مسوي GSM مرن لنوعية خدمة محددة من قبل المستثمر، بالاعتماد على نظام الاتصالات اللاسلكية المحددة برمجياً[1]

المهندس ياسر جعمور[2] الأستاذ الدكتور محمد سعيد الصفدي[3]

الملخص

بدأت نظم الاتصالات النقالة المرنة والمعتمدة على منهجية الاتصالات اللاسلكية المحددة برمجياً (Software Defined Radio, SDR) باتخاذ طريقها جدياً نحو التحقيق العملي، حيث تشكل الاتصالات النقالة- والمتنامية بشكل سريع- أقوى الدوافع للاهتمام الواسع بالاتصالات اللاسلكية المحددة برمجياً. هذا الجيل من الاتصالات الذي سيتيح تحقيق وإنشاء نظم الاتصالات اللاسلكية القابلة لإعادة التشكيل (Reconfigurable)، والقادرة على الاستجابة لمتطلبات نوعية الخدمة المحددة من قبل المستثمر، والمهمة جداً لإرضاء المستثمر في إطار توسيع الخدمات اللاسلكية وتخفيض تكلفتها.

ما برح النظام العالمي للاتصالات النقالة GSM يعم أسواق الاتصالات النقالة حول العالم. يستخدم هذا النظام المسوي المتكيف (adaptive equalizer) لإزالة تأثيرات الخفوت (fading) على قناة الاتصال اللاسلكية. نستخدم في هذه المقالة مبدأ الاتصالات اللاسلكية المحددة برمجياً لتصميم مسوي GSM مرن ذي معاملات متغيرة، بحسب ظروف القناة ومستوى نوعية الخدمة المحددة من المستثمر.

[1] أعد البحث في سياق رسالة الدكتوراه للمهندس ياسر جعمور بإشراف الأستاذ الدكتور محمد سعيد الصفدي.

[2] قسم الهندسة الالكترونية والاتصالات- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة دمشق.

[3] أستاذ- قسم الهندسة الالكترونية والاتصالات- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة دمشق.

نقدم في بداية هذه المقالة تمهيداً عن نظام الاتصـالات اللاسـلكية المحـددة برمجيـاً، ثـم نستعرض في الفقرة الثانية - وبشكل سريع - أهم خصائص نظام GSM وسبل رفـع نوعيـة الخدمة فيه. وبعد تعرف موجز على أهم تأثيرات الخفوت في الفقرة الثالثة، نقوم في الفقرة الرابعة بتحليل الخوارزمية المستخدمة لأداء وظائف التسوية فـي GSM . ونعتمـد فـي الفقرتين الخامسة والسادسة على نتائج المحاكاة في التصنيف الفعال لمعـاملات المسـوي، والمتغيرة بحسب مستوى نوعية الخدمة المحدد من المستثمر. حيث نبين أهمية ذلـك فـي الاستخدام الأمثل لموارد الكيان الصلب المخصصة لأداء وظائف معالجة الإشـارة الرقميـة، وفي التخفيض في الاستطاعة المستهلكة اللازمة لهذه الوظائف.

كلمات مفتاحية: نظام الاتصالات اللاسلكية المحددة برمجياً (SDR)، نوعية الخدمـة (QoS) المحددة من المستثمر، النظام العالمي للاتصالات النقالة (GSM)، خوارزمية Viterbi ذات الخرج اللين (SOVA)، المسوي المرن.

جدول بالمختصرات المستخدمة وترجمتها بحسب تسلسل ورودها في المقالة

SDR	Software Defined Radio	الاتصالات اللاسلكية المحددة برمجياً
QoS	Quality of Service	نوعية الخدمة
GSM	Global System for Mobile Communications	النظام العالمي للاتصالات النقالة
IS-95	Interim Standard 95	المعيار الانتقالي 95
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	النظام الشامل للاتصالات النقالة
DSP	Digital Signal Processor	معالج الإشارة الرقمية
FPGA	Field Programmable Gate Array	مصفوفة البوابات المبرمجة حقلياً
TDMA	Time Division Multiple Access	النفاذ المتعدد بتقسيم الزمن
RPE-LTP	Regular Pulse Excited-Long Term Prediction	التنبؤ طويل الأمد بتحريض النبضة المنتظمة
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying	الإقفال بالإزاحة الأصغرية الغوصية
ISI	Inter Symbol Interference	التداخل فيما بين الرموز
HSCSD	High-Speed Circuit-Switched Data	المعطيات بتبديل الدارة، عالية السرعة
GPRS	General Packet Radio Services	الخدمات الاتصال اللاسلكي بالرزمة العامة
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution	معدلات المعطيات المعززة للتحول العالمي
BER	Bit Error Rate	معدل خطأ البت
DFE	Decision Feedback Equalization	التسوية بالتغذية الخلفية للقرار
NDDE	Non-linear Data Directed Estimation	التقدير اللاخطي بحسب المعطيات
MLSE	Maximum Likelihood Sequence Estimation	تقدير التسلسل بالأرجحية العظمى
SOVA	Soft Output Viterbi Algorithm	خوارزمية Viterbi ذات الخرج اللين
BM	Branch Metric	معامل الفرع
PM	Path Metric	معامل المسار
SNR	Signal to Noise Ratio	نسبة الإشارة للضجيج
AWGN	Additive White Gaussian Noise	الضجيج الغوصي الأبيض الجمعي
BPSK	Binary Phase Shift Keying	الإقفال بالإزاحة الثنائية للطور

1- مقدمة

تشهد مخابر البحث والتطوير حول العالم تحولاً جذرياً في هندسة نظـم الاتصـالات اللاسلكية؛ يتمثل هذا التحول في الانتقال إلى مفهوم استقلالية المواصفات والخصائص والإمكانيات والخدمات في نظام الاتصال اللاسلكي عن مواصفات وإمكانيات الكيـان الصلب الذي يعتمد عليه بناء هذا النظام، تتحقق هذه الاستقلالية عن طريـق إمكانيـة إعادة برمجة النظام، بهدف تغيير مواصفاته والخدمات التي يؤمنها.

ويكمن وراء هذا التحول الرئيسي والمهم دافع قوي، يتجلى في ذلك التسارع الكبير في تطور نظم الاتصالات اللاسلكية النقالة خلال العقدين الأخيرين. حيث يتزايد تعقيد بنى هذه النظم مع كل جيل من أجيال معايير الاتصالات النقالة، وذلك كي تؤمن هذه النظم الاستجابة اللازمة للضغوطات من الأسواق الاقتصادية ذات المنافسات الشديدة، تتركز هذه الضغوطات على زيادة الطلب على رفع فعالية هذه الخدمة ونوعيتها مع تخفيض التكاليف. مع تحقق الشرط الأساسي الذي يدعم هذا التطور وهو التقدم فـي التقانـات التمكينية (enabling technologies)، حيث وصلت الحدود الفيزيائيـة حاليـاً إلـى 0.35 nm.

يتطلب نقل هذه المفاهيم إلى أرض الواقع العملي نظاماً قوياً ومفتوحاً، يصمم النظـام المفتوح بتقسيم الوظائف المطلوبة وتحديد التوافقات فيما بينها بشكل معياري ومفتـوح عبر المحافل العامة، ومن ثم تنقل إلى الواقع العملي بالاعتماد على العناصر المتاحـة تجارياً، وذلك مع المحافظة -بأفضل ما يمكن- على قوة النظام التي تتمثل في سهولة تطويره وتنفيذه.

من هنا نضج مفهوم الاتصالات اللاسلكية المحـددة برمجيـاً (Software Defined Radio SDR) كحل عملي لكل ما هو مطلوب، حيث يتم تنفيذ وظائف الاتصال بجهاز قابل لإعادة التشكيل للتوافق مع مختلف محددات ومعايير الاتصال اللاسلكي الممكنة، وذلك اعتماداً على بنى المعالجة الرقمية للإشارة والقابلة لإعـادة التشـكيل برمجيـاً (software reconfigurable) [1,2].

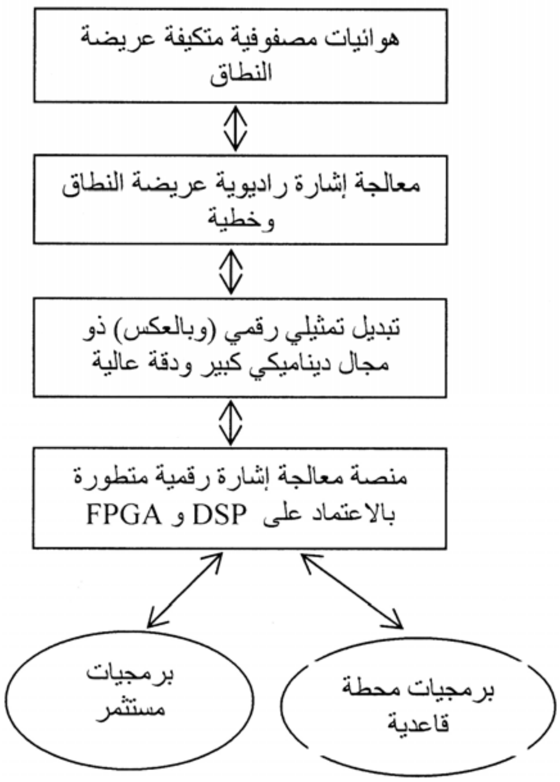
ويأتي في مقدمة متطلبات تطوير الأجيال القادمة من الاتصالات اللاسلكية النقالة من حيث الأهمية، الاستخدام الأمثلي والفعال للطيف الترددي المتاح، والإدارة المتكيفة للموارد التقانية وبنى الكيان الصلب، ونوعية الخدمة المتكيفة حسب طلب المستثمر، فضلاً عن التخفيض في التكلفة. تعد نظم الاتصالات اللاسلكية المحددة برمجياً أفضل بيئة تطوير مناسبة لتحقيق هذه المتطلبات.

وبذلك تُعرف نظم الاتصالات اللاسلكية المحددة برمجياً بأنها (مجموعة من التقنيات قيد التطوير، سيتم بواسطتها بناء نظم اتصال لاسلكية مرنة، هذه النظم المرنة هي متعددة الخدمات والمعايير والنطاقات الترددية وقابلة لإعادة التشكيل برمجياً، وذلك كي تعمل ضمن بيئة اتصال أمثلية يمكن للمستثمر من خلالها أن يجري الاتصال في أي مكان وفي أي وقت، باستخدام أفضل الموارد المتاحة بأقل تكلفة، مع تأمين سرعة نقل معطيات حسب الطلب ووثوقية عالية) [3].

