الاتحـــــــاد الـــدولـــــــي للاتصـــــــالات

ITU-T

قطـــاع تقييس الاتصـــالات
في الاتحاد الدولي للاتصالات

السلسلة G

الإضـــافة 39
(2006/02)

السلسلة G: أنظمة الإرسال ووسائطه والأنظمة والشبكات الرقمية

تصميم النظام البصري والاعتبارات الهندسية

توصيات السلسلة ITU-T G – الإضـــافة 39

ITU-T

توصيات السلسلة G الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات

أنظمة الإرسال ووسائطه والأنظمة والشبكات الرقمية

التوصيلات والدارات الهاتفية الدولية	G.199–G.100
الخصائص العامة المشتركة لكل الأنظمة التماثلية بموجات حاملة	G.299–G.200
الخصائص الفردية للأنظمة الهاتفية الدولية بموجات حاملة على خطوط معدنية	G.399–G.300
الخصائص العامة للأنظمة الهاتفية الدولية اللاسلكية أو الساتلية والتوصيل البيني مع الأنظمة على خطوط معدنية	G.449–G.400
تنسيق المهاتفة الراديوية والمهاتفة السلكية	G.499–G.450
خصائص وسائط الإرسال والأنظمة البصرية	G.699–G.600
التجهيزات المطرافية الرقمية	G.799–G.700
الشبكات الرقمية	G.899–G.800
الأقسام الرقمية وأنظمة الخطوط الرقمية	G.999–G.900
نوعية الخدمة وأداء الإرسال – الجوانب العامة والجوانب المتعلقة بالمستعمل	G.1999–G.1000
خصائص وسائط الإرسال	G.6999–G.6000
البيانات عبر طبقة النقل – الجوانب العامة	G.7999–G.7000
جوانب الرزم عبر طبقة النقل	G.8999–G.8000
نفاذ الشبكات	G.9999–G.9000
شبكات المباني	G.9950–G.9999

لمزيد من التفاصيل، يرجى الرجوع إلى قائمة التوصيات الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات.

الإضافة 39 إلى توصيات السلسلة ITU-T G

تصميم النظام البصري والاعتبارات الهندسية

ملخص

تقدم هذه الإضافة معلومات عن الخلفية والمنهجيات المستعملة في تطوير التوصيات المتعلقة بالسطوح البينية البصرية مثل التوصيات G.795 وG.691 و G.959.1 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T). ويوضح هذا التنقيح قياس نسبة الخطأ في البتات (BER) بالنسبة للأنظمة الممكنة للتصحيح الأمامي للأخطاء (FEC)، ويوضح معادلة إعاقة نموذج فصل الضوضاء في الفقرة 1.1.2.9، ويدمج المعلومات المتعلقة بإحصائيات التوهين للوصلات المركبة، ويضيف مبادئ توجيهية عن أحسن الممارسات بالنسبة لأنظمة رامان المضخمة في الفقرة 14، ويقوم بإجراء تصحيحات متنوعة أخرى.

المصدر

وافقت لجنة الدراسات 15 (2005-2008) لقطاع تقييس الاتصالات بتاريخ 17 فبراير 2006 على الإضافة 39 لتوصيات السلسلة ITU-T G.

تمهيـــد

الاتحاد الدولي للاتصالات وكالة متخصصة للأمم المتحدة في ميدان الاتصالات وتكنولوجيات المعلومات والاتصالات (ICT). وقطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) هو هيئة دائمة في الاتحاد الدولي للاتصالات. وهو مسؤول عن دراسة المسائل التقنية والمسائل المتعلقة بالتشغيل والتعريفة، وإصدار التوصيات بشأنها بغرض تقييس الاتصالات على الصعيد العالمي.

وتحدد الجمعية العالمية لتقييس الاتصالات (WTSA)، التي تجتمع مرة كل أربع سنوات، المواضيع التي يجب أن تدرسها لجان الدراسات التابعة لقطاع تقييس الاتصالات وأن تُصدر توصيات بشأنها.

وتتم الموافقة على هذه التوصيات وفقاً للإجراء الموضح في القرار رقم 1 الصادر عن الجمعية العالمية لتقييس الاتصالات.

وفي بعض مجالات تكنولوجيا المعلومات التي تقع ضمن اختصاص قطاع تقييس الاتصالات، تعد المعايير اللازمة على أساس التعاون مع المنظمة الدولية للتوحيد القياسي (ISO) واللجنة الكهرتقنية الدولية (IEC).

ملاحظـــة

تستخدم كلمة "الإدارة" في هذه التوصية لتدل بصورة موجزة سواء على إدارة اتصالات أو على وكالة تشغيل معترف بها.

والتقيد بهذه التوصية اختياري. غير أنها قد تضم بعض الأحكام الإلزامية (بهدف تأمين قابلية التشغيل البيني والتطبيق مثلاً). ويعتبر التقيّد بهذه التوصية حاصلاً عندما يتم التقيّد بجميع هذه الأحكام الإلزامية. ويستخدم فعل "يجب" وصيغ ملزمة أخرى مثل فعل "ينبغي" وصيغها النافية للتعبير عن متطلبات معينة، ولا يعني استعمال هذه الصيغ أن التقيّد بهذه التوصية إلزامي.

حقوق الملكية الفكرية

يسترعي الاتحاد الانتباه إلى أن تطبيق هذه التوصية أو تنفيذها قد يستلزم استعمال حق من حقوق الملكية الفكرية. ولا يتخذ الاتحاد أي موقف من القرائن المتعلقة بحقوق الملكية الفكرية أو صلاحيتها أو نطاق تطبيقها سواء طالب بها عضو من أعضاء الاتحاد أو طرف آخر لا تشمله عملية إعداد التوصيات.

وعند الموافقة على هذه التوصية، كان الاتحاد قد تلقى إخطاراً بملكية فكرية تحميها براءات الاختراع يمكن المطالبة بها لتنفيذ هذه التوصية. ومع ذلك، ونظراً إلى أن هذه المعلومات قد لا تكون هي الأحدث، يوصى المسؤولون عن تنفيذ هذه التوصية بالاطلاع على قاعدة البيانات الخاصة ببراءات الاختراع في مكتب تقييس الاتصالات (TSB) في الموقع http://www.itu.int/ITU-T/ipr/.

© ITU 2012

جميع الحقوق محفوظة. لا يجوز استنساخ أي جزء من هذه المنشورة بأي وسيلة كانت إلا بإذن خطي مسبق من الاتحاد الدولي للاتصالات.

جدول المحتويات

الصفحة

1 مجال التطبيق 1
2 المراجع 1
3 المصطلحات والتعاريف 2
4 المختصرات 2
5 تعريف النطاقات الطيفية 4
1.5 اعتبارات عامة 4
2.5 توزيع النطاقات الطيفية بالنسبة إلى أنظمة الألياف أحادية الأسلوب 5
3.5 النطاقات المتعلقة بأنظمة الألياف متعددة الأسلوب 7
6 معلمات عناصر النظام 7
1.6 التشفير الخطي 7
2.6 المرسلات 7
3.6 المضخمات البصرية 10
4.6 المسار البصري 11
5.6 المستقبلات 13
7 اعتبارات التشفير الخطي 14
1.7 تنفيذ العودة إلى الصفر (RZ) 15
2.7 الاعتبارات المتعلقة بإضعاف النظام 19
8 طوبولوجيا الشبكة البصرية 23
1.8 البنى الطوبولوجية 23
9 تصميم نظام "أسوأ حالة" 26
1.9 تسلسل موازنة القدرة 26
2.9 التشتت اللوني 27
3.9 تشتت أسلوب الاستقطاب (PMD) 37
4.9 نسبة الخطأ في البتات (BER) والعامل Q 38
5.9 تسلسل الضوضاء 41
6.9 اللغط البصري 46
7.9 تسلسل الآثار اللاخطية – منهج حسابي 51
10 تصميم نظام إحصائي 53
1.10 منهجية عامة 53
2.10 التصميم الإحصائي للخسارة 56
3.10 التصميم الإحصائي للتشتت اللوني 62
4.10 التصميم الإحصائي للتشتت بأسلوب الاستقطاب 68
11 التصحيح الأمامي للأخطاء 69
1.11 التصحيح الأمامي للأخطاء داخل النطاق في أنظمة التراتب الرقمي المتزامن 70
2.11 التصحيح الأمامي للأخطاء خارج النطاق في شبكات النقل البصرية 70

الصفحة

3.11 كسب التشفير والكسب الصافي للتشفير 71
4.11 حدود الكسب الصافي للتشفير النظرية فيما يتعلق ببعض وحدات التصحيح الأمامي للأخطاء غير المعيارية 73
5.11 الفرضية الإحصائية فيما يتعلق بكسب التشفير والكسب الصافي للتشفير 73
6.11 المرشحون لإرخاء المعلمة 74
7.11 المرشحون لتحسين خصائص النظام 75
12 التوافق المستعرض والتوافق الطولي للطبقة المادية 76
1.12 التوافق المستعرض للطبقة المادية 76
2.12 التوافق الطولي للطبقة المادية 77
3.12 الهندسة المشتركة 78
13 اعتبارات تصميم الشبكة البصرية المبدلة 79
14 أفضل الممارسات لسلامة القدرة البصرية 79
1.14 المشاهدة 79
2.14 طرفي الليفة 79
3.14 الألياف الشريطية 80
4.14 كبلات اختبار مرنة 80
5.14 انحناءات الليفة 80
6.14 ممدات اللوحة 80
7.14 الصيانة 80
8.14 معدات الاختبار 80
9.14 التعديل 81
10.14 التحكم في المفاتيح 81
11.14 الوسوم 81
12.14 العلامات 81
13.14 الإنذارات 81
14.14 أنظمة رامان المضخمة 81
التذييل I – اتساع النبضة بسبب التشتت اللوني 82
1.I الغرض 82
2.I النتيجة العامة المنشورة 82
3.I تغيير الترميز 83
4.I التبسيط من أجل حالة خاصة 84
5-I اتساع النبضة المرتبط بمعدل البتات 85
6.I قيمة عامل الأشكال 86
7-I النتيجة العامة والوحدات العملية 86
بيبليوغرافيـــا 88

الإضافة 39 إلى توصيات السلسلة ITU-T G

تصميم النظام البصري والاعتبارات الهندسية

1 مجال التطبيق

لا تعتبر هذه الإضافة توصية وليس لها أي وضع معياري. وفي حالة التعارض بين المادة الواردة في هذه الإضافة والمادة التي تتضمنها التوصيات ذات الصلة فستكون الغلبة دائماً لهذه الأخيرة. وينبغي ألا تستعمل هذه الإضافة باعتبارها مرجعاً ويمكن اعتماد التوصيات لا غير كمراجع يستند إليها.

وتقدم هذه الإضافة وصفاً للتصميم والاعتبارات الهندسية المتعلقة بالأنظمة الخطية الرقمية والبصرية أحادية ومتعددة القنوات المضخمة وغير المضخمة التي تدعم إشارات التراتب الرقمي متقارب التزامن (PDH) والتراتب الرقمي المتزامن (SDH) وشبكة النقل الرقمي (OTN) في الشبكات الأرضية المحلية والداخلية طويلة المدى.

ويتجلى أحد الأهداف التي تتوخاها هذه الإضافة في تعزيز وتعميم المادة ذات الصلة التي تتضمنها حالياً العديد من التوصيات، بما في ذلك التوصيات G.955 وG.957 وG.691 وG.692 وG.959.1 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T). وتهدف هذه الإضافة أيضاً إلى إتاحة القيام بمضاهاة أمثل لخصائص الألياف والمكونات والتوصيات المتعلقة بالتداخل البيني للأنظمة التي تعكف فرق البحث 15 و17 و16 على التوالي على إعدادها ضمن لجنة الدراسات 15.

2 المراجع

- التوصية ITU-T G.650.1 (2004)، *تعاريف وطرائق اختبار النعوت الخطية المحددة للألياف والكبلات أحادية الأسلوب*
- التوصية ITU-T G.652 (2005)، *خصائص الكبلات والألياف البصرية أحادية الأسلوب*.
- التوصية ITU-T G.653 (2003)، *خصائص الكبلات والألياف البصرية أحادية الأسلوب وذات التشتت المتخالف*.
- التوصية ITU-T G.654 (2004)، *خصائص الكبلات والألياف البصرية أحادية الأسلوب وذات القطع المزحزح*.
- التوصية ITU-T G.655 (2006)، *خصائص الكبلات والألياف البصرية أحادية الأسلوب وذات التشتت المتخالف غير المعدوم*.
- التوصية ITU-T G.661 (2006)، *تعريف المعلمات التنوعية المتصلة بأجهزة المكبرات البصرية وأنظمتها الفرعية وطرائق الاختبار الخاصة بها*.
- التوصية ITU-T G.662 (2005)، *الخصائص التنوعية للأجهزة والأنظمة الفرعية للمكبرات البصرية*.
- التوصية ITU-T G.663 (2000)، *الجوانب المتصلة بالتطبيق للأجهزة والأنظمة الفرعية للمكبرات البصرية*.
- التوصية ITU-T G.691 (2006)، *السطوح البينية البصرية للأنظمة STM-64 وأنظمة التراتب الرقمي المتزامن الأخرى ذات المكبرات البصرية*.
- التوصية ITU-T G.692 (1998)، *السطوح البينية البصرية للأنظمة متعددة القنوات وذات المكبرات البصرية*.
- التوصية ITU-T G. 957 (2006)، *السطوح البينية البصرية للمعدات والأنظمة المتعلقة بالتراتب الرقمي المتزامن*.
- التوصية ITU-T G. 959.1 (2006)، *السطوح البينية للطبقة المادية لشبكة النقل البصرية*.
- التوصية ITU-T G.982 (1996)، *شبكات النفاذ البصرية لدعم الخدمات إلى حد المعدل الأولي لشبكة رقمية متكاملة الخدمات أو معدلات بتات مقابلة*.

- التوصية ITU-T G.983.1 (2005)، *أنظمة نفاذ بصرية ذات نطاق واسع قائمة على شبكات بصرية منفعلة (PON).*
- التوصية ITU-T L.40 (2000)، *نظام لتعزيز صيانة الألياف البصرية خارج المصنع ورصدها واختبارها.*
- التوصية ITU-T L.41 (2000)، *صيانة الطول الموجي على الإشارات حاملة الموجات للألياف.*
- IEC/TR 61292-3 :2003 ، *المضخمات البصرية–القسم 3: التصنيف والخصائص والتطبيقات.*

3 المصطلحات والتعاريف

يمكن الاطلاع على التعاريف الرسمية في التوصيات الأولية.

4 المختصرات

1R إعادة توليد القدرة *(Regeneration of power)*

2R إعادة توليد القدرة والشكل *(Regeneration of power and shape)*

3R إعادة توليد القدرة والشكل والتوقيت *(Regeneration of power, shape, and timing)*

ADM معدد إرسال إضافة/حذف *(Add/Drop Multiplexer)*

ASE إرسال تلقائي مضخم *(Amplified Spontaneous Emission)*

ASK تشكيل بزحزحة الاتساع *(Amplitude Shift Key)*

BCH شفرة بوس–شودري–هوكنجام *(Bose-Chaudhuri-Hocquenghem)*

BER نسبة الخطأ في البتات *(Bit Error Ratio)*

BPM طريقة انتشار الحزمة *(Beam Propagation Method)*

CD تشتت لوني *(Chromatic Dispersion)*

CS-RZ الموجات الحاملة المكبوتة *(Carrier Suppressed Return to Zero)*

DA تشتت نقل الطاقة *(Dispersion Accommodation)*

DC تيار مستمر *(Direct Current)*

DCF ليف لتعويض التشتت *(Dispersion-Compensating Fibre)*

DGD زمن الانتشار التفاضلي لمجموعة الترددات *(Differential Group Delay)*

DST إرسال التشتت المدعم *(Dispersion-Supported Transmission)*

E/O التحويل الكهربائي البصري *(Electrical Optical conversion)*

EDC شفرة كشف الخطأ *(Error Detection Code)*

EDFA مضخم الألياف المعالجة بالإربيوم *(Erbium-Doped Fibre Amplifier)*

FEC تصحيح أمامي للأخطاء *(Forward Error Correction)*

FSK تشكيل بزحزحة التردد *(Frequency Shift Key)*

FWHM العرض التام عند منتصف الحد الأقصى *(Full Width at Half Maximum)*

FWM خلط الموجات الأربع *(Four-Wave Mixing)*

IaDI سطح بيني فيما داخل المجالات *(Intra-Domain Interface)*

IrDI سطح بيني فيما بين المجالات *(Inter-Domain Interface)*

LD ثنائيات المسارات الليزرية *(Laser Diode)*

MC متعدد القنوات *(Multichannel)*

MI عدم استقرار التشكيل *(Modulation Instability)*

MLM الأسلوب الطولي المتعدد *(Multi-Longitudinal Mode)*

MPI-R التداخل متعدد المسارات عند المستقبل *(Multi-Path Interface at the Receiver)*

MPI-S التداخل متعدد المسارات عند المنبع *(Multi-Path Interface at the Source)*

MPN ضوضاء أسلوب التقسيم *(Mode Partition Noise)*

M-Rx أجهزة المستقبلات متعددة القنوات *(Multichannel Receiver equipment)*

M-Tx أجهزة المرسلات متعددة القنوات *(Multichannel Transmitter equipment)*

MZM مشكل ماخ–زهندر *(Mach-Zehnder Modulator)*

NCG كسب التشفير الصافي *(Net Coding Gain)*

NRZ اللاعودة إلى الصفر *(Non-Return to Zero)*

O/E تحويل البصري إلى كهربائي *(Optical to Electrical conversion)*

OA مضخم بصري *(Optical Amplifier)*

OAC قناة بصرية إضافية *(Optical Auxiliary Channel)*

OADM معدد إرسال بصري إدراجي/إخراجي *((Optical ADM (also WADM)*

OCh قناة بصرية *(Optical Channel)*

ODUk وحدة بيانات القناة البصرية من الرتبة k *(Optical channel Data Unit of order k)*

OFA مضخم ألياف بصري *(Optical Fibre Amplifier)*

OLS تبديل الوسم البصري *(Optical Label Switching)*

OMS قسم تعدد إرسال بصري *(Optical Multiplex Section)*

ONE عنصر الشبكة البصرية *(Optical Network Element)*

OSC قناة الإشراف البصرية *(Optical Supervisory Channel)*

OSNR نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية *(Optical Signal-to-Noise Ratio)*

OTDR القياس الانعكاسي للمجال الزمني البصري *(Optical Time Domain Reflectometer)*

OTN شبكة النقل البصرية *(Optical Transport Network)*

OTUk وحدة نقل القناة البصرية من الرتبة k *(Optical channel Transport Unit of order k)*

OXC وصل متقاطع بصري *((Optical Cross Connect (also WSXC)*

PDC معوض التشتت المنفعل *(Passive Dispersion Compensator)*

PDFFA مضخم ألياف الفليوريد المعالجة بالبراسيوديميوم *(Praseodymium-Doped Fluoride Fibre Amplifiers)*

PDH التراتب الرقمي قريب التزامن *(Plesiosynchronous Digital Hierarchy)*

PMD تشتت أسلوب الاستقطاب *(Polarization Mode Dispersion)*

ptp نقطة إلى نقطة *(point-to-point)*

R نقطة سطح بيني بصري أحادي القناة في المستقبل *(single-channel optical interface point at the Receiver)*

RF تردد راديوي *(Radio Frequency)*

RFA مضخم ألياف رامان *(Raman Fibre Amplifier)*

RX مستقبل بصري *((optical) Receiver)*

RZ العودة إلى الصفر *(Return to Zero)*

S سطح بيني بصري أحادي القناة في المرسل *(single-channel optical interface at the Source)*

SBS انتثار بريلوين المستحث *(Stimulated Brillouin Scattering)*

SC أحادي القناة *(Single Channel)*

SDH تراتب رقمي متزامن *(Synchronous Digital Hierarchy)*

SLM الأسلوب الطولي الوحيد *(Single Longitudinal Mode)*

SOA مضخم بصري شبه موصل *(Semiconductor Optical Amplifier)*

SPM تشكيل ذاتي الطور *(Self-Phase Modulation)*

SRS انتثار رامان مستحث *(Stimulated Raman Scattering)*

STM وحدة النقل المتزامن *(Synchronous Transport Module)*

TDM تعدد الإرسال بتقسيم الزمن *(Time Division Multiplex)*

TX مرسل (بصري) *((optical) Transmitter)*

WADM طول موجة تعدد الإرسال الإدراجي/الإخراجي *((Wavelength ADM (also OADM))*

WDM تعدد إرسال بتقاسم طول الموجات *(Wavelength Division Multiplex)*

WSXC واصل بصري متقاطع لطول موجي انتقائي *((Wavelength-Selective XC (also OXC))*

WTM معدد إرسال طول الموجة الطرفي *(Wavelength Terminal Multiplexer)*

XC وصل متقاطع *(Cross-Connect)*

XPM تشكيل متقاطع الأطوار *(Cross-Phase Modulation)*

5 تعريف النطاقات الطيفية

1.5 اعتبارات عامة

تدرس المرسلات البصرية. فمن وجهة النظر الخاصة بثنائيات المسارات الليزرية شبه الموصلة، فبإمكان النظام المادي لغاليوم ألمنيوم الأرسنيد (GaAlAs) أن يغطي نطاقاً من الطول الموجي يمتد من 700 nm إلى 1000 nm، في حين يمكن لأنديوم غاليوم أرسنيد الفوسفيد (InGaAsP) أن يغطي نطاقاً يمتد من 1000 nm إلى 1700 nm. وقد يضاف الليزر الليفي لاحقاً إلى هذه القائمة. وبالنسبة إلى المستقبلات البصرية، فإن كفاءة كم المواد المكونة للمكشاف مهمة حيث يستعمل السلسيوم (Si) اعتباراً من 650 nm إلى 950 nm، ويستعمل غاليوم ألمنيوم الأرسنيد (GaAlAs) من 950 nm إلى 1150 nm، ويستعمل الجرمانيوم (Ge) من 1150 nm إلى 1550 nm وأنديوم غاليوم أرسنيد الفوسفيد (InGaAsP) من 1300 nm إلى 1700 nm. ومن ثم فإنه لا يوجد هنالك أي عارض تقني فيما يتعلق بالمرسلات والمستقبلات ضمن نطاق واسع من الطول الموجي الذي يكتسي أهمية بالنسبة إلى الاتصالات البصرية.

وبالنسبة إلى المضخمات البصرية، فيتم النشاط بصفة رئيسية في مناطق أطوال الموجات الأطول التي تستعمل مع الليفة أحادية الأسلوب. وتنضم مثيرات أخرى مثل (Te) و(Yt) و(Tu) إلى المضخمات الأصلية للألياف المعالجة ومضخمات الألياف المعالجة بالإربيوم (EDFAs) التي تبلغ حوالي 1445 nm ومضخمات ألياف الفليورايد المعالجة بالبراسيوديوم التي تبلغ حوالي 1305 nm. وبالتالي، فإنه يمكن تغطية المنطقة الطيفية الممتدة من 1440 nm تقريباً إلى ما يزيد على 1650 nm، حتى وإن لم يتم ذلك بنفس الدرجة من الكفاءة، وهي في مجملها غير متيسرة تجارياً في الوقت الحاضر. ويمكن للمضخات البصرية شبه

الموصلة (SOAs) ومضخمات ألياف رامان (RFAs) أن تتمدد اعتباراً من المقدار الذي يقل عن 1300 nm إلى ما يزيد على 1600 nm. ويجري استخدام توليفات لأنواع من المضخات البصرية بالنسبة إلى بعض التطبيقات لإنجاز عملية واسعة تمتاز بنطاقها المنتظم وضوضائها المنخفضة.

وتقدم النشرة IEC/TR 61292-3 المزيد من التفاصيل.

2.5 توزيع النطاقات الطيفية بالنسبة إلى أنظمة الألياف أحادية الأسلوب

يبحث القيود الواقعة على النطاقات الطيفية وفق النحو الذي تفرضه أنواع الألياف. ففي التوصية ITU-T G.957، التي لا تشمل المضخات البصرية، تم اختيار مدى طول الموجات الذي يمتد من 1260 nm إلى 1360 nm بالنسبة إلى ألياف التوصية G.652. وكذلك تستعمل توصية قطاع تقييس الاتصالات ITU-T G.983.1 المعنية بالشبكات البصرية المنفعلة هذا المدى. ويحدد طول موجة القطع الخاصة بالكبل الحد الأدنى الذي يبلغ 1260 nm. ويبين الشكل G.957/2.A منحنى معامل التشتت الأسوأ بالنسبة إلى ليفة التوصية G.652. ويبلغ مقدار معامل التشتت الأسوأ عند هذا الطول الموجي –6,42 ps/nm.km، ويحدث معامل التشتت الأسوأ الذي مقداره +6,42 ps/nm.km عند 1375 nm. غير أن طول الموجة هذا يكون عند الطرف المتزايد لذروة نطاق التوهين "المائي" الذي يبلغ 183 nm، وبالتالي فقد تم اختيار القيمة 1360 nm كحد أعلى. ويمكن أن يكون مدى الطول الموجي للعديد من شفرات التطبيق أكثر تقييداً وذلك حسب متطلبات التشتت. ويحدد هذا ما يلي:

- النطاق "الأصلي" (O-band)، الممتد من 1260 nm إلى 1360 nm.

تتضمن التوصية ITU-T G.652 أيضاً الألياف ذات ذروة التوهين المائية المنخفضة باعتبارها فئة فرعية G.652.C. وقد ورد أن "هذه الفئة الفرعية تتيح أيضاً لموصلات G.957 تجزئة النطاق إلى ما يتجاوز 1360 nm وما يقل عن 1530 nm." وآثار الذروة المائية الصغيرة تكاد تكون عديمة القيمة عند أطوال الموجات التي تتجاوز المقدار التقريبي 1460 nm. و هذا يحدد:

- النطاق "المتمدد" (E-band)، الممتد من 1360 nm إلى 1460 nm.

عند الأطوال الموجية الأكبر، اختار الخبراء الذين عكفوا على صياغة التوصية ITU-T G.957 المدى الممتد من 1430 nm إلى 1580 nm بالنسبة للتطبيقات قصيرة المدى مع ليفة G.652، والمدى الممتد من 1480 nm إلى 1580 nm بالنسبة للتطبيقات بعيدة المدى مع ألياف التوصيات G.652 وG.653 وG.654. وتحدد اعتبارات التوهين هذا المدى الذي يمكن أن يخضع لتقييد أكثر بفعل التشتت في جملة من التطبيقات المحددة.

وبالنسبة للتطبيقات ذات المضخمات البصرية التي تستعمل الإرسال أحادي القناة كما هو الحال في التوصية ITU-T G.991 والإرسال متعدد القنوات كما هو الحال في التوصية ITU-T G.992، فقد تم أخيراً تجزئة هذا المدى إلى فئات فرعية، وكان لمضخمات الألياف المعالجة بالإربيوم (EDFAs) نطاقات كسب مفيدة تبدأ عند 1530 nm تقريباً وتنتهي عند 1565 nm تقريبا. وقد أصبح هذا الكسب يعرف باسم النطاق التقليدي "C-band"، وتتفاوت الحدود في المواصفات الأدبية والتجارية. وجرى اعتماد المدى الممتد من 1530 nm إلى 1565 nm بالنسبة لليفة G.655 ولأنظمة G.691، وطورت المواصفات المتعلقة بالمدى. وهذا يحدد:

- النطاق "التقليدي" (C-band)، الممتد من 1530 nm إلى 1565 nm.

أصبحت مضخمات الألياف المعالجة بالإربيوم (EDFAs) متاحة مع مكاسب هي نسبياً أكثر تحديداً واتساعاً، ولا يفرض أي تقييد من تقييدات مضخمات الألياف المعالجة بالإربيوم (EDFAs) على هذا النطاق. ويمكن القول بأن بعض تصاميم مضخمات الألياف المعالجة بالإربيوم تتفوق على النطاق التقليدي "C-band".

وقد أصبحت المنطقة الواقعة أسفل النطاق التقليدي C-band" تعرف بنطاق طول الموجة القصير"S-band". وفي تطبيقات محددة، قد لا يكون كل هذا النطاق متاحاً لقنوات الإشارة. وقد تستعمل بعض أطوال الموجات لضخ مضخمات الألياف البصرية من نوع الأيونات النشطة ونوع رامان. وقد تحفظ بعض أطوال الموجات لقناة الإشراف البصرية (OSC). ويؤخذ

الحد الأدنى لهذا النطاق ليكون الحد الأعلى للنطاق المتمدد (E-band)، ويؤخذ الحد الأعلى ليكون الحد الأدنى للنطاق التقليدي (C-band). وهذا يحدد:

- نطاق "طول الموجة القصير" (S-band)، الممتد من 1460 nm إلى 1530 nm.

وبالنسبة لأطوال الموجات الأطول التي تقع أعلى النطاق التقليدي (C-band)، فإن أداء كبلات الألياف خلال مدى من درجات الحرارة يوافق القيمة 1625 nm بالنسبة إلى أنواع الألياف الحالية. وعلاوة على ذلك، فإنه من المستحب استعمال مدى واسع من أطوال الموجات كلما كان ذلك ملائماً لإرسال الإشارات. وهذا يحدد:

- نطاق "طول الموجة الطويل" (L-band)، الممتد من 1565 nm إلى 1625 nm.

بالنسبة إلى كبل الألياف الواقع خارج المحطة، تحدد التوصية ITU-T L.40 عدداً من وظائف التصليح– الوقاية، ما بعد التركيب، ما قبل الخدمة، ما بعد العطب. وتتضمن هذه الوظائف أنشطة المراقبة والاختبار والتحكم التي تستعمل اختبار القياس الانعكاسي للمجال الزمني البصري (OTDR) وتحديد الألياف واختبار الخسارة وقياس القدرة. وحددت التوصية ITU-T L.41 طول موجات التصليح. وتتضمن هذه التوصية الإفادات التالية:

- "تتناول هذه التوصية طول موجة التصليح فيما يتعلق بالألياف التي تحمل إشارات بدون مضخمات خطية بصرية."
- "مهمة طول موجة التصليح على علاقة وثيقة بمهمة طول موجة الإرسال التي اختارتها لجنة الدراسات 15."
- "لا تزال طول موجة الإرسال القصوى قيد الدراسة في لجنة الدراسات 15، ولكنها محددة بالقيمة التي تقل عن القيمة 1625 nm أو تعادلها."

وفي بعض الحالات، قد تتراكب إشارة الاختبار مع إشارات الإرسال حينما تكون قدرة الاختبار أضعف، بالمقدار الكافي، من قدرة الإرسال. وفي حالات أخرى، قد تتواجد طول موجة الاختبار في منطقة غير مشغولة بقنوات الإرسال الموجهة للتطبيق المحدد. وتحديداً، فإن المنطقة التي يجري تعيينها لكي لا تكون مشغولة البتة بهذه القنوات قد تكون منطقة جذب للتصليح، حتى وإن نجمت عن ذلك خسارة متزايدة. وهذا يحدد:

- نطاق "طول الموجة عالي الطول" (U-band)، الممتد من 1625 nm إلى 1675 nm.

ويلخص الجدول 5-1 الأنظمة أحادية الأسلوب:

الجدول 5-1 – النطاقات الطيفية أحادية الأسلوب

النطاق	الوصف	المدى [nm]
O-band	أصلي	من 1260 nm إلى 1360 nm
E-band	متمدد	من 1360 nm إلى 1460 nm
S-band	طول موجة قصير	من 1460 nm إلى 1530 nm
C-band	اصطلاحي	من 1530 nm إلى 1565 nm
L-band	طول موجة طويل	من 1565 nm إلى 1625 nm
U-band	طول موجة عالي الطول	من 1625 nm إلى 1675 nm

1) يهدف تعريف النطاقات الطيفية إلى تسهيل النقاش وليس إلى تحديد المواصفات. وتعرض مواصفات نطاقات أطوال موجات التشغيل في التوصيات المناسبة التي تتعلق بالأنظمة.

2) لم تؤكد التوصيات المتعلقة بالألياف G.65x قابلية تطبيق جميع نطاقات أطوال الموجات المذكورة بالنسبة إلى عمليات الأنظمة أو لأغراض التصليح.

3) لا يزال الحد الفاصل (1460 nm) بين النطاق المتمدد (E-band) ونطاق طول الموجة القصير (S-band) قيد الدراسة.

4) طول الموجة عالي الطول مخصص فقط لأغراض التصليح الممكنة، وإرسال الإشارات الحاملة للحركة غير متوقع الحدوث في الوقت الحاضر. ويتعين أن يكون الاستعمال لأغراض غير أغراض الإرسال على أساس إحداث تداخل عديم القيمة في إشارات الإرسال داخل النطاقات الأخرى. وعملية الليفة في هذا النطاق عملية غير مضمونة.

5) من المتوقع في المستقبل القريب أن تستعمل العديد من التطبيقات، مع المضخمات البصرية أو بدونها، إرسال إشارة يغطي كامل المدى الممتد من 1260 nm إلى 1625 nm.

3.5 النطاقات المتعلقة بأنظمة الألياف متعددة الأسلوب

لا تقيد الاعتبارات المتعلقة بطول موجة القطع الألياف متعددة الأسلوب. وعلى الرغم من أن قيم معامل التوهين الخاصة بها أكبر من تلك التي تخص الألياف أحادية الأسلوب، فمن الممكن أن تكون هنالك مقاومة أكبر لآثار الانحناء. وبتمثل التقييد الرئيسي لأطوال الموجات في نافذة أو أكثر من نوافذ عرض النطاق التي يمكن تصميمها لتصنيفات محددة من الألياف. ويتضمن الجدول 5-2 نوافذ عرض النطاق المعينة للعديد من التطبيقات:

الجدول 5-2 – نطاقات أطوال الموجات المتعلقة ببعض التطبيقات متعددة الأسلوب

التطبيق	النافذة (nm) حوالي 850 nm	النافذة (nm) حوالي 1300 nm
IEEE Serial Bus [1]	860-830	–
قناة الألياف [2]	860-770	أسلوب أحادي
10BASE-F, -FB, -FL, -FP [3]	910-800	–
100BASE-FX [3, 4], FDDI [4]	–	1380-1270
1000BASE-SX [3] (GbE)	860-770	–
1000BASE-LX [3] (GbE)	–	1355-1270
HIPPI [5]	860-830	1360-1260

وستعنى دراسة إضافية بالتصنيف المتعلق بالألياف متعددة الأسلوب. وقد جرى اقتراح المنطقة الممتدة من770 nm إلى 910 nm.

6 معلمات عناصر النظام

1.6 التشفير الخطي

يتم التشفير الخطي للأنظمة المحدد في التوصيات G.957 وG.691 وG.692 وG.959.1 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) باستعمال نوعين مختلفين من الشفرات الخطية:

- اللاعودة إلى الصفر (NRZ)؛
- العودة إلى الصفر (RZ).

ويمكن الحصول على معلومات أكثر حول هذا الموضوع في الفقرة 7.

2.6 المرسلات

1.2.6 أنواع المرسلات

تتضمن التوصيات G.957 وG.691 وG.692 وITU-T G.959.1 أنواع المرسلات التي تستعمل ثنائيات المسارات الليزرية ذات الأسلوب الطولي المتعدد (MLM) والأسلوب الطولي الوحيد (SLM) كما تتضمن المواصفات الملائمة بالإضافة إلى الجوانب المتصلة بالتنفيذ.

2.2.6 معلمات المرسلات

هذه المعلمات محددة عند إحدى النقطتين المرجعيتين لخرج المرسِل، وهما نقطة السطح البيني البصري أحادي القناة في المرسل (S) أو نقطة التداخل متعدد المسارات عند المنبع (MPI-S)، وذلك على النحو الوارد في التوصيات G.957 وG.691 وG.692 وG.959.1 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T).

1.2.2.6 مدى طول موجات تشغيل النظام

تتضمن التوصيتان G.691 وG.957 الصادرتان عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) مدى طول موجات التشغيل في الأنظمة أحادية القناة بتراتب رقمي متزامن (SDH) التي تعمل بمعدل يصل إلى 10 Gbit/s. وتعين التوصية G.959.1 الصادرة عن نفس القطاع مدى طول موجات تشغيل السطوح البينية أحادية القناة والسطوح البينية متعددة القنوات فيما بين المجالات (IrDIs) والتي تعمل بمعدل يصل إلى 40 Gbit/s. وقد تستعمل تطبيقات أخرى نطاقات ومدى طول موجات مختلفة داخل النطاقات حسبما هو محدد في هذه الإضافة.

وبالنسبة إلى أنظمة تعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM)، فإن التوصية ITU-T G.694.1 تتضمن شبكة تردد القنوات. وتتلخص شبكة تردد القنوات بالنسبة إلى أنظمة تعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM) فيما يلي:

$$193.1 + n * Sp_j \ [\text{THz}]$$

حيث إن:

n يمثل الأعداد الصحيحة الموجبة أو السالبة بما في ذلك الصفر؛

J يمثل أي عدد من الأعداد الصحيحة التالية: 1 أو 2 أو 3؛

Sp_j يمثل عاملاً لاشتقاق المباعدة التنوعية بين القنوات بالنسبة إلى أحد الألياف؛

$Sp_j = 2^{-j} * 0.1 \ [\text{THz}]$، حينما تكون المباعدة بين القنوات أضيق من 100 GHz، أو

$Sp_j = 0.1 \ [\text{THz}]$، حينما تكون المباعدة بين القنوات تساوي أو تفوق 100 GHz.

وتتألف الترددات المركزية الاسمية المعرفة بالصيغ الواردة أعلاه من شبكة الترددات بالنسبة إلى الأنظمة المكثفة لتعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM). وعند اختيار قيمة j، تتحدد القيم ذات الصلة المتعلقة بالمباعدة بين القنوات وبالترددات المركزية الاسمية في أحد أنظمة تعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM). وتتوافق قيم j التي تساوي 1 و2 و3 على التوالي مع الشبكات 50 و25 و12,5 والمقدرة بالجيغاهرتز.

2.2.2.6 الخصائص الطيفية

تتضمن التوصيتان G.957 وG.691 الصادرتين عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) الخصائص الطيفية للسطوح البينية أحادية القناة بتراتب رقمي متزامن (SDH) التي تعمل بمعدل يصل إلى 10 Gbit/s. وقد يكون من الضروري إيجاد مواصفات إضافية لمعدلات البتات الأعلى والمسافات الأطول، لا سيما في وسط متعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM).

3.2.2.6 الحد الأقصى لعرض طيف مصادر الأسلوب الطولي الوحيد (SLM)

تحدد التوصية ITU-T G.691 هذه المعلمة للأنظمة أحادية القناة بتراتب رقمي متزامن (SDH).

4.2.2.6 الحد الأقصى لعرض طيف مصادر الأسلوب الطولي المتعدد (MLM)

تحدد التوصية ITU-T G.691 هذه المعلمة للأنظمة أحادية القناة بتراتب رقمي متزامن (SDH).

5.2.2.6 تنوع طول الموجات

تحدد التوصية ITU-T G.691 هذه المعلمة. ويحتمل أن تكون هناك حاجة لإيجاد مواصفات إضافية لسلوك دينامي مقرر زمنياً الأنظمة التي تعمل بمعدل بتات أعلى أو لمسافات أطول، وربما تعمل أيضاً عبر شفرات خط أخرى. ويخضع هذا الموضوع، إلى جانب قياس هذه المعلمة، للمزيد من البحث.

6.2.2.6 نسبة كبت الأسلوب الجانبي

تحدد التوصيات G.957 وG.691 وG.959.1 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) نسبة كبت الأسلوب الجانبي لمصدر بصري بأسلوب طولي أحادي. وترد فيها قيم محددة لأنظمة التراتب الرقمي المتزامن (SDH) وأنظمة السطوح البينية فيما بين المجالات (IrDI) لشبكة النقل البصرية (OTN) والتي تعمل بمعدل يصل إلى 40 Gbit/s.

7.2.2.6 الحد الأقصى لكثافة القدرة الطيفية

تحدد التوصية ITU-T G.691 الحد الأقصى لكثافة القدرة الطيفية.

8.2.2.6 الحد الأقصى لمتوسط قدرة خرج القناة

تعين وتعرِّف التوصية ITU-T G.959.1 الحد الأقصى لمتوسط قدرة خرج قناة ذات إشارة بصرية متعددة القنوات.

9.2.2.6 الحد الأدنى لمتوسط قدرة خرج القناة

هذه الخاصية التي تتسم بها إشارة بصرية متعددة القنوات محددة ومعرَّفة في التوصية ITU-T G.959.1.

10.2.2.6 الترددات المركزية

تتضمن التوصية ITU-T G.959.1 والتوصية ITU-T G.694.1 الترددات المركزية لإشارات تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM). وترد هذه الترددات هنا بمقدار مباعدة منخفض بين القنوات يصل إلى 12,5 GHz.

11.2.2.6 المباعدة بين القنوات

تحدد التوصية ITU-T G.694.1 المباعدة بين القنوات في تعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM) فضلاً عن تحديد هذه المباعدة في تعدد الإرسال بتقاسم تقريبي لطول الموجات (CWDM) في التوصية ITU-T G.694.2. توجد احتمالات أخرى (أوسع وأكثر كثافة) لا تزال قيد المزيد من البحث.

12.2.2.6 الحد الأقصى لانحراف التردد المركزي

تعين التوصيتان G.692 وG.959.1 الصادرتان عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) الحد الأقصى لانحراف التردد المركزي في القنوات البصرية المشفرة باللاعودة إلى الصفر (NRZ). وقد تتطلب احتمالات أخرى تستعمل ترشيحاً غير متناظر تعريفاً مختلفاً لا يزال قيد المزيد من البحث.

13.2.2.6 الحد الأدنى لنسبة الخمود

تعين التوصية ITU-T G.959.1 الحد الأدنى لنسبة الخمود كقيمة لكل قناة في أنظمة تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM) المشفرة باللاعودة إلى الصفر (NRZ). وتنطبق نفس الطريقة على الإشارات المشفرة بالعودة إلى الصفر (RZ). أما فيما يتعلق بشفرات الخط الأخرى، فإن هذا التعريف هو رهن المزيد من البحث.

14.2.2.6 قناع مخطط العين

تتضمن التوصيات G.957 وG.691 وG.693 وغيرها من التوصيات الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) أقنعة مخطط العين في الأنظمة الأحادية القناة بتراتب رقمي متزامن (SDH). وتحدد التوصية ITU-T G.959.1 أقنعة مخطط العين في السطوح البينية أحادية القناة والسطوح البينية متعددة القنوات فيما بين المجالات (IrDI) المشفرة باللاعودة إلى الصفر (NRZ).

15.2.2.6 الاستقطاب

تعطي هذه المعلمة توزيع استقطاب إشارة المصدر البصرية. وقد تؤثر هذه المعلمة على التفاوت المسموح به في تشتت أسلوب الاستقطاب (PMD) وهي معلمة مهمة في حالة تعدد إرسال الاستقطاب.

16.2.2.6 نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية لمصدر بصري

تعطي هذه القيمة نسبة قدرة الإشارة البصرية بالمقارنة مع قدرة الضوضاء البصرية لمرسِل بصري في عرض نطاق معين مقترن بمسير الإرسال.

3.6 المضخمات البصرية

1.3.6 أنواع المضخمات

تتضمن التوصيات G.661 وG.662 بالإضافة إلى التوصية G.663 الصادرة، على نحو متتال، عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) أنواع المضخمات البصرية والمواصفات ذات الصلة، بالإضافة إلى الجوانب المتعلقة بتنفيذ مضخمات الألياف البصرية والمضخمات شبه الموصلة. وتتضمن التوصية ITU-T G.692 تعريفات المضخم الخطي للأنظمة طويلة المدى ذات القنوات المتعددة. وبالإضافة إلى هذا، فإنه يمكن استعمال تضخيم رامان في ليفة الإرسال أو أقسام الألياف الإضافية في مسار الإرسال. وستعنى دراسة إضافية بالتصنيف المتعلق بتضخيم رامان.

ويمكن استعمال المضخمات بالتزامن مع استعمال المستقبلات و/أو المرسلات. وفي هذه الحالات فإنها تكون مخبأة في الصندوق الأسود المستقبل أو المرسل ومشمولة بالمواصفة ذات الصلة. وتنبغي الإشارة إلى أن إعاقات جانب المستقبل، مثل إعاقة الارتعاش، تتأثر بوجود التضخيم البصري.

وتعين التوصية ITU-T G.661 قائمة شاملة بالمعلمات النوعية للمضخمات. وفي التصميم العملي للأنظمة فإن جزءاً فقط من مجموعة هذه المعلمات له صلة بالموضوع.

1.1.3.6 مضخم القدرة (التعزيز)

التطبيقات مفصلة في التوصية ITU-T G.663.

2.1.3.6 المضخم المسبق

التطبيقات مفصلة في التوصية ITU-T G.663.

3.1.3.6 المضخم الخطي

التطبيقات مفصلة في التوصية ITU-T G.692.

ويمكن استعمال مضخمات تكنولوجية مختلفة: مضخمات الألياف البصرية (OFA) والمضخمات شبه الموصلة البصرية (SOA) بالإضافة إلى مضخات ألياف رامان (RFA)، وهي تستعمل ليفة الإرسال أو الأقسام الإضافية الألياف في مسار الإرسال. وستعنى دراسة إضافية بالتصنيف المتعلق بمضخات ألياف رامان (RFA).

2.3.6 معلمات المضخمات

1.2.3.6 التباين في الكسب المتعدد القنوات

هذا المعلم معرف في النشرة 4-61291 الصادرة عن اللجنة الكهرتقنية الدولية (IEC).

2.2.3.6 ميل الكسب المتعدد القنوات

هذا المعلم معرف في النشرة 4-61291 الصادرة عن اللجنة الكهرتقنية الدولية (IEC).

3.2.3.6 الاختلاف في تغير الكسب المتعدد القنوات

هذا المعلم معرف في النشرة 4-61291 الصادرة عن اللجنة الكهرتقنية الدولية (IEC).

4.2.3.6 إجمالي القدرة المستقبلة

ويمثل هذا المعلم الحد الأقصى لمتوسط قدرة الإدخال المحددة في النقطة المرجعية الواقعة عند إخراج المضخم.

