

الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R S.2131-1
(2022/01)

طريقة تحديد أهداف أداء المسارات الرقمية
المرجعية الافتراضية الساتلية التي تستعمل
التشفير والتشكيل التكييفين

السلسلة S

الخدمة الساتلية الثابتة

تمهيد

يظطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد مدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها. ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يرد وصف للسياسة التي يتبعها قطاع الاتصالات الراديوية فيما يتعلق بحقوق الملكية الفكرية في سياسة البراءات المشتركة بين قطاع تقييس الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهروتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في القرار ITU-R 1. وترد الاستثمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en> حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>)

العنوان	السلسلة
البث الساتلي	BO
التسجيل من أجل الإنتاج والأرشفة والعرض؛ الأفلام التلفزيونية	BR
الخدمة الإذاعية (الصوتية)	BS
الخدمة الإذاعية (التلفزيونية)	BT
الخدمة الثابتة	F
الخدمة المتنقلة وخدمة الاستدلال الراديوي وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة	M
انتشار الموجات الراديوية	P
علم الفلك الراديوي	RA
أنظمة الاستشعار عن بُعد	RS
الخدمة الثابتة الساتلية	S
التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية	SA
تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة	SF
إدارة الطيف	SM
التجميع الساتلي للأخبار	SNG
إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت	TF
المفردات والمواضيع ذات الصلة	V

ملاحظة: تمت الموافقة على النسخة الإنكليزية لهذه التوصية الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية بموجب الإجراء الموضح في القرار ITU-R 1.

النشر الإلكتروني
جنيف، 2022

التوصية ITU-R S.2131-1

طريقة تحديد أهداف أداء المسارات الرقمية المرجعية الافتراضية الساتلية التي تستعمل التشفير والتشكيل التكييفيين¹

(المسألان ITU-R 275 و ITU-R 277-1/4)

(2022-2019)

مجال التطبيق

يُتيح استعمال التشفير والتشكيل التكييفيين (ACM) الحفاظ على توصيل ساتلي رغم الانحطاط بسبب الانتشار ولكن بمعدلات صبيب أدنى. وتقدم هذه التوصية طريقة لتحديد أهداف أداء أنظمة الاتصالات الساتلية التي تستعمل التشفير والتشكيل التكييفيين.

مصطلحات أساسية

تشفير وتشكيل تكييفيان؛ أهداف الأداء؛ اتصالات ساتلية

المختصرات/الأسماء المختصرة

التشكيل والتشفير التكييفيان (Adaptive coding and modulation)	ACM
معدل الفدرات الخلفية ذات الأخطاء (Background block error rate)	BBER
احتمال الخطأ في البتات (Bit error probability)	BEP
معدل الخطأ في البتات (Bit error ratio)	BER
الإذاعة الفيديوية الرقمية (Digital video broadcasting)	DVB
الجيل الثاني للإذاعة الفيديوية الرقمية الساتلية (Second generation digital video broadcasting via satellite)	DVB-S2
تمديد الجيل الثاني للإذاعة الفيديوية الرقمية الساتلية (Extension of second generation digital video broadcasting via satellite)	DVB-S2X
كتلة مشوبة بالخطأ (Errored block)	EB
ثانية تتخللها أخطاء (Errored second)	ES
المعهد الأوروبي لمعايير الاتصالات (European Telecommunications Standards Institute)	ETSI
معدل الخطأ في الإطار (Frame error rate)	FER
مسير رقمي افتراضي مرجعي (Hypothetical reference digital path)	HRDP
توصيل افتراضية مرجعية (Hypothetical reference connection)	HRX
التشكيل والتشفير (Modulation and coding)	MODCOD
فريق خبراء الصور المتحركة (Moving picture experts group)	MPEG

¹ تتطلب المنهجيات والمقاييس الإضافية لتقييم الأداء التحليل الكمي والنوعي لتحديد كفاءة هذه المنهجيات والمقاييس.

معدل الخطأ في الرزم (Packet error ratio)	PER
شبه خالية من الخطأ (Quasi error free)	QEF
ثانية شديدة الخطأ (Severely errored second)	SES
تعدد الإرسال بتقسيم الزمن (Time division multiplex)	TDM
النفاز المتعدد بتقسيم الزمن (Time division multiple access)	TDMA
نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء (Carrier to noise ratio γ)	C/N
نسبة الطاقة لكل رمز / كثافة طيفية للضوضاء (Symbol energy to noise spectral density ratio)	E_s/N_0
كفاءة طيفية بوحدات bit/s/Hz (Spectral efficiency in bit/s/Hz)	η
نسبة انحطاط الصبيب (Percent degraded throughput)	ϕ_{total}

التوصيات والتقارير ذات الصلة الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية

الأداء من حيث الأخطاء المسموح بها في مسير ساتلي رقمي افتراضي مرجعي من الخدمة الثابتة الساتلية يعمل تحت 15 GHz ويشكل جزءاً من توصيل دولي في شبكة رقمية متكاملة الخدمات	التوصية ITU-R S.614-4
استخدام استراتيجيات وتقنيات ترتيبات مضادة للخبو في الخدمة الثابتة الساتلية	التوصية ITU-R S.1061-1
الأداء من حيث الأخطاء المسموح بها في مسير رقمي افتراضي مرجعي لساتل يعمل تحت 15 GHz	التوصية ITU-R S.1062-4
تقنيات الإرسال القائم على موجات حاملة متعددة في الأنظمة الساتلية	التوصية ITU-R S.1878-0
الأداء من حيث الأخطاء قصيرة الأجل المسموح بها في مسير رقمي افتراضي مرجعي لساتل	التوصية ITU-R S.2099-0
تقنيات الإرسال القائم على موجات حاملة متعددة في الأنظمة الساتلية	التقرير ITU-R S.2173-1
معلومات وأهداف الأداء من حيث الخطأ من طرف إلى طرف في المسيرات والتوصيلات الرقمية الدولية ذات معدل البتات الثابت	التوصية ITU-T G.826

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

- (أ) أن اعتماد التشفير والتشكيل التكمييين (ACM) وخطية مكبر القدرة أدى إلى تحسين كفاءة السواتل وأداء الإرسال؛
- (ب) وأن الأنظمة الساتلية التي تستخدم تقنيات التشفير والتشكيل التكمييين ستتكيف مع الظروف المتدهورة بتخفيض الصبيب الإجمالي وبالتالي، لن تكون قادرة على توفير الخدمات بمعدلات بتات ثابتة؛
- (ج) وأن أداء الوصلة الساتلية يجب أن يكفي للسماح بالالتزام بأهداف الأداء الإجمالية من طرف إلى طرف وبمتطلبات المستعمل النهائي؛
- (د) وأن الضرورة تقتضي أن تؤخذ في الحسبان جميع الآليات المهيّمة لوقوع الخطأ لدى تحديد معايير الأداء من حيث الخطأ، لا سيما ظروف الانتشار المتغيرة مع الوقت والتداخل،