تعد خاصية المرونة من أهم مميزات هذه النظم، وهي التي تجعلها قابلة للاستجابة لكثير من المتغيرات في متطلبات وخصائص نظم الاتصال النقالة. يأتي في مقدمة هذه المتغيرات تلبية تحقيق نوعية الخدمة المحددة من قبل المستثمر (user defined quality of service QoS)، وملاحقة التغير في ظروف قناة الانتشار اللاسلكية، والقابلية لتغيير معيار نظام الاتصال (GSM, IS-95, UMTS…)، وتغيير النطاق الترددي (frequency band)، كل ذلك على حساب زيادة مطردة في كثافة وتعقيد عمليات المعالجة الرقمية للإشارة.

يبين الشكل (1) مخططاً صندوقياً أساسياً لنظام الاتصال اللاسلكي المحدد برمجياً، والذي يبين مجالات البحث الرئيسية اللازمة لتطوير هذه النظم، حيث يحتاج تطوير هذه النظم أيضاً إلى تقانات متطورة تلبي تعقيد (complexity) المعالجة الكثيفة المطلوبة [4]، وذلك على مستوى كل من مراحل: الهوائيات، ومعالجة الإشارة الراديوية، والتبديل التمثيلي الرقمي (وبالعكس)، والبرمجيات، والمعالجة الرقمية للإشارة.

إن خصائص هذه النظم كلّها تنعكس على مراحل المعالجة الرقمية للإشـارة، حيـث تصب التطبيقات المطلوبة كلّها في هذه النظم في بنية متطورة لمعالجة الإشارة تعتمـد على كل من: معالِجـات الإشـارة الرقميـة (Digital Signal Processors DSP's)، ومصـفوفات البوابـات المبرمجـة حقليـاً (Field Programmable Gate Arrays FPGA's)، وذلك لتحقيق المرونة المطلوبة المتمثلة في القابلية لإعادة التشكيل برمجياً [5].



بينا في بحث سابق [6]، أن هناك مجموعة من الاعتبارات يجب أن تتحقق لدى تصميم هذه النظم. تؤمن هذه الاعتبارات أهم الخصائص المتمثلة في الإدارة المتكيفة للموارد الطيفية والحسابية. أهم هذه الاعتبارات هي: الاعتماد بشكل رئيسـي علـى التقسـيم الفعال لعمليات المعالجة الرقمية مابين (DSP) و (FPGA)، وتوفير مـا أمكـن مـن الكيان الصلب. حيث يستحسن أن يقوم الكيان القابل لإعادة التشـكيل بالوظـائف ذات التعقيد العالي، مع الأخذ بالحسبان موارده الأساسية وهـي: زمـن المعالجـة (مـع المحافظة على فائض فيه) والذاكرة. هذه الاعتبارات تمثل أهم متطلبات الاتصـالات النقالة، وذلك من حيث تأمين الخدمة المتغيرة حسب طلب المستثمر، مع صغر حجـم الجهاز ووزنه، وانخفاض تكلفة الخدمة.

تعد نظام الاتصال اللاسلكية التعرفية (cognitive radios) [7] من الأشـكال المهمـة والمطروحة بقوة كأحد تطبيقات النظم اللاسلكية المحددة برمجياً، والتـي يقـوم فيهـا جهاز الاتصال بجمع المعلومات من ثلاثة أطراف، وهي: الشبكة، والكيـان الصـلب للجهاز النقال، والمستثمر. وذلك كي تنفذ الوظائف المطلوبة بـأكبر فعاليـة ممكنـة. يجرى ذلك بالتعرف أولاً على كل من: معيـار الاتصـال، والعناصـر المتـوافرة، والوحدات البرمجية، والشبكات القائمة، وحاجات المستثمر. واعتماداً على ذلـك يـتم تحديد طرائق التنفيذ. من الأمثلة المهمة على ذلك معرفة حالة المسـوي (equalizer) ومراقبتها بشكل دائم، إذْ إن هناك جزءاً لا يستهان به من حالات نظام الاتصال التـي تكون فيها القناة جيدة وتعدد المسارات قليلٌ، ومن ثَم هناك فائض في نسـبة الإشـارة للضجيج لا حاجة لها لتأمين الاتصال المطلوب، وهذا يعني أنه لا حاجة للأداء الكامل من المسوي، لأنه سيكون هناك ضياع في سعة وقدرة معالجة متاحة في الجهاز يمكن الاستفادة منها بشكل أفضل. مثل: إتاحة زيادة في عرض المجال لقناة الاتصـال، أو التوفير في استهلاك الطاقة إذا لم يكن هناك حاجة لدى المستثمر للزيادة في عـرض المجال.

نبين فيما يأتي تطبيق كل ما سبق في وضـع تصـميم لمسـو متكيـف (adaptive equalizer) في نظام الاتصالات النقالة GSM، يعتمد على عدة مستويات من المعالجة بحسب كل من: متغيرات قناة الانتشار، ومستوى الخدمة المطلوب من المستثمر. حيث يعد تحقيق المرونة في الخدمة ومستوياتها-بحسب حاجة المستثمر وقناعاته-من أهـم المتطلبات في تطوير نظم الاتصالات النقالة. ويشكل مفهوم نظم الاتصالات اللاسلكية المحددة برمجياً البيئة الأمثلية لتحقيق المرونة المطلوبة، وذلك بالاعتماد علـى أهـم

خاصية لهذه النظم، وهي القابلية لإعادة التشكيل برمجياً (Software Reconfigurability).

2- أهم خصائص نظام الاتصالات النقالة GSM وسبل رفع نوعية الخدمة فيه

أدى التسارع الكبير في نمو قطاع الاتصالات عبر العالم خلال السنوات الأخيرة إلى اعتبار الاتصالات اللاسلكية كأسرع القطاعات تطوراً في عالم الاتصالات، حيث سيطر النظام العالمي للاتصالات النقالة Global System for Mobile communications (GSM) على معظم الأسواق حول العالم. وما تزال أعداد المستثمرين لهذا النظام في تزايد مستمر، مع المطالبة بالمزيد من الخدمات، والتي أهم ما هو مطلوب فيها أنها نقالة. يبين الجدول (1) أهم المواصفات المعيارية لهذا النظام.

النطاق الترددي (MHz)	**DownLink: 869-894 UpLink: 824-849 DownLink: 935-960 UpLink: 890-915 DownLink: 1805-1880 UpLink: 1710-1785 DownLink: 1930-1990 UpLink: 1850-1910**
تقنية النفاذ المتعدد	**TDMA/FDMA**
عدد الأقنية على كل حامل	**8 (16 half rate)**
تباعد الأقنية (MHz)	**0.2**
نمط التعديل	**GMSK (BT=0.3)**
معدل المعطيات	**270.833 Kb/s**
عدد الأقنية الراديوية	**124/374**
معدل معطيات مرمز الصوت (kb/s)	**13/RPE-LTP**
تصحيح الخطأ	**موجود**
معدل المعطيات الكلي للمشترك (kb/s)	**22.8**
زمن الإطار الواحد(ms)	**4.6**
متوسط استطاعة الإرسال في الجهاز النقال (W)	**2.5…0.03**
التحكم بالاستطاعة في الجهاز النقال والمحطة	**موجود**
نسبة الإشارة إلى التداخل (dB)	**9**
المسوي	**مطلوب**

الجدول (1): أهم المواصفات المعيارية للنظام GSM [15]

أهم ما يميز نظام GSM أنه فعال طيفياً، مع تأمين نوعية اتصـال عاليـة وتشـكيلة خدمات متنوعة لنقل الصوت والمعطيات الرقمية، وذلك ضمن خلايا ذات أقطار تصل حتى 35 كم، مع القابلية للتجوال العالمي international roaming. يعتمد النظام على تقنية النفاذ المتعدد بتقسيم الزمن TDMA إلى ثماني فتحات زمنية تخصص لثمـاني أقنية فيزيائية منفصلة، وذلك لحمل تركيبة من الأقنيـة المنطقيـة المسـتخدمة لنقـل معطيات اتصال المشتركين ومعطيات عمل النظام. تؤمن كل قناة فيزيائية معدل نقـل معطيات كلي 271 kb/s لثمانية مشتركين بمعدل 22.8 kb/s لكل مشترك، يضاف إليها مجموعة مؤلفة من 14 قناة تحكم وتشوير signaling لتـأمين أداء النظـام بالشـكل المطلوب. كما أن هناك مرونة في تحديد سعة النظام، حيث يعتمد ذلك على العديد من المتغيرات، من أهمها: تشكيل الخلية بحسب المنطقة (منطقة سكنية، منطقة صـناعية، أوتوستراد سفر...)، عدد المكالمات الواردة في واحدة الزمن، مدة المكالمة المتاحـة، زمن طلب المكالمة المتاح (زمن الرنين لدى الطرف المطلوب)، احتمال عدم تخـديم المكالمات (2% مثلاً)، حركية المستثمرين (نسبة عمليات تحديث الموقـع)...، حيـث يقوم المشغل (operator) في أغلب الأحيان بتحديد هذه المتغيرات لتأمين أداء معـين للنظام في زمن معين.

يتم ترميز الصوت باستخدام خوارزمية التنبؤ طويل الأمد بتحريض النبضة المنتظمـة Regular pulse excited-long term prediction, RPE-LTP التي تـؤمن نوعيـة صوت عالية بمعدل 13 kb/s ، فضلاً عن سهولة نسبية في تنفيذها. يضاف إلى ذلـك تركيبة مناسبة لتصحيح الخطأ مؤلفة من مستويين: تصـحيح الخطـأ الكتلـي Block، وتصحيح الخطأ الالتفافي Convolutional. مع استخدام الإقحام بينـي interleaving لمقاومة الضجيج الرشقي على قناة الاتصال [8].

يعتمد نظام GSM على تقنية التعديل الإقفال بالإزاحة الأصغرية الغوصـية GMSK، وهي من تقنيات التعديل مستمرة الصفحة وثابتة الغلاف، ومن ثَم فهي تمتاز بفعاليـة

طيفية جيدة. إذْ كلما ازدادت حدة تغيرات الصفحة تحسنت الفعالية الطيفية، ولكن على حساب زيادة التداخل فيما بين الرموز (Inter Symbol Interference ISI)، فضلاً عن أن قناة الاتصال تسبب هذا النوع من التداخل نفسه. ومن هنا، حدد المعيار العالمي لهذا النظام ضرورة استخدام المسوي المتكيف في النظام للتغلب على التداخل فيما بين الرموز، والذي ينشأ عن سببين: تقنية التعديل المستخدمة، وقناة الانتشار.

