التوصيـــة ITU-R S.1062-4

أداء الأخطاء المسموح به في مسير رقمي افتراضي مرجعي لساتل يعمل تحت 15 GHz

(المسألة ITU-R 75-3/4)

(2007-2005-1999-1995-1994)

مجال التطبيق

تلعب الخدمة الثابتة الساتلية (FSS) دوراً هاماً في توفير اتصالات رقمية دولية يعول عليها. ونظراً لاندماجها مع المرافق الخاصة بالأرض، تصمم الوصلة الساتلية بحيث تحقق المتطلبات التي تتوافق مع أنظمة الأرض. وتحدد التوصية ITU-T G.826 أهداف الأداء لقفزة ساتلية في الجزء الدولي من المسير الرقمي الافتراضي المرجعي (HRDP). وتمشياً مع هذه الأهداف، تقدم هذه التوصية توجيهات بشأن أقنعة التصميم لاحتمال الخطأ في البتات (BEP) أو معدل الخطأ في البتات (BER) والتي يمكن أن تتفق بشكل كامل مع متطلبات التوصية ITU-T G.826.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن السواتل العاملة في الخدمة الثابتة الساتلية تؤدي دوراً هاماً في توفير اتصالات دولية رقمية موثوقة؛

ب) أنه يجب لأداء الوصلة الساتلية أن يكون كافياً للسماح بالتقيد بأهداف الأداء الكلي من طرف إلى طرف ومع أهداف نوعية خدمة المستعمل الطرفي؛

ج) أن أداء الوصلة الساتلية مستقل عموماً عن المسافة؛

د) أن التوصية ITU-R S.614، تحدد أهدافاً لأداء الوصلة الساتلية تتقيد بالأهداف المحددة في التوصية ITU-T G.821؛

هـ) أن أداء الأخطاء لمسيرات رقمية افتراضية مرجعية (HRDPs) ولتوصيلات افتراضية مرجعية (HPX) تم تحديدها في التوصية ITU-T G.826؛

و) أن من الضروري في تعريف معايير أداء الأخطاء أن تؤخذ في الاعتبار كل آليات الأخطاء المتوقعة، لا سيما شروط الانتشار المتغيرة والتداخلات في الوقت؛

إذ تلاحظ

أ) أن التوصية ITU-R S.1429 – أهداف أداء الأخطاء الناجمة عن التداخل بين أنظمة مدار السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض (GSO) وأنظمة مدار السواتل غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض (non-GSO) في الخدمة الثابتة الساتلية لمسيرات رقمية افتراضية مرجعية تعمل بصبيب يساوي أو أكبر من الصبيب الأولي الذي يؤمّن الأنظمة المستعملة لترددات تقل عن 15 GHz، تحدد أداء الأخطاء المسموح بها الناجمة عن التداخلات بين الأنظمة الساتلية المختلفة وأن التوصية ITU-R S.1323 – السويات القصوى للتداخل المسموح به في شبكة ساتلية (مدار السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض/الخدمة الثابتة الساتلية؛ وصلات التغذية لمدار السواتل غير المستقرة بالنسبة إلى الأرض في الخدمة المتنقلة الساتلية) في الخدمة الثابتة الساتلية والتي تسببها شبكات أخرى متحدة الاتجاه للخدمة الثابتة الساتلية العاملة تحت 30 GHz، تحدد كيفية حساب هوامش التشغيل بحيث تسمح بالخبو والتداخل على السواء،

توصـــي

1 بأن تصمم الوصلات الساتلية المستقبلية، وحيثما كان ذلك ممكناً، الوصلات الساتلية القائمة في الخدمة الثابتة الساتلية بحيث تستوفي على الأقل مواصفات قفزة لكل ساتل في الجزء الدولي المشار إليه في التوصية ITU-T G.826. وتقدم الملاحظة 1 مثالاً لمجموعة من أقنعة التصميم المستخلصة من معلمات التوصية ITU-T G.826؛

2 بأن من الممكن استعمال المنهجية الموضحة في الملحق 1 من أجل توليد أقنعة الأداء اللازمة والخاصة باحتمال الخطأ في البتات (BEP) (انظر الملاحظة 4) المحددة في الملاحظة 1. ويمكن استعمال المنهجية نفسها بمعدل من 155 Mbit/s من أجل استخلاص القناع المحدد في الملاحظة 2؛

الملاحظة 1 – ينبغي من أجل التقيد التام بمتطلبات التوصية ITU-T G.826، لاحتمال الخطأ في البتات (BEP) مقسوماً على متوسط عدد الأخطاء في الرشقة BEP/α، (انظر الفقرة 3 من الملحق 1) عند الخرج (أي عند أي طرف من توصيل باتجاهين) لمسير رقمي افتراضي مرجعي في الساتل (HRDP) يشكل جزءاً دولياً من توصيل أو مسير على ألاّ يتجاوز أثناء الوقت الكلي، بما في ذلك (أسوأ شهر) أقنعة التصميم المحددة بالقيم الواردة في الجدول 1 وكذلك بأقنعة احتمال الخطأ في البتات (BEP) الواردة في الشكل 4.

3 بأن تعتبر الملاحظات التالية جزءاً من التوصية:

الملاحظة 2 – يستحسن استخدام قناع أكثر صرامة، أو يعتبر من الضروري استخدامه من أجل بعض الخدمات، على الرغم من أن الملاحظة 1 تضمن التقيد التام بالتوصية ITU-T G.826.

الجـــدول 1

معدل البتات (Mbit/s)	النسبة المئوية من الوقت الكلي (أسوأ شهر)	BEP/α
0,064	0,2 10,0	$1,0 \times 10^{-4}$ $1,0 \times 10^{-8}$
1,5	0,2 2,0 10,0	7×10^{-7} 3×10^{-8} 5×10^{-9}
2,0	0,2 2,0 10,0	7×10^{-6} 2×10^{-8} 2×10^{-9}
6,0	0,2 2,0 10,0	8×10^{-7} 1×10^{-8} 1×10^{-9}
51,0	0,2 2,0 10,0	4×10^{-7} 2×10^{-9} 2×10^{-10}
155	0,2 2,0 10,0	1×10^{-7} 1×10^{-9} 1×10^{-10}

في هذه الحالة، ينبغي للمعدل BEP عند الخرج (أي عند أي طرف من توصيل باتجاهين) لمسير HRDP ساتلي يشغل بالمعدل الأولي أو بمعدل أعلى بما في ذلك معدل 155 Mbit/s ألا يتجاوز أثناء الوقت الكلي (أسوأ شهر) قناع التصميم المحدد بالقيم الواردة في الجدول 2:

الجـــدول 2

النسبة المئوية من الوقت الكلي (أسوأ شهر)	BEP/α	من أجل α = 10 (BEP)
0,2	10×1^{-7}	10×1^{-6}
2	10×1^{-9}	10×1^{-8}
10	10×1^{-10}	10×1^{-9}

الملاحظة 3 – تحدد مواصفات المسير HRDP المشار إليه في هذه التوصية، في التوصية ITU-R S.521.

الملاحظة 4 – ينبغي أن تقدر معدلات BER المحددة في الملاحظتين 1 و2 على فترة من الوقت طويلة بما يكفي لتوفير تقدير جيد للاحتمال BEP. ويقدم الملحق 1 بالتوصية ITU-R S.614 طريقة لقياس المعدل BER بدلالة النسبة المئوية من الوقت.

الملاحظة 5 – لتسهيل تطبيق هذه التوصية، يعبر عن القيم المقابلة للأهداف المشار إليها في الملاحظتين 1 و2 بالوقت الكلي، وتمثل هذه القيم حدود نموذج لأداء احتمال الخطأ في البتات (BEP) يستخدم الطريقة المشار إليها في الملحق 1. وقد استثنيت من قيم هذه الأهداف الأخطاء التي تحدث أثناء وقت عدم التيسر وذلك للوصول إلى الأهداف المذكورة في الملاحظتين 1 و2. وتقدم الملاحظة 7 تفسيراً للعلاقة بين وقت التيسر والوقت الكلي. ولا تعتبر الأهداف الخاصة بالمعدلات BEP المحددة في الملاحظة 1 هي الوحيدة التي تستوفي متطلبات التوصية ITU-T G.826. فيمكن للمصمم أن يستعمل، عند الحاجة، مجموعات أخرى من الأهداف طالما كانت هذه المجموعات تستوفي متطلبات التوصية ITU-T G.826.

الملاحظة 6 – يكون التطبيق الأولي لهذه التوصية في الأنظمة الساتلية العاملة تحت 15 GHz. ويشكل توسيع متطلبات الأداء المشار إليها في هذه التوصية على أنظمة تعمل عند ترددات أعلى موضع دراسة لاحقة.

الملاحظة 7 – تبدأ فترة من وقت عدم التيسر بعد انقضاء أحداث متتالية من الثواني شديدة الخطأ (SES) التي يبلغ عددها عشر ثوانٍ. وتعتبر هذه الثواني العشر جزءاً من وقت عدم التيسر. وتبدأ فترة جديدة من وقت التيسر بعد انقضاء فترة من 10 ثوان لا تتضمن عدداً كبيراً من الأخطاء المتتالية. وتعتبر هذه الثواني العشر جزءاً من وقت التيسر. ويمكن تحديد قيم عتبات عدم التيسر فيما يتعلق بالاحتمال BEP حيث يتم تحقيق حالة عدم التيسر بنسبة احتمال تساوي 0,5، كما هو موضح في الشكل 3.