وإذ تلاحظ

- (أ) أن أهداف الأداء من حيث الخطأ في الأجل الطويل متوفرة في التوصيتين ITU-R S.614 وITU-R S.1062؛
- (ب) أن تعريف الأجل القصير في مجال الاتصالات الساتلية وأهداف الأداء قصيرة الأجل يرد في التوصية ITU-R S.2099؛
- (ج) أن المعلومات المتعلقة بتقنيات الإرسال التكميبي والتحكم في القدرة التي يمكن استعمالها للتعويض عن التوهين المتغير مع الوقت متوفرة في التوصية ITU-R S.1061 والتوصية ITU-R S.1878 والتقارير ITU-R S.2173؛
- (د) أن انحطاط الوصلة الساتلية الناجم عن انحطاط الانتشار الذي يمكن توصيفه باستخدام النماذج الواردة في التوصيتين ITU-R P.618-13 وITU-R P.1623-1، وتنطبق هاتان التوصيتان المتعلقةتان بالانتشار حتى 51,4 GHz،

توصي

- 1 بأن تُصمم الأنظمة الساتلية التي تستخدم التشفير والتشكيل التكميبيين لتلبي أهداف الأداء المحددة من حيث معدل الخطأ في الرزم (PER) أو الكفاءة الطيفية (بوحدة bit/s/Hz) بدالة نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء (C/N)؛
- 2 بأن تعتبر الملاحظات التالية جزءاً من هذه التوصية.

الملاحظة 1 - في حالة استعمال معدل الخطأ في الرزم، ينبغي استعمال القيمة المبينة في الجدول 3 في الفقرة 2.2 من الملحق.

الملاحظة 2 - في حالة استعمال أهداف الأداء المحددة من حيث الكفاءة الطيفية، يُفترض ألا تكون الكفاءة الطيفية، المقاسة بقيمة التشغيل γ بوحدة dB أقل من $\eta(\gamma - 1.0)$ ، حيث أن γ هي نسبة الموجة الحاملة إلى الضوضاء (C/N) بوحدة dB، و $\eta(\gamma)$ هي الكفاءة الطيفية بوحدة bit/s/Hz بدالة القيمة γ المحددة في الفقرة 3.2 من الملحق.

الملاحظة 3 - يُفترض أن النظام قادر على استيعاب انخفاض قدره 1 dB في النسبة C/N خلال فاصل زمني مدته ثانية واحدة عند تغيير حالة التشكيل والتشفير (MODCOD). وهذا يقابل انخفاضاً بنسبة حوالي 10% في الكفاءة الطيفية (الصبيب أو السعة) عبر وصلة ساتلية غير خطية. وقد يُعزى هذا الانخفاض في النسبة C/N إلى أي مصدر للضوضاء الخارجية والخبو الناجم عن المطر.

الملاحظة 4 - جدير بالإشارة إلى أن متوسط الصبيب عبر الزمن على مدار أي سنة، لا يعطي معلومات كافية عن أداء الوصلة عند نسبة مئوية معينة من الوقت خلال سنة معينة. ويمكن ذكر متطلبات إضافية للأداء الإجمالي من حيث الصبيب/الكفاءة الطيفية كدالة للنسبة المئوية من سنة ما. ويتعين أن يؤخذ هذا المقياس المحتمل بعين الاعتبار في التقييم العام لأداء وصلة تستعمل تقنيات التشكيل والتشفير التكميبيين. وقد تتطلب النسب المئوية المذكورة أعلاه مزيداً من الدراسات.

الملحق

مثال لطريقة تحديد أهداف أداء المسارات الرقمية المرجعية الافتراضية الساتلية التي تستعمل التشفير والتشكيل التكميبيين

1 خلفية

أعدت التوصيات الحالية بشأن الأداء والتميز في حالة الخطأ مراعاة واقع أن الوصلات الساتلية يمكن أن تتدهور بسبب انحطاط الانتشار الذي يمكن وصفه باستخدام النماذج المقترحة في التوصيتين ITU-R P.618-13 وITU-R P.1623-1. وقد بينت الدراسات التي أجرتها لجنة الدراسات 3 أن هذه التوصيات بشأن الانتشار تنطبق حتى 51,4 GHz، ولكن، لا توجد توصيات بشأن مسارات مائلة تستعمل ترددات فوق 52 GHz. وفي ضوء هذه المعلومات، تنطبق التوصيات الحالية بشأن الأداء والتميز في حالة الخطأ على المسارات الرقمية المرجعية الافتراضية (HRDP) حتى 52 GHz.

وقد أدى تطوير واعتماد تقنيات التشفير والتشكيل التكمييين (ACM) وخطية مكبر القدرة من جانب مصنعي ومشغلي المعدات الساتلية إلى تحسين كفاءة السواتل وأداء الإرسال. ويسمح استخدام تقنية ACM بالحفاظ على المسير الرقمي المرجعي الافتراضي (HRDP) للسواتل على الرغم من انحطاط الأداء ولكن بمعدلات صبيب أقل. ويصف التقرير ITU-R S.2173 والفقرة 2 من الملحق 1 بالتوصية ITU-R S.2099 تطبيق تقنيات ACM على أنظمة الإرسال الساتلية.

1.1 أهداف الأداء للمسيرات HRDP بمعدل بتات ثابتة

تقدم التوصية ITU-R S.1062 أهداف الأداء بخصوص المسيرات HRDP للسواتل التي توفر خدمات بمعدلات بتات ثابتة. وكثيراً ما كانت هذه التوصيات تُستخدم في الحركة الساتلية في بداية التسعينات، قبل انتشار الألياف البصرية والكبلات البحرية. وتستند التوصية ITU-R S.1062 إلى المتطلبات المقدمة في التوصية ITU-T G.826. وترد هذه المتطلبات من حيث الفدرات المشوبة بالخطأ على عكس الأخطاء الواردة في البتات الفردية. وتعرف التوصية ITU-T G.826 أهداف الأداء من حيث معدلات الفدرات الخلفية المشوبة بالخطأ (BBER) التي تتراوح قيمتها بين 2×10^{-4} و 10×10^{-4} تبعاً لمعدل الخدمة حتى 3,5 Gbit/s، ولا يتم قياس المعدل BBER إلا أثناء وقت التيسر. ويرد أدناه جزء من الجدول 1 المقتطف من التوصية ITU-T G.826 للرجوع إليه.

