الاتحـــــــاد الـــدولـــــــي للاتصـــــــالات

ITU-T G.696.1

(2005/07)

قطـــاع تقييس الاتصـــالات
في الاتحاد الدولي للاتصالات

السلسلة G: أنظمة الإرسال ووسائطه والأنظمة والشبكات الرقمية

خصائص وسائط الإرسال – خصائص المكونات والأنظمة الفرعية البصرية

تطبيقات متلائمة طولياً لتعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM) بين الميادين

التوصيـــة ITU-T G.696.1

الاتحاد الدولي للاتصالات

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 الراديوية 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	G.699 – G.600
اعتبارات عامة	G.609 – G.600
أزواج كبلات متناظرة	G.619 – G.610
أزواج الكبلات البرية متحدة المحور	G.629 – G.620
الكبلات البحرية	G.649 – G.630
كبلات الألياف البصرية	G.659 – G.650
خصائص المكونات والأنظمة الفرعية البصرية	**G.699 – G.660**
تجهيزات مطرافية رقمية	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
المعطيات عبر شبكات النقل – الجوانب العامة	G.7999 – G.7000
جوانب شبكة الإثرنت عبر شبكات النقل	G.8999 – G.8000
شبكات النفاذ	G.9999 – G.9000

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

التوصيـــة ITU-T G.696.1

تطبيقات متلائمة طولياً لتعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM) بين الميادين

ملخص

تقدم هذه التوصية مواصفات الطبقة المادية لتطبيقات تعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM) بين الميادين (IaD) في الشبكات البصرية. ويرد وصف لهذه التطبيقات في ميدان إداري واحد في أنظمة خط متعدد القنوات من نقطة إلى نقطة بمضخم خط أو بدونه. وتقدم شفرات التطبيق الواردة في هذه التوصية مجموعة من فئات أنظمة الإرسال DWDM ووصلات الألياف البصرية. والغرض الأساسي من ذلك هو تمكين العديد من مقدمي الخدمات من تصميم أجهزة إرسال DWDM لوصلات بألياف بصرية متفقة مع هذه التوصية.

المصدر

وافقت لجنة الدراسات 15 (2005-2008) التابعة لقطاع تقييس الاتصالات في الاتحاد على التوصية ITU-T G.696.1 بتاريخ 14 يوليو 2005 وذلك بموجب الإجراء الوارد في التوصية ITU-T A.8.

تمهيـــد

الاتحاد الدولي للاتصالات وكالة متخصصة للأمم المتحدة في ميدان الاتصالات. 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، لم يكن 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 المعطيات الخاصة ببراءات الاختراع في مكتب تقييس الاتصالات (TSB).

© ITU 2005

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

جـــدول المحتـــويات

الصفحة

1 نطاق التطبيق 1
2 المراجع 1
1.2 المراجع المعيارية 1
2.2 المراجع الغنية بالمعلومات 2
3 المصطلحات والتعاريف 2
1.3 التعاريف 2
2.3 مصطلحات معرفة في توصيات أخرى 3
4 المختصرات 3
5 تصنيف السطوح البينية البصرية 4
1.5 التطبيقات 4
2.5 التشكيلات المرجعية 4
3.5 المصطلحات 5
6 الملائمة الطولية 6
7 المعلمات 6
1.7 الحدان الأقصى والأدنى لتوهين كل اتساع 6
2.7 نمط الليفة 7
3.7 مدى طول موجة التشغيل 7
4.7 الحدان الأدنى والأقصى للتشتت اللوني لكل اتساع 7
5.7 الحد الأدنى لمعامل لتشتت اللوني المحلي 8
6.7 الحد الأقصى لانحراف التشتت اللوني 8
7.7 الحد الأقصى لمهلة انتشار المجموعة التفاضلية 8
8.7 الحد الأدنى لخسارة العودة البصرية عند النقطة $MPI\text{-}S_M$ أو النقطة S_M 9
9.7 الحد الأقصى للانعكاسية المنفصلة بين النقطتين $MPI\text{-}S_M$ و$MPI\text{-}R_M$ 10
8 اعتبارات الأمان البصري 10
التذييل I – اعتبارات تتعلق بالحدود النظرية وبتصميم أنظمة تعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM) ... 11
1.I التكنولوجيات الأساسية وحدودها 11
2.I آثار أخرى تُحد من مسافة الإرسال 14
3.I تقنيات تستعمل لتخفيف حالات الانحطاط 16
4.I مثال عملي 18

التوصيـــة ITU-T G.696.1

تطبيقات متلائمة طولياً لتعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM) بين الميادين

1 نطاق التطبيق

تقدم هذه التوصية مواصفات الطبقة المادية لتطبيقات تعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM) بين الميادين (IaD) في الشبكات البصرية. وهذه المواصفات متاحة لأنظمة خطية متعددة القنوات من نقطة إلى نقطة بمضخم خط أو بدونه. والهدف منها هو تمكين التطبيقات المتلائمة طولياً داخل أحد الميادين الإدارية. أما الغرض الأساسي من ذلك فهو تمكين العديد من مقدمي الخدمات من تصميم أجهزة إرسال لوصلات بألياف بصرية متفقة مع هذه التوصية.

ولكي يتسنى عرض إطار لمواصفات التطبيقات بين الميادين (IaD)، تضم هذه التوصية نموذج مرجعي تنوعي لتطبيقات الطبقة المادية. والمواصفات منسقة وفقاً لشفرات التطبيق التي تراعي معلمات من قبيل مدى طول موجة تشغيل المضخمات البصرية وتوليف عدد القنوات وأصناف الزبائن ومسافات المدى وأنواع الألياف وتشكيلة الأنظمة.

وتركز الصيغة الأولية من هذه التوصية على التطبيقات بين الميادين (IaD) دون تدخل عناصر تبديل بصري. ومن المتوقع أن يتسنى للصيغ المقبلة و/أو التوصيات الجديدة الأخرى التطرق إلى تشكيلات أكثر تعقيداً من الطبقة المادية و/أو تدعيم مستوى أعلى من التواؤم. وقد تكون هذه التطبيقات بحاجة إلى معلمات مختلفة غير تلك المحددة لتشكيلة معينة من نقطة إلى نقطة.

وتفترض هذه التوصية أن الإشارات البصرية الرافدة المنقولة داخل قنوات بصرية هي إشارات رقمية وليست تماثلية. ومواصفات الأنظمة التي يمكن بموجبها نقل الإشارات البصرية الرافدة التماثلية هي مواصفات ستكون قيد المزيد من البحث.

2 المراجع

1.2 المراجع المعيارية

تضم التوصيات التالية وسائر المراجع الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) أحكاماً تشكل، من خلال الإشارة إليها في هذا النص، أحكاماً تتعلق بهذه التوصية. وكانت الطبعات المشار إليها في وقت نشرها سارية المفعول. وتخضع جميع التوصيات وغيرها من المراجع للتنقيح؛ ولذلك، يُشجع مستعملو هذه التوصية على تقصي إمكانية تطبيق أحدث طبعة من التوصيات وسائر المراجع المدرجة أدناه. وتُنشر بانتظام قائمة بتوصيات قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) السارية المفعول حالياً. ولا تمنح الإشارة إلى وثيقة معينة داخل هذه التوصية، بوصفها وثيقة مستقلة بحد ذاتها، صفة توصية لهذه الوثيقة.

