ ..... معطيات رقمية

Decision Device ..... ٢٩ ..... دارة مقارنة (ترجيح)

Dedicated Channel Allocation ..... ٢٠٤ ..... التخصيص الحصري للقنوات الفيزيائية المتاحة

Dedicated Control Channels (DCCH) ..... ١٦٨ ..... قنوات التحكم المُخصَّصَة

Detached Mode ..... ٣٧٤، ٣٩٠ ..... حال (أو وضع) الانفكاك التام عن الشبكة
Diffraction ..... ٣ ..... الانتشار
Digital Modulation ..... ٢١، ٢١٥، ٢٧٩ ..... التعديل (التضمين) الرقمي
Digitization ..... ٢١٤ ..... رقمنة الإشارة
Dirac Impulse ..... ١٠٩ ..... تابع النبضة الأحادية
Direct Sequence Spread Spectrum ..... ٧١ ..... النثر المباشِر للطيف
Directional Antennas ..... ١٢ ..... هوائي مُوجَّه
Discontinuous Transmission (DTX) ..... ١٥٨، ٢٤١، ٣٤٩ ..... تقنية الإرسال المتقطع
Diversity Combining Techniques ..... ١٣٥ ..... تقنيات (طرق) التجميع
Diversity Techniques ..... ١٣٣ ..... تقنيات (طرق) التباين
Doppler Frequency Shift ..... ١٢٣ ..... إزاحة دوبلر الترددية (تردد دبلر)
Doppler Spread (Frequency Dispersion) ..... ١٢٥ ..... نثر دوبلر (النثر أو الاتساع الطيفي)
Doppler Spread ..... ١٢١ ..... الاتساع أو النثر الطيفي (ظاهرة دوبلر)
Downlink Band ..... ٣٨ ..... النطاق الترددي للمسار الهابط
Downlink ..... ٢ ..... المسار الهابط
Dummy Burst ..... ١٧١ ..... رزمة معلومات وهمية (صورية)
Duplexer ..... ٥٢، ٣٠٨ ..... مرشح مزدوج الاتجاه
Duplexing Methods ..... ٣٧ ..... طرق توفير الاتصال مزدوج الإتجاه
Dynamic Channel Allocation (DCA) ..... ٢٠٤ ..... التخصيص المتكيف للقنوات الفيزيائية
Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) ..... ٣٢٩ ..... بروتوكول التجهيز الديناميكي للمضيف

E

Encapsulated ..... ٣٧٢ ..... مُغَلَّفةً
Encryption ..... ٢١٤، ٢٧٧، ٣٣٠ ..... التعمية
Enhanced Full Rate (EFR) ..... ٢٣٩ ..... معدل النقل الكامل المحسن
Equal Gain Combining ..... ١٣٦ ..... تجميع الربح المتساوي
Equalization ..... ١٣٧ ..... التسوية
Equalizer ..... ١٣٧ ..... دارة أو مرشح التسوية (المسوّي)
Equipment Identity Register (EIR) ..... ٣٣٨ ..... سجل أجهزة المشتركين
Erasable Programmable Read Only Memory (EPROM) ..... ٣٠٢ ..... ذاكرة غير متلاشية قابلة للبرمجة والمحو

Memory (EPROM)

Error Detection ..... ٣٤٨ ..... كشف أخطاء النقل
Excess Delay ..... ١٠٩ ..... مدة النثر الزمني
Excitation Signal ..... ٢٢٥ ..... إشارة تحريض
Extended GSM (E-GSM) ..... ١٩ ..... نظام GSM الموسع

F

Fade Margin ..... ٩٨ ..... هامش الخفوت
Fading Mechanisms ..... ٩٣ ..... ظواهر الخفوت
Fading ..... ٩٠ ..... الخفوت
Fast Associated Control Channel (FACCH) ..... ١٧٠ ..... قناة التحكم المقترنة السريعة
Fast Fading (Small Scale Fading) ..... ١٠٠، ١٢٨ ..... الخفوت السريع (الخفوت قصير المدى)
Features ..... ٣٤٦ ..... ميّزات (خدمات مميزة)
Filter ..... ٤ ..... مُرَشِّح
Flag ..... ٣٥٢ ..... مؤشر
Flat Fading ..... ١١٥ ..... خفوت منتظَم أو متساوي (بدلالة التردد)
Flow Control ..... ٣٤٨ ..... التحكم بوتيرة إرسال المعلومات
Forced Registration ..... ٣٩٠ ..... التحديث القسري لرقم منطقة وجود المشترك
Formants ..... ٢٢١، ٢٢٥ ..... البواني (ترددات التجاوب)
Forward Error Correction(FEC) ..... ٢٤٤ ..... التصحيح بالترميز الاستباقي
Frame Check Sequence (FCS) ..... ٢٤٦ ..... متتالية تدقيق
Free Space ..... ٨٥ ..... الفضاء الحر
Frequency Correction Burst ..... ١٥٩ ..... رزمة تصحيح التردد
Frequency Correction Channel (FCCH) ..... ١٥٩ ..... قناة ضبط (تصحيح) التردد
Frequency Dispersion (Doppler Spread) ..... ١٢٥ ..... النثر أو الاتساع الطيفي (نثر دوبلر)
Frequency Diversity ..... ١٣٤ ..... التباين الترددي
Frequency Division Duplex (FDD) ..... ٣٧ ..... (ازدواج اتجاه الاتصال بتقسيم التردد)
Frequency Division Multiple Access (FDMA) ..... ٣٩ ..... النفاذ المتعدد (تعدد النفاذ) باقتسام التردد
Frequency Hopping (FH) ..... ١٣٤، ١٥٨ ..... القفز الترددي
Frequency Hopping Spread Spectrum ..... ٧١ ..... نثر الطيف بالقفز الترددي
Frequency Reuse ..... ٦ ..... الاستخدام المتكرر للترددات
Frequency-Selective Fading ..... ١١٣، ١١٥ ..... الخفوت الانتقائي طيفياً

Full Rate (FR) ..... ٢٣٥ ..... معدل النقل الكامل
Full-rate Traffic Channel ..... ١٥٤ ..... قناة نقل المعلومات والمعطيات بمعدل كامل
Functional Level ..... ٣٦٦ ..... مستوي وظيفي (طبقة بروتوكولية جزئية)
Fundamental Frequency ..... ٢١٩ ..... التردد الأساسي
Gain Factor ..... ٨٧ ..... عامل (معامل) ربحٍ

G

Gateway GPRS Support Node (GGSN) ..... ٣٢٨ ..... موجه العبور (موجه GGSN)
Gateway MSC (GMSC) ..... ٣٢٥ ..... مقسم الولوج إلى الشبكة (بوابة الشبكة)
Gateway ..... ٣٦٧ ..... نقطة عبور (إلى الشبكة)
General Packet Radio Services (GPRS) ..... ٢٠ ..... خدمات الإرسال الراديوي الرزمي
Generator Polynomial ..... ٢٤٨، ٢٥٣ ..... دالة توليد الترميز
Glottis ..... ٢١٩ ..... فتحة المزمار
GPRS Encryption Algorithm (GEA) ..... ٣٣٦ ..... خوارزمية التعمية (لتبادل المعطيات الرزمية)
Gross Bit Rate ..... ٢٥٧ ..... معدل الدفق الإجمالي
Guard Band ..... ٤٠ ..... نطاق الحماية (العزل)
Guard Period (GP) ..... ١٥٠ ..... فاصل زمني عازل

H

Half Rate (HR) ..... ٢٣٨ ..... معدل النقل النصفي
Half-rate Traffic Channel ..... ١٥٤ ..... قناة نقل المعلومات والمعطيات بمعدلٍ نصفي
Handover (HO) ..... ٨، ١٥٩، ٤١٠ ..... إجراء التسليم (نقل المشترك من خليةٍ إلى أخرى)
Handover Margin ..... ٤١٣ ..... هامش إجراء التسليم
Handover Reference Number (HRN) ..... ٤١٥ ..... رمز إجراء التسليم
Hard Handover ..... ٤١٢ ..... إجراء التسليم على نحوٍ قطعي
Harmonics ..... ٢٢٥ ..... توافقيات (ترددات توافق أضعاف التردد الأساسي)
Header ..... ١٨٣، ٢٠٧ ..... بادئة (ترويسة)
Home Location Register (HLR) ..... ٢٩٥ ..... سجل مقر الاشتراك
Home Network ..... ٢٩١ ..... الشبكة الأم (شبكة الاشتراك أو الاكتتاب)
Hyperframe ..... ١٥١ ..... الإطار (المتعدد) الأعظمي

I

Idle Mode ..... ٢٠٠، ٣٧٥ ..... حالة سكون الوحدة المتحركة

Immediate Assignment ..... ٣٨٢ ..... تخصيص قناة فيزيائية للمشترك

Impulse Response ..... ٦٠ ..... الاستجابة النبضية

IMSI-Attached ..... ٣٧٤، ٣٩٠، ٣٩٦ ..... حال (أو وضع) الارتباط بالشبكة

IMSI-Detached ..... ٣٧٤، ٣٩٠، ٣٩٦ ..... حال (أو وضع) الانفكاك التام عن الشبكة

Information Element (IE) ..... ١٨٣، ٣٥١ ..... وحدة المعلومات (ضمن رسائل الطبقة الثالثة)

Information Exchange ..... ٣١١ ..... طور تبادل المعلومات أثناء الاتصال

Information Field (Data Field) ..... ١٥٥ ..... حقل معلومات (ضمن الرزمة الراديوية)

Initial Mobile Acquisition ..... ٣٧٨ ..... (إجراء) اختيار التردد وتحقيق التزامن

Input-Output Interfaces ..... ٣٠٣ ..... منافذ شريحة الاشتراك

Integrated Circuit Card Identifier (ICCID) ..... ٣٠٣ ..... رقم تسلسلي خاص بشريحة الاشتراك

Integrated Services Digital Network (ISDN) ..... ٢٨٦ ..... شبكة الهاتف الرقمية (شبكة الخدمات المتكاملة)

Intelligent Network (IN) ..... ٣٢١ ..... شبكة الخدمات الذكية (الشبكة الذكية)

Inter-burst Interleaving (Diagonal Interleaving) ..... ٢٧١ ..... التفريق الخارجي

Interception (Tapping) ..... ٣٣٠ ..... تنصّت

Interface Cards (Boards) ..... ٣٢٣ ..... وحدات التحكم بمنافذ الدخل والخرج

Interface ..... ٢٨٥ ..... رابط بيني

Interference Limited Systems ..... ٦٧ ..... نظام محدود السعة بسبب التشويش

Interference ..... ٢٥، ٢٦، ٣١ ..... تشويش (تداخل)

Interleaving Degree ..... ٢٧٠ ..... درجة (مرتبة) التفريق

Interleaving Depth ..... ٢٧١ ..... أَمَد التفريق

Interleaving ..... ١٣٤، ٢١٤، ٢٦٩ ..... التفريق

International Mobile Equipment Identity (IMEI) ..... ٢٩٤ ..... هوية الجهاز المستخدَم

International Mobile Subscriber Identity (IMSI) ..... ٢٨٩ ..... هوية المشترك (الدولية)

International Roaming ..... ١٧، ٢٩٣ ..... ميزة (خدمة) التجوال الدولي

International Signaling Point Code (ISPC) ..... ٣٦٧ ..... الرمز العالمي لنقطة التشوير

Interpolation ..... ٢٥٥ ..... استيفاء
Intersymbol Interference (ISI) ..... ١٠٨ ..... تداخل الرموز
Interworking Function (IWF) ..... ٣٢٤ ..... وحدة الملائمة مع الشبكة الثابتة
Intra-burst Interleaving ..... ٢٧٣ ..... التفريق الداخلي
ISDN User Part (ISUP) ..... ٣٦٦، ٣٦٩ ..... بروتوكول SS7 الجزئي الخاص بخدمات ISDN
Isotropic ..... ٨٦ ..... إيزوتروبي