الجدول 1

أهداف الأداء من طرف إلى طرف المحددة في التوصية ITU-T G.826 لمسير رقمي افتراضي مرجعي (HRDP) أو بتوصيل افتراضي مرجعي (HRX) يبلغ 27 500 km

المعدل	64 kbit/s	1,5 إلى 5 (Mbit/s)	5 إلى 15 (Mbit/s)	15 إلى 55 (Mbit/s)	55 إلى 160 (Mbit/s)	< 160 إلى 3 500 (Mbit/s)
عدد البتات في الفدرة		5 000-800	8 000-2 000	20 000-4 000	20 000-6 000	30 000-15 000
نسبة التوائي الخطأ	0,04	0,04	0,05	0,075	0,16	
نسبة التوائي شديدة الخطأ	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
معدل خطأ الفدرة الخلفية		2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}	10^{-4}

يوزع على قفزة ساتلية في الجزء الدولي 35% من جميع الأهداف من طرف إلى طرف، في أنظمة نقل الاتصالات العاملة بأي معدل بتات كان تغطيه التوصية ITU-T G.826، إما فوق أو تحت المعدل الأولي، بغض النظر عن المسافة الفعلية المغطاة. إذا كانت الوصلة الساتلية تؤمن الجزء الوطني، حينئذ تتلقى توزيعاً قدره 42% من جميع الأهداف من طرف إلى طرف. فعلى سبيل المثال، يُعدل هدف المعدل BBER البالغ 2×10^{-4} إلى $2 \times 10^{-4} \times 0,35 = 0,7 \times 10^{-4}$ من أجل توصيل دولي، في حين يُعدل إلى $2 \times 10^{-4} \times 0,42 = 0,84 \times 10^{-4}$ من أجل توصيل وطني. وإذا يسر سائل ما المسير بالكامل أو توصيل من طرف إلى طرف حينئذ تنطبق الأهداف الواردة في الجدول 1.

ويُحدد حجم الفدرة أيضاً تبعاً لمعدل بتات الخدمة. ومن هذا المنظور، تعرف التوصية ITU-R S.1062 أهداف الأداء من حيث النسبة BEP/α ، حيث يشير BEP إلى احتمال الخطأ في البتات ويشير α إلى عدد الأخطاء لكل رشقة. وفيما يلي مثال لأهداف الأداء المحددة للنظام الساتلي الذي يعمل بمعدل يصل إلى 155 Mbit/s.

الجدول 2

أهداف الأداء المحددة في التوصية ITU-R S.1062

For $\alpha = 10$ (BEP)	BEP/ α	النسبة المئوية من مجمل الوقت (أسوأ شهر)
$6-10 \times 1$	$7-10 \times 1$	0,2
$8-10 \times 1$	$9-10 \times 1$	2
$9-10 \times 1$	$10-10 \times 1$	10

وجدير بالإشارة إلى أن هذا النوع من التوصيل الساتلي كان موجهاً للتوصيلات الدائمة عالية السرعة التي توفر وصلة عابرة للقارات ذات قدرة عالية توفر في المقام الأول الخدمات الهاتفية أو حركة البيانات منخفضة المعدل. وكانت هذه الوصلات تُسير في معظم الأحيان عبر محطات أرضية كبيرة تعمل في النطاقات 4/6 GHz حيث تكون اضطرابات الانتشار صغيرة جداً.

وفي الوقت الحالي، تقوم التوصيلات الساتلية ثنائية الاتجاه أساساً بحمل حركة الإنترنت. وتكون هذه التوصيلات لا تناظرية عموماً ولها محطة محورية ترسل تدفقات بمعدلات بتات عالية يمكن أن تستعمل تقنية النفاذ المتعدد بتقسيم التردد (TDM) أو النفاذ المتعدد بتقسيم الزمن (TDMA). وترسل محطات المشتركين بمعدلات أقل بكثير من معدلات المحطة المحورية ولها دورة تشغيل منخفضة. وهذه هي أنواع الأنظمة التي ستستخدم وصلات بترددات أعلى؛ ولتكون قادرة على القيام بذلك على نحو فعال، ستعتمد على تقنيات ACM لتحقيق صبيب موثوق وكفاءة طيفية عالية. وعند ترددات أقل من 20 GHz، تكون الاضطرابات الناجمة عن الانتشار أكثر أهمية بكثير مما هي عليه في النطاقات 4/6 GHz.

2.1 النتائج التجريبية للخصائص الدينامية للخبو الناجم عن المطر

لوحظ أن متوسط ميل الخبو المقدر انطلاقاً من نظام ساتلي في النطاق Ku بلغ 0,24 dB/s². ويعرض الشكل 1 البيانات الإحصائية لميل الخبو المقيسة في نظام اتصالات ساتلية في النطاق Ka في جمهورية كوريا³. وفي هذا الشكل، يشير A إلى عمق الخبو الناجم عن المطر بوحدة dB، ويشير ΔA إلى ميل الخبو بوحدة dB/s، حيث إن $\overline{\Delta A}$ هو متوسط القيمة ΔA . ويبين هذا الشكل أن متوسط ميل الخبو أقل من 1 dB في جميع مديات الخبو.

وتشير دراسة تجريبية تقوم على استخدام منصة الاختبار DVB-S2 وتقنية ACM عبر وصلة ساتلية، في الفقرة E.3 من الوثيقة DVB A171-1⁴، إلى أن ميل الخبو الأقصى المقابل لحالات الأمطار الغزيرة في النطاق Ka لا يتجاوز عادةً 0,5 dB/s، ومن ثم، تعتبر مدة تحديث العروة ACM التي تبلغ ثانية واحدة واقعية في معظم الأوقات. وتتعلق النتائج التجريبية الموضحة هنا بالأنظمة التي تعمل في النطاق Ka. وبالإضافة إلى ذلك، لتقليل عدد تعديلات التشكيل والتشفير (MODCOD)، ونظراً إلى حجم الخطوة المعتاد بين مستويين MODCOD مجاورين بالنسبة لمنصة الاختبار DVB-S2، أُضيف تحالف اسمي قدره 0,3 dB عند أعلى العتبة بالمقارنة مع أسفل العتبة مما أدى إلى تأثير تخلفي.

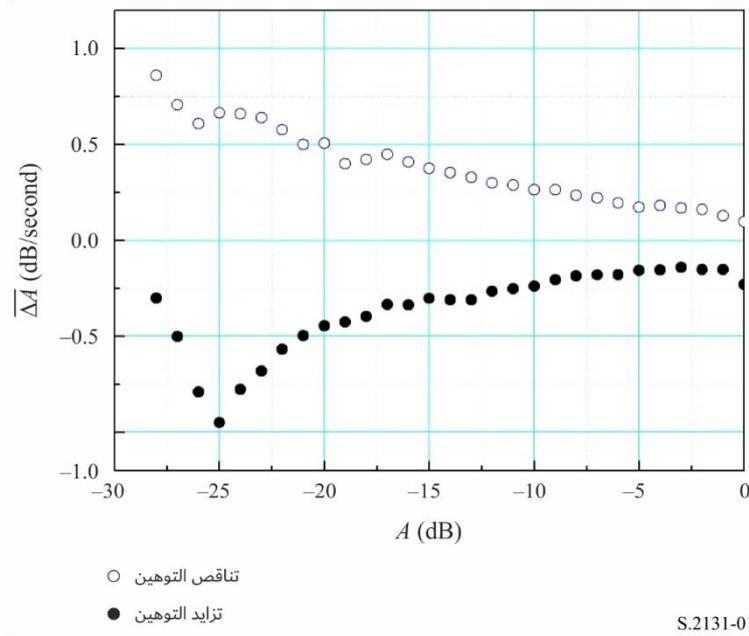
² Sooyoung Kim Shin, Kwangjae Lim, Kwonhue Choi, and Kunseok Kang, "Rain attenuation and Doppler shift compensation for satellite communications", *ETRI Journal*, المجلد 24، رقم 1، فبراير 2002، صفحات 31-42.