- التوصية ITU-T G.650.2 (2005)، *تعاريف وطرائق اختبار النعوت الإحصائية وغير الخطية 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 (2003)، *خصائص الكبلات والألياف البصرية أحادية الأسلوب وذات التشتت المتخالف غير المعدوم*.
- التوصية ITU-T G.663 (2000)، *جوانب تتعلق بتطبيقات الأنظمة الفرعية والمكبرات البصرية* زائداً التعديل 1 (2003)، *تعديلات على التذييل الثاني*.
- التوصية ITU-T G.664 (2003)، *إجراءات ومتطلبات السلامة البصرية المطبقة في أنظمة النقل البصرية* زائداً التعديل 1 (2005).
- التوصية ITU-T G.665 (2005)، *الخصائص التنوعية لمضخمات رامان ونظم رامان الفرعية المضخمة*.

- التوصية ITU-T G.691 (2003)، *السطوح البينية البصرية للأنظمة STM-64 وSTM-256 وأنظمة التراتب الرقمي المتزامن الأخرى ذات المكبرات البصرية* زائداً التعديل 1 (2005).
- التوصية ITU-T G.707/Y.1322 (2003)، *السطح البيني لعقدة الشبكة للتراتب الرقمي المتزامن (SDH)* زائداً التعديل 1 (2004) والتصويب 1 (2004).
- التوصية ITU-T G.709/Y.1331 (2003)، *السطوح البينية في شبكة النقل البصري (OTN)* زائداً التعديل 1 (2003).
- التوصية ITU-T G.872 (2001)، *معمارية شبكات النقل البصري* زائداً التعديل 1 (2003) والتصويب 1 (2005).
- التوصية ITU-T G.957 (1999)، *السطوح البينية البصرية للمعدات والأنظمة المتعلقة بالتراتب الرقمي المتزامن* زائداً التعديل 1 (2003) والتعديل 2 (2005).
- التوصية ITU-T G.959.1 (2003)، *السطوح البينية للطبقة المادية لشبكة النقل البصرية*.
- الوثيقة 60825-1 الصادرة عن اللجنة الكهرتقنية الدولية (IEC) (2001)، *الجزء 1 – سلامة أجهزة الليزر: تصنيف المعدات والمتطلبات ودليل المستعمل*.
- الوثيقة 60825-2 الصادرة عن اللجنة الكهرتقنية الدولية (IEC) (2005)، *الجزء 2 – سلامة أجهزة الليزر: سلامة أنظمة الاتصالات بالألياف البصرية (OFCS)*.
- الوثيقة 61292-4 الصادرة عن اللجنة الكهرتقنية الدولية (IEC) (2004)، *الجزء 4 – المكبرات البصرية: الحد الأقصى المسموح به للقدرة البصرية للاستعمال السليم الخالي من الأضرار للمكبرات البصرية بما فيها مكبرات رامان*.

2.2 المراجع الغنية بالمعلومات

- التوصية ITU-T G.975.1 (2004)، *التصحيح الأمامي للأخطاء في الأنظمة البحرية لتعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM) بمعدل بتات عالي*.
- توصيات السلسلة G الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T) – الإضافة 39 (2003)، *اعتبارات بشأن تصميم الأنظمة البصرية وهندستها*.

3 المصطلحات والتعاريف

1.3 التعاريف

تعرف هذه التوصية المصطلحات التالية:

1.1.3 صنف الزبون: يشير صنف الزبون إلى صنف معين لمعدلات بتات إشارة الزبون لإشارة بصرية رافدة واحدة موضوعة داخل قناة بصرية لنقلها عبر الشبكة البصرية. ومعدل بتات الزبون في سياق هذه التوصية هو عبارة عن معدل بتات إشارة رقمية مستمرة قبل إضافة أية بايتات زائدة بتصحيح أمامي للخطأ (FEC). وفي حال كانت الإشارة مطابقة للتوصية G.707/Y.1322 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات، فإن هذا المعدل هو معدل وحدة k لمعطيات القناة البصرية (ODUk).

2.1.3 صنف الزبون 1.25G: ينطبق هذا الصنف على إشارة رقمية مستمرة بمعدل بتات زبون يتراوح من حيث القيمة الاسمية بين 622 Mbit/s إلى 1,25 Gbit/s. ويشمل هذا الصنف (1,25G) إشارة بمعدل بتات STM-4 وفقاً للتوصية G.707/Y.1322 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات.

3.1.3 صنف الزبون 2.5G: ينطبق على إشارة رقمية مستمرة بمعدل بتات زبون يتراوح من حيث القيمة الاسمية بين 622 Mbit/s إلى 2,5 Gbit/s. ويشمل صنف الزبون 2.5G إشارة بمعدل بتات STM-16 وفقاً للتوصية G.707/Y.1322

الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات ومعدل بتات الوحدة 1 لمعطيات القناة البصرية (ODU1) وفقاً للتوصية G.709/Y.1331 الصادرة عن نفس القطاع (ITU-T).

4.1.3 صنف الزبون 10G: ينطبق الصنف على إشارة رقمية مستمرة بمعدل بتات زبون يتراوح من حيث القيمة الاسمية بين 2,4 إلى 10,5 Gbit/s. ويتضمن هذا الصنف (10G) إشارة بمعدل بتات STM-64 وفقاً للتوصية G.707/Y.1322 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات ومعدل بتات الوحدة 2 لمعطيات القناة البصرية (ODU2) وفقاً للتوصية G.709/Y.1331 الصادرة عن نفس القطاع (ITU-T).

5.1.3 صنف الزبون 40G: ينطبق على إشارة رقمية مستمرة بمعدل بتات زبون يتراوح من حيث القيمة الاسمية بين 9,9 إلى 42 Gbit/s. ويشمل هذا الصنف 40G إشارة بمعدل بتات STM-256 وفقاً للتوصية G.707/Y.1322 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات ومعدل بتات الوحدة 3 لمعطيات القناة البصرية (ODU3) وفقاً للتوصية G.709/Y.1331 الصادرة عن نفس القطاع (ITU-T).

2.3 مصطلحات معرفة في توصيات أخرى

تستعمل هذه التوصية المصطلحات التالية المحددة في التوصية G.872 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات، وهي:

- سطح بيني بين الميادين (IaDI)؛
- إعادة توليد 3R.

وتستعمل هذه التوصية التعبير التالي المحدد في التوصية ITU-T G.709/Y.1331، وهو:

- وحدة معطيات قناة بصرية (ODUk).

وتستعمل هذه التوصية المصطلح التالي المحدد في التوصية ITU-T G.959.1، وهو:

- إشارة بصرية رافدة.