L

Layer-3 Messages ..... ١٨٣ ..... رسائل الطبقة الثالثة
Leased Lines ..... ٣١٦ ..... خطوط التراسل (النقل) المؤجرة
Linear Prediction ..... ٢٢٨ ..... الاستقراء الخطي
Load ..... ٣٠٨، ٣٦٧ ..... عبء (حِمل)
Localization of the MS ..... ٣٥٠ ..... متابعة مكان المشترك
Location Area (LA) ..... ٣٣٩، ٣٤٢ ..... منطقة وجود المشترك (منطقة الوجود)
Location Area Code (LAC) ..... ٣٤٠ ..... رمز منطقة الوجود
Location Area Identity (LAI) ..... ٣٤٠ ..... رقم منطقة الوجود
Location Area ..... ٣٣١ ..... منطقة وجود المشترك
Location Management ..... ٣٤٢ ..... إدارة موقع المشترك
Location Registration ..... ٣٨١، ٣٩٦ ..... تسجيل مكان وجود الوحدة المتحركة
Location Update (LU) ..... ٣٤١، ٣٨١، ٣٩٦ ..... تحديث رقم منطقة الوجود
Logical Channel ..... ١٤٥، ١٤٦ ..... قناة اعتبارية
Logical Link Control Layer (LLC) ..... ٢٠٧، ٣٣٦ ..... طبقة التحكم بمسار نقل المعطيات
Log-Normal Fading ..... ٩٥ ..... الخفوت ذو التوزع الطبيعي لقيم اللوغاريتم
Long Term Prediction ..... ٢٣٣ ..... الاستقراء طويل الأمد
Long-Term Fading (Slow Fading) ..... ٩٣، ٩٨، ١٢٨ ..... الخفوت بعيد المدى (الخفوت البطيء)
Loop Configuration ..... ٣١٣ ..... النمط الحِلَقي لربط المحطات الثابتة
Low-Pass Filter ..... ٦٠ ..... مرشح ذو نطاقِ تمريرٍ منخفض

M

Mast ..... ١٣ ..... صاري (حامل الهوائي في المحطة الثابتة)
Matched Filter ..... ٦٠ ..... المرشح الموائم
Maximum Likelihood Sequence Estimation (MLSE) ..... ١٣٩ ..... تحديد أو اختيار سلسلة المعلومات الأكثر احتمالاً

Maximum Ratio Combining ..... ١٣٧ ..... تجميع النسبة العظمى
Mean Excess Delay..... ١٠٩ ..... متوسط النثر الزمني
Medium Access Control (MAC) ..... ٢٠٧ ..... طبقة التحكم بالنفاذ إلى الوسط المادي
Message Signaling Unit (MSU)..... ٣٧٢ ..... وحدات رسائل التشوير
Message Transfer Part (MTP)..... ٣٦٥ ..... قسم (جزء) نقل رسائل التحكم (ضمن نظام SS7)
Microwave Link ..... ٣١٤ ..... قناة تراسل (نقل) راديوية
Minimum Detectable Signal (MDS) ..... ٣٤ ..... قيمة الإشارة الصغرى القابلة للتمييز
Mixer ..... ٢٧ ..... دارة مزج
Mobile Application Part (MAP) ..... ٣٦٦، ٣٧٠ ..... جزء التحكم بخدمات التجوال (ضمن نظام SS7)
Mobile Country Code (MCC)..... ٢٩٠ ..... الرمز القطري
Mobile Initialization..... ٣٧٨ ..... اختيار التردد وتحقيق التزامن (للوحدة المتحركة)
Mobile National Code (MNC) ..... ٢٩٠ ..... رمز الشبكة المحلي
Mobile Originating Call (MOC) ..... ٣٨٢، ٣٩٧ ..... مكالمة صادرة
Mobile Satellite Networks..... ٢٨٧ ..... شبكات الأقمار الصناعية للاتصال
Mobile Station (MS)..... ٢، ٢٨٧، ٢٩٨ ..... وحدة متحركة
Mobile Subscriber Identity Number (MSIN) ..... ٢٩١ ..... هوية المشترك ضمن الشبكة
Mobile Subscriber ISDN Number (MSISDN) ..... ٢٩٢ ..... رقم هاتف المشترك
Mobile Subscriber Roaming Number (MSRN) ..... ٢٩٣ ..... رقم هاتف المشترك المؤقت
Mobile Switching Center (MSC)..... ٣٢٢ ..... مركز تبديل خدمات التجوال (مركز التبديل)
Mobile Terminating Call (MTC)..... ٣٩٠ ..... مكالمة واردة
Mobility Management (MM)..... ٢٩٩، ٣٥٠ ..... إدارة التجوال (إدارة تنقل المشترك)
Mobility..... ١٦، ١٧ ..... التجوال (تنقل المشترك)
Model Type..... ٣٤٦ ..... نموذج تسويقي
Modem..... ٣٠٩ ..... مودم
Modulation and Coding Scheme (MCS)..... ٢٦٥ ..... أنماط ترميزٍ وتعديل
Modulation ..... ٤، ٢١٥، ٢٧٩ ..... تعديل (تضمين) الإشارة
MSC Service Area..... ٣٤٢ ..... منطقة خدمة المقسم
Multiframe..... ١٥١ ..... إطار متعدد
Multipath Fading ..... ١٠٠ ..... خفوت تعدد المسارات
Multiple Access Methods ..... ٣٧ ..... تقنيات (طرق) النفاذ المتعدد

Multiplexing ..... ٣١١ ..... تجميع (ضم)
Multislot Class ..... ٢٠٣ ..... نمط تعدد شغل الأحياز الزمنية
Narrow Band System ..... ١١٠ ..... نظام (إرسال واستقبال) ضيق النطاق
National Destination Code (NDC) ..... ٢٩٢ ..... مفتاح الشبكة القطري
National Mobile Subscriber Identity (NMSI) ..... ٢٩١ ..... هوية المشترك القطرية

N

National Roaming ..... ٢٩٣ ..... التجوال القطري
National Signaling Point Code (NSPC) ..... ٣٦٧ ..... الرمز القطري لنقطة الإشارة
Near Far Effects ..... ٨٠ ..... آثار تفاوت القُرب والبُعد
Net Bit Rate ..... ٢٥٧ ..... معدل الدفق الصافي
Network Color Code (NCC) ..... ١٦٤ ..... هوية الشبكة
Network Layer ..... ٣٤٩ ..... طبقة إدارة موارد وخدمات الشبكة
Networking ..... ٣١٠ ..... تشبيك
Node B ..... ٣٠٥ ..... المحطة الثابتة (نظام UMTS)
Noise Spectral Density ..... ٣١ ..... الكثافة الطيفية لاستطاعة الضجيج
Noise ..... ٢٥ ..... ضجيج
Nonlinear Amplifier ..... ٢٨١ ..... مضخم غير خطي
Normal Burst ..... ٤٨، ١٥٥ ..... الرزمة العادية

O

Octet ..... ١٨٣ ..... بايت
Omnidirectional Antenna ..... ١١ ..... هوائي ذو ربح ثابت (في كل الاتجاهات)
On Demand Allocation ..... ٢٠٤ ..... تخصيص الموارد وفق الحاجة أو وفق الطلب
Operation and Maintenance Center (OMC) ..... ٣٠٧ ..... مركز الصيانة والتشغيل
Operation Support System (OSS) ..... ٢٨٩ ..... منظومة تشغيل وصيانة الشبكة
Optical Fiber ..... ٢٨٥ ..... ليف ضوئي
Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) ..... ٨٣ ..... تعدد النفاذ باستخدام الحوامل المتعامدة
Orthogonal Spreading Codes ..... ٧٢ ..... متتاليات (سلاسل) النثر المتعامدة

متتاليات (سلاسل) النثر ذات عامل النثر المتغير ..... ٧٣، ٧٥ ..... Orthogonal Variable Spreading Factor Codes (OVSF-Codes)

شبكة موازية ..... ٢١، ٣٢٧ ..... Overlay Network

P

قناة قبول طلب النفاذ (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٦ ..... Packet Access Grant Channel (PAGCH)

قناة التحكم المُقترنة (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٦ ..... Packet Associated Control Channel (PACCH)

قناة المعلومات العامة (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٥ ..... Packet Broadcast Control Channel (PBCCH)

قناة التحكم العامة (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٦ ..... Packet Common Control Channel (PCCCH)

وحدة تحكم بدفق الرزم ..... ٣١٢ ..... Packet Control Unit (PCU)

وحدة التحكم بالرزم ..... ٣٢١ ..... Packet Control Unit (PCU)

اتصال رزمي ..... ٢٠١ ..... Packet Data Call

قناة معطيات رزمية ..... ٢٠٥ ..... Packet Data Channel (PDCH)

قناة تحكم بالمعطيات الرزمية ..... ٢٠٥ ..... Packet Data Control Channel (PDCCH)

بروتوكولات تحكم بمعطيات رزمية ..... ٣٢٧ ..... Packet Data Protocol (PDP)

هوية المشترك المؤقتة الخاصة بتبادل المعطيات الرزمية ..... ٢٩٢ ..... Packet Data -TMSI (P-TMSI)

قناة تبادل المعطيات الرزمية الفعلية ..... ٢٠٥ ..... Packet Data Traffic Channel (PDTCH)

معطيات رُزَمِيَّـة ..... ٢٠، ٢٠١ ..... Packet Data

قناة الإخطار العامة (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٦ ..... Packet Notification Channel (PNCH)

قناة النداء (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٦ ..... Packet Paging Channel (PPCH)

قناة طلب النفاذ العشوائي (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٦ ..... Packet Random Access Channel (PRACH)

توجيه الرزم ..... ٢٠ ..... Packet Routing

نطاق (قسم) توجيه الرزم (ضمن الشبكة) ..... ٢٨٨ ..... Packet Switched Domain (PS-Domain)

تبديل الرزم ..... ٢٠ ..... Packet Switching

قناة ضبط تقديم الإرسال (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٦ ..... Packet Timing Advance Control Channel (PTCCH)

رزمة معطيات ..... ٢٠١ ..... Packet

قناة النداء (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ١٦٥ ..... Paging Channel (PCH)

قناة ترددية ثنائية (مزدوجة) ..... ٣٩ ..... Paired Channel

موسط (مُعامِل) ..... ٤٢ ..... Parameter

الترميز الوسيطي للمنبع ..... ٢١٧، ٢٢٧ Parametric Source Coding.....

بتات تكافؤ ..... ٢٥٥ Parity Bits.....

فحص التكافؤ ..... ٢٤٤ Parity-Check.....

معيار تخميد الاشارة ..... ١٩٨ Path Loss Criterion .....

عامل (ثابت) التخميد..... ٩١ Path Loss Exponent .....

سياق اتصال رزمي (سياق رزمي)..... ٣٢٧ PDP-Context.....

رقم الولوج إلى الشريحة ..... ٣٠٣ Personal Identification Number (PIN) .....

تجوال (تنقل) المستخدم ..... ١٧ Personal Mobility.....

قناة فيزيائية ..... ١٤٥، ١٤٦ Physical Channel .....

الطبقة المادية (الفيزيائية) ..... ٣٤٧، ٣٥٩ Physical Layer.....

رقم تحرير الشريحة..... ٣٠٤ PIN Unlock Code (PUK).....

حدة (طبقة) الصوت ..... ٢١٩ Pitch .....

منطقة خدمة الشبكة ..... ٣٤٢ PLMN Service Area.....

تباين الاستقطاب ..... ١٣٥ Polarization Diversity .....

التحكم بالطاقة (ضبط الطاقة) ..... ٨٣، ١٥٨، ٣٤٩ Power Control (PC) .....

نمط النثر الزمني للاستطاعة (تابع النثر الزمني)..... ١٠٩ Power Delay Profile .....

كثافة الاستطاعة ضمن وحدة المساحة ..... ٨٦ Power Density .....