³ KMeixiang Zhang and Sooyoung Kim, "A Statistical Approach for Dynamic Rain Attenuation Model," الدورة التاسعة والعشرون للمنتدى AIAA، المؤتمر الدولي لأنظمة الاتصالات الساتلية (ICSSC)، Nara، اليابان، 28 نوفمبر - 1 ديسمبر 2011.

⁴ DVB Document A171-1. Digital Video Broadcasting (DVB), Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1 (DVB-S2)، مارس 2015.

الشكل 1

متوسط ميل الخبو في نظام ساتلي في النطاق Ka



2 معلمات الأداء المنطبقة

1.2 الحاجة إلى أهداف جديدة للأداء من أجل المسيرات HRDP بمعدل بتات متغير

تتناول التوصيات الحالية بشأن الأداء في حالة الخطأ (مثل التوصية ITU-R S.1062-4) المسيرات HRDP بمعدل بتات ثابت وبالتالي فهي لا تنطبق على الأنظمة التي تستخدم تقنيات ACM. ويتمثل جانب مهم لتقنيات ACM في أن خصائص معدل الخطأ في البتات لمختلف الأساليب MODCOD تُظهر انخفاض سريع في معدل الخطأ في البتات فيما يتعلق بالنسبة C/N ، حيث تشير N إلى الضوضاء الكلية في الوصلة، بما في ذلك الضوضاء الحرارية والتداخل. ويبلغ الفرق C/N بين نسبة BER عاملة تبلغ 10^{-8} مثلاً ومعدل BER متدهور يبلغ 10^{-3} حوالي 0,25 dB بالنسبة لحالة MODCOD معينة.

ويُحدد العديد من أهداف الأداء المتعلقة بالأنظمة الساتلية بالنسبة إلى معدل الخطأ في الرزم (PER) في سياق الإرسال بالرمز، وتبين خصائص المعدل PER نفس الانخفاض السريع تقريباً في السلوك كما هو الحال بالنسبة لمعدل الخطأ في البتات. ويعني هذا السلوك أن أداء الساتل من حيث المعدل PER كدالة للوقت لا صلة له بالأنظمة الساتلية التي تستعمل تقنيات ACM علماً أن هذه الأنظمة ستتكيف مع الظروف المتدهورة بتخفيض الصبيب العام وبالتالي، لم تعد أنظمة ذات معدل ثابت. وقد تم النظر بالفعل في مفهوم قياس أداء الوصلات الساتلية التي تستخدم تقنيات ACM استناداً إلى متوسط الصبيب أو انحطاط الصبيب⁵. وتتناول الوثيقة المذكورة في المرجع التطبيقات ACM التي تسمح بانخفاض معدل المعلومات. ويمكن استعمال مفهوم انحطاط الصبيب الوارد في هذا الملحق لتقييم انخفاض معدل المعلومات.

⁵ Gerald Shewan, "Alternative Measure of Performance for Satellite Links Employing Adaptive Coding and Modulation"

الدورة الثلاثون للمنتدى AIAA، المؤتمر الدولي لأنظمة الاتصالات الساتلية (ICSSC-2012)، 24-27، سبتمبر 2012، أوتاوا، كندا.

حيث إن القيمة η هي الكفاءة الطيفية بوحدات bit/s/Hz والقيمة γ هي النسبة C/N التي تساوي في هذه الحالة نسبة الطاقة لكل رمز/كثافة طيفية للضوضاء (E_s/N_0) بوحدة dB.

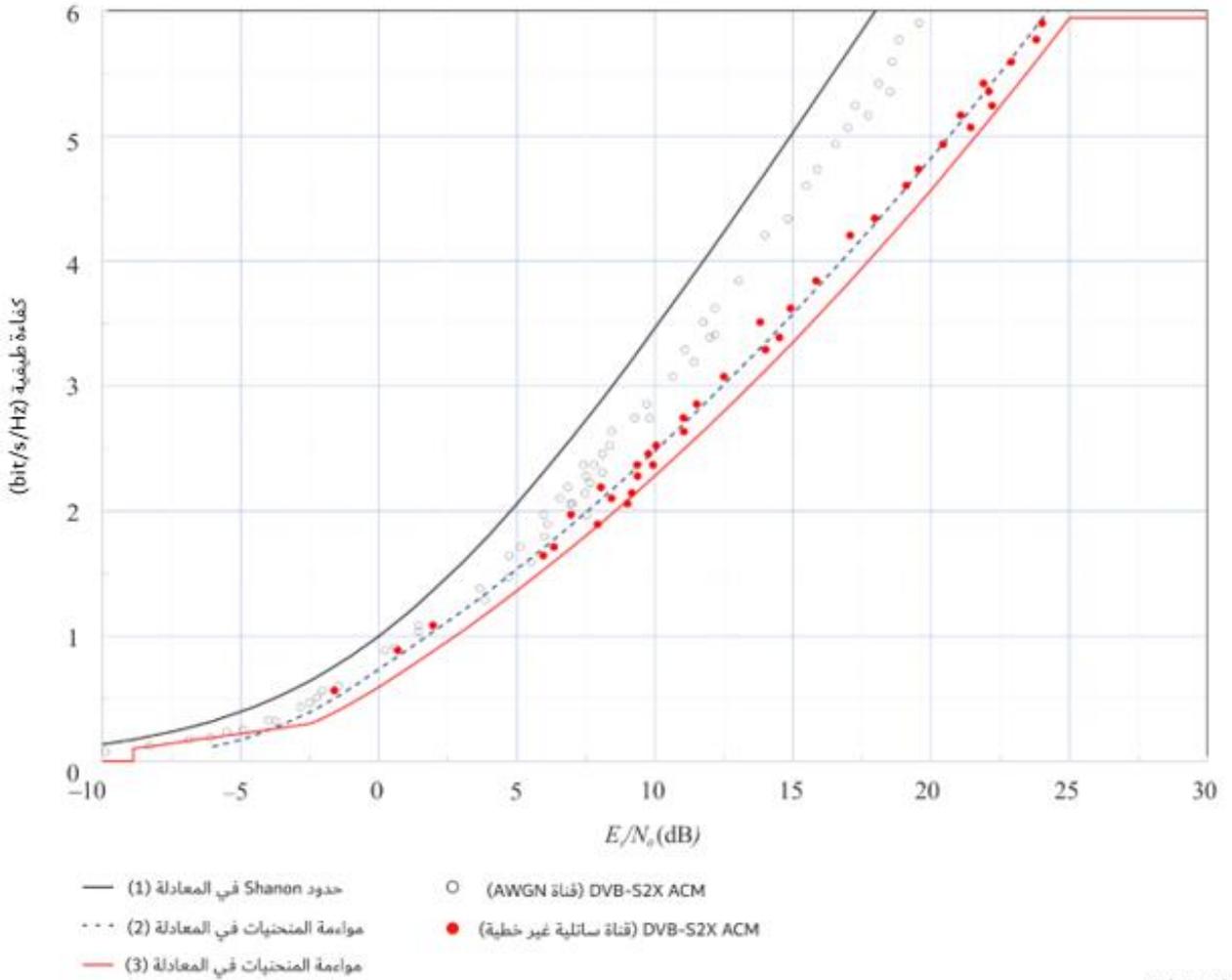
وإذا كان أحد الأنظمة يستخدم تقنيات ACM مع أساليب MODCOD متعددة، يمكن استخلاص القيمة $\eta(\gamma)$ وتحديد هدف الأداء للحفاظ على القيمة $\eta(\gamma)$ مع هامش معيّن من خلال النظر في تغييرات الحالة ACM خلال فاصل زمني يبلغ ثانية واحدة تقريباً. وبالتالي، يمكن أن يستند هدف الأداء إلى الكفاءة الطيفية للنظام التي ينبغي ألا تكون أقل من $\eta(\gamma - 1,0)$ من أجل قيمة معيّنة تبلغ γ بوحدة dB.