5.2.3.6 إجمالي القدرة المطلقة

ويمثل هذا المعلم الحد الأقصى لمتوسط قدرة الخرج المحددة في النقطة المرجعية الواقعة عند خرج المضخم.

4.6 المسار البصري

يتألف المسار البصري من جميع عناصر الإرسال في السلسلة الواقعة بين نقطة السطح البيني البصري أحادي القناة في المرسل 'S' ونقطة السطح البيني البصري أحادي القناة في المستقبل 'R'. وغالبية هذه العناصر هي في العادة عبارة عن كبل ألياف بصري، غير أن بعض العناصر الأخرى (مثل الموصلات والوصلات المتقاطعة البصرية، وغيرها) الواقعة بين نقطة السطح البيني البصري أحادي القناة في المرسل 'S' ونقطة السطح البيني البصري أحادي القناة في المستقبل 'R'، تمثل بدورها جزءاً من المسار البصري وتساهم في تشكيل خصائص المسار. وتعين قيم معلم المسار البصري، المدرجة في التوصيتين G.957 وG.691 وغيرهما من التوصيات المتعلقة بالسطوح البينية الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T)، الحدود التي تسمح بعملية وصل مرضية. وقد تتسبب المسارات البصرية ذات القيم الواقعة خارج محال هذه الحدود في أن يتجاوز أداء الوصلات نسبة الخطأ المطلوبة في البتات.

واعتمد النهج المستعمل لتحديد قيم حدود معلم المسار البصري، في بعض الحالات، على توافق مبلغ في الآراء حول ما يمكن توقعه منطقياً وعملياً. وأخذت المعلمات الفردية للمسار البصري والكيفية التي تتوافق بها بعين الاعتبار في عملية تعيين الحدود (انظر الفقرة 10 المتعلقة بجوانب التصميم الإحصائي).

1.4.6 معلمات وأنواع الألياف

تحدد التوصيات G.650 وG.652 وG.653 وG.654 وG.655 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) المعلمات ذات الصلة بالكبلات والألياف البصرية.

وينبغي الإشارة إلى أنه بالنسبة إلى بعض أنظمة الإرسال التي تعمل بمعدل بتات عال أو لمسافات طويلة، فإن المعلمات المعينة لأنواع الألياف المختلفة قد لا تكون دقيقة بالقدر الكافي لضمان الأداء المناسب.

2.4.6 آثار المسار البصري

يتضمن التذييل II/التوصية G.663 الجوانب المتصلة بالإرسال في أنظمة إرسال الألياف البصرية. وتتم في إطاره دراسة الآثار التالية التي لها صلة بالمسار:

- لاخطيات الألياف البصرية:
  - انتثار بريلوين المستحث؛
  - خلط الموجات الأربع؛
  - عدم استقرار التشكيل؛
  - تشكيل ذاتي الطور؛
  - تكون الموجات الوحيدة؛
  - التشكيل المتقاطع الأطوار؛
  - انتثار رامان المستحث.

- خواص الاستقطاب:
  - تشتت أسلوب الاستقطاب؛
  - الخسارة المعتمدة على الاستقطاب؛
  - احتراق فجوة الاستقطاب.
- خواص تشتت الألياف.
- التشتت اللوني.

3.4.6 معلمات المسار البصري

يتميز المسار البصري من ناحية منظور الأنظمة بالمعلمات التالية:

1.3.4.6 الحد الأقصى للتوهين

تتضمن التوصيات G.957 وG.691 وG.692 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) تعريف وقيم الحد الأقصى للتوهين بالنسبة إلى أنظمة التراتب الرقمي المتزامن الخطية (SDH).

بالنسبة لأنظمة السطوح البينية فيما بين المجالات (IrDIs) لشبكة النقل البصرية (OTN)، تتضمن التوصية ITU-T G.959.1 تعريف الحد الأقصى للتوهين.

وتعرف التوصيات الواردة أعلاه التطبيقات التي تتم في النطاق الأصلي والنطاق التقليدي ونطاق طول الموجة الطويل. وتجدر الإشارة إلى أن قيماً مختلفة للتوهين قد تستعمل في نطاقات أخرى. ففي نطاق طول الموجة الطويل قد تتزايد قيمة معامل التوهين لبعض الألياف بفعل الخسارة في الانحناءات الكبرى و/أو الانحناءات الصغرى بعد تركيب الكبلات. والقيمة الحقيقية للخسارة المتزايدة مرتبطة ببنية الكبلات وظروف وتاريخ تركيبها. ويمكن تحديدها بواسطة قياس الخسارة عند أطوال الموجات المطلوبة بعد تركيب الكبلات.

ويتمثل النهج المستعمل لتحديد المشار البصري في التوصيات الواردة أعلاه في ضرورة استـــعمال الافتراض 0,275 dB/km بالنسبة إلى معامل توهين الألياف المركبة بما في ذلك هوامش الوصلات المجدولة والكبلات بالنسبة إلى أنظمة 1550-nm و0,55 dB/km بالنسبة إلى أنظمة 1310-nm. ويتعين استعمال المسافات المستهدفة التي اشتقت من هذه القيم في عملية التصنيف وليس في تحديد المواصفات.

وتتضمن جوانب المسار ما يلي:

- الوصلات المجدولة؛
- الموصلات؛
- الموهنات (عند استعمالها)؛
- أي هامش إضافي للكبلات لتغطية التفاوتات بالنسبة إلى:
  - التعديلات التي تجري مستقبلاً على تشكيلة الكبل (الوصلات المجدولة الإضافية، أطوال الكبلات المتزايدة، إلى غير ذلك)؛
  - التباينات في أداء ألياف الكبلات التي تحدث بسبب العوامل البيئية؛
  - تدهور أي من الموصلات أو الموهنات البصرية أو الأجهزة البصرية المنفعلة الداخلة في المسار البصري.

2.3.4.6 الحد الأدنى للتوهين

تتضمن التوصيات G.957 وG.691 وG.692 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) تعريف وقيم الحد الأدنى للتوهين بالنسبة إلى أنظمة التراتب الرقمي المتزامن الخطية (SDH).

بالنسبة لأنظمة السطوح البينية فيما بين المجالات (IrDIs) لشبكة النقل البصرية (OTN)، تتضمن التوصية ITU-T G.959.1 تعريف الحد الأدنى للتوهين.

3.3.4.6 التشتت

تتضمن التوصيات G.957 وG.691 وG.692 وG.959.1 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) تعريف الحدين الأقصى والأدنى للتشتت اللوني، المستحثين عادة بليفة الإرسال البصرية، واللذين يتعين تكييفهما بواسطة أحد الأنظمة بالنسبة إلى أنظمة التراتب الرقمي المتزامن الخطية (SDH) وشبكة النقل البصرية (OTN). وبالنسبة إلى معدلات البتات الأعلى وأنظمة الإرسال ذات المسافات الأطول، قد يجري تطبيق قيم مختلفة بسبب مواصفات مدى طول الموجات على سبيل المثال. ومن الضروري أيضاً إعادة النظر في القيم بالنسبة إلى نطاقات أخرى.

4.3.4.6 الحد الأدنى لخسارة العودة البصرية

تتضمن التوصيات G.957 وG.691 وG.692 وG.959.1 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) تعريف الحد الأدنى لخسارة العودة البصرية بالنسبة إلى أنظمة التراتب الرقمي المتزامن الخطية (SDH) و شبكة النقل البصرية (OTN). وقد تختلف القيم بالنسبة إلى الأنظمة المستقبلية التي تستعمل معدلات البتات الأعلى والإرسال غبر مسافات أطول.

5.3.4.6 الحد الأقصى لمعامل الانعكاس المتفرد

تتضمن التوصيات G.957 وG.691 وG.692 وG.959.1 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) تعريف الحد الأقصى لمعامل الانعكاس المتفرد لأنظمة التراتب الرقمي المتزامن الخطية (SDH) و شبكة النقل البصرية (OTN).

6.3.4.6 الحد الأقصى لمهلة انتشار المجموعة التفاضلية

تتضمن التوصيات G.957 وG.691 وG.692 وG.959.1 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) تعريف الحد الأقصى لمهلة انتشار المجموعة التفاضلية التي يسببها تشتت أسلوب الاستقطاب (PMD) والتي يتعين تكييفها بالنسبة إلى أنظمة التراتب الرقمي المتزامن الخطية (SDH) وشبكة النقل البصرية (OTN). وقد تقدم معدلات البتات الأعلى وأنظمة الشفرات الخطية مواصفات مختلفة.

5.6 المستقبلات

1.5.6 أنواع المستقبلات

يمكن استعمال المضخمات بالتزامن مع استعمال المستقبلات البصرية. وفي هذه الحالة فإن المضخم يكون مخبأ في الصندوق الأسود للمستقبل ومشمولاً بالمواصفة ذات الصلة. وتنبغي الإشارة إلى أن إعاقات جانب المستقبل، مثل إعاقة الارتعاش، تتأثر بوجود التضخيم البصري.

2.5.6 معلمات المستقبِلات

هذه المعلمات محددة في النقاط المرجعية للمستقبِل (R) أو السطح البيني المتعدد المسيرات في المستقبِل (MPI-R) مثلما يرد في التوصيات G.957 وG.691 وG.692 وG.959.1 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T).

1.2.5.6 الحساسية

تحدد التوصيتان G.957 وG.691 الصادرتان عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) حالات حساسية المستقبِلات للأنظمة أحادية القناة بتراتب رقمي متزامن (SDH) التي تعمل بمعدل يصل إلى 10 Gbit/s. أما حالات حساسية المستقبِلات لأنظمة التراتب الرقمي المتزامن (SDH) وأنظمة السطوح البينية فيما بين المجالات (IrDI) لشبكة النقل البصرية (OTN) فتحددها التوصية ITU-T G.959.1.

وتعرف حالات حساسية المستقبلات هذه على أنها قيم معبرة عن نهاية عمر النظام وقيم أسوأ الحالات مع مراعاة هامشي التقادم ودرجة الحرارة فضلاً عن قناع عين أسوأ الحالات وإعاقات نسبة الخمود التي تسببها عيوب المرسل المحددة في مواصفات مرسلات السطح البيني المحدد.

ومع ذلك، فإن الإعاقات المتصلة بآثار المسار محددة بمعزل عن القيمة الأساسية للحساسية.

2.2.5.6 الحمولة الزائدة

تحدد التوصيتان G.957 وG.691 الصادرتان عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) تعريف الحمولة الزائدة للمستقبِلات وقيم الأنظمة أحادية القناة بتراتب رقمي متزامن (SDH) التي تعمل بمعدل يصل إلى 10 Gbit/s. أما التوصية ITU-T G.959.1 فتحدد تعريف الحمولة الزائدة وقيم مستقبلات التراتب الرقمي المتزامن (SDH) ومستقبلات السطوح البينية فيما بين المجالات (IrDI) لشبكة النقل البصرية (OTN) التي تعمل بمعدل يصل إلى 40 Gbit/s.

3.2.5.6 الحد الأدنى لمتوسط قدرة دخل القناة

تحدد التوصية ITU-T G.959.1 الحد الأدنى لمتوسط قدرة دخل قناة السطوح البينية متعددة القنوات فيما بين المجالات (IrDIs) والمتعددة الإرسال البصري التي تعمل بمعدل يصل إلى 10 Gbit/s في المستقبِلات المتعددة القنوات.

4.2.5.6 الحد الأقصى لمتوسط قدرة دخل القناة

تحدد التوصية ITU-T G.959.1 الحد الأقصى لمتوسط قدرة دخل قناة السطوح البينية متعددة القنوات فيما بين المجالات (IrDIs) والمتعددة الإرسال البصري التي تعمل بمعدل يصل إلى 10 Gbit/s في المستقبلات المتعددة القنوات.

5.2.5.6 خطأ المسير البصري

تحدد التوصيتان G.957 وG.691 الصادرتان عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) تعريف إعاقة المسير البصري وقيم الأنظمة أحادية القناة بتراتب رقمي متزامن (SDH) التي تعمل بمعدل يصل إلى 10 Gbit/s. أما التوصية ITU-T G.959.1 فتحدد تعريف هذه الإعاقة وقيم مستقبلات السطوح البينية فيما بين المجالات (IrDI) الأحادية القناة والمتعددة القنوات على حد سواء لشبكة النقل البصرية (OTN) والتي تعمل بمعدل يصل إلى 10 Gbit/s. كما تحدد نفس التوصية (G.959.1) تعاريف إعاقة المسير وقيم المستقبلات أحادية القناة بتراتب رقمي متزامن (SDH) ومستقبلات السطوح البينية فيما بين المجالات (IrDI) لشبكة النقل البصرية (OTN) والتي تعمل بمعدل يصل إلى 40 Gbit/s.

6.2.5.6 الحد الأقصى لاختلاف قدرة دخل القناة

تبين هذه المعلمة الحد الأقصى للاختلاف في قدرة دخل قنوات إشارة متعددة الإرسال البصري وهي محددة في التوصية ITU-T G.959.1.

7.2.5.6 الحد الأدنى لنسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) في دخل المستقبل

تحدد هذه القيمة الحد الأدنى لنسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية اللازمة لتحقيق نسبة الخطأ في البتات (BER) المستهدفة عند نقطة مرجعية لمستقبل ما بمستوى قدرة معين في الأنظمة التي تكون فيها نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) محددة (مضخمة خطياً). ومن الجدير بالذكر أن هذه هي إحدى معلمات التصميم.

7 اعتبارات التشفير الخطي

تعتمد الأنظمة الحالية وفق التعريف الوارد في التوصيات G.957 وG.691 وG.692 وG.959.1 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) على إرسال اللاعودة إلى الصفر (NRZ). وتعرف هذه التوصيات المعلمات ذات الصلة (بالإضافة إلى تعريف العدد المنطقي "0" والعدد المنطقي "1"). وقد تكون بعض الشفرات الخطية الأخرى صالحة بالنسبة إلى التطبيقات المطلوبة بشكل أكبر.

وتمتلك أنظمة العودة إلى الصفر (RZ) المشفرة خطياً قدرة عالية على تحمل التشتت بأسلوب الاستقطاب (PMD) من الرتبة الأولى الذي يستحث زمن الانتشار التفاضلي لمجموعة الترددات (DGD)، ومن ثم فهي أحسن ملاءمة لإرسال الإشارات ذات المعدلات العالية بالنسبة إلى المضخمات الخطية للأنظمة التي تتميز بالمدى عالي الطول. ومع ذلك، فنظراً لعرض النطاق الأوسع المتعين استعماله، فإن تشفير العودة إلى الصفر (RZ) ينطوي على إمكانية الارتداد لكونه أقل كفاءة من الناحية الطيفية مقارنة بتشفير اللاعودة إلى الصفر (NRZ).

وقد جرى البحث في نسق تشفير العودة إلى الصفر (RZ) التي تتشكل فيها نبضات العودة إلى الصفر (RZ) طورياً. ولا تتمثل الفائدة التي تقدمها هذه النسق في تحسين التسامح بالنسبة للتشتت بأسلوب الاستقطاب (PMD) فحسب، بل تتمثل أيضاً في تعزيز التسامح غير الخطي. وعلاوة على ذلك، فمن الممكن أن يقدم هذا النسق كفاءة طيفية أحسن مقارنة بالنسق النقي لتشفير العودة إلى الصفر (RZ).

وقد نشرت المواضيع المتعلقة بالشفرات الخطية الأخرى لمعدلات البتات عالية الطول بهدف استكمال عرض نطاق القناة الأدنى والكثافة الطيفية الأعلى بالنسبة إلى ليفة الإرسال. ونشر على الخصوص ما له علاقة بالعديد من الصفات المميزة للتشفير "الثنائي المزدوج" أو التشفير متعدد المستويات. ولا يزال موضوع قدرة تحمل الإضعاف المتصل بمسار الإرسال والعنصر المرسل والمستقبل قيد المزيد من البحث.

وسيؤثر استعمال الشفرات الخطية التي تختلف عن شفرات اللاعودة إلى الصفر (NRZ) على العلاقة بين المعلمات المختلفة بالنسبة إلى النظام، وبالتالي فسينعكس هذا الاستعمال على مجموعة المعلمات المختلفة عن المعلمات الحالية وعلى ترابطها الذي يستعمل في التطبيقات المعيارية.

1.7 تنفيذ العودة إلى الصفر (RZ)

هنالك العديد من الطرائق المستعملة لتوليد إشارات العودة إلى الصفر (RZ) البصرية، مثل التشكيل المباشر لليزر شبه الموصل مع إشارة بيانات العودة إلى الصفر (RZ)، وذلك عن طريق توليد سلسلة نبضات بصرية أولاً ثم تشكيلها مع إشارة بيانات اللاعودة إلى الصفر (NRZ)، أو عن طريق نحت نبضي لإشارة من إشارات اللاعودة إلى الصفر (NRZ) البصرية بواسطة مشَكل ماخ–زهندر (MZM).

وقد استعمل الخيار الأخير بشكل عملي نظراً لبساطته ونظراً لإمكانية إجراء العديد من دورات الاستخدام عن طريق توليفة ملائمة من الفلطية المائلة واتساع تشكيل مشَكل ماخ–زهندر (MZM). ويمكن أن يتولد الدخل البصري لمشَكل ماخ-زهندر (MZM) من ثنائيات المسارات الليزرية (LD) المشكلة بصورة مباشرة أو ليزر تقريبي لطول الموجات (CW) سواء أكان ذلك مع مشَكل ماخ–زهندر (MZM) أو مع مشكل امتصاص كهربائي.

ودورات الشغل الثلاث الممكن تحقيقها بسهولة هي 1/3 و1/2 و2/3 (ويرجع إليها وفق النسب 33% و50% و67% على التوالي في النص الوارد أدناه). ويوضح الجدول 7-1 التنفيذات الممكنة المقابلة لتنفيذ مشَكل ماخ–زهندر (MZM).

مع فلطية محركة:

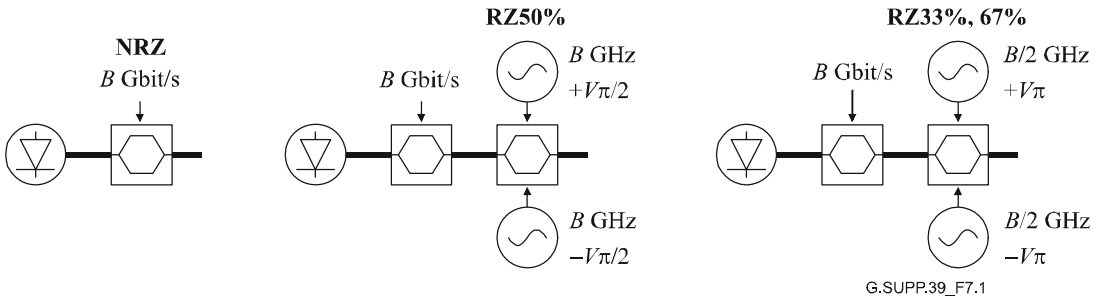
$$V_m(t) = V_{bias} + V_{RF}(t) = V_{bias} + V_{RF}\cos(2\pi ft + \phi_m) \tag{1-7}$$

حيث تمثل V_{bias} التيار المستمر (DC) للفلطية المائلة وV_{RF} توسع تشكيل التردد الراديوي RF، وf_{mod} تردد تشكيل التردد الراديوي RF وϕ_m زحزحة الطور. ويمكن كتابة دالة تحول القدرة البصرية لمشَكل ماخ–زهندر (MZM) على النحو التالي:

$$T(t) \propto \cos^2\left[\frac{\pi V_m(t)}{2V_\pi} + \frac{\theta}{2}\right] = \cos^2\left[\frac{\pi V_{bias}}{2V_\pi} + \frac{\pi V_{RF}(t)}{2V_\pi} + \frac{\theta}{2}\right] \tag{2-7}$$

وفيها تمثل θ زحزحة الطور المتأصل لمشَكل ماخ–زهندر (MZM) بدون الفلطية المحركة، وتمثل V_π فلطية زحزحة الطورπ لمشَكل ماخ–زهندر (MZM). ونعرف أنه إذا ما كانت $V_{bias} = V_{max}$، فإن مشَكل ماخ–زهندر (MZM) هو عبارة عن التيار المستمر (DC) الذي يميل عند الحد الأقصى لإرساله البصري.ويمكن أن يحرك مشَكل ماخ–زهندر (MZM) أيضاً بطريقة متوازنة (الدفع والجذب).

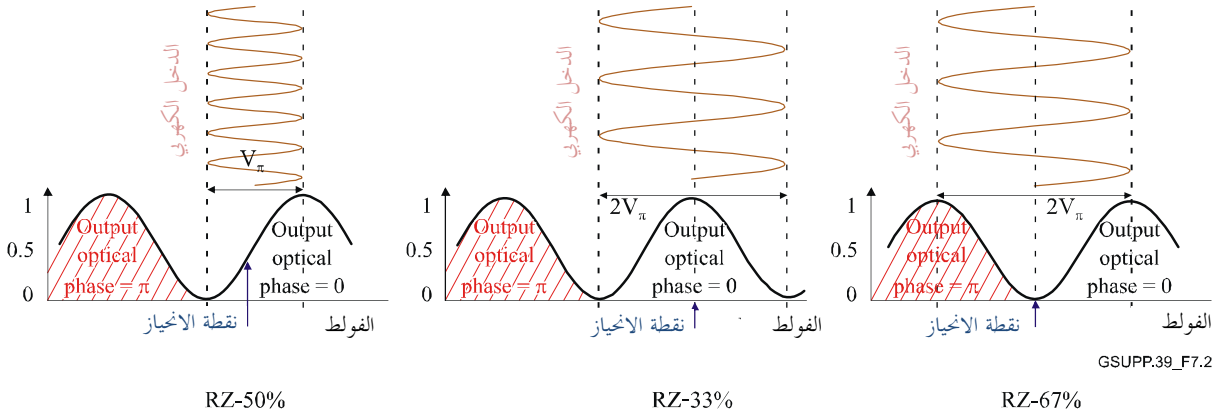
ويظهر تشفير اللاعودة إلى الصفر (NRZ) هنا مستعملاً لمشَكل ماخ–زهندر (MZM) مع إلكترود محرك وحيد. وتنجز عملية النحت النبضي للعودة إلى الصفر (RZ) بطريقة الدفع والجذب الخاصة بمشَكل ماخ–زهندر (MZM) والتي تتبع مشكل بيانات اللاعودة إلى الصفر (NRZ). ويوضح الشكل 7-1 مجموعة الرسوم البيانية الأساسية لتشفير نسق العودة إلى الصفر (RZ) واللاعودة إلى الصفر (NRZ):



الشكل 7-2 – مجموعة الرسوم البيانية لتشفير نسق اللاعودة إلى الصفر (NRZ) ونسق العودة إلى الصفر (RZ) بمشَكل ماخ-زهندر (MZM)

وفي حالة تشكيل الدفع والجذب الخالي من التنوع بالنسبة إلى مشَكل ماخ–زهندر (MZM) المكون من عنصر $LiNbO_3$ والذي له ذراعا القطع من النوع z، ينقسم تشكيل الذروة إلى الذروة المتعلق، على سبيل المثال، بالقيمة Vπ إلى +Vπ/2 و–Vπ/2 من أجل الحصول على النسق RZ-50%؛ انظر الشكل 7-1. وعلى نحو متناوب، يمكن تحقيق تشكيل العودة إلى الصفر (RZ) باستعمال مشَكل ماح–زهندر (MZM) الذي له ذراع وحيدة وذلك بتطبيق تشكيل الذروة إلى الذروة المتعلق بالقيمة Vπ عند الذراع الوحيدة للحصول على النسق RZ-50%.

ويتوقف توليد دورات الاستخدام الثلاث المختلفة للعودة إلى الصفر (RZ) على تردد مشكل العودة إلى الصفر (RZ) وفلطية تشكيل الذروة إلى الذروة الكهربائية وميل المشكل. ويوضح الشكل 7-2 شروط تحريك نسق العودة إلى الصفر (RZ) ذات النسبتين 50% و33% ودورة استخدام الموجات الحاملة المكبوتة (CS-RZ) ذات النسبة 67%.



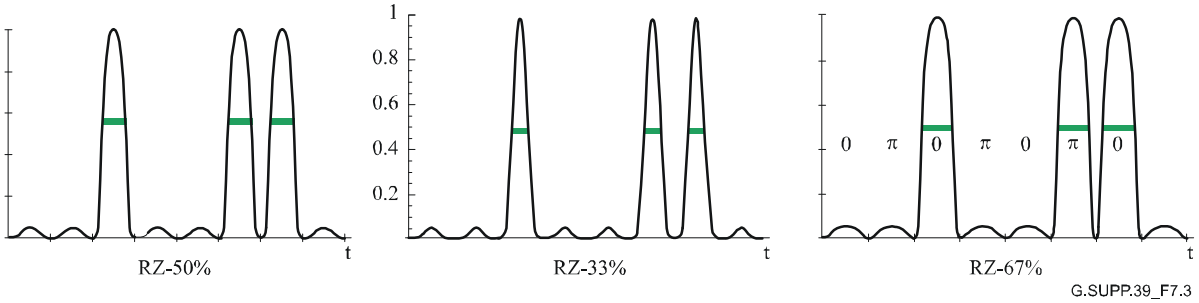
الشكل 7-2 – التشكيلات المائلة لنسق العودة إلى الصفر (RZ)

يلخص الجدول 7-1 الأرقام الرئيسية لدورات الاستخدام الثلاث المتعلقة بالعودة إلى الصفر (RZ)، حيث تمثل f_{mod} تردد التشكيل، وV_{mod} فلطية تشكيل الذروة إلى الذروة ($2V_{RF}$)، وتبين V_{bias} شروط الميل: V_{min} وV_{max} هما نقطتا الميل عند الحد الأدنى للإرسال (حيث الناقل منزوع) والحد الأقصى على التوالي، وتمثل V3dB نقطة الميل التقليدية لمشَكل ماح-زهندر (MZM) التي تستعمل أيضاً بالنسبة إلى تشكيل بيانات اللاعودة إلى الصفر (NRZ) من قبل مشكل اللاعودة إلى الصفر (NRZ). وتبين "زحزحة الطور" زحزحة الطور بين نبضات وبتات العودة إلى الصفر (RZ) المتعاقبة.

الجدول 7-1 – أرقام تشكيل نسق العودة إلى الصفر (RZ) عند 43 Gbit/s

RZ-	%33	%50	%67 (CS-RZ)
(GHz) f_{mod}	21,5	43	21,5
V_{mod}	$2V_{\pi}$	V_{π}	$2V_{\pi}$
V_{bias}	V_{max}	V_{3dB}	V_{min}
زحزحة الطور	0,0,0	0,0,0	0,π,0

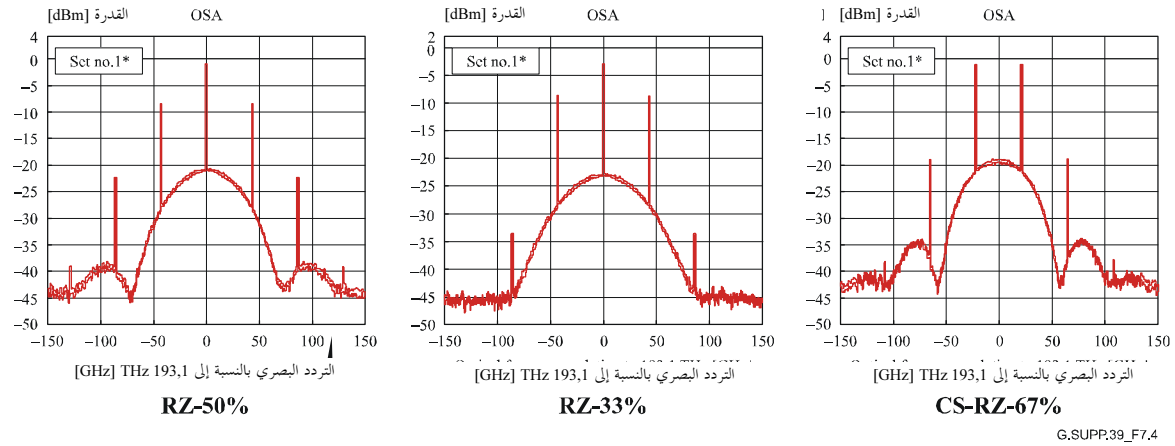
يبين الشكل 7-3 تباين شدة نبضات العودة إلى الصفر (RZ) التي تتبع تشكيل بيانات اللاعودة إلى الصفر (NRZ) مع تسلسل البيانات '00100110'. وتحدد دورات الاستخدام الثلاث المختلفة بواسطة عرض النبضات [العرض التام عند منتصف الحد الأقصى/الزمن (FWHM/T)]: 50% و33%و67% من فترة البتات T. ولا يحدث أي تغير للطور في النسقين RZ-50% وRZ-33%، بينما تعرف النبضات المتعاقبة للموجات الحاملة المكبوتة CS-RZ-67% تغيراً للطور مقداره π.



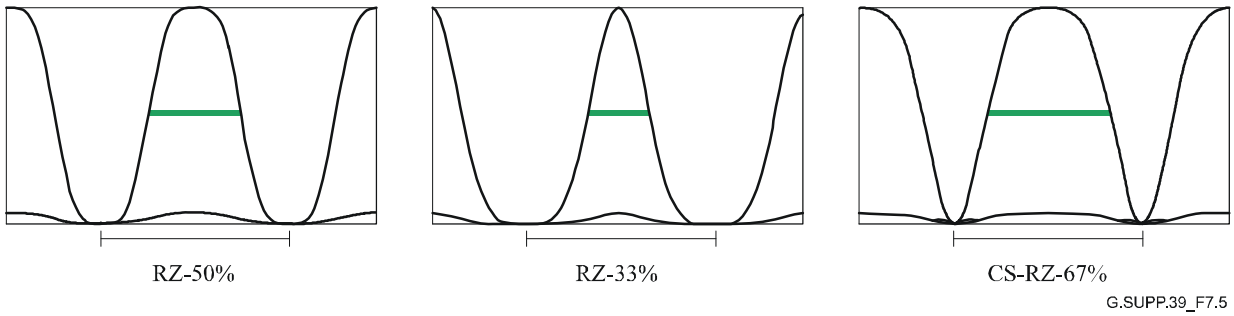
ملاحظة – يبين العمود العرض التام للنبضات عند منتصف الحد الأقصى ودورة شغلها. وتبين π و0 تغير طور نبضات العودة إلى الصفر (RZ) عند الموجات الحاملة المكبوتة CS-RZ-67%.

الشكل 7-3 – نبضات العودة إلى الصفر لجميع دورات الاستخدام مع بيانات 00100110

ويوضح الشكلان 7-4 و7-5، على التوالي، الأطياف البصرية ونموذج العين البصري للنسق الثلاثة للعودة إلى الصفر (RZ). ويحتاج النسق RZ-33% إلى العرض الطيفي الأطول مقارنة مع النسقين RZ-50% وCS-RZ-67% ، اللذان يبديان طيفاً أضيق بدرجة كبيرة ويوفران كفاءة طيفية أعلى مقارنة مع النسق RZ-33%.



الشكل 7-4 – الأطياف البصرية لنسق العودة إلى الصفر (RZ)



ملاحظة – يبين العمود الرفيع فترة البتات T ويبين العمود الغليظ عرض النبضة، وهما يتعلقان بدورة الاستخدام.

الشكل 7-5 – نموذج العين البصري لنسق العودة إلى الصفر (RZ)

1.1.7 العودة إلى الصفر مع دورة الاستخدام بنسبة 33%

في الجدول 7-1، إشارة الدخل بالنسبة إلى مشكّل ماخ–زهندر (MZM) هي عبارة عن إشارة اللاعودة إلى الصفر (NRZ) مع معدل بتات قيمته $1/T_b$ (حيث تمثل T_b مدة البتات). و مشكّل ماخ–زهندر (MZM) هو التيار المستمر (DC) المائل عند الحد الأقصى للإرسال البصري بواسطة $V_{bias} = V_{max}$، والتردد الراديوي (RF) المشكل بفعل إشارة جيبية مع تردد قيمته $f = 1/(2T_b)$ واتساع قيمته V_π (الذروة إلى الذروة بالنسبة إلى $2V_\pi$).

ومن ثم فإن اتساع المجال البصري $E_1(t)$ لخرج مشكّل ماخ–زهندر (MZM) يتناسب مع:

$$E_1(t) \propto \cos\left[\frac{\pi}{2}\cos\left(\pi\frac{t}{T_b}\right)\right] e_{NRZ}(t) \tag{3-7}$$

حيث يمثل $e_{NRZ}(t)$ المجال البصري لإشارة دخل اللاعودة إلى الصفر (NRZ). وعلى ذلك، تصبح قدرة الخرج البصري لمشكّل ماخ–زهندر (MZM) كما يلي:

$$P_{out} \propto E_1(t)E_1(t)^* \propto \left[\cos\left[\frac{\pi}{2}\cos\left(\pi\frac{t}{T_b}\right)\right] e_{NRZ}(t)\right]^2 \tag{4-7}$$

2.1.7 الموجات الحاملة المكبوتة (CS-RZ) بدورة استخدام 67%

وتمثل الموجات الحاملة المكبوتة CS-RZ ذات دورة الاستخدام 67% مخطط استخدام آخر. وقوة هذا التشكيل تجاه التشتت اللوني أفضل منها بالنسبة إلى تشكيل العودة إلى الصفر بدورة استخدام 33%.

وللحصول على نسق الموجات الحاملة المكبوتة CS-RZ ذات دورة الاستخدام 67%، فإن مشَكل ماخ–زهندر (MZM) هو عبارة عن التيار المستمر (DC) الذي يميل عند الحد الأدنى للإرسال البصري بواسطة $V_{bias} = V_{min}$، ويتشكل بفعل الإشارة الجيبية لتشكيل التردد الراديوي RF بتردد مقداره $f = 1/(2T_b)$ وزحزحة في الطور مقدارها $\phi_m = \pi/2$؛ انظر الشكل 7-1. وتوسع تشكيل التردد الراديوي RF هو عبارة عن V_π (الذروة إلى الذروة بالنسبة إلى $2V_\pi$) الذي يقابل فلطية نصف الموجة بالنسبة إلى مشَكل ماخ–زهندر (MZM). ويتناسب توسع المجال البصري $E_2(t)$، عند خرج مشَكل ماخ–زهندر (MZM) مع:

$$E_2(t) \propto \sin\left[\frac{\pi}{2}\sin\left(\pi\frac{t}{T_b}\right)\right] e_{NRZ}(t) \tag{5-7}$$

وتتناسب قوة خرج لمشَكل ماخ–زهندر (MZM) مع $E_2(t)E_2(t)^*$، وهي تتمثل فيما يلي:

$$P_{out} \propto E_2(t)E_2\,(t)^* \propto \left[\sin\left[\frac{\pi}{2}\sin\left(\pi\frac{t}{T_b}\right)\right] e_{NRZ}(t)\right]^2 \tag{6-7}$$

3.1.7 العودة إلى الصفر (RZ) بدورة استخدام 50%

للحصول على نسق العودة إلى الصفر (RZ) بدورة استخدام 50%، فإن مشَكل ماخ–زهندر (MZM) هو عبارة عن التيار المستمر (DC) الذي يميل عند إرساله البصري 3-dB بواسطة $V_{bias} = V_{3dB}$، ويتشكل بفعل الإشارة الجيبية لتشكيل التردد الراديوي RF بتردد مقداره $f = 1/(T_b)$؛ انظر الشكل 7-1. وتوسع تشكيل التردد الراديوي RF هو عبارة عن $V_\pi/2$ (الذروة إلى الذروة بالنسبة إلى V_π). ويتناسب توسع المجال البصري $E_3(t)$، عند خرج مشَكل ماخ–زهندر (MZM) مع:

$$E_3(t) \propto \cos\left[\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4}\cos\left(\frac{2\pi t}{T_b}\right)\right] e_{NRZ}(t) \tag{7-7}$$

وتتناسب قوة خرج لمشَكل ماخ–زهندر (MZM) مع $E_3(t)E_3(t)^*$، وهي تتمثل فيما يلي:

$$P_{out} \propto E_3(t)E_3(t)^* \propto \left[\cos\left[\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4}\cos\left(\frac{2\pi t}{T_b}\right)\right] e_{NRZ}(t)\right]^2 \tag{8-7}$$

2.7 الاعتبارات المتعلقة بإضعاف النظام

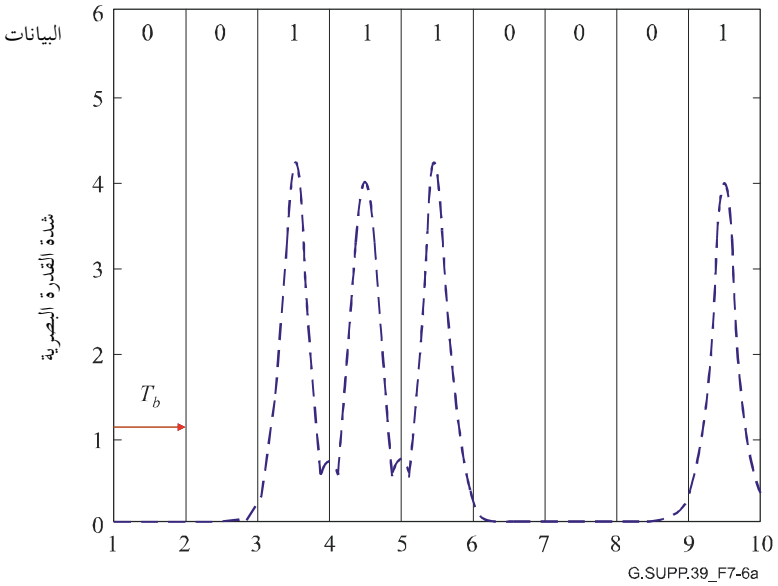
1.2.7 الإضعاف المستحث بالألياف ذات النعوت

1.1.2.7 التشتت اللوني (CD) وتوسيع النبضات

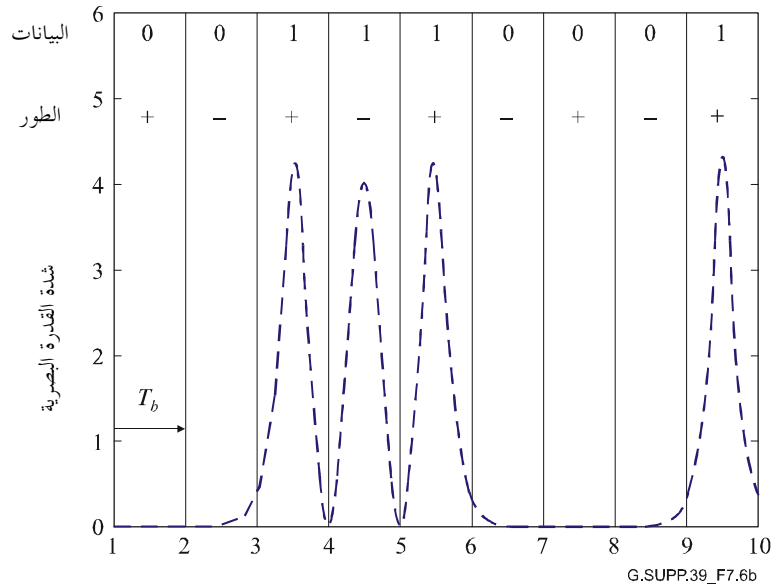
في حالة الإرسال ذي المجال الحر أو بالنسبة إلى التشتت اللوني للألياف الذي يتميز بانخفاضه الشديد، فإن نسق العودة إلى الصفر (RZ) بدورة استخدام 33% يمتلك حساسية مستقبلات أفضل من تلك التي يمتلكها نسق العودة إلى الصفر (RZ) ذي دورة الاستخدام الأوسع أو تلك التي يمتلكها نسق اللاعودة إلى الصفر (NRZ) [6]. ومع ذلك، فإن تراكب النبضات المتجاورة يؤدي إلى إنتاج نبضات شبح عقب عملية الانتشار عبر الليفة البصرية [7]، مادامت جميع الأعداد المنطقية من الرتبة '1' تتميز بطور بصري متماثل.

وفي حالة الموجات الحاملة المكبوتة (CS-RZ)، فإن للنبضات المتجاورة أطواراً متعاكسة. وتتجمع المجالات البصرية للبتتين '1' تجمعاً هداماً. ولا تتولد أية نبضة شبح بين عددين منطقيين من الرتبة '1'، وعلاوة على ذلك، فنتيجة للطيف الأضيق فإن توسيع النبضات الذي يحدث بفعل التيار المستمر (CD) يكون أقل منه بالنسبة إلى التوسيع الذي يحدث مع نسق العودة إلى الصفر (RZ) المألوف. ومن ثم، فإن الموجات الحاملة المكبوتة (CS-RZ) تمثل نسق تشكيل شديد القوة بالنسبة إلى روابط الألياف البصرية مع بقايا معتبرة من التشتت اللوني.

ويبين الشكل 6-7 a وb أشكال النبضات لنسقين اثنين من نسق تشكيل العودة إلى الصفر (RZ) مع معدل بتات مقداره 40 Gbit/s عند تشتت لوني متراكم مقداره D = 20 ps/nm. ولتعيين إعاقة التشتت اللوني، فقد جرى تبسيط نموذج النظام عن طريق إهمال أي تأثير لتشتت أسلوب الاستقطاب (PMD) وللاخطية الألياف، وهذا يعني أن افتراض إضعاف التيار المستمر (CD) هو بمعزل عن تشتت أسلوب الاستقطاب (PMD) وعن إضعاف لا خطية الألياف. وبين النموذج أنه مادامت النبضات تنتشر على طول الليفة، فإن النبضات الشبح تتولد ما بين القيمتين المتجاورتين '1' بالنسبة إلى RZ-33% في الشكل 6-7 a، بينما لا يمكن ملاحظة أي نبضة شبح في خالة الموجات الحاملة المكبوتة (CS-RZ)؛ انظر الشكل 6-7 b.



a) 33%-RZ



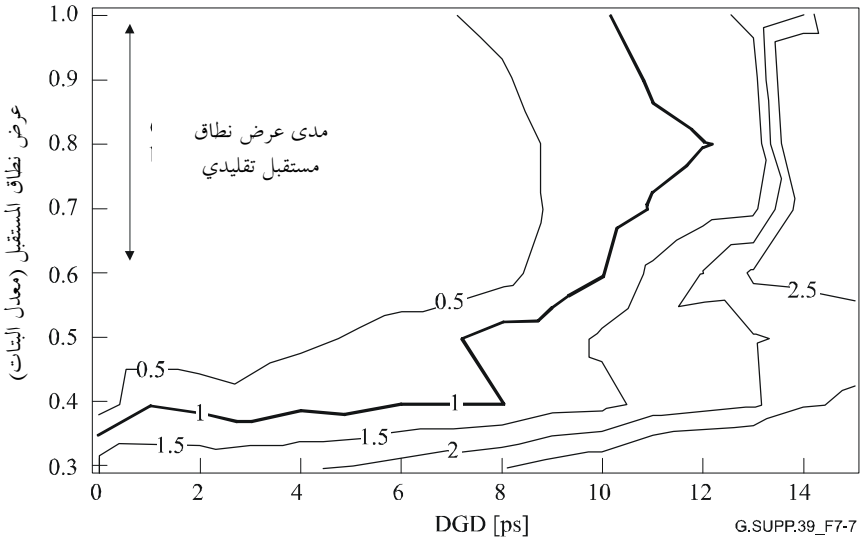
b) 67%-CS-RZ

الشكل 6-7 – شكل النبضة ذات القيمة 40 Gbit/s عقب التشتت المتراكم الذي مقداره 20 ps/nm

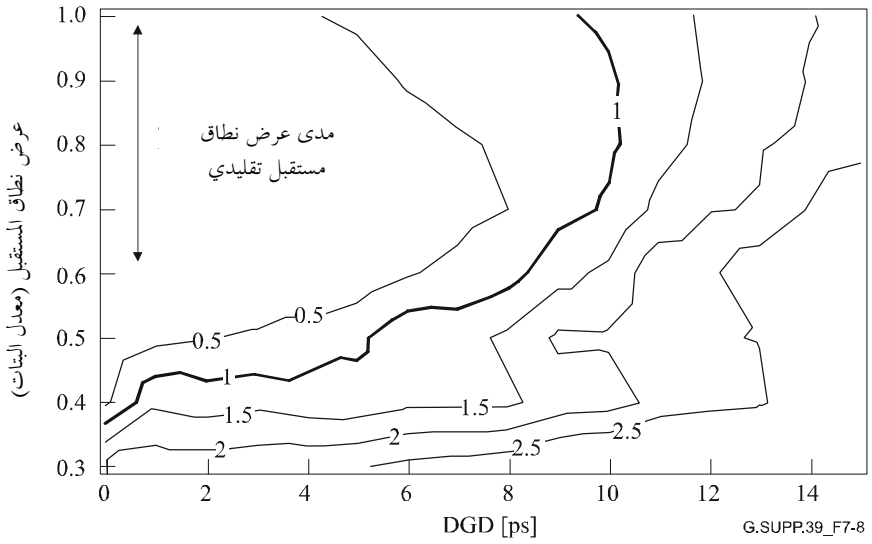
2.1.2.7 تشتت أسلوب الاستقطاب (PMD)

يسبب تشتت أسلوب الاستقطاب (PMD) في ألياف الإرسال انحطاط أداء الإرسال عن طريق تشويه شكل الموجة، لاسيما في أنظمة الإرسال ذات القيمة 40 Gbit/s. ومن ثم فإن تسامح تشتت أسلوب الاستقطاب (PMD) تعد واحدة من المعلمات الرئيسية التي يتعين تحديدها في التطبيقات المتصلة بالقيمة 40 Gbit/s. وتشتت أسلوب الاستقطاب من الرتبة الأولى (PMD) هو عبارة عن المهلة الزمنية لانتشار المجموعة التفاضلية (DGD). (ويمكن الحصول على تعريف واضح للمهلة الزمنية لانتشار المجموعة التفاضلية في التوصية ITU-T G.671). وتعتمد قدرة أنظمة 40 Gbit/s لمواجهة المهلة الزمنية لانتشار المجموعة التفاضلية (DGD) الحتمي اعتماداً قوياً على عرض النطاق الكهربائي للمستقبل.