الملاحظة 8 – يعبر عن الأهداف المشار إليها في الملاحظتين 1 و2 بالنسبة المئوية من الشهر الأسوأ. وتقابل هذه النسب المئوية الشهرية النسب المئوية السنوية التالية:

- 10% من الشهر الأسوأ 4,0% من السنة؛
- 2% من الشهر الأسوأ 0,6% من السنة؛
- 0,2% من الشهر الأسوأ 0,04% من السنة.

الملاحظة 9 – من أجل التقيد بالملاحظتين 1 و2 عند ترددات أكبر من 10 GHz، قد يكون من المفيد استعمال إجراءات مضادة للخبو تشمل التشفير التكييفي مع تصحيح أمامي للخطأ (FEC) والتحكم في القدرة أو اختلاف المواقع. ويقدم الملحق 1 بالتوصية ITU-R S.522 معلومات حول التشغيل باختلاف المواقع.

الملاحظة 10 – ترتكز الطريقة المفضلة للتحقق من أداء الوصلات الرقمية الساتلية على القياسات في الخدمة. وقد تستعمل هذه القياسات مخططات كشف الأخطاء في الفدرات التي ترتبط بقد الفدرة الملازمة وببنية نظام الإرسال. ويؤثر التصحيح الأمامي للخطأ FEC والتخليط والتشفير التفاضلي في تفسير القياسات (انظر الفقرة 3 من الملحق 1).

الملاحظة 11 – وضع أداء الأخطاء الموضح في الملاحظتين 1 و2 على أساس استعمال مسير HRDP في الجزء الدولي من الوصلة (أي بوابة الخط الدولي المبدل إلى بوابة رأس الخط الدولي المبدل). وثمة تطبيقات ممكنة أخرى للمسير HRDP داخل التوصيل (من مكتب إلى مكتب، مثلاً) ويمكن ضبط أهداف أداء الأخطاء وفقاً لذلك.

الملاحظة 12 – يمكن تطبيق الطرائق الموضحة في هذه التوصية على تصميم الوصلات الساتلية في الشبكات الخاصة. ويتم الاتفاق عادة على أهداف الأداء بين مشغل الشبكة ومستعمل الشبكة عن طريق اتفاق على مستوى الخدمة (SLA) كما هو محدد في التوصية ITU-T E.800.

الملاحظة 13 – ينبغي بلوغ أهداف الأداء لمعدل الإرسال المطلوب وليس بالضرورة لأي معدل أعلى من معدل دعم تعدد الإرسال أو تصحيح الخطأ. وعلى سبيل المثال، إذا كان معدل الإرسال على وصلة ساتلية يبلغ 6 Mbit/s ومعدل الإرسال المتعاقد عليه المحدد في الاتفاق على مستوى الخدمة يبلغ 2 Mbit/s، ينبغي تطبيق أهداف الأداء للإرسال بمعدل 2 Mbit/s.

الملحق 1

1 اعتبارات عامة، وتاريخ وتعاريف معلمات وأهداف التوصية ITU-T G.826

ترد متطلبات التوصية ITU-T G.826 من حيث الفدرات الخطأ لا من حيث الأخطاء الفردية في البتات.

والغرض من هذه الخاصية هو السماح بالتحقق من الالتزام بمتطلبات أداء التوصية ITU-T G.826 أثناء الخدمة. ولخاصية الأداء من حيث الأخطاء في الفدرات لا من حيث الأخطاء في البتات عواقب هامة بالنسبة للأنظمة التي تحدث فيها الأخطاء في زمر، مثل الأنظمة التي تستعمل التخليط والتصحيح الأمامي للأخطاء (FEC). والفدرة المستعملة في التوصية ITU-T G.826 هي زمرة من البتات المتلاصقة التي تشكل عادة فدرة المراقبة أو رتل المراقبة الملازمين لنظام الإرسال المستعمل.

تغطي التوصية ITU-T G.826 – المعلمات والأهداف المتعلقة بخصائص الخطأ من طرف إلى طرف من أجل التوصيلات والمسيرات الرقمية بمعدل بتات منتظم، نمطين من أنظمة النقل بالتفصيل ويمكن توسيعها لتشمل أنماطاً أخرى من الأنظمة عند الضرورة. وهذان النمطان هما:

- تراتب رقمي متقارب التزامن (PDH) من 64 kbit/s إلى معدل أولي؛
- تراتب رقمي متزامن (SDH) من معدل أولي إلى 500 3 Mbit/s.

أضيفت السرعات الأولية الفرعية في عام 2002 لتسهيل وضع الأنظمة على هذه السرعات. إلا أنه للمحافظة على استقرار تشغيل هذه القاعدة العريضة من أنظمة PDH تم الاتفاق على عدم تغيير التوصية ITU-T G.821 القائمة منذ فترة طويلة، والتي تطبق على هذه الأنظمة.

ووفقاً لمصطلح SDH، يشار إلى دارة من طرف إلى طرف بتعبير مسير.

ووفقاً لمصطلح PDH، يشار إلى دارة من طرف إلى طرف بتعبير وصلة.

يحدد أداء نظام النقل من حيث معلمات يطلق عليها الثواني الخطأ (ES) والثواني شديدة الخطأ (SES) في كل من التراتب الرقمي متقارب التزامن والتراتب الرقمي المتزامن على أن يصحب SDH معلمة إضافية يطلق عليها أخطاء الفدرة لإعطاء استبانة أكبر لسرعات الإرسال العالي. ومدة هذه الفدرات أقل بكثير من ثانية واحدة.

وفدرة التراتب الرقمي المتزامن التي يتوقف قدها على سرعة الإرسال، هي مجموعة متتالية من البتات التي قد لا تكون متجاورة إذا تشابكت الفدرة مع حدود حاوية معينة، على سبيل المثال.

1.1 تعاريف مستمدة من التوصية ITU-T G.826

1.1.1 الأحداث المتعلقة بأداء الخطأ في المسيرات

– *الفدرة الخطأ (EB)*

فدرة تتضمن بتة خطأ أو أكثر.

– *الثانية الخطأ (ES)*

فترة من ثانية واحدة تتضمن فدرة خطأ أو أكثر (EBs).

– *الثانية شديدة الخطأ (SES)*

فترة من ثانية واحدة تشتمل على ≥30% من الفدرات الخطأ أو خطأ واحداً على الأقل (انظر التوصية ITU-T G.826 للاطلاع على تعريف الأخطاء).

ويجدر ملاحظة أن الثواني شديدة الخطأ (SES) تشكل مجموعة فرعية للثواني الخطأ (ES).

– *خطأ الفدرة الخلفية (BBE)*

خطأ فدرة (EB) لا يحدث كجزء من ثانية شديدة الخطأ (SES).

2.1.1 الأحداث المتعلقة بأداء الخطأ في التوصيلات

– *الثانية الخطأ (ES)*

فترة من ثانية واحدة تشتمل على بتة خطأ أو أكثر يكتشف خلالها خسارة في الإشارة أو في إشارة دلالة الإنذار.

– *الثانية شديدة الخطأ (SES)*

فترة من ثانية واحدة تتضمن معدل خطأ في البتات قدره $\geq 10^{-3}$.

2.1 المعلمات

ينبغي عدم تقييم أداء الخطأ إلا إذا كان المسير أو التوصيلة في حالة تيسر. انظر الملاحظة 7 والملحق ألف بالتوصية ITU-T G.826 للاطلاع على تعريف معيار الدخل/الخرج في حالة عدم التيسر.

– *نسبة الثواني الخطأ (ESR)*

نسبة الثواني الخطأ إلى الثواني الكلية في وقت التيسر أثناء فاصل محدد للقياس.

– *نسبة الثواني شديدة الخطأ (SESR)*

نسبة الثواني شديدة الخطأ إلى الثواني الكلية في وقت التيسر أثناء فاصل محدد للقياس.

– *نسبة خطأ الفدرة الخلفية (BBER)*

نسبة الفدرة الخطأ (EB) إلى إجمالي الفدرات أثناء فاصل قياس محدد، باستثناء جميع الفدرات التي تظهر أثناء الثواني شديدة الخطأ ووقت عدم التيسر.

3.1 فدرات المراقبة

يوضح الجدول 3 قد الفدرة وعدد الفدرات/الثانية بالنسبة لمعدلات الإرسال المختلفة.

الجـــدول 3

العلاقة بين معدل البتات وقد الفدرات وعدد الفدرات/الثانية

معدل البتات (Mbit/s)	قد الفدرات (bits)	عدد الفدرات/الثانية
1,544	4 632	333
2,048	2 048	1 000
6,312	3 156	2 000
44,736	4 760	9 398
51,84	6 480	8 000
155,52	19 440	8 000

4.1 أهداف الأداء

ترد أهداف الأداء من طرف إلى طرف المحددة في التوصية ITU-T G.826 في الجدول 4 لأغراض الملاءمة. وتعرض أهداف الأداء بدلالة معدل البتات في نظام الإرسال. ويعرض أيضاً مدى قد الفدرات المطابقة لمعدلات البتات هذه. وكما أشير إليه أعلاه، يكون قد الفدرات هو الحجم المصاحب لبنية الرتل في نظام الإرسال. وتحدد هذه الأهداف من أجل وقت التيسر.