يبين الشكل (2) المخطط الصندوقي الأساسي لجهاز GSM .

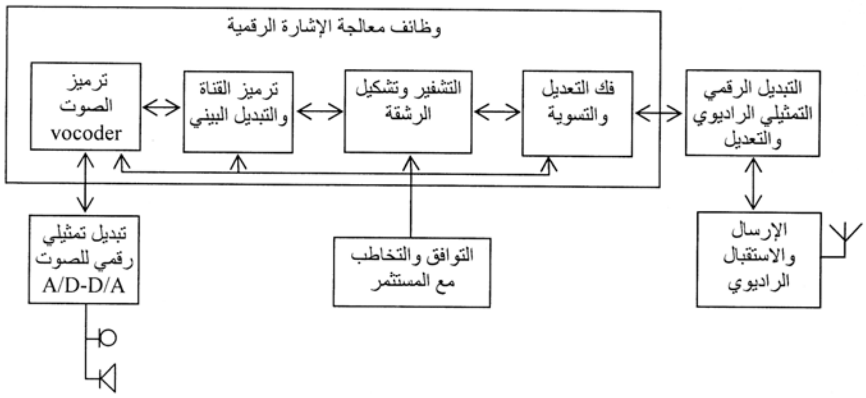
تركز تطوير المعيار GSM من خلال 2.5G وبشكل كبير على زيادة خدمات نقل المعطيات للمشتركين والتحسين في نوعيتها. حيث برزت المحدودية في معدل نقل المعطيات المتاح للمشترك (9.6 kbps أو 14.4 kbps تم تثبيتها لاحقاً في المعيار الأساسي) كثغرة واضحة في خدمات GSM. ولذلك تم التحديث على شكل عدد من الخدمات التي تؤمن معدلات معطيات أعلى للمشتركين. أشهر هذه الخدمات التي ظهرت في 2.5G هي [9]:

1- المعطيات بتبديل الدارة، عالية السرعة (High-Speed Circuit-Switched Data HSCSD): وتعتمد على زيادة معدل نقل المعطيات المتاح للمشترك بتخصيص أكثر من فتحة زمنية لهذا المشترك في النظام (أربع فتحات زمنية كحد أقصى في التطبيقات الحالية). إلا أن هذه التقنية تسبب تفريطاً في الموارد المخصصة للنظام (يتم تخصيص عدد من الفتحات الزمنية للمشترك بشكل مستمر حتى ولو لم يكن هناك نقل للمعطيات). ولكن تتميز هذه الخدمة في مجال نقل المعطيات بالزمن الحقيقي، حيث تتم المحافظة على أخفض ما يمكن من التأخيرات الزمنية في النظام ككل.

2- خدمات الاتصال اللاسلكي بالرزمة العامة (General Packet Radio Services GPRS): وتعتمد على أسلوب الخدمة السابقة نفسه في زيادة معدل المعطيات، ولكن بتخصيص عدد أكبر من الفتحات الزمنية (ثماني فتحات زمنية تؤمن معدل نقل معطيات يبلغ 115 kbps). يتم التغلب على سلبية انخفاض فعالية استخدام الموارد

المخصصة للنظام باعتماد أسلوب تبديل الرزمة (packet switching). ومن ثـم، لا تحجز الفتحات الزمنية إلا عند وجود معطيات جاهزة يجب نقلها. إلا أن هذه التقنية لا تضمن تخفيض التأخيرات الزمنية، أي أنها غير مناسبة لتطبيقات الـزمن الحقيقـي. ولكنها تميزت عملياً في نقل المعطيات رشقياً، وقد لاقت نجاحاً من الناحيـة العمليـة وإقبالاً عليها من المستثمرين بشكل أكبر من التقنية السابقة.

3- معدلات المعطيات المعـززة للتحـول العـالمي (Enhanced Data Rates for Global Evolution EDGE): وتعتمد على زيادة معدل نقـل المعطيـات باسـتخدام التعديل بالإقفال بالإزاحة الثمانية للطور (8PSK). تؤمن طريقة التعديل هذه زيادة في معدل نقل المعطيات بمقدار ثلاث مرات بالمقارنة مع المعيار GSM. إلا أن مجمـل خصائص هذا النوع من التعديل يجعله مناسباً من أجل المسافات القصيرة في الـنظم الحالية القائمة (لا تزال تقنية التعديل GMSK أفضل من أجل المسافات الكبيرة).



كنا قد بينا في بحث سابق [10]، أن تطوير أداء هذا النظام ورفع نوعية الخدمـة فيـه (QoS) يتمثل بشكل رئيسي في الاتجاهين الأساسيين الآتيين:

2-1- قابلية التشغيل المتبادل لهذا النظام (interoperability) مع نظم اتصـال نقالـة أخرى، مثل نظم الجيل الثالث من الاتصالات النقالة، وذلك للانتشار الكبير لهذا النظام

(GSM) حول العالم، مع الحاجة إلى مرحلة انتقالية نحو الجيل الثالث. حيث ستكون هناك ضرورة خلال هذه المرحلة الانتقالية لاستمرار الاعتماد على GSM.

2-2- إتاحة نوعية الخدمة المتغيرة حسب طلب المستثمر، وذلك بربط أحد مقاييس أداء النظام-مثل معدل خطأ البت (BER)-مع مستوى الخدمة المطلوب من المستثمر. فمثلاً: في الاتصال الكلامي يكون معدل خطأ البت المقبول هو $BER=10^{-4}$ (بحسب خوارزمية ترميز الصوت المستخدمة)، في حين تعد هذه النسبة غير مقبولة في الاتصال المرئي، ومن ثم يجب أن يكون النظام مرناً ليؤمن عدة مستويات خدمة للمستثمر، فضلاً عن ملاحقة التغيرات في الخفوت (fading) على قناة الاتصال.

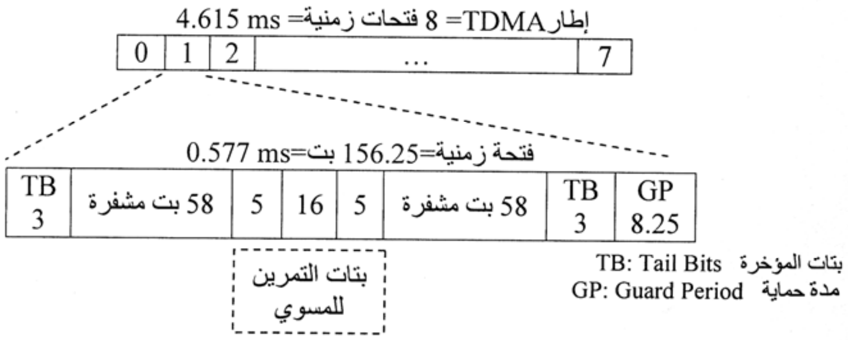
3- الخفوت على قناة الاتصال النقالة في نظام GSM

تسبب قناة الانتشار اللاسلكية النقالة تأثيرات خفوت عديدة. تؤدي هذه التأثيرات إلى تدهور في نوعية الاتصال [11]. يظهر الخفوت انتقائي التردد (frequency selective fading) عندما يكون زمن التأخير الأعظمي في القناة أكبر من زمن الرمز الواحد (maximum excess delay > symbol time)، وفي هذه الحالة تمتد مركبات تعدد المسار للرمز الواحد على مجال أكبر من زمن الرمز الواحد، وهذا ما يسبب التداخل البيني فيما بين الرموز ISI الناتج عن القناة، في حين يظهر الخفوت السريع (fast fading) عندما يكون زمن تماسك القناة أقل من زمن الرمز الواحد (channel coherence time < symbol time)، وفي هذه الحالة يتغير الخفوت على القناة عدة مرات خلال زمن انتشار الرمز الواحد.

يتم في نظام GSM التغلب على تأثيرات الخفوت السريع من خلال تحديد زمن الرمز وتصميم الفتحة الزمنية (time slot) المخصصة لكل مشترك-الشكل (3)، بحيث لا يتجاوز زمن الفتحة الزمنية زمن تماسك القناة في أسوأ الأحوال (مستثمر يجري اتصالاً على متن قطار يسير بسرعة تصل حتى 200كم/سا). ومن ثَم يمكن اعتبار أنه لا وجود للخفوت السريع في قناة الاتصال GSM، ولكن لا بد من التغلب على ISI

الذي يسببه الخفوت انتقائي التردد فضلاً عن ISI الذي يسببه نوع التعديل المستخدم، وذلك باستخدام المسوي المتكيف [11].

يقوم المسوي المطلوب بتجميع الاستطاعة المتناثرة لرمز ما وإعادتها إلى المرحلة الزمنية الخاصة بهذا الرمز، وعلى المسوي أن يتكيف ويلاحق الطبيعة المتغيرة لقناة الاتصال.



الشكل (٣): بنية الفتحة الزمنية في نظام GSM

4- خوارزمية التسوية المستخدمة في GSM

لم يحدد المعيار العالمي لنظام GSM خوارزمية معينة لتنفيذ المسوي، إلا أنه نص على ضرورة استخدام المسوي، وذلك للتغلب على مستوى من التداخل البيني للرموز ISI يمتد تأثيره عبر أربعة رموز على الأكثر [8]، ولذلك تستمر عملية تطوير المسوي للوصول إلى أفضل تركيبة. وذلك من حيث الموازنة التفضيلية ما بين: تحسين الأداء (performance)، وتخفيض التعقيد في التنفيذ.

ومن أهم الأمثلة على الخوارزميات المقترحة في هذا المجال: استخدام التسوية بالتغذية الخلفية للقرار (Decision Feedback Equalization DFE) [12].يتميز المسوي المنفذ وفق هذه الخوارزمية بالتغلب على تأثيرات الخفوت العميق، وبأداء جيد في مقاومة التداخل البيني للرموز، فضلاً عن مقاومته للتداخل، ينشأ هذا التداخل عن كل

من: التردد الراديوي المجاور ضمن الخلية نفسها، واستخدام التردد الراديوي نفسها في خلية أخرى (بعيدة ولكن يحصل تداخل في بعض الأحيان). يرتبط تعقيد الحسابات في هذه الخوارزمية مع عدد الرموز المراد كشفها، لأن هذه الخوارزمية تلاحق تغيرات القناة على مستوى الرمز الواحد. في حين أنه في نظام GSM يتم إجراء التسوية على مستوى الفتحة الزمنية، والتي يخصص في منتصفها عدد من البتات لإجراء عملية تقدير القناة (channel estimation)-الشكل (3). بسبب ذلك فإن هذه الخوارزمية تعد غير فعالة نسبياً من أجل نظام GSM.