ويبين الشكلان 7-7 و7-8 الخرائط الكنتورية لإعاقة القدرة بالنسبة إلى التشفير الخطي للعودة إلى الصفر (RZ) بنسبتي اشتغال مقدارهما 33% و50%، باعتبارها دالة لعرض نطاق المستقبلات وللمهلة الزمنية المحددة لانتشار المجموعة التفاضلية (DGD) يتم الحصول عليها بواسطة التنبيه العددي. ولقد وجد أن نسامح مهلة انتشار المجموعة التفاضلية (DGD) يعتمد على مهلة انتشار المجموعة التفاضلية (DGD) وعلى عرض نطاق المستقبلات [8]. وفي المدى التقليدي لعرض نطاق المستقبلات على النحو الموضح في الشكل، فقد أظهر تسامح تشتت أسلوب الاستقطاب (PMD) بعض الانحراف. فالحد الأقصى المسموح به من تشتت أسلوب الاستقطاب (PMD) يكون على سبيل المثال 11,5 ps (بالنسبة إلى الإعاقة (1-Db) عبر مدى جد ضيق من عرض نطاق المستقبلات المتمركز عند 0,8 بالنسبة إلى RZ-33%. وعلى النقيض من ذلك، فإن الإعاقة التي تتجاوز (1-Db) تكون حتمية في المدى التقليدي لعرض نطاق المستقبلات.



الشكل 7-7 – خريطة كِفَاف للتسامح بشأن مهلة انتشار المجموعة التفاضلية (DGD) (RZ-33%)

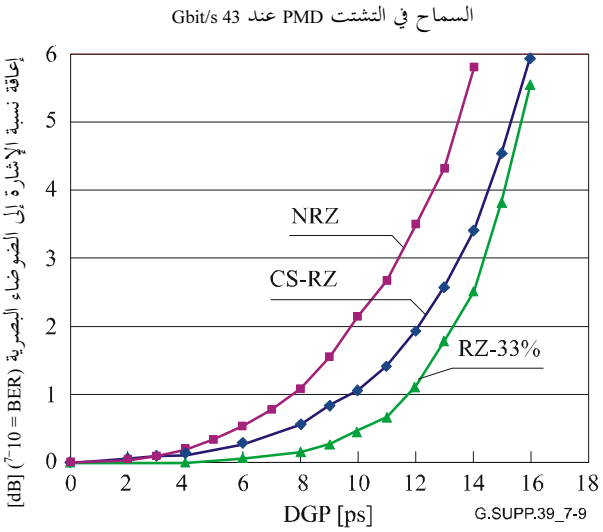


الشكل 7-8 – خريطة كِفَاف للتسامح بشأن مهلة انتشار المجموعة التفاضلية (DGD) (RZ-50%)

وقد أظهرت إعاقة القدرة اعتماداً قوياً على عرض نطاق المستقبلات. ومن ثم فإن عرض نطاق المستقبلات يتطلب دراسة متأنية وذلك من أجل تصميم أنظمة العودة إلى الصفر (RZ) من النوع Gbit/s 40 بدرجة تسامح كافية بالنسبة إلى مهلة انتشار المجموعة التفاضلية (DGD).

وفيما يتعلق بالتداخل البيني من الصنف Gbit/s 40، فقد اقترح استعمال التشفير الخطي للعودة إلى الصفر (RZ) والتشفير الخطي للاعودة إلى الصفر (NRZ) بالنسبة إلى شفرات التطبيقات أحادية القناة. واقترح شفرة العودة إلى الصفر (RZ) لاستعمال دورة الاستخدام 33%. وستكون لهذه الشفرة، بالنظر إلى طبيعتها، تسامح تشتت أسلوب الاستقطاب (PMD) هو أكبر بقليل من تسامح شفرة الموجات الحاملة المكبوتة (CS-RZ) ذات دورة الاستخدام التي نسبتها 66% (والتي تمثل بديلاً آخر). وأجريت القياسات للتحقق من صحة القيم المقترحة للتسامح بالنسبة إلى مهلة انتشار المجموعة التفاضلية (DGD).

وقد استعمل تشتت أسلوب استقطاب (PMD) مضاهي ومولد لتشتت أسلوب الاستقطاب (PMD) من الرتبة الأولى في هذه التجربة. ويبين الشكل 7-9 إعاقة نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) كدالة للمهلة الزمنية لانتشار المجموعة التفاضلية (DGD).



الشكل 7-9 – إعاقة نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) مقابل مهلة انتشار المجموعة التفاضلية (DGD) بالنسبة إلى شفرات خطية مختلفة

وتكون المهلة الزمنية لانتشار المجموعة التفاضلية (DGD) لتوليد الإعاقة (1-dB) مستقلة عن نسبة الخطأ في البتات الفعلية والتحتية (BER) المتعلقة بنسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) التي تقع تحت مستويات نسبة الخطأ الدنيا في هذه التجربة. وبما أن المستقبل قد أعد على نحو أمثل ليوائم الموجات الحاملة المكبوتة (CS-RZ)، فإنه ينبغي تحقيق تسامح بشأن مهلة انتشار المجموعة التفاضلية (DGD) التي يمكن توقعها بالنسبة إلى الشفرات الخطية الأخرى لما مقداره 7,5 ps بالنسبة إلى الإعاقة (1-dB) في اللاعودة إلى الصفر (NRZ) ولما مقداره 11,5 ps بالنسبة إلى الإعاقة (1-dB) في العودة إلى الصفر RZ-33%. ومع ذلك، فإنه يمكن ملاحظة أن RZ-66% (النقطة المحركة الأخرى لتنفيذ مشَكل ماخ–زهندر (MZM) لا تعمل على تدعيم المقدار 11,5 ps ليوائم الحد الأقصى للإعاقة (1-dB) عند 43 Gbit/s (معدل التوصية G.709)، ومن ثم فإنه يتعين استعمال RZ-33% لهذا التطبيق.

8 طوبولوجيا الشبكة البصرية

في الوقت الحالي، تتعلق التوصيتان G.692 وG.959.1 الصادرتان عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) بأنظمة الإرسال من نقطة إلى نقطة، في حين تترك ترتيبات أكثر تعقيداً للمزيد من البحث (وكمثال على ذلك الترتيبات التي تتضمن الإدراج/الإخراج البصريين). وتناقش هذه الفقرة الطوبولوجيا من النوع نقطة إلى نقطة بالإضافة إلى تضمنها لموضوع الإدراج/الإخراج البصريين.

1.8 البنى الطوبولوجية

هنالك نمطان من الشبكات يجري تمييزهما على حسب خصائص عناصر الشبكة البصرية (ONEs) التي تعبرها الإشارات: فهنالك أولاً شبكات إعادة توليد القدرة (1R)، وثانياً هنالك الشبكات التي تعمل فيها عناصر الإشارة المتوافقة للشبكة البصرية الخطية (ONEs) على إعادة توليد القدرة والشكل (2R) و/أو إعادة توليد القدرة والشكل والتوقيت (3R). ولا تمنع الحالة الأخيرة أيضاً من احتمال إمكانية إعادة توليد القدرة (1R) بالنسبة إلى بعض عناصر الإشارة المتوافقة للشبكة البصرية الخطية (ONEs) أو بالنسبة إلى جميعها.

وحسب الملحق A/G.872، فإن إعادة توليد القدرة (1R) يشتمل على التضخيم البصري وتعويض التشتت، وهذا يعني أن الآليات المماثلة التي لا تتضمن معالجة للبتات، يتم اجتذابها إلى دائرة إعادة توليد القدرة (1R). ومن ناحية ثانية، فإن إعادة توليد القدرة والشكل (2R) وإعادة توليد القدرة والشكل والتوقيت (3R) تطبقان العمليات الرقمية (وكمثال على ذلك إعادة التشكيل الرقمية وإعادة التوليد الرقمية للنبضات).

وتحدد أصناف طوبولوجية مختلفة بما في ذلك الروابط من النوع نقطة إلى نقطة البنى الحافلية والشبكات الحلقية والشبكات ذات العيون. ويعرض كل صنف وفق نهج تنوعي. ومن ثم، فإن مخططات تنفيذ محددة غير واردة سواء أكان ذلك على سبيل الافتراض أو على سبيل الإقصاء. وبالإضافة إلى ذلك، فقد قلص عدد الأصناف الطوبولوجية إلى أدنى حد نتيجة لهذا النهج ورتب التشعب الهائل لمخططات التنفيذ المختلفة في مجموعات قليلة. ويؤدي غياب التمثيل التنوعي إلى وضع عدد كبير من الرسوم البيانية لكل تعديل من التعديلات الطوبولوجية البسيطة.

وأخيراً وبهدف التوضيح، فإن عدداً قليلاً من الأمثلة النموذجية يقدم إيضاحات للوصف التنوعي.

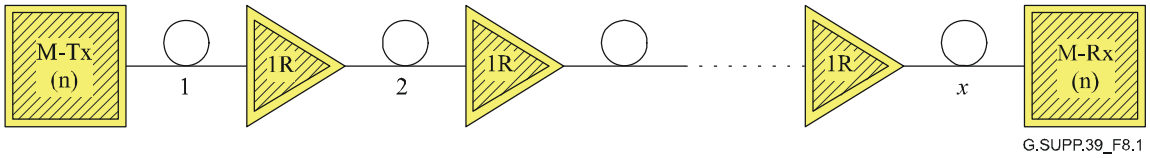
1.1.8 الشبكات ذات إعادة توليد القدرة (1R)

تتضمن الشبكات ذات إعادة توليد القدرة (1R) روابط من النوع نقطة إلى نقطة والبنى الحافلية والشبكات الحلقية والشبكات ذات العيون.

1.1.1.8 الروابط من النوع نقطة إلى نقطة

يبين الشكل 8-1 التمثيل التنوعي للرابطة من النوع نقطة إلى نقطة (ptp). وينقل ضوء قنوات تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM) من الرتبة n بواسطـــة أحد ألياف الإخراج في أحد أجهزة المرسلات متعددة القنوات (M-Tx). وتتجاوز

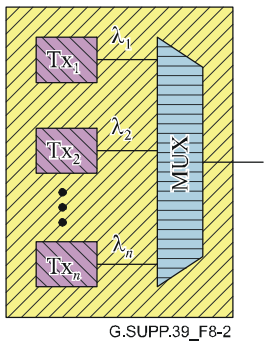
هذه الإشارة أقسام الإرسال ذات الأجزاء البديلة من الألياف و مولدات تجديد القدرة (1R) قبل الدخول إلى أحد أجهزة المستقبلات متعددة القنوات (M-Rx). وتبين الصناديق والمثلثات ذات الخطين في الشكل 8-1 إمكانية وجود مخططات إنجاز مختلفة (فيما يتعلق بالطوبولوجيا المفصلة والتنفيذ داخل الصناديق ذات الخطين).



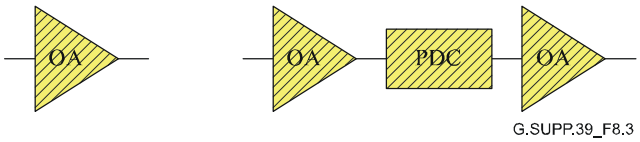
الشكل 8-1 – التمثيل التنوعي للرابطة من النوع نقطة إلى نقطة مع معيدات توليد القدرة (1R)

ويظهر الشكل 8-2 مخطط الإنجاز النموذجي في أحد أجهزة الإرسال متعددة القنوات ذات العدد n من قنوات تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM) التي تنشط عند أطوال الموجات المركزية λ_1، λ_2،....λ_n. ويقدم الشكل 8-3 أمثلة لمولدات تجديد القدرة (1R) بما في ذلك أحد المضخمات البصرية (OA) – على الجانب الأيسر– وأحد المضخمات الخطية ذات معوض للتشتت المنفعل (PDC) – على الجانب الأيمن. وتنبغي الإشارة إلى أن العديد من المخططات الأخرى المتعلقة بإنجاز مولدات تجديد القدرة (1R) ذات قدرات لتعويض التشتت المنفعل (PDC) هي مخططات ممكنة.

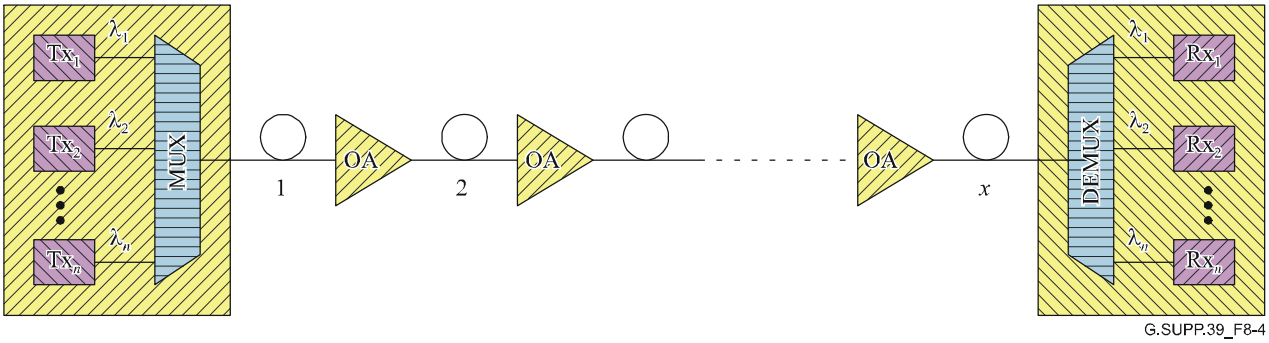
ويقدم الشكل 8-4 مثالاً لرابطة نموذجية من النوع نقطة إلى نقطة (ptp) وذات تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM). وهذا لا يمثل سوى نموذج محدد من مخططات الإنجاز من النوع نقطة إلى نقطة (ptp) وذات تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM).



الشكل 8-2 – مثال لمخطط إنجاز ذو مستقبل متعدد القنوات



الشكل 8-3 – أمثلة لمخططات إنجاز مولدات تجديد القدرة (1R)

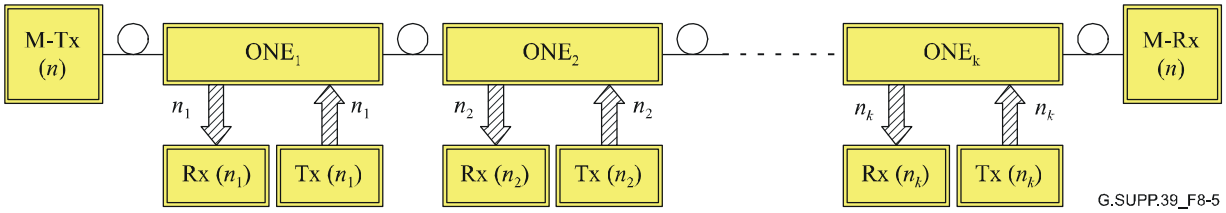


الشكل 8-4 – مثال لمخطط إنجاز الرابطة من النوع نقطة إلى نقطة (ptp) وذات تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM)

2.1.1.8 البنى الحافلية

يبين الشكل 8-5 التمثيل التنوعي لإحدى البنى الحافلية. ويدخل العدد (n) الذي يمثل أعداد قنوات تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM) والذي تطلقه أجهزة الإرسال متعددة القنوات (M-Tx) إلى العنصر الأول للشبكة البصرية (ONE) ONE_1. وتخرج المجموعة الفرعية (n_1) لقنوات تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM) وتدرج بواسطة ONE_1 ويتم الكشف عنها بواسطة أخذ أجهزة المستقبلات والمرسلات (ويرمز إليها بالرمزين "Rx (n_1)" و"Tx (n_1)") بالنسبة إلى القنوات (n_1). ويستمر الإجراء نفسه عند عناصر الشبكات البصرية التالية ONE_2 ... ONE_k حيث يرمز k إلى العدد الإجمالي ONEs، وفيه يكون ($k \geq 1$). وقد تتراوح قيم أعداد القنوات الخارجة والمدرجة ما بين:

$$0 \leq n_j \leq n, \quad (1 \leq j \leq k)$$

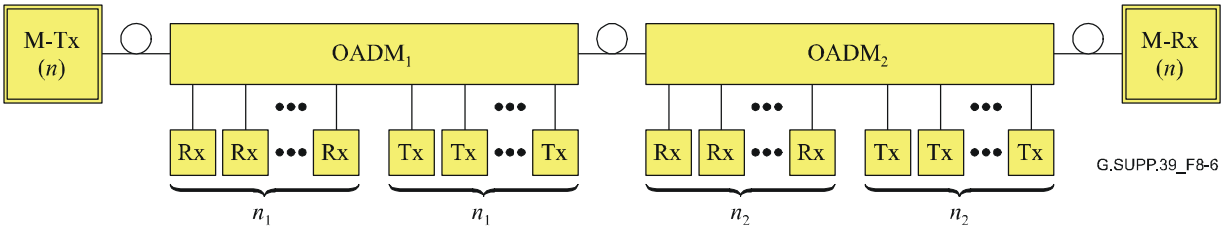


الشكل 8-5 – التمثيل التنوعي لإحدى البنى الحافلية

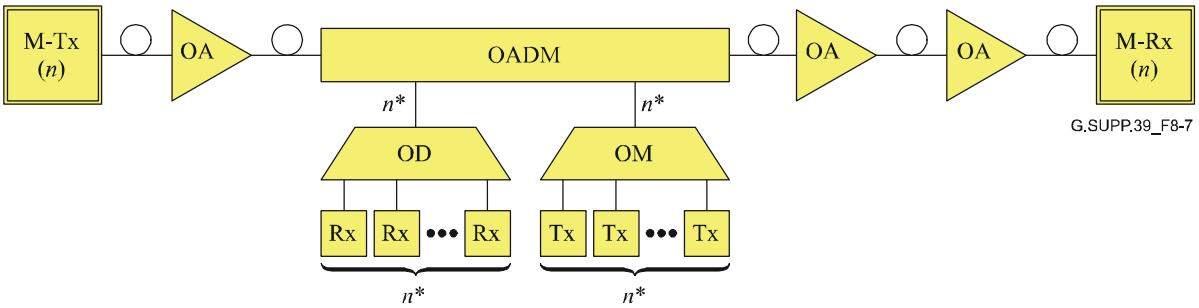
ففي الحالة التي يكون فيها $n_j = n$، فإنه يتم إخراج وإدراج جميع قنوات تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM). وفي الحالة التي يكون فيها الحاصل $n_j = 0$، فلن يكون هنالك بالتالي إدراج أو إخراج للقنوات، وبمعنى آخر فإن ONE_j لا تمثل في هذه الحالة سوى مولد تحديد القدرة (1R). ومن ثم، فإن النهج التنوعي يعمل أيضاً على أن يستحوذ على المخطط الطوبولوجي الهجين الذي يضم سلسلة من المضخمات البصرية وعلى المضاميم البصرية الإدراجية/الإخراجية (OADMs).

وتدل الإشارات السهمية المتولدة عند المنافذ التي تصب في كل عنصر من عناصر الشبكة البصرية ONE_j (حيث: $j = 1 \ldots k$) على إمكانية استعمال عدد من الألياف يصل إلى ما مقداره n_j.

وترد أدناه بعض مخططات الإنجاز المحددة المتعلقة بالبنى الحافلية. ويمثل الشكل 8-6 حافلة ذات مضاميم بصرية إدراجية/إخراجية (OADMs) وليفة واحدة لكل قناة من قنوات تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM) المدرجة والمخرجة عند المنافذ الفرعية. والشكل 8-7 عبارة عن مثال بنية حافلية ذات سلسلة من المضخمات البصرية (OA) زيادة على مجرد معدد إرسال بصري إدراجي/إخراجي إضافي واحد لإدراج وإخراج العدد (n^*) الذي يمثل قنوات تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM). وعلى عكس الشكل 8-6، فلا تستعمل سوى ليفة واحدة (تنقل الضوء إلى جميع قنوات تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM) ذات العدد n^*) عند المنافذ الفرعية من معدد الإرسال البصري الإدراجي/الإخراجي المحدد.



الشكل 8-6 – مثال لبنية حافلية بمعددي إرسال بصريين للإدراج/الإخراج وليفة واحدة لكل قناة، إضافة/حذف، ذات تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM)



الشكل 8-7 – مثال لبنية حافلية بمضخمات بصرية ومعدد إرسال بصري واحد للإدراج/الإخراج

9 تصميم نظام "أسوأ حالة"

بالنسبة لنظام "أسوأ حالة"، تحدد معلمات الأنظمة البصرية والكهربائية الأنظمة البصرية في شبكات المخدوم (التراتب الرقمي المتقارب التزامن (PDH) والتراتب الرقمي المتزامن (SDH) وشبكات نقل البصرية (OTN)) مع الحد الأقصى والحد الأدنى للقيم عند نهاية العمر (التوصيات G.955 وG.957 وG.691 وG.692 وG.959.1 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات.

1.9 تسلسل موازنة القدرة

أعطيت موازنات القدرة للأنظمة البصرية أحادية القناة (TDM) الواردة في التوصيتين G.957 وG.691 الصادرتين عن قطاع تقييس الاتصالات ومتعددة القنوات (WDM) الواردة في التوصية ITU-T G.959.1 مع المعلمات البصرية التالية في إطار نهج "أسوأ حالة":

- الحد الأقصى لمتوسط قدرة الخرج (القناة)؛
- الحد الأدنى لمتوسط قدرة الخرج (القناة)؛
- الحد الأقصى لمتوسط إجمالي قدرة الخرج (بالنسبة للتطبيقات متعددة القنوات)؛
- الحد الأقصى للتوهين؛
- الحد الأدنى للتوهين؛
- الحد الأقصى للتشتت اللوني؛
- الحد الأدنى للتشتت اللوني؛
- الحد الأقصى لمهلة انتشار مجموعة تفاضلية (DGD)؛
- الحد الأقصى لمتوسط قدرة الدخل (القناة)؛
- الحد الأقصى لمتوسط إجمالي قدرة الدخل (بالنسبة للتطبيقات متعددة القنوات)؛
- الحد الأدنى لحساسية المستقبِل (أو الحد الأدنى للحساسية المقابلة)؛

- الحد الأقصى لإعاقة المسير البصري.

1.1.9 الحد الأدنى لحساسية المستقبِل

تُعرّف حساسية المستقبل (بالنسبة لأسوأ حالة ونهاية العمر) بالحد الأدنى للقيمة المقبولة لمتوسط القدرة البصرية المتلقاة عند نقطة سطح بيني على المسير الرئيسي عند مستوى المستقبل (MPI-R) التحقيق نسبة 1×10^{-12} من الخطأ في البتات. ونسبة خمود المرسل وخسارة العودة البصرية عند نقطة سطح بيني على المسير الرئيسي عند مستوى المرسل (MPI-S) وانحطاط وصلات المستقبل والتسامح في القياس وآثار القدم تتسبب كلها في حدوث أسوأ حالة.

والأنظمة البصرية التي تكون محدودة بشكل آخر من حيث طول الإرسال بسبب تهوين الألياف البصرية بالإمكان تشغيلها باستخدام مضخمات بصرية (دافعة أو/وخطية أو/ومسبقة) (التوصيات G.661 وG.662 وG.663 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T).

2.1.9 الحد الأقصى لإعاقة المسير البصري

تنضوي إعاقات القدرة المرتبطة بالمسير البصري (من قبيل تشتت الألياف اللونية أو تشتت أسلوب الاستقطاب أو ارتعاشه أو انعكاسه) تحت الحد الأقصى لإعاقة المسير البصري، ولكنها ليست منضوية تحت الحد الأدنى لحساسية المستقبل. بيد أنه تجدر الإشارة إلى أنه يتعين أن يكون الحد الأدنى لمتوسط القدرة البصرية عند المستقِبل أكبر من الحد الأدنى لحساسية المستقِبل بقيمة إعاقة المسير البصري.

والأنظمة البصرية التي تكون محدودة بشكل آخر من حيث طول الإرسال بسبب تشتت الألياف اللونية تستوجب بعض عمليات تكييف التشتت (التوصية ITU-T G.691) لتجاوز تقييد طول الألياف، وفقاً لما سيتم اعتباره في الفقرة 1.2.9.

2.9 التشتت اللوني

1.2.9 التشتت اللوني – نهج تحليلي

التشتت اللوني في الليف أحادي الأسلوب هو امتزاج تشتت المواد مع تشتت الدليل الموجي، ويساهم التشتت اللوني في توسيع النبضات وتشويهها في إشارة رقمية. ومن منظور المرسل يحدث ذلك لسببين.

أحد السببين هو وجود أطوال موجات مختلفة في الطيف البصري للمصدر. إذ أن كل طول موجة لها تأخر الطور وتأخر الزمرة مختلفان على طول الليف، بحيث تُشوه نبضة الخرج في الوقت المناسب. (ذلك هو السبب الذي تم اعتباره في التوصية ITU-T G.957.)

والسبب الآخر هو تشكيل المصدر، الذي لديه أيضا أثران وهما:

الأثر الأول، هو محتوى تردد فوريه للإشارة المشكلة. فبارتفاع معدل البتات يرتفع أيضا عرض التردد المشكل للإشارة ويمكن مقارنته بعرض التردد البصري للمصدر أو قد يتجاوزه. (تورد التوصية ITU-T G.663 صيغة لمصدر عرض التردد الصفري.)

والأثر الآخر، هو تنوع طول الموجات الذي يحدث عندما يتغير طيف طول موجة المصدر أثناء النبضة. وكقاعدة، يحدث تنوع طول الموجات الموجب في المرسل عندما يتزحزح الطيف إلى أطوال الموجات الأقصر/الأطول أثناء صعود/تراجع النبضة، تباعا. وفيما يتعلق بعامل تشتت الألياف، تتأخر أطوال الموجات الأطول بالنسبة لأطوال الموجات الأقصر. وعليه، فإن كانت إشارة نتيجة تنوع طول الموجات موجبة، تتضافر العمليتان لإحداث تمديد النبضة. وإن كانت النتيجة سالبة، فقد يحدث ضغط النبضة مقابل طول أولي لليف إلى أن تصل النبضة إلى الحد الأدنى للعرض ثم تمتد من جديد بتشتت متزايد.

1.1.2.9 القيود المطبقة على معدل البتات بسبب التشتت اللوني

يُعمم هذا البند "نموذج إبسلون" الوارد في التوصية ITU-T G.957 للاعتماد عليه فيما يتعلق بآثار التشتت لكل من أعراض تشكيل طيف المصدر والمرسل، في حالة ما كان ممكنا تجاوز تنوع طول الموجات وأي أسلوب من الأساليب الجانبية عند

المقارنة. وفي العديد من الحالات قد يطغى تنوع طول الموجات، والقيود النظرية للتشتت المشار إليها في هذا البند تكون أكثر أو أقل من الواقع العملي.

ويورد التذييل الأول تلك النظرية. ويعتبر بأنه بالإمكان تطبيق نظرية جذر متوسط تربيع (rms) عرض الأشكال الغوسية للمصدر وأطياف التشكيل على الأشكال العامة، وأن تشتت الدرجة الثانية هو صغير مقارنة بتشتت الدرجة الأولى. وعلى غرار ما ورد في التوصية ITU-T G.957، يعتبر التذييل الأول بأن النبضة المسموح بها والتي تنتشر كجزء من مدة البتة تكون محدودة بقيمة قصوى، تسمى قيمة –"إبسلون" (قيمة– ε)، التي تحددها أدناه إعاقة القدرة المسموح بها.

صيغ التشتت

تتبع هذه الصيغ من البند 7.1 حيث ترد في شكلها العام قبل إجراء عملية التحويل إلى الوحدات العددية الخاصة المستعملة أدناه. دورة العمل هي f؛ من أجل RZ $f > 1$، ومن أجل NRZ $f = 1$. وبمعدل البتات B (جيغابايت/ثانية) على طول الليفة بطول L (الكيلومتر) وبمعامل تشتت D (ps/km.nm) عند مصدر متوسط طول الموجات λ (µm) (وليس nm)، والحد الأقصى للوصلة المسوح بها للتشتت اللوني بمعدل ps/nm هي كالتالي:

$$DL = \frac{1819.650\,\varepsilon}{\lambda^2 B\left[\left(\frac{1.932\,B}{f}\right)^2 + \Gamma_\nu^2\right]^{0.5}} \tag{1-9}$$

وهنا Γ_ν (GHz) يمثل –20 dB عرض طيف المصدر في التردد البصري. ويعادل –20 dB عرض طيف طول الموجات $\Gamma\lambda$ (nm) المصاغة بالمعادة التالية:

$$\Gamma_\lambda \approx \frac{\lambda^2}{299.792}\Gamma_\nu \tag{2-9}$$

المقارنة الجانب الأيسر للنتيجة مع المعادلة 1-9 تظهر أن عرض الطيف –20 dB "الفعلي" للمصدر المشّكل هو $\left[\left(\frac{1.932\,B}{f}\right)^2 + \Gamma_\nu^2\right]^{0.5}$، يعني تضافر التشكيل مع أطياف التردد البصرية.

وبالنسبة لحالة التتقييد الخاصة بالطيف الواسع/معدل البتات المنخفض، تؤول المعادلتين 1-9 و2-9 إلى ما يلي:

$$D\,L\,B\,\lambda^2\,\Gamma_\nu \approx 1819.650\,\varepsilon \quad \text{or} \quad D\,L\,B\,\Gamma_\lambda \approx 6.0697\,\varepsilon \tag{3-9}$$

وتقدر هذه التقريبات بنسبة 1% فيما يتعلق بالمعادلة 1-9 كلما كان $\Gamma_\nu > \frac{14B}{f}$. وقد استعمل معادل نتيجة الجانب الأيمن للمعادلة 3-9 في التوصية ITU-T G.957 (بإعاقة تبلغ 1 dB ونسبة الخطأ في البتات = 10^{-10}) لاشتقاق متطلبات المصدر لمسافات الهدف في الجداول. وبالتالي، فإن الحد المعاكس الطيف الضيق/معدل البتات العالي، يعطينا:

$$D\,L\,B^2\,\lambda^2 \approx 941.826\varepsilon\,f \tag{4-9}$$

ويقدر التقريب بنسبة 1% فيما يتعلق بالمعادلة 1-9 كلما كان $\Gamma_\nu > \frac{B}{4f}$، محدداً مصدر "عرض خط ضيق". وبإعاقة 1 dB ولا عودة إلى الصفر تعطينا المعادلة 4-9 ما يلي:

$$D\,L\,B^2\,\lambda^2 \approx 282.548 \tag{5-9}$$

وتقارب النتيجة الواردة في التوصية ITU-T G.663 هذه النتيجة بمقدار 1550 nm.

ملاحظة – إن عدد الأرقام الهامة الواردة في الصيغ أعلاه والمستخدمة في النتائج أدناه، هو نتيجة عمليات حسابية. ولا يعني ذلك أن الصيغ والنتائج تكون بنفس الدرجة من الدقة.

نسبة الفجوات الزمنية المرتبطة بإعاقة القدرة

بالنسبة للتوصية ITU-T G.957 فإن المعادلة التي تربط بين انتشار النبضة الجزئية بإعاقة القدرة P_{ISI} (dB) بالنسبة لنبضات لا عودة إلى الصفر وليزرات الأسلوب الطولي الوحيد (SLM) كانت [26]:

$$P_{ISI} = 5\log_{10}\left(1+2\pi\varepsilon^2\right) \text{ or } \varepsilon = \left(\frac{10^{\frac{P_{ISI}}{5}}-1}{2\pi}\right)^{0.5} \quad (6\text{-}9)$$

النتيجة غير متعلقة بنسبة خطأ في البتات، التي تفترض التوصية ITU-T G.957 أنها تعادل 10^{-10}. وفي الواقع هنالك ارتفاع طفيف في درجة الإعاقة إلى 10^{-12}، مما يحدث تقليص من قيمة ε قد تكون بنسبة قليلة عند مستوى محدد لإعاقة dB.

يورد الجدول 9-1 قيم عدة إعاقات للقدرة ذات الأهمية، بالتقريب إلى الأسفل في حدود ½1-2%.

الجدول 9-1 – إعاقة القدرة لعدة قيم ε

إعاقة القدرة [dB]	قيم ε
0,5	0,2 ≈ 0,203
1	0,3 ≈ 0,305
2	0,48 ≈ 0,491

وفيما يتعلق بليزرات الأسلوب الطولي المتعددة (MLM)، فإن إعاقة القدرة لضوضاء تجزئة الأساليب (MPN) منمذجة حسب [26]:

$$P_{MPN} = 2\left(-5\log_{10}\left\{1-\tfrac{1}{2}\left[kQ\left(1-e^{-\pi^2\varepsilon^2}\right)\right]^2\right\}\right) \quad (7\text{-}9)$$

حيث k يمثل عامل ضوضاء تجزئة الأساليب وعامل Q يمثل النسبة الفعلية للإشارة إلى الضوضاء عند نسبة محددة للخطأ في البتات. ونسبة الخطأ في البتات بقيمة 10^{-12} تقابل $Q \approx 7{,}03$. ومجموع إعاقة القدرة هو مجموع P_{ISI} وP_{MPN}.

العامل 2 الإضافي في المعادلة 9-7 مقارنة بالمعامل الموجود في المعادلة في [26] يرجع إلى أن المعادلة في [26] استخفت توقع إعاقة ضوضاء تجزئة الأساليب بمعامل 2.

وبتحديد قيمة ε المرتبطة بليزرات الأسلوب الطولي المتعددة في التوصية ITU-T G.957، أتيحت إعاقة إجمالية للقدرة بقيمة 1 dB عندما Q = 6,36، ما يقابل نسبة الخطأ في البتات بقيمة 10^{-10} وk = 0,7 لعامل ضوضاء تجزئة الأساليب. والحد الأقصى لقيمة ε = 0,115 الوارد في التوصية ITU-T G.957 هو أقل بقليل من القيمة التي تكون منسجمة مع المعادلة 9-7، وفقاً لدراسة هندسية التي حددت بأنه ينبغي اعتماد قيمة أكثر ثبوتاً.

وفيما يتعلق بنسبة الخطأ في البتات بقيمة 10^{-12} تستعمل ε بقيمة 0,109، المشتقة من المعادلة 9-7 مع Q = 7,03 وk = 0,76.

والأمثلة التالية لا تأخذ في الاعتبار سوى ليزرات الأسلوب الطولي الوحيد حيث ضوضاء تجزئة الأساليب تعادل الصفر.

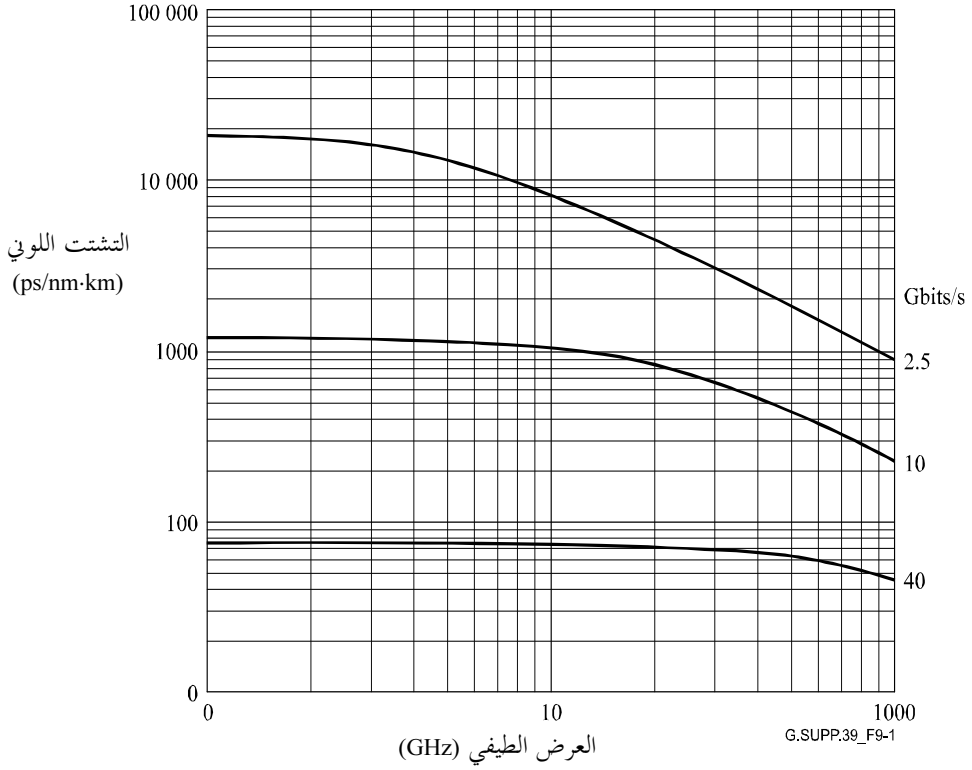
الأمثلة

معدلات بتات أسلوب النقل المتزامن (STM) المستخدمة هنا هي للاعودة إلى الصفر 10G: 9,95328 Gbit/s، وللاعودة إلى الصفر 40G: 39,81312 Gbit/s على غرار ما ورد في التوصية ITU-T G.707/Y.1322. ومن الجدول 9-1 نستخدم ε = 0,3 أو 0,48 لإعاقة القدرة بقيمة 1 أو 2 dB، على التوالي.

المثال 1: لنعتبر الحد الأقصى المسموح به للتشتت اللوني في العديد من معدلات بتات اللاعودة إلى الصفر ذات طول موجات غير متنوعة بمصادر عرض بقيمة غير الصفر(بتنوع ضئيل أو بأساليب جانبية) لإعاقة بقيمة 1 dB. ومن ثم، ولقيمة 1550 nm تعطينا المعادلة 9-1 الشكل 9-1. (واستنادا إلى المعادلة 9-2في طول الموجات هذا، يقابل تمديد ترددي بقيمة 100 GHz تمديد طول الموجات بحوالي 0,8 nm). تلك هي قيم التشتت الضرورية التي لا تعتمد على نوع الليفة.

وجدير بالملاحظة إلى أنه كلما ارتفع العرض الطيفي للمصدر كلما انخفض الحد الأقصى المسموح به للتشتت اللوني. ويكون هذا التناسب العكسي أقل أهمية في المعدلات الأعلى للبتات ، حيث يمثل طيف التشكيل جزءاً أكبر من إجمالي العرض الطيفي.

ويتم الحصول على طول الموجات محدودة التشتت بتقسيم التشتت اللوني على عامل التشتت اللوني لليفة. وبالنسبة للمثال المتعلق بالليفة G.652 وباعتبار $D(1550) = 17$ ps/nm·km، نتوصل إلى منحنى مشابه للشكل 9-1 بتقسيم سلم المحور العمودي على 17 لنحصل على الطول بالكيلومترات.



الشكل 9-1 – الحد الأقصى المسموح به للتشتت اللوني مقابل العرض الطيفي للمصدر عند قيمة 1550 nm لعدة معدلات بتات اللاعودة إلى الصفر ذات طول موجات غير متنوعة بإعاقة القدرة بقيمة 1 dB

المثال 2: لنعتبر الحالة المحدودة الواردة في المثال 1 المتعلقة بمعدلات عالية للبتات ومستقبِل الطيف ذي عرض الخط الضيق (قيم محور الصادات في المنحنيات الواردة أعلاه). والمعادلة 9-4 التالية تعطينا التشتت اللوني المسموح به:

$$DL \approx \frac{117.606 \text{ or } 188.169}{B^2} \qquad (8\text{-}9)$$

بالنسبة لإعاقة بقيمة 1 dB أو 2 dB على التوالي. يُبين الجدول 9-2 القيم المقابلة. (تقابل أعداد 1 dB النقاط العمودية المواجهة في الشكل 9-1).

الجدول 9-2 – الحد الأقصى للتشتت اللوني المسموح به نظريا لمصدر عرض خط ضيق بدون تنوع طول الموجات بقيمة 1550 nm لعدة معدلات بتات اللاعودة إلى الصفر ذات طول موجات غير متنوعة ولإعاقات القدرة

معدل بتات اللاعودة إلى الصفر ذات طول موجات غير متنوعة [Gbit/s]	الحد الأقصى للتشتت اللوني [ps/nm]	
	إعاقة بقيمة 1 dB	إعاقة بقيمة 2 dB
2,5	18,820	30,110
10	1,175	1,880
40	73,5	118

المثال 3: لنعتبر مصدر عرض الخط الضيق في المدى العلوي لنطاق C بقيمة 1565 nm وإعاقة بقيمة 1 dB. ومن ثم تعطينا المعادلة 9-5 طول الموجات محدودة التشتت كما يلي:

$$L = \frac{115.362}{B^2 D} \qquad (9\text{-}9)$$

ويبين الجدول 9-3 بعض الأمثلة.

الجدول 9-3 – الحدود النظرية لطول الموجات لمصدر عرض الخط الضيق بدون تنوع طول الموجات بقيمة 1565 nm بثلاثة أنواع من الألياف ومعدلين من بتات اللاعودة إلى الصفر ذات طول موجات غير متنوعة لإعاقة بقيمة 1 dB.

نوع الليفة		G.652	G.653	G.655
معامل التشتت بقيمة 1565 nm في ps/(nm·km)		19	3,5	10
طول موجات محدودة التشتت بالكيلومترات	10G NRZ	61	333	116
	40G NRZ	3,8	20,8	7,3

علينا أن نتذكر بأن في شفرات تطبيقات النظام هنالك ما يلي: نظام داخلي ((intra-office I (≤25 km) ونظام قصير المدى ((short-haul S (≤40 km) ونظام طويل المدى ((long-haul L (≤80 km) ونظام قاصي المدى ((very-long-haul V (≤120 km). وبالنسبة للأمثلة الشاملة لقيمة 1565 nm الواردة في الجدول 9-3، هناك ما يلي:

- أنظمة اللاعودة إلى الصفر 10G بالليفة G.653 لتطبيقات I وS وL وV أو بالليفة G.655 لتطبيقات I وS وL لا تقتضي عادة أي تكييف للتشتت اللوني.
- أنظمة اللاعودة إلى الصفر 10G بالليفة G.652 لتطبيقي L وV تقتضي تكييفاً للتشتت اللوني.
- أنظمة اللاعودة إلى الصفر 40G تقتضي تكييفاً للتشتت اللوني لكافة أنواع الألياف ولتطبيقات I وS وL وV. وبالنسبة لليفة G.652 يبدأ حد طول موجات اللاعودة إلى الصفر 40G في حوالي كيلومتر.

وبالإمكان تطبيق تقنيات تكييف التشتت الفعال و/أو التشتت المنفعل، كما ورد في التوصية ITU-T G.691 وفي الفقرتين 2.1.2.9 و3.1.2.9 التاليتين، من أجل تخطي حدود طول موجات الليفة الناتجة عن التشتت اللوني.

المثال 4: وكمثال أخير لنعتبر تطبيق المعادلة 9-4 على عدة نسق بمقدار 40 Gbit/s.

الجدول 9-4 – الحد الأقصى للتشتت اللوني المسموح به نظريا لمصدر عرض خط ضيق بدون تنوع طول الموجات بقيمة 1550 nm لعدة معدلات بتات اللاعودة إلى الصفر ذات طول موجات غير متنوعة بمقدار 40 Gbit/s ولإعاقة القدرة بقيمة 2 dB

النسق (أطوال موجات غير متنوعة)	الحد الأقصى للتشتت اللوني [ps/nm]
اللاعودة إلى الصفر	118
العودة إلى الصفر (⅔)	78
العودة إلى الصفر (½)	59
العودة إلى الصفر (⅓)	39
ملاحظة – القيمة الواردة أعلاه للاعودة إلى الصفر (⅔) هي للتشكيل الاصطلاحي للعودة إلى الصفر وليست للعودة إلى الصفر بحامل موجات مكبوت.	

2.1.2.9 إعاقة القدرة بسبب التشتت اللوني

تفيد التوصية ITU-T G.959.1 بسماح استخدام حد أقصى لإعاقة المسير بمقدار 1 dB بالنسبة للأنظمة ذات تشتت منخفض، وبمقدار 1 dB بالنسبة للأنظمة ذات تشتت عالي. ولا تستخدم إعاقات المسير على نحو متناسب مع مسافة الهدف لتجنيب أنظمة التشغيل من إعاقات عالية.

وقد تُدخل في المستقبل الأنظمة المستخدمة لتقنيات تكييف التشتت القائمة على التشويه المسبق (يعني التنويع المسبق لطول الموجات) للإشارة البصرية في المرسل. وفي هذه الحالة، يمكن تحديد إعاقة المسير في إطار السياق السالف الذكر فقط بين نقاط ذات إشارات غير مشوهة. بيد أن هذه النقاط لا تتطابق مع السطوح البينية للمسير الرئيسي وبالتالي قد يتعذر حتي النفاذ إليها. وتعريف إعاقة المسير لهذا الاستخدام هو رهن دراسة أخرى.

3.1.2.9 تكييف التشتت اللوني

تفيد التوصية ITU-T G.691 التقنيات التالية لتكييف التشتت الفعال:

- يُطبق التنوع المسبق لطول الموجات في المرسل البصري لضغط النبضات ولتمديد مسافة الإرسال.
- يستخدم التشكيل ذاتي الطور (SPM) أثر Kerr اللا خطي في ليفة G.652 لضغط النبضات ولتمديد أطول لمسافة الإرسال، إلا أن ذلك يقتضي قدرة للإشارة البصرية تتجاوز عتبة اللا خطية.
- يستخدم الإرسال الداعم للتشتت (DST) تشكيل بزحزحة التردد/تشكيل بزحزحة الاتساع (FSK/ASK) (أو تشكيل خالص بزحزحة التردد البصري) ويستعمل ليفة الإرسال المتشتت لتحويل أجزاء إشارة التشكيل بزحزحة التردد في المرسل إلى إشارة بزحزحة الاتساع في المستقبِل. ويتفاعل التشكيل بزحزحة التردد البصري مع التشتت اللوني لليفة لوظيفة النقل ذات التمرير العالي. وباستخدام مِرْشاح التمرير المنخفض (DST-filter) في الميدان الكهربائي للمستقبِل يمكن تسوية إشارة الاستجابة.

ولأن كافة تقنيات تكييف التشتت الفعالة هي تقنيات إضافية في المرسل الكهربائي/البصري والمستقبِل البصري/الكهربائي (وأيضا فيما يتعلق بالتسوية في الميدان الكهربائي)، تم إدخال هذه العملية في التوصية ITU-T G.798 كعملية لتكييف تشتت القناة (DAc).