كفاءة الاستطاعة ..... ٢٧٩ Power Efficiency .....

الكثافة الطيفية لاستطاعة الإشارة ..... ٥٤ Power Spectral Density.....

معاملات الاستقراء..... ٢٣٠ Prediction Coefficients .....

خطأ الاستقراء..... ٢٢٩ Prediction Error.....

نظام GSM الأساسي ..... ١٩ Primary GSM (P-GSM) .....

ربح إجراء النثر..... ٦٣ Processing Gain .....

قناة الانتشار الراديوية (وسط الانتشار) ..... ٣ Propagation Channel .....

التخميد بسبب مسار الانتشار (تخميد الانتشار) ..... ٨٨ Propagation Loss (Path Loss) .....

تخميد (خبو) انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية..... ٨٦ Propagation Loss .....

وحدة معطيات بروتوكولية ..... ٢٠٧ Protocol Data Unit (PDU).....

بروتوكول ..... ٣٤٥ Protocol.....

سلاسل (متتاليات) شبه عشوائية ..... ٧٨ Pseudo Noise Codes (PN-Codes) .....

الشبكة العمومية لتبادل المعطيات ..... ٢٨٦ Public Data Network (PDN) .....

شبكة اتصال خلوية ..... ٢٨٦ Public Land Mobile Network (PLMN) .....

شبكة الهاتف الثابت العمومية (التقليدية) ..... ٢٨٦ Public Switched Telephone Network (PSTN)

Pulse Code Modulation (PCM) ..... ٣١٥ ..... التضمين النبضي المرمَّز
Pulse Sequence ..... ٥٣ ..... متتالية من النبضات
Puncturing ..... ٢٥٩ ..... الاستثناء

Q

Quantization ..... ٢١٥ ..... التكمية

R

Rack ..... ٣٢٢ ..... قائم
Radio Access Network (RAN) ..... ٢٨٧ ..... شبكة النفاذ الراديوي (شبكة النفاذ)
Radio Block ..... ٢٠٩ ..... حيز راديوي رباعي
Radio Channel ..... ٤ ..... قناة راديوية
Radio Frequency Band (RF-Band) ..... ٣٠، ٣٤٧ ..... نطاق الترددات الراديوية (النطاق الراديوي)
Radio Interface Layer 3 (RIL3) ..... ١٨٣، ٣٤٩ ..... الطبقة الثالثة للمنفذ الراديوي
Radio Interface ..... ٣٠٥ ..... الرابط الراديوي
Radio Link Control (RLC) ..... ٢٠٧ ..... طبقة التحكم بالمسار الراديوي
Radio Network Controller (RNC) ..... ٣٠٥، ٣١٠ ..... وحدة التحكم بالمحطات الثابتة (نظام UMTS)
Radio Resource Management (RR) ..... ٢٩٩، ٣١٠، ٣٤٩ ..... إدارة موارد الشبكة الراديوية
RAKE Receiver ..... ١٤١ ..... المستقبل المتعدد المسالك (مستقبل RAKE)
Random Access Channel (RACH) ..... ١٦٥ ..... قناة طلب النفاذ العشوائي
Random Access Memory (RAM) ..... ٣٠٢ ..... ذاكرة مؤقتة
Rate Adaptation ..... ٣١٥ ..... ملاءمة الدفق
Read Only Memory (ROM) ..... ٣٠٣ ..... ذاكرة دائمة
Receiver Gain ..... ٣٢ ..... ربح المستقبل
Receiver Sensitivity ..... ٣٢، ٣٤ ..... حساسية المستقبل
Rectifier ..... ٣٠٨ ..... مُقَوِّم تيار
Reduced Frame Number (RFN) ..... ١٦١ ..... الرقم المختصر (المختزل) للإطار
Redundant Information ..... ١٣٢، ٢٢٨، ٢٤٤ ..... فائضٍ من المعلومات (حشو)
Reference Point ..... ٢٨٥ ..... نقطة ربط بيني
Reflection Coefficients ..... ٢٣٧ ..... معاملات الارتداد
Reflection ..... ٣ ..... الانعكاس
Registration ..... ١٩٩، ٣٨١ ..... تسجيل مكان وجود المشترك ضمن الشبكة
Regular Pulse Excitation (RPE) ..... ٢٣٥ ..... التحريض النبضي المنتظم

Release ..... ٢٨٦ ..... إصدار
Residual Signal ..... ٢٣١، ٢٣٦ ..... إشارة متبقية (من إجراء الاستقراء)
Ring-back Ton (RBT) ..... ٣٥٠ ..... اختيار نغمة رنين الهاتف
RLC-Block ..... ٢٠٨ ..... وحدة نقل راديوي (لتبادل المعطيات الرزمية)
RMS Delay Spread ..... ١١٠ ..... الانحراف المعياري للنشر الزمني
Roaming ..... ٢٩٣، ٣٧٥ ..... التجوال (تنقل المشترك)
Router ..... ٢٠٧ ..... موجّه
Routing Area (RA) ..... ٣٤٢ ..... منطقة توجيه الرزم
Routing Area Code (RAC) ..... ٣٤٢ ..... رمز منطقة توجيه الرزم
Routing Area Identity (RAI) ..... ٣٤٢ ..... رقم منطقة توجيه الرزم

S

Sampling Circuit ..... ٢٩ ..... دارة اعتيان (أخذ عينات دورية)
Sampling ..... ٢١٥ ..... أخذ العينات (الاعتيان)
Scrambling Codes ..... ٧٦ ..... المتتاليات شبه العشوائية (سلاسل البعثرة)
Scrambling ..... ٧٧، ٣٠٦ ..... البعثرة
Sectorized Cell ..... ١٢ ..... خلية قطاعية
Segment ..... ٧٩، ٢٠٧ ..... مُقتطع
Selection Combining ..... ١٣٥ ..... التجميع الانتقائي
Serial Number (SN) ..... ٢٩٤ ..... رقم تسلسلي
Series Number ..... ٤٠٤ ..... رقم سلسلة أرقام MSISDN
Service Access Point Identifier (SAPI) ..... ٣٥٦ ..... رقم نقطة النفاذ إلى المجموعة الوظيفية
Serving GPRS Support Node (SGSN) ..... ٣٢٧ ..... موجه الرزم الرئيسي (موجه SGSN)
Session ..... ٣٢٧ ..... جلسة (تبادل معطيات)
Shadowing ..... ٩٥ ..... خفوت الحجب
Shift Register ..... ٧٨ ..... سجل إزاحة
Short Message Service (SMS) ..... ٣٢١ ..... خدمة الرسائل النصية القصيرة
Short Term Prediction ..... ٢٣٢ ..... الاستقراء قصير الأمد
Signal to Interference Ratio (SIR) ..... ٣٠ ..... نسبة الإشارة إلى التداخل
Signal to Noise and Interference Ratio (SNIR) ..... ٢٩ ..... نسبة الإشارة إلى التشويش
Signal to Noise Ratio (SNR) ..... ٣٠ ..... نسبة الإشارة إلى الضجيج
Signaling Block ..... ١٥١ ..... إطار تحكم أو تشوير رباعي (إطار رباعي)

Signaling Connection Control Part (SCCP) ..... ٣٦٨ ..... جزء التحكم بمسارات التشوير
Signaling Message ..... ١٤٦ ..... رسالة تشوير
Signaling Point (SP) ..... ٣٦٧ ..... نقطة تشوير
Signaling Point Code (SPC) ..... ٣٦٧ ..... رمز نقطة التشوير
Signaling System Nr. 7 (SS7) ..... ٣٦٤ ..... نظام التشوير رقم 7
Signaling Unit (SU) ..... ٣٧٢ ..... وَحدة تشوير (رسالة تشوير)
Signaling ..... ٢٩٩ ..... التشوير
Silence Descriptor Frame (SID) ..... ٢٤٣ ..... الإطار الواصف للضجيج
SIM Application Toolkit (SAT) ..... ٣٠٥ ..... بيئة تطوير برمجيات الشريحة
SIM-Toolkit (STK) ..... ٣٠٤ ..... برمجيات الشريحة
Slow Associated Control Channel (SACCH) ..... ١٦٩ ..... قناة التحكم المقترِنة البطيئة
Slow fading (Long-Term Fading) ..... ٩٣، ٩٨، ١٢٨ ..... الخفوت البطيء (الخفوت بعيد المدى)
Small Scale Fading (Fast Fading) ..... ١٠٠، ١٢٨ ..... الخفوت قصير المدى (الخفوت السريع)
Smart Phones ..... ٣٠٢ ..... الهواتف الذكية
Socket ..... ٢٩٦ ..... مقبس الهاتف
Soft Capacity ..... ٧١ ..... سعة متكيفة
Soft Handover ..... ٤١٣ ..... إجراء التسليم على نحوٍ تدريجي
Software Modules ..... ٣٠٣ ..... وحدات برمجية
Software ..... ٣٠١ ..... برمجيات (وحدات برمجية)
Source Coding ..... ٢١٤، ٢١٦، ٣٤٧ ..... ترميز المنبع
Source Filter Model ..... ٢٢٧ ..... نموذج المنبع والمرشح لتوليد الإشارة
Space Diversity ..... ١٣٣ ..... التباين المكاني (تباين مسار الانتشار)
Space Diversity ..... ٣٠٧ ..... التباين المكاني
Spectrum Efficiency ..... ٢٦٥، ٢٧٩ ..... الكفاءة الطيفية
Spectrum Mask ..... ٤٥ ..... قالب (إطار) طيفي (للإشارة الراديوية)
Speech Segment ..... ٢٢١ ..... مقتطع كلامي
Splitter ..... ٣٠٨ ..... دارة فصل
Spread Spectrum Technique ..... ٥٤، ٣٤٧ ..... نثر الطيف
Spreading Factor ..... ٦٢ ..... عامل (معدل) النثر
Spreading Sequence ..... ٥٦ ..... متتالية الترميز (متتالية النثر)
Spurious Emissions ..... ٢٧ ..... الإشعاعات الكهرومغناطيسية الثانوية

Standalone Dedicated Control Channel (SDCCH) ..... ١٦٩ ..... قناة التحكم المخصصة المنفردة
Standard Deviation ..... ٩٦ ..... الانحراف المعياري
Star Configuration ..... ٣١٣ ..... النمط النجمي لربط المحطات الثابتة
Stealing Flag ..... ١٥٥ ..... مؤشر (علامة) استعارة (ضمن الرزمة الراديوية)
Sublayer ..... ٣٤٩ ..... طبقة جزئية (مستوي وظيفي)
Subscriber Identity Module (SIM) ..... ٢٨٧، ٢٩٨ ..... شريحة (بطاقة) الاشتراك
Subscriber Number (SN) ..... ٢٩٢ ..... رقم المشترك
Subscribes Identity Module (SIM) ..... ٣٠١ ..... شريحة الاشتراك
Subsystem Number (SSN) ..... ٣٦٨ ..... رقم الوحدة الوظيفية
Superframe ..... ١٥١ ..... إطار (متعدد) فائق الطول
Switching Center (Switch) ..... ٢٨٧، ٣٢٢ ..... مركز تبديل (مقسم)
Switching Combining (Threshold Combining) ..... ١٣٥، ١٣٦ ..... تجميع التبديل
Switching Matrix ..... ٣٢٣ ..... مصفوفة التبديل (وحدة التشبيك)
Switching Network ..... ٣٢٣ ..... وحدة التشبيك (شبكة الربط)
Synchronization Burst ..... ١٦٠ ..... رزمة (ضبط) التزامن
Synchronization Channel (SCH) ..... ١٦٠ ..... قناة (ضبط) التزامن
Systematic Code Word ..... ٢٤٦ ..... كلمة مرمزة متَّسِقة