الجـــدول 4

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

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

[1] ليس من المطلوب تطبيق هذه الأهداف على التجهيزات المصممة قبل عام 2003. وترد أهداف الأداء بالنسبة لهذه التجهيزات في التوصية ITU-T G.821.

[2] المسير VC-4-4c كما هو معرّف حالياً (التوصية ITU-T G.707) هو مسير بمعدل 601 Mbit/s مع قد للفدرة قدره 168 75 بتة في الفدرة. ولما كان قد الفدرة يقع خارج المدى الموصى به لمسيرات من 160 إلى 500 3 Mbit/s، فإن الأداء على المسيرات VC-4-4c يقع خارج نطاق هذا الجدول. وهدف النسبة BBER للمسير VC-4-4c الذي يستعمل قداً للفدرة من 168 75 بتة هو 4×10^{-4}.

[3] وأهداف نسبة الثواني الخطأ (ESR) تميل إلى خسارة دلالتها عند معدل بتات مرتفع ولذلك فهي غير محددة لمسيرات تعمل فوق 160 MBit/s. غير أنه، لأغراض الصيانة، ينبغي تطبيق مراقبة الثانية الخطأ (ES).

[4] بالنسبة للأنظمة المصممة قبل عام 1996، يقدر هدف معدل نسبة خطأ الفدرة الخلفية بزهاء 3×10^{-4}.

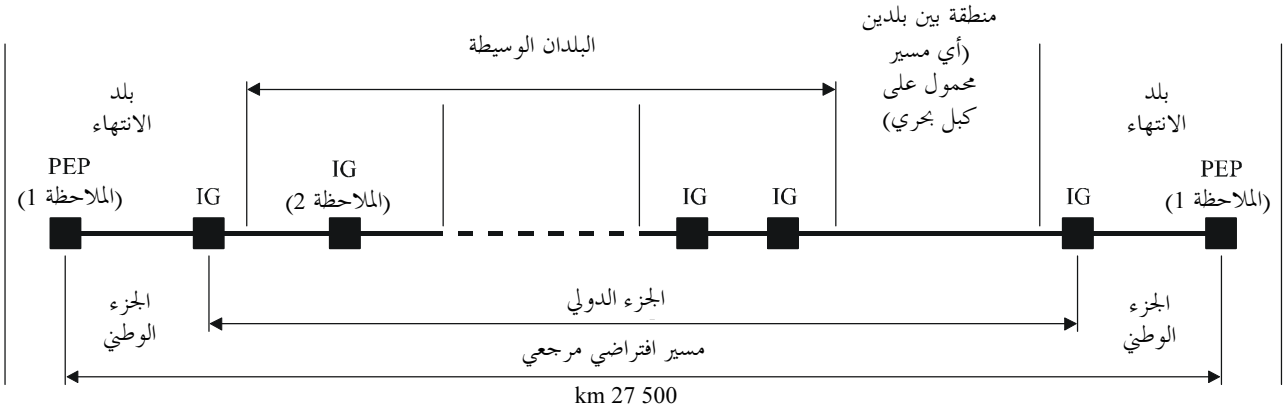
يمكن أن تستعمل المسيرات والتوصيلات الرقمية العاملة بمعدل بتات تغطيه هذه التوصية أنظمة إرسال تعمل بمعدل بتات أعلى. ويجب أن تصمم هذه الأنظمة وتنفذ الأهداف الرامية إلى دعم الأهداف من طرف إلى طرف المرتبطة بالروافد الحالية والمتوقعة. وعلى افتراض توزيع الخطأ العشوائي، ينبغي أن يضمن استيفاء الأهداف الموزعة في الجدول 1 من التوصية ITU-T G.826 بالنسبة لأنظمة معدل البتات المرتفعة، أن جميع الروافد ستحقق أهدافها.

5.1 توزيع الأهداف من طرف إلى طرف بين أجزاء المسير

توزع أهداف الأداء من طرف إلى طرف بين الأجزاء الوطنية والدولية لمسير رقمي افتراضي مرجعي باستعمال مبادئ التوزيع الوارد تفصيلها في التوصية ITU-T G.828 (انظر الشكل 1).

الشـــكل 1

مسير رقمي افتراضي مرجعي (HRDP)



IG: بوابة دولية

PEP: نقطة طرف المسير

الملاحظة 1 – إذا اعتبرنا أن المسير ينتهي عند البوابة الدولية، يطبق توزيع الجزء الدولي فقط.

الملاحظة 2 – يمكن أن يحدد البلد الوسيط بوابة دولية أو بوابتين دوليتين (للدخل أو الخرج).

الملاحظة 3 – يُفترض في هذه التوصية أن عدد البلدان الوسيطة يبلغ "أربعة بلدان" في حالة الوصلة للأرض، وكذلك وجود قفزة لكل ساتل.

6.1 التوزيعات على السواتل

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.

وهذا الأمر يتناقض مع التوزيعات الواردة في التوصية ITU-T G.821، حيث تختلف التوزيعات بالنسبة للثانية الخطأ (ES) والثانية شديدة الخطأ (SES). ولا يوزع على السواتل سوى 20% من الأهداف من أجل الثانية الخطأ في الجزء الدولي لكن توزيع الثانية الخطأ من طرف إلى طرف يكون أعلى بمقدار 0,04 بحيث يكون الأداء المطلوب من الوصلة الساتلية مشابهاً للغاية. بالنسبة للثواني شديدة الخطأ، لا يبلغ التوزيع على السواتل سوى 15% من 0,002 أي زهاء 0,0003.

ترد في الجدولين 5 و6 أهداف الأداء للسواتل التي تؤمن لأجزاء مسير رقمي افتراضي مرجعي أو توصيل افتراضي مرجعي يبلغ km 27 500.

الجـــدول 5

أهداف أداء ساتل من أجل الجزء الدولي

المعدل (Mbit/s)	0,064 إلى 1,5	1,5 إلى 5	> 5 إلى 15	> 15 إلى 55	> 55 إلى 160	> 160 إلى 3 500
نسبة الثواني الخطأ	0,014	0,014	0,0175	0,0262	0,056	لا تنطبق
نسبة الثواني شديدة الخطأ	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007
نسبة خطأ الفدرة الخلفية	لا تنطبق	$0,7 \times 10^{-4}$	$0,7 \times 10^{-4}$	$0,7 \times 10^{-4}$	$0,7 \times 10^{-4}$	$0,35 \times 10^{-4}$

الجـــدول 6

أهداف أداء ساتل من أجل الجزء الوطني

المعدل (Mbit/s)	0,064 إلى 1,5	1,5 إلى 5	> 5 إلى 15	> 15 إلى 55	> 55 إلى 160	> 160 إلى 3 500
نسبة الثواني الخطأ	0,0168	0,0168	0,021	0,0315	0,0672	لا تنطبق
نسبة الثواني شديدة الخطأ	0,00084	0,00084	0,00084	0,00084	0,00084	0,00084
نسبة خطأ الفدرة الخلفية	لا تنطبق	$0,84 \times 10^{-4}$	$0,84 \times 10^{-4}$	$0,84 \times 10^{-4}$	$0,84 \times 10^{-4}$	$0,42 \times 10^{-4}$

إذا يسّر ساتل ما المسير بالكامل أو توصيلة من طرف إلى طرف حينئذ تنطبق الأهداف الواردة في الجدول 4.

2 اشتقاق أقنعة احتمال الخطأ في البتات (BEP)

تعتبر مجموعة المعلمات والأهداف المعرَّفة في التوصية ITU-T G.826 غير مناسبة في تصميم نظام ساتلي. ويجب أن تحول إلى توزيع احتمال الخطأ في البتات وفقاً لنسبة مئوية من الوقت، يطلق عليها أيضاً قناع احتمال الخطأ في البتات، على نحو يجعل أي نظام ساتلي مصمم للاستجابة لهذا القناع يستجيب أيضاً لأهداف هذه التوصية. غير أن هذا التحويل لا يؤدي إلى قناع وحيد.

1.2 احتمال الأحداث الأساسية

من المعروف تماماً أن أخطاء الإرسال عبر الوصلات الساتلية تحدث على شكل رشقات، حيث يكون متوسط عدد الأخطاء لكل رشقة، ضمن جملة عوامل أخرى، دالة للمخلط ولشفرة تصحيح أمامي للخطأ (FEC). وبناء على ذلك، ينبغي أن يراعي النموذج الناجح بأداء رقمي عبر الوصلات الساتلية طبيعة هذه الرشقات. ويعتبر توزيع Neyman-A الساري نموذجاً إحصائياً يمكنه أن يمثل الحدوث العشوائي للرشقات تمثيلاً ملائماً، حيث يقدم احتمال حدوث k من الأخطاء في N بتة، $P(k)$، على النحو التالي:

$$P(k) = \frac{\alpha^k}{k!} e^{-\frac{BEP \cdot N}{\alpha}} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{j^k}{j!} \left(\frac{BEP \cdot N}{\alpha} \right)^j e^{-j\alpha} \quad (1)$$

حيث:

α: متوسط عدد البتات الخطأ في رشقة أخطاء

BEP: احتمال الخطأ في البتات.