4 المختصرات

تستعمل هذه التوصية المختصرات التالية:

3R	(إعادة توليد) إعادة تضخيم وإعادة تشكيل وإعادة توقيت
ASE	إرسال تلقائي مضخم
BER	نسبة الخطأ في البتات
DCM	وحدة تعويض التشتت
DEMUX	مزيل تعدد الإرسال
DGD	مهلة انتشار المجموعة التفاضلية
DRA	تضخيم رامان الموزع
DWDM	تعدد إرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات
EDFA	مضخم ألياف مقواة بالإربيوم
FEC	تصحيح أمامي للخطأ
FWM	خلط الموجات الأربع
IaD	بين الميادين
IaDI	سطح بيني بين الميادين
MPI	سطح بيني رئيسي على المسير

MUX معدد إرسال
NCG صافي كسب التشفير
NRZ اللاعودة إلى الصفر
OA مضخم بصري
ODUk وحدة معطيات قناة بصرية (k = 1 أو 2 أو 3)
OPM مرقاب القدرة البصرية
OSA محلل طيف بصري
OSNR نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية
PDG كسب معتمد على الاستقطاب
PDL خسارة معتمدة على الاستقطاب
PMD تشتت بأسلوب الاستقطاب
PMDq معلمة إحصائية لتشتت الوصلة بأسلوب الاستقطاب (PMD)
RZ العودة إلى الصفر
SPM تشكيل ذاتي الطور
VOA موهن بصري متغير
WDM تعدد إرسال بتقاسم طول الموجات
XPM تشكيل متقاطع الطور

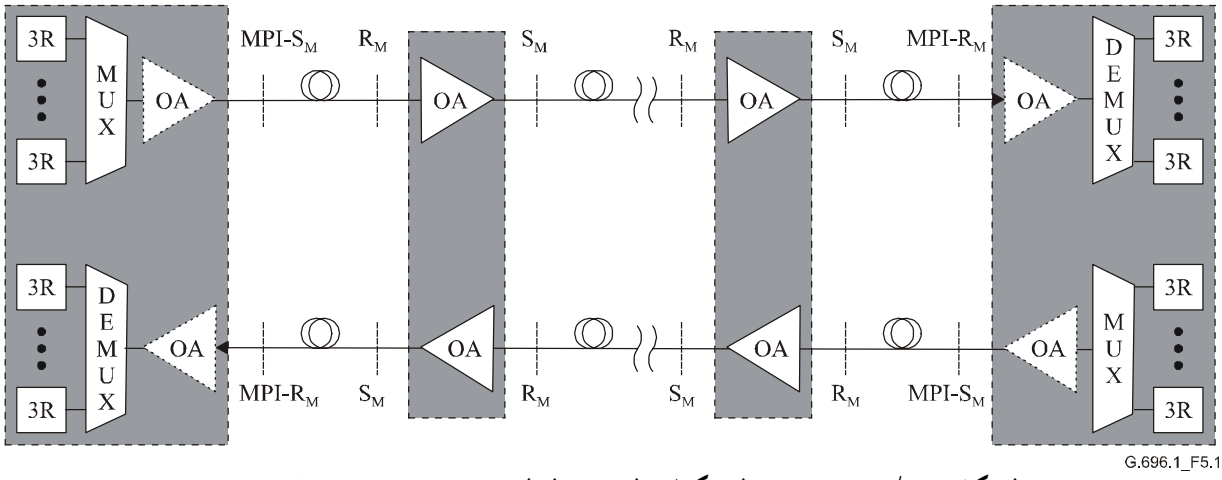
5 تصنيف السطوح البينية البصرية

1.5 التطبيقات

تتطرق هذه التوصية إلى تطبيقات متلائمة طولياً لتعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM) بين الميادين بمضخمات خط بصري أو بدونه. ويمكن استعمال أنماط مختلفة من المضخمات الخطية، وخاصة مضخمات الخط المنفصلة التي يرد وصفها في التوصية ITU-T G.663، أو مضخمات رامان وفقاً للتوصية ITU-T G.665.

2.5 التشكيلات المرجعية

لأغراض هذه التوصية، يبين الشكل 5-1 النقاط المرجعية ذات الصلة القابلة للانطباق على تطبيقات السطح البيني بتعدد الإرسال DWDM بين الميادين.



الشكل G.696.1/5-1 – التشكيلة المرجعية لنظام DWDM متعدد الاتساعات

والنقاط المرجعية المبينة في الشكل 5-1 محددة أدناه باستعمال نفس المصطلحات الواردة في التوصية ITU-T G.959.1، وهي:

- $MPI\text{-}S_M$ هي نقطة مرجعية (متعددة القنوات) على ليفة بصرية تأتي مباشرة بعد الواصل البصري لخرج السطح البيني لنقل أحد عناصر الشبكة البصرية؛
- $MPI\text{-}R_M$ هي نقطة مرجعية (متعددة القنوات) على ليفة بصرية تأتي مباشرة قبل الواصل البصري لدخل السطح البيني لنقل أحد عناصر الشبكة البصرية؛
- S_M هي نقطة مرجعية تأتي مباشرة بعد الواصل البصري لخرج مضخم بصري (OA) لخط متعدد القنوات؛
- R_M هي نقطة مرجعية على ليفة بصرية تأتي مباشرة قبل الواصل البصري لدخل مضخم بصري (OA) لخط متعدد القنوات.

3.5 المصطلحات

بنية ترميز شفرات التطبيق هي كالآتي:

n.B-xWF(s)

حيث:

n الحد الأقصى لعدد القنوات المدعومة بشفرة التطبيق،

B يشير إلى صنف الزبون:
- صنف الزبون 1.25G يشير إلى معدل بتات زبون يتراوح مداه بين 622 Mbit/s إلى 1,25 Gbit/s؛
- صنف الزبون 2.5G يدل على معدل بتات زبون يتراوح مداه بين 622 Mbit/s إلى 2,5 Gbit/s؛
- صنف الزبون 10G يشير إلى معدل بتات زبون يتراوح مداه بين 2,4 إلى 10,5 Gbit/s؛
- صنف الزبون 40G يدل على معدل بتات زبون يتراوح مداه بين 9,9 إلى 42 Gbit/s.

x عدد الاتساعات المسموح بها ضمن شفرة التطبيق،

W حرف يدل على توهين الاتساع، من قبيل ما يلي:
S يدل على مدى قصير (يصل إلى 11 dB من توهين الاتساع)،
L يدل على مدى بعيد (يبلغ 22 dB من توهين الاتساع)،
V يدل على مدى بعيد للغاية (يصل إلى 33 dB من توهين الاتساع)،

F نوع الليفة (بكامل التفاصيل)، مثل G.652.A، ... G.652.D التي يُشار إليها على التوالي بواسطة "652A" ... "652D" في شفرة التطبيق،

s يدل على مدى طول موجة التشغيل على أساس نطاقات الطيف (انظر الإضافة ITU-T G.39:

s	الواصف	المدى (nm)
O	أصلي	1260 إلى 1360
E	موسع	1360 إلى 1460
S	طول موجي قصير	1460 إلى 1530
C	تقليدي	1530 إلى 1565
L	طول موجي طويل	1565 إلى 1625

وإذا استُعمل أكثر من نطاق طيفي واحد، يقابل الحرف s حينئذ حروف النطاقات المفصولة بالعلامة "+" ، فمثلاً يقابل الحرف s الحرفين"C+L" في تطبيق يستدعي استعمال النطاقين C وL معاً. أما في الحالات التي يستعمل فيها أكثر من نطاق طيفي واحد، ترتب الحروف المستعملة من الأطوال الموجية الأدنى إلى الأعلى.

ويُضاف الحرف R في نهاية شفرة التطبيق في حالة نظام الإرسال DWDM بمضخم رامان ومن ثم يكتب هذا الحرف كما يلي:

n.B-xWF(s)R

وقد يبدو أحد أمثلة التطبيقات المحددة على النحو التالي:

40,10G-20L652A(C)R

ويشير هذا التطبيق إلى نظام ذي 40 قناة بإشارات من صنف الحمولة النافعة 10G ومدى اتساع الليفة G.652A تلائم من حيث الاستعمال مضخمات رامان. ويستعمل النطاق C بوصفه مدى طول موجة التشغيل.