كما اقترحت خوارزمية التقدير اللاخطي بحسب المعطيات[12] (non-linear data directed estimation NDDE). تستخدم هذه الخوارزمية أساساً في الاتصالات اللاسلكية بمجال التردد العالي HF. وتعتمد على مبدأ التسوية على مستوى كتل المعطيات بطول 5-30 رمزاً لكل كتلة. ونظراً لأن طول الفتحة الزمنية في GSM - والتي يتم إجراء التسوية عليها-يبلغ 148 رمزاً، فإن تعقيد الحسابات في هذه الخوارزمية من أجل هذا الطول (من مستوى مقلوب مصفوفة) يجعلها غير مناسبة للاستخدام في GSM، لأن التحسين في الأداء الذي تؤمنه لا يتجاوز 1-2 dB عند نسبة إشارة للضجيج 10 dB، وذلك بالمقارنة مع طريقة تسوية أخرى شائعة بالاعتماد على تقنية تقدير التسلسل بالأرجحية العظمى (Maximum Likelihood Sequence Estimation MLSE)، والتي تعد حتى الآن الأنسب والأكثر فعالية للاستخدام في GSM.

ما تزال خوارزمية Viterbi ذات الخرج اللين (Soft Output Viterbi Algorithm SOVA) [13] هي الأنسب حتى الآن لتنفيذ تقنية التسوية MLSE في نظام GSM. تسيطر SOVA بشكل كبير على الاستخدام في GSM. وذلك بسبب السهولة النسبية في تنفيذها وأدائها الجيد. وتعتمد على فكرة استخدام خوارزمية Viterbi التقليدية (والمعروفة) مع إضافة حسابات حالة القناة خلال الفتحة الزمنية التي تتم معالجتها،

حالة القناة هذه يتم تقديرها من خلال بتات التمرين المتوضعة في منتصف تشكيلة الفتحة الزمنية للمشترك-الشكل (3).

يتم في خوارزمية SOVA تمثيل المعطيات المراد معالجتها بشكلها الرقمي المكمم (quantized) ، حيث يتم التعامل مع المعطيات بقيمها اللينة (soft values) بعد تكميمها وتمثيلها بعدة بتات معالجة لكل بت في تسلسل المعطيات المراد معالجتها، كما تعطى نتيجة المعالجة على شكل قرار لين (soft decision). يتم الحصول بهذه الطريقة على تحسين يتراوح (بشكل عام) ما بين 1-4 dB في Eb/No من أجل BER معينة مطلوبة، وذلك بالمقارنة مع الطريقة التقليدية في إعطاء نتيجة المعالجة على شكل قرار صلب (إما 0 أو 1) (hard decision) (حيث يتم تمثيل كل قيمة على شكل بت واحد).

يؤمن أسلوب القرار اللين في المعالجة المزيد من المعلومات عن المعطيات المراد معالجتها رقمياً، وتعد معلومات القرار اللين المستخدمة في عمليات معالجة الإشارة-فضلاً عن القرار الصلب (hard decision)-مقياساً للثقة (measure of confidence). يعبر بهذا المقياس عن مدى التأكد من قيمة الرمز الذي تتم معالجته.

ويرتبط مقدار التحسين الذي يمكن الحصول عليه بالاعتماد على أسلوب القرار اللين على عدد المستويات التي يتم التكميم عليها، ويعد التكميم على ثمانية مستويات هو الأفضل، حيث لا يؤمن التكميم على عدد لا نهائي من المستويات سوى 0.2dB من التحسين في BER بالمقارنة مع التكميم على ثمانية مستويات [14].

ولكن تحتاج المعالجة بالاعتماد على أسلوب القرار اللين إلى المزيد من العمليات، حيث تتم معالجة كمية أكبر من المعطيات بالمقارنة مع أسلوب القرار الصلب، فمثلاً لدى التكميم على ثمانية مستويات فإن حجم المعطيات يتضاعف عدة مرات، وهذا يسبب بطئاً في العمليات الحسابية تجب معالجته، فضلاً عن الحاجة للمزيد من وحدات

الذاكرة ووحدات معالجة حسابية ذات أطوال أكبر، ومن ثَم حجم كيان صـلب أكبـر واستهلاك طاقة أكبر.

يعتمد استخدام خوارزمية SOVA في عمليات التسوية في نظام GSM على إجـراء تقدير للقناة بالاعتماد على كلمة التمهيد المتوسطة (midamble). تتألف هذه الكلمة من 26 بتاً متوضعة في منتصف البتات المرسلة في الفتحة الزمنية، كلمة التمهيـد هـذه معروفة لكل من المرسل والمستقبل وتعد ككلمة تمرين للمسوي-الشكل (3)، لذا يـتم استقبالها وإجراء تقدير لاستجابة القناة من خلالها وذلك خلال كل فتحة زمنية. من هنا تتم التسوية في نظام GSM على مستوى الفتحة الزمنية، وبعد تحديد اسـتجابة القنـاة خلال الفتحة الزمنية، يتم إجراء التسوية للرموز الـ 58 السابقة وتلك اللاحقة لكلمـة التمرين دفعة واحدة.

لتكن كلمة التمهيد المرسلة هي $s_{tr}(t)$ ، هذه الكلمة يتم استقبالها $r_{tr}(t)$ على شكل جداء طي مابينها وبين الاستجابة النبضية لقناة الانتشار $h_c(t)$ ، أي:

$$r_{tr}(t) = s_{tr}(t) * h_c(t) \qquad (1)$$

بعد تحويل الإشارة المستقبلة إلى الشكل الرقمي $r_{tr}[k]$، يتم إدخالها إلى مرشح متوافق (matched filter) ذي استجابة نبضية رقمية $h_{mf}[k]$ متطابقة مع كلمة التمهيد المرسلة $s_{tr}[k]$، فيكون خرج المرشح المتوافق هو:

$$h_e[k] = r_{tr}(k) * h_{mf}[k] = s_{tr}[k] * h_c[k] * h_{mf}[k] = R_s[k] * h_c[k] \qquad (2)$$

حيث $R_s[k]$ هو تابع الترابط الذاتي لكلمة التمهيد.

يتم في نظام GSM تصميم كلمة التمهيد بحيث يكون تـابع التـرابط الـذاتي لهـا ذا خصائص جيدة، إِذْ إن حدوث أي انزياح زمني في الترابط سيسبب فارقاً كبيـراً فـي مطال تابع الترابط. يمثل خرج المرشح المتوافق $h_e[k]$ تقديراً جيداً لحالة القناة $h_c[k]$.

يتم استخدام معلومات تقدير حالة القناة هذه في خوارزمية Viterbi التقليدية لإجـراء حسابات التسوية المطلوبة. يتم أولاً حساب البعد (distance) مابين الرمـز المسـتقبل واحتمالات الرموز الممكنة كلّها، (وهي الحـالات (states) علـى شـجرة (trellis)

الحسابات في خوارزمية Viterbi). وذلك بالقيم اللينة، وتدعى هذه القيمة بـ معامل الفرع (Branch Metric BM)، تعتمد معظم التطبيقات على حساب هذا المعامل بطريقة تدعى (Manhatten distance) تعطى بالمعادلة الآتية:

$$BM = (a.x) + (b.y) \qquad (3)$$

حيث إن: a,b هما قيمة معامل الفرع بالشكل الثنائي (بعد استبدال 0 بـ 1 واستبدال 1 بـ -1)

x,y هما قيمة الرمز المستقبل بالقيم اللينة.

بعد ذلك تتم الاستفادة من معلومات حالة القناة التي تم الحصول عليها في الحسابات كلّها على طول الشجرة، بحيث يتم عند كل فرع من فروع الشجرة إضافة حسابات حالة القناة ضمن حسابات المعامل إلى هذا الفرع، ثم تتابع الحسابات بطريقة الخوارزمية نفسها Viterbi التقليدية ولكن بالقيم اللينة للحصول على المسار المطلوب، والذي يحقق تقدير الرموز المستقبلة بأرجحية أعظمية MLSE ممثلة بالقيم اللينة. بهذا يكون قد تم إجراء التسوية للرموز المستقبلة بحسب حالة القناة، وتعطى للمرحلة التالية من مراحل الاستقبال على شكل قيم لينة تزيد من الوثوقية من صحة قيم الرموز المستقبلة.

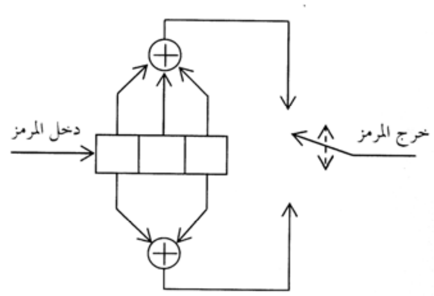
تجري المعالجة في خوارزمية Viterbi بالاعتماد على شجرة يتم إنشاؤها بالاعتماد على خصائص ترميز القناة المستخدم، يتم في GSM استخدام ترميز الطي بمعدل rate = 1/2 (كل بت تدخل إلى المرمز تؤدي إلى خروج رمز مؤلف من 2 بت على خرجه)، وبالطول المقيد 3 = (constraint length) (عدد مراحل مسجل الإزاحة المستخدم في المرمز)، وكثيري الحدود المولدين هما:

$$g_1(X) = 1 + X + X^2 \qquad (4)$$

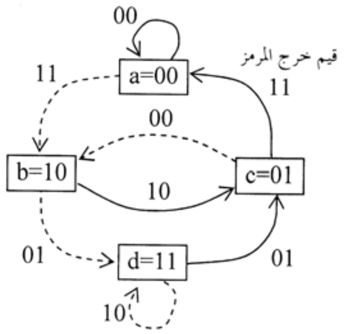
$$g_2(X) = 1 + X^2 \qquad (5)$$

وبذلك يكون عدد حالات هذا الترميز هو أربع حالات (تمثل حالات المرمز، وهي نفسها حالات الشجرة المستخدمة في المعالجة في فك الترميز في الاستقبال)، يبين

الشكل (4) بنية المرمز المذكور، ويبين الشـكل (5) مخطـط الحالـة للمرمـز ذي الخصائص المذكورة (والتي يعتمد عليها إنشاء الشجرة في الاستقبال).