ولتوضيح كيفية تطبيق الكفاءة الطيفية لتحديد هدف الأداء، تُستخدم الخصائص DVB-S2X⁸.

وترد في الشكل 2 مقارنة للكفاءة الطيفية للنظامين DVB-S2 و DVB-S2X اللذين يستخدمان تقنيات ACM MODCOD مع حدود Shannon-Hartley.

الشكل 2

مقارنة الكفاءة الطيفية (السعة)



⁸ ينبغي ألا يُعتبر استخدام خصائص النظام DVB-S2X اعترافاً بهذا النظام على حساب تقنية ACM بديلة. واستُخدمت خصائص النظام DVB-S2X لأنها متاحة بحرية في المجال العام واستخدام هذه الخصائص لا يخضع لقيود الملكية الفكرية.

من خلال موازنة الكفاءة الطيفية للنظام DVB-S2X الذي يستعمل تقنيات ACM على قناة ساتلية غير خطية باستعمال متعددتي حدود من الدرجة الثانية لمعرفة الحد الأدنى للخطأ بطريقة المربعات الصغرى، يتم اشتقاق المعادلات التالية⁹:

$$\eta(\gamma) = 0,8181 + 0,1607\gamma + 0,0096\gamma^2 \text{ for } -5 \leq \gamma < 0$$

(2)

$$\eta(\gamma) = 0,7375 + 0,1433\gamma + 0,003\gamma^2 \text{ for } \gamma \geq 0$$

وللحصول على موازنة تقريبية للمنحنى في الجزء السفلي منه، تم تخفيض الثابت 0,8181 في الجزء ($-5 \leq \gamma < 0$ dB) من المنحنى بعامل يتراوح بين 0,08 و 0,7375 بحيث تتم موازنة الأجزاء العليا والسفلى من المنحنى عند نفس القيمة γ من أجل $E_s/N_0 = 0$. وجدير بالإشارة أيضاً إلى أنه في الشكل 2، تبين نقاط المنحنى للنظام DVB-S2X (القناة (AWGN)) في الجزء الأيسر السفلي من الشكل أن اختلاف الكفاءة الطيفية بين القناة AWGN والقناة غير الخطية يقل عند انخفاض القيمة E_s/N_0 إلى ما دون الصفر. وفي المعادلة (2)، حيث يُعدل الحد الثابت في جزء المنحنى من ($-2,5 \leq \gamma < 0$ dB) تمكن زيادة تعديله لتجسيد سلسلة بيانات الكفاءة الطيفية الدنيا. وبالنسبة للجزء الأدنى من المنحنى ($-8,9 \leq \gamma < -2,5$ dB)، يمكن استعمال دالة خطية لنمذجة الأداء. وتجمع النتيجة الإجمالية بين الجزء العلوي من المنحنى والجزء السفلي من المنحنى على أي من جانبي $\gamma = 0$ ، وبإضافة أدنى جزء من المنحنى الموصوف باستعمال دالة خطية، يمكن وصف الكفاءة الطيفية الدنيا لقناة ساتلية غير خطية (DVB-S2X) بواسطة سلسلة من الدوال على النحو التالي:

$$\eta(\gamma) = 0, \text{ for } \gamma < -8,9,$$

$$\eta(\gamma) = 0,030337\gamma + 0,376643, \text{ for } -8,9 \leq \gamma < -2,5,$$

$$\eta(\gamma) = 0,5933 + 0,1415\gamma + 0,0096\gamma^2, \text{ for } -2,5 \leq \gamma < 0,$$

(3)

$$\eta(\gamma) = 0,5933 + 0,1388\gamma + 0,003\gamma^2, \text{ for } 0 \leq \gamma < 25,02$$

$$\eta(\gamma) = 5,944, \text{ for } \gamma \geq 25,02$$

وفي الأنظمة التي تستعمل نسق التأطير DVB-S2X المستمثل لتحقيق نسبة متدنية جداً للموجة حاملة إلى الضوضاء $10(C/N)$ ، ينطبق كامل مدى المعادلة (3). وفي الأنظمة التي لا تستعمل نسق التأطير DVB-S2X المستمثل لتحقيق نسبة متدنية جداً للموجة حاملة إلى الضوضاء (C/N) ، تنطبق المعادلة (3) لقيمة γ دنيا تساوي -3 dB، وفيما دونها $n(\gamma) = 0$.

وفي نسق التأطير DVB-S2X، تبلغ الكفاءة الطيفية العليا لأعلى 5,944 MODCOD bit/s/Hz بما يقابل $\gamma = 25,02$ dB. ولذلك فإن للمعادلة (3) قيمة ثابتة هي 5,944 bit/s/Hz عندما يزيد المتحول γ عن أو يساوي 25,02 dB، لدى النظر في أنظمة ساتلية تستعمل نسق التأطير DVB-S2X، وقد تؤدي مخططات MODCOD الأخرى إلى كفاءات طيفية أعلى، عندما يزيد المتحول γ عن 25,02 dB¹¹.

ويوفر هدف الأداء زيادة قدرها 1 dB بالنسبة لأداء النظام DVB-S2X للسماح بمراعاة الانحطاط في القناة في بيئة تشغيل نمطية.