6 الملائمة الطولية

التطبيقات المشمولة بهذه التوصية ملائمة طولياً وفقاً للتعريف الوارد في الإضافة ITU-T G.39.

7 المعلمات

شفرات التطبيق المستعملة في هذه التوصية ((n.B-xWF(s)) مكونة من جزأين منفصلين، الأول "n.B" ذو صلة بنظام الإرسال البصري والثاني "xWF(s)" يتصل بالبنية التحتية لليفة.

وبالنظر إلى أن هذه التوصية تشمل الأنظمة المتلائمة طولياً، فإن المعلمات الواردة في الجدول 7-1 هي معلمات لا تتعلق سوى بالبنية التحتية لليفة، فيما عدا الحالات التي يؤثر فيها الجزء المتصل بنظام إرسال شفرة التطبيق على متطلبات الليفة.

الجدول G.696.1/1-7 – معلمات ألياف تطبيقات DWDM بين الميادين

المعلمة	البند
الحد الأقصى لتوهين كل اتساع	1.7
الحد الأدنى لتوهين كل اتساع	1.7
نوع الليفة	2.7
مدى طول موجة التشغيل	3.7
الحد الأدنى للتشتت اللوني لكل اتساع	4.7
الحد الأقصى للتشتت اللوني لكل اتساع	4.7
الحد الأدنى لمعامل التشتت اللوني المحلي	5.7
الحد الأقصى لانحراف التشتت اللوني	6.7
الحد الأقصى لمهلة انتشار المجموعة التفاضلية	7.7
الحد الأدنى لخسارة العودة البصرية عند النقطة MPI-S_M أو النقطة S_M	8.7
الحد الأقصى للانعكاسية المنفصلة بين النقطتين MPI-S_M وMPI-R_M	9.7

1.7 الحدان الأقصى والأدنى لتوهين كل اتساع

يرد الحدان الأقصى والأدنى لحالات توهين الاتساع في الجدول 7-2.

الجدول G.696.1/2-7 – الحدان الأقصى والأدنى لحالات توهين كل اتساع

المعلمة	الوحدات	قيمة "W" في شفرة التطبيق		
		S	L	V
الحد الأقصى لتوهين كل اتساع	dB	11	22	33
الحد الأدنى لتوهين كل اتساع	dB	قيد البحث (ffs)	11	22

2.7 نمط الليفة

تتضمن هذه التوصية جميع أنماط الألياف الواردة في سلسلة التوصيات ITU-T G.65x. ويشمل ذلك حالياً الأنواع المبينة في الجدول 7-3.

الجدول 7-3/G.696.1 – أنواع الألياف

G.656	G.655.A	G.654.A	G.653.A	G.652.A
	G.655.B	G.654.B	G.653.B	G.652.B
	G.655.C	G.654.C		G.652.C
				G.652.D

3.7 مدى طول موجة التشغيل

يتألف مدى طول موجة التشغيل من نطاق واحد أو أكثر من نطاقات طول الموجة حسب ما هو محدد في الإضافة ITU-T G.39. انظر الجدول 7-4.

الجدول 7-4/G.696.1 – مدى أطوال الموجات

s	الواصف	المدى (nm)
O	أصلي	1260 إلى 1360
E	ممتد	1360 إلى 1460
S	طول موجي قصير	1460 إلى 1530
C	تقليدي	1530 إلى 1565
L	طول موجي طويل	1565 إلى 1625

4.7 الحدان الأدنى والأقصى للتشتت اللوني لكل اتساع

يمكن حساب الحدين الأدنى والأقصى (باستثناء أي تعويض عن التشتت) باستعمال معلمات مقيسة للألياف (مستمدة من توصيات السلسة G.65x) أو بالإمكان قياس هذا التشتت. وغالباً ما يكون قياس التشتت الخيار الأكثر عملية في أنظمة 40G و10G التي لديها اتساعات كثيرة.

ويمكن حساب الحدين الأدنى والأعلى للتشتت اللوني لكل اتساع بأخذ معلمات مقيسة للألياف من توصيات السلسة G.65x، زائداً معلمات إضافية تستعمل في هذه التوصية. وترد أدناه تفاصيل إجراء هذا القياس: يُعبر عن الحد الأقصى للتشتت اللوني لكل اتساع، $CD_{\max}^{(span)}$، بالمعادلة التالية:

$$CD_{\max}^{(span)} = D_{\max}(s) \cdot L_{\max}^{(span)}$$

حيث:

$$L_{\max}^{(span)} = \frac{A_{\max}(W)}{\alpha(s)}$$

ويعين الحرف "W" الحد الأقصى لطول الاتساع مع الحد الأقصى لتوهينه $A_{max}(W)$ (انظر الجدول 7-2)، ومعامل التوهين $\alpha(s)$ ضمن مدى طول موجة التشغيل "s" (انظر البند 5-3)، حيث $\alpha(s)$ هي "القيمة النموذجية للوصلة" المحددة في سلسلة التوصيات G.65x. ويشير الرمز $D_{max}(s)$ إلى الحد الأقصى لمعامل التشتت اللوني ضمن مدى طول موجة التشغيل "s".

وبالمثل، يُعبر عن الحد الأدنى للتشتت اللوني لكل اتساع، $CD_{\min}^{(span)}$، بالمعادلة التالية:

$$CD_{\min}^{(span)} = D_{\min}(s) \cdot L_{\min}^{(span)}$$

حيث:

$$L_{\min}^{(span)} = \frac{A_{\min}(W)}{\alpha(s)}$$

ويعين الحرف "W" الحد الأدنى لطول الاتساع مع الحد الأدنى لتوهينه $A_{max}(W)$ (انظر الجدول 7-2)، ومعامل التوهين $\alpha(s)$ ضمن مدى طول موجة التشغيل "s" (انظر البند 5-3)، حيث $\alpha(s)$ هي "القيمة النموذجية للوصلة" المحددة في سلسلة التوصيات G.65x. ويشير الرمز $D_{min}(s)$ إلى الحد الأدنى لمعامل التشتت اللوني ضمن مدى طول موجة التشغيل "s".

ويمكن الاطلاع على معاملات التشتت اللوني لجميع أنواع الألياف التي تستعمل "نعوت الوصلة" في سلسلة التوصيات ITU-T G.65x. ويعين الجدول 7-2 الحدود القصوى والدنيا لحالات توهين الاتساع.

5.7 الحد الأدنى لمعامل لتشتت اللوني المحلي

عند النظر في جودة أداء فرادى القنوات في نظام إرسال متعدد الاتساعات، يجب الحفاظ على مستوى التشتت اللوني المتبقي من طرف إلى طرف (بما في ذلك التعويض) ضمن الحدود الصارمة التي تسمح بتشغيل النظام على نحو مقبول.

ومع ذلك، ولتشغيل أنظمة الإرسال DWDM بشكل مقبول على مسافات طويلة بمباعدة ضئيلة بين القنوات (أي 100 GHz)، ينبغي أيضاً تعيين قيمة بحد أدنى لمعامل التشتت المحلي لليفة الإرسال من أجل تفادي الآثار غير الخطية المترتبة على ذلك من قبيل خلط الموجات الأربع (FWM) والتشكيل متقاطع الطور (XPM).