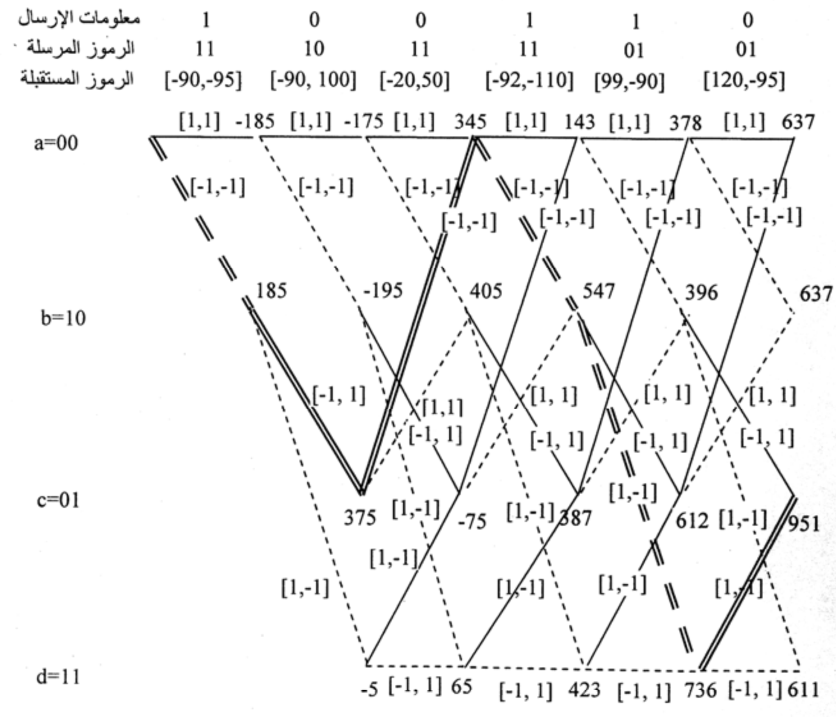
الشكل (٤): مرمز طي بمعدل rate = 1/2
وبالطول المقيد = 3



الشكل(٥):مخطط الحالة للمرمز في الشكل(٤)
الخط المتصل يقابل الدخل (0) والمتقطع الدخل (1)

تُجرى التسوية في الاستقبال بإجراء مجموعة من الحسابات على شجرة فك الترميـز، وذلك عند معالجة كل رمز جديد من الرموز المستقبلة وعلى حالات الشجرة كلّها عند ذلك الرمز، كحساب: بعد الفرع، ومعامل الفرع BM، ومعامل المسار (Path Metric PM). فضلاً عن الأخذ بالحسبان معامـل Viterbi (Viterbi Parameter VP) الـذي يعبر عن نتيجة تقدير حالة القناة. وبعد التقدم في عمق الشجرة عدة مراحـل (سـتتم مناقشة عدد هذه المراحل فيما يأتي) يتم اختيار المسـار المتبقـي(survivor path) لتحديد قيم الخرج بشكلها اللين واحدة تلو الأخرى. يبين الشكل (6) مثالاً لعملية فـك الترميز بالاعتماد على خوارزمية SOVA للمرمز ذي المواصفات المـذكورة أعـلاه (والذي يعتمد عليه GSM)، تمثل قيم البتات في الرموز في هذا المثال علـى ثمانيـة خانات لكل منها، أي ضمن المجال [127,127-] (مع الانتباه إلى أن المسار المتبقـي في هذه الخوارزمية-والتي تعتمد القيم اللينة-هو المسار ذي المعامل الأكبر قيمةً بدلاً

عن الأقل قيمةً في خوارزمية Viterbi التقليدية- والتي تعتمـد القـيم الصـلبة hard (values/0 or 1/.



- القيم مابين قوسين [ ]على كل فرع هي القيم المتوقع استقبالها على هذا الفرع.
- الخط المزدوج يمثل المسار المتبقي.

الشكل (6) مثال على حسابات فك الترميز في خوارزمية SOVA

تتم عملية التسوية بالاعتماد على خوارزمية SOVA بحساب القيم الممكنة كلّها *a[k]* للإشارة المستقبلة *x[k]* في كل مرحلة من مراحل الحسابات عبر الشجرة، ثم تحسـب قيم المسارات بحساب المعامل *M[k]* لكل مسار باستخدام قـيم *a[k]* وذلـك وفـق المعادلة الآتية:

$$M[k]=\sum_{l=0}^{k}\left|x[l]-\sum_{i=0}^{L}h_e[i]\cdot a[l-i]\right|^2 \qquad (6)$$

حيث h_e هي استجابة المرشح المتوافق، والتي تم تحديدها بالاعتماد على بتات التمرين المستقبلة ضمن الإشارة (كما هو مبين أعلاه)، المسار المتبقي الذي تعتمد بموجبه القيم المستقبلة النهائية هو المسار ذو القيمة الكبرى للمعامل *M[k]*. وبذلك تؤمن خوارزمية SOVA إجراء التسوية المطلوبة بفعالية كبيرة لإجراء التقدير بالأرجحية الأعظمية MLSE للقيم المستقبلة.

5- تصميم المسوي المتكيف المرن

تعد خاصية المرونة في نظام الاتصال من أهم ما يميز نظم الجيلين القادمين من نظم الاتصالات النقالة. أهم أوجه هذه المرونة هو القابلية لتأمين عدة مستويات من نوعية الخدمة بحسب رغبة المستثمر (كما هو مبين في الفقرتين /1/ و /2-2/ أعلاه)، كما أن موضوع نوعية الخدمة المتغيرة حسب طلب المستثمر يرتبط ارتباطاً جذرياً بمبدأ نظام الاتصال اللاسلكية التعرفية (المبينة في الفقرة /1/) التي تعد أحد أهم تطبيقات النظم اللاسلكية المحددة برمجياً.

نميز فيما يأتي محورين رئيسيين نعتمد عليهما في تعريف عدة مستويات للمرونة في تأمين نوعية الخدمة المتغيرة حسب طلب المستثمر:

<u>المحور الأول</u>: يتعلق بظروف قناة الاتصال اللاسلكية، والذي يتمثل في التأثيرات المختلفة للخفوت، حيث بينا في الفقرة /3/ أن التخفيف من تأثيرات الخفوت في GSM يتمثل في تصميم الفتحة الزمنية واستخدام المسوي. يمكن تحديد عتبة للمقارنة، بحيث تعد القناة جيدة إذا كانت تأثيرات الخفوت (بالاعتماد على مرحلة تقدير (estimation) القناة في النظام) فوق هذه العتبة، أو سيئة إذا كانت دونها. وبذلك، يمكن التمييز مابين حالتين رئيسيتين فقط من حالات قناة الاتصال، وذلك لتخفيف التعقيد على المستثمر في اختيار مستوى نوعية الخدمة (كما سيبين لاحقاً)، وهما:

الحالة الأولى: هي عندما تكون قناة الاتصال جيدة ولا يوجد هناك تعدد في المسارات (مسار واحد أو خط نظر واضح) ومستوى الخفوت على القناة ضئيل (نسبة الإشارة

للضجيج SNR=25 dB أو E_b/N_o=8 dB على الأقل مثلاً). من الأمثلة على ذلك عندما يكون المستثمر قريباً من المحطة القاعدية (base station) أو عندما يكون هناك خط نظر مابين مستثمر ثابت في مكانه والمحطة القاعدية (على شرفات المنازل أو في الشوارع).

الحالة الثانية: عندما تكون قناة الاتصال سيئة ويوجد تعدد في المسارات ومستوى الخفوت عالٍ، من الأمثلة على ذلك: عندما يكون المستثمر بعيداً عن المحطة القاعدية وضمن بناء، أو عندما يكون المستثمر ضمن مركبة تسير بسرعة عالية.

المحور الثاني: يتعلق بنوعية الاتصال المطلوب إجراؤه، حيث يمكن التمييز ما بين صنفين رئيسيين من الاتصالات عملياً في المعيار GSM: الاتصالات الكلامية، واتصالات نقل المعطيات (وهما النوعان المتاحان في GSM). ترتبط نوعية الخدمة في كل من هذين الصنفين بمعدل خطأ البت BER، وبالتأخير delay.

الصنف الأول: الاتصالات الكلامية، يقبل هذا النوع من الاتصالات نسبة معينة من الانخفاض في معدل خطأ البت BER، (10^{-4} للاتصال المقبول في GSM). ولكنه حساس بالنسبة للتأخير. السبب الأكبر والرئيسي للتأخير في معايير الاتصالات النقالة هو الانتشار عبر أجزاء الشبكة. يبين الجدول(2) تأثيرات التأخير في الاتصالات الكلامية.

مقدار التأخير	التأثير في الاتصالات الكلامية
50 ms	لا يوجد تأثير
100 ms	لا يوجد تأثير بشرط جودة الوصلة عبر مختلف أجزاء الشبكة
150 ms	تأثير خفيف في المحادثات الكلامية
250 ms	تأثير كبير-تشويش واضطراب في الاتصال
400 ms	الحد الأسوأ للتأخير المقبول في الاتصالات الكلامية
600+ ms	لا يمكن إجراء اتصال كلامي

الجدول (2): تأثيرات التأخير في الاتصالات الكلامية.

ومن ثم، فإن التأخير الناتج عن المعالجة في جهاز الاتصال يعد مهملاً بالنسبة للتأخير الناتج عن الانتشار عبر مختلف أجزاء شبكة الاتصال. لأن المعالجة في المعيار GSM تتم على أساس الفتحة الزمنية (0.577 ms)، أي أن الحد الأقصى للتأخير الناتج عن المعالجة لا يتجاوز هذه القيمة.