T

Tail Bits ..... ١٥٦، ٢٥٥ ..... بتات استهلال أو تذييل (حاشية)
TDMA-Frame ..... ٤٦ ..... إطار زمني
Temporary Block Flow (TBF) ..... ٢٠٩ ..... دفق المعطيات الجزئي أو المؤقت
Temporary Flow Identifier (TFI) ..... ٢٠٩ ..... رقم الدفق الجزئي أو المؤقت
Temporary Mobile Subscriber Identity (TMSI) ..... ٢٩١ ..... هوية المشترك المؤقتة
Terminal Equipment (TE) ..... ٢٩٨ ..... جهاز طرفي
Terminal Equipment (TE) ..... ٣٦٠ ..... وحدة طرفية
Terminal Equipment Identity (TEI) ..... ٣٦٠ ..... رقم الوحدة الطرفية
Terminal Mobility ..... ١٧ ..... تجوال (تنقل) الوحدة المتحركة
Throughput ..... ٥٥ ..... وتيرة (أو معدل) دفق المعلومات
Time Dispersion ..... ١٠٨ ..... النثر الزمني

Time Diversity ..... ١٣٤ ..... التباين الزمني
Time Division Duplex (TDD) ..... ٣٨ ..... ازدواج اتجاه الاتصال بتقسيم الزمن
Time Division Multiple Access (TDMA) ..... ٤٦ ..... النفاذ المتعدد (تعدد النفاذ) باقتسام الزمن
Time Division Multiplexing ..... ٣١٥ ..... التجميع باقتسام الزمن
Time Slot (TS) ..... ٤٦، ١٤٩ ..... حيز زمني
Time-Selective Fading ..... ١٢٥، ١٢٧ ..... الخفوت الانتقائي زمنياً
Timing Advance (TA) ..... ٨٢، ٣٤٩، ٣٨٢ ..... تقديم توقيت إرسال الوحدة المتحركة
Traffic Channels (TCH) ..... ١٤٩، ١٥٤ ..... قنوات نقل المعلومات والمعطيات
Training Sequence ..... ١٣٩، ١٥٥ ..... سلسلة (متتالية) اختبار (ضمن الرزمة الراديوية)
Transcoding and Rate Adaptation Unit (TRAU) ..... ٣١٤ ..... وحدة فك الترميز وملاءمة الدفق (وحدة الملاءمة)
Transcoding ..... ٣١٥ ..... ضغط الإشارة الكلامية والعكس (فك الضغط)
Transfer Function ..... ٤٣ ..... الاستجابة الترددية (الطيفية)
Transit Switch ..... ٣٢٣ ..... مقسم عبور
Transmission Network (TN) ..... ٢٨٨ ..... شبكة التراسل
Transmission ..... ٢٨٦ ..... تراسلٍ (نقل)
Transmit-Receive Unit (TRU) ..... ٣٠٦ ..... وحدة إرسال واستقبال
Transparent ..... ٣٦٢ ..... خفي
Transport ..... ٢٨٨ ..... نقل
TRAU Frame ..... ٣١٦ ..... إطار وحدة الملاءمة
Tree Configuration ..... ٣١٤ ..... النمط المتفرّع لربط المحطات الثابتة
Triplet ..... ٣٣٤ ..... ثلاثية التوثق والتعمية
Tune ..... ٣٧٨ ..... ضبط (توليف)
Turbo Coding ..... ٢٥٤ ..... ترميز توربو
Type allocation Code (TAC) ..... ٢٩٤ ..... رمز نموذج الوحدة المتحركة

U

UMTS SIM Application Toolkit (USAT) ..... ٣٠٥ ..... بيئة تطوير برمجيات الشريحة (نظام UMTS)
Unacknowledged Operation ..... ٣٤٨ ..... خدمة نقل المعلومات بدون إقرار
Unvoiced Sound ..... ٢٢٠ ..... صوت مهموس
Uplink Band ..... ٣٨ ..... النطاق الترددي للمسار الصاعد
Uplink ..... ٢ ..... المسار الصاعد
User Equipment (UE) ..... ٢٨٧، ٢٩٨ ..... وحدة متحركة (نظام UMTS)

User Parts (UP) ..... ٣٦٥ ..... أجزاء التطبيقات (ضمن نظام SS7)

V

Value Added Services (VAS) ..... ٣٢١ ..... الخدمات الإضافية
Visited Network ..... ٢٩٤ ..... شبكة مُضيفة
Visitor Location Register (VLR) ..... ٢٩٧ ..... سجل المقر الحالي
VLR Service Area ..... ٣٤٢ ..... منطقة خدمة سجل VLR
Vocal Tract Filter ..... ٢٢٧ ..... مرشح جهاز النطق
Vocal Tract ..... ٢١٨ ..... جهاز النطق
Voice Activity Detector (VAD) ..... ٢٤١ ..... كاشف النشاط الكلامي
Voice Mail Service (VMS) ..... ٣٢١، ٣٥٠ ..... خدمة البريد الصوتي
Voiced Sound ..... ٢٢٠ ..... صوت مجهور
Vowels ..... ٢٢٠ ..... الصوائت (الأحرف الصوتية)

W

Wave Form Coding ..... ٢١٦ ..... ترميز شكل وهيئة الإشارة
Weighting Factors ..... ٢٢٨ ..... معاملات ترجيح
Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) ..... ٥٢ ..... نظام CDMA ذو النطاق العريض

X

XOR-Operation ..... ٥٦، ٣٣٥ ..... الخيار المقصور (نمط جداء إثناني القيم)

مسرد بالمصطلحات العربية

المعنى العربي	الصفحة	المصطلح الانكليزي

أ

(إجراء) اختيار التردد وتحقيق التزامن ..... ٣٧٨ ..... Initial Mobile Acquisition
الاتساع أو النثر الطيفي (ظاهرة دوبلر) ..... ١٢١ ..... Doppler Spread
اتصال رزمي ..... ٢٠١ ..... Packet Data Call
اتصال متعدد الأطراف ..... ٣٥١ ..... Call Conference
اتصال متعدد الأطراف ..... ٣٧٠ ..... Conference Call
آثار تفاوت القُرب والبُعد ..... ٨٠ ..... Near Far Effects
إجراء التسليم (نقل المشترك بين الخلايا) ..... ٨، ١٥٩، ٤١٠ ..... Handover (HO)
إجراء التسليم على نحوٍ تدريجي ..... ٤١٣ ..... Soft Handover
إجراء التسليم على نحوٍ قطعي ..... ٤١٢ ..... Hard Handover
أجزاء التطبيقات (ضمن نظام SS7) ..... ٣٦٥ ..... User Parts (UP)
اختيار التردد وتحقيق التزامن (للوحدة المتحركة) ..... ٣٧٨ ..... Mobile Initialization
اختيار نغمة رنين الهاتف ..... ٣٥٠ ..... Ring-back Ton (RBT)
أخذ العينات (الاعتيان) ..... ٢١٥ ..... Sampling
أخطاء جماعية (رُزَميَّة) ..... ٢٦٩ ..... Bursty Errors
إدارة التجوال (إدارة تنقل المشترك) ..... ٢٩٩، ٣٥٠ ..... Mobility Management (MM)
إدارة خدمات الاتصال ..... ٣٥٠ ..... Connection Management (CM)
إدارة موارد الشبكة الراديوية ..... ٢٩٩، ٣١٠، ٣٤٩ ..... Radio Resource Management (RR)
إدارة موقع المشترك ..... ٣٤٢ ..... Location Management
إزاحة دوبلر الترددية (تردد دبلر) ..... ١٢٣ ..... Doppler Frequency Shift
ازدواج اتجاه الاتصال بتقسيم التردد ..... ٣٧ ..... Frequency Division Duplex (FDD)
ازدواج اتجاه الاتصال بتقسيم الزمن ..... ٣٨ ..... Time Division Duplex (TDD)

الاستثناء ..... ٢٥٩ ..... Puncturing
الاستجابة الترددية (الطيفية) ..... ٤٣ ..... Transfer Function
الاستجابة النبضية ..... ٦٠ ..... Impulse Response
الاستجابة النبضية للقناة ..... ١٣٧ ..... Channel Impulse Response
الاستخدام المتكرر للترددات ..... ٦ ..... Frequency Reuse
الاستقراء الخطي ..... ٢٢٨ ..... Linear Prediction
الاستقراء الخطي المحرَّض بالمتتاليات ..... ٢٣٧ ..... Code Excited Linear Prediction (CELP)
الاستقراء طويل الأمد ..... ٢٣٣ ..... Long Term Prediction
الاستقراء قصير الأمد ..... ٢٣٢ ..... Short Term Prediction
استيفاء ..... ٢٥٥ ..... Interpolation
إشارة تحريض ..... ٢٢٥ ..... Excitation Signal
إشارة تمثيلية ..... ٢١٤ ..... Analogue Signal
إشارة متبقية (من إجراء الاستقراء) ..... ٢٣١، ٢٣٦ ..... Residual Signal
الإشعاعات الكهرومغناطيسية الثانوية ..... ٢٧ ..... Spurious Emissions
إصدار ..... ٢٨٦ ..... Release
الإطار (المتعدد) الأعظمي ..... ١٥١ ..... Hyperframe
إطار (قالب) للإشارة المرسلة ضمن الرزمة الواحدة ..... ٤٩ ..... Burst Power Mask
إطار (متعدد) فائق الطول ..... ١٥١ ..... Superframe
الإطار الواصف للضجيج ..... ٢٤٣ ..... Silence Descriptor Frame (SID)
إطار تحكم أو تشوير رباعي (إطار رباعي) ..... ١٥١ ..... Signaling Block
إطار زمني ..... ٤٦ ..... TDMA-Frame
إطار متعدد ..... ١٥١ ..... Multiframe
إطار وحدة الملاءمة ..... ٣١٦ ..... TRAU Frame
أطوار الاتصال ..... ١٥٨ ..... Call Phases
إقرار ..... ٣٤٨ ..... Acknowledgement
إقلاع الجهاز ..... ٣٧٨ ..... Boot-On
آليات التحكم بأخطاء النقل ..... ٢٤٤ ..... Error Control Mechanisms
آليات التحكم بالاتصال ..... ٢٩٩، ٣٥٠ ..... Call Control (CC)
أمد التأثير (الأمد المقيَّد) ..... ٢٤٦ ..... Constraint Length
أَمَد التفريق ..... ٢٧١ ..... Interleaving Depth
الانتشار ..... ٣ ..... Diffraction
الانحراف المعياري ..... ٩٦ ..... Standard Deviation
الانحراف المعياري للنثر الزمني ..... ١١٠ ..... RMS Delay Spread

إنشاء الاتصال ..... ١٥٨ ..... Call Establishment
إنشاء الاتصال ..... ٣١١ ..... Call Setup
الانعكاس ..... ٣ ..... Reflection
أنماط ترميزٍ وتعديل ..... ٢٦٥ ..... Modulation and Coding Scheme (MCS)
إيزوتروبي ..... ٨٦ ..... Isotropic

ب

بادئة (ترويسة) ..... ١٨٣، ٢٠٧ ..... Header
بايت ..... ١٨٣ ..... Octet
بت ..... ٥٣ ..... Bit
بتات استهلال أو تذييل (حاشية) ..... ١٥٦ ..... Tail Bits
بتات تحكم ..... ٣١٦ ..... Control Bits
بتات تكافؤ ..... ٢٥٥ ..... Parity Bits
برمجيات (وحدات برمجية) ..... ٣٠١ ..... Software
برمجيات الشريحة ..... ٣٠٤ ..... SIM-Toolkit (STK)
بروتوكول ..... ٣٤٥ ..... Protocol
بروتوكول التجهيز الديناميكي للمضيف ..... ٣٢٩ ..... Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)
بروتوكول SS7 الجزئي الخاص بخدمات ISDN ..... ٣٦٦، ٣٦٩ ..... ISDN User Part (ISUP)
بروتوكولات تحكم بمعطيات رزمية ..... ٣٢٧ ..... Packet Data Protocol (PDP)
البعثرة ..... ٧٧، ٣٠٦ ..... Scrambling
البواني (ترددات التجاوب) ..... ٢٢١، ٢٢٥ ..... Formants
بيئة تطوير برمجيات الشريحة ..... ٣٠٥ ..... SIM Application Toolkit (SAT)
بيئة تطوير برمجيات الشريحة (نظام UMTS) ..... ٣٠٥ ..... UMTS SIM Application Toolkit (USAT)