وقيمة معامل التشتت اللوني المحلي اللازمة لتفادي حالات الانحطاط الكبيرة الناجمة عن هذه الآثار هي قيمة تتوقف على عوامل كثيرة تتعلق بتصميم نظام الإرسال مثل المباعدة بين القنوات، ومستوى القدرة، وطول الوصلة، وما إلى ذلك، وهي بالتالي لا تندرج ضمن نطاق هذه التوصية.

ويرد المزيد من التفاصيل عن هذه الآثار غير الخطية في التوصية G.663 وفي الإضافة 39 الصادرتين عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T)، ويناقش البند 3.I بعض طرائق تخفيف هذه الآثار.

6.7 الحد الأقصى لانحراف التشتت اللوني

تخضع متطلبات الحد الأقصى لانحراف التشتت اللوني للمزيد من البحث.

7.7 الحد الأقصى لمهلة انتشار المجموعة التفاضلية

تنطبق مهلة انتشار المجموعة التفاضلية (DGD) على كامل الوصلة بين المرسل (المبين على أنه "3R" الموصول بمعدد الإرسال (MUX) المبين في الشكل 5-1) والمستقبل المطابق ("3R" الموصول بمزيل تعدد الإرسال (DEMUX) المبين في الشكل 5-1).

ويمكن استعمال المعادلة الواردة أدناه لحساب الحد الأقصى للمهلة DGD لوصلة معينة (تضم العديد من المكونات وأقسام الليفة) مع تحديد احتمال تجاوز هذه المهلة.

$$DGD\max_{link} = \left[DGD\max_{F}^{2} + S^{2} \sum_{i} PMD_{Ci}^{2} \right]^{1/2}$$

حيث:

$DGDmax_{link}$ الحد الأقصى لمهلة انتشار المجموعة التفاضلية (DGD) للوصلة (ps)

$DGDmax_{F}$ الحد الأقصى للمهلة DGD لكبل بألياف بصرية متفرعة (ps)

S عامل ضبط توزيع ماكسويل (انظر الجدول 7-5)

PMD_{Ci} قيمة التشتت بأسلوب الاستقطاب (PMD) للمكون ith (ps)

وتفترض هذه المعادلة أن إحصاءات المهلة DGD الآنية تقريبية بواسطة توزيع ماكسويل، مع احتمال تجاوز هذه المهلة الآنية الحد الأقصى لمهلة انتشار المجموعة التفاضلية (DGD) للوصلة ($DGDmax_{link}$) التي تتحكم في قيمة عامل ضبط توزيع ماكسويل المستنبطة من الجدول 7-5.

الجدول 7-5/G.696.1 – قيم واحتمالات S

نسبة القيمة القصوى إلى القيمة المتوسطة (S)	احتمال تجاوز قيمة القيمة القصوى	نسبة حد القيمة القصوى إلى القيمة المتوسطة (S)	احتمال تجاوز القيمة القصوى
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	$5{,}1 \times 10^{-8}$		

وبالإمكان الاطلاع على المزيد من التفاصيل في التوصيتين ITU-T G.650.2 وITU-T G.691. ويمكن قياس قيمة الحد الأقصى للمهلة DGD لكبل بألياف بصرية متفرعة ($DGDmax_F$) (الحد الأقصى للمهلة DGD الناجم عن الجزء الليفي)، والحل الآخر هو إمكانية حساب حد أعلى لطول ليفة معينة باستعمال معامل المعلمة الإحصائية لتشتت الوصلة بأسلوب الاستقطاب (PMDQ) في التوصية المعنية بهذه الليفة.

وترد حدود المهلة DGD لكامل الوصلة في الجدول 7-6 لأنظمة اللاعودة إلى الصفر (NRZ) وفي الجدول 7-7 لأنظمة العودة إلى الصفر (RZ).

الجدول 7-6/G.696.1 – الحد الأقصى لمهلة انتشار المجموعة التفاضلية على وصلة لأنظمة NRZ

صنف الزبون	الوحدات	القيمة
1.25G	Ps	240
2.5G	Ps	120
10G	ps	30
40G	ps	7,5

الجدول 7-7/G.696.1 – الحد الأقصى لمهلة انتشار المجموعة التفاضلية على وصلة لأنظمة RZ

صنف الزبون	الوحدات	القيمة
1.25G	Ps	قيد البحث (ffs)
2.5G	Ps	قيد البحث (ffs)
10G	ps	قيد البحث (ffs)
40G	ps	قيد البحث (ffs)

8.7 الحد الأدنى لخسارة العودة البصرية عند النقطة $MPI\text{-}S_M$ أو النقطة S_M

تنجم الانعكاسات عن حالات انقطاع دليل الانكسار على امتداد المسير البصري. وإن لم يجر التحكم فيها، فبمقدورها أن تعرض أداء النظام للانخطاط بفعل ما تخلفه من آثار تؤدي إلى اضطراب تشغيل المصدر أو المضخم البصري، أو بفعل انعكاسات متعددة تتسبب في حدوث ضوضاء لقياس التداخل عند المستقبل. ويتم التحكم في الانعكاسات عبر المسير البصري عن طريق تعيين ما يلي:

الحد الأدنى لخسارة العودة البصرية لتركيب الكبل في نقطة الإرسال المرجعية (مثل النقطة $MPI\text{-}S_M$، النقطة S_M)، بما في ذلك جميع الواصلات؛

والحد الأقصى للانعكاس المنفصل بين نقاط الإرسال المرجعية (مثل النقطة $MPI\text{-}S_M$، النقطة S_M) ونقاط الاستقبال المرجعية (مثل النقطة $MPI\text{-}R_M$، النقطة R_M).

وتشير الانعكاسية إلى الانعكاس الآتي من أي نقطة انعكاس منفصل وحيدة، بينما تتمثل خسارة العودة البصرية في نسبة القدرة البصرية الساقطة إلى إجمالي القدرة البصرية العائدة من الليفة ككل، بما في ذلك الانعكاسات المنفصلة والانتثار الخلفي الموزع على حد سواء مثل انتثار رايلي.

ويصف التذييل G.957/I طرائق قياس حالات الانعكاس. ولأغراض قياس الانعكاسية وخسارة العودة، فقد افتُرض أن النقطتين MPI-S وMPI-R هما نقطتان مطابقتان لطرف كل مقبس من مقابس الواصلات. ومن المسلم به أن ذلك لا يشمل الأداء الفعلي لانعكاس الواصلات المعنية في نظام التشغيل. ويُفترض أن يكون لهذه الانعكاسات القيمة الاسمية لانعكاس نمط معين من الواصلات المستعملة.

والحد الأدنى لخسارة العودة البصرية لتركيب الكبل في النقطة $MPI\text{-}S_M$ أو النقطة S_M يحدد بقيمة تبلغ –24 dB.

9.7 الحد الأقصى للانعكاسية المنفصلة بين النقطتين $MPI\text{-}S_M$ و$MPI\text{-}R_M$

تُعرف الانعكاسية البصرية على أنها نسبة القدرة البصرية المنعكسة عند نقطة ما، إلى القدرة البصرية الساقطة على هذه النقطة. وتناقش التوصية ITU-T G.957 موضوع التحكم في الانعكاسات باستفاضة. ويجب أن يكون الحد الأقصى لعدد الواصلات أو نقاط الانعكاس المنفصل الأخرى التي يمكن أن يشملها المسير البصري (من قبيل أرتال التوزيع، أو مكونات تعدد الإرسال بتقاسم طول الموجات (WDM))، حداً يسمح ببلوغ كامل الخسارة المحددة للعودة البصرية. وإذا تعذر ذلك باستعمال واصلات تستوفي الحد الأقصى للانعكاس المنفصل المذكور هنا، ينبغي حينئذ استعمال واصلات بأداء أفضل من حيث الانعكاس. وكبديل عن ذلك، يجب تخفيض عدد الواصلات. وقد تقتضي الضرورة أيضاً الحد من عدد الواصلات أو استعمال واصلات بأداء انعكاسية محسن من أجل تفادي حالات الانخطاط غير المقبولة الناجمة عن تعدد الانعكاسات.