الصنف الثاني: اتصالات نقل المعطيات، تتفاوت حساسية هذا الصنف من الاتصالات بالنسبة لمعدل خطأ البت وبالنسبة للتأخير بحسب التطبيق. أغلب تطبيقات اتصالات نقل المعطيات تندرج ضمن ثلاثة أنواع من الخدمات، وهي: التشاركية (interactive)، والجارية (streaming)، والخلفية (background).من الأمثلة على ذلك: يقبل اتصال نقل المعطيات لنقل الملفات الصوتية المخزنة مسبقاً (خدمة تشاركية) نسبة معينة من معدل خطأ البت، وكذلك اتصال نقل المعطيات لنقل فاكس (خدمة خلفية). في حين أن اتصالات نقل المعطيات لنقل ملفات تحتوي على صور؛ هي حساسة جداً لأي تدهور في معدل خطأ البت، وكذلك اتصال نقل المعطيات للبريد الالكتروني. أما بالنسبة للتأخير، فإن اتصالات نقل المعطيات بشكل عام أقل حساسية بالنسبة للتأخير من الاتصالات الكلامية. تتراوح قيم التأخير المقبولة لهذه الخدمات ما بين نصف ثانية إلى عدة ثوانٍ [9]. أي أن التأخير الناتج عن المعالجة في جهاز الاتصال لا يشكل محدودية بالنسبة لاتصالات نقل المعطيات بشكل عام.

وبذلك، يمكن التمييز ما بين نوعين رئيسيين من الاتصالات عملياً (تشمل الاتصالات الكلامية واتصالات نقل المعطيات):

النوع الأول: هو الاتصال المهم والضروري والذي يجب أن يكون جيداً إلى أقصى حد (درجة 5 بحسب التصنيف المعياري للاتصالات الكلامية [15]). من الأمثلة على ذلك الاتصالات خلال الحالات الطارئة والكوارث، أو اتصالات نقل ملفات معطيات لا يمكن قبول حدوث أخطاء فيها.

النوع الثاني: هو الاتصال العادي الذي يقبل فيه المستثمر بعض الأخطاء خلال الاتصال بشكل غير مزعج وبحيث تبقى مفهومية الكلام مقبولة (اتصال كلامي بدرجة 4 أو 3)، أو اتصالات نقل المعطيات التي تقبل نسبة معينة من معدل خطأ البت.

استناداً إلى ما سبق، نعرف-مبدئياً-أربعة مستويات من نوعية الخدمة يمكن للمستثمر أن يختار فيما بينها:

1- اتصال مهم عندما تكون قناة الاتصال سيئة.

2- اتصال عادي عندما تكون قناة الاتصال سيئة.

3- اتصال مهم عندما تكون قناة الاتصال جيدة.

4- اتصال عادي عندما تكون قناة الاتصال جيدة.

وبموجب هذه المستويات الأربعة، تكون الأولوية لتغيرات قناة الاتصال التي ربما تتدهور بشكل أكبر من الفارق ما بين نوعية الصوت الجيدة ونوعية الصوت المقبولة، لذلك تم التمييز مابين الحالتين /2/ و/3/ في مستويين مستقلين.

بتطبيق مستويات نوعية الخدمة هذه على مسو متكيف مرن، يجب أن يكون هذا المسوي المتكيف المرن قابلاً لتغيير مواصفاته بحسب مستوى نوعية الخدمة المطلوب، حيث ينعكس التغيير في هذه المواصفات بشكل رئيسي على كل من: استهلاك الاستطاعة من بطارية الجهاز، والتوفير في استهلاك موارد المعالجة الرقمية للإشارة المتاحة في الجهاز أو الزيادة في استهلاكها، ولكن على حساب التخفيض من العمليات اللازمة لوظائف أخرى أو زيادتها (تتجلى أهمية الاحتمال الأخير أيضاً في المحطة القاعدية التي تحتوي على عمليات كثيفة لمعالجة الإشارة)، يتحقق ذلك عن طريق إعادة تشكيل الأجزاء المسؤولة عن تنفيذ وظائف التسوية.

يقوم الجهاز بالتوفيق ما بين كل من: حالة القناة، ونوع الاتصال المطلوب من المستثمر. ثم يقوم الجهاز بالتخاطب معه لتحديد مستوى نوعية الخدمة الذي سيتم إجراء الاتصال فيه، واعتماداً على ذلك، يقوم الجهاز بإعادة تشكيل المسوي المتكيف

لإجراء الاتصال وفق مستوى QoS المطلوب. ويشكل ذلك أحد أوجـه الاتصـالات اللاسلكية المحددة برمجياً.

تنعكس مستويات نوعية الخدمة المذكورة على تصميم المسوي بحيـث يكـون قـابلاً للتغيير في مواصفاته على أربعة مستويات، ويمكن أن يـتم ذلـك علـى محـورين أساسيين: عمق المعالجة في شجرة فك الترميز، وعدد المستويات التي يتم عليها تكميم الرموز المستقبلة. من ثم، يتعلق أداء فك الترميز (وتطبيقه من أجل التسوية) بالاعتماد على SOVA على ناحيتين أساسيتين: الأولى هي عمق المعالجـة فـي شـجرة فـك الترميز-الشكل (6)، والثانية هي عدد مستويات التكميم التي يتم وفقها تحويل الرموز إلى القيم اللينة.

فمن الناحية الأولى، كلما كان عدد مراحل المعالجة أكبر-أي طول المسـار المتبقـي أكبر- كانت النتيجة أقرب إلى الصحة. إن أفضل أداء يمكن الحصول عليه هو عندما يكون عدد مراحـل المعالجة 5 أضعاف الطول المقيد [14] (15 مرحلة بالنسبة للمثال المبين في الأشكال (4 و 5 و 6)، ولكن يتطلب ذلك حجم تخزين أكبر وتعقيداً أكبر في المعالجة وزيادة في استهلاك الاستطاعة.

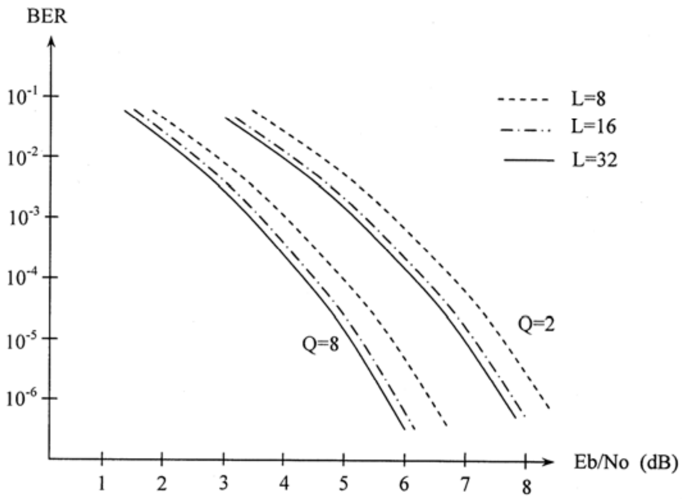
أما من الناحية الثانية، فكلما كان عدد مستويات التكميم أكبـر تحسـن الأداء (BER مقابل E_b/N_o)، حيث يقترب التكميم على ثمانية مستويات إلى حد كبير مـن التكمـيم على عدد لانهائي من المستويات (الفارق 0.2 dB فقط) [14].

العلاقة مابين الأداء وكل من طول المسار (أو عمق المعالجة على الشـجرة) وعـدد مستويات التكميم مبينة بشكل مفصل في المرجع [16]، وذلك من أجل قناة الضـجيج الغوصي الأبيض الجمعـي (Additive White Gaussian Noise Channel)، ومـن أجل تعديل الإقفال بالإزاحة الثنائية والترابعية للطور (Binary (Quaternary) Phase Shift Keying BPSK, QPSK)-حيث تم حذف التأثيرات الناتجة عن تـأثير نـوع التعديل المستخدم-ومن أجل عدة قيم لمعدل الترميز وللطول المقيد، فمن أجل معـدل

rate=1/2 وطول مقيد=3 ، يبين الشكل (7) قيم E_b/N_o اللازمة لعدة قـيم مـن BER وذلك من أجل عدة أطوال مسار L ومن أجل قيمتين لعدد مستويات التكميم Q (Q=2، أي تمثيل الرموز على شكل قرار صاب إما 0 أو 1 ، و Q=8، أي تمثيل القيمة بثلاثة بتات).

وقد تم اعتماد نموذج AWGN كنموذج مرجعي لتبيان الفارق في الأداء بحسب تغيـر طول المسار ومستويات التكميم، وإسقاط ذلك على استنباط المنهجية في تغييـر الأداء بحسب مستويات الخدمة المطلوبة من المستثمر. (يوجد نماذج عديـدة لتمثيـل قنـاة الاتصال اللاسلكية بشكل عام، أشهرها نموذج Rayleigh الذي يستخدم عند عدم وجود خط نظر بشكل رئيسي، ونموذج Rician الذي يستخدم عند وجود خط نظـر بشـكل رئيسي، وقد حدد المعيار GSM نموذجاً لقناة الاتصـال اللاسـلكية النقالـة بحسـب الموازنة التفضيلية للمتغيرات الموجودة في المعيار؛ وبناء على ذلك حدد المعيار طول الفتحة الزمنية وضرورة استخدام المسوي (كما هو مبين في الفقرة /3/).

يمكن إيجاز العلاقة المبينة في الشكل (7) بالجدول (3) كأرقام، الذي يبين قيمة E_b/N_o عند عدة قيم لـ BER وذلك من أجل أطوال مسار 8 و 16 و 32 ومن أجل قيمتـين لمستويات التكميم 2 و 8 (من أجل مواصفات الترميز المبينة نفسها فـي الفقـرة /4/). يوضح هذا الجدول أن الانتقال من التكميم على مستويين Q=2 إلى التكميم على ثمانية Q=8 يؤمن تحسناً في الأداء بمقدار 2 dB،



الشكل (٧): علاقة قيم Eb/No مع BER من أجل عدة قيم لطول المسار L وقيمتين لمستويات التكميم Q
(معدل الترميز=1/2 وطول المقيد=3)

في حين أن الانتقال من طول مسار L=8 إلى L=16 يؤمن تحسناً يتراوح مابين 0.5 dB إلى 0.8 dB ، ويقترب الأداء عند طول مسار L=16 كثيراً من الأداء عند طول مسار L=32 (أكبر قيمة للفارق تتراوح حول 0.2 dB)، ويلاحظ بشكل عام أن مقدار التحسن يتزايد مع تناقص قيم BER.