إذا كانت $N_B = N$ مأخوذة على اعتبار أنها تمثل عدد البتات في فدرة معطيات، فإن احتمال عدم وجود خطأ في فدرة معينة يكون على النحو التالي:

$$P(0) = e^{-\frac{BEP \cdot N_B}{\alpha}} \sum_{j=0}^{\infty} \left[\left(\frac{BEP \cdot N_B}{\alpha} \right)^j \Big/ j! \right] e^{-j\alpha} \cong e^{-\frac{BEP \cdot N_B}{\alpha}} \quad (2)$$

لجميع القيم العملية لمتوسط عدد البتات الخطأ α.

ويعبر عن احتمال وقوع الفدرة الخطأ، P_{EB}، بالمعادلة التالية:

$$P_{EB} = 1 - P(0) = 1 - e^{-\frac{BEP \cdot N_B}{\alpha}} = 1 - e^{-N_B \cdot BEP_{CRC}} \quad (3)$$

حيث $BEP_{CRC} = BEP/\alpha$. ويمكن التعبير عن ثانية خطأ، P_{ES}، بالمعادلة التالية:

$$P_{ES} = 1 - e^{-n \cdot P_{EB}} \quad (4)$$

حيث n هو عدد الفدرات/الثانية.

ولما كان احتمال حدوث عدد k من الفدرات الخطأ في مجموع n من الفدرات، $P_{n,k}$، يُعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$P_{n,k} = \frac{n!}{(n-k)!\,k!} (1 - P_{EB})^{n-k} P_{EB}^k \quad (5)$$

فإن احتمال وقوع ثانية شديدة الخطأ ، P_{SES}، يكون على النحو التالي:

$$P_{SES} = \sum_{k=0.3n}^{n} P_{n,k} = 1 - \sum_{k=0}^{0.3n-1} P_{n,k} = 1 - \sum_{k=0}^{0.3n-1} \frac{n!}{(n-k)!k!} (1 - P_{EB})^{n-k} P_{EB}^k \quad (6)$$

2.2 حساب معلمات التوصية ITU-T G.826 لقناع معين للتوزيع التراكمي لاحتمال الخطأ في البتات

انطلاقاً من التعريف الأصلي لمعلمات التوصية ITU-T G.826، يمكن صياغة التعابير التالية لحساب قيم ESR وSESR وBBER:

$$ESR = \frac{N_{ES}}{N} \quad (7)$$

$$SESR = \frac{N_{SES}}{N} \quad (8)$$

$$BBER = \frac{N_{EB}}{N_B} \quad (9)$$

حيث:

N_{ES}: عدد الثواني الخطأ في وقت التيسر

N_{SES}: عدد الثواني شديدة الخطأ في وقت التيسر

N_{EB}: عدد الفدرات الخطأ في وقت التيسر، باستثناء الثواني شديدة الخطأ

N_B: عدد الفدرات في وقت التيسر، باستثناء الثواني شديدة الخطأ

N: العدد الكلي للثواني أثناء وقت التيسر.

ويمكن تطبيق تقريب التردد النسبي المعتاد للاحتمالات على التعابير السابقة للحصول على القيم التالية:

$$ESR \cong P_{ES} \tag{10}$$

$$SESR \cong P_{SES} \tag{11}$$

$$BBER \cong P_{EB} \tag{12}$$

وينبغي تفسير الاحتمالات السابقة على اعتبارها احتمالات متوسطة في فاصل الملاحظة المعني. وفي الممارسة، يجب تقييم هذا المتوسط في الوقت المناسب. ولذلك، فإذا افترضنا ملاحظة احتمال خطأ في البتات عشوائي في كل ثانية، يمكننا تحديد احتمالات وقوع الأحداث الأساسية وفقاً للوقت وعندئذ حساب قيمتها المتوسطة باستعمال المعادلات التالية:

$$ESR = \frac{\int_{T_a} P_{ES}(t)\,\mathrm{d}t}{T_a} \tag{13}$$

$$SESR = \frac{\int_{T_a} P_{SES}(t)\,\mathrm{d}t}{T_a} \tag{14}$$

ولحساب استثناء الثواني شديدة الخطأ في نسبة خطأ الفدرة الخلفية، تجرى العملية التالية:

$$BBER = \frac{\int_{T_a} P_{EB}(t)\,\frac{1 - P_{SES}(t)}{1 - SESR}\,\mathrm{d}t}{T_a} \tag{15}$$

حيث T_a هو وقت التيسر.

ويمكن حساب القيم المتوسطة في الوقت عن طريق التعابير المكافئة وفقاً لدالة التوزيع التراكمي من أجل BEP/α، وهي $F(x)$. وتوضح فيما يلي طريقة حساب SES:

$$\frac{1}{T_a} \int_{T_a} P_{ES}(t)\,\mathrm{d}t = \int_0^{BEP_{th}/\alpha} P_{ES}(x)\,\mathrm{d}F(x) \tag{16}$$

حيث BEP_{th}/α هي قيمة العتبة التي يُعتبر فوقها النظام غير متيسر. وتنطبق المشتقات التماثلية على المعلمات الأخرى.

ولإجراء حساب رقمي، يمكن استعمال تقريب منفصل على النحو التالي:

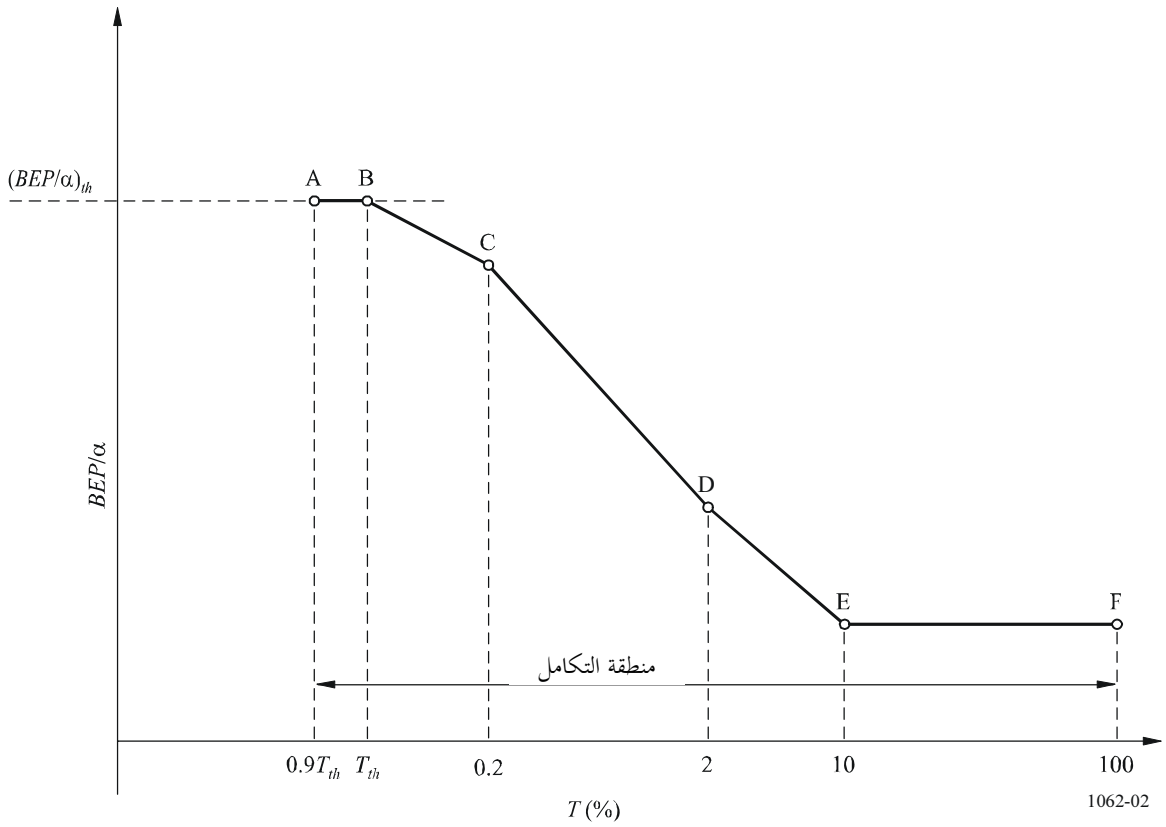
$$\frac{1}{T_a} \int_{T_a} P_{ES}(t)\,\mathrm{d}t \cong \sum_i P_{ES}(x_i)\,[F(x_{i+1}) - F(x_i)] \tag{17}$$

حيث يحسب التجميع للقيم x_i عند BEP/α تحت BEP_{th}/α.

ولتحقيق أهداف أداء التوصية ITU-T G.826 يمكن أن نجد عدداً غير محدود من التوزيعات التراكمية BEP/α، $F(x)$. وذلك، يفترض أن يكون لقناع $F(x)$ الصورة الواردة في الشكل 2. ويجدر ملاحظة أنه يمكن التعبير عن $F(x)$ كنسبة مئوية من الوقت الذي لا تتجاوز فيه BEP/α القيمة x ولذلك ينبغي أن تقرأ $F(x)$ على اعتبارها مكملاً لقيم المحور الأفقي في الشكل 2.