ت

تابع النبضة الأحادية ..... ١٠٩ ..... Dirac Impulse
تباين الاستقطاب ..... ١٣٥ ..... Polarization Diversity
التباين الترددي ..... ١٣٤ ..... Frequency Diversity
التباين الزمني ..... ١٣٤ ..... Time Diversity
التباين المكاني ..... ٣٠٧ ..... Space Diversity

التباين المكاني (تباين مسار الانتشار)..... ١٣٣ ..... Space Diversity
التبديل الإثناني للطور..... ٥٧ ..... Binary Phase Shift Keying (BPSK)
التبديل الثُماني للطور..... ٢١، ٢٦٥ ..... 8 Phase Shift Keying (8PSK)
تبديل الدارات..... ٢٠، ٣٢٦ ..... Circuit Switching
تبديل الرزم..... ٢٠ ..... Packet Switching
تجميع (ضم)..... ٣١١ ..... Multiplexing
التجميع الانتقائي..... ١٣٥ ..... Selection Combining
تجميع التبديل..... ١٣٥، ١٣٦ ..... Switching Combining
(Threshold Combining)
تجميع الربح المتساوي..... ١٣٦ ..... Equal Gain Combining
تجميع النسبة العظمى..... ١٣٧ ..... Maximum Ratio Combining
التجميع باقتسام الزمن..... ٣١٥ ..... Time Division Multiplexing
تجهيزات وعتاد المحطة الثابتة..... ٢، ٣٠٥ ..... Base Transceiver Station (BTS)
التجوال (تنقل المشترك)..... ١٦، ١٧ ..... Mobility
التجوال (تنقل المشترك)..... ٢٩٣، ٣٧٥ ..... Roaming
تجوال (تنقل) المستخدم..... ١٧ ..... Personal Mobility
تجوال (تنقل) الوحدة المتحركة..... ١٧ ..... Terminal Mobility
التجوال القطري..... ٢٩٣ ..... National Roaming
التحديث القسري لرقم منطقة وجود المشترك..... ٣٩٠ ..... Forced Registration
تحديث رقم منطقة الوجود..... ٣٤١، ٣٨١، ٣٩٦ ..... Location Update (LU)
تحديد سلسلة المعلومات الأكثر احتمالاً..... ١٣٩ ..... Maximum Likelihood Sequence
Estimation (MLSE)
تحرير الاتصال..... ١٥٨، ٤٠٢ ..... Call Release
التحريض النبضي المنتظم..... ٢٣٥ ..... Regular Pulse Excitation (RPE)
التحكم بالطاقة (ضبط الطاقة)..... ٨٣، ١٥٨، ٣٤٩ ..... Power Control (PC)
التحكم بوتيرة إرسال المعلومات..... ٣٤٨ ..... Flow Control
التحليل عن طريق التركيب..... ٢٣٩ ..... Analysis by Synthesis (ABS)
تحويل المكالمات إلى أرقام بديلة..... ٣٥٠ ..... Call Forwarding
تحويل المكالمات إلى رقم بديل..... ٣٧٠ ..... Call Forwarding
تخاطبٍ نصّي..... ٣٢٧ ..... Chat
التخصيص الحصري للقنوات الفيزيائية المتاحة..... ٢٠٤ ..... Dedicated Channel Allocation
التخصيص المتكيف للقنوات الفيزيائية..... ٢٠٤ ..... Dynamic Channel Allocation (DCA)
تخصيص الموارد وفق الحاجة أو وفق الطلب..... ٢٠٤ ..... On Demand Allocation

تخصيص قناة فيزيائية للمشترك ..... ٣٨٢ ..... Immediate Assignment
التخميد (الخُبُوُّ) ..... ٣، ٣٨ ..... Attenuation
تخميد (خبو) انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية ..... ٨٦ ..... Propagation Loss
التخميد بسبب مسار الانتشار (تخميد الانتشار) ..... ٨٨ ..... Propagation Loss (Path Loss)
تداخل الرموز ..... ١٠٨ ..... Intersymbol Interference (ISI)
تداخل القناة المشتركة ..... ٢٨ ..... Co-channel Interference
تداخل القنوات المجاورة ..... ٢٨ ..... Adjacent Channel Interference
تدقيق الفائض الحِلَقي (الفائض الدَّوَّار) ..... ٢٤٨ ..... Cyclic Redundancy Check
التدوين العقدي ..... ١١٦ ..... Complex Numbers Notation
الترابط الإحصائي المتبادل ..... ٦٤ ..... Cross Correlation
تراسلٍ (نقل) ..... ٢٨٦ ..... Transmission
التردد الأساسي ..... ٢١٩ ..... Fundamental Frequency
التردد الدَّال على المحطة (المميِّز للمحطة) ..... ١٥٩ ..... Beacon Frequency
تردد مركزي (للقناة الراديوية) ..... ٤ ..... Center Frequency
الترميز ..... ٢١٥ ..... Coding
ترميز التلافّ (الطيّ) ..... ٢٤٦، ٢٥٣ ..... Convolutional Coding
ترميز القناة ..... ١٣٢، ٢١٤، ٢٤٤ ..... Channel Coding
الترميز المتكيّف (ذو معدلات النقل المتعددة) ..... ٢٣٩ ..... Adaptive Multi Rate Coding
ترميز المجموعات (الترميز الانفرادي) ..... ٢٤٦ ..... Block Coding
ترميز المنبع ..... ٢١٤، ٢١٦، ٣٤٧ ..... Source Coding
الترميز الوسيطي للمنبع ..... ٢١٧، ٢٢٧ ..... Parametric Source Coding
ترميز توربو ..... ٢٥٤ ..... Turbo Coding
ترميز شكل وهيئة الإشارة ..... ٢١٦ ..... Wave Form Coding
تسجيل مكان وجود المشترك ضمن الشبكة ..... ١٩٩، ٣٨١ ..... Registration
تسجيل مكان وجود الوحدة المتحركة ..... ٣٨١، ٣٩٦ ..... Location Registration
تسلسل خطوات الاتصال ..... ٣٠٤ ..... Calling Process
التسوية ..... ١٣٧ ..... Equalization
تشبيك ..... ٣١٠ ..... Networking
التشفير ..... ٢٧٨ ..... Ciphering
التشوير ..... ٢٩٩ ..... Signaling
تشويش (تداخل) ..... ٢٥، ٢٦، ٣١ ..... Interference
التصحيح اللاحق للخطأ ..... ٢٤٤ ..... Backward Error Correction (BEC)
التصحيح بالترميز الاستباقي ..... ٢٤٤ ..... Forward Error Correction(FEC)

التضمين النبضي المرمَّز ..... ٣١٥ ..... Pulse Code Modulation (PCM)
تعارض (تصادم عند شغل موارد الشبكة) ..... ١٨٧ ..... Collision
التعديل (التضمين) الرقمي ..... ٢١، ٢١٥، ٢٧٩ ..... Digital Modulation
تعديل (تضمين) الإشارة ..... ٤، ٢١٥، ٢٧٩ ..... Modulation
التعديل النبضي التفاضلي المتكيّف ..... ٢١٦ ..... Adaptive Pulse Code Modulation
التعمية ..... ٢١٤، ٢٧٧، ٣٣٠ ..... Encryption
التفريق ..... ١٣٤، ٢١٤، ٢٦٩ ..... Interleaving
التفريق الخارجي ..... ٢٧١ ..... Inter-burst Interleaving (Diagonal Interleaving)
التفريق الداخلي ..... ٢٧٣ ..... Intra-burst Interleaving
تفريق المجموعات ..... ٢٧٠ ..... Block or Matrix Interleaving
تقديم توقيت إرسال الوحدة المتحركة ..... ٨٢، ٣٤٩، ٣٨٢ ..... Timing Advance (TA)
تقنيات (طرق) التباين ..... ١٣٣ ..... Diversity Techniques
تقنيات (طرق) التجميع ..... ١٣٥ ..... Diversity Combining Techniques
تقنيات (طرق) النفاذ المتعدد ..... ٣٧ ..... Multiple Access Methods
تقنية الإرسال المتقطع ..... ١٥٨، ٢٤١، ٣٤٩ ..... Discontinuous Transmission (DTX)
التكمية ..... ٢١٥ ..... Quantization
تكوين الرزم (الراديوية) ..... ٢١٥، ٢٧٨ ..... Burst Forming
تلافّ (طَيّ) ..... ٢٢٥، ٢٥٣ ..... Convolution
تنازع (تنافس لشغل موارد الشبكة) ..... ١٨٧ ..... Contention
تنصّت ..... ٣٣٠ ..... Interception (Tapping)
توافقيات (ترددات توافق أضعاف التردد الأساسي) ..... ٢٢٥ ..... Harmonics
توجيه الرزم ..... ٢٠ ..... Packet Routing
توجيه مسار المكالمة ..... ٣١٠ ..... Call Routing

ث

ثلاثية التوثق والتعمية ..... ٣٣٤ ..... Triplet

ج

جزء التحكم بخدمات التجوال (ضمن نظام SS7) ..... ٣٦٦، ٣٧٠ ..... Mobile Application Part (MAP)
جزء التحكم بشبكة النفاذ (ضمن نظام SS7) ..... ٣٧١ ..... BSS Application Part (BSSAP)

جزء التحكم بمسارات التشوير ..... ٣٦٨ ..... Signaling Connection Control Part (SCCP)
جلسة (تبادل معطيات) ..... ٣٢٧ ..... Session
جهاز النطق ..... ٢١٨ ..... Vocal Tract
جهاز طرفي ..... ٢٩٨ ..... Terminal Equipment (TE)

ح

حاشية (بتات تذييل ضمن الرزمة الراديوية) ..... ٢٥٥ ..... Tail Bits
حال (أو وضع) ارتباط الوحدة بالشبكة ..... ٣٧٤، ٣٩٠ ..... Attached Mode
حال (أو وضع) الارتباط بالشبكة ..... ٣٧٤، ٣٩٠، ٣٩٦ ..... IMSI-Attached
حال (أو وضع) الانفكاك التام عن الشبكة ..... ٣٧٤، ٣٩٠ ..... Detached Mode
حال (أو وضع) الانفكاك التام عن الشبكة ..... ٣٧٤، ٣٩٠، ٣٩٦ ..... IMSI-Detached
حالة سكون الوحدة المتحركة ..... ٢٠٠، ٣٧٥ ..... Idle Mode
حالة نشاط أو فاعلية الوحدة المتحركة ..... ٣٧٥ ..... Active Mode
الحامل الراديوي ..... ٣٠٦ ..... Carrier Frequency
حدة (طبقة) الصوت ..... ٢١٩ ..... Pitch
حساسية المستقبل ..... ٣٢، ٣٤ ..... Receiver Sensitivity
حشو (فائضٍ من المعلومات) ..... ١٣٢، ٢٢٨، ٢٤٤ ..... Redundant Information
حقلَ تحكُّمٍ ..... ٣٥٤ ..... Control Field
حقل عنونة ..... ٣٥٤ ..... Address Field
حقل معلومات (ضمن الرزمة الراديوية) ..... ١٥٥ ..... Information Field (Data Field)
حيز راديوي رباعي ..... ٢٠٩ ..... Radio Block
حيز زمني ..... ٤٦، ١٤٩ ..... Time Slot (TS)