	Q=8			Q=2		
BER	**L=8**	**L=16**	**L=32**	**L=8**	**L=16**	**L=32**
10^{-2}	**3**	**2.6**	**2.4**	**4.6**	**4.2**	**4**
10^{-3}	**4**	**3.6**	**3.5**	**5.9**	**5.4**	**5.1**
10^{-4}	**5**	**4.4**	**4.3**	**6.9**	**6.3**	**6.2**
10^{-5}	**5.8**	**5.3**	**5.2**	**7.6**	**7.3**	**7.2**

الجدول (3): العلاقة ما بين الأداء (قيم E_b/N_o مقابل BER) وطول المسار L والتكميم Q

يلاحظ أن التحسن الممكن الحصول عليه بزيادة طول المسار غير كاف نسبياً للتمييز ما بين مستويات المرونة المقترحة، لذا؛ يمكن الاستفادة من التحسينات التي يتم إجراؤها على عمليات المعالجة في خوارزمية Viterbi. يبين المرجع [17] أن الاكتفاء بطول مسار يساوي الطول المفيد يؤمن توفيراً كبيراً في زمن المعالجة (كما نستنتج أنه يمكن توفير قدر من الموارد أيضاً)، حيث يتم الكشف على الفرع الذي يشترك فيه أكبر عدد من المسارات ذات القيم الكبرى عند كل حالة في الشجرة، مقابل خسارة في الأداء تقارب 1.5 dB . بالاستفادة من ذلك من أجل الترميز المبين بالفقرة /4/، يمكن الانتقال مابين طول مسار L=3 إلى طول مسار L=16 مقابل الحصول على تحسين في الأداء بمقدار 1.5 dB

بإسقاط ما سبق على مستويات المرونة المقترحة للمسوي المتكيف، يمكن اعتبار المستوى الأدنى من نوعية الخدمة (المستوى /4/) هو من أجل L=3 و Q=2، ومن ثم يكون المستوى /3/ هو من أجل L=16 و Q=2، وهكذا. يبين الجدول (4) قيم L و Q عند مستويات نوعية الخدمة الأربعة والتحسين في الأداء الذي يؤمنه كل من هذه المستويات. فإذا اعتبرنا أن المستوى /2/ هو المرجع في مقارنة الأداء، عندها سيكون هناك ما يأتي:

- إما فائض في نسبة الإشارة للضجيج إذا كان مستوى الخدمة المطلوب من المستثمر هو المستوى الثالث أو الرابع، حيث يستفاد من هذا الفائض لإعادة تشكيل المسوي إلى المستوى الثالث أو الرابع (حسب الطلب)، وذلك للتوفير في الاستهلاك وللاستفادة من موارد المعالجة في وظائف أخرى.

- أو نقص في نسبة الإشارة للضجيج إذا كان مستوى الخدمة المطلوب هو الأول، يتم تعويض هذا النقص بالانتقال إلى المستوى الأول عند طلب ذلك من المستثمر، على حساب الزيادة في الاستهلاك وفي حجم موارد المعالجة في النظام.

الفارق في الأداء	Q	L	نوعية الخدمة
+1.5 dB	8	16	1- اتصال مهم-قناة سيئة
(مرجع المقارنة)	8	3	2- اتصال عادي-قناة سيئة
-0.5 dB	2	16	3- اتصال مهم-قناة جيدة
-2 dB	2	3	4- اتصال عادي-قناة جيدة

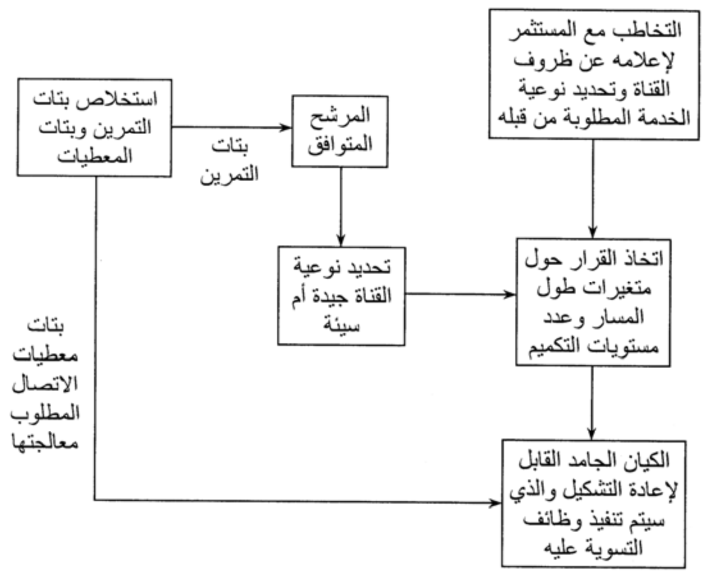
الجدول (4): الأداء عند مستويات نوعية الخدمة وقيم L و Q الموافقة

نلاحظ من الجدول (4) أن مستويي نوعية الخدمة /2/ و /3/ متقاربان من حيث الأداء، ويمكن دمجهما في مستو واحد، ولكن يجب اختيار قيم L و Q الأنسب، وسيتم مناقشة ذلك من خلال عمليات المحاكاة.

6- نموذج المسوي المتكيف المرن والمحاكاة ومناقشة النتائج

6-1- نموذج المسوي المتكيف المرن

يبين الشكل (8) مخططاً صندوقياً لنموذج المسوي المتكيف المرن، حيث تجري العمليات وفق التسلسل الآتي (بإيجاز):



الشكل (8) مخطط صندوقي لنموذج المسوي المتكيف المرن

1- مراقبة حالة القناة بشكل دائم من خلال خرج المسوي المتوافق بالاعتمـاد علـى بتات التمرين، وذلك خلال كل فتحة زمنية، وتحديد نوعية القناة (مستويين: جيـدة أو سيئة وفق التفصيل المبين في الفقرة /5/).

2- التخاطب مع المستثمر كي يقوم بتحديد مستوى نوعية الخدمـة الـذي يناسـبه، اعتماداً على كل من: ظروف قناة الاتصال (يتم إعلامه بذلك)، ونوعية الاتصال الذي يجريه (وفق التفصيل المبين في الفقرة /5/).

3- اتخاذ القرار حول متغيرات طول المسار وعدد مستويات التكميم، بحسب مستوى نوعية الخدمة المطلوب ونوعية قناة الاتصال.

4- إعادة تشكيل الكيان الجامد القابل لإعادة التشكيل لإجراء التسوية وفق المتغيـرات التي تم تحديدها في العملية السابقة.

6-2- المحاكاة

أجريت المحاكاة على مرحلتين:

المرحلة الأولى: باستخدام MATLAB للتأكد من أداء التصميم المقتـرح، ولإعـداد تقسيم أولي للعمليات بشكل أمثلي تمهيداً لتنفيذها على المرحلة الثانيـة، مـع الأخـذ بالحسبان البنية التي سيتم تقسيم الوظائف عليها وهي (DSP+FPGA)، إذْ إن هنـاك نقصاً في وسائل التطوير الفعالة التي تحقق ذلك (فضلاً عن صعوبة تأمينها) [6].

المرحلة الثانية: باستخدام C لتفصيل أكبر في جزئيات العمليات اللازمة لتحقيق الأداء المرن المطلوب مع تحقيق الأمثلـة فـي الأداء، تمهيـداً لتوزيـع الوظـائف علـى DSP+FPGA (سيتم تبيان ذلك في بحث لاحق مستقل).

أجريت المحاكاة على المسوي المرن المقترح لنظام الترميز المبين فـي الفقـرة /4/، وذي مستويات المرونة الأربعة الآتية: (عدد الحالات على شجرة فك الترميز هوثابت M=4):

- عدد مستويات التكميم هو: إما Q=2 (تمثيل بالقيم الصلبة، أي عدد البتات اللازمة لتمثيل القيمة هو R=1)، أو Q=8 (تمثيل بالقيم اللينة، أي عدد البتات اللازمة لتمثيـل كل قيمة هو R=3).

- طول مسار المعالجة يأخذ القيم: إما L=3 أو L=16.

تبين من المحاكاة أن متطلبات المعالجة الرقمية تقسم إلى جزأين رئيسيين: متطلبـات التخزين ومتطلبات الحسابات.

أ- تقسم متطلبات التخزين إلى الأجزاء الرئيسية الآتية:

1- جزء تخزين معطيات الدخل المطلوب معالجتها، وهي فـي نظـام GSM بطـول (58.2) رمزاً- الشكل (3)- كل من هذه الرموز يمثل بـ 2 بت صـاب، كـل منهـا يحتاج إلى R بت لتمثيلها بالقيم اللينة، لأن التسوية تتم على أساس فتحة زمنية كاملـة بحسب بتات التمهيد المتوسطة لهذه الفتحة والتي يتم إجراء تقدير حالة القناة عليهـا، ومن ثّم فإن حجم التخزين الكلي المطلوب لهذا الجزء هو:

(R.58.4) بت.

2- مصفوفة لتخزين المسارات (تعبر عنها قيم معاملات الفرع BM)، بأبعاد: (M.L)، كل عنصر من هذه المصفوفة ممثل على R بت، ومن ثّم فإن حجم التخـزين الكلـي المطلوب لهذا الجزء هو:

(R.M.L) بت.

3- مصفوفة لتخزين معاملات المسار (تعبر عنها قيم PM)، حجم التخزين المطلـوب لهذا الجزء يساوي [M x (R + log2L)] بت.

4- جزء تخزين خرج المسوي بالقيم اللينة، وهو يساوي الجـزء /1/، أي: (R.58.4) بت.

ونظراً لأن M=4 ثابتة في هذا المسوي فإن حجم التخزين الكلـي الـلازم للمسـوي المتكيف هو:

$4 [R (L+117) + \log_2 L]$ بت.

ب- كما تقسم متطلبات الحسابات إلى الأجزاء الرئيسية الآتية (الشكل (6)):

1- وحدات حساب معاملات الفرع بطريقة (Manhatten) (والمبينة في الفقـرة /4/). تتم عمليات حساب معاملات الفرع عند كل مرحلة من مراحل الشجرة، ومن ثم تخزن في المصفوفة الخاصة بها، وهي مؤلفة بشكل أساسي من عملية جمع لقيمتين على كل فرع من الفروع الثمانية عند كل مرحلة (الشكل (6))، طول كل من هاتين القيمتين هو

R بت. كما يلاحظ أنه يمكن إجراء عمليات الجمع الثماني على التفرع بهدف أمثلة أداء المسوي من حيث السرعة، ومن ثَم فإن عدد الوحدات الحسابية لهذا الجزء هو ثمانية جوامع بطول R بت لكل منها. يستفاد من الجوامع الثمانية نفسها لجمع قيم تقدير حالة القناة للحصول على القيمة النهائية لمعامل الفرع ومن ثم تخزينها.