ويمكن استخدام تقنيات التشتت اللوني المنفعلة، المحددة في التوصية ITU-T G.691، في نظام إرسال المعطيات بنسب عالية عبر مسافات طويلة أو نطاقات متعددة. ويمكن لمعوض تشتت منفعل (PDC، G.671) أن يكون في صفة ألياف معوضة للتشتت (DCF) أو تشبيكات للألياف. وبالإمكان تطبيقه في مرسل بصري ذي مضخم معزز و/أو في مستقبِل بصري ذي مضخم مسبق وأيضاً في مضخم خط بصري. ومن أجل تعويض الخسارة الإضافية لأجزاء معوض تشتت المنفعل، يمكن تصميم مضخمات الخط بتشكيلة ثنائية الطور ويمكن رص تلك الأجهزة بين مضخات الخط لملاءمة نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) في المستقبِل. وقد أدخلت عملية تكييف التشتت المستعين بمضخم (DAa) في التوصية ITU-T G.798.

وفي نظام متعدد أطوال الموجات يستطيع معوض التشتت المنفعل أن يعوض بالتمام التشتت اللوني لطول موجة واحدة؛ وقد يعجز عن التعويض بالتمام لأطوال الموجات الأخرى. ويمكن تقليص الفارق في التشتت المتبقي بين القنوات إلى الحد الأدنى من خلال تطبيق تعويض التشتت وتعويض ميل التشتت معا. وبما أن التشتت اللوني في الليفة قد تتغير مع الزمن/درجة الحرارة، فقد يحتاج نظام ذي سرعة عالية إلى التعويض جزئيا بمعوض التشتت المنفعل، وجزئياً بتعويض دينامي معدل وملائم.

2.2.9 التشتت اللوني – منهج حسابي

1.2.2.9 مقدمة

سوف يجري في ما يلي تقييم درجات تحمل النظام للتشتت اللوني المتبقي، وتقديم مقترحات للأنظمة أحادية القناة (SC) ومتعددة القنوات (MC) التي تستخدم الإرسال من نسق العودة إلى الصفر (RZ).

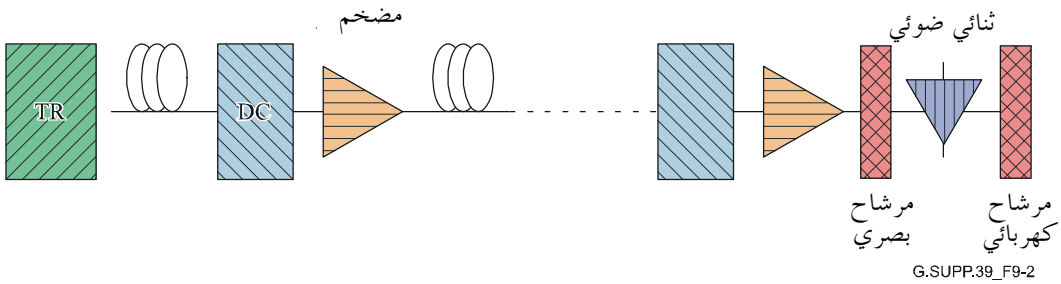
ففي حالة الإرسال أحادي القناة (SC) بمعدل 40 Gbit/s، تقترح قيمة قصوى للتشتت اللوني المتبقي حسب معدل قدرة الدخل. وفي حالة الإرسال المتعدد القنوات (MC) (ضمن طيف أطوال الموجات المحدد في تطبيقات G.959.1)، نأخذ في عين الاعتبار أثر منحدر تشتت الألياف وتعويضه.

2.2.2.9 افتراضات النظام ووصف أداة الاحتساب

النتائج الموردة أدناه مبنية على الافتراضات التالية:

- نظام بمعدل $N \times$ 40 Gbit/s بأطوال أرضية اعتيادية (500-1000 km)، بمباعدة بين المضخمات طويلة نوعاً ما (100 km، على سبيل المثال).
- الإرسال من نسق العودة إلى الصفر (RZ) مع نبضات غوسية (T_{FWHM} = 5 ps). وبما أن هدفنا يتمثل في تحليل آثار التشتت، فنعتبر المرسل "مثالياً".
- تعويض التشتت الدوري بفترة تعادل في المباعدة بين المضخمات. وقد اقترحت عدة أنظمة لتعويض التشتت في وثائق البحث (تعويض لاحق، تعويض سابق، تعويض لاحق مع تنوع مسبق للطول الموجي) [9]. والحالة هنا هي التعويض اللاحق.
- مستقبل مثالي مؤلف من مرشاح بصري بعرض النطاق 160 GHz، وثنائي المساري ضوئي مثالي، ومرشاح كهربائي (بيسل–طومسون من الدرجة الرابعة بعرض النطاق 32 Ghz).
- انتشار بتتابع بتات شبه عشوائي من 32 بتة. وفي حالة الأنظمة متعددة القنوات فلا يترابط تتابع البتات في القنوات المختلفة.

ويوضح الشكل 9-2 التالي مخططاً مبسطاً للنظام.



الشكل 9-2 – مخطط النظام بالتعويض اللاحق الدوري

أما في ما يخص عمليات المحاكاة، فقد اعتمد منهج فورييه (Fourier) المعني بفصل الخطوات، ويدعى أيضاً منهج انتشار الحزمة (BPM). ولوصف مفصل عن منهج انتشار الحزمة (BPM) انظر المرجع [10] و[11]؛ وفي ما يلي شرح مقتضب له. يتيح منهج انتشار الحزمة (BPM) حل معادلة شرودينغر (Schroedinger) اللاخطية، التي تصف انتشار النبضة البصرية في الليفة، حلاً رقمياً، بالأخذ في الحسبان التشتت اللوني، والآثار اللاخطية (التشكيل ذاتي الطور (SPM) والتشكيل مشترك الطور (XPM) والخلط للموجات الأربع(FWM))، وأثر منحدر التشتت، وخسارة الألياف، والتضخيم المتكتل.

ويعد منهج انتشار الحزمة (BPM) أساس معظم أدوات المحاكاة التجارية. وقد اختبر عدة باحثين الشفرة المعتمدة وأتت نتائج الاختبار مقترنة بنتائج الأدوات التجارية الأخرى قبل استخدامها.

وقد قيم أداء النظام وفق كل من معياري الإعاقة بمخطط العين ونسبة الخطأ في البتات (BER) (أو العامل Q).

3.2.2.9 التسامح إزاء التشتت اللوني المتبقي في الأنظمة أحادية القناة (SC) بمعدل 1 × 40 Gbit/s

يصعب كثيراً إعطاء إرشادات عامة لأقصى حد ممكن تحمله من التشتت اللوني المتبقي في نظام بمعدل 1 × 40 Gbit/s لأن الاعتبار يجب أن يولى إلى أوجه عديدة.

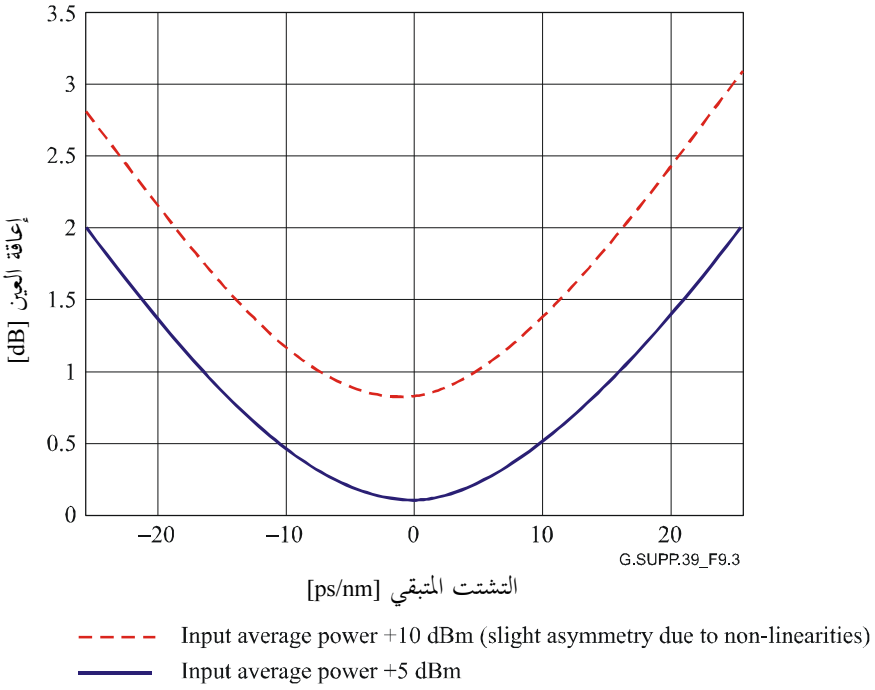
أول هذه الأوجه هو نسق تشكيل الإرسال: وفي هذه الحالة تم تفحص نسق الإرسال بالعودة إلى الصفر (RZ) (T_{FWHM} = 5 ps). وثانيها هو قدرة الدخل البصري؛ ففي الحقيقة تتيح قدرة الدخل المنخفضة سير العملية في النظام الخطي ولكنها لا تضمن نسبة كافية للإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR). ومن جهة أخرى، تسبب قدرات الإدخال الأعلى، بالرغم من توفيرها نسبة جيدة من الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR)، آثاراً لا خطية متسقة (انظر أيضاً 5.9 و7.9).

وقد أجريت عمليات المحاكاة باستخدام مباعدة بين المضخمات قدرها 100 km على مسافة 500 km، تتراوح قدرة الدخل البصري بين 0 و10 dBm، والتشتت المتبقي بين −30 و+30 ps/nm. ويورد الشكل 9-3 الإعاقة بمخطط العين ويعبر عنها بالديسيبل مقابل التشتت المتبقي لقدرتي إدخال بصريتين: 5 dBm (خط مستمر) و10 dBm (خط متقطع).

ويمكن ملاحظة أنه مع وضع حد أعلى بمقدار 1 dB في مغلق الإعاقة بمخطط العين نظراً لحالة التعويض المحددة، فيبلغ أقصى ما ينتج من التشتت المتبقي حوالي 17 ps/nm. وتقترن قيمة التشتت المتبقي هذه بدرجة تسامح تبلغ حوالي 1 km من مجمل طول الوصلة عند التعامل مع ألياف G.652، وحوالي 4 km في حالة ألياف G.655.

والخلاصة أن أنظمة 40 Gbit/s تتسم بدرجة تسامح منخفضة جداً تجاه التشتت اللوني، وخاصة في حالة ألياف G.652. وتثبت نتائج التجارب [12] مدى أهمية تحقيق تعويض التشتت الصحيح لكل مضخم على حدة.

والاعتبارات المذكورة أعلاه لا ترتكز على نوع جهاز تعويض التشتت المعتمد، بالرغم أنه من الجلي أن توافر الجهاز القابل للمعايرة من شأنه إتاحة حل هذا الضرب من المشكلات. وفي حال التعامل مع الألياف أحادية الأسلوب بتعويض التشتت (DCFs)، فيجب تعديل النظام ليشمل مضخمات مزدوجة المراحل. والنتائج المبينة في الشكل 9-3 صالحة فقط في حال بث قدرات بصرية في الألياف أحادية الأسلوب بتعويض التشتت (DCFs) تبلغ أقل من 3 dBm للتقليل من آثارها اللاخطية القوية.



الشكل 9-3 – إعاقة العين بمثابة وظيفة للتشتت المتبقي المتأتي عن تعديل طول المدى الأخير

4.2.2.9 التسامح إزاء التشتت اللوني المتبقي في الأنظمة متعددة القنوات (MC) بمعدل N × 40 Gbit/s

في حالة أنظمة تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM)، يلزم أيضاً أخذ منحدر تشتت الليفة في عين الاعتبار. فنظراً لمنحدر التشتت، تتسم كل من قنوات تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM) بقيمة مختلفة لمُعامل التشتت. ويمكن مقاربة ذلك في مجال 1550 nm كالتالي:

$$D(\lambda) = D(1550) + S_0(\lambda - 1550) \quad (10\text{-}9)$$

حيث D هو مُعامل التشتت، وS هو مُعامل منحدر التشتت، وλ هو طول موجة القناة.

ويبقى من الصعب حالياً إيجاد جهاز تعويض للتشتت يمكن أن يعوض منحدر التشتت تعويضاً تاماً. ونتيجة لذلك، فعند التعامل مع نظام تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM)، يجري اختيار جهاز تعويض التشتت بحيث يولد التعويض الدقيق للقناة المركزية، في حين تعاني القنوات على المحيط من التشتت المتبقي. ويمكن عند هذه النقطة تقييم أقصى درجة تسامح للتشتت المتبقي لكل من القنوات بالنظر مجدداً إلى الشكل 3.9. وهذه القيمة ترسم الحدود لثلاث كميات في الآن نفسه: عدد القنوات (N)، والمباعدة بين القنوات، وطول النظام.

وحين يتسم بعض القنوات بدرجة أوسع من التشتت المتبقي، يبقى بالإمكان الحصول على أداء مقبول عبر التعويض الإضافي المدرج بعد مزيل تعدد الإرسال وبالقيمة الفضلى لكل من القنوات.

5.2.2.9 مثال: 4 × 40 Gbit/s على ألياف G.652 أحادية الأسلوب بتعويض التشتت (DCF)

سوف يعرض في هذه الفقرة مثال عملي عما سبقت مناقشته.

تمت دراسة نظام يعتمد تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM) بمعدل 4 × 40 Gbit/s عبر ألياف G.652 أحادية الأسلوب بتعويض التشتت (DCF)، وبالخصائص التالية:

- أربع قنوات تعدد إرسال بتقاسم طول الموجات (WDM) بمباعدة قدرها 200 GHz، وبأطوال الموجات:
  - القناة 1: λ_1 ـ 1554,13 nm؛

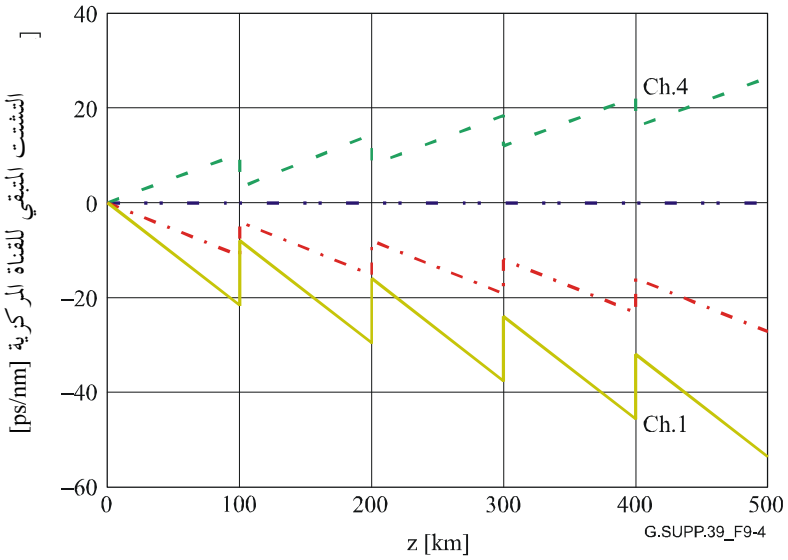
- القناة 2: λ_2 ـ 1555,57 nm؛
- القناة 3: λ_3 ـ 1557,36 nm؛
- القناة 4: λ_4 ـ 1558,98 nm؛

- مزيل تعدد الإرسال بعرض النطاق B = 160 GHz؛
- ألياف G.652 حيث D = 17 ps/nm·km وS_0 = 0,0677 ps/nm^2·km؛
- تعويض التشتت بواسطة الألياف أحادية الأسلوب بتعويض التشتت (DCF) حيث D = −80 ps/nm·km وS_0 = −0.2 ps/nm^2·km؛
- باقي المعلمات هي نفسها المذكورة في الفقرة 2.2.2.9.

وفي حين أن منحدرات تشتت الألياف تختلف عما يقابلها في الألياف أحادية الأسلوب بتعويض التشتت (DCF)، فالقنوات المختلفة تشهد درجات مختلفة من التشتت ولذلك فتعويضاتها ليست متساوية.

وقد اختيرت الألياف أحادية الأسلوب بتعويض التشتت (DCF) للحصول على التعويض الدقيق للقناة الثالثة (λ_3 = 1557,36 nm). وبعد المرشاح الكهربائي، نقيّم أداء النظام بواسطة مغلق العين ويعبر عنه بالديسيبل.

ويوضح الشكل 9–4 لكل من القنوات الفرق بين درجة تشتيتها الإجمالية مقارنةً بالقناة الثالثة. ويمكن بهذه الطريقة تقييم التشتت المتبقي عند مكان توضع المضخمات.



الشكل 9-4 – الاختلاف بين التشتت الإجمالي لكل من القنوات والقناة الثالثة (التي تتمتع بتعويض دقيق)

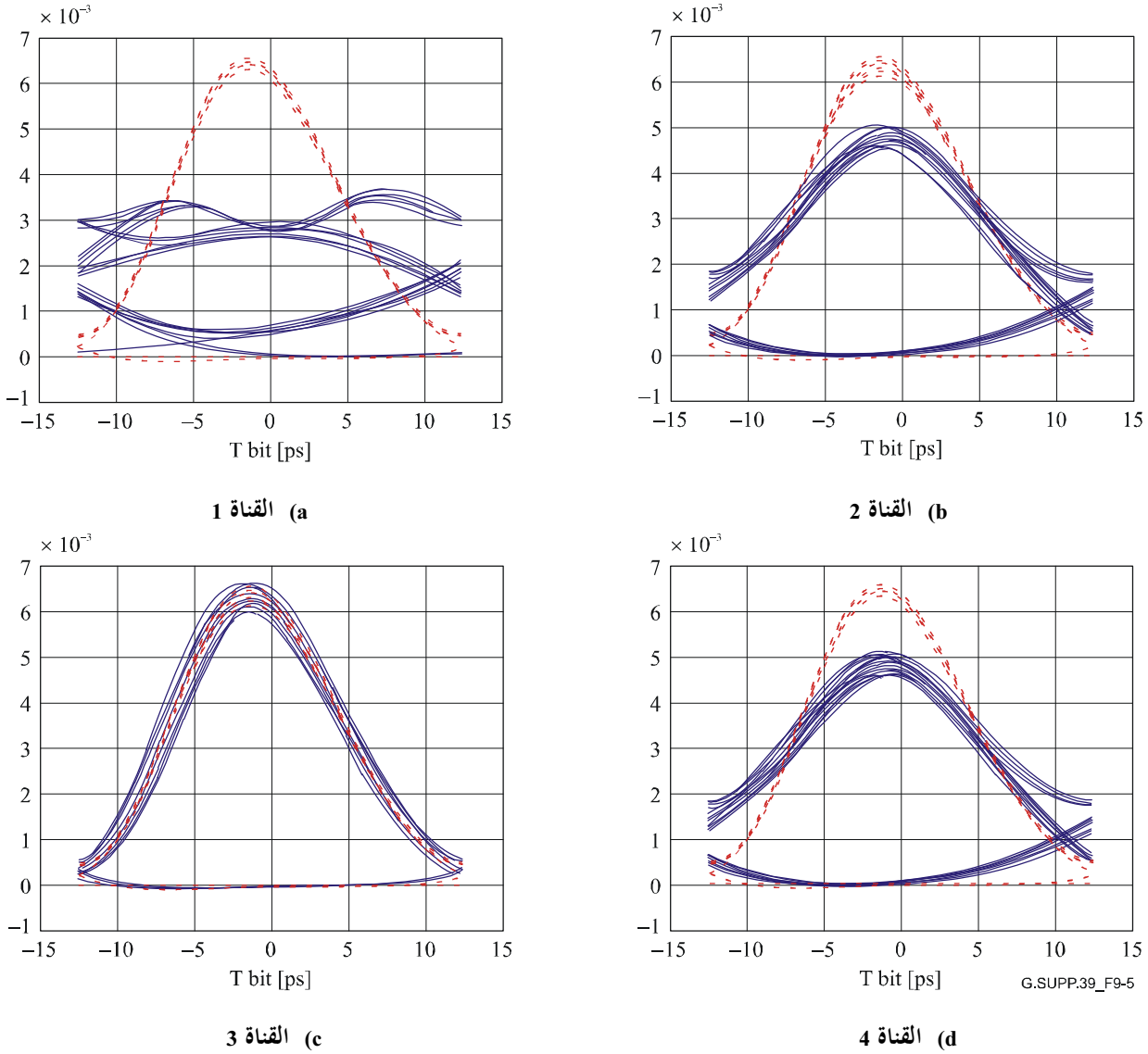
الجدول 9-5 يبين قيم التشتت اللوني الحاصلة بعد 500 km.

الجدول 9-5 – القيم الحاصلة للتشتت اللوني (CD) [ps/nm]

CD(λ_1)	CD(λ_2)	CD(λ_3)	CD(λ_4)
–40.9	–20.9	–1	19.1

ووفق المنحنى في الشكل 9-5، يجوز التأكيد أن التشتت المتبقي على القناة الأولى مرتفع جداً. بل ويؤكد الشكل 9-5 أنه ليس من الممكن الحصول على أداء مقبول على هذه القناة. وفي حقيقة الأمر، في حين أن الألياف أحادية الأسلوب بتعويض التشتت (DCF) تعوض تماماً التشتت اللوني على أطوال الموجات الثابتة، فإن تشتتها لا يتحسن لتعويض منحدر التشتت

أيضاً. ويقترن سجل إعاقة العين أيضاً الوارد في الشكل بمعدل قدرة دخل يبلغ حوالي +5 dBm. وقد أجريت عمليات المحاكاة أيضاً على قدرات أعلى تظهر إعاقة أقوى نتيجةً للأثر اللاخطي.



الشكل 9-5 – مخططات العين للقنوات المتعددة عند نهاية نظام غير خطي طوله 500 km

6.2.2.9 الخلاصة

تبين أن منحدر تشتت الألياف يحد كثيراً من الطول الأقصى لأنظمة تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM). وبما أن هذا الأثر هو أثر حتمي، فمن الممكن تعويض التشتت المتبقي على القنوات الجانبية بواسطة أجهزة تعويض التشتت المستمثل لكل من القنوات وتوضع بعد مزيل تعدد الإرسال البصري. ومن ناحية أخرى يمكن التأكيد على أن الأنظمة التي تتمتع بمعدل عالي للبتات تقدم نسبة تحمل صغيرة جداً إزاء التشتت اللوني ولذلك يجب توخي الدقة العالية لدى اختيار أطوال الألياف.

3.9 تشتت أسلوب الاستقطاب (PMD)

في حالة إرسال اللاعودة إلى الصفر (NRZ) الذي يصل حتى 40 Gbit/s، تحدد مهلة انتشار المجموعة التفاضلية بنسبة 30% من فترة البتة، وهي تقارن حداً أقصى يبلغ 1 dB من إعاقة المسير. ولا يزال تشتت أسلوب الاستقطاب (PMD) من الرتبة الثانية وتفاعله مع التشتت اللوني وتحمله للعودة إلى الصفر (RZ) قيد الدراسة.

1.3.9 تعويض تشتت أسلوب الاستقطاب (PMD)

تتضمن معلمات عنصر الوصلة القائمة جوانب إحصائية لدعم متطلبات النظام. وتمكن الاستزادة من النقاش حولها في الفقرة 4.10.

وقد تستخدم تقنيات تعويض تشتت أسلوب الاستقطاب (PMD) في الوصلات التي يبلغ فيها هذا التعويض حداً مفرطاً. وقد يلزم بغية تحديد مدى تعويض تشتت أسلوب الاستقطاب (PMD) إجراء تحقيق دقيق للمنشآت الخارجية.

2.3.9 إعاقة قدرة تشتت أسلوب الاستقطاب (PMD)

تعد إعاقة القدرة التي تولدها مهلة انتشار مجموعة تفاضلية (DGD) لدى نقطة الاستقبال R احدى وظائف القدرة النسبية لأسلوبي الاستقطاب التعامدي. وهي تتراوح في الشدة مع تراوح الاصطفاف النسبي لحالات الاستقطاب الرئيسية في كبل الألياف البصرية، وتراوح استقطاب المرسل. وتحدد مهلة انتشار مجموعة تفاضلية (DGD) قصوى للوصلة لتتيح إعاقة محددة من الرتبة الأولى لا أكثر في أسوأ حالات نسبة تقاسم القدرة (تساوي القدرة في كلا الأسلوبين). وتتأثر أسوأ حالات إعاقة القدرة من الرتبة الأولى أيضاً بنسق الإرسال، اللاعودة إلى الصفر (NRZ) أو العودة إلى الصفر (RZ).

وفي تطبيقات اللاعودة إلى الصفر (NRZ) بمعدل 10 Gbit/s في التوصيتين G.691 وG.959.1 الصادرتين عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T)، تقترن الإعاقة من الرتبة الأولى المسموح بها بمقدار 1 dB بحدٍّ قدره 30 ps على مهلة انتشار المجموعة التفاضلية (DGD) عند النقطة R. (ويقترن ذلك بالقيمة إبسيلون نفسها للتشتت اللوني، ويتوقع للحد 20 ps أن تكون القيمة 0,5 dB). وكما هي الحال مع التشتت اللوني، لا تزال حالة العودة إلى الصفر (RZ) تتطلب المزيد من الدراسة.

4.9 نسبة الخطأ في البتات (BER) والعامل Q

تحمل تطبيقات التوصيات G.691 وG.692 وG.959.1 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) هدفاً تصميمياً في القسم البصري لا يزيد عن 10^{-12} في ما يخص نسبة الخطأ في البتات (BER) عند نهاية أمدها. وقد استقيت متطلبات تطبيقات التراتب الرقمي المتزامن (SDH) من التوصية ITU-T G.826 (وكذلك مؤخراً من التوصية ITU-T G.828)، في حين أن المتطلبات المقترنة بتطبيقات شبكات النقل البصرية (OTN) معروضة في التوصية ITU-T G.8201.

إلاّ أن تطبيقات التوصية ITU-T G.957 تحمل متطلبات نهاية أمد في ما يخص نسبة الخطأ في البتات (BER) تبلغ 10^{-10} نتيجة للتخفيف في التشدد إزاء المتطلبات الذي كان سائداً وقت تطويرها.

وبغية "ترحيل" المتطلبات من نسبة الخطأ في البتات (BER) التي تبلغ 10^{-10} إلى نسبة تبلغ 10^{-12}، اعتمد عرفاً يجري بموجبه تقليص شفرات التطبيقات ذات مدى توهين أقصى يبلغ 12 dB بنسبة خطأ في البتات تبلغ 10^{-10}، إلى 11 dB بنسبة خطأ في البتات (BER) تبلغ 10^{-12}، وتقليص شفرات التطبيقات ذات مدى توهين أقصى يبلغ 24 dB بنسبة خطأ في البتات (BER) تبلغ 10^{-10}، إلى 22 dB بنسبة خطأ في البتات (BER) تبلغ 10^{-12}.

وعموماً كلما انخفضت قيمة نسبة الخطأ في البتات (BER) كلما صعب التأكد فعلاً من أداء المستقبل بسبب طول مدة القياس اللازمة. وينطبق هذا الأمر خاصةً على حساسيات المستقبلين STM-1 وSTM-4 بنسبة خطأ في البتات (BER) تبلغ 10^{-12}. وقد اقترح منهجان لمعالجة هذه المشكلة. أولهما هو استخدام طول محدد لعملية خالية من الأخطاء لتحديد احتمال أكيد لورود معدل الخطأ تحت المنسوب. ويمكن الخروج برقم البتات الخالية من الخطأ المطلوب (n) بالمعادلة التالية:

$$n = \frac{\log(1-C)}{\log(1-P_E)} \tag{11-9}$$

حيث C هو منسوب الثقة المطلوب (مثلاً 0,95 من أجل ثقة بنسبة 95%) وP_E هو نسبة الخطأ في البتات (BER) المطلوبة (مثلاً 10^{-12}). ولذلك فإن كان مطلوباً نسبة ثقة تبلغ 95٪ لتحقيق نسبة خطأ في البتات (BER) أقل من 10^{-12}، فيلزم 3×10^{12} من البتات الخالية من الخطأ (20 دقيقة بمعدل STM-16).

وبما أن ذلك لا يزال يتطلب أوقات قياس طويلة بمعدلات أخفض، فالمنهج البديل يقول بقياس العامل Q. والعامل Q هو نسبة الإشارة إلى الضوضاء عند دارة القرار في وحدات التوتر أو التيار، وعادة ما تعبر عنه المعادلة:

$$Q = \frac{(\mu_1 - \mu_0)}{(\sigma_1 + \sigma_0)} \tag{12-9}$$

حيث $\mu_{1,0}$ هي القيمة المتوسطة للتوترات أو التيارات للعلامات أو الفراغات، و $\sigma_{1,0}$ هو الانحراف المعياري. ونسبة 10^{-12} من الخطأ في البتات (BER) تقترن بالعامل $Q \approx 7{,}03$.

ومن حيث أن تقنيات قياس العامل Q العملية تجري في المناطق العليا والسفلى من "عين" المستقبل بغية استقاء جودة الإشارة عند أفضل منسوبات القرار، فيمكن للعامل Q أن يعتبر مؤشراً نوعياً فقط لنسبة الخطأ في البتات (BER) الفعلية.

وفي ما يلي العلاقات الرياضية لنسبة الخطأ في البتات (BER) (في حال القيام بعمليات تخلو من التصحيح الأمامي للأخطاء) لدى تحديد العتبة عند القيمة الفضلى:

$$BER = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \tag{13-9}$$

حيث:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_x^{\infty} \mathrm{e}^{-\frac{\beta^2}{2}}\,\mathrm{d}\beta \tag{14-9}$$

ويشيع استخدام المقاربة التالية لهذه المعادلة:

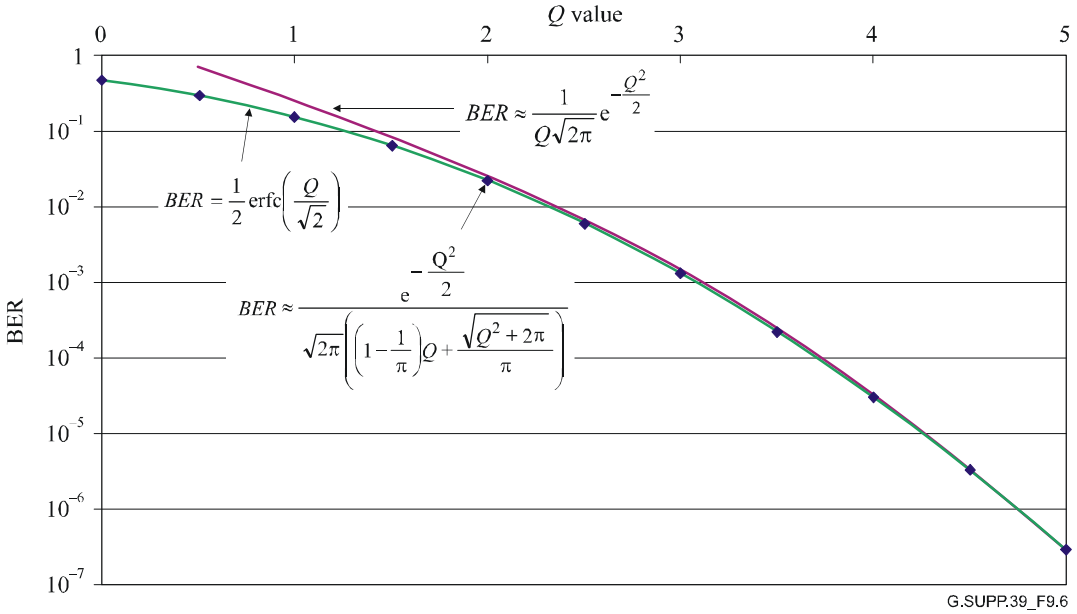
$$BER \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{Q^2}{2}} \tag{15-9}$$

من أجل $Q > 3$.

ويمكن الخروج بتعبير بديل يعطي الإجابات الدقيقة في كامل مدى Q [13]:

$$BER \approx \frac{\mathrm{e}^{-\frac{Q^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}\left(\left(1-\frac{1}{\pi}\right)Q + \frac{\sqrt{Q^2+2\pi}}{\pi}\right)} \tag{16-9}$$

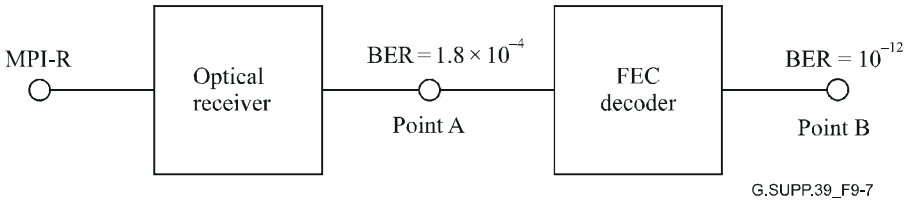
ويورد الشكل 9-6 خطاً بيانياً يقارن هاتين المقاربتين لقيم Q دون 5.



الشكل 9-6 – المقاربتان المتعلقتان بالعامل Q وبنسبة الخطأ في البتات (BER)

1.4.9 نسبة الخطأ في البتات (BER) في التطبيقات ذات التصحيح الأمامي للأخطاء (FEC)

ترد في التوصيات G.693 وG.959.1 وG.698.1 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) عدة شفرات تطبيقات مع مجموعات خصائص للسطح البيني البصري، إذ حددت أو اقترحت بناءً على معدلات وحدة نقل القناة البصرية من الرتبة k (OTUk) التي تتطلب نقل بايتات التصحيح الأمامي للأخطاء (FEC) كما هو محدد في التوصية ITU-T G.709/Y.1331. ويلزم احترام نسبة الخطأ في البتات (BER) في النظام وفق شفرات التطبيقات هذه فقط "بعد تطبيق التصحيح (إن استخدم)". وفي هذه الحالات بالتحديد تثبت الخصائص البصرية بنسبة خطأ في البتات (BER) لا تزيد عن 10^{-12} عند مفكك تشفير التصحيح الأمامي للأخطاء. ويوضح ذلك في الشكل 9-7. وكما هو موضح في الجدول 11-2، فنسبة الخطأ في البتات (BER) النظرية عند خرج المستقبل (النقطة A في الشكل 9-7) هي $1{,}8 \times 10^{-4}$ من أجل نسبة خطأ في البتات (BER) تبلغ 10^{-12} عند خرج مفكك تشفير التصحيح الأمامي للأخطاء (FEC) (النقطة B).



الشكل 9-7 – أثر استخدام التصحيح الأمامي للأخطاء (FEC) على أداء المستقبل قياساً إلى نسبة الخطأ في البتات (BER)

وفي حال تعذر تطبيق تقنيات التصحيح الأمامي للأخطاء (FEC) للتحقق من المكونات، فقد يكون من الأيسر والأجدى التحقق من أداء جهازي المرسل والمستقبل البصريين (المرمي استخدامها في التطبيقات ذات التصحيح الأمامي للأخطاء (FEC)) بنسب خطأ في البتات (BER) تلائم إدخال مفكك تشفير التصحيح الأمامي للأخطاء (FEC)، بدل أن يتم ذلك بنسبة 10^{-12} التي قد تطرح في أغلب الحالات معايير اختبار أكثر تشدداً من اللازم لهذا النوع من التطبيقات.

ونسبة الخطأ في البتات (BER) الملائمة لهذه الغاية تعتمد إلى حد ما على التطبيق المعني لأن التراوح في إحصاءات الأخطاء (بمعزل عن توزيع الخطأ العشوائي الذي تفترضه النظرية) سوف يتطلب بلوغ نسبة الخطأ في البتات (BER) عند النقطة A أقل من 1.8×10^{-4} لمعدل نسبة خطأ في البتات (BER) يبلغ 10^{-12} عند النقطة B. إلاّ أنه وتوخياً للأهداف العملية تعتبر القيم في المدى من 10^{-5} إلى 10^{-6} قيماً ملائمة.

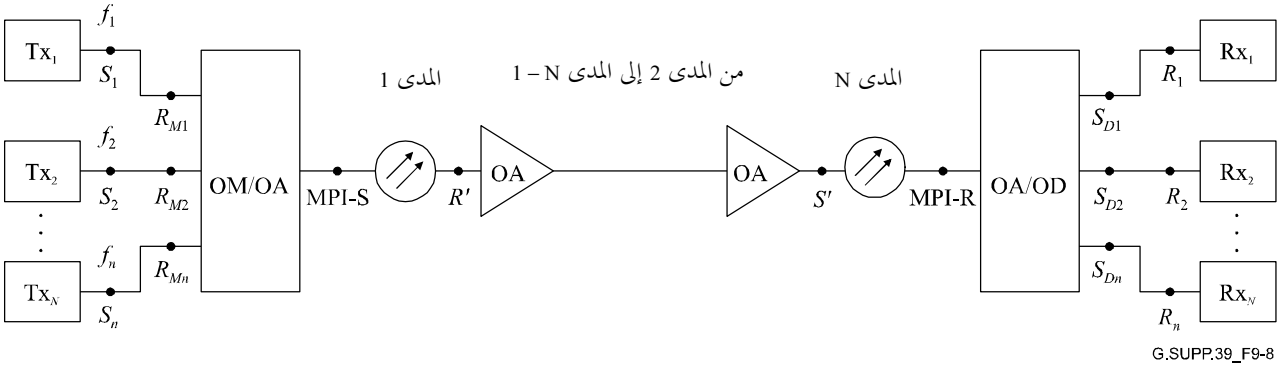
وباستخدام هذا المنهج سوف تكون القيم المعبرة عن حساسية المستقبل وإعاقة المسير البصري التي تقاس عند خرج المستقبل (النقطة A) بنسبة خطأ في البتات (BER) بين 10^{-5} و10^{-6} عادةً تقديرات متحفظة لقيم حساسية المستقبل وإعاقة المسير بنسبة خطأ في البتات (BER) تبلغ 10^{-12} بعد مفكك تشفير التصحيح الأمامي للأخطاء (FEC) (النقطة B).

5.9 تسلسل الضوضاء

في نظام يتألف من سلسلة مضخمات بصرية متشلشلة، تتراكم ضوضاء الإرسال التلقائي المضخم (ASE) من جراء روافد المضخمات البصرية جميعاً. ونتيجة لذلك تتعرض نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) إلى الانحطاط إثر كلٍ من المضخمات البصرية. وهذه النسبة (OSNR) مفيدة لرصد أداء المضخمات البصرية وتشخيصه. وفي ما يلي المعادلة التي ترسم أسوأ حالات تقدير نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) ونصها:

يصف الشكل 9-8 نظاماً مرجعياً متعدد القنوات ذا المدى N يحتوي مضخمات للتقوية، ومضخمات للخط 1-N و مهيئ تضخيم. وبالنسبة للنظام المرجعي هذا، تعتمد الافتراضات التالية:

- تتسم المضخمات البصرية جميعاً في السلسلة بما فيها المضخمات للتقوية ومهيئ التضخيم بدرجة الضوضاء نفسها.
- تتساوى خسارات كل المديات (لكل قناة).
- لا تختلف قدرات المخارج (لكل قناة) عند مضخمات التقوية والخط.



الشكل 9-8 – بيان السطوح البينية لنظام الخط البصري (نظام متعدد القنوات ذا المدى N)

يمكن في هذه الحالة تقريب نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) عند إدخال المستقبلات (النقطة R_i في الشكل 9-8، $i = 1$، ... n) بالمعادلة التالية:

$$OSNR = P_{out} - L - NF - 10\log\left(N + \frac{10^{\frac{G_{BA}}{10}}}{10^{\frac{L}{10}}}\right) - 10\log(h\nu\nu_r) \quad (17\text{-}9)$$

حيث P_{out} هي القدرة عند الخرج (لكل قناة) لمضخمات التقوية والخط ويعبر عنها بالوحدة dBm، وL هي خسارة المدى ويعبر عنها بالديسيبل (ويفترض بها أنها تعادل كسب مضخمات الخط)، وG_{BA} هو كسب مضخم التقوية البصري ويعبر عنه بالديسيبل، وNF هي درجة الضوضاء تلقائية الإشارة في المضخم البصري ويعبر عنها بالديسيبل، وh هو ثابت بلانك (ويعبر

عنه بالوحدة mJ·s ليتلازم مع القيمة P_{out} التي يعبر عنها بالوحدة dBm)، وν هو التردد البصري ويعبر عنه بالهرتز، وν_r هو عرض النطاق المرجعي ويعبر عنه بالهرتز (ويقترن بالقيمة c/Br في الفقرة 1.5.9)، وN-1 هو إجمالي عدد مضخمات الخط.

وتشير المعادلة 9-17 إلى أن ضوضاء الإرسال التلقائي المضخم (ASE) تتراكم من جميع المضخمات $N + 1$. ويمكن تبسيطها في الحالات التالية:

1) حين يعادل كسب مضخم التقوية تقريباً كسب المضخمات الخط، أي $G_{BA} \approx L$، يمكن آنذاك تبسيط المعادلة 9-17 إلى التالي:

$$OSNR = P_{out} - L - NF - 10\log(N+1) - 10\log(h\nu\nu_r) \quad (18\text{-}9)$$

2) ويمكن تجاهل ضوضاء الإرسال التلقائي المضخَم (ASE) من مضخِم التقوية فقط إن كانت خسارة المدى L (وهي أيضاً كسب مضخم الخط) أكبر بكثير من كسب التقوية G_{BA}. ويمكن في هذه الحالة تبسيط المعادلة 9-18 إلى التالي:

$$OSNR = P_{out} - L - NF - 10\log(N) - 10\log(h\nu\nu_r) \quad (19\text{-}9)$$

ملاحظة – تصف المعادلة G.692/3-I حالةً خاصة فقط.

3) وتصلح المعادلة 9-18 أيضاً في حالة المدى المنفرد الذي يمر بمضخم تقوية واحد فقط، أي مثلاً السطح البيني فيما بين المجالات (IrDI) متعدد القنوات وقصير المسافة في الشكل G.959.1/5-5، ويمكن تعديلها في هذه الحالة إلى:

$$OSNR = P_{out} - G_{BA} - NF - 10\log(h\nu\nu_r) \quad (9\text{-}20)$$

وفي حالة المدى المنفرد الذي يمر فقط بمهيئ التضخيم، يمكن تعديل المعادلة 9-18 إلى:

$$OSNR = P_{out} - L - NF - 10\log(h\nu\nu_r) \quad (9\text{-}21)$$

1.5.9 قياس نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR)

يعبر عادة عن نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) بعرض نطاق استبانة يبلغ 0,1 nm وتحدده المعادلة 9-22:

$$OSNR = 10\log\frac{P_i}{N_i} + 10\log\frac{B_m}{B_r} \quad (9\text{-}22)$$

حيث:

P_i هي قدرة الإشارة البصرية بالواط عند القناة رقم i.

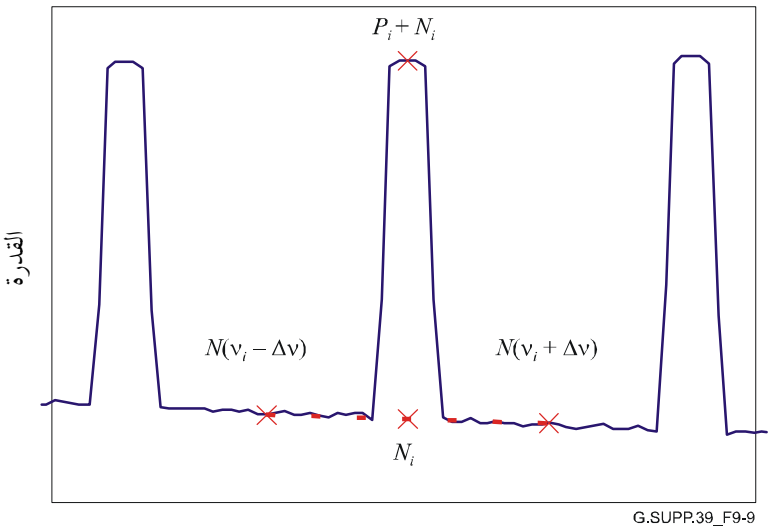
N_i هي القيمة المستكملة داخلياً لقدرة الضوضاء بالواط وقد قيست بعرض النطاق المعادل للضوضاء، B_m، عند القناة رقم i:

$$N_i = \left(\frac{N(\nu_i - \Delta\nu) + N(\nu_i + \Delta\nu)}{2} \right)$$

$\Delta\nu$ هو تخالف الاستكمال الداخلي المكافئ لنصف مباعدة القنوات (في حالة مباعدة قنوات تبلغ 200 GHz، $\Delta\nu$ = 100 GHz).

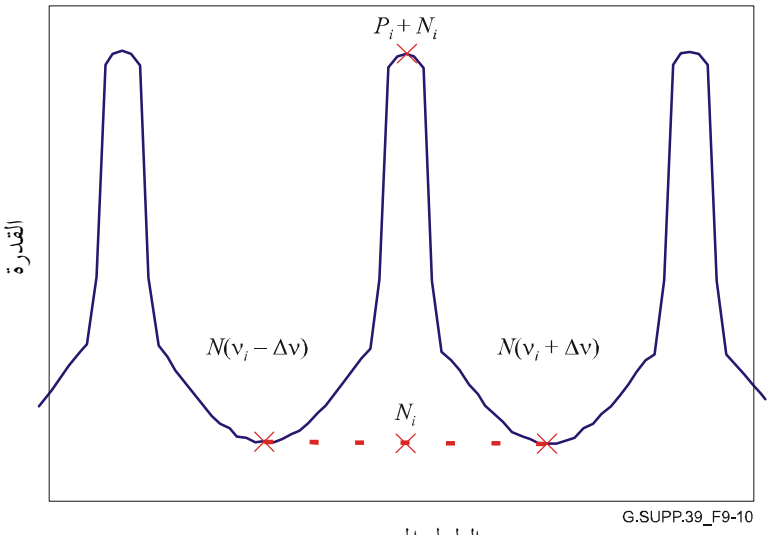
B_r هو عرض النطاق البصري المرجعي. (يمكن التعبير عن B_m وB_r بوحدة التردد أو بوحدة عرض النطاق، ولكن يجب الانتباه إلى تلازمها.) وعادةً يكون عرض النطاق البصري 0,1 nm.

وآلية التقييم المتعارف عليها لنسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) استقاءً من معلومات القياس مبينة في الشكل 9-9. وبغية تحقيق نتيجة دقيقة، يجب توخي استخدام عرض نطاق استبانة ملائم لمعدل الإشارة الاثنينية التي يجري قياسها، ومثلاً من أجل Gbit/s 40 يوصى باستخدام عرض نطاق استبانة أدنى للقياس لا يقل عن nm 1.