والحد الأقصى للانعكاسية المنفصلة بين النقطتين $MPI\text{-}S_M$ و$MPI\text{-}R_M$ يحدد بقيمة تبلغ –27 dB.

8 اعتبارات الأمان البصري

مع أن هذه التوصية تتطرق إلى البنية التحتية للألياف ولا تحدد خصائص أنظمة الإرسال البصري التي تستعمل هذه البنية، يمكن لهذه الأنظمة أن تعمل كما ينبغي بمستويات قدرة بصرية عالية نسبياً. وبالإمكان الرجوع إلى التوصية ITU-T G.664 والوثائق 1-60825 و2-60825 والتقرير التقني (TR) 4-61292 للجنة الكهرتقنية الدولية (IEC) للاطلاع على معلومات بخصوص اعتبارات الأمان البصري.

التذييل I

اعتبارات تتعلق بالحدود النظرية وبتصميم أنظمة تعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM)

يقدم هذا التذييل بعض الحدود المادية والتكنولوجية على المسافات التي يمكن تحقيقها للوصلات المحددة بواسطة أنظمة تعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM) بين الميادين.

ويناقش البند 1.I القيود الأساسية المفروضة على ذلك من جانب ضوضاء الإرسال التلقائي المضخم (ASE) والتشتت بأسلوب الاستقطاب (PMD). ويليه البند 2.I الذي يناقش آثاراً أخرى تحد من مسافات الوصلات داخل أنظمة عملية، ويرد في البند 3.I وصف لتقنيات تخفيف هذه الآثار. وأخيراً، يرد في البند 4.I مثال على الأداء النموذجي الذي يسمح بالحصول على التكنولوجيا المتيسرة حالياً.

1.I التكنولوجيات الأساسية وحدودها

يشير هذا البند إلى بعض العوامل الأساسية التي تقيد تطبيقات تعدد الإرسال DWDM من حيث جدواها التكنولوجية.

ويفترض أن المضخمات البصرية تعوض عن التوهين البصري عبر الوصلة بينما يُعوض عن التشتت اللوني بمعوضات تشتت لوني.

وضوضاء الإرسال التلقائي المضخم (ASE) والتشتت بأسلوب الاستقطاب (PMD) هما من أهم حالات الانحطاط التي تحد من قدرة ومسافة إرسال تطبيقات DWDM.

وتشير المناقشة الواردة في البند 1.I إلى التشفير الخطي للاعودة إلى الصفر (NRZ) لأنه تشفير شائع الاستعمال في تطبيقات تعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM). ويمكن أن تعطي الحالات الأخرى لتشفير الخطوط نتائج مختلفة وقد تكون ملائمة أكثر لحالات معينة (يناقش البند 3.I بعض البدائل للتشفير الخطي NRZ).

1.1.I ضوضاء الإرسال التلقائي المضخم (ASE)

تأثير ضوضاء الإرسال التلقائي المضخم (ASE) هو تأثير يتسم أساساً بخصائص نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR). ومثلما هو مبين في الإضافة 39 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات (ITU-T)، فإن النسبة OSNR لنظام مرجعي متعدد القنوات باتساعات x ذي مضخم تعزيز ومضخمات خطية x-1 ومضخمات سابقة هي نسبة يُحصل عليها من المعادلة التالية:

$$\text{OSNR} = P_{out} - L - NF_{eff} - 10\cdot\log\left(x + \frac{10^{\frac{G_{BA}}{10}}}{10^{\frac{L}{10}}}\right) - 10\cdot\log[h\cdot\nu\cdot\nu_r] \quad \text{(1-I)}$$

حيث P_{out} قدرة خرج (كل قناة) لمضخمات التعزيز ومضخمات الخط محسوبة بالوحدة dBm، وL هي خسارة الاتساع بالوحدة dB (على فرض أنها مساوية لكسب مضخمات الخط (G_{LA}))، وG_{BA} هو كسب المضخم البصري للتعزيز محسوباً بالوحدة dB، وNF_{eff} هو عامل ضوضاء المضخم البصري محسوباً بالوحدة dB، وh ثابت بلانك (محسوباً بالوحدة mJ*s حتى يتفق مع قدرة الخرج (P_{out}) المحسوبة بالوحدة dBm)، وν هو التردد البصري محسوباً بالهرتز (Hz)، وν_r هو عرض النطاق المرجعي محسوباً بالهرتز (Hz)، وx-1 هو مجموع عدد مضخمات الخط.

وتراعي المعادلة 1-I ضوضاء الرشقة وضوضاء خفقان الإشارة الآني بوصفها مساهمات الضوضاء الأكثر أهمية. ويمكن النظر في مساهمات أخرى للضوضاء في بعض الحالات.

وتدل هذه المعادلة على أن ضوضاء الإرسال التلقائي المضخم (ASE) هي ضوضاء متراكمة من جميع مضخمات $x + 1$.

وتستنتج الافتراضات الرئيسية الواردة أدناه على هذا النظام المرجعي، وهي:

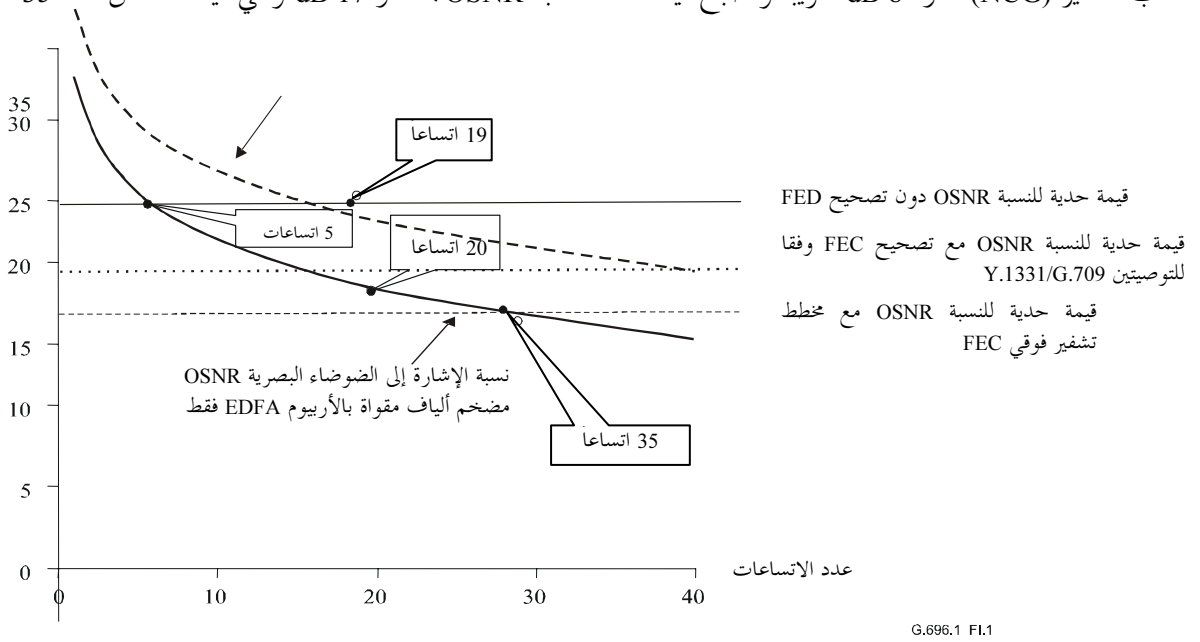
- لجميع المضخمات البصرية داخل السلسلة، بما فيها مضخمات التعزيز والمضخمات السابقة، نفس عامل الضوضاء.
- تتساوى خسارات الاتساعات كافة (في كل قناة).
- قدرات خرج (كل قناة) في مضخمات التعزيز ومضخمات الخط متماثلة.