الشـــكل 2

الشكل العام للقناع

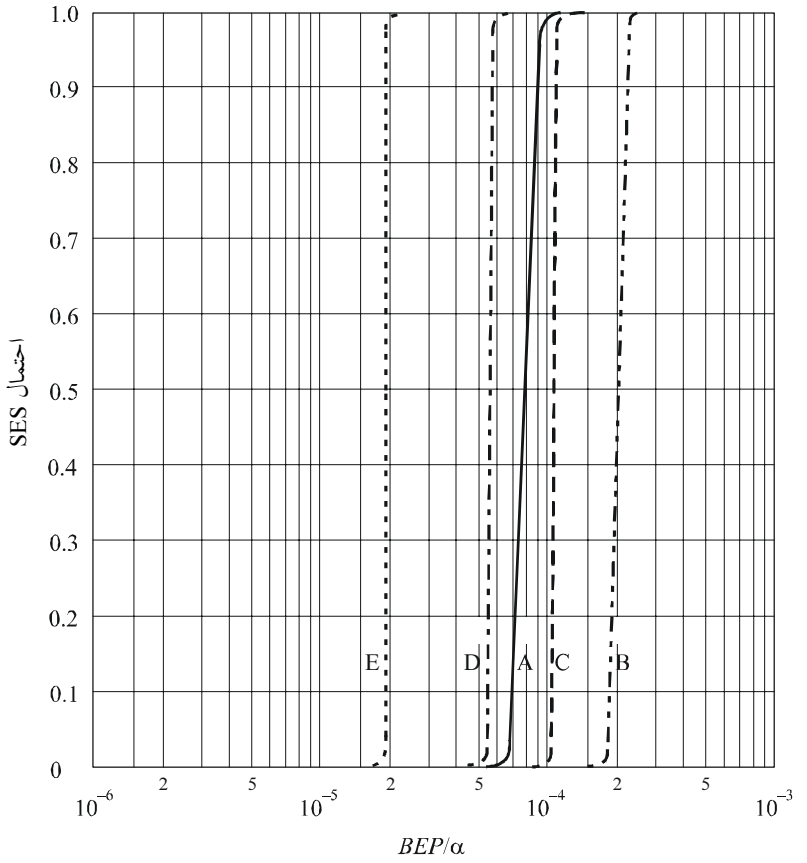


يحدد الوقت المقابل لعتبة عدم التيسر T_{th} بالقيمة P_{SES} = 0,933. وتقابل هذه القيمة احتمالاً بنسبة تبلغ 0,5 بحيث تحدث عشر ثوانٍ شديدة الخطأ بشكل متتال.

يتضمن الشكل 3 قيم BEP_{th}/α المقابلة فيما يتعلق بمعدلات بتات مختلفة، وترد هذه القيم أيضاً في الجدول 7.

الشـــكل 3

BEP/α بدلالة P_{SES}



A: 1.5 Mbit/s
B: 2 Mbit/s
C: 6 Mbit/s
D: 51 Mbit/s
E: 155 Mbit/s

1062-03
(180153)

الجـــدول 7

BEP_{th}/α	معدل البتات (Mbit/s)
$3-10 \times 3$	0,064
$5-10 \times 9{,}00$	1,544
$4-10 \times 1{,}90$	2,048
$4-10 \times 1{,}17$	6,432
$5-10 \times 5{,}68$	51,84
$5-10 \times 1{,}89$	155,52

عند اختيار القيمة BEP_{th}/α من أجل توليد الأقنعة، ينبغي، مع ذلك، الانتباه إلى أن المودمات تخضع لخسارة التزامن عند عتبة معينة للقيمة BEP، تعرّف هنا بالقيمة BEP_{mod}. واستناداً إلى ما سبق، تعطى قيمة BEP_{th}/α التي يجب استعمالها بالصيغة التالية:

$$BEP_{th}/\alpha = -\min\left(BEP_{th}/\alpha \text{ of Table 7}; BEP_{mod}/\alpha\right)$$

بالنسبة إلى معظم المودمات العاملة حالياً، تشكل القيمة 1×10^{-3} تقارباً جيداً للقيمة BEP_{mod}.

ستؤدي الطريقة المذكورة أعلاه إلى توليد عدد غير محدود من الأقنعة التي تستوفي أهداف الأداء الواردة في التوصية ITU-T G.826. وبالتالي، تستعمل العملية التالية لتعريف قناع معين وتحديد النقاط C وD وE وF للقناع (انظر الشكل 2).

الخطوة 1 – تثبيت قيم القناع عند 100% و10% و2% و0,2% من الوقت (النقاط C وD وE وF).

الخطوة 2 – تحديد القيمة BEP_{th}/α.

الخطوة 3 – اختيار قيمة للوقت المطابق لعتبة عدم التيسر، T_{th} ($T_{th} < 0{,}2\%$).

الخطوة 4 – افتراض خط مستقيم بين النقطتين B وC.

الخطوة 5 – حساب النسب ESR وSESR وBBER من خلال دمج داخل المجال الواقع بين $0{,}9\ T_{th}$ و100% (انظر الملاحظة 1).

الملاحظة 1 – استناداً إلى النتائج الواردة في التوصية ITU-R S.579، التي تبين أحداث توهين الانتشار التي لا ينتج عنها وقت عدم التيسر، استعمل "عامل تيسر بسبب الانتشار" بنسبة 10% من أجل تحقيق هذه الأقنعة. وهكذا تم دمج 10% من القيمة T_{th} في وقت التيسر لمراعاة الحالات التي تكون فيها القيمة BEP أسوأ من القيمة BEP_{th} ولكن تعود إلى وضعها في أقل من 10 ثوانٍ.

الخطوة 6 – اختيار قيمة جديدة للوقت T_{th} وتكرار الخطوتين 4 و5 إلى أن تتحقق أعلى قيم للنسب ESR وSESR وBBER لأي T_{th} أصغر من 0,2% من الوقت.

إذا استوفيت الأهداف المنطبقة على النسب ESR وSESR وBBER الواردة في الجدولين 5 و6 فيما يتعلق بكل $T_{th} > 0{,}2\%$ من الوقت، يعتبر أن القناع المحدد بالنقاط C وD وE وF يفي بمتطلبات التوصية الحالية. إضافة إلى ذلك، تؤمن العملية المذكورة أعلاه أن عدم تيسر الوصلة بنسبة تقل عن 0,2% من الوقت قد تحقق.

وكنتيجة للعملية المتكررة للمراحل 4 و5 و6، سيفي كل خط مستقيم بين النقطتين B وC، حيث B يمكن أن يقع في أي مكان بين 0% و0,2% من الوقت، بأهداف التوصية الحالية وأهداف عدم التيسر. وهكذا يمكن تبسيط الشكل العام للقناع عن طريق تمديد القناع رأسياً انطلاقاً من النقطة C كما يوضح ذلك الشكل 4.

وباستعمال العملية الموصوفة أعلاه وبإضافة الافتراضات التالية:

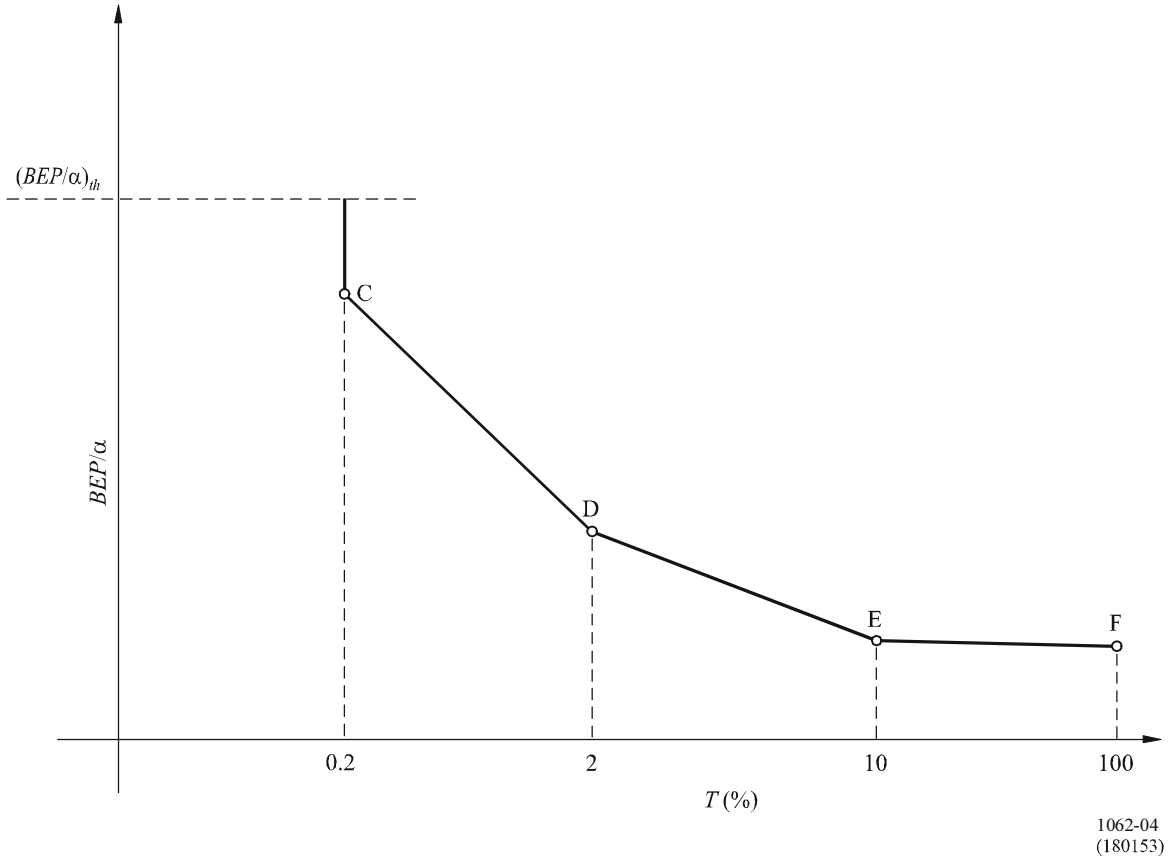
- القيم BEP/α المطابقة للنقطتين E وF متطابقة،
- القيم BEP/α المطابقة للنقطتين E وD تختلف بعشرة،

وكمثال، تم توليد مجموعة من الأقنعة من أجل معدلات بتات مختلفة للإرسال وتوضح هذه الأقنعة في الشكل 5.