9 يُستخدم النظام DVB-S2X كمثل لأن هذا المعيار مستعمل على نطاق واسع وخصائصه متاحة في المجال العام. ويمكن القيام بنفس الاشتقاق فيما يخص أي تقنية ACM بديلة.

10 انظر مثلاً المرجع المعنون، Implementation guidelines for the second-generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: S2 Extensions (DVB-S2X), C.2.6.2 Super-frame format 7 صفحة 160.

11 يُستخدم النظام DVB-S2X كمثل لأن هذا المعيار مستعمل على نطاق واسع وخصائصه متاحة في المجال العام. ويمكن القيام بنفس الاشتقاق فيما يخص أي تقنية ACM بديلة.

وفي هذا المثال، يتبين بوضوح من الشكل 2 أنه في وصلة ACM تستخدم النظام DVB-S2X ACM عبر قناة ساتلية غير خطية، يؤدي انخفاض قدره 1 dB في قيمة النسبة C/N إلى انخفاض بنسبة 10% في الكفاءة الطيفية التي يمكن تحقيقها. ولا يمكن التوصل إلى نفس النتيجة بالنسبة للوصلات التي تستخدم توليفات MODCOD مختلفة عن تلك التي يستخدمها النظام DVB-S2X. ويعتمد الانخفاض الفعلي في الكفاءة على القيمة C/N الاسمية قبل الانحطاط.

وكان النظام المقدم كمثال بهذا الصدد قادراً على استيعاب انخفاض يبلغ 1 dB في النسبة C/N ، خلال فاصل زمني مدته ثانية عند تغيير حالة ACM. وهذا الانحطاط في النسبة C/N سيُعزى إلى جميع مصادر الضوضاء الخارجية وإلى الخبو الناجم عن المطر. ويعد الشكل 2 والاستنتاجات المستمدة منه أمثلة لأنظمة تستخدم DVB-S2X، ولكن يمكن تطبيق هذه المنهجية على وصلات ساتلية أخرى تستخدم أنواعاً أخرى من تقنيات ACM.

4.2 انحطاط الصيبي

يسمح استخدام تقنيات ACM في النظام الساتلي بالحفاظ على توصيل ساتلي على الرغم من انحطاط الصيبي ولكن مع توفير قدر أقل من الصيبي. وانحطاط الصيبي الملاحظ عند خرج المسير HRDP للساتل الذي يستخدم تقنيات ACM، يمكن أن يكون ذا صلة بالكفاءة الطيفية من خلال افتراض معقول يفيد بأن الصيبي يتغير بصورة مباشرة مع الكفاءة الطيفية. وعلى أساس هذا الافتراض، يمكن حساب الصيبي كدالة للنسبة C/N التي تتغير تبعاً لظروف الانتشار والتداخل.

وفيما يلي مثال لاستخدام النظام DVB-S2X في وصلة ساتلية تتأثر بالخبو فقط في جنوب فلوريدا بالولايات المتحدة الأمريكية. وباستخدام الطريقة الواردة في التوصية ITU-R P.618، يمكن حساب قيم للنسبة C/N على مدى فترة زمنية معينة تتجاوز القيم التي يمكن الحصول عليها على مدى سنة متوسطة. وعلى سبيل المثال، يبين الشكل 3 القيم المتعلقة بوصلة ساتلية تعمل في النطاق 38,5 GHz في منطقة ذات مناخ مماثل لمناخ جنوب فلوريدا. وبالنسبة للتردد والموقع المفترضين المستعملين لحساب المنحنى الوارد في الشكل 4، وبافتراض هامش قدره 1 dB لاستيعاب أي تداخل ممكن، سيؤدي التوهين إلى عدم تيسر النظام بنسبة 0,3% أي ما يعادل تيسراً بنسبة 99,7%. ويبلغ المدى الدينامي للوصلة المذكورة أعلاه 33 dB.

وتعتمد النسبة المثوية من الوقت التي تتعرض فيها وصلة للخبو فقط بسبب الانتشار وتهدب إلى ما دون أدنى كفاءة طيفية على ما يلي:

- 1 المناخ السائد في موقع محطة الاستقبال الأرضية؛
- 2 شكل الموجة (مثل DVB-S2X، و DVB-S2)، وما إلى ذلك) وتحديد أعلى تشفير (التشفير MODCOD الأقوى) متوفر ينفذه شكل الموجة هذا؛
- 3 المدى الدينامي الذي يعتمد على تصميم النظام. والمدى الدينامي للوصلة هو الفرق بين أقصى نسبة C/N في الوصلة في ظروف انتشار مثلي ونسبة C/N في الوصلة عندما تتسبب ظروف الانتشار في هبوط نسبة C/N إلى النقطة التي تحوي فيها الكفاءة الطيفية لشكل الموجة المستعملة إلى الصفر¹². وإذا لم يكن المدى الدينامي للوصلة كافياً، فقد لا يستوعب المدى الدينامي النظري الكامل لشكل الموجة المستخدم.

وسيتأثر المدى الدينامي الذي يمكن للوصلة أن تعمل فيه بتنفيذ شكل موجة معين للتشفير والتشكيل التكمييين (ACM) وبقدرة المودم في طرف الاستقبال من التوصيل على إزالة تشكيل وفك تشفير حركة ذات نسبة منخفضة جداً للموجة الحاملة إلى الضوضاء (C/N). وعلى هذا النحو، يمكن الوصول إلى نقطة يظل فيها المودم/الكودك محافظاً على التزامن (المواكب للموجة الحاملة)، دون توفر الوصلة، لأن مستوى C/N المستقبل يقل عن مستوى C/N الذي ينفذ فيه التشكيل والتشفير (MODCOD) الأكثر متانة.

12 لهذا الغرض، ينبغي أن تُفهم الكفاءة الطيفية على أنها معدل المعلومات المفيدة، باستثناء شفرات تصحيح الأخطاء التي تدعمها الوصلة.

وعلى الرغم من أن وصلة ساتلية تستعمل تقنيات ACM يمكن أن تحافظ على التوصيل بصيب منخفض، يمكن حساب خسارة الصيب الذي يمكن تحقيقه والمعبر عنه بجزء من الصيب الأقصى خلال نسبة مئوية محددة من الوقت على النحو التالي:

$$(4) \quad \varphi(T\%) = 1 - \frac{\eta(\gamma(T\%))}{\eta_{max}}$$

حيث يشير η_{max} إلى الكفاءة الطيفية القصوى التي يمكن تحقيقها، ويشير $T\%$ إلى النسبة المئوية من الوقت، ويشير $\gamma(T\%)$ إلى النسبة C/N التي يمكن تحقيقها $T\% \leq$ ويشير $\varphi(T\%)$ إلى انحطاط الصيب الذي يمكن تحقيقه.