وعلى افتراض مثلاً أن قدرة خرج القناة البصرية P_{out} = 3 dBm وعامل الضوضاء NF_{eff} = 6,5 dB وعرض النطاق المرجعي ν_r = 0,1 nm وخسارة الاتساع L = 22 dB، فإننا نحصل على المنحني المتصل المبين في الشكل I.1.

وعلى افتراض أن نسبة OSNR في معدل معطيات قدره 10 Gbit/s هي نسبة محددة بقيمة 25 dB لنسبة خطأ في البتات (BER) قدرها 10^{-12} دون تصحيح أمامي للخطأ (FEC)، فإننا نحصل على مسافة نظرية محددة لخمسة اتساعات.

أما إذا افترضنا تطبيق التصحيح FEC المحدد في التوصية G.709/Y.1331 بصافي كسب تشفير (NCG) قدره 5,6 dB، فإن قيمة حد النسبة OSNR تصبح 19,4 dB، وهي قيمة يتم بلوغها عند 20 اتساعاً.

وباستعمال تصحيح أمامي أقوى للخطأ (FEC)، من قبيل المخططات الواردة في التذييل G.975.1/I، يمكن بلوغ صافي كسب تشفير (NCG) قدره 8 dB تقريباً وتصبح قيمة حد النسبة OSNR بمقدار 17 dB وهي قيمة تتحقق عند 35 اتساعاً.



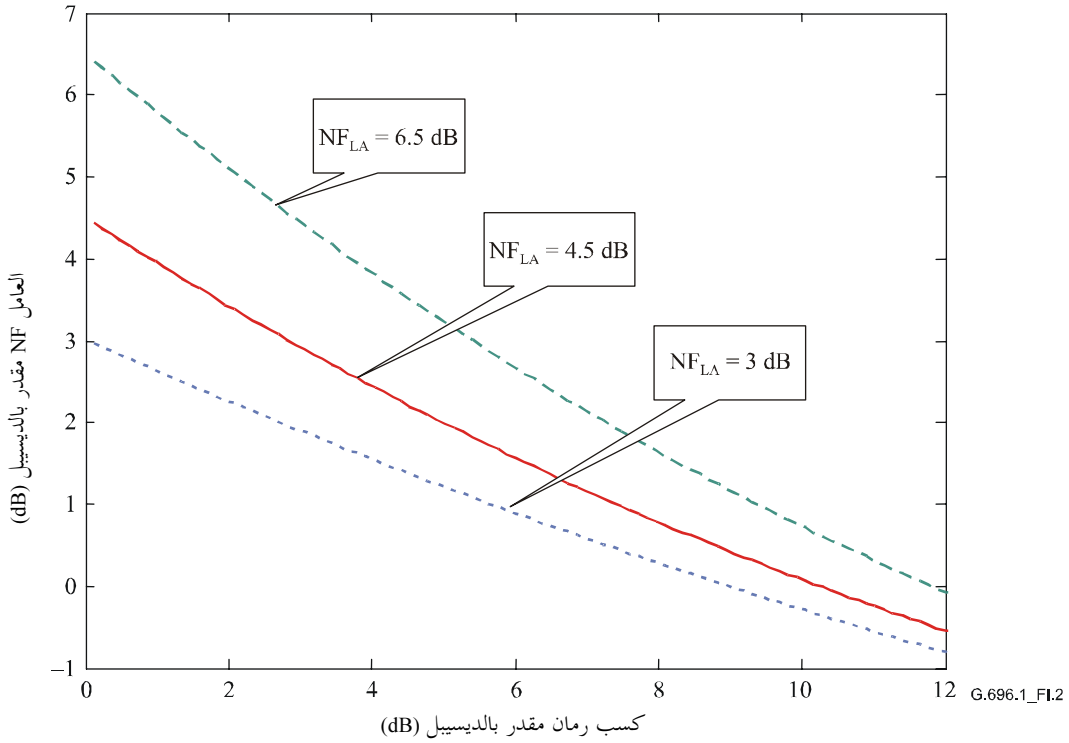
الشكل G.696.1/1.I – قيم حدود النسبة OSNR لنظام مرجعي، النسبة OSNR كدالة لعدد الاتساعات بتضخيم رامان وبدونه

وتضخيم رامان الموزع (DRA) هو خيار آخر لتمديد مسافة الإرسال. وعامل تحسين نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) المتوقع من التضخيم DRA في تشكيلة الضخ باتجاه خلفي هو عامل يمكن حسابه بواسطة عامل الضوضاء الفعال (NF_{eff}) الذي يمكن التعبير عنه بالمعادلة I-2 [1] أدناه.

$$NF_{eff} = 10 \cdot \log\left(\left(NF'_{LA} + \frac{P_{ASE,Raman}}{h \cdot \nu \cdot \nu_r}\right) \cdot \frac{1}{G'_{Raman}}\right) \quad \text{(2-I)}$$

حيث NF'_{LA} عامل الضوضاء الخطي لمضخم الخط المنفصل، وG'_{Raman} الكسب الخطي لتضخيم رامان الموزع (DRA)، و$P_{ASE,Raman}$ قدرة الإرسال ASE الناجمة عن التضخيم DRA، وν_r عرض النطاق المرجعي. وتصح المعادلة $NF_{LA} = 10 \cdot \log(NF'_{LA})$ عندما يكون NF'_{LA} عامل ضوضاء مضخم الخط المنفصل محسوباً بالوحدة dB.

وقيمة القدرة $P_{ASE,Raman}$ والكسب $10 \log = G_{Raman}$ (G'_{Raman}) هي قيمة يمكن تقديرها تحليلياً [2].