الشكل 9-9 – قياس نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) من الطيف البصري

وتجدر الملاحظة أيضاً أن هذا المنهج لتقييم نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) يمكن أن يعطي نتائج غير دقيقة في بعض الظروف. ويبين الشكل 9-10 حالة خضعت فيها الضوضاء ما بين القنوات إلى ترشيح نتيجة وجود تفرع لمعدد إرسال إدراج/إخراج بصري (OADM) على إحدى الوصلات. وهنا لا يعبر الاستكمال الداخلي لقياس الضوضاء في الفراغات بين القنوات عن تقدير صالح للضوضاء على طول موجة الإشارة.



الشكل 9–10 – قياس نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) غير دقيق نتيجة لتشكيل الضوضاء

ويمكن أن تحصل مشكلة مماثلة في الأنظمة التي تتمتع بقنوات عالية المعدل الاثنيني بمباعدة محصورة بين القنوات حيث لا تدرك حواف قمم الموجات منسوبات الضوضاء الفعلية عند النقطة التي تتوسط القنوات.

2.5.9 نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) والقدرة البصرية المستقبَلة للأنظمة أحادية المدى والمهيأة للتضخيم

تصف المعادلة 9-23 انحطاط نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) بسبب الإرسال التلقائي المضخم (ASE) لنظام أحادي المدى بمهيئ تضخيم بصري واحد:

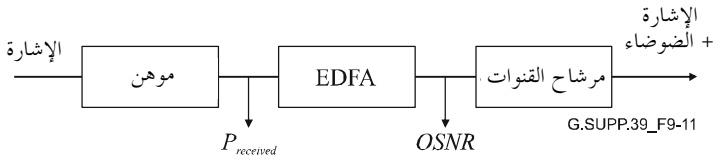
$$OSNR = P_{out} - L - NF - 10\log(h\nu\nu_r) \quad (23\text{-}9)$$

وعند تطبيق المبدأ $P_{received} = P_{out} - L$ و $-10\log(h\nu\nu_r)$ = +58 dB بعرض نطاق استبانة قيمته 0,1 nm– وطول موجة يبلغ 1550 mn، تأخذ المعادلة 9-23 الشكل التالي:

$$OSNR = P_{received} - NF + 58 \text{ dB} \quad (24\text{-}9)$$

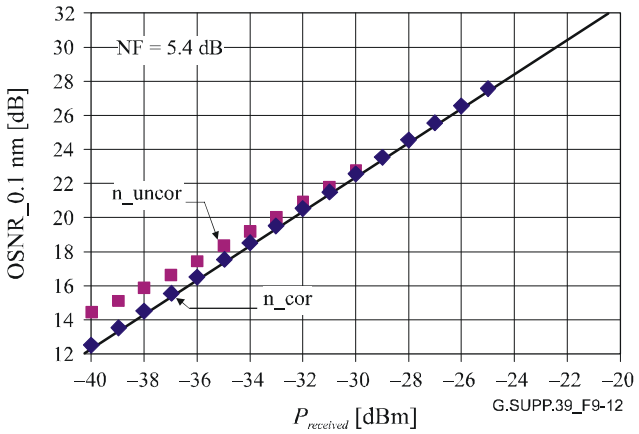
وتصلح المعادلة 9-24 للمدى 1 وللقياسات المتلاحقة مع مهيئ تضخيم بصري. وتترابط قدرة دخل الإشارة ($P_{received}$) عند إدخال مهيئ التضخيم ونسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) عند خرج المهيئ ترابطاً خطياً قوياً عبر رقم الضوضاء NF في مهيئ التضخيم.

وكما هو موضح في الشكل 9-11، يمكن لنسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) أن تتراوح عبر تهوين قدرة دخل الإشارة ($P_{received}$) إلى مهيئ التضخيم البصري (EDFA)، وباستخدام مرسل إشارة عالي نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) (> 40 dB). وتقاس النسبة مباشرة بعد المهيئ EDFA. ويتوقع ترابط خطي مع القدرة البصرية المستقبَلة حسب المعادلة 9-23.



الشكل 9-11 – تجهيز قياس نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR)

ويبين الشكل 9-12 مثالاً على نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) مقابل القدرة البصرية المستقبَلة على مدى واسع باستخدام قناة مشَكّلة من نمط اللاعودة إلى الصفر (NRZ) بمعدل 43 Gbit/s وبطول 1550 nm، تستعمل استبانة عرض نطاق بقيمة 1 nm على محلل الطيف البصري. وإن كانت القدرة المقيسة على طول الموجة هي P_m ($N_i + P_i = P_m$)، فيمكن لنا أن نقدر قيمة نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) عبر العملية الحسابية $OSNR = 10\log\frac{P_m}{N_i} + 10\log\frac{B_m}{B_r}$.
وأما عند التعامل بقيم نسبة إشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) أقل من حوالي 20 dB فهذا قد يؤدي إلى المبالغة في التقدير كما هو مبين في المنحنى "n_uncor" في الشكل 9-12، ولذلك فالطريقة الأفضل هي في العملية الحسابية $OSNR = 10\log\frac{P_m - N_i}{N_i} + 10\log\frac{B_m}{B_r}$، التي تعطي العلاقة الخطية المسماة "n_cor" كما هو متوقع من المعادلة 9-23.
وتعتمد العلاقة الخطية هذه على شكل ضوضاء المضخم عند تلازمها، ولذلك فهي لن تبقى صالحة إذا أضحت قدرة الدخل عالية بما يكفي لتؤدي إلى الإشباع.

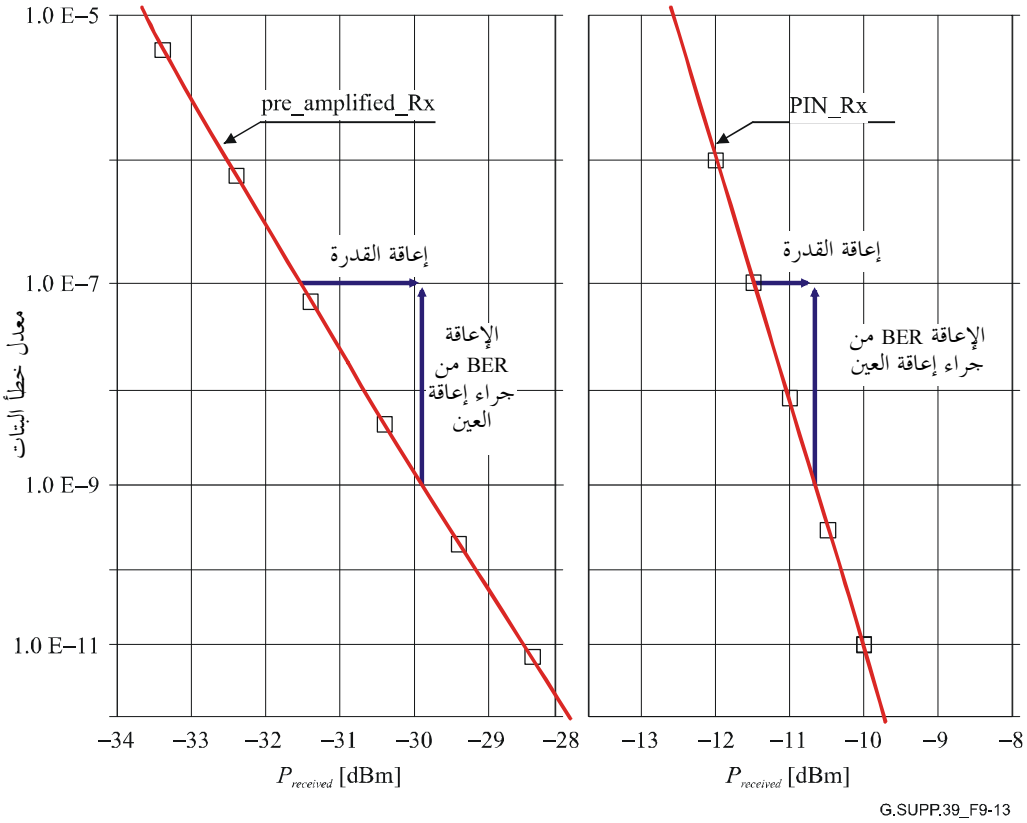


الشكل 9-12 – نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) مقابل قياس القدرة البصرية المستقبَلة: مع تصحيح الضوضاء (n_cor) ومن دون تصحيح الضوضاء (n_uncor) بطول موجة قناة الإشارة

وخلاصة القول إنه في حالة الإرسال أحادي المدى واختبار الأنظمة المتلاحق مع مهيئ تضخيم بصري، يتم الحصول على ترابط خطي بين نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) والقدرة البصرية المستقبَلة. وبذلك فإن أي إعاقة للمسير بسبب انغلاق العين يرتبط مباشرة بالإعاقة بنسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) في المستقبِل المزود بمهيئ تضخيم.

الملاحظة 1 – تختلف إعاقة القدرة والإعاقة بنسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) في أنظمة الإرسال متعددة المديات وطويلة المسافة (محدودة نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR)).

الملاحظة 2 – كما هو مبين في الشكل 9-13، تختلف درجات إعاقة القدرة بين المستقبلات المهيأة التضخيم وتلك غير مهيأة التضخيم اختلافاً منحدر نسبة الخطأ في البتات (BER) مقابل القدرة البصرية المستقبلة. ويعادل إعاقة بقيمة 1 dB في مستقبل غير مهيئ التضخيم إعاقةً بنسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) بقيمة 2 dB في مستقبل مهيئ التضخيم.



الشكل 9-13 – نسبة الخطأ في البتات (BER) مقابل القدرة المستقبلة مع مهيئ التضخيم البصري ومن دونه

6.9 اللغط البصري

1.6.9 تعريف المصطلحات

بما أن المصطلحات المستخدمة لوصف اللغط البصري وآثاره ليست موحدة تماماً في مجال العمل بالألياف البصرية، فمن المفيد وصفها وصفاً موجزاً هنا (انظر الجدول 9-6). ففي لجنة الدراسة 15 لقطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) جرى العرف على تخصيص المصطلح "crosstalk" (اللغط) لوصف آثار النظام والمصطلح "isolation" (العزل) يستخدم لخصائص المكونات.

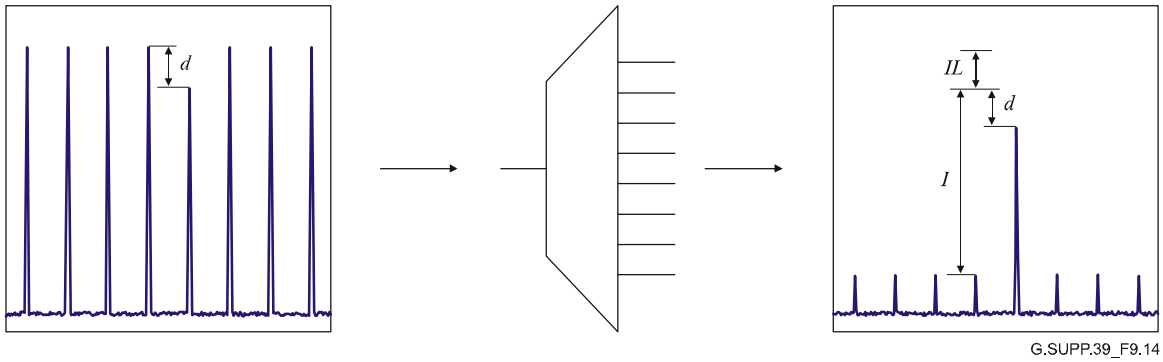
الجدول 9-6 – المصطلحات المستخدمة

المعلَمة [الوحدة]	الرمز	توصية قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) التي يرد فيها التعريف	التعريف
معلَمات النظام			
اللغط بين القنوات [dB]	C_C	G.692	نسبة القدرة الإجمالية في القنوات الاضطرابية إلى القدرة في القنوات المطلوبة. (إذ تكون القنوات المطلوبة والاضطرابية على أطوال موجات مختلفة (الإجمالي k)).
اللغط لقياس التداخل [dB]	C_I	–	نسبة القدرة الاضطرابية (عدا الإرسال التلقائي المضخَم (ASE)) إلى القدرة المطلوبة ضمن القناة الواحدة (طول الموجة). وتعرف هذه المعلَمة أيضاً "باللغط ضمن القنوات".
إعاقة اللغط بين القنوات [dB]	P_C	–	الإعاقة المخصصة في ميزانية النظام لتعليل اللغط بين القنوات.
إعاقة اللغط لقياس التداخل [dB]	P_I	–	الإعاقة المخصصة في ميزانية النظام لتعليل اللغط لقياس التداخل.
فرق قدرة القناة [dB]	d	G.959.1	فرق القدرة الأقصى المسموح به بين القنوات عند دخولها أحد الأجهزة.
نسبة الخمود (والخطية هي المستخدمة هنا)	r	G.691	نسبة القدرة عند مركز القيمة المنطقية "1" إلى القدرة عند مركز القيمة المنطقية "0".
إعاقة إغلاق العين [dB]	E		إعاقة حساسية المستقبل بسبب كل آثار إغلاق العين. وهذا يتضمن إغلاق عين المرَسل وإعاقة التشتت اللوني.
معلَمات المكونات			
فقد الإدراج [dB]	IL	G.671	نقص القدرة بين نقطتي الدخل والخرج بطول موجة القناة المطلوب.
العزل أحادي الاتجاه [dB]	I	G.671	الفرق بين خسارة الجهاز بطول موجة القناة الاضطرابية وخسارته بطول موجة القناة المطلوبة.
عزل القناة المجاورة [dB]	I_A	G.671	عزل الجهاز بطولي موجتي القناتين فوق وتحت القناة المطلوبة مباشرة.
عزل القناة غير المجاورة [dB]	I_{NA}	(ffs) G.671	عزل الجهاز بأطوال موجات القنوات الاضطرابية جميعها عدا القنوات المجاورة.

وتتوزع دراسة آثار اللغط على قسمين: اللغط بين القنوات واللغط لقياس التداخل.

2.6.9 اللغط بين القنوات

أكثر أسباب هذا الأثر التي تمت دراستها هو أثر إزالة تعدد إشارة إرسال متعدد القنوات إلى قنواتها الفردية قبل مجموعة من مستقبلات القنوات الأحادية. ويوضح الشكل 9-14 هذه الحالة:



الشكل 9-14 – مثال عن مزيل تعدد بسيط

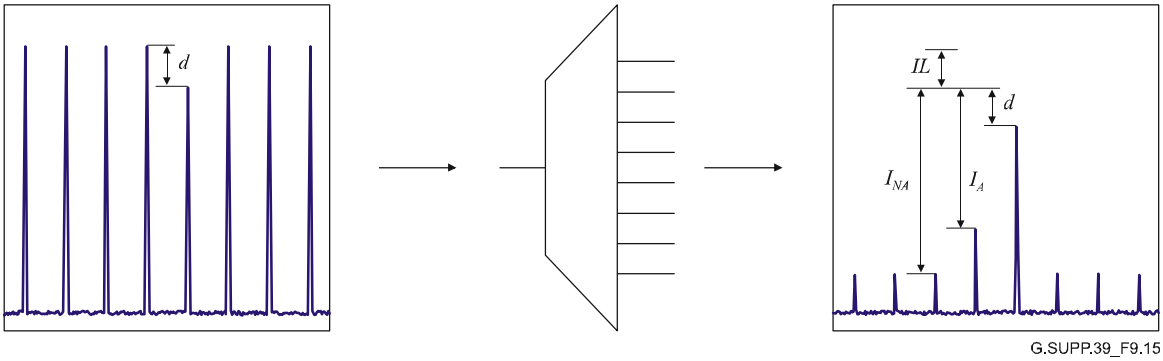
فهنا يدخل عدد من قنوات تعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM) الإدخال المشترك لمزيل التعدد. وأسوأ الحالات بالنسبة لأي من القنوات هي أن تكون قدرتها عند الحد الأدنى وقدرة القنوات الباقية عند الحد الأقصى. ويشار إلى أقصى فرق مسموح به بين القنوات بالرمز d (dB). وعند خروج القنوات من منافذ الخرج الفردية، تكون القنوات الاضطرابية قد وهنت إزاء القناة المطلوبة بقدر يعادل العزل أحادي الاتجاه I (dB).

والمعلَمة الأساسية التي تحكم المنسوب الأقصى للّغط البصري الذي يمكن السماح به في أي نظام بصري مفترض هو إعاقة اللغط بين القنوات P_c. وانطلاقاً من ذلك، ومع عدد صغير من المعلَمات الأخرى، فمن الضروري التمكن من الحصول على معلَمات العزل المطلوبة في مزيل التعدد.

وفي الحالة المبينة في الشكل 9-14 يمكن أن نحرر معادلة للّغط بين القنوات لنظام قناة k C_C:

$$C_C = d - I + 10\log_{10}(k-1) \quad \text{dB} \tag{25-9}$$

ومن المحبذ التوصل لاستقاء القيمة المطلوبة C_C من قيمة إعاقة اللغط بين القنوات. وإذا افترضنا عدداً كبيراً جداً من إشارات متداخلة ومتساوية التشكيل كما هو وارد أعلاه، فيمكن توليد نماذج بسيطة نسبياً للقيام بذلك. وفي مزيلات التعدد العملية، تعطى قيمة العزل للقنوات المجاورة مباشرة للقناة المطلوبة I_A بحيث تكون أصغر من عزل القنوات الاضطرابية غير المجاورة I_{NA}. ومع أخذ ذلك بعين الاعتبار تتغير الحالة إلى ما هو مبيّن في الشكل 9-15.



الشكل 9-15 – مثال عن مزيل تعدد أكثر واقعية

فتصبح المعادلة المعبرة عن اللغط بين القنوات C_C كالتالي:

$$C_C = d + 10\log_{10}\left(2\times 10^{\frac{-I_A}{10}} + (k-3)10^{\frac{-I_{NA}}{10}}\right) \quad \text{dB} \tag{26-9}$$

بيد أنه في هذه الحالة اختلاف القيم I_A وI_{NA} يمكن أن يعطي الأنظمة قيماً مختلفة لإعاقة اللغط بين القنوات P_c التي تتمتع بنفس القيمة C_C الإجمالية.

وأدناه المعادلات المعبرة عن الحالتين الحصريتين.

في حالة قناة اضطرابية أحادية:

$$P_C = 10\log_{10}\left(1-10^{\frac{C_C}{10}}\frac{r+1}{r-1}\right) \quad \text{dB} \tag{27-9}$$

حيث r هي نسبة الخمود الخطية.

الملاحظة 1 – لا تتضمن هذه المعادلة مباشرة أثر أي نقصان في فتحة العين بسبب انغلاق عين المرسل أو إعاقة المسير. بيد أن هذه الآثار يمكن تضمينها عبر حساب قيمة r الفعلية (ويشار إليها بالرمز r') التي تأخذ بالحسبان كل من نسبة الخمود وانغلاق العين.

$$r' = \frac{(r+1)+10^{\frac{-E}{10}}(r-1)}{(r+1)-10^{\frac{-E}{10}}(r-1)} \tag{28-9}$$

حيث E هو إعاقة إغلاق العين ويعبر عنها بالديسيبل. وعلى سبيل المثال، إن كانت نسبة الخمود تعادل 6 dB، فتكون r = 3,98. وللتعبير عن إعاقة إغلاق العين بمقدار 3 dB إضافية فتصبح r' = 1,86.

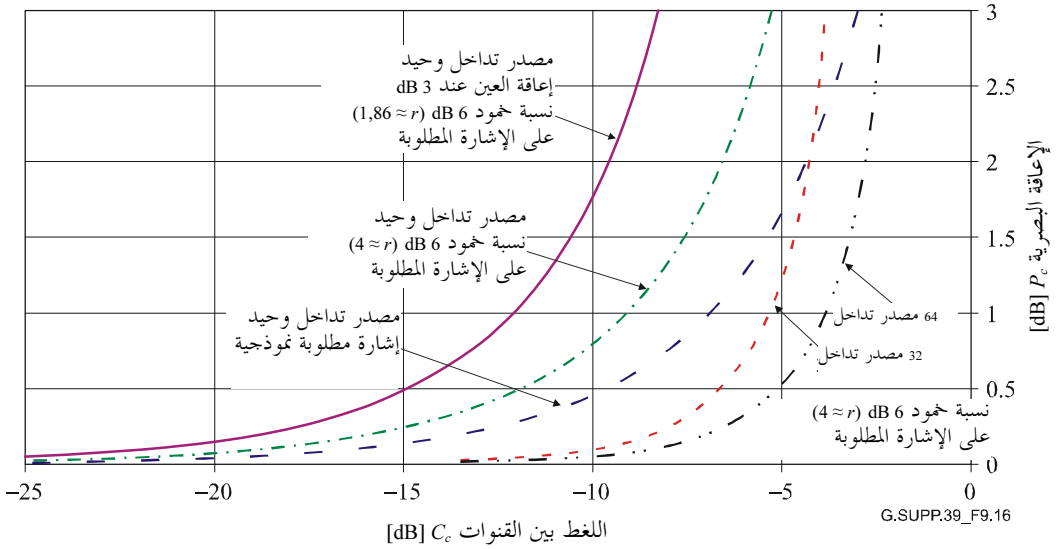
ومن أجل عدد كبير جداً من القنوات الاضطرابية متساوية التشكيل (بمعطيات غير مترابطة)، يصبح اللغط بين القنوات كالضوضاء ويمكن آنذاك افتراض تقريب غوسي. وفي هذه الحالة، ينبغي على اللغط المشابه للضوضاء أن يكون ملفوفاً بتوزيع المستقبل للضوضاء (أو الإرسال التلقائي المضخم (ASE)) لينتج إعاقةً فعالة. وباتباع المناهج المبينة في [14] و[15] وباستخدام تقريبٍ غوسي إلى التوزيع الاسمي المزدوج، تصبح المعادلة آنذاك:

$$P_C = -5\log_{10}\left(1-\frac{10^{\frac{2C_C}{10}}}{k-1}Q^2\left(\frac{r+1}{r-1}\right)^2\right) \tag{29-9}$$

حيث $Q = \sqrt{2}\,\text{erfc}^{-1}(2\times BER)$. ومن أجل نسبة خطأ في البتات (BER) تعادل 10^{-12}، $Q \approx 7{,}03$.

وفي الشكل 9–16 رسم الخط البياني للإعاقة البصرية المستحثة مقابل اللغط بين القنوات بعدد متنوع من الافتراضات. والإعاقة الفعلية التي تحصل في نظام عملي تقع قريباً في المنطقة تحت المنحنى الأعلى.

الملاحظة 2 – قد تعتمد الإعاقة باللغط أيضاً على شفرة الخط (عودة إلى الصفر (RZ) أو اللاعودة إلى الصفر (NRZ)) وعلى المعدلات الاثنينية النسبية للإشارات المطلوبة والمتداخلة.



الشكل 9-16 – الخط البياني للإعاقة البصرية مقابل اللغط بين القنوات

فيصبح آنذاك إجراء تحديد العزل المطلوب كالآتي:

- نحدد انطلاقاً من معلمات النظام قيمة للّغط قد تختلف مع اختلاف الأنظمة. فقد يعين نظامٌ قصير المسافة إعاقة أعلى باللغط من الأنظمة البعيدة المسافة مثلاً. ومن أجل التعبير عن ذلك برقم ملموس، نختار 0,5 dB.
- نشتق قيمة C_C من القيمة P_c. والنموذج المطلوب يقع في ما بين حالة إشارتين متداخلتين عندما يكون الفارق كبيراً بين القيمتين I_A وI_{NA} وحالة النموذج الغوسي حيث I_A تعادل I_{NA} والقيمة k كبيرة. واختيار أسوأ الأمثلة من بين المنحنيات المبيّنة في الشكل 9–16 يعطي القيمة −15 dB.
- انطلاقاً من معلمات النظام نحدد قيمة d، التي سوف تكون أيضاً مختلفة باختلاف الأنظمة. ففي التوصية ITU-T G.959.1 مثلاً يحمل رمز التطبيق P16S1-1D2 القيمة d = 6 dB في حين أنها في P16S1-2C2 تصبح d = 2 dB. (هذا يؤدي إلى فرق بمقدار 4 dB في العزل المطلوب بين التطبيقين.) لذلك فمن أجل P16S1-1D2 نحدد القيمة d = 6 dB. (وأيضاً من أجل هذا التطبيق تكون k = 16.)
- وبتعويض هذه القيم في المعادلة البسيطة $C_C = I - d + 10\log_{10}(k - 1)$ تصبح المعادلة $-15 = I - 6 + 10\log_{10}$ (15) وهذا يؤدي إلى قيمة I = 32,8 dB من أجل هذا المثال.

3.6.9 اللغط لقياس التداخل

يحصل اللغط لقياس التداخل عندما تكون القناة الاضطرابية والقناة المطلوبة على نفس طول الموجة الاسمي. والأمثلة الأربعة عن ذلك هي التالية:

- في معدد إرسال إدراج/إخراج بصري حيث يخرج طول الموجة المعني بصورة غير كاملة قبل إدراج الإشارة الجديدة؛
- في معدد إرسال بصري قد يبث أحد المرسلات فيه القدرة على طول موجة قناة أخرى (مثلاً بسبب نسبة غير ملائمة لكبت الأسلوب الجانبي) ويطلق على هذه الحالة مصطلح اللغط عند جانب الإرسال في G.692؛
- في توصيل متقاطع بصري حيث يسبب نقص العزل الكافي للبدالة إلى وصول الضوء إلى المستقبل من أكثر من ليفة واحدة تنبع عن المرسل؛
- في أي من المكونات فرادى أو مجموعات التي يكون فيها أكثر من مسير يمكن أن يسلكه الضوء ليدرك المستقبل. ويدعى ذلك بالتداخل متعدد المسيرات (MPI).

ويتصرف اللغط لقياس التداخل تصرفاً مختلفاً عن اللغط بين القنوات عندما تكون الإشارتان البصريتان متقاربتين بما يكفي ليكون تردد خفقانهما ضمن عرض النطاق الكهربائي للمستقبل. وفي هذه الحالة تكون الحقول البصرية هي التي تتفاعل لتولد اللغط بدلاً من القدرات البصرية، وتبعاً لذلك تكون منسوبات اللغط المطلوبة لتوليد إعاقة محددة أصغر بكثير.

ويمكن وضع نموذج للغط مسبب تداخل وحيد على أنه يمتلك دالة كثافة احتمالات (pdf) محدودة. فتصبح الإعاقة باللغط من [16] (بما في ذلك من أثر معدل الخمود غير التام) كالتالي:

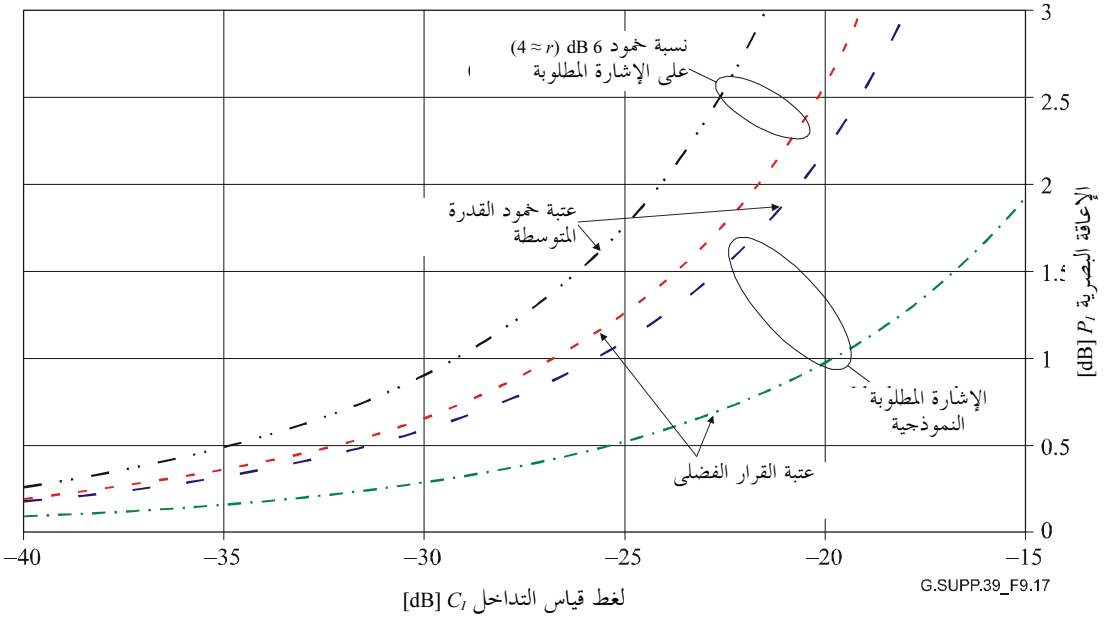
$$P_I = 10\log_{10}\left(\frac{\frac{r-1}{r+1}}{\frac{r-1}{r+1}+10^{\frac{C_I}{10}}-4\sqrt{\frac{r}{r+1}10^{\frac{C_I}{10}}}}\right) \quad \text{dB} \tag{30-9}$$

أما بالنسبة لعتبة قرار القدرة العادية:

$$P_I = -10\log_{10}\left(1-2\left(\frac{\left(1+\sqrt{r}\right)\sqrt{10^{\frac{C_I}{10}}(r+1)}}{r-1}\right)\right) \quad \text{dB} \tag{9-31}$$

بالنسبة لعتبة القرار الفضلى.

ويرسم الخط البياني في الشكل 9–17 إعاقة اللغط لقياس التداخل من أجل إشارة مطلوبة بمعدل خمود 6 dB.



الشكل 9-17 – الخط البياني للإعاقة البصرية مقابل اللغط لقياس التداخل في حالة مسبب تداخل وحيد (نموذج محدود)

أما عندما يتعلق الأمر بمسببات تداخل متعددة فتصبح دالة كثافة الاحتمالات (pdf) غوسية تقريباً وتكون إعاقة اللغط البصري من [15] في حالة مستقبل من النوع PIN كالتالي:

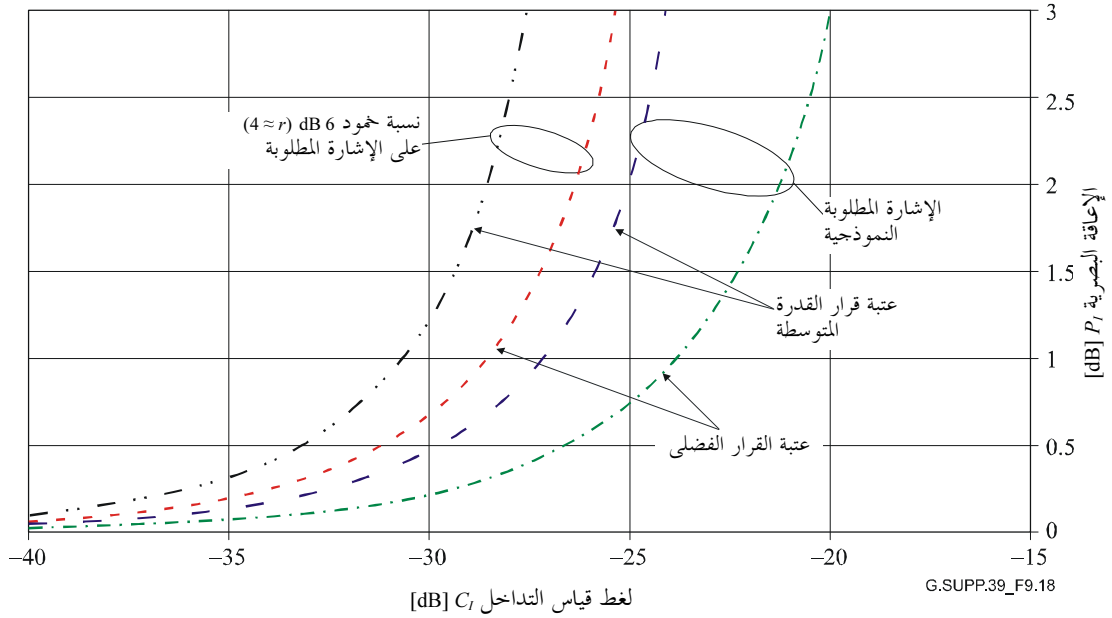
$$P_I = -5\log_{10}\left(1-4\times10^{\frac{C_I}{10}}Q'^2\frac{1+\frac{1}{r}}{\left(1-\frac{1}{r}\right)^2}\right) \quad \text{dB} \tag{9-32}$$

وبالنسبة لعتبة قرار القدرة العادية:

$$P_I = -5\log_{10}\left(1-2\times10^{\frac{C_I}{10}}Q^2\left(\frac{r+1}{r-1}\right)^2+\left(10^{\frac{C_I}{10}}\right)^2Q^4\left(\frac{r+1}{r-1}\right)^2\right) \quad \text{dB} \tag{9-33}$$

أما بالنسبة لعتبة القرار الفضلى، حيث $Q' = \sqrt{2}\text{erfc}^{-1}(4\times BER)$ و $Q = \sqrt{2}\text{erfc}^{-1}(2\times BER)$ من أجل نسبة خطأ في البتات (BER) تعادل 10^{-12}، $Q \approx 6{,}94$ و $Q \approx 7{,}03$.

ويرسم الخط البياني في الشكل 9-18 هذه الوظائف في حالة الإشارة المطلوبة المثالية وأيضاً في حالة إشارة بمعدل خمود 6 dB.



الشكل 9-18 – الخط البياني للإعاقة البصرية مقابل اللغط لقياس التداخل في حالة مسببات تداخل متعددة (نموذج غوسي)

7.9 تسلسل الآثار اللاخطية – منهج حسابي

1.7.9 مقدمة

سوف يجري في ما يلي تقييم وقع الآثار اللاخطية مثل التشكيل ذاتي الطور (SPM)، والتشكيل متقاطع الأطوار (XPM) وخلط الموجات الأربع (FWM) على أنظمة $N \times 40$ Gbit/s متعددة القنوات (MC). ويجري تقييم هذه الآثار بواسطة محاكاة قيم مختلفة لمعدل قدرة الدخل البصري بغية تحديد عتبة القدرة التي تقترن بإعاقة معينة بأداء النظام.

2.7.9 افتراضات النظام ووصف أداة الاحتساب

النتائج الموردة أدناه مبنية على الافتراضات التالية:

- نظام بمعدل $N \times 40$ Gbit/s بأطوال أرضية اعتيادية (500-1000 km).
- الإرسال من نسق العودة إلى الصفر (RZ) مع نبضات غوسية ($T_{FWHM} = 5$ ps). وبما أن هدفنا يتمثل في تحليل الآثار اللاخطية، فنعتبر المرسل "مثالياً".
- تعويض التشتت الدوري بفترة تعادل المباعدة بين المضخمات. وقد اقترحت عدة نظم لتعويض التشتت في وثائق البحث (تعويض لاحق، تعويض سابق، تعويض لاحق مع تنوع مسبق لطول الموجة) [9]. والحالة التي ننظر فيها هنا تفترض أن التشتت والمنحدر معوضان تعويضاً تاماً.
- مستقبل مثالي مؤلف من مرشاح بصري بعرض النطاق 160 GHz، وثنائي المساري ضوئي مثالي، ومرشاح كهربائي (بيسل–طومسون من الدرجة الرابعة بعرض النطاق 32 GHz).
- انتشار بتتابع بتات شبه عشوائي من 32 بتة. وفي حالة الأنظمة متعددة القنوات فلا يترابط تتابع البتات في القنوات المختلفة (وأسوأ الحالات تتمثل في إرسال نفس التتابع على القنوات كافة).

ويوضح الشكل 9-2 مخططاً مبسطاً للنظام.

3.7.9 وقع الآثار اللاخطية

يتأثر أي نظام للإرسال عالي السرعة ومتعدد المديات يكون فيه التعويض عن التشتت كاملاً بالظواهر البصرية اللاخطية، وخاصةً التشكيل ذاتي الطور (SPM) في الأنظمة أحادية القناة أو التشكيل متقاطع الأطوار (XPM) وخلط الموجات الأربع (FWM) في الأنظمة متعددة القنوات. ويعود سبب حصول هذه الآثار اللاخطية إلى أثر كير (Kerr)، ويتعاظم وقعها على النظام بتعاظم قدرة الدخل البصري. ونتيجة لذلك، يمكن أن يتعرض أداء النظام إلى انحطاط شديد بفعل هذه الآثار غير الخطية، وذلك في حال أصبحت قدرة الدخل البصري لليفة عالية جداً.

ويتعرض أداء النظام للانحطاط أيضاً عندما تكون قدرة الدخل البصري لليفة منخفضة بسبب انخفاض نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية المستقبلة في نهاية خط الإرسال. ولذلك توجد عتبتان قصوى ودنيا لقدرة الدخل تقترنان بإعاقة معينة بأداء النظام (العامل Q، ونسبة الخطأ في البتات (BER)، إلخ.). وتمكن مراجعة المقترحات للعتبة الدنيا لقدرة الدخل البصري في الفقرة 5.9 (تسلسل الضوضاء).

وفي ما يخص العتبة القصوى للقدرة بسبب الآثار اللاخطية، فقد أخذت الجوانب التالية في عين الاعتبار:

أ) نوع الليفة المستخدمة للإرسال

يختلف أداء الألياف اختلافاً كبيراً من ناحية الآثار اللاخطية باختلاف ما يميزها من المعاملات اللاخطية ومعاملات التشتت.

وكمثال على ذلك، تتميز الألياف أحادية الأسلوب بتعويض التشتت (DCF) بمساحة فعلية أصغر وبالتالي بمعامل لا خطي كبير. وقد تم التحقق عبر عمليات المحاكاة من أن التشكيل ذاتي الطور (SPM) يبدأ يتسبب بانحطاط أداء النظام ما إن تتجاوز قدرة الدخل البصري القيمة $P_{in} > 3$ dBm.

وتتمتع ألياف G.652 بمعامل لاخطي صغير وبالتالي يهمل التشكيل ذاتي الطور (SPM) فيها عموماً إلا عند التعامل مع قدرات إدخال بصرية مرتفعة جداً (مثلاً عندما تكون $P_{in} > 8$ dBm، ونظام تعويض لاحق ومباعدة بين المضخمات تبلغ 100 km، فيبدأ التشكيل الذاتي الطور (SPM) يتسبب بانحطاط الخصائص الخطية المثالية للأداء). ومن جهة أخرى يتسبب التشتت المحلي المرتفع الذي تتسم به ألياف G.652، بمنسوبات مهملة فعلاً للأثرين التشكيل متقاطع الأطوار (XPM) وخلط الموجات الأربع (FWM)، على فرض أن التشتت معوض تماماً.

وتتميز ألياف G.655 بنفس الأداء تقريباً الذي تتمتع به ألياف G.652 بالنسبة للتشكيل ذاتي الطور (SPM)، ولكن نظراً لأنها تتسم بمعامل تشتت أصغر، فلا يهمل أثر خلط الموجات الأربع (FWM).

ب) نظام تعويض التشتت

تم النظر في الأنظمة الثلاثة التالية لتعويض التشتت (وتوجد المعلومات بالتفصيل عنها في [9]) وهي تتميز بأداء مختلف في ما يتعلق بالتشكيل ذاتي الطور (SPM):

- **تعويض سابق**: يوضع جهاز تعويض التشتت عند بداية كل مدى قبل ليفة الإرسال. ويخضع هذا النظام خضوعاً قوياً للتشكيل الذاتي الطور (SPM). وقد بيّنت المحاكاة مع مباعدة بين المضخمات بمسافة 100 km، ووصلة طولها 500 km، ومضخمات بمعدل NF = 6 dB، أن قدرة الدخل القصوى للعامل Q = 7 هي P_{in} = 4 dBm.
- **تعويض لاحق**: يوضع جهاز تعويض التشتت عند نهاية كل مدى بعد ليفة الإرسال. وقد بيّنت المحاكاة مع مباعدة بين المضخمات بمسافة 100 km، ووصلة طولها 500 km، ومضخمات بمعدل NF = 6 dB، أن قدرة الدخل القصوى للعامل Q = 7 هي P_{in} = 13 dBm.
- **تعويض لاحق مع تنوع مسبق لطول الموجة**: تماماً كالتعويض اللاحق، ولكن تكون النبضة عند بداية الوصلة ذات تنوع مسبق لطول الموجة. وتساهم قيمة التنوع المسبق لطول الموجة الفضلى التي تحتسب بواسطة عمليات المحاكاة أو حسب ما هو وارد في [9]، في تخفيض أثر التشكيل ذاتي الطور (SPM) تخفيضاً قوياً.

ج) طول المدى

تضمحل قدرة الدخل البصري بسبب خسارات الألياف وفق قاعدة أسيّة أثناء انتشارها في أحد المديات. ومن جهة أخرى يعتمد وقع الآثار اللاخطية على قيمة القدرة البصرية. ونتيجة لذلك تحمل عتبة قدرة الدخل القصوى بسبب الآثار اللاخطية قيماً مختلفة للأنظمة التي تختلف فقط باختلاف معلَمة المباعدة بين المضخمات.

ولنأخذ على سبيل المثال وصلة بطول 500 km بألياف G.652 مع تعويض لاحق ومضخمات بمعدل NF = 6 dB، فإن كان المدى بمسافة 100 km تظهر المحاكاة أن قدرة الدخل القصوى للعامل Q = 7 هي P_{in} = 13 dBm. أما إذا كان المدى بمسافة 50 km فتظهر المحاكاة أن قدرة الدخل القصوى للعامل Q = 7 هي P_{in} = 8 dBm.

4.7.9 الخلاصة

من المستحيل انتقاء قيمة وحيدة لقدرة الدخل البصري القصوى لتحقيق قيمة للعامل Q أكبر من 7. ويمكن استغلال هذا القيد على الإدخال الأقصى لتحديد أفضل مناطق أداء أي نظام، ويجوز تحديدها بواسطة عمليات المحاكاة المبدئية بمعلمات النظام المرغوبة (نوع الليفة، وتعويض التشتت، والمباعدة بين المضخمات، والمباعدة بين القنوات). وفي النهاية، تجدر الملاحظة أن كل المقترحات الواردة هنا مبنية على افتراض نسق التشكيل بالعودة إلى الصفر (RZ) ولا تتحقق لا من عدد قنوات تعدد إرسال بتقاسم طول الموجات (WDM) ولا من المباعدة بين ترددها.

10 تصميم نظام إحصائي

1.10 منهجية عامة

إن التصميم الحتمي (أو "تصميم أسوأ حالة") مفيدٌ لنظام ينطوي على عدد صغير من المكونات إذ أنه يوفر هوامش معقولة للنظام. بيد أنه بالنسبة لنظام فيه عدد كبير من المكونات من قبيل نظام متعدد المدى أو نظام متعدد القناة، فإن الهوامش الناجمة عن التصميمات الحتمية قد تصبح كبيرة بدرجة مفرطة. وفي هذه الحالة، يتعين على مشغلي الشبكات ومصنعيها أن يراعوا استخدام التصميم الإحصائي.

وتختلف معلمات نظام ما (مثل الحد الأقصى للتوهين أو الحد الأقصى للتشتت اللوني للوصلة وما إلى ذلك) عن معلمات عنصر معين (مثل مُعامل التوهين أو مُعامل التشتت لمنتوج بكرة الألياف وما إلى ذلك). وتتحدد معلمات نظام ما من خلال تصميم هذا النظام الذي تراعى فيه الخصائص الإحصائية لمعلمات العنصر. ويظهر الجدول 1.10 أمثلة عن العلاقة بين معلمات النظام ومعلمات العنصر.

الجدول 10-1 – العلاقة بين معلمات النظام ومعلمات العنصر

معلم النظام	معلم العنصر	موصوف في
الحد الأقصى للتوهين	مُعامل توهين كبل الألياف، قدرة خرج المُرسل، حساسية المُستقبل، إضرار القدرة، خسارة الجدالة، خسارة الواصلَ	2.10 التصميم الإحصائي للربح والخسارة
الحد الأقصى للتشتت اللوني	مُعامل تشتت الألياف، عرض طيف المُرسِل	3.10 التصميم الإحصائي للتشتت اللوني
الحد الأقصى للمهلة الزمنية لانتشار المجموعة التفاضلية DGD	معامل التشتت بأسلوب الاستقطاب للكبل، تقاسم القدرة بين حالات الاستقطاب الأساسية، عناصر أخرى في الوصلة	4.10 التصميم الإحصائي للتشتت بأسلوب الاستقطاب
الحد الأقصى لقدرة الخرج	مُعامل توهين الكبل، طول موجة تشتت الألياف المعدوم، منطقة الألياف الفعالة، معامل غير خطي للألياف، مباعدة بين القنوات.	بحاجة إلى مزيد من الدراسة.

وتقترح النسخة الحالية من هذا الملحق أن تتم مراعاة معلم نظام واحد فقط مراعاةً إحصائية في أي نظام معين. ففي نظم التشتت المحدود على سبيل المثال يراعى الحد الأقصى للتشتت اللوني مراعاةً إحصائية بينما تُعامل معلمات النظام الأخرى باستخدام النهج الاعتيادي لتصميم أسوأ حالة. وتترك مسألة الاعتبارات الإحصائية لمعلمات نظام تعددي إلى أعمال مستقبلية.

1.1.10 احتمال انقطاع النظام

عادة ما يُعرَّف احتمال انقطاع النظام على أنه احتمال أن تتجاوز نسبة الخطأ في البتات BER القيمة 10^{-12} [21]. وبما أن نسبة الخطأ في البتات BER ترتبط بالعديد من المعلمات (مثل خصائص المرسِل والمستقبِل) فإنه من الصعوبة بمكان الاعتماد على نسبة الخطأ في البتات BER في تصميم إحصائي عام. ولهذا يقترح هذا البند مراعاة "مستوى دلالة النظام" بدلاً من "احتمال انقطاع النظام" كما يقترح عدم الاعتماد على نسبة الخطأ في البتات BER. ومستوى الدلالة هو مصطلح شاع استخدامه في الإحصاءات بهدف اختبار الفرضيات [22].