وعند وضع هذه الأقنعة، افترض أن $BEP_{mod} = 1 \times 10^{-3}$. وتم تعديل الافتراض الثاني في شكل 5 للحصول على قناع منتظم. فمثلاً بالنسبة للقناع ذي المعدل 1,5 Mbit/s، فإن النسبة بين القيم BEP/α المقابلة للنقطتين E وD تغيرت من 10 إلى 3.

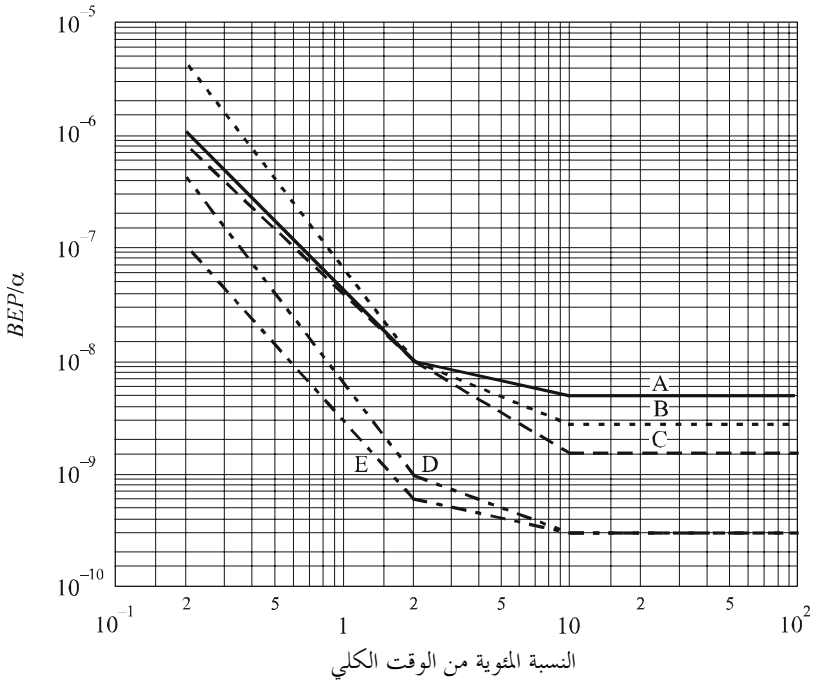
الشـــكل 4

قناع مبسط



الشـــكل 5

الأقنعة المولدة للقفزات الساتلية



A: 1.5 Mbit/s
B: 2 Mbit/s
C: 6 Mbit/s
D: 51 Mbit/s
E: 155 Mbit/s

1062-05
(180153)

3 العلاقة بين معدل الخطأ في البتات ومعدل حدوث الخطأ

من المعروف تماماً أن الأخطاء الملاحظة على الوصلات الساتلية التي تستعمل مخططات التصحيح الأمامي للخطأ (FEC) وأنظمة التخليط تقترب في حدوثها من مبدأ الحشد. وأن ظهور هذه الحشود التي يمكن تسميتها أيضاً بأحداث الخطأ، هو ظهور عشوائي ويتبع توزيع بواسون. وإن معدل الخطأ في الفدرات الناتج عن ذلك هو نفس المعدل الذي يطابق حدوث أخطاء عشوائية في البتات (موزعة وفقاً لتوزيع بواسون) مع معدل من الأخطاء في البتات *BER/α*، حيث α (المستخدم في الفقرة 1.2 من أجل مراعاة حدوث الأخطاء على رشقات) هو متوسط عدد البتات الخطأ في الحشد، كما يمثل α النسبة بين معدل الخطأ في البتات ومعدل حدوث الخطأ. فمثلاً في قناة خطأ إثنيني عشوائي بدون تصحيح أمامي للأخطاء ومخلط، يعتبر العامل α مساوياً للواحد الصحيح. ومع ذلك يمكن أن يكون العامل α مع مخططات تشكيل عالية الرتبة أكبر من الواحد الصحيح.

وفي أي مخطط للتصحيح الأمامي للأخطاء FEC، يمكن تقدير القيم النظرية للعامل α باستعمال توزيع مرجح للمخطط FEC. وترد المعلومات الأساسية الخاصة باشتقاق القيمة النظرية في الفقرة 1.3.وتتوقف الخصائص الإحصائية لحشود الأخطاء على مخطط التصحيح FEC/التخليط المستعمل. وقد استخدمت عمليات المحاكاة والقياسات بواسطة الحاسوب لمختلف مخططات التصحيح FEC (دون تخليط أو تشفير تفاضلي) من أجل تحديد العامل α. ويفترض في عملية المحاكاة قناة غوسية بيضاء مضافة. وترد هذه النتائج في الفقرات من 2.3 إلى 6.3.

1.3 اشتقاق متوسط عدد البتات الخطأ في الحشد

بافتراض أن الشفرة النظامية لفدرة (n,k) هي C، فإن دالة التثقيل العددية (WEF) لها المعروفة جيداً هي:

$$B^C(H) \triangleq \sum_{i=0}^{n} B_i H^i \tag{18}$$

حيث:

B_i: (عدد صحيح) هو عدد كلمات الشفرة ذات ثقل هامينغ (عدد قيم الواحد الصحيح) i

H: متغير زائف.

ويمكن استعمال الدالة WEF لشفرة لحساب الصيغة الدقيقة لاحتمال الأخطاء غير المكتشفة وحد أعلى لاحتمال خطأ الكلمة.

ويمكن تعريف دالة التثقيل العددية للإطناب الداخل (IRWEF) للشفرة كما يلي:

$$A^C(W,Z) \triangleq \sum_{w,j} A_{w,j} W^w Z^j \tag{19}$$

حيث $A_{w,j}$ تشير إلى عدد (عدد صحيح) كلمات الشفرة المتولدة من كلمة معلومات دخل لها ثقل هامينغ w وثقل هامينغ لبتات اختبار تعادليتها j، وبالتالي فإن ثقل هامينغ الكلي يساوي $w+j$. وتبين الدالة (IRWEF) المساهمات المنفصلة من المعلومات ومن بتات اختبار التعادلية في ثقل هامينغ الكلي لكلمات الشفرة ويوفر هذا معلومات إضافية بشأن المظهر الجانبي للثقل (هامينغ) للشفرة.

وباستعمال الصيغة أعلاه، يمكن تحديد الحد الأعلى لاحتمال الخطأ في البتات، P_b، بالقيمة:

$$P_b \le \sum_{m=d_{min}}^{\infty} D_m P(R_m'' | C_0) \tag{20}$$

حيث d_{min} هي المسافة الدنيا للشفرة و $P(R_m'' | C_0)$ هو احتمال أن يقوم المشفر باختيار كلمة الشفرة ذات الثقل m بشرط أن تكون كلمة الشفرة المرسلة كلمة شفرة كل قيمها صفر و:

$$D_m = \sum_{j+w=m} \frac{w}{k} A_{w,j} \tag{21}$$

وبالتالي يكون متوسط عدد البتات في الحشد α هو القيمة المتوسطة للثقل w وهو ما ينتج عنه:

$$\overline{w} = \sum_{m=d_{min}}^{\infty} \sum_{m=w+j} w A_{w,j} P_m \tag{22}$$

حيث P_m هو احتمال وقوع أحداث أخطاء بعدد أخطاء m في جميع أحداث الأخطاء. ونظراً لأن P_m تتناقص بسرعة مع قيمة m، خاصة مع القيم المنخفضة لاحتمال الخطأ في البتات (BEP)، لذا يمكن تقريب قيمة $\overline{w}$ كما يلي:

$$\overline{w} \approx \sum_{d_{min}=w+j} w \; A_{w,j} P_{d_{min}} \tag{23}$$

2.3 عوامل شفرات BCH الإثنينية

باستعمال المعادلة (23)، يمكن تقدير قيم α لشفرات BCH النظامية. ويبين الجدول 8 توزيع التثقيل للشفرة BCH (7,4) والمسافة الدنيا لهذه الشفرة تبلغ 3. وبالتالي، يمكن تقدير α للشفرة على النحو التالي:

$$\overline{w}_{(7,4)} = \alpha_{(7,4)} \approx 1\times\frac{3}{7}+2\times\frac{3}{7}+3\times\frac{1}{7}\cong 1.7 \quad (24)$$

الجـــدول 8

توزيع التثقيل للشفرة BCH (7,4)

$A_{w,j}$	j	w
1	0	0
3	2	1
1	3	1
3	1	2
3	2	2
1	0	3
3	1	3
1	3	4

ويبين الجدول 9 القيمة المقدرة للعامل α لدالات BCH نظامية مختلفة فيما يقارن الجدول 10 نتائج المحاكاة للشفرة (15,11) BCH مع النتائج المقدرة. وكلما قل معدل الخطأ في البتات اقتربت القيمة المقدرة مع قيمة المحاكاة.