خ

خانة التدقيق ..... ٢٩٥ ..... Check Digit
خدمات الإرسال الراديوي الرزمي ..... ٢٠ ..... General Packet Radio Services (GPRS)
الخدمات الإضافية ..... ٣٢١ ..... Value Added Services (VAS)
خدمات تبادل المعطيات ..... ٢٠ ..... Data Communication Services
خدمة البريد الصوتي ..... ٣٢١، ٣٥٠ ..... Voice Mail Service (VMS)
خدمة الرسائل النصية القصيرة ..... ٣٢١ ..... Short Message Service (SMS)
خدمة نقل المعلومات بدون إقرار ..... ٣٤٨ ..... Unacknowledged Operation

خدمة نقل المعلومات مع إقرارٍ باستلامها ..... ٣٤٨ ..... Acknowledged Operation
خصائص القناة الفيزيائية (الراديوية) ..... ٣٩٩ ..... Bearer Capabilities
خطأ الاستقراء ..... ٢٢٩ ..... Prediction Error
خطوط التراسل (النقل) المؤجرة ..... ٣١٦ ..... Leased Lines
الخفوت ..... ٩٠ ..... Fading
الخفوت الانتقائي زمنياً ..... ١٢٥، ١٢٧ ..... Time-Selective Fading
الخفوت الانتقائي طيفياً ..... ١١٣، ١١٥ ..... Frequency-Selective Fading
الخفوت البطيء (الخفوت بعيد المدى) ..... ٩٣، ٩٨، ١٢٨ ..... Slow fading (Long-Term Fading)
خفوت الحجب ..... ٩٥ ..... Shadowing
الخفوت السريع (الخفوت قصير المدى) ..... ١٠٠، ١٢٨ ..... Fast Fading (Small Scale Fading)
الخفوت بعيد المدى (الخفوت البطيء) ..... ٩٣، ٩٨، ١٢٨ ..... Long-Term Fading (Slow Fading)
خفوت تعدد المسارات ..... ١٠٠ ..... Multipath Fading
الخفوت ذو التوزع الطبيعي لقيم اللوغاريتم ..... ٩٥ ..... Log-Normal Fading
الخفوت قصير المدى (الخفوت السريع) ..... ١٠٠، ١٢٨ ..... Small Scale Fading (Fast Fading)
خفوت منتظَم أو متساوي (بدلالة التردد) ..... ١١٥ ..... Flat Fading
خفي ..... ٣٦٢ ..... Transparent
خلية ..... ٧، ١٣، ٣٣٩ ..... Cell
خلية قطاعية ..... ١٢ ..... Sectorized Cell
خوارزمية التعمية ..... ٣٣٥ ..... A5-Algorithm
خوارزمية التعمية (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٣٣٦ ..... GPRS Encryption Algorithm (GEA)
خوارزمية التوثق ..... ٣٣٣ ..... A8-Algorithm
خوارزمية التوثق والتعمية ..... ٣٣٤ ..... Comp 128
الخيار المقصور (نمط جداء إثناني القيم) ..... ٥٦، ٣٣٥ ..... XOR-Operation

د

دارة ..... ٣٢٥ ..... Circuit
دارة اعتيان (أخذ عينات دورية) ..... ٢٩ ..... Sampling Circuit
دارة أو مرشح التسوية (المسوّي) ..... ١٣٧ ..... Equalizer
دارة تبديلٍ ..... ٥٢ ..... Switch
دارة تضخيم ..... ٢٧ ..... Amplifier
دارة فصل ..... ٣٠٨ ..... Splitter
دارة مزج ..... ٢٧ ..... Mixer

دارة مزج (ضم) ..... ٣٠٨ ..... Combiner
دارة مقارنة (ترجيح) ..... ٢٩ ..... Decision Device
دالة توليد الترميز ..... ٢٤٨، ٢٥٣ ..... Generator Polynomial
درجة (مرتبة) التفريق ..... ٢٧٠ ..... Interleaving Degree
دفق المعطيات الجزئي أو المؤقت ..... ٢٠٩ ..... Temporary Block Flow (TBF)

ذ

ذاكرة دائمة ..... ٣٠٣ ..... Read Only Memory (ROM)
ذاكرة غير متلاشية قابلة للبرمجة والمحو ..... ٣٠٢ ..... Erasable Programmable Read Only Memory (EPROM)
ذاكرة مؤقتة ..... ٢٧٠ ..... Buffer
ذاكرة مؤقتة ..... ٣٠٢ ..... Random Access Memory (RAM)

ر

الرابط (المنفذ) الراديوي ..... ٣، ٨٥ ..... Air Interface
الرابط الراديوي ..... ٣٠٥ ..... Radio Interface
رابط بيني ..... ٢٨٥ ..... Interface
ربح إجراء النثر ..... ٦٣ ..... Processing Gain
ربح المستقبل ..... ٣٢ ..... Receiver Gain
ربح الهوائي ..... ٨٦ ..... Antenna Gain
ربح ترميز القناة ..... ٢٦٧ ..... Coding Gain
رزمة (ضبط) التزامن ..... ١٦٠ ..... Synchronization Burst
الرزمة العادية ..... ٤٨، ١٥٥ ..... Normal Burst
رزمة تصحيح التردد ..... ١٥٩ ..... Frequency Correction Burst
رزمة طلب النفاذ العشوائي ..... ١٦٦ ..... Access Burst
رزمة معطيات ..... ٢٠١ ..... Packet
رزمة معلومات راديوية (رزمة) ..... ٤٨، ١٤٩ ..... Burst
رزمة معلومات وهمية (صورية) ..... ١٧١ ..... Dummy Burst
رسالة تشوير ..... ١٤٦ ..... Signaling Message
رسائل الطبقة الثالثة ..... ١٨٣ ..... Layer-3 Messages
الرقم الأساسي أو المرجعي للقناة الترددية ..... ٤١ ..... Absolute Radio Frequency Channel Number (ARFCN)
رقم الدفق الجزئي أو المؤقت ..... ٢٠٩ ..... Temporary Flow Identifier (TFI)

الرقم المُتَّصِل ..... A-Number (A-Party) ٣٩٩
الرقم المُتَّصَلِ به ..... B-Number (B-Party) ٣٩٩
رقم المحطة ضمن المنطقة الجغرافية ..... Base Station Color Code (BCC) ١٦٤
الرقم المختصر (المختزل) للإطار ..... Reduced Frame Number (RFN) ١٦١
رقم المشترك ..... Subscriber Number (SN) ٢٩٢
رقم الوحدة الطرفية ..... Terminal Equipment Identity (TEI) ٣٦٠
رقم الوحدة الوظيفية ..... Subsystem Number (SSN) ٣٦٨
رقم الولوج إلى الشريحة ..... Personal Identification Number (PIN) ٣٠٣
رقم تحرير الشريحة ..... PIN Unlock Code (PUK) ٣٠٤
رقم تسلسلي ..... Serial Number (SN) ٢٩٤
رقم تسلسلي خاص بشريحة الاشتراك ..... Integrated Circuit Card Identifier (ICCID) ٣٠٣
رقم سلسلة أرقام MSISDN ..... Series Number ٤٠٤
رقم منطقة الوجود ..... Location Area Identity (LAI) ٣٤٠
رقم منطقة توجيه الرزم ..... Routing Area Identity (RAI) ٣٤٢
رقم نقطة النفاذ إلى المجموعة الوظيفية ..... Service Access Point Identifier (SAPI) ٣٥٦
رقم هاتف المشترك ..... Mobile Subscriber ISDN Number (MSISDN) ٢٩٢
رقم هاتف المشترك المؤقت ..... Mobile Subscriber Roaming Number (MSRN) ٢٩٣
رقمنة الإشارة ..... Digitization ٢١٤
رمز إجراء التسليم ..... Handover Reference Number (HRN) ٤١٥
رمز الخلية العالمي ..... Cell Global Identity (CGI) ٣٤١
رمز الشبكة المحلي ..... Mobile National Code (MNC) ٢٩٠
الرمز العالمي لنقطة التشوير ..... International Signaling Point Code (ISPC) ٣٦٧
الرمز القطري ..... Mobile Country Code (MCC) ٢٩٠
الرمز القطري لنقطة الإشارة ..... National Signaling Point Code (NSPC) ٣٦٧
رمز منطقة الوجود ..... Location Area Code (LAC) ٣٤٠
رمز منطقة توجيه الرزم ..... Routing Area Code (RAC) ٣٤٢
رمز نقطة التشوير ..... Signaling Point Code (SPC) ٣٦٧
رمز نموذج الوحدة المتحركة ..... Type allocation Code (TAC) ٢٩٤
رمز هوية المحطة ..... Base Station Identity Code (BSIC) ١٦٤

س

سجل أجهزة المشتركين ..... ٣٣٨ ..... Equipment Identity Register (EIR)
سجل إزاحة ..... ٧٨ ..... Shift Register
سجل المقر الحالي ..... ٢٩٧ ..... Visitor Location Register (VLR)
سجل تفاصيل المكالمة ..... ٣٢٣ ..... Call Data Record (CDR)
سجل مقر الاشتراك ..... ٢٩٥ ..... Home Location Register (HLR)
سعة متكيفة ..... ٧١ ..... Soft Capacity
السلاسل شبه العشوائية (سلاسل البعثرة) ..... ٧٦ ..... Scrambling Codes
سلاسل (متتاليات) شبه عشوائية ..... ٧٨ ..... Pseudo Noise Codes (PN-Codes)
سلسلة (متتالية) اختبار (ضمن الرزمة الراديوية) ..... ١٣٩، ١٥٥ ..... Training Sequence
سياق ..... ٣٢٧ ..... Context
سياق اتصال رزمي (سياق رزمي) ..... ٣٢٧ ..... PDP-Context

ش

شبكات الأقمار الصناعية للاتصال ..... ٢٨٧ ..... Mobile Satellite Networks
شبكة اتصال خلوية ..... ٢٨٦ ..... Public Land Mobile Network (PLMN)
الشبكة الأم (شبكة الاشتراك أو الاكتتاب) ..... ٢٩١ ..... Home Network
شبكة التراسل ..... ٢٨٨ ..... Transmission Network (TN)
شبكة الخدمات الذكية (الشبكة الذكية) ..... ٣٢١ ..... Intelligent Network (IN)
الشبكة العمومية لتبادل المعطيات ..... ٢٨٦ ..... Public Data Network (PDN)
الشبكة المركزية ..... ٢٨٧، ٣٢١ ..... Core Network (CN)
شبكة النفاذ (شبكة المحطات الثابتة) ..... ٢٨٧، ٣١٩ ..... Base Station System (BSS)
شبكة النفاذ الراديوي (شبكة النفاذ) ..... ٢٨٧ ..... Radio Access Network (RAN)
شبكة الهاتف الثابت العمومية (التقليدية) ..... ٢٨٦ ..... Public Switched Telephone Network (PSTN)
شبكة الهاتف الرقمية (شبكة الخدمات المتكاملة) ..... ٢٨٦ ..... Integrated Services Digital Network (ISDN)
شبكة مُضيفة ..... ٢٩٤ ..... Visited Network
شبكة موازية ..... ٢١، ٣٢٧ ..... Overlay Network
شريحة (بطاقة) الاشتراك ..... ٢٨٧، ٢٩٨ ..... Subscriber Identity Module (SIM)
شريحة الاشتراك ..... ٣٠١ ..... Subscribes Identity Module (SIM)

ص

صاري (حامل الهوائي في المحطة الثابتة) ..... ١٣ ..... Mast
الصوائت (الأحرف الصوتية) ..... ٢٢٠ ..... Vowels
صوت مجهور ..... ٢٢٠ ..... Voiced Sound
صوت مهموس ..... ٢٢٠ ..... Unvoiced Sound

ض

ضبط (توليف) ..... ٣٧٨ ..... Tune
ضجيج ..... ٢٥ ..... Noise
ضغط الإشارة الكلامية والعكس (فك الضغط) ..... ٣١٥ ..... Transcoding