ومع مراعاة كل معلم نظام، يُعرَّف مستوى دلالة النظام على أنه احتمال تجاوز معلم النظام قيمة x. وبالطبع فإن مستوى دلالة النظام رهن بالقيمة x. وعلى سبيل المثال، فإن مستوى دلالة النظام للمهلة الزمنية لانتشار المجموعة التفاضلية DGD هي $4{,}2 \times 10^{-5}$ حيث x يساوي متوسط قيمة المهلة الزمنية لانتشار المجموعة التفاضلية DGD بثلاث مرات (انظر الاتحاد الدولي للاتصالات، قطاع تقييس الاتصالات، التوصية وكمثال أخر، فإن مستوى دلالة النظام لأقصى تشتت لوني هو $1{,}3 \times 10^{-3}$ عندما يساوي x مجموع متوسط القيمة و3σ (σ هي الانحراف المعياري) [20].

2.1.10 عتبة احتمال قبول النظام

تُعرّف عتبة احتمال قبول النظام (P_{th}) بأنها الحد الأقصى المتاح لمستوى الدلالة الخاص بكل معلم نظام. وستعتمد عتبة الاحتمال على سيناريو تشغيل الشبكة وعلى علاقة التسوية بين احتمال تجاوز القيمة والتكلفة.

ويتعين الإشارة إلى أنه بالنسبة لبعض المعلمات التي تمت مراعاتها هنا، تشير عتبة احتمال قبول النظام P_{th} إلى احتمال تجاوز القيمة المحددة لدى تفعيل الوصلة. ففي حالة التشتت اللوني، على سبيل المثال، تدل عتبة احتمال قبول النظام P_{th} ذات القيمة 10^{-3} إلى أنه من المتوقع، بمتوسط واحد من ألف، أن تتجاوز الوصلات التشتت المحدد لها عندما يتم تفعيل الوصلة. أما بالنسبة

للمعلمات الأخرى، تشير عتبة احتمال قبول النظام P_{th} إلى احتمال تجاوز القيمة في أي وقت معين من عمر الوصلة. والمثال على هذا الأمر هو التشتت بأسلوب الاستقطاب PMD حيث تدل عتبة احتمال قبول النظام P_{th} ذات القيمة 10^{-5} على أنه، في أية لحظة، يكون احتمال تجاوز الحد الأقصى للمهلة الزمنية لانتشار المجموعة التفاضلية DGD هو واحد من كل مئة ألف.

ويحتوي الجدول 10-2 على بعض أمثلة قيم عتبة احتمال قبول النظام P_{th} مع القيم المقابلة لها لعدد الانحرافات القياسية دون المتوسط والمتعلقة بالإحصاءات الغوسية وأيضاً المقابل لها المتمثل في نسبة الحد الأقصى إلى المتوسط والخاص بتوزيع ماكسويل (Maxwell) الذي يتسم بتشتت أسلوب الاستقطاب (PMD).

الجدول 10-2 – عتبة احتمال قبول النظام

عتبة احتمال قبول النظام P_{th}	الإحصاءات الغوسية الانحراف القياسي دون المتوسط [σ]	توزيع ماكسويل: نسبة الحد الأقصى إلى المتوسط [S]
10^{-3}	3,1	2,5
10^{-5}	4,3	3,2
10^{-7}	5,2	3,7
10^{-9}	6,0	4,2

3.1.10 تصميم مخطط انسيابي

إن المخطط الانسيابي العام مصوَّرٌ في الشكل 10-1 على يسار الصفحة. وهنالك أيضاً مثال عن الحد الأقصى للتشتت اللوني موضّح في الشكل 10-1 على يمين الصفحة.

1) *اختر معامل النظام الواجب تحديده.*

في المثال الواضح في الشكل 10-1، معامل النظام هو في حده الأقصى من التشتت اللوني.

2) *احصل على دالة توزيع الاحتمالات لمعلمات العنصر التي تقابلها*

كما نلاحظ في المخطط الدرجي في الإطار الثاني على يمين الصفحة في الشكل 10-1، فإن معامل متوسط التشتت لمنتوج الألياف i هو D_i افتراضاً والانحراف القياسي هو σ_i.

3) *احتسب دالة توزيع الاحتمالات لمعامل النظام p(x) في ظروف معينة.*

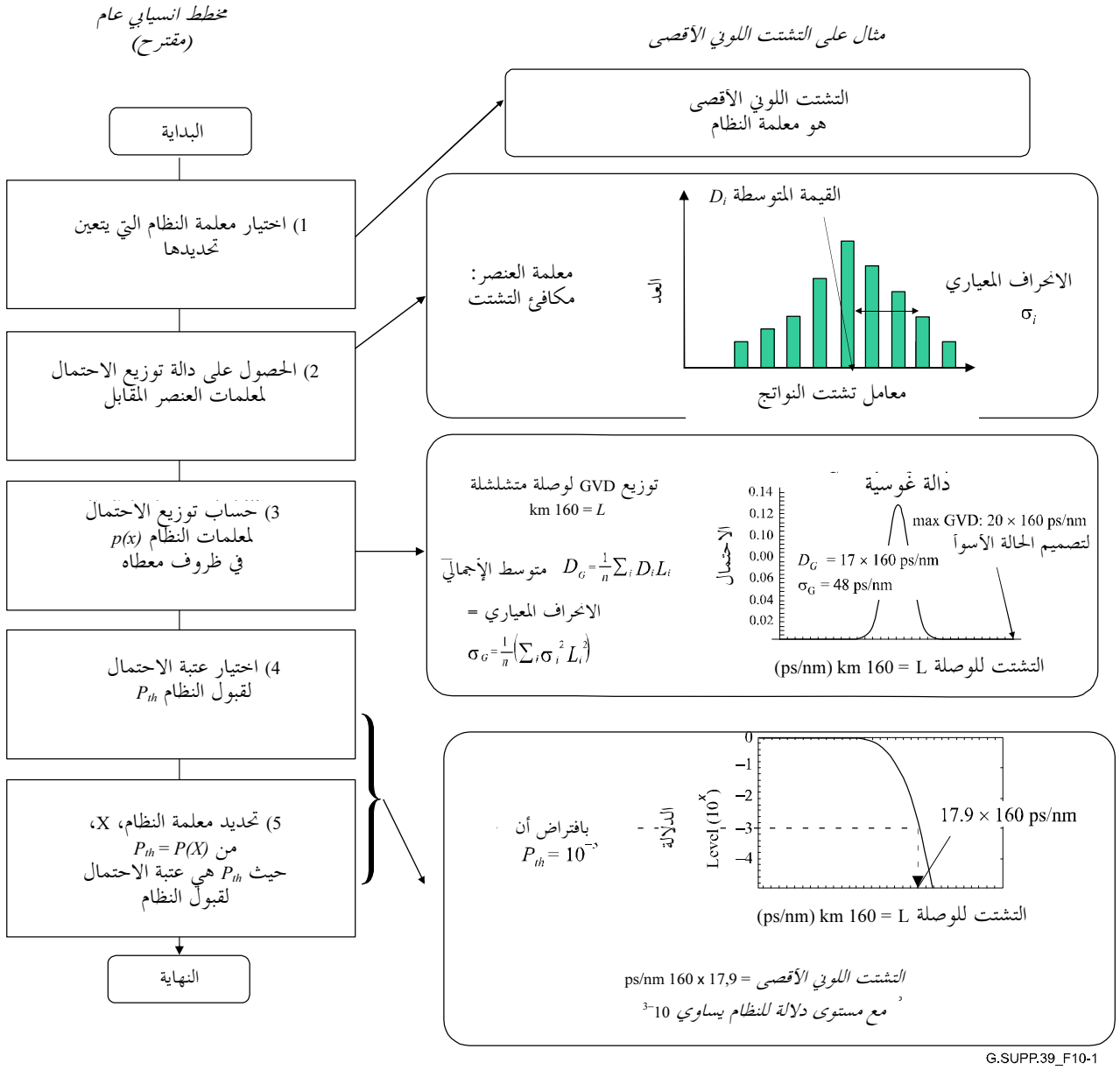
الظرف المعين في هذا المثال هو طول وصلة الليفة والذي يبلغ 160 km. ويتم الحصول على التوزيع الإحصائي لمعلم النظام مع تسلسل توزيع العديد من بكرات الألياف. ولتوزيع الوصلات المتسلسلة مظهر جانبي غوسي وفقاً لنظرية الحد المركزي. وفي هذا المثال، فإن المتوسط الكلي للتشتت اللوني هو 17 × 160 = 2720 ps/nm، بينما يكون الانحراف القياسي 48 ps/nm. ومن الجدير ملاحظة أن الحد الأقصى للتشتت اللوني يبلغ 20 × 160 = 3200 ps/nm وذلك باستخدام التصميم الاعتيادي لأسوأ حالة.

4) *اختر قيمة لعتبة احتمال قبول النظام، P_{th}*

وفي هذا المثال، يعد وجود وصلة واحدة في كل ألف وصلة تتسم بتشتت أعلى من القيمة المحتسبة أمراً مقبولاً. (P_{th} هي 10^{-3}).

5) *حدد معامل النظام X من المعادلة التالية $P_{th} = P(X)$ حيث إن P_{th} هو عتبة احتمال قبول النظام*

وفي هذا المثال، يتبين أن الحد الأقصى للتشتت اللوني هو 17,9 × 160 = 2864 ps/nm على افتراض أن P_{th} هو 10^{-3}. ولهذا فإن متطلب التشتت الخاص بالنظام المرسِل يرتخي عند 336 ps/nm بالمقارنة مع تصميم نظام أسوأ حالة.



الشكل 10-1 – مخطط انسيابي عام ومثال عن الحد الأقصى للتشتت اللوني

2.10 التصميم الإحصائي للخسارة

عادة ما تحتوي الوصلة المتسلسلة على عدد من أطوال الصنع المتراكبة لكبل بليف بصري. إن متطلبات أطوال الصنع منصوص عليها في التوصيات المتعلقة بالليف البصري والكبل. وينبغي لمعلمات الإرسال الخاصة بالوصلات المتسلسلة ألاّ تأخذ في الحسبان أطوال فرادى الكبلات فقط بل إحصاءات التسلسل أيضاً.

وستحتوي خصائص الإرسال لكبلات الألياف البصرية بأطوال الصنع على شيء من توزيع الاحتمالات الذي غالباً ما يحتاج إلى مراعاة حتى يمكن التوصل إلى أكثر التصميمات نجاعة من الوجهة الاقتصادية. ويتعين قراءة ما يلي من الفقرات في هذا البند مع مراعاة هذه الطبيعة الإحصائية لمختلف المعلمات.

تتأثر نعوت الوصلات بعوامل أخرى غير كبلات الألياف البصرية، منها أجزاء الوصلات، ومعدات التوصيل، والتركيب. ولأغراض تقدير قيم نعوت الوصلات، سترد القيم النمطية لوصلات الألياف البصرية في تذييل خاص بالتوصيات المتعلقة بالكبلات والألياف. كما ترتكز أساليب تقدير المعلمات الخاصة بتصميم النظام على القياسات أو النمذجة أو اعتبارات أخرى.

توضح الصيغة التالية التوهين A لوصلة:

$$A = \alpha L + \alpha_s x + \alpha_c y \quad (1\text{-}10)$$

حيث:

α المعامل النمطي للتوهين لكبلات الألياف في وصلة؛

α_s متوسط خسارة الجدالة؛

x عدد الجدالات في وصلة؛

α_c متوسط الخسارة الناتجة عن واصلات الخط؛

y عدد واصلات الخط في وصلة (في حالة وجودها)؛

L طول الوصلة.

وينبغي تخصيص هامش ملائم بالتعديلات التي يمكن إدخالها مستقبلاً على تشكيلات الكبل (جدالات إضافية، أطوال كبل زائدة، آثار التقادم، تغيرات درجة الحرارة، وما إلى ذلك). وتتعلق القيم النمطية الواردة في تذييل خاص بالتوصيات المتعلقة بالكبلات والألياف، بمعامل توهين وصلات الألياف البصرية.

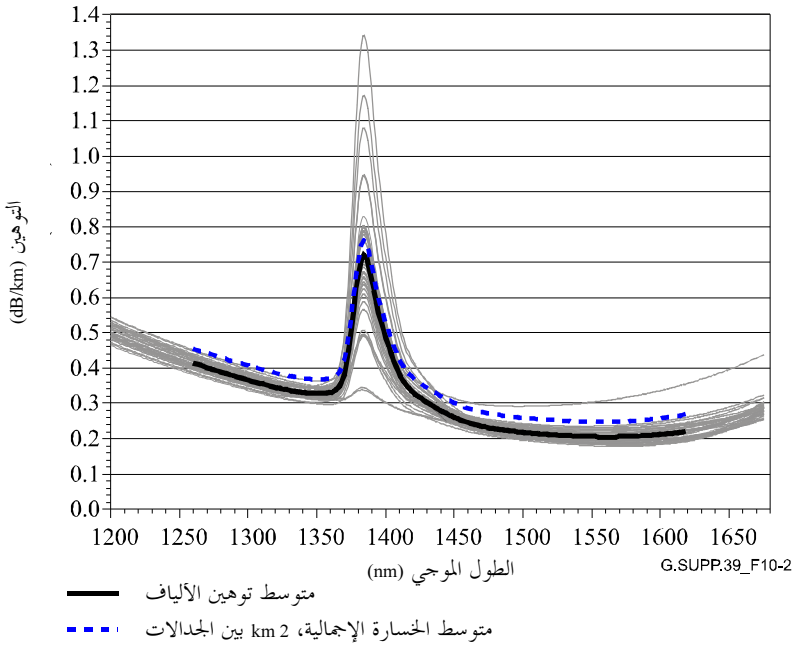
وتفضي هذه التركيبة من مساهِمات التوهين في علاقتها مع الحد الأقصى لقيمة توهين النظام إلى إحداث تغييرات في طول المدى. ولطول المدى قيمة حددتها توصيات قطاع تقييس الاتصالات من قبيل التوصيتين G.957 وG.691. ولكن من الممكن تجاوزها لدرجة يصبح معها هذا الطول محدوداً بالتشتت اللوني.

ويختلف المعامل النمطي للتوهين لكبلات الألياف α باختلاف طول الموجة λ ويعزى ذلك إلى العديد من العوامل: انتثار ريلي Rayleigh وامتصاص الماء وخسارة الانحناء الكلي وخسارة الانحناء الجزئي. وبالنسبة للكبلات المصممة تصميماً جيداً، يعد تغيُّر خسارة الأنحاء بتغيُّر طول الموجة أمراً لا يُذكر ولكنه عموماً ما يزداد مع ازدياد أطوال الموجات فوق 1550 nm. وعلى أية حال، يمكن أن يؤدي أثر الانحناء الجزئي في بعض الكبلات إلى توهين مرتفع عند بلوغ أطوال موجات أعلى وهذا ما يُطلق عليه زاوية الانحناء. ويكون انتثار ريلي Rayleigh الوارد في G.652 المتعلقة بالألياف موحداً من حيث المزودين ومدة التصنيع ويتبع علاقة $1/\lambda^4$.

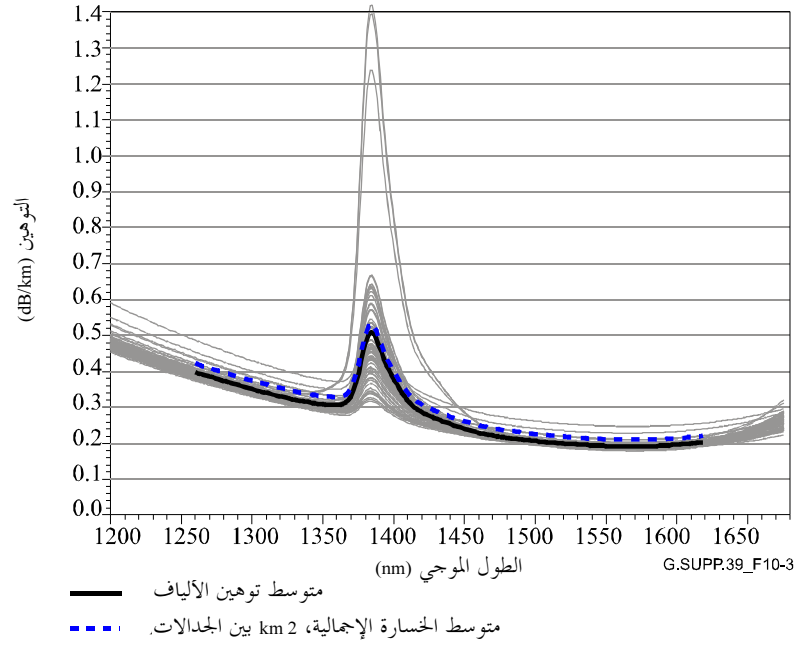
وتقترب ذروة طول موجة امتصاص الماء من 1383 nm ويمكن وصفها نوعاً بأنها قيمة هائلة مضاعفة بمنحنى مميز حول 1383 nm. قد تتأثر هذه الذروة أيضاً من جراء تعرضها للهيدروجين وحساسية هيدروجين الألياف. وقد تعلم مصنعو الألياف مع مرور الزمن الحد من مكونات امتصاص الماء ومن حساسية الهيدروجين.G.652 على فئتين: G.652.C وG.652.D يجب بمقتضاهما أن يكون معامل توهين ذروة الماء بالاقتران مع تقادم الهيدروجين أقل من الحد الأقصى من القيمة المحددة لشريحة تتراوح من 1310 nm إلى 1625 nm أو مساو له.

وأثناء إعداد التوصية ITU-T G.695، تميز التوهين الكلي للوصلة مقابل طول الموجة بقيم تم قياسها عند 1550 nm بالاقتران مع منحنى حدي مقابل طول الموجة. وتم اعتبار المنحنى الحدي على أنه ثابت وأُخذ التغير في القيم عند 1550 nm في الاعتبار هذه العوامل من قبيل نوعية وتردد أجزاء الوصلة/معدات التوصيل بالإضافة إلى التغيرات في التوهين الكلي لكبلات الألياف. ونتج هذا النوع من النُهج التذييل G.695/1.I الذي يحتوي على جدول بقيم معاملات التوهين استخدمت بدورها لوصل مستويات القدرة بالأطوال المستهدفة في هذه التوصية.

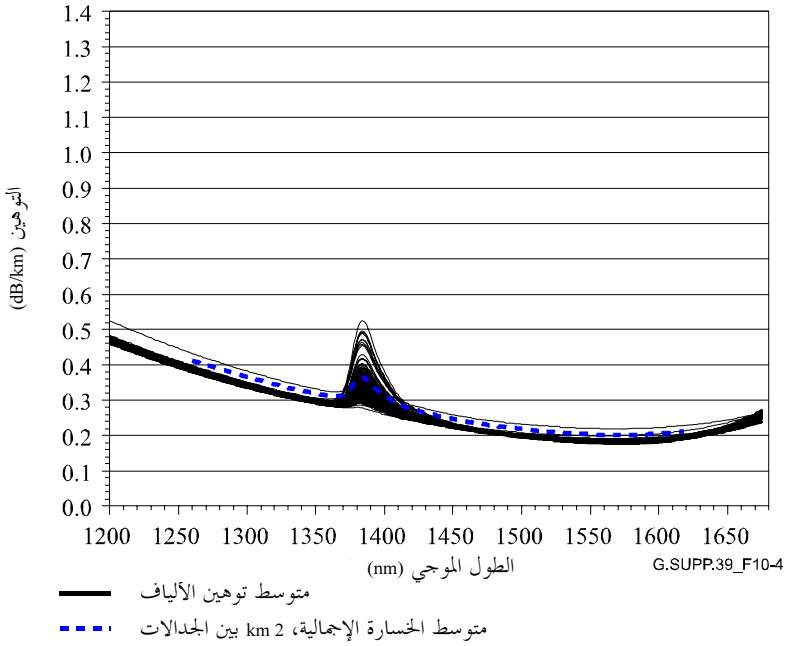
وتُبرز ما يلي من أمثلة استندت، باستخدام مقياس الانعكاس، إلى قياس وصلة الشبكة المركزية لمشغل شبكة واحد، التحسينات في امتصاص الماء على مر الزمن.



الشكل 10-2 – توهين ألياف مقيس وخسارة الجدالة في التوصية G.652 A&B المتعلقة بالكبل – تم تركيب الكبلات قبل 1990



الشكل 10-3 – توهين ألياف مقيس وخسارة الجدالة في التوصية G.652 A&B المتعلقة بالكبل– تم تركيب الكبلات بحلول 2000



الشكل 10-4 – توهين ألياف مقيس وخسارة الجدالة في التوصية G.652 A&B المتعلقة بالكبل– تم تركيب الكبلات في 2003

يلخص الجدول 10-3 إحصاءات قناة تعدد إرسال بتقاسم تقريبي لطول الموجات (CWDM) وقد تم استخلاص هذه الإحصاءات من المقاييس المبينة أعلاه.

الجدول 10-3 – إحصاءات معامل توهين الشبكة المركزية

كبلات رُكِّبت في 2003				كبلات رُكِّبت بحلول 2000				كبلات رُكِّبت قبل 1990				مركز طول موجة CWDM (nm)
خسارة الجدالة – 2 km بين الجدالات (dB/km)		توهين الألياف (dB/km)		خسارة الجدالة – 2 km بين الجدالات (dB/km)		توهين الألياف (dB/km)		خسارة الجدالة – 2 km بين الجدالات (dB/km)		توهين الألياف (dB/km)		
Stdv	Ave	Stdv	Ave	Stdv	Ave	Stdv	Ave	Stdv	Ave	Stdv	Ave	
0,025	0,025	0,005	0,382	0,025	0,025	0,018	0,392	0,037	0,041	0,017	0,408	**1271**
0,024	0,024	0,005	0,359	0,024	0,024	0,017	0,368	0,036	0,041	0,016	0,384	**1291**
0,024	0,024	0,004	0,337	0,024	0,024	0,016	0,346	0,036	0,041	0,015	0,368	**1311**
0,024	0,024	0,004	0,317	0,024	0,024	0,015	0,326	0,035	0,041	0,015	0,341	**1331**
0,023	0,023	0,004	0,291	0,023	0,023	0,019	0,307	0,034	0,041	0,015	0,329	**1351**
0,023	0,023	0,026	0,323	0,023	0,023	0,137	0,439	0,034	0,041	0,127	0,586	**1371**
0,022	0,022	0,041	0,342	0,022	0,022	0,210	0,509	0,033	0,041	0,197	0,720	**1391**
0,022	0,022	0,016	0,280	0,022	0,022	0,082	0,348	0,033	0,041	0,074	0,436	**1411**
0,022	0,022	0,006	0,248	0,022	0,022	0,033	0,277	0,032	0,041	0,028	0,316	**1431**
0,021	0,021	0,004	0,230	0,021	0,021	0,018	0,246	0,031	0,041	0,017	0,269	**1451**
0,021	0,021	0,003	0,216	0,021	0,021	0,012	0,226	0,030	0,041	0,015	0,240	**1471**
0,021	0,021	0,003	0,205	0,021	0,021	0,012	0,213	0,030	0,041	0,017	0,225	**1491**
0,020	0,020	0,003	0,197	0,020	0,020	0,010	0,204	0,029	0,041	0,018	0,216	**1511**
0,020	0,020	0,003	0,191	0,020	0,020	0,010	0,198	0,028	0,041	0,020	0,210	**1531**
0,019	0,019	0,003	0,186	0,019	0,019	0,010	0,194	0,028	0,042	0,022	0,207	**1551**
0,019	0,019	0,004	0,184	0,019	0,019	0,010	0,192	0,029	0,043	0,025	0,206	**1571**

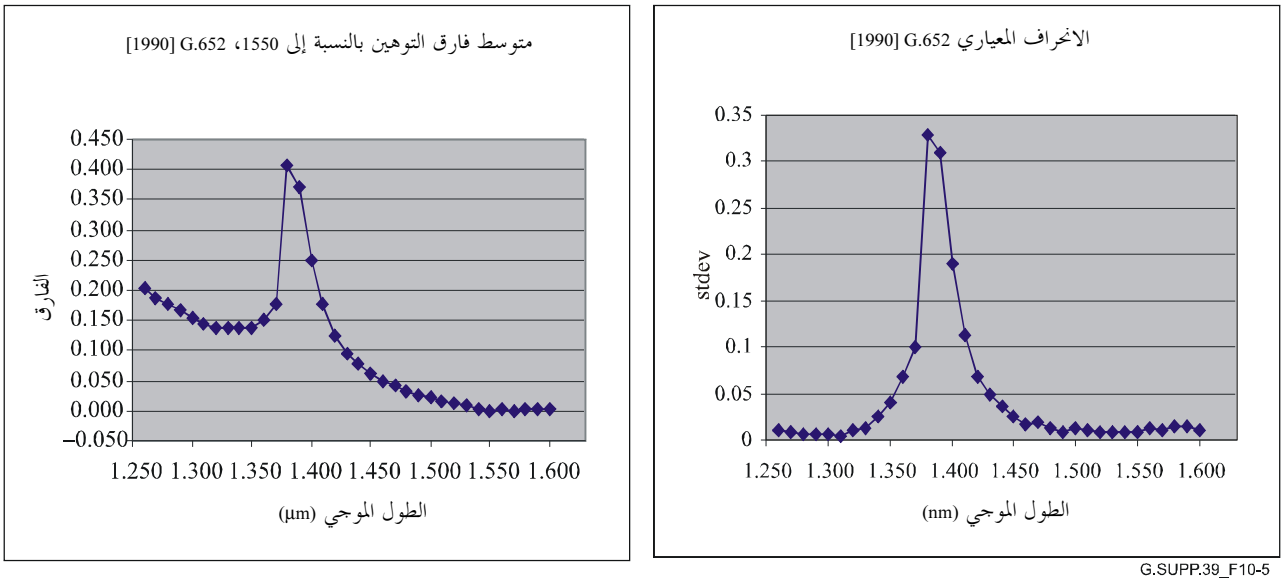
الجدول 10-3 – إحصاءات معامل توهين الشبكة المركزية

مركز طول موجة CWDM (nm)	كبلات رُكِّبت قبل 1990				كبلات رُكِّبت بحلول 2000				كبلات رُكِّبت في 2003			
	توهين الألياف (dB/km)		خسارة الجدالة – 2 km بين الجدالات (dB/km)		توهين الألياف (dB/km)		خسارة الجدالة – 2 km بين الجدالات (dB/km)		توهين الألياف (dB/km)		خسارة الجدالة – 2 km بين الجدالات (dB/km)	
	Ave	Stdv	Ave	Stdv	Ave	Stdv	Ave	Stdv	Ave	Stdv	Ave	Stdv
1591	0,211	0,027	0,045	0,032	0,195	0,010	0,018	0,018	0,187	0,004	0,018	0,018
1611	0,220	0,028	0,049	0,034	0,203	0,010	0,018	0,018	0,194	0,004	0,018	0,018

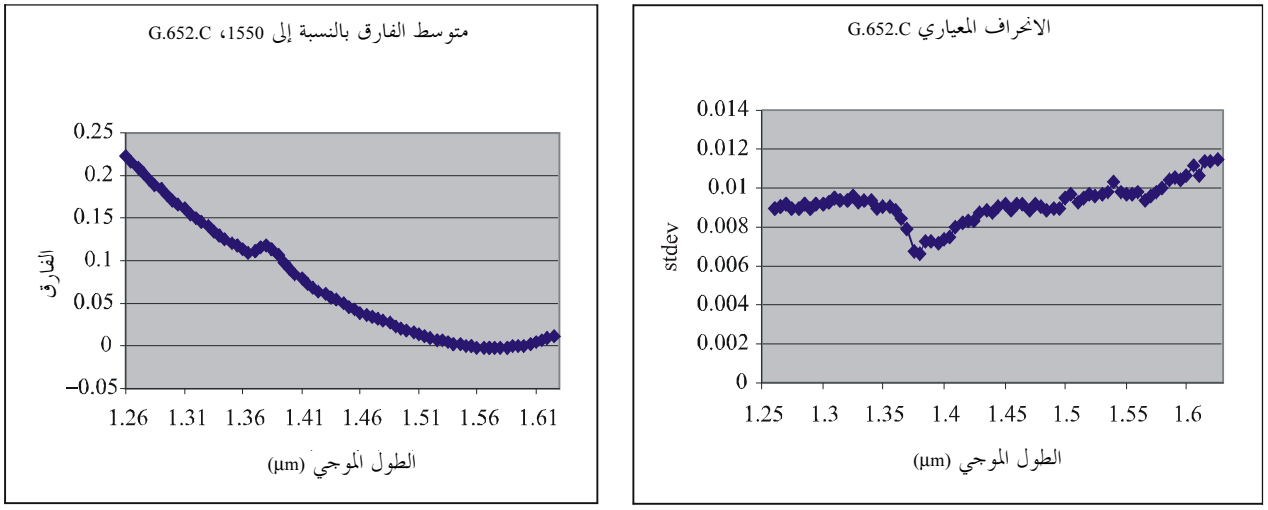
الملاحظة 1 – تستخدم أعلى قيمة أثناء كل فاصل، طول الموجة المركزية ±6,5 nm.

الملاحظة 2 – أطوال الموجات الست لمقياس انعكاس المجال الزمني البصري هي: 1241 nm و1310 nm و1383 nm و1550 nm و1625 nm و1642 nm.

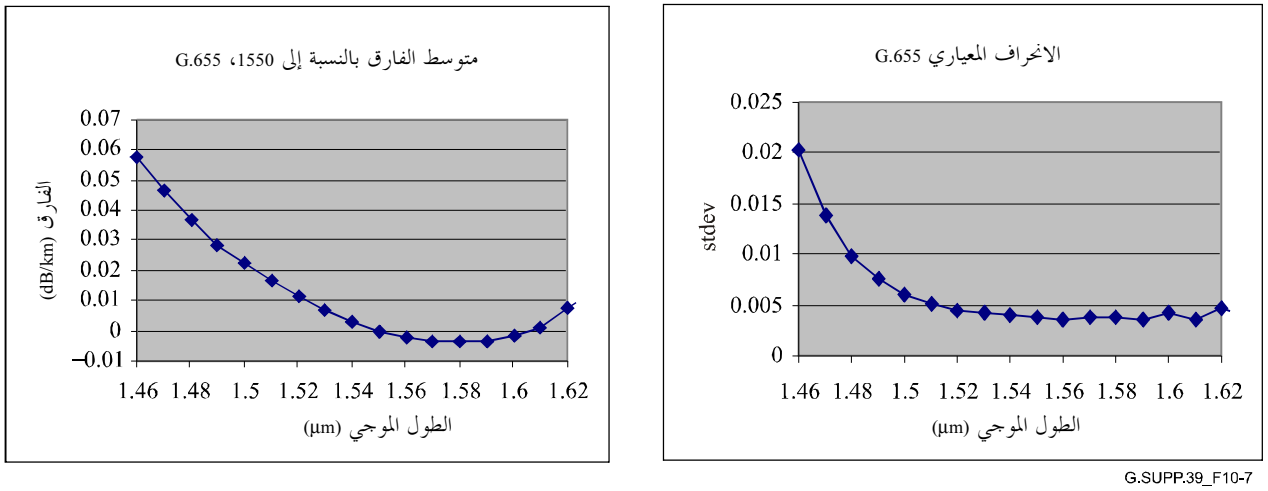
تمثل الأشكال التالية الاختبار الذي أجراه أحد مصنعي الألياف على تغير معامل التوهين بتغير طول الموجة بوصفه مختلفاً عن القيمة الناتجة عند 1550 nm. وقد استخدمت هذه القيم في إعداد التوصية ITU-T G.695.



الشكل 10-5 – الانحراف المتوسط والقياسي للفارق في معامل التوهين من 1550 nm – G.652 حوالي عام 1990



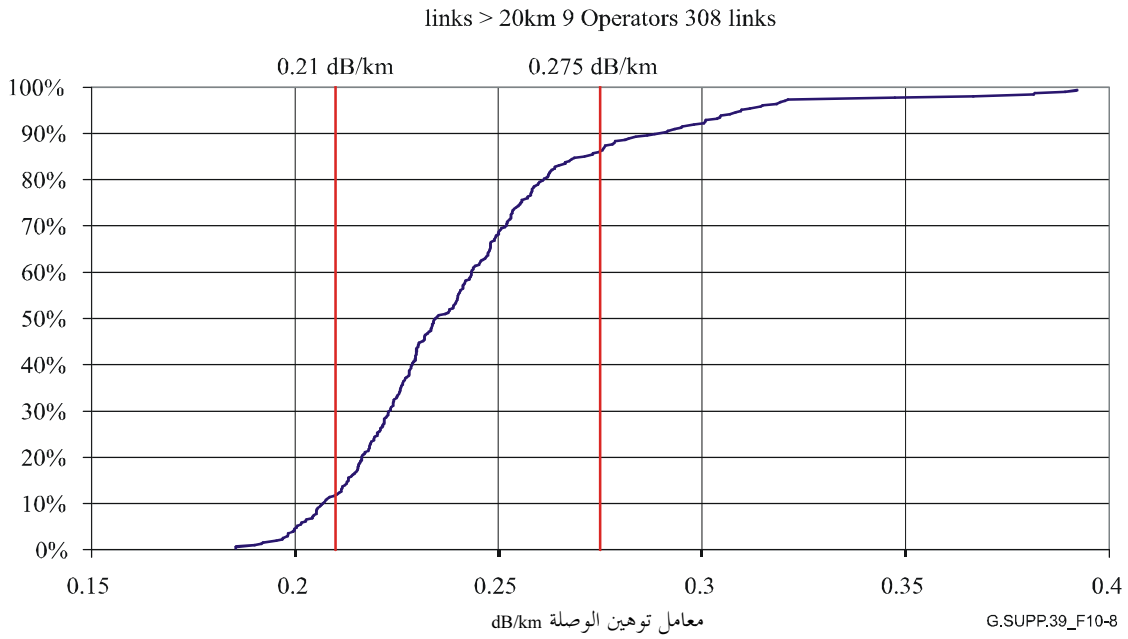
الشكل 10-6 – الانحراف المتوسط والقياسي للفارق في معامل التوهين من 1550 nm – G.652.C



الشكل 10-7 – الانحراف المتوسط والقياسي للفارق في معامل التوهين من 1550 nm – G.655

أثناء إعداد التوصية ITU-T G.695، خضعت قيم معامل التوهين للوصلة عند 1550 nm والتي تم الحصول عليها من الشبكات المركزية في الولايات المتحدة، إلى دراسة وتم استبقاء القيم الأساسية 0,275 dB/km بسبب شكوك حول معلومات ترتبط بخسارة الجدالة المتعلقة بشبكات المترو.

يبرز الشكل 10-8 اختبار قام به أحد مزودي الشبكات على مقاييس 308 وصلة في 9 مشغلي شبكات في مضمار المترو حيث تجاوز طول الوصلة 20 km. وتدعم هذه المقاييس التي جرت ما بين عامي 2003 و2005 القيم المنصوص عليها في التوصية ITU-T G.695 الخاصة بهذا المضمار.



الشكل 8.10 – احتمال الخسارة الحاصلة مقابل معامل توهين وصلة 1550 nm لوصلات > 20 km

3.10 التصميم الإحصائي للتشتت اللوني

1.3.10 معلومات ضرورية

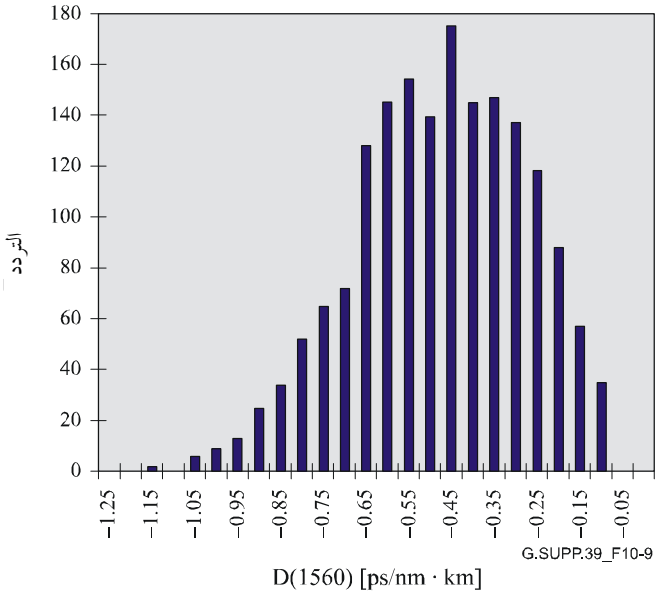
عند تركيب عدة مكونات أو ألياف يشكل التشتت اللوني لهذه التركيبة مجموع قيم التشتت اللوني فرادى على أساس طول كل موجة على حدة. وسيعتمد التغير في التشتت الإجمالي للوصلات على توزيع المنتوجات المستخدمة في الوصلات.

ملاحظة – ثمة أمثلة حول أنواع معينة من الألياف والمكونات فيما يلي من بنود، وهذه الأمثلة ليست بالضرورة تمثيلاً واسع النطاق.

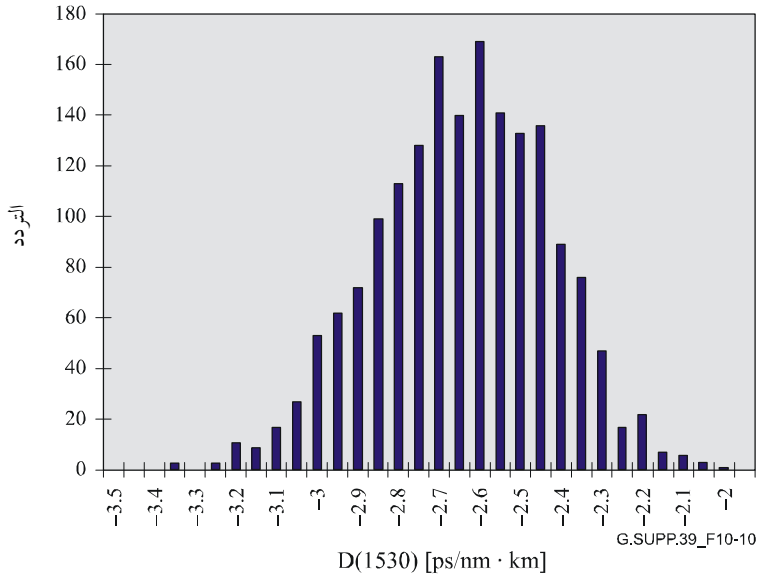
ويقاس معامل التشتت اللوني للألياف $D(\lambda)$ كإحدى وظائف طول الموجة λ بطرائق أبرزها التوصية ITU-T G.650.1، *تعاريف وطرائق اختبار النعوت الخطية المحددة للألياف والكبلات أحادية الأسلوب*. غالباً ما تُمثل شريحة معينة من أطوال الموجات على أنها صيغة تنطوي على معلمات يمكن أن تختلف باختلاف الألياف مع مراعاة تصميم معين من الألياف. وهنالك بعض الصيغ التي وردت في التوصية ITU-T G.650.1 والوحدات المشتركة هي ps/nm·km. أما بالنسبة للمكونات، فهنالك أنماط مشابهة من التعبيرات يمكن استخدامها لوصف التشتت اللوني $CD(\lambda)$ في ps/nm.

2.3.10 إحصاءات معامل التشتت اللوني

إن المنهج الوصفي الملائم لإحصاءات التسلسل الخاصة بتوزيع أحادي الأسلوب أو بتركيبة من التوزيعات، يكمن في احتساب معامل التشتت لكل من أطوال الموجات ضمن نطاق استخدامها – لكل شريحة مفردة من الألياف. وهذا يفضي إلى توزيع قيم معامل التشتت الخاصة بطول كل موجة على حدة. يظهر الشكلان 10-9 و10-10 التوزيعات بالنسبة لألياف من النمط الوارد في G.655 عند طولي موجتين تم اختيارهما.

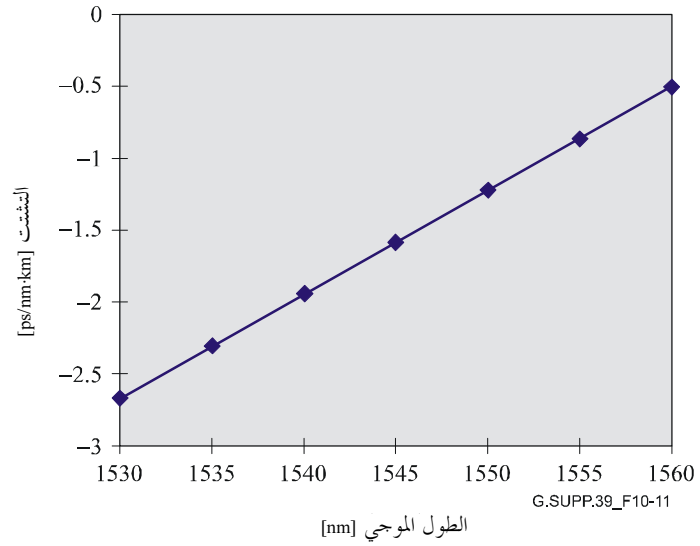


الشكل 10-9 – مخطط دَرجي لقيم معامل التشتت عند 1560 nm

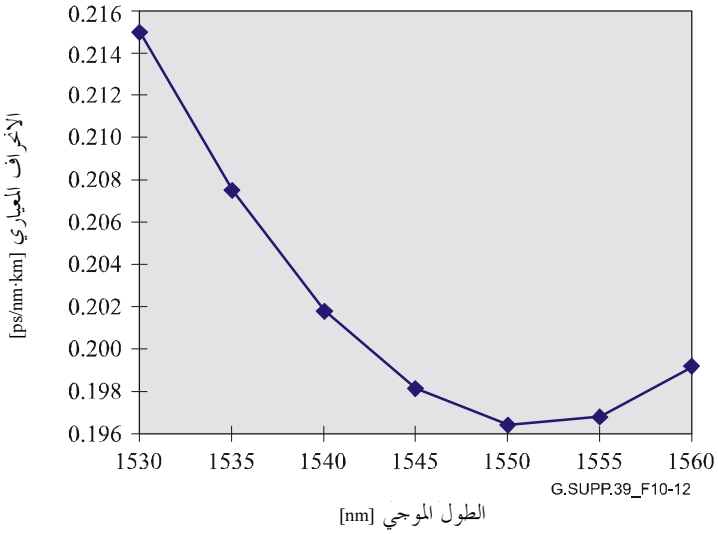


الشكل 10-10 – مخطط دَرجي لقيم معامل التشتت عند 1530 nm

يتسم توزيع كل طول موجة بقيمة انحراف متوسطة وقياسية كما يظهر في الشكلان 10-11 و10-12.



الشكل 10-11 – متوسط معامل التشتت مقابل طول الموجة



الشكل 10-12 – الانحراف القياسي لمعامل التشتت مقابل طول الموجة

لاحظ أن العلاقة الخطية تمثل المتوسط وأن العلاقة الرباعية تمثل الانحراف القياسي. ويعزى هذا في جزء منه إلى التمثيل الخطي لمعامل التشتت مع طول الموجة. ويمكن من وجهة نظر بحثية مطابقة المعطيات الواردة في الشكلين 10-11 و10-12 للحصول على صيغ مقابل طول الموجة، λ، (nm):

$$\mu(\lambda) = 0.072(\lambda - 1567) \qquad (\text{ps/nm} \cdot \text{km}) \tag{2a-10}$$

$$\sigma(\lambda) = 0.1964 + 3.97 \times 10^{-5}(\lambda - 1551.6)^2 \qquad (\text{ps/nm} \cdot \text{km}) \tag{2b-10}$$

حيث إن μ متوسط الانحراف وσ الانحراف القياسي.

3.3.10 الإحصاءات التسلسلية لعائلة واحدة من الألياف البصرية

تستند هذه الإحصاءات إلى افتراضات غوسية. وتحتسب هذه الأمثلة عند مستوى "3 سيغما" من P_{th} (عتبة احتمال قبول النظام) بنسبة 0,13% فوق الحدود وأدناها. ويمكن انتقاء مستويات أخرى من الاحتمالات.

وعلى افتراض أن الأطوال متساوية، فإن معامل تشتت تسلسل الألياف هو متوسط معامل تشتت الألياف المفردة:

$$\overline{D}(\lambda)=\frac{1}{n}\sum_{i}D(\lambda)_i \tag{3-10}$$

وباستخدام نظرية الحد المركزي، فإن هذه المتوسطات يمكن أن تختلف بخصوص المتوسط الأعظمي وفقاً للتوزيع العشوائي الغوسي. وباستخدام حد احتمال ثابت يحتوي على 99,7% من التوزيع (0,13% في الأعلى و0,13% في الأسفل) يصبح حد قيم معامل التشتت للوصلة، D_{Tot}، على الشكل التالي:

$$D_{Tot}(\lambda)=\mu(\lambda)\pm\frac{3}{\sqrt{n}}\sigma(\lambda) \tag{4a-10}$$

وعلى افتراض وجود قيمة تقليدية لـــ n تقترن مع الحد الأقصى لطول مقطع الليفة داخل وصلة L_{Tot}، تكتب المعادلة على الشكل التالي:

$$D_{Tot}(\lambda)=\mu(\lambda)\pm 3\left(\frac{L_{Seg}}{L_{Tot}}\right)^{1/2}\sigma(\lambda) \tag{4b-10}$$

إن الحدود المفروضة على قيمة تشتت الوصلة، CD_{Tot}، هي ذاتها حدود قيم معامل التشتت للوصلة مضروبة بطول الوصلة:

$$CD_{Tot}(\lambda)=L_{Tot}\mu(\lambda)\pm 3\left(L_{Seg}L_{Tot}\right)^{1/2}\sigma(\lambda) \tag{5-10}$$

يظهر الجدول 10-4 القيم المحتسبة لعائلة القسم السابق لطول وصلة مفترض مقداره 120 km وطول مقطع مفترض مقداره 5 km. وفعلياً، فإن هذه القيم أدنى من قيمة –420 ps/nm والتي تُستنتج من مواصفات أسوأ حالة.

الجدول 10-4

طول الموجة	CD_{min}	CD_{max}
nm 1530	ps/nm 336–	ps/nm 304–
nm 1540	ps/nm 249–	ps/nm 219–

إذا استند التوزيع إلى مقاييس الأقسام الفرعية للوصلات المركبة، استبدل الطول L_{Seg} بطول الأقسام الفرعية التي تم قياسها أو بقيمة أكبر تمثل طول أطول قطاع فرعي في الوصلة.