وبالنسبة للشفرات غير النظامية، عندما تفشل عملية فك التشفير، يكون نصف كلمة المعلومات تقريباً خطأ. وفي هذه الحالة، يمكن تقريب العامل α إلى القيمة $2/k$.

الجـــدول 9

قيم α النظرية المقدرة لشفرات BCH مختلفة

شفرة BCH (n,k)	α	شفرة (n,k) موسعة	α	شفرة (n,k) منقحة	α
(15,11)	2,20	(16,11)	2,75	(15,10)	2,67
(31,26)	2,52	(32,26)	3,25	(31,25)	3,23
(31,21)	3,73	(32,21)	4,56	(31,20)	4,53
(63,57)	2,06	(64,57)	2,96	(63,56)	2,96
(63,51)	4,07	(64,51)	4,50		

الجـــدول 10

مقارنة بين القيم النظرية وقيم المحاكاة للعامل α للشفرة BCH (15,11)

معدل الخطأ في البتات	قيم α من المحاكاة	قيم α النظرية
$2{,}88 \times 10^{-2}$	2,60	2,2
$4{,}69 \times 10^{-3}$	2,37	
$5{,}57 \times 10^{-4}$	2,36	
$2{,}36 \times 10^{-5}$	2,33	

3.3 عوامل الشفرات التلافيفية

يمكن تطبيق نهج مماثل على الشفرات التلافيفية. وبالنسبة للشفرات التلافيفية المعروفة، حددت دراسات مختلفة توزيعات التثقيل لهذه الشفرات بمعلومية a_d، عدد كلمات الشفرة ذات المسافة d، وc_d، مجموع أخطاء البتات (ثقل الخطأ في المعلومات) لكلمات شفرة ذات مسافة d. وباستعمال نفس التقريب المستعمل مع شفرات BCH الإثنينية، فإن$(\alpha =) \overline{w}$ يمكن تقريبها بالنسبة للشفرات التلافيفية على النحو $(c_{d_f})/(a_{d_f})$، حيث d_f هي المسافة الحرة للشفرة.

ويبين الجدول 11 توزيعات التثقيل لشفرات تلافيفية شهيرة فيما يقارن الجدول 12 بين قيم α المقدرة نظرياً وقيمها من المحاكاة. وكما ثبت في شفرات BCH الإثنينية، فإن قيم α المقدرة تساوي تقريباً قيمها من المحاكاة عند القيم المنخفضة لمعدلات الخطأ في البتات (BER).

الجـــدول 11

توزيع التثقيل للشفرات التلافيفية

معدل الشفرة R	الطول المقيد K	المولد (ثماني)	d_f	$(a_d, d = d_f, d = d_f + 1, d = d_f + 2, \ldots)$ $(c_d, d = d_f, d = d_f + 1, d = d_f + 2, \ldots)$
1/2	7	133, 171	10	(11, 0, 38, 0, 193, 0, 1 331, 0, 7 275,···) (36, 0, 211, 0, 1 404, 0, 11 633, ···)
	9	561, 753	12	(11, 0, 50, 0, 286, 0, 1 630, 0, 9 639, ···) (33, 0, 281, 0, 2 179, 0, 15 035, ···)
*2/3	7	133, 171	6	(1, 16, 48, 158, 642, 2 435, 9 174) (3, 70, 285, 1 276, 6 160, 27 128, ···)
*7/8	7	133, 171	3	(2, 42, 468, 4 939, 52 821) (14, 389, 6 792, 97 243, 1 317 944)

* شفرات مثقوبة من الشفرة ذات المعدل 1/2 مع طول مقيد $K = 7$.

4.3 عوامل الشفرات المتسلسلة

بالنسبة لشفرة متسلسلة ذات شفرة خارجية من نمط ريد–سولومون (RS) وشفرة داخلية تلافيفية، تؤول قيمة α مباشرة إلى توزيع التثقيل لشفرة RS لأنها هي الشفرة الخارجية. ويمكن الحصول على قيمة α لشفرات RS باستعمال نفس القاعدة المستعملة مع الشفرة BCH الإثنينية، وذلك في حال استعمال أقصى مخطط فك تشفير مرجح. وفي هذه الحالة، ينبغي تحديد توزيع التثقيل الإثنيني للشفرات RS.

ويبين الجدول 13 قيم α المحاكاة لشفرات RS في مخطط التشفير المتسلسل الموصف في التوصيتين ITU-R BO.1724 وITU-R S.1709. وتستعمل هنا الشفرة RS(204,188) المختزلة من الشفرة RS(255,239) الأصلية. كما تستعمل الشفرة RS(71,55) المختزلة مع حجم رزمة مختلف.

الجـــدول 12

مقارنة بين القيم النظرية وقيم المحاكاة للعامل α في الشفرات التلافيفية

معدل الشفرة R	الطول المقيد K	المولد (ثماني)	d_f	α (المقدرة)	معدل الخطأ في البتات	α (المحاكاة)
1/2	7	133, 171	10	3,27	$1,74 \times 10^{-2}$	7,21
					$1,91 \times 10^{-3}$	5,68
					$1,05 \times 10^{-4}$	3,74
					$5,05 \times 10^{-6}$	3,48
					$1,07 \times 10^{-7}$	3,00
	9	561, 753	12	3,00	$1,22 \times 10^{-2}$	13,00
					$1,77 \times 10^{-3}$	11,56
					$2,10 \times 10^{-5}$	4,38
					$4,20 \times 10^{-7}$	3,96
2/3	7	133, 171	6	3,00	$3,61 \times 10^{-2}$	8,00
					$7,86 \times 10^{-4}$	7,14
					$2,96 \times 10^{-6}$	5,32
					$2,14 \times 10^{-7}$	5,67
7/8	7	133, 171	3	7,00	$6,24 \times 10^{-2}$	9,08
					$2,68 \times 10^{-2}$	8,85
					$9,82 \times 10^{-3}$	7,77
					$1,77 \times 10^{-5}$	7,57
					$1,49 \times 10^{-6}$	7,29

الجـــدول 13

قيم α المحاكاة لشفرات RS في مخطط التشفير المتسلسل

شفرة RS (N,K)	معدل الخطأ في البتات	α	شفرة RS (N,K)	معدل الخطأ في البتات	α
(204,188)	$7,74 \times 10^{-3}$	12,80	(71,55)	$6,17 \times 10^{-3}$	8,47
	$5,19 \times 10^{-4}$	9,14		$2,03 \times 10^{-4}$	7,74
	$1,02 \times 10^{-6}$	8,58		$2,02 \times 10^{-7}$	7,32

5.3 عوامل شفرات turbo

يمكن بالنسبة لشفرات turbo استخدام نهج مشابه للنهج المستخدم مع الشفرات التلافيفية لأن شفرات turbo تقوم على شفرات تلافيفية. ويبين الجدول 14 توزيعات التثقيل لشفرات turbo الموصفة في التوصيتين ITU-R BO.1724 وITU-R S.1709 ويبين الجدول 15 قيم α المقدرة المقابلة. ويبين الجدول 16 قيم α المحاكاة لحجم رزمة يبلغ 53 بايتة. ونظراً لأن شفرات turbo تستعمل خوارزمية فك تشفير تكرارية، لذا فإن قيم α ومعدل الخطأ في البتات تتوقف جميعها على خوارزمية فك التشفير وعلى عدد التكرارات. وفي المحاكاة، استخدمت خوارزمية فك التشفير max-log MAP وقدرت قيم α عند عدد تكرارات 6 و15. ونظراً لأنه يمكن اعتبار القيم النظرية المقدرة في الجدول 15 بمثابة حد أدنى، لذا فهي أقل من قيم المحاكاة في الجدول 16.

الجـــدول 14

توزيع التثقيل لشفرات turbo ($d_f/a_d/c_d$)

حجم الرزمة (بالبايتات)	$R = 1/3$	$R = 1/2$	$R = 2/3$	$R = 3/4$	$R = 6/7$
53	31/106/954	18/159/954	11/159/901	7/10/50	4/9/27
	32/265/1643	19/159/1431	12/265/1325	8/85/375	5/194/719
	33/106/901	20/530/3551	13/1802/11342	9/486/2335	6/1228/5371
188	33/3476/3384	19/376/3384	12/188/1316	9/27/171	6/199/826
	35/376/3760	20/376/3008	14/752/5264	10/148/1025	7/1578/7269
	36/752/6392	22/752/6768	15/1504/12220	11/1462/9674	8/9144/49558

الجـــدول 15

قيم α المقربة نظرياً لشفرات turbo

حجم الرزمة (بالبايتات)	$R = 1/3$	$R = 1/2$	$R = 2/3$	$R = 3/4$	$R = 6/7$
53	9,00	6,00	5,67	5,00	3,00
	6,20	9,00	5,00	4,41	3,70
	8,50	6,70	6,29	4,80	4,37
752	9,00	9,00	7,00	6,33	4,15
	10,00	8,00	7,00	6,93	4,60
	8,50	9,00	8,13	6,62	5,42