ط

طبقة إدارة موارد وخدمات الشبكة ..... ٣٤٩ ..... Network Layer
طبقة التحكم بالمسار الراديوي ..... ٢٠٧ ..... Radio Link Control (RLC)
طبقة التحكم بالنفاذ إلى الوسط المادي ..... ٢٠٧ ..... Medium Access Control (MAC)
طبقة التحكم بمسار نقل المعطيات ..... ٢٠٧، ٣٣٦ ..... Logical Link Control Layer (LLC)
الطبقة الثالثة للمنفذ الراديوي ..... ١٨٣، ٣٤٩ ..... Radio Interface Layer 3 (RIL3)
الطبقة المادية (الفيزيائية) ..... ٣٤٧، ٣٥٩ ..... Physical Layer
طبقة جزئية (مستوي وظيفي) ..... ٣٤٩ ..... Sublayer
طبقة حماية المعلومات (المعطيات) ..... ٢٠٧، ٣٤٧، ٣٦٠ ..... Data Link Layer
طرق توفير الاتصال مزدوج الإتجاه ..... ٣٧ ..... Duplexing Methods
الطلب الآلي لتكرار الإرسال ..... ٢٤٤ ..... Automatic Repeat Request(ARQ)
طور تبادل المعلومات أثناء الاتصال ..... ٣١١ ..... Information Exchange
طَيّ (تلافّ) ..... ٢٢٥، ٢٥٣ ..... Convolution

ع

عامل (ثابت) التخميد ..... ٩١ ..... Path Loss Exponent
عامل (معامل) ربحٍ ..... ٨٧ ..... Gain Factor
عامل (معدل) النثر ..... ٦٢ ..... Spreading Factor
عبء (حِمل) ..... ٣٠٨، ٣٦٧ ..... Load

ف

فاصل زمني عازل ..... ١٥٠ ..... Guard Period (GP)
فائضٍ من المعلومات (حشو) ..... ١٣٢، ٢٢٨، ٢٤٤ ..... Redundant Information
فتحة المزمار ..... ٢١٩ ..... Glottis
فحص التكافؤ ..... ٢٤٤ ..... Parity-Check
الفضاء الحر ..... ٨٥ ..... Free Space

ق

قاعدة معطيات ..... ٢٨٧ ..... Data Base
قالب (إطار) طيفي (للإشارة الراديوية) ..... ٤٥ ..... Spectrum Mask
قائم ..... ٣٢٢ ..... Rack
قسم (جزء) نقل رسائل التحكم (ضمن نظام SS7) ..... ٣٦٥ ..... Message Transfer Part (MTP)
القفز الترددي ..... ١٣٤، ١٥٨ ..... Frequency Hopping (FH)
قناة (ضبط) التزامن ..... ١٦٠ ..... Synchronization Channel (SCH)
قناة اعتبارية ..... ١٤٥، ١٤٦ ..... Logical Channel
قناة الإخطار العامة (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٦ ..... Packet Notification Channel (PNCH)
قناة الانتشار الراديوية (وسط الانتشار) ..... ٣ ..... Propagation Channel
قناة التحكم الحاملة للمعلومات العامة ..... ١٥٨ ..... Broadcast Control Channel (BCCH)
قناة التحكم العامة (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٦ ..... Packet Common Control Channel (PCCCH)
قناة التحكم المخصصة المنفردة ..... ١٦٩ ..... Standalone Dedicated Control Channel (SDCCH)
قناة التحكم المُقترنة (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٦ ..... Packet Associated Control Channel (PACCH)
قناة التحكم المقترِنة البطيئة ..... ١٦٩ ..... Slow Associated Control Channel (SACCH)
قناة التحكم المقترنة السريعة ..... ١٧٠ ..... Fast Associated Control Channel (FACCH)
القناة الراديوية الحاملة للمعلومات (الحامل الراديوي) ..... ٤ ..... Carrier Wave
قناة المعلومات العامة (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٥ ..... Packet Broadcast Control Channel (PBCCH)

قناة النداء (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ١٦٥ ..... Paging Channel (PCH)
قناة النداء (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٦ ..... Packet Paging Channel (PPCH)
قناة تبادل المعطيات الرزمية الفعلية ..... ٢٠٥ ..... Packet Data Traffic Channel (PDTCH)
قناة تحكم بالمعطيات الرزمية ..... ٢٠٥ ..... Packet Data Control Channel (PDCCH)
قناة تراسل (نقل) راديوية ..... ٣١٤ ..... Microwave Link
قناة ترددية ثنائية (مزدوجة) ..... ٣٩ ..... Paired Channel
قناة راديوية ..... ٤ ..... Radio Channel
قناة ضبط (تصحيح) التردد ..... ١٥٩ ..... Frequency Correction Channel (FCCH)
قناة ضبط تقديم الإرسال (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٦ ..... Packet Timing Advance Control Channel (PTCCH)
قناة طلب النفاذ العشوائي ..... ١٦٥ ..... Random Access Channel (RACH)
قناة طلب النفاذ العشوائي (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٦ ..... Packet Random Access Channel (PRACH)
قناة فيزيائية ..... ١٤٥، ١٤٦ ..... Physical Channel
قناة قبول طلب النفاذ (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٦ ..... Packet Access Grant Channel (PAGCH)
قناة قبول طلب النفاذ العشوائي ..... ١٦٨ ..... Access Grant Channel (AGCH)
قناة معطيات رزمية ..... ٢٠٥ ..... Packet Data Channel (PDCH)
قناة نقل المعلومات والمعطيات بمعدل كامل ..... ١٥٤ ..... Full-rate Traffic Channel
قناة نقل المعلومات والمعطيات بمعدلٍ نصفي ..... ١٥٤ ..... Half-rate Traffic Channel
قنوات التحكم ..... ١٤٩ ..... Control Channels
قنوات التحكم ..... ١٥٧ ..... Control Channels (CCH)
قنوات التحكم العامة ..... ١٥٨ ..... Broadcast Channels (BCH)
قنوات التحكم المُخصَّصَة ..... ١٦٨ ..... Dedicated Control Channels (DCCH)
قنوات التحكم المشتَرَكة ..... ١٦٤، ١٦٥ ..... Common Control Channels (CCCH)
قنوات نقل المعلومات والمعطيات ..... ١٤٩، ١٥٤ ..... Traffic Channels (TCH)
قيمة إثنانية ..... ٥٣ ..... Binary Value
قيمة الإشارة الصغرى القابلة للتمييز ..... ٣٤ ..... Minimum Detectable Signal (MDS)

أ

كابل محوري ..... ٢٨٥ ..... Coaxial Cable
كاشف النشاط الكلامي ..... ٢٤١ ..... Voice Activity Detector (VAD)
كثافة الاستطاعة ضمن وحدة المساحة ..... ٨٦ ..... Power Density
الكثافة الطيفية لاستطاعة الإشارة ..... ٥٤ ..... Power Spectral Density

الكثافة الطيفية لاستطاعة الضجيج ..... ٣١ ..... Noise Spectral Density
كشف أخطاء النقل ..... ٣٤٨ ..... Error Detection
كفاءة الاستطاعة ..... ٢٧٩ ..... Power Efficiency
الكفاءة الطيفية ..... ٢٦٥، ٢٧٩ ..... Spectrum Efficiency
كلمة مرمزة متَّسِقة ..... ٢٤٦ ..... Systematic Code Word

ل

لغة برمجة الآلة ..... ٣٠٤ ..... Assembly
ليف ضوئي ..... ٢٨٥ ..... Optical Fiber

م

متابعة مكان المشترك ..... ٣٥٠ ..... Localization of the MS
متتاليات (سلاسل) النثر المتعامدة ..... ٧٢ ..... Orthogonal Spreading Codes
متتاليات (سلاسل) النثر ذات عامل النثر المتغير ..... ٧٣، ٧٥ ..... Orthogonal Variable Spreading Factor Codes (OVSF-Codes)
المتتاليات المميِّزة للقنوات الفيزيائية المختلفة ..... ٧٥ ..... Channelization Codes
متتالية الترميز (متتالية النثر) ..... ٥٦ ..... Spreading Sequence
متتالية تدقيق ..... ٢٠٨ ..... Block Check Sequence (BCS)
متتالية تدقيق ..... ٢٤٦ ..... Frame Check Sequence (FCS)
متتالية ترميز (شيفرة) ..... ٥٤ ..... Code
متتالية من النبضات ..... ٥٣ ..... Pulse Sequence
متصفح ..... ٣٠٠ ..... Browser
متوسط النثر الزمني ..... ١٠٩ ..... Mean Excess Delay
المحطة الثابتة ..... ٢، ٣٠٥ ..... Base Station (BS)
المحطة الثابتة (نظام UMTS) ..... ٣٠٥ ..... Node B
مدة الترابط ..... ١٢٧، ١٢٨ ..... Coherence Time
مدة النثر الزمني ..... ١٠٩ ..... Excess Delay
المرافق العقدي ..... ١١٧ ..... Complex Conjugate
مُرَشِّح ..... ٤ ..... Filter
المرشح الموائم ..... ٦٠ ..... Matched Filter
مرشح جهاز النطق ..... ٢٢٧ ..... Vocal Tract Filter
مرشح ذو نطاقِ تمريرٍ منخفض ..... ٦٠ ..... Low-Pass Filter

مُرَشِّح متعدد الأقطاب ..... ٢٢٥ ..... All-pole Filter
مرشح مزدوج الاتجاه ..... ٥٢، ٣٠٨ ..... Duplexer
مركز التَّوَثُّق ..... ٣٠٤، ٣٣٠ ..... Authentication Center (AUC)
مركز الصيانة والتشغيل ..... ٣٠٧ ..... Operation and Maintenance Center (OMC)
مركز تبديل (مقسم) ..... ٢٨٧ ..... Switching Center (Switch)
مركز تبديل خدمات التجوال (مركز التبديل) ..... ٣٢٢ ..... Mobile Switching Center (MSC)
مرمِّز الضجيج ..... ٢٤٢ ..... Background Noise Encoder
المسار الصاعد ..... ٢ ..... Uplink
المسار الهابط ..... ٢ ..... Downlink
المستقبل المتعدد المسالك (مستقبل RAKE) ..... ١٤١ ..... RAKE Receiver
مستوي وظيفي (طبقة بروتوكولية جزئية) ..... ٣٦٦ ..... Functional Level
مسوّي (دارة أو مرشح تسوية) ..... ١٣٧ ..... Equalizer
المُسوّي المتكيّف ..... ١١٠ ..... Adaptive Equalizer
مصفوفة التبديل (وحدة التشبيك) ..... ٣٢٣ ..... Switching Matrix
مضخم غير خطي ..... ٢٨١ ..... Nonlinear Amplifier
معالج مركزي (وحدة معالجة مركزية) ..... ٣٠٢ ..... Central Processor Unit (CPU)
معامل الترابط الإحصائي ..... ١١٧ ..... Correlation Coefficient
معامل الترابط الإحصائي الذاتي ..... ٧٢ ..... Autocorrelation Coefficient
معاملات الارتداد ..... ٢٣٧ ..... Reflection Coefficients
معاملات الاستقراء ..... ٢٣٠ ..... Prediction Coefficients
معاملات ترجيح ..... ٢٢٨ ..... Weighting Factors
معدل الترميز ..... ٢٤٦ ..... Coding Rate
معدل الدفق الإجمالي ..... ٢٥٧ ..... Gross Bit Rate
معدل الدفق الصافي ..... ٢٥٧ ..... Net Bit Rate
معدل النقل الكامل ..... ٢٣٥ ..... Full Rate (FR)
معدل النقل الكامل المحسن ..... ٢٣٩ ..... Enhanced Full Rate (EFR)
معدل النقل النصفي ..... ٢٣٨ ..... Half Rate (HR)
معدل خطأ البت ..... ٢٩ ..... Bit Error Rate (BER)
معدلات نقل (دفق) ..... ٢٠ ..... Data Rates
معطيات رُزَمِيَّة ..... ٢٠، ٢٠١ ..... Packet Data
معطيات رقمية ..... ١٥٤ ..... Data
معلومات تحكم ..... ١٤٦ ..... Control Information