4,3,10 الإحصاءات التسلسلية لعدة عائلات من الألياف البصرية بما في ذلك المكونات

تزداد قيمة الترميز من خلال وضع المؤشر أدنى وظائف الانحراف المتوسط والقياسي مع إضافة *I*، *II*، وما إلى ذلك، ناهيك عن إضافة $L_{I\text{-}Tot}$ على سبيل المثال لإسهام طول الوصلة لليفة ذات النمط I وn_A لعدد المكونات ذات النمط A.

وتستكمل حدود الاحتمال باقتران حد الاحتمال مع الانحراف الغوسي $\pm 3\sigma$ إلا أن المعادلات تنقسم إلى "قسم المتوسط" وقسم "الانحراف القياسي" قبل اقترانهما سوياً. ويكون متوسط التشتت:

$$\mu\{[CD_{Tot}(\lambda)]\}=L_{I-Tot}\mu_I(\lambda)+L_{II-Tot}\mu_{II}(\lambda)+n_A\mu_A(\lambda)+n_B\mu_B(\lambda) \tag{6a-10}$$

والانحراف القياسي لمجمل التشتت هو:

$$\sigma\{[CD_{Tot}(\lambda)]\}=\left[L_{I-Seg}L_{I-Tot}\sigma_I^2(\lambda)+L_{II-Seg}L_{II-Tot}\sigma_{II}^2(\lambda)+n_A\sigma_A^2(\lambda)+n_B\sigma_B^2(\lambda)\right]^{1/2} \tag{6b-10}$$

وتصبح الحدود عندها:

$$CD_{Tot}(\lambda) = \mu[CD_{Tot}(\lambda)] \pm 3\sigma[CD_{Tot}(\lambda)] \quad (6c\text{-}10)$$

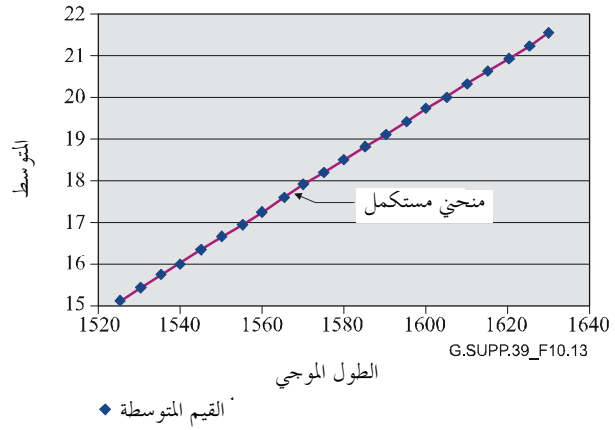
ويمكن الحصول على مزيد من أنماط المكونات أو الألياف مع إجراء توسع بسيط بالصيغ المذكورة أعلاه.

لاحظ أن هذه الصيغ تمثل الموقف بطريقة تدفع المرء إلى الاستنتاج بأن جميع المعوضات يمكن أن تكون مشتركة في الموقع. وعلى العموم، هذا الأمر لم يحدث. وتتوزع المعوضات بشكل طبيعي للحد من أقصى تشتت محلي على طول الوصلة.

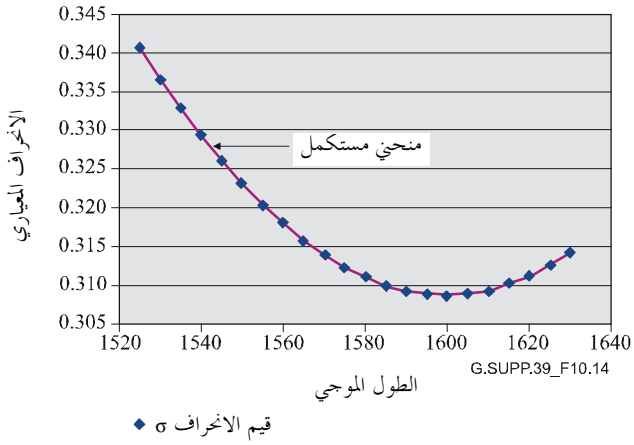
هذه الصيغ موضحة بخصوص تركيبة من توزيع يرد في التوصية G.652 والمتعلقة بالألياف وبتوزيع مكونات تعويض التشتت كما هو محدد في التوصية ITU-T G.671 وتكون المعلمات المفترضة للوصلة:

$$L_{Tot} = 400\,\text{km}, \quad L_{Seg} = 10\,\text{km}, \quad n_{DC} = 5$$

ويظهر الشكلان 10-13 و10-14 إحصاءات الألياف لمعامل التشتت اللوني (ps/nm·km) مقابل طول الموجة (nm).



الشكل 10-13 – متوسط معامل التشتت اللوني للتوصية G.652 المتعلقة بالألياف



الشكل 10-14 – الانحراف القياسي لمعامل التشتت اللوني للتوصية G.652 المتعلقة بالألياف

وفيما يلي صيغة الخط البياني في الشكل 10-13:

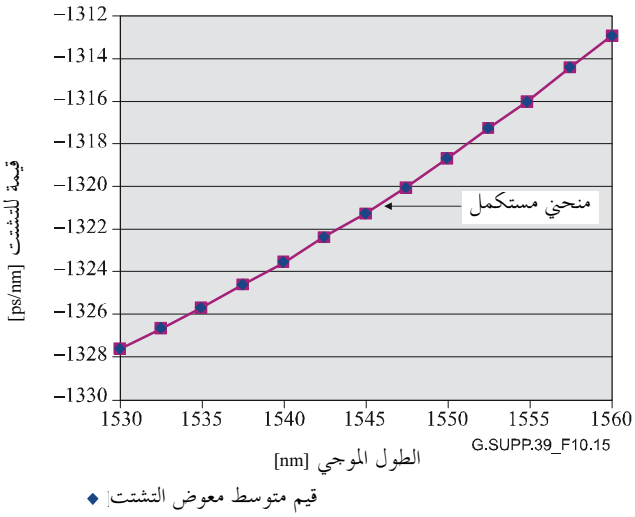
$$\mu(\lambda) = -77.403 + 0.0607 \times \lambda \qquad (\text{ps/nm} \cdot \text{km}) \quad (7a\text{-}10)$$

حيث λ محسوبة بـــ nm.

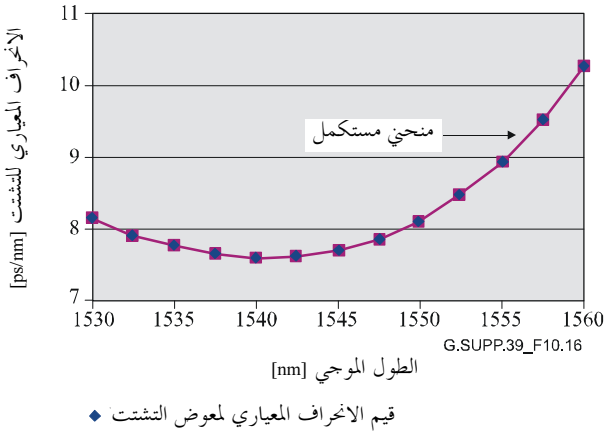
وفيما يلي صيغة المنحني البياني في الشكل 10-14:

$$\sigma(\lambda) = 15.013 - 18.384 \times 10^{-3} \times \lambda + 5.746 \times 10^{-6} \times \lambda^2 \quad (ps/nm \cdot km) \tag{7b-10}$$

ويظهر الشكلان 10-15 و10-16 إحصاءات تعويض التشتت.



الشكل 10-15 – قيم متوسط معوض التشتت



الشكل 10-16 – قيم الانحراف القياسي لمعوض التشتت

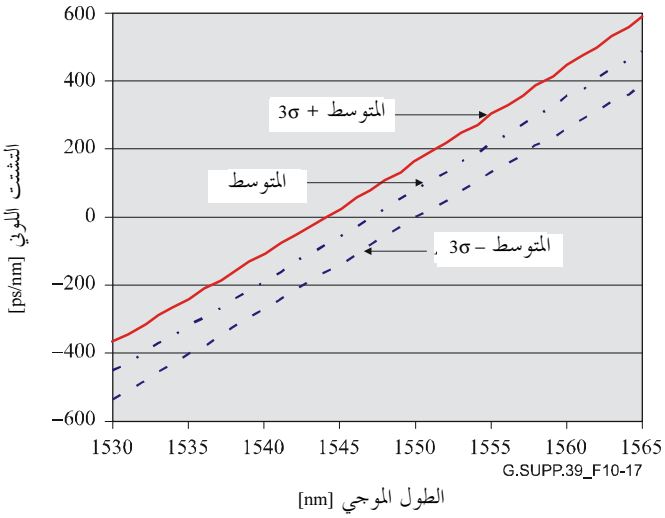
وفيما يلي صيغة المنحني البياني في الشكل 10-15:

$$\mu(\lambda) = 8.010 \times 10^3 - 12.5698 \times \lambda + 4.227 \times 10^{-3} \times \lambda^2 \quad (ps/nm) \tag{8a-10}$$

وفيما يلي صيغة المنحني البياني في الشكل 10-16:

$$\sigma(\lambda) = -3.4612 \times 10^5 + 6.824 \times 10^2 \times \lambda - 0.4484 \times \lambda^2 + 9.818 \times 10^{-5} \times \lambda^3 \quad (ps/nm) \tag{8b-10}$$

إن الجمع بين هذه الإحصاءات وفقاً لصيغ التساوي 10-6a و10-6b و10-6c واستخدام الافتراضات المتعلقة بالوصلة (400 km من الألياف و10 km من المقاطع و5 معوضات تشتت) يفضي إلى النتائج الواردة في الشكل 10-17. لاحظ وجود الشريحة الأصغر من شريحتي صفات طول الموجة. ورغم أن شريحة الليفة أوسع، إلا أن الشريحة المحددة للمعوض ليست على هذا القدر من السعة.



الشكل 10-17 – حدود 3σ للتوصية G.652 التي تجمع بين الليفة والمعوضات

بالنسبة لإشارة C-band (1530 nm إلى 1565 nm) يكون التشتت اللوني لهذه الوصلة المعوضة ±600 ps/nm. في التوصية ITU-T G.691، يكون حد الإرسال ذو القيمة 10 Gbit/s بخصوص التشتت اللوني دون غيره محدد بمقدار 1000 ps/nm تقريباً للمرسلات والمستقبلات التي تتطابق مع التوصية ITU-T G.691

4.10 التصميم الإحصائي للتشتت بأسلوب الاستقطاب

يختلف انتشار المجموعة التفاضلية DGD عشوائياً وفقاً توزيع ماكسويل المحدد بمعامل التشتت بأسلوب الاستقطاب PMD.ويتحدد أيضاً التشتت بأسلوب الاستقطاب التابع لكبل الليفة البصرية وفقاً لصيغة إحصائية يمكن أن تضاف إلى عناصر الوصلة البصرية الأخرى لمعرفة الحد الأقصى لانتشار المجموعة التفاضلية المحددة على أنها حد احتمال. انظر التذييل G.650.2/I للحصول على وصف بالمواصفات الإحصائية للتشتت بأسلوب الاستقطاب المتعلق بكبل الليفة البصرية. التوصية ITU-T G.671 تحتوي على وصف بكيفية الجمع بين مواصفات التشتت بأسلوب الاستقطاب للعناصر الأخرى للوصلة مع مواصفات كبل الليفة البصري لتحديد الحد الأقصى من انتشار المجموعة التفاضلية للوصلة.

$$DGD\max_{link} = \left[DGD\max_{F}^{2} + S^{2} \sum_{i} PMD_{Ci}^{2} \right]^{1/2} \qquad (9\text{-}10)$$

حيث:

$DGD\max_{link}$ هو الحد الأقصى للمهلة الزمنية لانتشار المجموعة التفاضلية (DGD) للوصلة (ps)

$DGD\max_{F}$ الحد الأقصى للمهلة الزمنية لانتشار المجموعة التفاضلية (DGD) المتحصل عليه بعد تفريع كبل بألياف بصرية (ps)

S عامل ضبط توزيع ماكسويل (Maxwell) (انظر الجدول 10-2)

PMD_{Ci} قيمة تشتت أسلوب استقطاب (PMD) المكون ith (ps).

وتفترض المعادلة أنه بالإمكان تقريب إحصاءات المهلة الزمنية الفورية لانتشار المجموعة التفاضلية (DGD) بواسطة توزيع ماكسويل (Maxwell)، وأن التحكم في احتمال تجاوز هذه المهلة الفورية (DGD) الحد الأقصى للمهلة الزمنية لانتشار المجموعة التفاضلية (DGD) المعين للوصلة ($GD\max_{link}$) هو تحكم يتم بواسطة قيمة عامل ضبط توزيع ماكسويل (Maxwell) المأخوذة من الجدول 10-5.

انظر الوثيقة IEC 61282-3 لمزيد من التفاصيل، بما فيها مثال عملي يفضي إلى وصلة مركبة من الحد الأقصى لانتشار المجموعة التفاضلية مقداره 30 ps عند احتمال $1{,}3 \times 10^{-7}$.

الجدول 10-5 – عوامل تعديل ماكسويل والاحتمالات ذات الصلة.

نسبة الحد الأقصى إلى المتوسط (S)	احتمال تجاوز الحد الأقصى	نسبة الحد الأقصى إلى المتوسط (S)	احتمال تجاوز الحد الأقصى
3	$4{,}2 \times 10^{-5}$	4	$7{,}4 \times 10^{-9}$
3,2	$9{,}2 \times 10^{-6}$	4,2	$9{,}6 \times 10^{-10}$
3,4	$1{,}8 \times 10^{-6}$	4,4	$1{,}1 \times 10^{-10}$
3,6	$3{,}2 \times 10^{-7}$	4,6	$1{,}2 \times 10^{-11}$
3,8	$5{,}1 \times 10^{-8}$		

11 التصحيح الأمامي للأخطاء

سرعان ما استحال التصحيح الأمامي للأخطاء (FEC) إلى طريقة هامة في تحسين أداء أنظمة الإرسال البصرية طويلة المدى التي تتمتع بسعة كبيرة، وبات يحظى بمكانة رفيعة في أنظمة الاتصالات اللاسلكية. واستخدام التصحيح الأمامي للأخطاء في أنظمة الإرسال البصرية يؤدي إلى تصميم أنظمة بوسعها أن تسمح نسبياً بنسبة كبيرة من الخطأ في البتات (أكثر من 10^{-12}) في خط الإرسال البصري (قبل فك التشفير). وعلاوة على ذلك، يمكّن تطبيق التصحيح الأمامي للأخطاء المعلمات البصرية من أن تكون مسترخية بصفة كبيرة، كما أنه يساعد على بناء أنظمة إرسال بصرية طويلة المدى، تتمتع بسعة كبيرة وبمردودية عالية.

يحتوي الجدول 11-1 على تعريف مصطلحات التصحيح الأمامي للأخطاء.

الجدول 11-1 – مصطلحات التصحيح الأمامي للأخطاء

بتة المعلومة (بايتة)	الإشارة الرقمية الأصلية التي يتعين تشفيرها بواسطة التصحيح FEC قبل الإرسال
بتة تعادلية التصحيح FEC (بايتة)	بتة إطناب (بايتة) ينشئها تشفير التصحيح FEC
كلمة الشفرة	بتة معلومة (بايتة) زائد بتة تعادلية التصحيح FEC (بايتة)
معدل الشفرة R	نسبة معدل البتات بدون التصحيح FEC إلى معدل البتات مع التصحيح FEC (R = 1 بالنسبة إلى FEC داخل النطاق)
كسب التشفير	تخفيض قيم Q عند النسبة BER المحددة (10^{-12} ، مثلا) مع افتراض ضوضاء غوسية بيضاء ومستقبل مرجعي نظري
الكسب الصافي للتشفير (NCG)	تصحيح كسب التشفير بواسطة زيادة الضوضاء بسبب اتساع عرض النطاق اللازم لبتات التصحيح FEC مع افتراض ضوضاء غوسية بيضاء (FEC خارج النطاق)
العامل Qb	Q عامل مصحح بواسطة عامل اتساع عرض النطاق $1/\sqrt{R}$
BER_{in}	النسبة BER من إشارة الخط المشفرة (= BER لإشارة دخل مفكك شفرة التصحيح FEC)
BER_{out}	النسبة BER لإشارة الزبون مفكوكة الشفرة (= النسبة BER لإشارة خرج مشفر التصحيح FEC)
شفرات BCH	شفرات Bose-Chaudhuri-Hocquenghem: شفرات BCH الأكثر استعمالا عادة هي الشفرات الاثنينية
شفرات RS	شفرات ريد–سولومون: الصنف الفرعي غير الاثنيني الأكثر استعمالا عادة بالنسبة إلى شفرات BCH
شفرة xxx (n, k)	xxx = صنف الشفرة (BCH أو RS) n = عدد بتات كلمة الشفرة (بايتات) k = عدد بتات المعلومة (بايتات)

يُوصى في الوقت الحاضر بمخططين من مخططات التصحيح الأمامي للأخطاء بالنسبة إلى أنظمة الإرسال البصرية، هما "التصحيح FEC داخل النطاق" بالنسبة إلى أنظمة التراتب الرقمي المتزامن و"التصحيح FEC خارج النطاق" بالنسبة إلى شبكات النقل البصرية. وقد جرت التوصية في البداية بالتصحيح FEC خارج النطاق بالنسبة إلى الأنظمة البصرية تحت البحار). ويشير المصطلح "داخل" و"خارج" إلى عرض نطاق الزبون. وتُدمج بتات تعادلية التصحيح FEC في القسم الذي يسبق استعماله من رأسية جزء إشارات التراتب الرقمي المتزامن، بحيث لا يعرف معدل البتات ازدياداً. وبخلاف التراتب الرقمي المتزامن، تتمتع إشارات شبكات النقل البصرية التي تشمل مكان بتات التصحيح FEC (OTUk) بمعدل بتات أعلى من الإشارة المكافئة قبل إضافة التصحيح الأمامي للأخطاء (ODUk). لذلك، تُشفر إشارات شبكات النقل البصرية باستعمال التصحيح FEC خارج النطاق مما يؤدي إلى ازدياد طفيف في معدل الخط. وعلاوة على ذلك، تتيح التوصية ITU-T G.709/Y.1331 خيار التصحيح FEC خارج النطاق غير المعياري بغرض الاستعمال الفعال.

1.11 التصحيح الأمامي للأخطاء داخل النطاق في أنظمة التراتب الرقمي المتزامن

يرد وصف التصحيح الأمامي للأخطاء في الفقرة 4.2.9، والملحق A والتذييلين IX وX/G.707/Y.1322. وتعتبر الشفرة اختيارية في STM-16، و64-، و256- أنظمة وحيدة ومتعددة القنوات. وتعتبر الشفرة اثنينية مصححة لأخطاء ثلاثة من شفرة BCH، وبصفة أدق شفرة BCH (4359,4320) مختصرة. ويمكن تصحيح ما يبلغ عدده ثلاث بتات في كلمة شفرة تتكون من 4359 بتة. وكلمة الشفرة هي تدفق مشذر يتكون من 8 بتات لإشارة تبلغ 16 × 270 بايتة انطلاقاً من الصف 1 للرتل STM-N. لذلك، يمكن تصحيح ما يبلغ 24 بتة من الأخطاء المتواصلة في كل صف من STM-16 أو 64- أو 256 رتل.

وإذا حدثت الأخطاء بصفة عشوائية، يُعبر عن النسبة BER بعد فك التشفير P_c = BER_{out}، باستعمال صف p = BER_{in} (قبل فك التشفير)، كما يلي بالنسبة إلى N = 4359.

$$P_c = \sum_{i=4}^{N} \frac{i}{N} \times \binom{N}{i} \times p^i \times (1-p)^{N-i} \tag{1-11}$$

2.11 التصحيح الأمامي للأخطاء خارج النطاق في شبكات النقل البصرية

يرد وصف التصحيح الأمامي للأخطاء خارج النطاق في الفقرة 1.11 والملحق A/G.709/Y.1331 كتعديل للشفرة خارج النطاق في التوصية ITU-T G.975. وتحدد التوصية ITU-T G.709/Y.1331 السطح البيني لعقدة الشبكة (NNI) في شبكة النقل البصري حيث تُدرج الشفرة RS(255,239) على سبيل الاختيار. وتوصي التوصية ITU-T G.975 بنسق أرتال للأنظمة البحرية، كما تصف أداء الشفرة RS(255,239). وهذه الشفرة هي شفرة مُصححة لأخطاء الرمز RS، ومن ثمَّ، يُستعمل رقم البتة في التعيين. ويمكن تصحيح ما يبلغ عدده ثماني بايتات في كلمة الشفرة. ويستخدم رتل التوصية G.709/Y.1331 تشذير 16 بايتة، ويمكن بالتالي تصحيح أخطاء مستمرة ذات 1024 بتة.

وإذا حدثت الأخطاء بصفة عشوائية، يُعبر عن النسبة BER بعد فك التشفير P_c = BER_{ou} باستعمال الصف الأصلي p = BER_{in} (قبل التشفير)، على النحو التالي:

$$P_{UE} = \sum_{i=9}^{N} \frac{i}{N} \times \binom{N}{i} \times P_{SE}^{i} \times (1-P_{SE})^{N-i}$$

$$p = 1-(1-P_{SE})^{1/8} \tag{2-11}$$

$$p_c = 1-(1-P_{UE})^{1/8}$$

P_{UE} هي احتمال الخطأ غير القابل للتصحيح، وP_{SE} هي احتمال خطأ (بايتة) الرمز؛ N = 255.

3.11 كسب التشفير والكسب الصافي للتشفير

في حالة الأخطاء الموزعة عشوائياً في خط الإشارة المشفرة، يُخفض مشفر التصحيح الأمامي للأخطاء من الخط أو من نسبة الخطأ في البتات الخام بالنسبة إلى قيمة مرجعية مطلوبة لنسبة الخطأ في البتات داخل إشارة الحمولة النافعة. لذلك يمكن النظر إلى كسب التشفير بوصفه العلاقة بين هذه النسب من الخطأ في البتات. ولتحديد معلمة تشفير الكسب على أنها ترتبط بالنظام ارتباطاً أكثر، يجري عادة تحويل التخفيض من نسبة الخطأ في البتات بواسطة التصحيح الأمامي للأخطاء إلى قيمة dB استناداً إلى نظام مرجعي نظري. وقد جرت العادة على تعريف كسب التشفير باعتباره تخفيضاً لنسبة الإشارة إلى الضوضاء عند نسبة خطأ في البتات المرجعية. ويُطبق هذا التعريف مباشرة على التصحيح الأمامي للأخطاء داخل النطاق لأن استعماله لا يعني بالضرورة ازدياداً في معدل البتات، ومن ثمّ لا يتحقق أيضاً أي ازدياد للضوضاء في دارة القرار بسبب اتساع عرض نطاق المستقبل. ويمكن أن يتميز أداء التصحيح الأمامي للأخطاء خارج النطاق بصفة أفضل بمعلمة معدّلة لكسب التشفير. وقد ترسخ استعمال معلمة الكسب الصافي للإرسال في أنظمة الإرسال اللاسلكي بصفة جيدة فيما يتعلق بالتصحيح الأمامي للأخطاء خارج النطاق. وهي تضع في الاعتبار أن تمديد عرض النطاق الضروري لمخططات التصحيح الأمامي للأخطاء يرتبط بازدياد ضوضاء المستقبل.

ويمكن، استناداً إلى قيمة الكسب الصافي للتشفير، تقدير كسب النظام الذي يمكن تحقيقه في الأنظمة التي تقتصر على نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية على نحو دقيق. وفي هذه الحالة، يعكس التخفيض من نسبة الإشارة إلى الضوضاء الكهربائية تبعاً لعلو خط معدل الخطأ في البتات التخفيض المسموح به في نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية. ويزداد الفرق بين تخفيض الحساسية الناجمة عن اتساع عرض النطاق وكسب التشفير تعقيداً في الأنظمة التي تشتمل على مساهمات الضوضاء غير البيضاء الإضافية. ولأغراض مقارنة الفعالية العالية لمخططات التصحيح الأمامي للأخطاء مع معدلات تشفير مختلفة (ولكن متماثلة) تُستعمل في الأنظمة طويلة المدى، تعتبر معلمة الكسب الصافي للتشفير مقياساً جيداً. ولكن لا بد من الإشارة إلى أن هذه المقارنة لا تصح إلا في الأنظمة التي تقتصر على مصادر الضوضاء البيضاء. وفي حال وجود إعاقة كبيرة بسبب انحطاط الإشارة (شبة التحديدية)، يمكن أن تعرف الإعاقة ازدياداً سريعاً مع ازدياد معدل البتات وتلغي صحة المقارنة. وحتى في الأنظمة التي تعمل في نظام غير خطي للغاية، لليف الإرسال، يكون تطبيق الكسب الصافي للتشفير ذا قيمة محدودة بما أن الضوضاء ذات الصلة لا يمكن أن تتصف بضوضاء غوسية بيضاء.

الملاحظة 1 – في بعض الحالات الخاصة من استعمال تشفير التصحيح الأمامي للأخطاء للتخفيض من الحد الأدنى المسموح به لنسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (على سبيل المثال، بالنسبة إلى حساب أعلى للقنوات)، يمكن أن يكون التخفيض في نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية أعلى من الكسب الصافي للتشفير. ويظهر ذلك في الحالة التي تكون فيها الضوضاء في دارة القرار ذات مساهمة كبيرة من مصدر يختلِف عن نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية، وبالتالي بالنسبة إلى زيادة معينة في إجمالي الضوضاء، تكون الزيادة في مساهمة الضوضاء الناجمة عن نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية لوحدها أكبر من مجموع الزيادة.

تعريف الكسب الصافي للتشفير

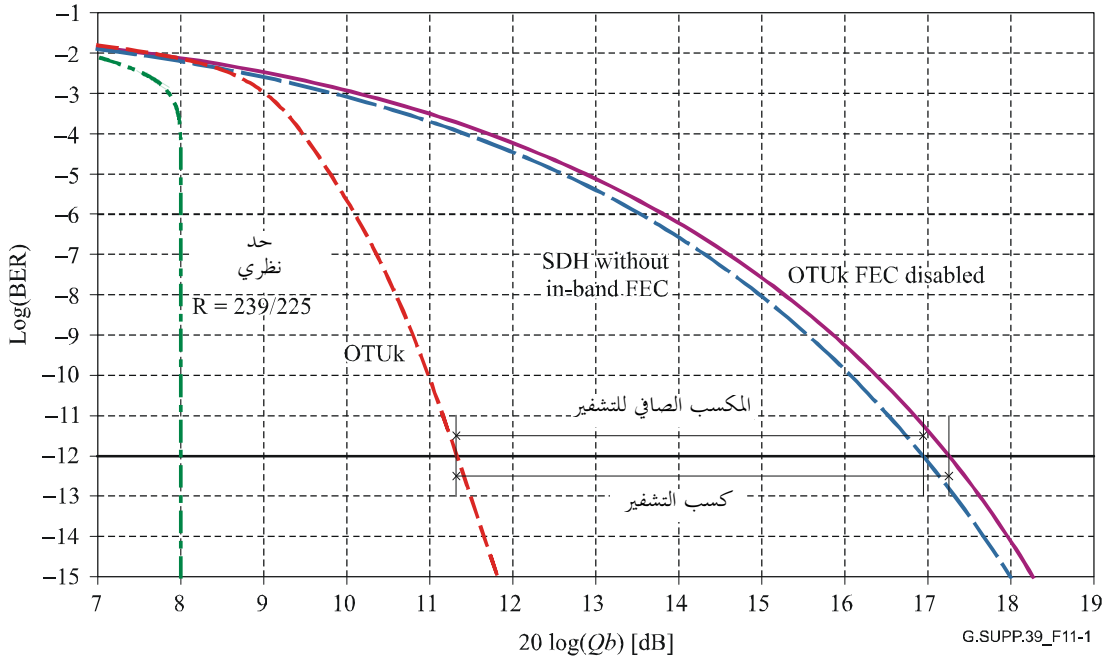
يتميز الكسب الصافي للتشفير بمعدل التشفير R والحد الأقصى المسموح به BER_{in} لإشارة دخل مفكك شفرة التصحيح الأمامي للأخطاء الذي يمكن تخفيضه إلى $BER_{out} = B_{ref}$ مرجعي، وذلك بتطبيق خوارزمية التصحيح الأمامي للأخطاء. وعلاوة على ذلك، لا بد للكسب الصافي للتشفير أن يشير إلى قناة تناظرية اثنينية مع ضوضاء غوسية بيضاء مضافة.

$$NCG = 20\log_{10}\left[\text{erfc}^{-1}(2B_{\text{ref}})\right] - 20\log_{10}\left[\text{erfc}^{-1}(2B_{in})\right] + 10\log_{10} R \qquad \text{(dB)} \tag{3-11}$$

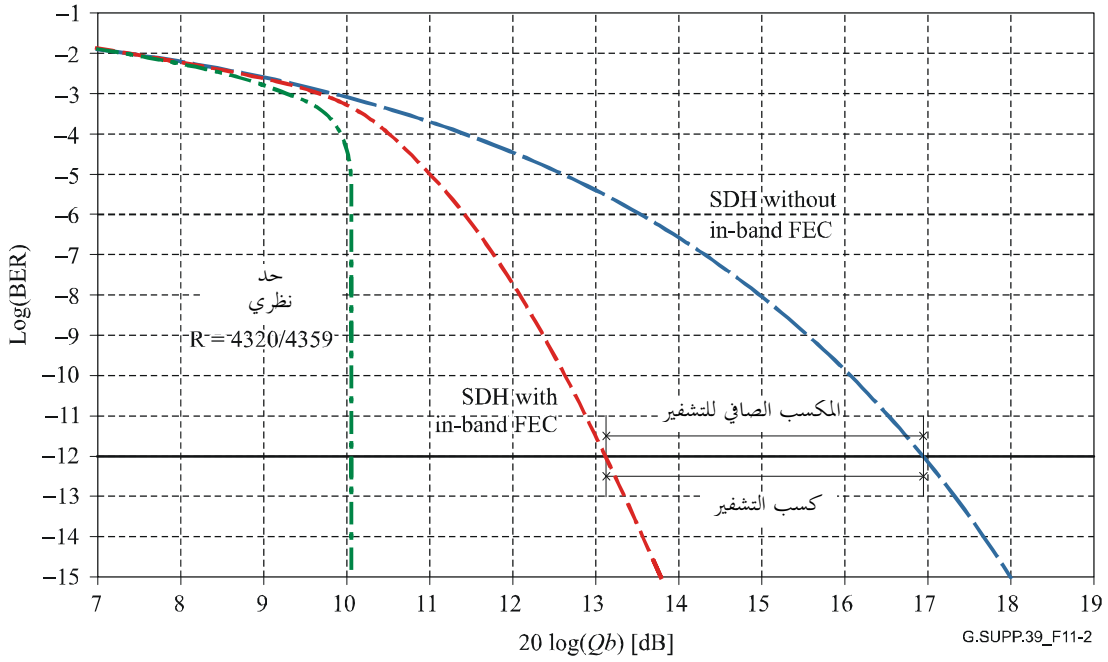
مع erfc^{-1} عكس الدالة المكملة للخطأ $\text{erf}(x) - 1 = \text{erfc}(x)$

الملاحظة 2 – $R = 1$ بالنسبة إلى التصحيح الأمامي للأخطاء داخل النطاق.

انظر الشكلين 11-1 و 11-2.



الشكل 11-1 – تقدير الأداء لمخطط التصحيح الأمامي للأخطاء G.709/Y.1331



الشكل 11-2 – تقدير الأداء لمخطط التصحيح الأمامي للأخطاء G.707/Y.1332

يلاحظ أن:

$$20\log_{10} Qb = 20\log_{10} Q - 10\log_{10} R \qquad (4\text{-}11)$$

يمثل المحور الأفقي $20\log_{10}Qb$ معبراً عنه بالديسبل بينما يمثل المحور الأفقي Log(BER). ويعادل الكسب الصافي للتشفير من حيث $20\log_{10}Qb$ تخفيض النسبة OSNR المسموح بها عندما يستعمل نظام الخط مضخمات بصرية وعندما تكون الضوضاء التي تسببها ASE المصدر الوحيد للضوضاء الذي يكتسي أهمية عند دارة القرار.

انظر الجدول 11-2

الجدول 11-2 – أداء وحدات التصحيح الأمامي للأخطاء المعيارية

	FEC داخل النطاق BCH (4359,4320)	FEC خارج النطاق RS (255,239)
التطبيق	**SDH**	**OTN**
BERin for BERout = BERref = 10–12	2.9×10^{-6}	1.8×10^{-4}
كسب التشفير (BERref = 10–12) بوحدة dB	3.8	5.9
الكسب الصافي للتشفير (BERref = 10–12) بوحدة dB	3.8	5.6
معدل الشفرة	1	239/255

4.11 حدود الكسب الصافي للتشفير النظرية فيما يتعلق ببعض وحدات التصحيح الأمامي للأخطاء غير المعيارية

استناداً إلى النتائج الأساسية المستقاة من نظرية المعلومات نحو تلك الواردة في [23]، يمكن تحديد حدود الكسب الصافي للتشفير كدالة على معدل الشفرة. وترد بعض النتائج في الجدول 11-3 بشأن $BER_{ref} = 10^{-12}$.

الجدول 11-3 – الحدود النظرية للكسب الصافي للتشفير

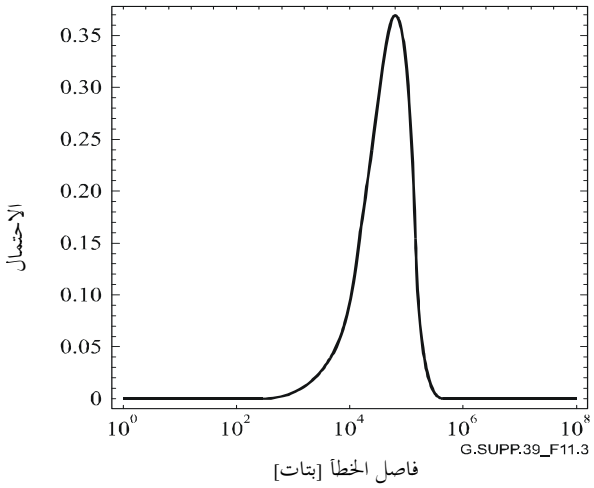
اتساع عرض النطاق معبراً عنه بالنسبة المئوية	معدل الشفرة R	الكسب الصافي للتشفير معبراً عنه بالديسيبل ($BER_{ref} = 10^{-12}$)
5	0,952	8,6
7	0,935	9,0 (ملاحظة)
10	0,909	9,4
15	0,870	9,9
20	0,833	10,3
25	0,800	10,6
ملاحظة – يتطابق مع معدل الشفرة للتصحيح الأمامي للأخطاء خارج النطاق المعياري.		

5.11 الفرضية الإحصائية فيما يتعلق بكسب التشفير والكسب الصافي للتشفير

نتائج تقييم الأداء الواردة في الجدول 11-2 صحيحة في إطار الفرضية التي مفادها أن الأخطاء تحدث بصفة عشوائي إحصائياً. ويعرّف الخطأ العشوائي هنا على غرار دالة الاحتمال التالية.

$$P_k(t) = \frac{(\rho t)^k}{k!} \exp\{-\rho t\} \tag{5-11}$$

تعتبر المعادلة 11-5 تعريفاً شهيراً للإحصائيات العشوائية لبواسون، وتؤدي إلى احتمال حدوث k–مرة من الأحداث العشوائية في فاصل زمني t. ويؤدي استبدال $k = 1$ في المعادلة 11-5 إلى إحصائيات خطأ 1 بتة، ويرد توضيح المنحنى النظري للإحصاءات العشوائية لحدوث خطأ 1 بتة في الشكل 11-3 بالنسبة إلى متوسط النسبة BER الذي يبلغ 1×10^{-6}.



الشكل 11-3 – المنحنى النظري لاحتمال خطأ 1 بتة بالنسبة إلى فاصل زمني

يُلاحظ أن المحور الأفقي لوغاريتمي. وفي حال اتباع إحصاءات الخطأ للمنحنى الوارد في الشكل 11-2، يتبع أداء التصحيح الأمامي للخطأ التنبؤ النظري الذي يرد وصفه في الجدول 11-2. وتحتاج الحالة التي لا تتبع فيها إحصاءات الخطأ المنحنى النظري الوارد في الجدول 11-2 إلى المزيد من الدراسة.

وهناك العديد من مصادر توليد الخطأ في أنظمة الإرسال البصري، مثل ضوضاء ASE و GVD و PMD. وعلاوة على ذلك، يمكن للآثار غير الخطية أن تحط من أداء الإشارة من خلال تشكيل الطور الذاتي (SPM) ومحاكاة انتثار بريون (SBS)، وعدم استقرار التشكيل (MI) في أنظمة القناة الوحيدة، والتشكيل شامل الأطوار (XPM)، وخلط الموجات الأربع (FWM)، ومحاكاة انتثار رامان (SRS) في أنظمة القنوات المتعددة. وقد ثبت أن التصحيح الأمامي للأخطاء فعال في الأنظمة التي تقتصر على النسبة OSNR وكذلك فيما يتعلق بالأنظمة التي تقتصر على التشتت. أما بالنسبة إلى الآثار غير الخطية، فإن التخفيض من قدرة الخرج يؤدي إلى قيود تفرض على النسبة OSNR التي تستفيد من التصحيح الأمامي للأخطاء. ومع ذلك، يكون التصحيح الأمامي للأخطاء أقل فعالية بالنسبة إلى PMD. ومن ثم، فإن معالجة PMD تعتبر موضوعاً يحتاج إلى المزيد من الدراسة. ويرد وصف احتمالات إرخاء المعلمات البصرية مع التصحيح الأمامي للأخطاء أدناه. وقد تم الاحتفاظ بمجموعة من المرشحين للمزيد من الدراسة.

6.11 المرشحون لإرخاء المعلمة

بفضل استعمال التصحيح الأمامي للأخطاء، يمكن إرخاء المعلمات البصرية إذا كانت فرضية إحصاءات الخطأ العشوائي صحيحة.

1.6.11 إرخاء خصائص المرسل و/أو المستقبل

يمكن إرخاء أقصى نسبة الخطأ في البتات من 10^{-12} إلى القيم التي يحتوي عليها الصف الثالث من الجدول 11-2 عند الإرخاء الأقصى. وهو ما يسمح بتخفيض نسبة الإشارة إلى الضوضاء عند دارة القرار. وافتراض نسبة معينة من OSNR في نظام مرجعي دون تصحيح أمامي للأخطاء يعد كافياً لإنتاج نسبة الخطأ في البتات المطلوبة، ويمكن استعمال كسب التشفير الذي يُحصل عليه بإضافة التصحيح الأمامي للأخطاء إلى النظام لإرخاء معلمات المكونة في المستقبل و/أو المستقبل. وهناك العديد من المعلمات التي يمكن أن تستفيد من هذه الأخيرة مثل المتطلبات التي تتعلق بإجمالي القدرة المطلقة، وقناع العين، ونسبة الانطفاء، والضوضاء الكهربائية لمستقبل PIN، ورقم الضوضاء والمضخم المسبق البصري، وعزل مراشح إزالة تعدد الإرسال، أو إلى حد ما، خصائص وظيفة نقل المستقبل التي تحدد تداخل الرمز البيني وعرض نطاق الضوضاء قبل القرار.

2.6.11 التخفيض من سويات قدرة الخرج للإبقاء على قدرة الضخ

يؤدي التخفيض من سويات قدرة الخرج للمستقبل ومضخمات الخط بواسطة قيمة الكسب الصافي للتشفير إلى تخفيض النسبة OSNR عند نهاية سلسة مضخمات بصرية. وتعَوض الضوضاء الكهربائية ذات الصلة وبالتالي أعلى نسبة الخطأ في البتات بواسطة التصحيح الأمامي للأخطاء. وبالإمكان تطبيق نفس المبدأ على تطبيق مدى وحيد مع مستقبل ذي مضخم مسبق بصرياً. ويسمح نشر التصحيح الأمامي للأخطاء في نظام مدى وحيد دون مستقبل ذي مضخم مسبق بصرياً، لقدرة خرج المستقبل بالاحتفاظ بما يبلغ نصف قيمة الكسب الصافي للتشفير فقط، لأن النظام في هذه الحالة يقتصر على الضوضاء الكهربائية للمستقبل.

7.11 المرشحون لتحسين خصائص النظام

1.7.11 تخفيض سويات القدرة لتفادي عدم الخطية

يجبر تخفيض سويات قدرة الخرج والدخل للمضخمات البصرية النظام الذي يقتصر على آثار غير خطية على أن يصبح نظاماً يقتصر على النسبة OSNR، بشرط ألا تتغير المعلمات الأخرى. وتخفيض القدرة بحسب قيمة الكسب الصافي للتشفير، بل وأكثر، ممكن كما ترد الإشارة إلى ذلك في الملاحظة 3.11. وعلى سبيل المثال، يمكنُ أيضاً، بعد التخفيض من سويات القدرة، تطبيق المعلمات متعددة القنوات للنظام بالنسبة إلى G.652 كما يمكن تطبيق الليف G.655 على الليف G.653. وهكذا، تصبح مواصفة نظام مشتركة ممكنة أي تصبح صحيحة بالنسبة إلى جميع أنواع الألياف.

2.7.11 الزيادة في أقصى توهين المدى

إذا لم يكن نظام المديات المتعددة تشتتاً لونيا محدوداً (استعمال G.652 مع ملاءمة التشتت، G.653 أو الليف G.655) يمكن تمديد مسافة مدى الهدف. ويمكن تخفيض قدرة الدخل لكل مضخم من مضخمات الخط بما قيمته قدره الكسب الصافي للتشفير. وبالتالي، يمكن التخفيض من أقصى توهين المدى بمقدار الكسب الصافي للتشفير (الحالة القصوى). وبإمكان التخفيض أن يلغي وحدات الإعادة غير الضرورية في نظام ذي خسارة أكبر إلى حد ما من الخسارة المحددة. ويحتاج تمديد مسافة نظام يقتصر على التشتت إلى المزيد من الدراسة.

ملاحظة – في نظام مدى وحيد دون مضخم مسبق، تبلغ زيادة التوهين الأقصى للمسير نصف قيمة الكسب الصافي للتشفير فقط، وذلك لأن النظام في هذه الحالة يقتصر على الضوضاء الكهربائية للمستقبل.

3.7.11 زيادة العدد الأقصى للمديات بالنسبة إلى نظام المدى الطويل

يمكن تمديد إجمالي مسافة الهدف لنظام طويل المدى بصفة كبيرة من خلال زيادة عدد المديات (وكذلك مضخمات الخط) مع افتراض أن تشتت أسلوب اللون والاستقطاب لا يصبحان من العوامل المقيدة (يبقى النظام مقتصراً على النسبة OSNR مثلاً). ويمكن، بشرط أن يكون توهين كل مدى نفس الشيء، ويبقى ثابتاً، الزيادة في عدد المديات بعامل يُعطى بواسطة قيمة الكسب الصافي للتشفير. ويمكن في حال التصحيح الأمامي للأخطاء المعياري، الزيادة في مسافة الهدف بعامل يبلغ 4 تقريباً. ويحتاج تمديد المسافة لنظام يقتصر على النسبة non-OSNR إلى المزيد من الدراسة.

4.7.11 زيادة حساب القنوات بالنسبة إلى الأنظمة عالية السعة

إذا قُيد نظام متعدد المديات بواسطة قدرة الخرج للمضخمات البصرية، يمكن زيادة حساب القناة بواسطة عامل تُعطيه قيمة الكسب الصافي للتشفير. وفي حال التصحيح الأمامي للأخطاء خارج النطاق المعياري، يمكن الزيادة في حساب القناة بعامل يبلغ 4 تقريباً. ولا بد من الإشارة إلى أنه بالإمكان استعمال هذا الأسلوب ما بقيَ النظام المرجعي غير مدعوم بآثار غير خطية بإمكانها أن تتغير بالتخفيض من قدرة القناة. وعلى سبيل المثال، ليس بالإمكان استعمال SPM لتعويض التشتت اللوني إذا أصبحت قدرة القناة أقل من العتبة SPM.

12 التوافق المستعرض والتوافق الطولي للطبقة المادية

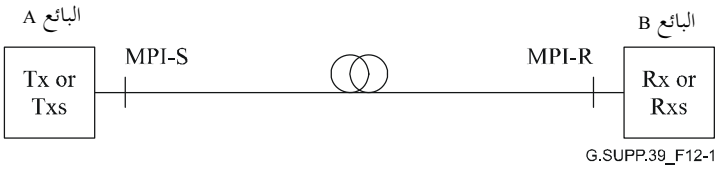
تصف هذه الفقرة التوافق المستعرض للطبقة المادية على النحو الذي يتم به استعماله في التوصيات G.957 وG.691 وG.693 وG.959.1 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T). وتقدم أيضاً تعريفات للتشكيلات الممكنة التي قد تشكل أساس التقييس الذي سيتم في المستقبل للأنظمة متعددة المديات.

وتتعلق جميع التشكيلات التي تجري مناقشتها هنا بالأنظمة من النوع نقطة إلى نقطة. وتخضع الترتيبات الأكثر تعقيدا مما ورد للمزيد من البحث.

1.12 التوافق المستعرض للطبقة المادية

1.1.12 توافق الطبقة المادية المستعرض أحادي المدى

تعرف التطبيقات الواردة في التوصيات G.957 وG.691 وG.693 وG.959.1 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) على أنها "متوافقة بصورة مستعرضة"، مما يقتضي أن أطراف أحد القطاعات البصرية قد تنتهي بتجهيزات صادرة عن مصنعين مختلفين، على النحو الموضح في الشكل 12-1. ومن ثم فإن تقديم تعريفات لمجموعة كاملة من المعلمات والقيم المتصاحبة عند نقطة السطح البيني متعدد المسيرات في المستقبل MPI-S ونقطة السطح البيني متعدد المسيرات في المرسل MPI-R يعد أمراً ضرورياً لإتاحة إمكانية وجود هذا السطح البيني.