2- وحدات حساب معاملات المسار، والتي تتم أيضاً عند كل مرحلة من مراحل الشجرة، وتخزن في المصفوفة الخاصة بها. يضم ذلك عملية جمع ومقارنة واختيار للقيمة الكبرى عند كل حالة من حالات الشجرة الأربع، وذلك بطول R بت لكل منها. يلاحظ أنه يمكن إجراء هذه العمليات الأربع على التفرع بهدف أمثلة سرعة المسوي، ومن ثَم فإن عدد الوحدات الحسابية لهذا الجزء هو أربع وحدات جمع-مقارنة-اختيار بطول R بت لكل منها.

3- وحدات حساب المسار المتبقي، وتتم أيضاً عند كل مرحلة من مراحل الشجرة، وذلك لاستنتاج خرج المسوي، وتتألف من وحدات مقارنة-اختيار عددها L وحدة وبطول R بت لكل منها.

يلاحظ أن تعقيد الحسابات وحجم وحدات المعالجة اللازمة يتعلق بعدد مستويات التكميم بشكل أكبر نسبياً من طول المسار.

يبين الجدول (5) حجم موارد المعالجة الرقمية المطلوبة (تخزين وحسابات) لكل من مستويات نوعية الخدمة المقترحة.

6-3- مناقشة نتائج المحاكاة

نلاحظ من الجدول (4) أن الفارق الضئيل في الأداء (0.5dB) ما بين مستويي نوعية الخدمة الثاني والثالث يقابله استهلاك حجم كبير في موارد المعالجة الرقمية اللازمة، والذي ينعكس أيضاً على زيادة في استهلاك استطاعة البطارية، أي أن الانتقال من المستوى الثالث إلى المستوى الثاني للحصول على (0.5dB) فقط؛ لا يتناسب أبداً مع تكلفة ذلك من حيث حجم موارد المعالجة والاستطاعة اللازمة، لذا؛ يجب دمج هذين المستويين من نوعية الخدمة في مستوٍ واحد هو الأقل استهلاكاً للموارد وللاستطاعة، أي يدمج المستوي الثاني والثالث في مستوٍ واحد هو الأمثل من حيث حجم الموارد

اللازمة لعمليات المعالجة (أي المستوى الثالث الذي فيه L=16 و R=1). كما أن هذا المستوى هو الأكثر احتمالاً من الناحية الاستثمارية العملية.

وهكذا نستنتج أن زيادة عمق المعالجة عبر الشجرة (زيادة طول المسار) وإنقاص عدد مستويات التكميم يوفر من استهلاك الموارد إلى حد كبير بالمقارنة مع الحالة المعاكسة (زيادة عدد مستويات التكميم وإنقاص طول المسار)، مقابل خسارة في الأداء لا تتجاوز (0.5 dB) في أحسن الأحوال (عند BER منخفضة).

نوعية الخدمة	L	R	الفارق في الأداء	موارد المعالجة الرقمية اللازمة: للتخزين (بت)	النسبة (تخزين)	للحسابات
1- اتصال مهم- قناة سيئة	16	3	+1.5 dB	1612	+ 11%	- 8 جوامع بطول 3 بت - 4 (جمع- مقارنة- اختيار)بطول 3 بت. - 16 (مقارنة- اختيار) بطول 3 بت.
2- اتصال عادي- قناة سيئة	3	3	(مرجع)	1448	(مرجع)	- 8 جوامع بطول 3 بت - 4 (جمع- مقارنة- اختيار)بطول 3 بت. - 3 (مقارنة- اختيار) بطول 3 بت.
3- اتصال مهم- قناة جيدة	16	1	-0.5 dB	548	- 62 %	- 8 جوامع بطول 1 بت - 4 (جمع- مقارنة- اختيار)بطول 1 بت. - 16 (مقارنة- اختيار) بطول 1 بت.
4- اتصال عادي- قناة جيدة	3	1	-2 dB	488	- 66 %	- 8 جوامع بطول 1 بت - 4 (جمع- مقارنة- اختيار)بطول 1 بت. - 3 (مقارنة- اختيار) بطول 1 بت.

الجدول (5): حجم موارد المعالجة الرقمية المطلوبة لمستويات نوعية الخدمة الأربعة المقترحة

وبالاعتماد على ما سبق، يصبح عدد مستويات نوعية الخدمة ثلاثة مستويات، وهـي تكافئ مستويات الخدمة الأربعة المقترحة أعلاه، يبين الجدول (6) مسـتويات نوعيـة الخدمة الثلاثة والفارق في الأداء فيما بينها، فضلاً عن متطلبـات مـوارد المعالجـة اللازمة والفارق بينها عند كل من المستويات الثلاثة.

نوعية الخدمة	L	R	الفارق في الأداء	موارد المعالجة الرقمية اللازمة		
				للتخزين (بت)	النسبة (تخزين)	للحسابات
1- اتصال هام- قناة سيئة	16	3	+ 2 dB	1612	+ 194 %	- 8 جوامع بطول 3 بت - 4 (جمع-مقارنة-اختيار)بطول 3 بت. - 16 (مقارنة-اختيار) بطول 8 بت.
2- اتصال عادي- قناة سيئة	16	1	(مرجع)	548	(مرجع)	- 8 جوامع بطول 1 بت - 4 (جمع-مقارنة-اختيار)بطول 1 بت. - 16 (مقارنة-اختيار) بطول 1 بت.
3- اتصال عادي- قناة جيدة	3	1	- 1.5 dB	488	- 11 %	- 8 جوامع بطول 1 بت - 4 (جمع-مقارنة-اختيار)بطول 1 بت. - 3 (مقارنة-اختيار) بطول 1 بت.

الجدول (6): التوزيع الأمثلي لمستويات نوعية الخدمة ومقارنة أداء كل منها والموارد اللازمة

نلاحظ من الجدول (6) أن الانتقال من المستوى الثاني إلى الأول يتطلب زيادة كبيـرة نسبياً في موارد المعالجة، وهذا يسبب بدوره زيادة في استهلاك البطارية، لذا؛ يقـوم النظام بالتخاطب مع المستثمر لإعلامه عندما يطلب المستوى الأول بأن هذا المستوى من نوعية الخدمة سيسبب زيادة في الاستهلاك وتخفيضاً في بعض وظائف المعالجـة الأخرى ذات الأولوية المنخفضة.

كما نلاحظ من الجدول (6) أن الانتقال من المستوى الثاني إلى الثالث سيوفر (11 %) من موارد المعالجة، ولكن يتبين من المحاكاة أن إنقاص طول المسار في هذا المستوى سيؤدي بدوره أيضاً إلى إنقاص عدد عمليات المعالجة، وبالتالي إلى تسريع عمليـات

المعالجة اللازمة وإنقاص استهلاك التيار، فضلاً عن إتاحة المزيد من الوقت للاستفادة من الموارد في عمليات معالجة أخرى.

7- الخلاصة

بعد تبيان أهم معالم وأوجه نظام الاتصالات اللاسلكية المحددة برمجياً، وبعد استعراض سريع لخصائص نظام GSM، وتبيان أهمية جزء المسوي فيه للتغلب على التداخل الناشئ عن كل من قناة الاتصال ونوع التعديل المستخدم، قمنا في هذه الدراسة بطرح تصميم لمسو مرن لنظام GSM. تتغير مواصفات هذا المسوي لتأمين مستوى نوعية خدمة معين من بين ثلاث مستويات نوعية خدمة، يمكن للمستثمر أن يختار فيما بينها بحسب درجة أهمية الاتصال المطلوب وحالة القناة التي يتم الاتصال عليها. وقد بيّنّا في هذه الدراسة الاختيار الأمثلي لمواصفات المسوي المقترح عند كل مستوى نوعية خدمة يطلبه المستثمر، وذلك بما يؤمن الاستفادة بشكل أمثلي من موارد معالجة الإشارة الرقمية والتوفير في الاستهلاك في النظام مع المحافظة على الأداء المطلوب. يستند هذا الأسلوب إلى قابلية هذه الموارد لإعادة التشكيل للانتقال فيما بين مستويات نوعية الخدمة الثلاث المقترحة.

المراجع

[1] B. Enrico, "The Software Radio Concept", IEEE Communications Magazine, September 2000, pp. 138-143.
[2] J. Mitola, "The Software Radio Architecture", IEEE Communications Magazine, May 1999, pp. 26-37.
[3] W.H. Tuttlebee Et al, "Software Defined Radio, Baseband Technologies for 3G Handsets and Basestations", John Wily, 2004.
[4] J. Mitola, "Software Radio Architecture: A Mathematical Perspective", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, April 1999, pp. 514-538.
[5] J. Mitola, "Software Radio Architecture", John Wily, 2000.
[6] Y. Jaamour & M. S. Safadi, "Report on Phase One of the Ph.D. Research", Department of Electronics and Communications Engineering, FMEE, University of Damascus, December 2003.
[7] J. Mitola, "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal", IEEE Personal Communications, August 1999.
[8] M. Mouly, "The GSM System for Mobile Communications", Published by Author, 1992.
[9] J. Korhonen, “Introduction to 3G Mobile Communications”, Artech House, 2001.
[10] Y. Jaamour & M. S. Safadi, "Report on Phase Two of the Ph.D. Research", Department of Electronics and Communications Engineering, FMEE, University of Damascus, June 2004.
[11] B. Sklar, "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication System: Mitigation", IEEE Communications Magazine, July 1997, pp. 102-109.
[12] J.G. Proakis Et al, "A Comparison of GSM receivers for Fading Multipath Channels with Adjacent and Co-Channel Interference", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, November 2000, pp. 2211-2218.

[13] J. Hagenauer Et al, "A Viterbi Algorithm with Soft Decision Outputs and its Applications", Proc. Globecom, Dallas TX, November 1989, pp. 1680-1686.
[14] B. Sklar, "Digital Communications: Fundamentals and Applications", PrenticeHall, 1988.
[15] J.D. Gibson, "The Mobile Communications Handbook", CRC Press & IEEE Press, 1996.
[16] J. A. Heller Et al, "Viterbi Decoding for Satellite and Space Communications", IEEE Transactions on Communications Technology, October 1971, pp. 835-848.
[17] M. Wainakh Et al, "Fast Decoding Viterbi Algorithm", The 1'st International Conference on Information and Communications Technology: from Theory to Applications, Damascus, April 2004.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: 2008/1/1.