معيار تخميد الاشارة ..... ١٩٨ ..... Path Loss Criterion
مُغَلَّفةً ..... ٣٧٢ ..... Encapsulated
مفتاح التعمية (التشفير) ..... ٢٧٨، ٣٣٣ ..... Ciphering Key (Kc)
مفتاح التَّوَثُّق ..... ٣٠٤، ٣٣١ ..... Authentication Key (Ki)
المفتاح الدولي ..... ٢٩٢ ..... Country Code (CC)
مفتاح الشبكة القطري ..... ٢٩٢ ..... National Destination Code (NDC)
مقبس الهاتف ..... ٢٩٦ ..... Socket
مُقتطع ..... ٧٩، ٢٠٧ ..... Segment
مقتطع كلامي ..... ٢٢١ ..... Speech Segment
المقسم ..... ٣٢٢ ..... Switching Center (Switch)
مقسم (مركز تبديل) ..... ٢٨٧ ..... Switching Center (Switch)
مقسم الولوج إلى الشبكة (بوابة الشبكة) ..... ٣٢٥ ..... Gateway MSC (GMSC)
مقسم عبور ..... ٣٢٣ ..... Transit Switch
مُقَوِّم تيار ..... ٣٠٨ ..... Rectifier
مكالمة صادرة ..... ٣٨٢، ٣٩٧ ..... Mobile Originating Call (MOC)
مكالمة واردة ..... ٣٩٠ ..... Mobile Terminating Call (MTC)
ملاءمة الدفق ..... ٣١٥ ..... Rate Adaptation
منافذ شريحة الاشتراك ..... ٣٠٣ ..... Input-Output Interfaces
منطقة توجيه الرزم ..... ٣٤٢ ..... Routing Area (RA)
منطقة خدمة الشبكة ..... ٣٤٢ ..... PLMN Service Area
منطقة خدمة المقسم ..... ٣٤٢ ..... MSC Service Area
منطقة خدمة سجل VLR ..... ٣٤٢ ..... VLR Service Area
منطقة وجود المشترك ..... ٣٣١ ..... Location Area
منطقة وجود المشترك (منطقة الوجود) ..... ٣٣٩، ٣٤٢ ..... Location Area (LA)
منظومة تشغيل وصيانة الشبكة ..... ٢٨٩ ..... Operation Support System (OSS)
موجِّه ..... ٢٠٧ ..... Router
موجه الرزم الرئيسي (موجه SGSN) ..... ٣٢٧ ..... Serving GPRS Support Node (SGSN)
موجه العبور (موجه GGSN) ..... ٣٢٨ ..... Gateway GPRS Support Node (GGSN)
مودم ..... ٣٠٩ ..... Modem
موسط (مُعامِل) ..... ٤٢ ..... Parameter
مؤشر ..... ٣٥٢ ..... Flag
مؤشر (علامة) استعارة (ضمن الرزمة الراديوية) ..... ١٥٥ ..... Stealing Flag
موقع المحطة الثابتة ..... ١٣، ٣٠٨ ..... Cell Site

مولد الضجيج الصنعي ..... ٢٤٣ ..... Comfort Noise Generator
ميِّزات (خدمات مميزة) ..... ٣٤٦ ..... Features
ميزة (خدمة) التجوال الدولي ..... ١٧، ٢٩٣ ..... International Roaming

ن

نبضة الترميز (المستخدمة لنثر الطيف) ..... ٥٣، ٥٤ ..... Chip
النثر الزمني ..... ١٠٨ ..... Time Dispersion
نثر الطيف ..... ٥٤، ٣٤٧ ..... Spread Spectrum Technique
نثر الطيف بالقفز الترددي ..... ٧١ ..... Frequency Hopping Spread Spectrum
النثر المباشِر للطيف ..... ٧١ ..... Direct Sequence Spread Spectrum
النثر أو الاتساع الطيفي (نثر دوبلر) ..... ١٢٥ ..... Frequency Dispersion (Doppler Spread)
نثر دوبلر (النثر أو الاتساع الطيفي) ..... ١٢٥ ..... Doppler Spread (Frequency Dispersion)
نسبة (قوة) إشارة الحامل إلى التشويش ..... ٣٠ ..... Carrier to Noise and Interference Ratio (CNIR)
نسبة الإشارة إلى التداخل ..... ٣٠ ..... Signal to Interference Ratio (SIR)
نسبة الإشارة إلى التشويش ..... ٢٩ ..... Signal to Noise and Interference Ratio (SNIR)
نسبة الإشارة إلى الضجيج ..... ٣٠ ..... Signal to Noise Ratio (SNR)
نطاق (قسم) تبديل الدارات (ضمن الشبكة) ..... ٢٨٨ ..... Circuit Switched Domain (CS-Domain)
نطاق (قسم) توجيه الرزم (ضمن الشبكة) ..... ٢٨٨ ..... Packet Switched Domain (PS-Domain)
نطاق الترابط (نطاق استقرار خصائص القناة) ..... ١١٩، ١٢٠ ..... Coherence Bandwidth
نطاق الترددات الراديوية (النطاق الراديوي) ..... ٣٠، ٣٤٧ ..... Radio Frequency Band (RF-Band)
النطاق الترددي الأساسي ..... ٣٠، ٢٧٩، ٣٤٧ ..... Baseband
النطاق الترددي للمسار الصاعد ..... ٣٨ ..... Uplink Band
النطاق الترددي للمسار الهابط ..... ٣٨ ..... Downlink Band
نطاق الحماية (العزل) ..... ٤٠ ..... Guard Band
نظام (إرسال واستقبال) ضيق النطاق ..... ١١٠ ..... Narrow Band System
نظام CDMA ذو النطاق العريض ..... ٥٢ ..... Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA)
نظام GSM الأساسي ..... ١٩ ..... Primary GSM (P-GSM)
نظام GSM الموسع ..... ١٩ ..... Extended GSM (E-GSM)
نظام التشوير رقم 7 ..... ٣٦٤ ..... Signaling System Nr. 7 (SS7)

نظام الفوترة ..... ٣٢١، ٣٢٣ ..... Billing System
نظام محدود السعة بسبب التشويش ..... ٦٧ ..... Interference Limited Systems
نظام محدود السعة بسبب عرض النطاق المتاح ..... ٦٧ ..... Bandwidth Limited Systems
النفاذ المتعدد باستخدام الحوامل المتعامدة ..... ٨٣ ..... Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)
النفاذ المتعدد (تعدد النفاذ) باقتسام التردد ..... ٣٩ ..... Frequency Division Multiple Access (FDMA)
النفاذ المتعدد (تعدد النفاذ) باقتسام الزمن ..... ٤٦ ..... Time Division Multiple Access (TDMA)
النفاذ المتعدد (تعدد النفاذ) بتمييز متتاليات الترميز ..... ٥٢، ٥٤ ..... Code Division Multiple Access (CDMA)
نقطة تشوير ..... ٣٦٧ ..... Signaling Point (SP)
نقطة ربط بيني ..... ٢٨٥ ..... Reference Point
نقطة عبور (إلى الشبكة) ..... ٣٦٧ ..... Gateway
نقل ..... ٢٨٨ ..... Transport
النمط الحِلَقي لربط المحطات الثابتة ..... ٣١٣ ..... Loop Configuration
النمط المتفرّع لربط المحطات الثابتة ..... ٣١٤ ..... Tree Configuration
نمط النثر الزمني للاستطاعة (تابع النثر الزمني) ..... ١٠٩ ..... Power Delay Profile
النمط النجمي لربط المحطات الثابتة ..... ٣١٣ ..... Star Configuration
نمط تعدد شغل الأحياز الزمنية ..... ٢٠٣ ..... Multislot Class
نمط توزيع القنوات الاعتبارية على القنوات الفيزيائية ..... ١٧٢ ..... Channel Combination
نمط ربط المحطات الثابتة على التسلسل ..... ٣١٣ ..... Chain Configuration
نموذج المنبع والمرشح لتوليد الإشارة ..... ٢٢٧ ..... Source Filter Model
نموذج تسويقي ..... ٣٤٦ ..... Model Type

هـ

هامش الخفوت ..... ٩٨ ..... Fade Margin
هامش إجراء التسليم ..... ٤١٣ ..... Handover Margin
الهواتف الذكية ..... ٣٠٢ ..... Smart Phones
هوائي ذو ربح ثابت (في كل الاتجاهات) ..... ١١ ..... Omnidirectional Antenna
هوائي مُوجَّه ..... ١٢ ..... Directional Antennas
هوية (رقم الخلية) ..... ٣٤١ ..... Cell Identity (CI)
هوية الجهاز المستخدَم ..... ٢٩٤ ..... International Mobile Equipment Identity (IMEI)

هوية الشبكة ..... ١٦٤ ..... Network Color Code (NCC)
هوية المشترك (الدولية) ..... ٢٨٩ ..... International Mobile Subscriber Identity (IMSI)
هوية المشترك القطرية ..... ٢٩١ ..... National Mobile Subscriber Identity (NMSI)
هوية المشترك المؤقتة ..... ٢٩١ ..... Temporary Mobile Subscriber Identity (TMSI)
هوية المشترك المؤقتة الخاصة بتبادل المعطيات الرزمية ..... ٢٩٢ ..... Packet Data -TMSI (P-TMSI)
هوية المشترك ضمن الشبكة ..... ٢٩١ ..... Mobile Subscriber Identity Number (MSIN)

و

وتيرة (أو معدل) دفق المعلومات ..... ٥٥ ..... Throughput
وحدات التحكم بمنافذ الدخل والخرج ..... ٣٢٣ ..... Interface Cards (Boards)
وحدات برمجية ..... ٣٠٣ ..... Software Modules
وحدات رسائل التشوير ..... ٣٧٢ ..... Message Signaling Unit (MSU)
وحدة (نمط) تكرار الخلايا ..... ١٤، ١٥ ..... Cluster
وحدة إرسال واستقبال ..... ٣٠٦ ..... Carrier Unit (CU)
وحدة إرسال واستقبال ..... ٣٠٦ ..... Transmit-Receive Unit (TRU)
وحدة التحكم بالرزم ..... ٣٢١ ..... Packet Control Unit (PCU)
وحدة التحكم بالمحطات الثابتة ..... ٣٠٥، ٣١٠ ..... Base Station Controller (BSC)
وحدة التحكم بالمحطات الثابتة (نظام UMTS) ..... ٣٠٥، ٣١٠ ..... Radio Network Controller (RNC)
وحدة التشبيك (شبكة الربط) ..... ٣٢٣ ..... Switching Network
وحدة التنسيق المركزية ..... ٣٢٤ ..... Central Command Unit
وحدة المعلومات (ضمن رسائل الطبقة الثالثة) ..... ١٨٣، ٣٥١ ..... Information Element (IE)
وحدة الملائمة مع الشبكة الثابتة ..... ٣٢٤ ..... Interworking Function (IWF)
وحدة تحكم بدفق الرزم ..... ٣١٢ ..... Packet Control Unit (PCU)
وحدة تحكم مشتركة (ضمن المحطة الثابتة) ..... ٣٦٠ ..... Base Control Function (BCF)
وَحدة تشوير (رسالة تشوير) ..... ٣٧٢ ..... Signaling Unit (SU)
وحدة طرفية ..... ٣٦٠ ..... Terminal Equipment (TE)
وحدة فك الترميز وملاءمة الدفق (وحدة الملاءمة) ..... ٣١٤ ..... Transcoding and Rate Adaptation Unit (TRAU)

وحدة متحركة ..... ٢، ٢٨٧، ٢٩٨ ..... Mobile Station (MS)
وحدة متحركة (نظام UMTS) ..... ٢٨٧، ٢٩٨ ..... User Equipment (UE)
وحدة معطيات بروتوكولية ..... ٢٠٧ ..... Protocol Data Unit (PDU)
وحدة نقل راديوي (لتبادل المعطيات الرزمية) ..... ٢٠٨ ..... RLC-Block