وبذلك، يمكن حساب خسارة الصيب (φ_{total}) عن طريق دمج الكفاءة الطيفية عددياً خلال الفترة التي يتيسر فيها التوصيل على النحو التالي:

$$(5) \quad \varphi_{total} = \int \left(1 - \frac{\eta(\gamma(T\%))}{\eta_{max}} \right) dT\% \approx \sum \varphi(T\%) \Delta T\%$$

ويمكن الحصول على الكفاءة الطيفية η المقابلة خلال نسبة مئوية محددة من الوقت بإدراج النسبة C/N ، أي القيمة γ في المعادلة (3). ويقدم الجدول 4 مثلاً لحساب أداء الوصلات التي تستخدم تقنيات ACM، وتم حساب هذا الأداء بتحديد متوسط خسارة الصيب φ_{total} فيما يخص الأنظمة الساتلية، على النحو المبين في الشكل 4 وذلك استناداً إلى دالة التوزيع التراكمية للصيب الممكن تحقيقه، $\varphi(T\%)$. وفي هذا المثال، تبلغ $\eta_{max} = \eta(24)$ حوالي 5,653. ويبين الشكل 4 منحنى الكفاءة الطيفية $\eta(\gamma(T\%))$ والتدهور الناجم في الصيب الممكن تحقيقه $\varphi(T\%)$. وفي هذا المثال، يبلغ متوسط خسارة الصيب φ_{total} المقدر باستعمال المعادلة (5) حوالي 4,774% عندما يبلغ المدى الدينامي حوالي 33 dB.

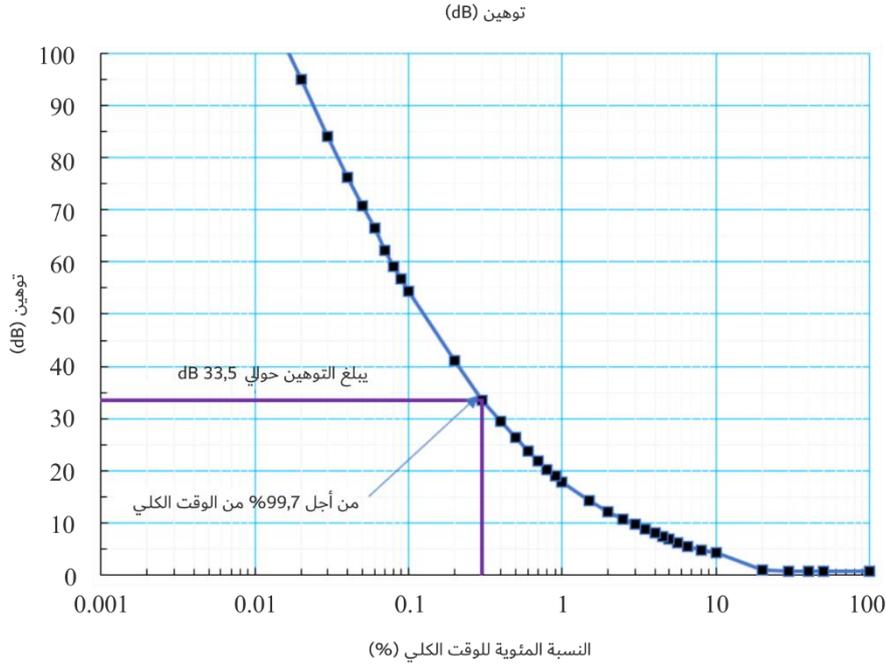
الجدول 4

مثال عن تقدير انحطاط الصبيب

$\phi(T_{\%}) \Delta T_{\%}$	$\Delta T_{\%}$	$\phi(T_{\%})$	$\eta(\gamma(T_{\%}))$	$C/N, \gamma(T_{\%})$ (dB)	إجمالي التوهين (dB)	$T_{\%}$
$0,098 = 0,980 \times 0,1$	0,1	$0,980 = 1 - (0,111/5,653)$	0,111	8,77-	33,5	0,3
$0,096 = 0,959 \times 0,1$	0,1	$0,959 = 1 - (0,234/5,653)$	0,234	4,69-	29,413	0,4
$0,093 = 0,93 \times 0,1$	0,1	0,930	0,397	1,550-	26,227	0,5
0,087	0,1	0,873	0,719	0,885	23,842	0,6
0,082	0,1	0,821	1,011	2,834	21,893	0,7
0,078	0,1	0,775	1,269	4,443	20,285	0,8
0,073	0,1	0,735	1,500	5,803	18,925	0,9
0,349	0,5	0,698	1,707	6,974	17,754	1
0,289	0,5	0,577	2,390	10,540	14,187	1,5
0,248	0,5	0,497	2,844	12,718	12,009	2
0,222	0,5	0,444	3,145	14,093	10,634	2,5
0,201	0,5	0,403	3,376	15,111	9,617	3
0,183	0,5	0,366	3,585	16,011	8,716	3,5
0,168	0,5	0,335	3,759	16,744	7,983	4
0,154	0,5	0,309	3,906	17,357	7,371	4,5
0,172	0,6	0,286	4,034	17,879	6,849	5
0,257	1	0,257	4,198	18,54	6,186	5,6
0,319	1,4	0,228	4,365	19,20	5,524	6,6
0,395	2	0,198	4,535	19,87	4,861	8
0,368	2,2	0,167	4,707	20,529	4,199	10
0,298	2,3	0,130	4,920	21,34	3,392	12,2
0,228	2,5	0,091	5,137	22,14	2,585	14,5
0,156	3	0,052	5,359	22,95	1,778	17
0,122	10	0,012	5,584	23,756	0,972	20
0,025	10	0,003	5,638	23,950	0,778	30
0,013	10	0,001	5,645	23,975	0,753	40
0,000	50	0,000	5,653	24,000	0,727	50
0,000	0	0,000	5,653	24,000	0,727	100
4,774	Φ_{total}					

الشكل 3

التوهين بسبب خسارة الانتشار وفقاً للتوصية ITU-R P.618 من أجل توصيل ساتلي يستخدم تقنيات ACM ويُشغل في منطقة ذات مناخ مماثل لمناخ جنوب فلوريدا، الولايات المتحدة الأمريكية



S.2131-03

بافتراض أن التوصيل الساتلي سيخضع للتوهين بدالة نسبة الوقت الكلي على النحو المبين في الشكل 4، فإن متوسط خسارة الصيب الذي يمكن توقعه سيبلغ 4,774% من إجمالي الصيب الممكن.