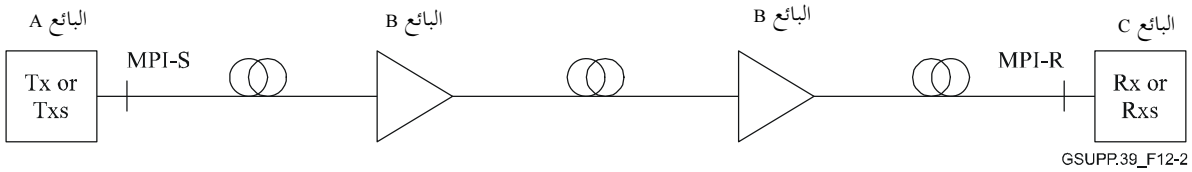


الشكل 12-1 – توافق الطبقة المادية المستعرض أحادي المدى

ملاحظة – في العديد من التوصيات، تمتلك نقطتا السطحين البينيين الموسومتان بنقطة السطح البيني متعدد المسيرات في المستقبل MPI-S ونقطة السطح البيني متعدد المسيرات في المرسل MPI-R والواردتين في الشكل 12-1 وسوماً مختلفة (ومعلمات مختلفة للسطوح البينية)، غير أن المبدأ نفسه ينطبق على جد سواء على السطوح البينة أحادية القناة والسطوح البينة متعددة القنوات. وفي الوقت الحاضر لا توجد التطبيقات متعددة القنوات والمتوافقة بصورة مستعرضة إلا في التوصية ITU-T G.959.

2.1.12 توافق الطبقة المادية الكامل والمستعرض ومتعدد المديات

لا تتضمن التوصية ITU-T G.959.1 في الوقت الحالي سوى الأنظمة أحادية المدى. وقد كان يتوخى أيضاً في البداية إدراج الأنظمة متعددة المديات التي تستخدم المضخمات الخطية البصرية على النحو الموضح في الشكل 12-2. غير أنه لم تتم الموافقة على إدراج التطبيقات متعددة المديات لدى نشر النسخة الأولى للتوصية ITU-T G.959.1.



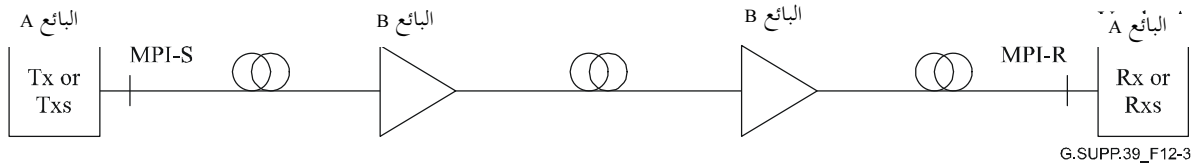
الشكل 2.12 – توافق الطبقة المادية الكامل والمستعرض ومتعدد المديات

يبين الشكل 2.12 الحالة المتعلقة بالتوافق الكامل المستعرض حيث تتوفر المضخات التي تصدر من التجهيزات المنتهية عن طريق مقدم خدمات مختلف. وتتطلب هذه الحالة تحديداً لمواصفات خطة القناة وتفاصيل كاملة عن قناة الإشراف البصرية (OSC) وذلك إذا جرى استعمال أحدها.

وتتطلب هذه الحالة أيضاً تحديد مواصفات بعض المعلمات مثل مستويات الخسارة والقدرة على أساس قيمتها بالنسبة إلى المدى وكذلك "إدارة" معلمات أخرى مثل التشتت الضوئي وتشتت أسلوب الاستقطاب والمعلمات اللاخطية عبر الوصلة بكاملها.

3.1.12 توافق الطبقة المادية الجزئي والمستعرض ومتعدد المديات

من الممكن أيضاً تحديد تشكيلة إضافية عندما يتم توفير التجهيزات المنتهية من قبل مقدم خدمات وحيد عند أي طرف من أطراف الوصلة. ويسمى هذا بالتوافق الجزئي المستعرض وهو موضح في الشكل 12-3.

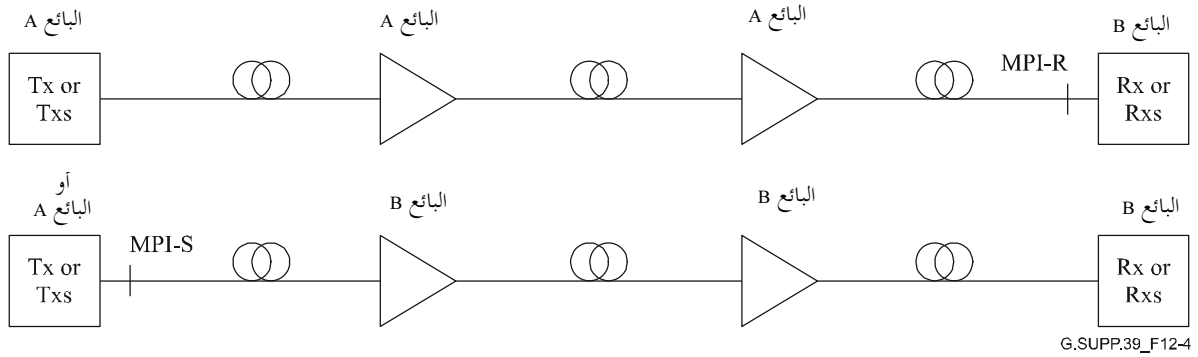


الشكل 12-3 – توافق الطبقة المادية الجزئي والمستعرض ومتعدد المديات

وقد تتطلب هذه الإمكانية البديلة القدر الأكبر من نفس المواصفات المتعلقة بالخصائص المادية كما هو الحال بالنسبة إلى التوافق الكامل المستعرض متعدد المديات باستثناء عدم الحاجة إلى تحديد مواصفات الخطة الدقيقة للقناة. ويشترط أيضاً نطاق طول موجة التشغيل الخاصة بالنظام.

4.1.12 التوافق المستعرض ومتعدد المديات للسطح البيني الوحيد

توجد هنالك إمكانية بديلة على النحو الموضح في الشكل 12-4 (وقد تتطلب تحديداً أقل للخصائص المادية مقارنة مع التوافق الكامل المستعرض متعدد المديات). ومع ذلك فإنه لم تتم دراسة هذه التشكيلة داخل قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T). ولا تحدد في هذا الإطار سوى نقطة سطح بيني وحيدة بالنسبة إلى الوصلة (سواء عند المرسل أو عند المستقبل) وهنالك مقدم خدمات وحيد يوفر جميع التجهيزات على جانب وحيد من السطح البيني.

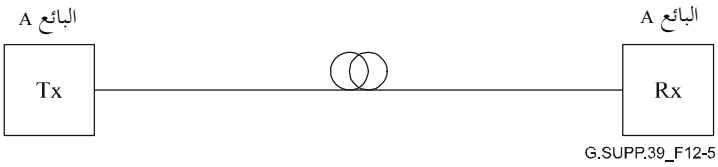


الشكل 12-4 – التوافق المستعرض للسطح البيني الوحيد متعدد المديات

وتخضع مواصفات الخصائص المادية التي تتطلبها هذه التشكيلة للمزيد من البحث، غير أنه قد يكون من المتعين تضمنها لتفاصيل تتعلق بالخطة الدقيقة للقناة.

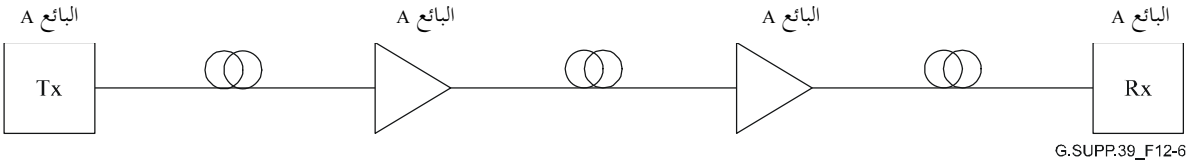
2.12 التوافق الطولي للطبقة المادية

وعلى العكس مما ورد أعلاه، فإن التطبيق المعرف على أنه "متوافق طولياً" يقتضي بأن طرفي أحد القطاعات البصرية ينتهيان بتجهيزات يوفرها مقدم خدمات واحد. وتشترط في هذه الحالة مجموعة معلمات تكون محدودة بشكل أكبر منها بالنسبة إلى أنظمة التوافق المستعرضة. ولا تحدد في هذا الإطار سوى خصائص الألياف (التوهين، التشتت، المهلة الزمنية لانتشار المجموعة التفاضلية (DGD)، الانعكاسات). ويوضح الشكل 12-5 النظام المتوافق طوليا أحادي المدى.



الشكل **12-5** – توافق **الطبقة** المادية الطولي أحادي المدى

والتوافق الطولي ممكن أيضاً بالنسبة إلى الأنظمة متعددة المديات. وهو يشابه النظام المتوافق طولياً أحادي المدى حيث ترد جميع التجهيزات النشطة من مصدر وحيد، وهذا ما يوضحه الشكل 12-6. وكما هو الحال بالنسبة إلى النوع أحادي المدى، فإنه لا يشترط سوى تحديد عدد محدود للغاية من المعلمات، على الرغم من وجوب إدارة التشتت اللوني وتشتت أسلوب الاستقطاب (PMD) على الأساس "من طرف إلى طرف".



الشكل **12-6** – توافق الطبقة **المادية** الطولي متعدد المديات

3.12 الهندسة المشتركة

تشتمل توصيتان اثنتان من التوصيات الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) على أقسام تتعلق بالهندسة المشتركة:

- التوصية ITU-T G.955: تعد العملية التي تتفق الإدارات/المشغلون بواسطتها على مجموعة من الخصائص المتعلقة بالسطح البيني لأحد الوصلات البصرية التي تفي بخصائص أداء الوصلة المتفق عليها عندما تكون مواصفات السطح البيني المتاحة في التوصيات الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) غير كافية لضمان مستوى الأداء.
- التوصيةITU-T G.957: بالنسبة إلى عدد محدود من الحالات، فإنه يمكن تصور هندسة مشتركة تفي بمتطلبات القطاعات البصرية حينما يثبت أن مواصفات السطوح البينية للتوصية ITU-T G.957 غير ملائمة. ومن المحتمل أن يحدث هذا حينما تكون خسارة القطاع المطلوبة (2 dB على سبيل المثال) أكبر من تلك المحددة في التوصية ITU-T G.957، غير أنه يمكن أيضاً دراستها بالنسبة إلى معلمات أخرى.

وبالنسبة إلى هذه الحالات، فإن من واجب الإدارات/المشغلين المعنيين تحديد جوانب النظام بشكل أوثق حينما تكون مواصفات التوصية ITU-T G.957 مواصفات غير مرضية. وإنه لمن الأهمية بمكان التأكيد على احتمال اختلاف كل وضع يتطلب "هندسة مشتركة" عن غيره من الأوضاع: ومن ثم فستكون محاولة تقييس أي قيمة من قيم المعلمات بالنسبة إلى هذه الأنظمة محاولة خالية من المعنى. وعوض ذلك فإنه يتعين على الإدارات/المشغلين المعنيين التوصل إلى اتفاق حول ما هو مطلوب ثم التفاوض مع المصنعين حول ما هو قابل للتحقيق في الواقع. وهنالك احتمال ضعيف في أن تؤدي هذه العملية إلى أن يتم التزويد بكلي طرفي وصلة الإرسال من قبل مصنّع واحد يلبي الأداء المطلوب لتحقيق مستوى أمثل بالنسبة إلى المرسلات والمستقبلات.

وتنبغي الإشارة إلى أنه على الرغم من عدم أهمية تحديد أي قيمة من قيم المعلمات بالنسبة إلى الأنظمة "المهندسة بصورة مشتركة"، فإنه من الأجدر أن تهتدي الإدارات/المشغلون أو المصنعون المعنيون بالمبادئ التوجيهية العامة والنهج الهندسي للأنظمة المستعملين في التوصية ITU-T G.957. وتحديداً، فقد يكون من المفيد استعمال نفس التعريفات الخاصة بالمعلمات (مثل حساسية المستقبل عند النقطة المرجعية للسطح البيني البصري أحادي القناة في المستقبل (R) بما يشمل كل الآثار المتعلقة بدرجة الحرارة والقدم).

13 اعتبارات تصميم الشبكة البصرية المبدلة

تتضمن التوصية ITU-T G.8080/Y.1304 الأساس البنيوي المتعلق بالتوصيل البيني للشبكات البصرية المبدلة. فمن زاوية هندسة أنظمة الإرسال البصرية المتعلقة بالشبكات البصرية المبدلة، يمكن مراعاة الحالتين اللتين تقابلان موقع انتهائيات إعادة توليد القدرة، والشكل، والتوقيت (3R) داخل الشبكة البصرية المبدلة.

وفي الحالة التي يعمل فيها أيضاً عنصر الشبكة المبدل للإشارة البصرية على توفير انتهائية إعادة توليد القدرة، والشكل والتوقيت (3R)، فإنه يمكن حينئذ هندسة القطاعات البصرية بشكل منفصل على كل جانب من جوانب عنصر الشبكة. ويمكن استعمال مبدأ الحالة الأسوأ أو مبدأ التصميم الإحصائي لتحقيق أداء النظام "من طرف إلى طرف" الذي يتوافق مع التخصيصات المتعلقة بأهداف الأداء والواردة في التوصيتين G.828 وG.8201 الصادرتين عن قطاع تقييس الاتصالات.

وفي الحالة التي لا يعمل فيها عنصر الشبكة الذي يقوم بتبديل/إعادة تسيير الإشارة البصرية بتوفير انتهائية إعادة توليد القدرة والشكل والتوقيت (3R) (وكمثال على ذلك التوصيل المتقاطع البصري الشفاف)، فبشكل عام، سيكون من الصعب جداً حينها ضمان أداء نسبة الخطأ في البتات بالنسبة إلى التوصيل البصري دون فرض تقييدات صارمة على مدى الشبكة. وكمثال على ذلك، فإن نشاط عنصر الشبكة المبدلة الشفافة للتأثير على إعادة تسيير مبدل تعدد الإرسال البصري الإلكتروني (OMS) يمكن أن ينتج في مسار إرسال جديد ذي خصائص بصرية مختلفة، وقد يكون ذلك خارج حدود التصميم المطلوبة ولكن من أجل الأداء المرغوب لإشارات المخدوم والذي يدعمه مبدل الإرسال البصري (OTS). وقد تتم معالجة إلغاء مثل هذه الحالات من خلال التخطيط المسبق لتوصيلات ممكنة التنفيذ بالنسبة إلى إشارات إعادة التسيير أو من خلال الهندسة المشتركة.

وإمكانية حدوث قيود على الجدول الزمني لإنجاز الشبكات البصرية المبدلة بسبب السلوك الدينامي للمضخمات البصرية أو غيرها من العناصر البصرية الموجودة داخل وصلة الإرسال، موضوع يتجاوز نطاق هذه الإضافة.

14 أفضل الممارسات لسلامة القدرة البصرية

1.14 المشاهدة

1.1.14 مشاهدة اللفية

ينبغي عدم مشاهدة طرفي أو سطوح واصل الليفة بدون حماية العينين أو بواسطة أي جهاز تسديد غير معتمد من طرف منظمة التشغيل.

2.1.14 وسائل المساعدة على المشاهدة

تُستخدم فقط وسائل المساعدة على المشاهدة المرشحة أو الموهنة المعتمدة من طرف منظمة التشغيل.

2.14 طرفي الليفة

1.2.14 الانتهائية

ينبغي تغطية، فرديا أو جماعيا، أي طرف أو أطرف الليفة (أحادية الطرف أو متعددة الأطراف) التي تكون بدون نهاية (أن تكون مطابقة أو متراكبة مثلاً) بمادة تناسب طول الموجات والقدرة عندما لا تُستخدم. وينبغي أن لا تكون الأطراف مرئية وينبغي عدم عرض الأطراف الحادة.

وتشمل طرائق التغطية الملائمة استخدام واق تراكبي أو شريط. وينبغي دائما ربط رؤوس الأطراف بالواصلات غير المتجانسة.

2.2.14 التنظيف

تُستخدم فقط الطرائق المعتمدة من طرف منظمة التشغيل للتنظيف وإعداد الليفات البصرية والواصلات البصرية. ويُعد التنظيف أساسيا لا سيما بالنسبة للأنظمة عالية القدرة (من قبيل الأنظمة التي تتعدى قدرتها 1 W). وفي حالة ما لا يتم

تنظيف سطوح أطراف الواصلات في مثل تلك الأنظمة فقد ينجم عن ذلك ارتفاع عال في درجات الحرارة غير مستحب مما قد يؤدي، في بعض الحالات، إلى ظاهرة "انحلال الليفة".

وقبل تفعيل القدرة ينبغي التأكد من عدم تعرض أطراف الليفة إلى أي تلويث.

ملاحظة – تتميز ظاهرة "انحلال الليفة" بدرجات حرارة جد عالية إلى جانب انتشار ضوء أبيض بارق في الليفة، مما قد يتسبب في حالات خطيرة في النظام.

3.2.14 خسارة الواصل

قد تستحث خسارة الواصل ارتفاعا في درجة الحرارة، لا سيما بالنسبة للأنظمة عالية القدرة. وعليه، ينبغي أخذ في الحسبان اختيار الواصلات للأنظمة عالية القدرة. فعلى سبيل المثال، في نظام تبلغ قدرة الإطلاق البصرية في الواصل 2 W، فإن خسارة بمقدار 0,25 dB تعني أن هنالك حوالي 0,1 W من القدرة البصرية المتاحة للتسبب في حرارة محلية. وفي مثال لواصل مستخدم ليفة G.653، تسببت خسارة الواصل في ارتفاع في درجة الحرارة بمقدار 5° C.

4.2.14 خسارة الجدالة

قد تستحث خسارة الجدالة ارتفاعا في درجة الحرارة، لا سيما بالنسبة للأنظمة عالية القدرة. والقدرة المتاحة للإحماء في حالة خسارة الجدالة هي مماثلة لحالة خسارة الواصل. ويعتمد أثر الإحماء الناجم عن ذلك على موقع امتصاص القدرة "المفقودة". وفي حالة امتصاصها كليا في موقع الجدالة (أي جراء التلوث)/ فقد تحدث ارتفاعات كبيرة في درجات الحرارة.

3.14 الألياف الشريطية

قد تظهر أطراف الألياف الشريطية الملتصقة كوحدة مستوى من الخطر أعلى من الذي قد تسببه ليفة واحدة. وبالتالي، يرجى عدم إلصاق الألياف الشريطية على شكل شريط غير منفصل، أو استخدام لاصقات شريطية، إلا إذا سمحت بذلك منظمة التشغيل.

4.14 كبلات اختبار مرنة

عند استخدام كبلات اختبار بصرية مرنة، ينبغي أن يكون مصدر القدرة البصرية آخر ما يتم توصيله وأول ما يُفك توصيله.

5.14 انحناءات الليفة

قد يشكل الانحناء المفرط لليفة خطرا في حدوث عطل ميكانيكي بسبب ضغط الانحناء بالإضافة إلى بقعة إحماء محلية بإرسال عالي القدرة. إذ ينبغي تجنب الانحناءات المحلية بنصف القطر المنخفض.

6.14 ممدات اللوحة

ينبغي عدم استخدام ممدات اللوحة على مرسل بصري أو بطاقات المضخمات البصرية. ويرجى عدم تشغيل المصادر البصرية عندما تكون خارج حاملات المرسل.

7.14 الصيانة

يرجى عدم اتباع سوى التعليمات المعتمدة من طرف منظمة التشغيل لتشغيل النظام المستخدم وصيانته.

8.14 معدات الاختبار

يرجى استخدام معدات الاختبار من أدنى فئة تكون ضرورية وعملية للمهمة. ويرجى عدم استخدام معدات اختبار من فئة أعلى من مستوى خطر الموقع.

9.14 التعديل

يرجى عدم إدخال أي تعديل غير مرخص به على أي نظام اتصال بالألياف البصرية أو المعدات المرتبطة به.

10.14 التحكم في المفاتيح

بالنسبة للمعدات المحكومة بمفاتيح، ينبغي أن توضع المفاتيح تحت حكم شخص تعينه الإدارة لضمان استخدامها الآمن وحفظها والتحكم فيها. وينبغي أن تحفظ مفاتيح احتياطية تحت إجراءات تحكم صارمة من طرف مدير سام معين.

11.14 الوسوم

يرجى إبلاغ إدارة منظمة التشغيل بوسوم السلامة البصرية المتلفة أو المفقودة.

12.14 العلامات

علامات التحذير المتعلقة بالمناطق ضرورية للمواقع التي يتجاوز مستوى الخطر فيها 1 M. ويجوز وضع علامات المناطق في المواقع ذات تصنيف أدنى.

13.14 الإنذارات

ينبغي الاستجابة لإنذارات الأنظمة، لا سيما تلك التي تبين بأن نظام APR أو أي نظام أمن آخر غير قابل للعمل حتى يتسنى التصليح في الحيز الزمني المحدد.

14.14 أنظمة رامان المضخمة

تعمل أنظمة رامان المضخمة بقدرات عالية بما يكفي للتسبب في تلف الليفة أو غيرها من المكونات. ويورد البندان 2.14 و5.14 وصفا إلى حد ما بهذا الأثر، إلا أن بعض الإرشادات الإضافية تتبع فيما يلي:

قبل تفعيل قدرة رامان

- حساب المسافة إلى حيث تُخفض القدرة إلى أقل من 150 mW.
- فحص، إن أمكن ذلك، أي علبة تجديل في مجال تلك المسافة. إن وجدت انحناءات ضيقة يكون قطرها أقل من 20 mm مثلاً، ويرجى محاولة إزالة الانحناء أو التقليص من حدته، أو اختيار ألياف أخرى.
- إن لم يتسن الفحص، فيمكن استخدام نظام OTDR عالي الاستبانة لتحديد مصادر خسارة الانحناء أو الواصل التي قد تؤدي إلى التلف تحت قدرة عالية.
- وإن استخدمت واصلات، ينبغي التحقق من النظافة الجيدة للأطراف. والملوثات المعدنية ميالة بصفة خاصة إلى التسبب في التلف. وتعتبر جدالات الاندماج الأقل عرضة للتلف.

أثناء تفعيل قدرة رامان

في بعض الحالات، قد يكون ممكنا رصد الضوء المنعكس في المصدر عندما ترتفع قدرة مضخة رامان. إذا أظهر مخطط القدرة المنعكسة مقابل القدرة المحقونة خاصية اللاخطية، فقد يكون هنالك موقع عاكس يكون عرضة للتلف. ومواقع أخرى هي عرضة للتلف، من قبيل الانحناءات الضيقة حيث الغلاف يمتص القدرة البصرية، قد توجد من دون أن تظهر إشارة واضحة في منحنى القدرة المنعكسة مقابل القدرة المحقونة.

إذا كان هنالك انخفاض في مستوى التضخيم مع مرور الوقت، فقد يكون ذلك راجع إلى تقلص قدرة المضخة أو زيادة في الخسارة استحثتها بعض أساليب التلف البطيء من قبيل تلك التي تحدث في السطح البيني لواصل ما. والاكتفاء برفع قدرة المضخة لاستعادة الإشارة قد يؤدي حتى إلى تلف أكبر أو عطل كارثي.

والأسلوب المتعلق بعطل الليفة عند الانحناء هو أن الضوء يتسرب من الغمد وبعضه يمتصه الغلاف مما يفضي إلى إحماء محلي وتفاعلات حرارية. وتميل هذه التفاعلات إلى زيادة الامتصاص وبالتالي زيادة الإحماء. وعندما تتكون طبقة من الكربون، يكون هنالك تفاعل حراري غير قابل للتحكم يفضي إلى حرارة تكفي لإذابة الليفة التي تتحول إلى حالة الخلل تعيق القدرة البصرية بأكملها. وعليه، لن يكون هنالك سوى القليل من التغيير في خصائص الإرسال المستحثة جراء عملية تلف إلى أن يحدث العطل الفعلي. وإذا كانت الليفة غير مصمدة، يحدث برق عند العطل الذي ينطفئ ذاتيا لسرعة تدهور الغلاف. ويمكن أن تحدث الليفة المصمدة عدداً أكبر من الشعلات بحسب المادة التي تتكوم منها. وبالنسبة لليفة غير المصمدة يدل تلون الغلاف في قمة الانحناء على تلف تحت الحرج.

التذييل I

اتساع النبضة بسبب التشتت اللوني

1.I الغرض

يتعلق هذا التذييل بالفقرة 1.1.2.9. ويورد تفسيرا لمعدل البتات كما هو محدد في التشتت اللوني. يبدأ بنتيجة عامة منشورة تضم ما يلي:

- معاملي ليفة الرتبة الأولى وليفة الرتبة الثانية؛
- معلمات المرسل لعرض الطيف وتنوع طول الموجات وعرض نطاق التشكيل.

2.I النتيجة العامة المنشورة

بداية النتيجة العامة هي الوثيقة المرجعية [24]، والمعادلات المستقاة منها مبينة بقوسين معقوفين [xx]. وغيرها من المعادلات مبينة بقوسين (y-I). ومن باب التبسيط وتفادي الخلط مع الرموز "المعيارية" تم تغيير بعض الرموز.

واللغة الأكثر شيوعاً الواردة في هذه الوثيقة تعطي لنا العرض الزمني الفعلي لمدة نبضة الخرج حيث تكون دالة طول الليفة L كما يلي:

[26] $$\sigma(L) = \sigma_0 \left[(1 + AC)^2 + A^2 \left(1 + V^2\right) + E^2 \left(1 + V^2 + C^2\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

الرموز التي لا تعكس الأبعاد هي:

[21، 22] $$V = WT, \qquad C = T\Delta\omega, \qquad A = \frac{L\,\partial^2 \beta}{T^2\,\partial\omega^2}, \qquad E = \frac{L\,\partial^3 \beta}{2T^3\,\partial\omega^3}$$

حيث β يمثل عدد موجات الانتشار. بالإضافة إلى أن المعادلة:

$$\sigma_0 = \frac{T}{\sqrt{2}} \qquad [27]$$

تمثل المدة الفعلية لنبضة الدخل (عروة الرجعة) عندما يساوي L الصفر، حيث نبضة الدخل وطيف المصدر ذو طول موجات غير متنوعة هما غوسيان بمقدار $\frac{1}{e}$ من نصفي عرض T (في زمن t) وW (وبتردد دائري ω)، بالتوالي. (لاحظ أن T ليس عرض فجوة زمنية لمعدل بتات ما) وبصفة عامة تكون نبضة الخرج غير غوسية. ويكون طور المجال الكهربائي للنبضة متنوعة طول الموجات كما يلي:

$$\omega_m + \Delta\omega \frac{t}{T} \qquad [1]$$

حيث يمثل ω_m التردد الدائري لمتوسط المصدر و$\Delta\omega$ زحزحة التردد أثناء النبضة.

3.I تغيير الترميز

والآن، نغير الترميز إلى ترميز قائم على مقاييس أكثر إشاعة وإلى أعراض ذات قيم فعلية.

ومشتقات عدد موجات الانتشار بالنسبة للتردد الدائري هي:

$$\frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} = -\frac{\lambda_m^2}{2\pi c} D_m, \qquad \frac{\partial^3 \beta}{\partial \omega^3} = \left(\frac{\lambda_m^2}{2\pi c}\right)^2 \left(S_m + \frac{2D_m}{\lambda_m}\right) \qquad (1\text{-I})$$

مقدرة عند قيمة ω_m. ويمثل D_m هنا عامل تشتت الليفة وS_m عامل ميل تشتت الليفة $\left(S = dD/d\lambda\right)$، بالتوالي، كلاهما مقدر بقيمة طول موجات متوسط المصدر $\lambda_m \left(= 2\pi c/\omega_m\right)$.

ولنحول العرض الطيفي للمصدر إلى عرض مصدر فعلي في تردد بصري بمقدار $\nu \left(= \omega/2\pi\right)$ حتى نحصل على:

$$\sigma_\nu = \frac{W}{2\pi\sqrt{2}} \qquad (2\text{-I})$$

وعلى المنوال نفسه، تكون التغييرات بالنسبة للمعادلة [1] كما يلي:

$$2\pi\left(\nu_m + \frac{t\Delta\nu}{\sigma_0\sqrt{2}}\right) \qquad (3\text{-I})$$

حيث يمثل ν_m التردد البصري لمتوسط المصدر و$\Delta\nu$ يمثل زحزحة التردد البصري أثناء النبضة.

وبالترميز الوارد أعلاه، تصبح الحدود في المعادلات [21، 22] كما يلي:

$$V = 4\pi\sigma_0\sigma_\nu, \qquad C + 2\pi\sqrt{2}\,\sigma_0\Delta\nu, \qquad A = -\frac{\lambda_m^2 D_m L}{4\pi c\sigma_0^2}, \qquad E = \left(\frac{\lambda_m^2}{2\pi c}\right)^2 \left(\frac{S_m + \frac{2D_m}{\lambda_m}}{8\sigma_0^3\sqrt{2}}\right) L \qquad (4\text{-I})$$

لكي تصبح المعادلة [26] للمدة الفعلية لنبضة الخرج غير الغوسي كما يلي:

$$\sigma^2 = \left(\sigma_0 - \frac{\lambda_m^2 \, D_m \, L\Delta\nu}{c\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{\lambda_m^2 \, D_m \, L}{c} \right)^2 \left[(4\pi\,\sigma_0)^{-2} + \sigma_\nu^2 \right] +$$

(5-I)

$$\frac{L^2}{8} \left\{ \left(\frac{\lambda_m^2}{c} \right)^2 \left(S_m + \frac{2\,D_m}{\lambda_m} \right) \left[(4\pi\,\sigma_0)^{-2} + \sigma_\nu^2 + \frac{1}{2}(\Delta\nu)^2 \right] \right\}^2$$

وتظل هذه النتيجة هي الأعم ولكن بترميز أكثر "شيوعاً". إذ أن هذه النتيجة تضم التشتت وميل التشتت وتنوع طول الموجات وأعراض نبضة الدخل وطيف المصدر.

4.I التبسيط من أجل حالة خاصة

مراعاة للأغراض الراهنة، يرجى تجاهل تنوع طول الموجات وتشتت الرتبة الثانية. وبالتالي يصبح لدينا في المعادلة I-4 ما يلي:

$$C, E = 0 \tag{6-I}$$

ومن باب تبسيط الترميز يرجى إسقاط الحرف السفلي m من أجل التقييم عند متوسط طول الموجات. وبالتالي تتقلص المعادلة لتصبح كما يلي:

$$\sigma^2(L) = \sigma_0^2 + \sigma_D^2(L) \tag{7-I}$$

حيث الاتساع الزمني الناجم عن التشتت اللوني يكون كالتالي:

$$\sigma_D = \frac{\lambda^2 \, DL}{c} \left[\sigma_\nu^2 + (4\pi\,\sigma_0)^{-2} \right]^{\frac{1}{2}} = DL \left[\sigma_\lambda^2 + \left(\frac{\lambda^2}{4\pi c\,\sigma_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{8-I}$$

حيث إن:

$$\sigma_\lambda = \frac{\lambda^2}{c} \sigma_\nu$$

كُتبت هذه الصيغة بتمثيلي التردد وطول الموجات على حد سواء، اللذين لهما علاقة بعرض القيمة الفعلية الطيفية للمصدر فيما يخص طول الموجات كما يلي:

$$\sigma_\lambda = \frac{\lambda^2}{c} \sigma_\nu \tag{9-I}$$

تأخذ المعادلة I-8 في عين الاعتبار أعراض النطاق لكل من تشكيل النبضة وطيف المصدر، التي يمكن مشاهدتها في المجال الترددي أو في مجال طول الموجات. فمثلاً، العبارة $(4\pi\,\sigma_0)^{-1}$ تمثل فعلاً عرض التردد البصري لنبضة الدخل.

وثمة حالتان محدودتان تطابقان النتائج المعلومة. فإذا هيمن العرض الطيفي للمصدر، تفضي المعادلة I-8 إلى النتيجة المعتادة ألا وهي:

$$\sigma_D \approx D\,L\,\sigma_\lambda \tag{10-I}$$

(تقابل هذه النتيجة المعادلة (24.4.2) ذات المرجع [25].) وفي حدود مصدر جد منسجم، تفضي المعادلة I-8 إلى ما يلي:

$$\sigma_D \approx \frac{\lambda^2 \, DL}{4\pi c \, \sigma_0} \tag{11-I}$$

وعليه يزداد الاتساع كلما تقلص عرض نبضة الدخل. (تقابل هذه النتيجة المعادلة (30.4.2) ذات المرجع [25].)

5-I اتساع النبضة المرتبط بمعدل البتات

لنعتبر نبضات ذات طول موجات غير متنوعة بمعدل بتات B. التبادل لهذا المعدل يكون في فجوته الزمنية. وفيما يتعلق بالعودة إلى الصفر، فإن نبضة الدخل لها مدة هي نسبة f (<1) من مدة نبضة اللاعودة إلى الصفر؛ وتسمى هذه النسبة بدورة التشغيل. وكحالة خاصة، وفيما يتعلق باللاعودة إلى الصفر يكون $f = 1$. وتبين المعادلة التالية:

$$N \, \sigma_0 = \frac{f}{B} \tag{12-I}$$

أن N جداء القيمة الفعلية لنبضة الدخل، من المفترض أن يناسب الفجوة الزمنية، التي تقلصها دورة التشغيل. وتعتمد قيمة عامل الأشكال بلا أبعاد N على نوع نبضة الدخل كما سيتم مناقشة ذلك لاحقاً. ومع المعادلة I-12 يصبح اتساع النبضة للمعادلة I-8 كما يلي:

$$\sigma_D = \frac{\lambda^2 \, DL}{c} \left[\sigma_\nu^2 + \left(\frac{N \, B}{4\pi \, f} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{13-I}$$

سنعمل من جانب التردد البصري بدلاً من طول الموجات. وهذا يبين بأن عرض التردد الفعلي هو مجموع القيمتين الفعليتين للعرض الطيفي والعرض الناجم عن معدل البتات، وأن الاتساع يزداد كلما ازداد هذان العرضان.

وعلى غرار ما ورد في توصية ITU-T G.957، فيما يتعلق بقيمة محددة لإعاقة القدرة ونسبة الخطأ في البتات في المستقبِل، هنالك حد أعلى للتداخل بين الرموز(ISI) المسموح به. ويحدث ذلك عندما يتعادل الحد الأقصى للاتساع مع نسبة من الفجوة الزمنية ε (<1) من الفجوة الزمنية لمعدل بتات اللاعودة إلى الصفر، يعني:

$$(\sigma_D)_{\max} = \frac{\varepsilon}{B} \tag{14-I}$$

وتسمى هذه النسبة قيمة إبسلون. وبالتالي تفضي المعادلتين I-13 وI-14 إلى ما يلي:

$$\left(\frac{N \, B}{4\pi \, f} \right)^2 + \sigma_\nu^2 = \left(\frac{\varepsilon \, c}{\lambda^2 \, B \, D \, L} \right)^2 \tag{15-I}$$

وهي نتيجة عامة تشمل أعراض نطاقات المصدر والتشكيل (لكن من دون تنوع في طول الموجات أو تشتت من المرتبة الثانية)، بالنسبة لأية قيم مفترضة لعامل الأشكال N ونسبة الفجوة الزمنية ε.

6.I قيمة عامل الأشكال

وفقاً لما تمت مناقشته بالتطابق مع المعادلة I-12، فإن مدة نبضة اللاعودة إلى الصفر هي $\frac{1}{B}$؛ نفترض أن $N = 4$ مما يعني أن ضعفي القيمة الفعلية الكاملة لعرض نبضة الدخل يجب أن تناسب مدة النبضة المسموح بها [25]. (مثالان: $N = 3{,}46$ يشمل كامل قدرة نبضة مربعة بلا عودة إلى الصفر، بينما $N = 4$ يشمل 95,4% من نبضة غوسية.)

والآن يمكن حل المعادلة I-15 للتشتت اللوني للنظام كما يلي:

$$DL = \frac{\varepsilon\, c}{\lambda^2\, B \sqrt{\left(\frac{B}{\pi\, f}\right)^2 + \sigma_\nu^2}} \tag{16-I}$$

وينخفض التشتت اللوني المسموح به كلما تقلصت دورة التشغيل بما أن عرض نطاق الإشارة يتزايد في الوقت ذاته. وبالنسبة للحالة المحدودة للمرسل ذي طيف واسع/معدل بتات منخفض، تعطينا المعادلتان I-15 وI-16 ما يلي:

$$D\, L\, B\, \lambda^2\, \sigma_\nu \approx c\, \varepsilon \qquad \text{or} \qquad D\, L\, B\, \sigma_\lambda \approx \varepsilon \tag{17-I}$$

وليس لدورة التشغيل أي تأثير عندما يكون طيف المصدر مهيمناً. وقد استخدم الحد الأيمن للعبارة في التوصية ITU-T G.957. وبالنسبة للحالة المحدودة للمرسل ذي طيف ضيق/ معدل بتات عال، تعطينا المعادلتان I-15 وI-16 ما يلي:

$$D\, L\, B^2\, \lambda^2 \approx \pi\, c\, \varepsilon\, f \tag{18-I}$$

وبالتالي، ينخفض الحد الأقصى للتشتت اللوني المسموح به بالنسبة لمعدل ثابت لبتات العودة إلى الصفر إلى جانب دورة التشغيل. ومرة أخرى، يعود السبب في ذلك إلى أن عرض نطاق التردد لإشارة العودة إلى الصفر يكون أكبر من عرض نطاق التردد لإشارة اللاعودة إلى الصفر عند نفس معدل البتات.

والمعادلتان الواردتان أعلاه تتعلقان بنبضات الدخل وأطياف المصادر التي تكون غوسية. وسنفترض أنهما تتطبقان من حيث القيمة الفعلية على عدد أكبر من الأشكال العامة في حدود حيز تقريبي معقول.

7-I النتيجة العامة والوحدات العملية

والآن تفضي المعادلتان I-16 وI-9 عموماً إلى ما يلي:

$$DL = \frac{\varepsilon\, c}{\lambda^2\, B \sqrt{\left(\frac{B}{\pi\, f}\right)^2 + \sigma_\nu^2}} \tag{19-I}$$

طيف واسع/معدل بتات منخفض:

$$\lambda^2\, B\, D\, L\, \sigma_\nu \approx \varepsilon\, c \qquad \text{or} \qquad B\, D\, L\, \sigma_\lambda \approx \varepsilon \tag{20-I}$$

طيف ضيق/معدل بتات عال:

$$\lambda^2\, B^2\, D\, L \approx \pi\, \varepsilon\, c\, f \tag{21-I}$$

وعادة ما يُستخدم العرض الكامل Γ بمقدار –20 dB في المواصفات. والتقريب الغوسي المستخدم في التوصية ITU-T G.957 يعطينا العلاقة بعرض القيمة الفعلية، كما يلي:

$$\Gamma \approx 6.0697\,\sigma \qquad \text{(22-I)}$$

وأيضاً، مع B Gbit/s وD بوحدة ps/nm·km وL بوحدة km (وبالتالي DL بوحدة ps/nm) وλ بوحدة µm (وليس بوحدة nm) وσ_ν بوحدة GHz وσ_λ بوحدة nm و$c \approx$ 299 792,458 km/s (وفقاً للتوصية ITU-T G.692)، تصبح المعادلة I-19 هي المعادلة I-9 في الفقرة 1.1.2.9. والتردد وأعراض المصادر في المعادلة I-9 مرتبطان بعلاقة في المعادلة 9-2.

وبالنسبة للحالة المحدودة التي يكون فيها طيف واسع/معدل بتات منخفض، نستخلص من المعادلتين I-20 وI-22 المعادلة I-3. وفيما يتعلق بالحالة المعاكسة، أي طيف ضيق/معدل بتات عال، تصبح المعادلة I-21 هي المعادلة 9-4.

بيبليوغرافيـــا

[1] IEEE Project P1394b, *Draft Standard for a High Performance Serial Bus (Guideline)*, Draft 0.90, 1999.

[2] T11 FC Project, *Fibre Channel, Physical Interfaces (FC-PI)*, Draft Rev. 8.1, 2000.

[3] IEEE Std. 802.3-2005, *Specific Requirements – Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications*.

[4] ISO/IEC 9314-3:1990, *Information processing systems – Fibre Distributed Data Interface (FDDI) – Part 3: Physical Layer Medium Dependent (PMD)*.

[5] T11.1 Draft High-Performance Parallel Interface – 6400 Mbit/s Optical Specification (HIPPI-6400-OPT), National Committee for Information Technology Standardization (NCTIS), 2000.

[6] PAUER (M.), WINZER (P.J.), LEEB (W.R.): Bit error probability reduction in direct detection optical receivers using RZ coding, *J. Lightwave Tech.*, Vol. 19, pp. 1255-1262, 2001.

[7] BÖCKL (M.): Diplomarbeit, *INTHFT*, TU Wien 2002.

[8] WINZER (P.J.), et al.: Effect of receiver design on PMD outage for RZ and NRZ, *Proc. OFC'02*, TuI1, pp. 46-48, 2002.

[9] ZITELLI (M.), MATERA (F.), SETTEMBRE (M.): Single-channel transmission in dispersion management links in conditions of very strong pulse broadening: application to 40 Gb/s signals on step-index fibers, *J. Lightwave Technol.*, Vol. 17, pp. 2498-2505, 1999.

[10] AGRAWAL (G.P.): Nonlinear fiber optics, *Academic Press*, San Diego, Cal. 1995.

[11] IANNONE (E.), MATERA (F.), MECOZZI (A.), SETTEMBRE (M.): Nonlinear optical communication networks, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York 1998.

[12] MATERA (F.), SCHIFFINI (A.), PIZZINAT (A.), GUGLIELMUCCI (M.): Esperimenti di trasmissione solitonica multicanale a 40 Gb/s: il progetto IST/ATLAS, *Atti Fotonica 2001*, relazione invitata, pp. 67-74.

[13] SPIRIT (D.M.), O'MAHONY (M.J.): High Capacity Optical Transmission Explained, *John Wiley & Sons Inc.*, 1995.

[14] TAKAHASHI (H.), ODA (K.), TOBA (H.): Impact of crosstalk in an arrayed-waveguide multiplexer on N × N optical interconnection, *J. Lightwave Technol.*, Vol. 14, No. 6, pp. 1097-1105, 1996.

[15] LIU (F.), RASMUSSEN (C.J.), PEDERSEN (R.J.S.): Experimental verification of a new model describing the influence of incomplete signal extinction ratio on the sensitivity degradation due to multiple interferometric crosstalk, *Photonics Technology Letters*, Vol. 11, No. 1, pp. 137-139, 1999.

[16] LEGG (P.J.), TUR (M.), ANDONOVIC (I.): Solution paths to limit interferometric noise induced performance degradation in ASK/Direct detection lightwave networks, *J. Lightwave Technol.*, Vol. 14, No. 9, pp. 1943-1954, 1996.

[17] IEC/TR 61282-1: 2000, *Fibre optic communication system design guides – Part 1: Single-mode digital and analogue systems*, Annex A: Statistical system design (statistical approach to gain and loss).

[18] KIKUSHIMA (K.), HOGARI (K.): Statistical dispersion budgeting method for single-mode fiber transmission systems, *J. Lightwave Technol.*, Vol. 8, No. 1, pp. 11-15 (1990).

[19] INOUE (K.), TOBA (H.): Fiber four-wave mixing in multi-amplifier systems with non-uniform chromatic dispersion, *J. Lightwave Technol.*, Vol. 13, No. 1, pp. 88-93 (1995).

[20] IEC SC86C/WG1 ST-20, *Statistical treatment of chromatic dispersion* (submitted by T.A. Hanson), 2000.

[21] BULOW (H.): System outage probability due to first and second order PMD, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 10, No. 5, pp. 696-698, 1998.

[22] MAKSOUDIAN (Y.L.): Probability and Statistics with Applications, *Scranton International Textbook Company*, 1969.

[23] BENEDETTO (S.), BIGLIERI (E.): Principles of digital transmission with wireless applications, (Chap.3.: Basic results from information theory), *Kluwer Academic Press*, New York 1999.

[24] MARCUSE (D.): Pulse distortion in single-mode fibers. 3: Chirped pulses, *Applied Optics*, Vol. 20, No. 20, pp. 3573-3579, 1981.

[25] AGRAWAL (G.P.): Fiber-Optic Communication Systems, 2nd Edition, *John Wiley & Sons, Inc.*, 1997.

[26] AGRAWAL (G.P.), ANTHONY (P.J.), SHEN (T.M.): Dispersion penalty for 1.3-μm lightwave systems with multimode semiconductor lasers, *J. Lightwave Tech.*, Vol. 6, No. 5, pp. 620-625, 1987.

سلاسل التوصيات الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات

السلسلة A تنظيم العمل في قطاع تقييس الاتصالات

السلسلة D المبادئ العامة للتعريفة

السلسلة E التشغيل العام للشبكة والخدمة الهاتفية وتشغيل الخدمات والعوامل البشرية

السلسلة F خدمات الاتصالات غير الهاتفية

السلسلة G أنظمة الإرسال ووسائطه والأنظمة والشبكات الرقمية

السلسلة H الأنظمة السمعية المرئية والأنظمة متعددة الوسائط

السلسلة I الشبكة الرقمية متكاملة الخدمات (ISDN)

السلسلة J الشبكات الكبلية وإرسال إشارات تلفزيونية وبرامج صوتية وإشارات أخرى متعددة الوسائط

السلسلة K الحماية من التداخلات

السلسلة L بناء الكبلات وغيرها من عناصر المنشآت الخارجية وإنشاؤها وحمايتها

السلسلة M إدارة الاتصالات، بما في ذلك شبكة إدارة الاتصالات وصيانة الشبكات

السلسلة N صيانة الدارات الإذاعية الدولية لإرسال البرامج الصوتية والتلفزيونية

السلسلة O مواصفات أجهزة القياس

السلسلة P جودة الإرسال الهاتفي والمنشآت الهاتفية وشبكات الخطوط المحلية

السلسلة Q التبديل والتشوير

السلسلة R التراسل الإبراقي

السلسلة S التجهيزات الانتهائية لخدمات الإبراق

السلسلة T تجهيزات مطرافية للخدمات التلماتية

السلسلة U التبديل الإبراقي

السلسلة V اتصالات البيانات على الشبكة الهاتفية

السلسلة X شبكات البيانات والاتصالات بين الأنظمة المفتوحة ومسائل الأمن

السلسلة Y البنية التحتية العالمية للمعلومات وملامح بروتوكول الإنترنت وشبكات الجيل التالي

السلسلة Z اللغات والجوانب العامة للبرمجيات في أنظمة الاتصالات

طبعت في سويسرا
جنيف، 2012