الجـــدول 16

قيم α المحاكاة لشفرات turbo

عدد التكرارات	$R = 1/3$ BER/α	$R = 2/5$ BER/α	$R = 1/2$ BER/α	$R = 3/4$ BER/α	$R = 6/7$ BER/α
6	$5{,}58 \times 10^{-5}$/16,8	$3{,}79 \times 10^{-5}$/16,6	$1{,}39 \times 10^{-4}$/21,5	$9{,}53 \times 10^{-4}$/15,9	$3{,}44 \times 10^{-5}$/6,8
	$9{,}28 \times 10^{-6}$/14,0	$5{,}56 \times 10^{-6}$/12,8	$2{,}24 \times 10^{-5}$/17,1	$3{,}47 \times 10^{-5}$/11,3	$2{,}34 \times 10^{-6}$/5,2
	$1{,}42 \times 10^{-6}$/10,6	$9{,}68 \times 10^{-7}$/10,6	$5{,}69 \times 10^{-7}$/9,0	$9{,}89 \times 10^{-7}$/7,8	$2{,}53 \times 10^{-7}$/4,1
15	$2{,}25 \times 10^{-5}$/23,7	$1{,}57 \times 10^{-5}$/20,8	$6{,}36 \times 10^{-5}$/26,6	$6{,}46 \times 10^{-4}$/18,3	$2{,}67 \times 10^{-5}$/7,0
	$3{,}28 \times 10^{-6}$/16,5	$2{,}41 \times 10^{-6}$/14,5	$9{,}30 \times 10^{-6}$/18,9	$1{,}89 \times 10^{-5}$/12,2	$1{,}74 \times 10^{-6}$/4,8
	$5{,}62 \times 10^{-7}$/11,6	$4{,}25 \times 10^{-7}$/10,8	$3{,}02 \times 10^{-7}$/8,9	$6{,}02 \times 10^{-7}$/7,9	$1{,}78 \times 10^{-7}$/4,3

6.3 عوامل شفرات turbo الفدرية

شفرات turbo الفدرية (BTC) عبارة عن شفرات نتاجية تفك شفرتها بالتكرار. والمسافة الدنيا لشفرة نتاجية هي ناتج المسافات الدنيا للشفرات المشكلة منها. فمثلاً المسافة الدنيا لشفرة نتاجية بعدد نواتج m من شفرة مكونة واحدة مسافتها الدنيا d_{min} تساوي $(d_{min})^m$.وباستعمال نفس القاعدة، يمكن تمثيل قيمة α بالنسبة لشفرة BTC، α_{BTC}، كما يلي:

$$\alpha_{BTC} = \alpha_{c_1} \cdot \alpha_{c_2} \cdots \alpha_{c_m} \quad (25)$$

حيث α_{c_i} هي قيمة α للشفرة المكونة رقم i. وتستخدم الشفرات النظامية الإثنينية الموضحة في الفقرة 2.3 عادة كشفرات مكونة.

ويبين الجدول 17 قيم α_{BTC} المقدرة نظرياً باستعمال المعادلة (25)، حيث يفترض استعمال نفس الشفرات المكونة المستعملة من قبل في الشفرة BTC. وبالتالي، فإن قيمة α_c في الجدول 17 تكون هي نفس قيمها المدرجة في الجدول 9. ويقارن الجدولان 18 و19 القيم المقدرة نظرياً وقيم المحاكاة لشفرات BTC ثنائية المكونات. وكما ثبت في الفقرتين 2.3 و3.3، فإن القيم المقدرة تساوي تقريباً قيم المحاكاة مع المعدلات المنخفضة للخطأ في البتات.

الجـــدول 17

القيم المقربة نظرياً لشفرات turbo الفدرية

شفرة (n,k) موسعة	d_{min}	α_c	قيمة α_{BTC} لشفرة BTC ثنائية	قيمة α_{BTC} لشفرة BTC ثلاثية
(16,11)	4	2,75	7,56	20,80
(32,26)	4	3,25	10,56	34,33
(32,21)	6	4,56	20,79	94,82
(64,57)	4	2,96	8,76	25,93
(64,51)	6	4,50	20,25	91,13

الجـــدول 18

مقارنة بين قيم α النظرية والمحاكاة لشفرة BTC (16,11)x(16,11)

E_b/N_0 (dB)	معدل الخطأ في البتات	α_{BTC}	الشفرة المكونة	
			معدل الخطأ في البتات	α_c
1,0	$4,41 \times 10^{-2}$	14,50	$1,25 \times 10^{-1}$	2,82
2,0	$3,43 \times 10^{-3}$	10,35	$7,82 \times 10^{-2}$	2,88
2,5	$4,24 \times 10^{-4}$	7,46	$5,97 \times 10^{-2}$	2,52
3,0	$8,30 \times 10^{-5}$	7,25	$4,31 \times 10^{-2}$	2,82
3,5	$8,51 \times 10^{-6}$	7,31	$2,97 \times 10^{-2}$	2,99

الجـــدول 19

مقارنة بين قيم α النظرية والمحاكاة لشفرة BTC (32,26)×(32,26)

E_b/N_0 (dB)	معدل الخطأ في البتات	α_{BTC}	الشفرة المكونة	
			معدل الخطأ في البتات	α_c
2,0	$4{,}19 \times 10^{-3}$	31,57	$5{,}96 \times 10^{-2}$	3,88
3,0	$7{,}80 \times 10^{-6}$	11,21	$3{,}10 \times 10^{-2}$	3,33
3,3	$2{,}10 \times 10^{-6}$	9,76	$2{,}35 \times 10^{-2}$	3,15

7.3 نتائج وملخص قياسات أخرى

نتج عن القياسات المختبرية لإرسالات رقمية من النمط INTELSAT IDR (مع استخدام تصحيح أمامي للأخطاء بمعدل $R = 3/4$ ومخلط) قيمة للعامل α تساوي 10 عبر مدى من معدل خطأ في البتات يتراوح من 1×10^{-4} إلى 1×10^{-11}. وقد تحددت قيمة للعامل α أيضاً في نفس القياسات لإرسالات رقمية من النمط INTELSAT IBS (مع استخدام تصحيح أمامي للأخطاء بمعدل $R = 1/2$ ومخلط).

ويتبين من دراسة النتائج أن العامل α دالة في توزيع التثقيل لمخطط التصحيح الأمامي للأخطاء واحتمال الخطأ في البتات. ويمكن تقييم أثر المعامل α لى نموذج الأداء على النحو الوارد أدناه.

تم توليد الأقنعة الموضحة في الشكلين 2 و3 باستخدام قيمة للعامل α تساوي 10. فمثلاً في حال عدم استخدام تصحيح أمامي للأخطاء/مخلط ($\alpha = 1$)، تُزحزح النماذج بمقدار 10 وتكون متطلبات معدل الخطأ في البتات (BER) أكثر صرامة (بمقدار 10).

4 الاستنتاجات

أظهرت نتائج الدراسات أن الأقنعة المطلوبة للاستجابة للأهداف المحددة في التوصية الحالية المستمدة من التوصية ITU-T G.826 تتعلق بمعدل الإرسال. وتتعلق أقنعة التصميم أيضاً بتوزيع الخطأ الذي يتأثر بدوره بمخطط التصحيح FEC/التخليط المطبق.

وينبغي أيضاً أن تؤخذ في الاعتبار متطلبات الخدمة عند استخلاص أقنعة أداء الأخطاء المسموح بها.

5 قائمة المختصرات والأسماء المختصرة

BBE خطأ الفدرة الخلفية *(Background block error)*

BBER نسبة خطأ الفدرة الخلفية *(Background block error ratio)*

BCH بوس، راي تشوداري، هوكينغيم *(Bose, Ray-Chaudhuri, Hocquenghem)*

BEP احتمال الخطأ في البتات *(Bit error probability)*

BER معدل الخطأ في البتات *(Bit-error rate)*

BTC شفرة turbo فدرية *(Block turbo code)*

EB فدرة خطأ *(Errored block)*

ES	ثانية خطأ *(Errored second)*
ESR	نسبة الثواني الخطأ *(Errored second ratio)*
FEC	التصحيح الأمامي للأخطاء *(Forward error-correction)*
FSS	الخدمة الثابتة الساتلية *(Fixed-satellite service)*
GSO	المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض *(Geostationary orbit)*
HRDP	مسير رقمي افتراضي مرجعي *(Hypothetical reference digital path)*
HRX	وصلات مرجعية افتراضية *(Hypothetical reference connections)*
IBS	خدمة INTELSAT للأعمال التجارية *(INTELSAT business service)*
IDR	معدل معطيات متوسط *(Intermediate data rate)*
IG	بوابة دولية *(International gateway)*
INTELSAT	المنظمة الدولية للاتصالات الساتلية *(International Telecommunication Satellite Organization)*
IRWEF	دالة تثقيل عددية للإطناب المدخل *(Input-redundancy weight enumerating function)*
MAP	القيمة القصوى التالية مباشرةً *(Maximum a posteriori)*
MSS	الخدمة المتنقلة الساتلية *(Mobile-satellite service)*
PDH	تراتب رقمي متقارب التزامن *(Plesiochronous digital hierarchy)*
RS	ريد–سولومون *(Reed-Solomon)*
SDH	تراتب رقمي متزامن *(Synchronous digital hierarchy)*
SES	ثانية شديدة الخطأ *(Severely errored second)*
SLA	اتفاق مستوى الخدمة *(Service level agreement)*
SESR	نسبة الثواني شديدة الخطأ *(Severely errored seconds ratio)*
VC	حاوية تقديرية *(Virtual container)*
WEF	دالة تثقيل عددية *(Weight enumeration function)*

_____