$$(6) \quad \text{الصيب} = \text{معدل القناة} \times \text{الوقت}$$

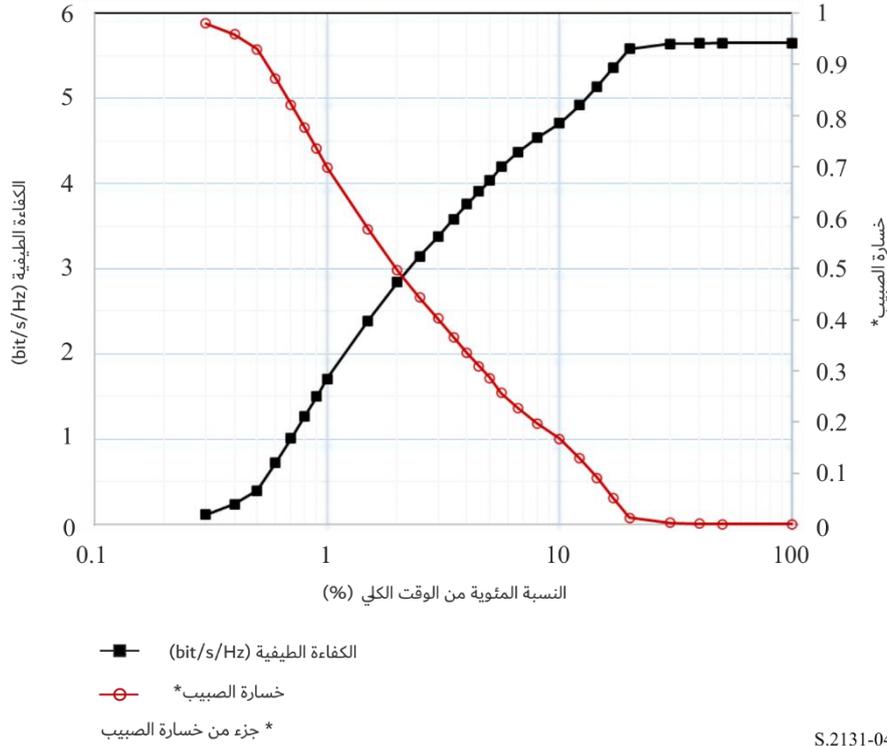
$$(7) \quad \text{خسارة الصيب} = \text{الصيب الأقصى المتيسر} - \text{الصيب المقدم}$$

$$(8) \quad \text{النسبة المئوية لانحطاط الصيب} = (\text{خسارة الصيب} / \text{الصيب الأقصى المتيسر}) \times 100$$

ويرد في المرفق بالملحق مثال لحساب انحطاط الصيب معبراً عنه بالنسبة المئوية.

الشكل 4

الكفاءة الطيفية وخسارة الصبيب* فيما يخص توصيل ساتلي يستخدم تقنيات ACM ويُشغل في منطقة ذات مناخ مماثل لمناخ جنوب فلوريدا، الولايات المتحدة الأمريكية



مرفق
بالملاحق

مثال لحساب انحطاط الصبيب معبراً عنه بالنسبة المئوية

لنفترض أن أفضل تشفير MODCOD ممكن تحقيقه هو الأسلوب 16APSK 77/90. ولنفترض كذلك أن معدل تشكيل القناة هو 34 ميغابود في الثانية. فالجمع بين هاذين الافتراضين يؤدي إلى معدل بتات يبلغ 116,36 Mbit/s. ولنفترض أيضاً أن التوصيل يستخدم رمزاً من 188 بايتة وأن كل بايتة تمثل أثنوناً.

ويرد فيما يلي حساب الصبيب الأقصى المتيسر (MAT_{put}) والصبيب المقدم (DT_{put}) وخسارة الصبيب (LT_{put}) والنسبة المئوية لانحطاط الصبيب ($\%DT_{put}$):

$$(9) \quad MAT_{put} = \text{Maximum Channel Rate (bit/s)} \times \text{Time (s)}$$

$$(10) \quad DT_{put} = \sum \text{Channel Rate (C/N)}_i \text{ (bit/s)} \times \text{Time}_i \text{ (s)}$$

$$(11) \quad LT_{put} = MAT_{put} - DT_{put}$$

$$(12) \quad \%DT_{put} = (LT_{put}/MAT_{put}) \times 100$$

بالنسبة إلى القيم المفترضة:

. باستخدام البيانات المقدمة في الجدول 5 وبافتراض أن معدل القناة يتغير بنفس طريقة الكفاءة الطيفية، فإن قيمة LT_{put} هي $116.36 \text{ Mbit/s} \times 31557600 \text{ s/year} = 3.67 \times 10^{15} \text{ bit}$ or 2.44×10^{12} packets per year (عدد الرزم في السنة).

هي 116.36 Mbit/s ، وصيبب أقصى متيسر $= 2.44 \times 10^{12}$ رزمة في السنة هي 4.774% .

الجدول 5

النسبة المئوية لانحطاط الصيبب من أجل 34 ميغابود في الثانية مع أسلوب 16APSK 77/90 ووزم من 188 أثنوناً، 116.36 Mbit/s ، وصيبب أقصى متيسر $= 2.44 \times 10^{12}$ رزمة في السنة

خسارة الصيبب	$\%DT_{put, \phi}(T\%)$	$\Delta T\%$	$\eta(\gamma(T\%))$	$C/N, \gamma(T\%)$ (dB)	إجمالي التوهين	النسبة المئوية من الوقت
2392300555,55	0,980 = 1-(0,111/5,653)	0,1	0,111	8,77-	33,5	0,3
2338777860,07	0,959	0,1	0,234	4,69-	29,413	0,4
2268593048,04	0,930	0,1	0,397	1,550-	26,277	0,5
2129821586,02	0,873	0,1	0,719	0,885	23,842	0,6
2003692375,24	0,821	0,1	1,011	2,834	21,893	0,7
1892136410,30	0,775	0,1	1,269	4,443	20,285	0,8
1792605325,58	0,735	0,1	1,500	5,803	18,925	0,9
8515408574,43	0,698	0,51	1,707	6,974	17,754	1
7042604485,82	0,577	0,5	2,390	10,540	14,187	1,5
6061899097,19	0,497	0,5	2,844	12,718	12,009	2
5411456009,74	0,444	0,5	3,145	14,093	10,634	2,5
4914264989,65	0,403	0,5	3,376	15,111	9,617	3
4462867228,40	0,366	0,5	3,585	16,011	8,716	3,5
4087795603,11	0,335	0,5	3,759	16,744	7,983	4
3769153208,08	0,309	0,5	3,906	17,357	7,371	4,5
4192406755,67	0,286	0,6	4,034	17,879	6,849	5
6277955694,24	0,257	1	4,198	18,54	6,186	5,6
7780079269,90	0,228	1,4	4,365	19,20	5,524	6,6
9650151891,10	0,198	2	4,535	19,87	4,861	8
8979487209,87	0,167	2,2	4,707	20,529	4,199	10
7269900943,64	0,130	2,3	4,920	21,34	3,392	12,2
5558025750,48	0,091	2,5	5,137	22,14	2,585	14,5
3806209512,79	0,052	3	5,359	22,95	1,778	17
2974051094,53	0,012	10	5,584	23,756	0,972	20
615903898,01	0,003	10	5,638	23,950	0,778	30
308034447,18	0,001	10	5,645	23,975	0,753	40
0,00	0,000	50	5,653	24,000	0,727	50
0,00	0,000	0	5,653	24	0,727	100
116495582824,63						
4,774			Φ_{total}			