الشكل G.696.1/2.I – عامل الضوضاء الفعال (NF_{eff}) كدالة لكسب رامان

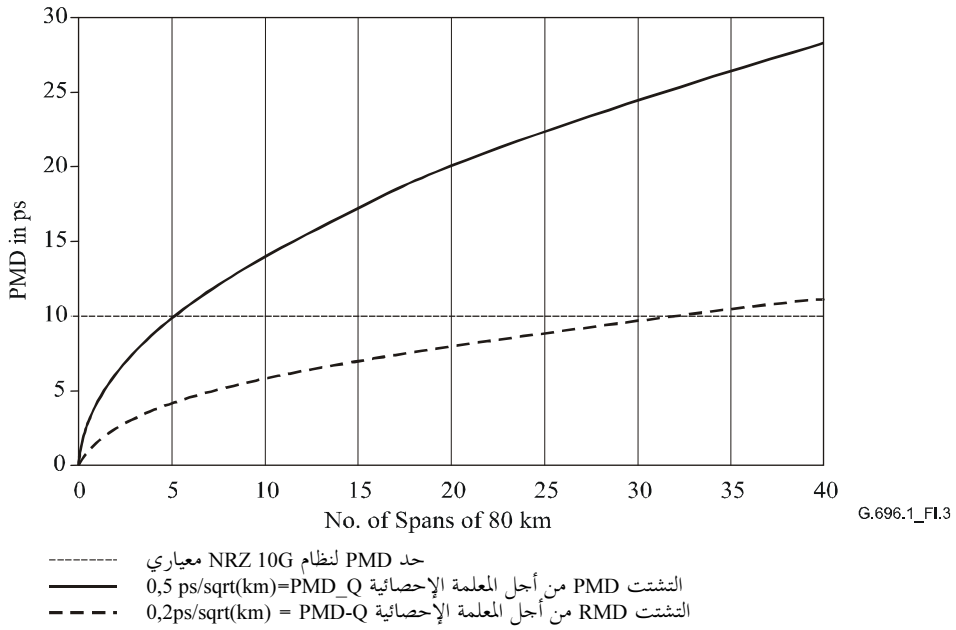
يمثل العامل NF_{eff} في الشكل 2.I بوصفه دالة كسب رامان G_{Raman}. والمعلمات المفترضة هنا هي التالية: طول الليفة 80 كم ومعامل التوهين 0,275 و0,3 dB/km لطول موجة الإشارة وطول موجة المضخة على التوالي، والمنطقة الفعالة لليفة 80 µm² ومعامل كسب رامان 3.1E-14. وعوامل ضوضاء مضخم الألياف المقواة بالإربيوم (EDFA) هي 3 و4,5 و6,5 dB على التوالي. ويمكن تقدير مسافة الإرسال القصوى بمضخمات رامان ومضخمات EDFA بإدراج عامل الضوضاء الفعال (NF_{eff}) المستنبط من المعادلة 2-I في المعادلة 1-I لنسبة OSNR وبتطبيق المعادلة $L = G_{Raman} + G_{LA}$ حيث G_{LA} هو مرة أخرى كسب مضخم الخط محسوباً بالوحدة dB.

وعلى افتراض أن كسب رامان هو بقيمة 9,3 dB تقريباً وعامل ضوضاء مضخم الألياف المقواة بالإربيوم (EDFA) للعامل NF_{LA} = dB 6,5، فإننا نحصل على عامل ضوضاء فعال NF_{ef} = 1 dB، وهو يقابل الخط المقطع المبين في الشكل 1.I.

وفي هذه الحالة، تصبح مسافة التحديد النظرية بدون التصحيح FEC بمقدار 19 اتساعاً، ومن شأن إضافة التصحيح FEC المحدد في التوصية G.709/Y.1331 أن يسمح بنظام يضم أكثر من 40 اتساعاً.

2.1.I التشتت بأسلوب الاستقطاب (PMD)

التشتت الكلي بأسلوب الاستقطاب (PMD) لوصلة ليفة معينة بطول كلي L ومعامل تشتت PMD لكل قسم فردي من أقسام الكبل PMD_Q، هو تشتت يُعبر عنه بالمعادلة $PMD = \sqrt{L} \cdot PMD_Q$. وفيما يتعلق بأي سطح بيني للاعودة إلى الصفر (NRZ) بمعدل 10 Gbit/s، لا ينبغي أن يتجاوز إجمالي التشتت PMD قيمة قدرها 10 ps (أي ما يقابل احتمال انقطاع بمقدار "خمس تسعات" في ليفة بصرية مستحثة بحد أقصى لمهلة انتشار المجموعة التفاضلية (DGD) = 30 ps). وإذا لم تتجاوز قيمة معامل التشتت (PMD_Q) مقدار 0,5 $ps/km^{1/2}$، فإن طول الوصلة الكلي هو 400 كم؛ وعندما تكون القيمة القصوى لمعامل التشتت PMD_Q = 0,2 $ps/km^{1/2}$، يصبح طول الوصلة الكلي 2500 كم، انظر الشكل 3.I.



الشكل G.696.1/3.I – التشتت PMD مقابل مسافة معاملاته المختلفة (PMD) وحدوده في أنظمة NRZ بمعدل 10 Gbit/s بنسبة تيسر قدرها 99,999%

ويقدم الشكل أعلاه إرشادات بشأن المسافة القصوى المسموح بها وفقاً للقيمة القصوى لمعامل تشتت (PMD_Q) الليفة لتشفير خط للاعودة إلى الصفر (NRZ) على أساس تسامح مهلة انتشار DGD من الرتبة الأولى. ولا يبين الشكل مساهمة التشتت PMD المقدمة من الأجهزة.

وينبغي أن يراعي أي نظام حقيقي في وصلة حقيقية بألياف بصرية حد التشتت PMD الذي تفرضه المساهمة المشتركة للوصلة البصرية والأجهزة على حد سواء والتي تشكل جميع العقد في وصلة معينة.

كما ينبغي في بعض الحالات مراعاة التشتت PMD الأعلى رتبة.

2.I آثار أخرى تُحد من مسافة الإرسال

مسافات حدود الوصلة المحسوبة في البنود السابقة هي مسافات يمكن بلوغها في ظروف مثالية. ومع ذلك، تتعرض الأنظمة من الناحية العملية لعدة آثار تقلل الحد الأقصى لطول الوصلة.

1.2.I تراكم تموجات الكسب من المضخمات EDFA المتعاقبة والميل الناجم عن آثار رامان المستحثة

من الضروري أن يراعي أي نظام حقيقي في وصلة حقيقية بألياف بصرية حالات انحراف القدرة فيما بين القنوات بسبب تراكم تموجات الكسب وآثار رامان المستحثة.

ويمكن استعمال تكنولوجيات من قبيل تكنولوجيا مرشاح إزالة الكسب وتكنولوجيا التسوية الدينامية بين الكسب والقدرة للتقليل من وطأة هذه الآثار، ولكن دون التمكن من إزالتها تماماً، مما يؤدي إلى تقصير المسافات التي يمكن بلوغها إلى مسافات أقل من تلك المبينة في الشكل 1.I.

2.2.I عدم انتظام طول الاتساع

أطوال الاتساع قيد الدراسة في شفرات التطبيق الواردة في هذه التوصية هي أطوال متساوية. ولغرض المناقشة في هذا التذييل، فقد استُعمل توهين ثابت قدره 22 dB لكل اتساع. وعادة ما تكون أطوال الاتساع في الأنظمة الحقيقية غير متساوية، ويعتمد ذلك في واقع الأمر على الطبولوجيا الفعلية للشبكة والقيود الطبوغرافية.

ويصعب تفسير حالة "عدم انتظام" أطوال الاتساع هذه بأسلوب عام، لأن الاتساع الأطول في نفس النظام يتحول إلى "دين" لنسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR) بينما تتحول الاتساع الأقصر إلى "رصيد" للنسبة OSNR.

ويمكن التعويض عن "دين" النسبة OSNR الذي يسببه الاتساع الأطول تعويضاً جزئياً أو كلياً عن طريق زيادة قدرة خرج المضخم الذي يسبق الاتساع في حد ذاته، شريطة ألا يترتب على هذه الزيادة آثار غير خطية يتعذر التسامح معها دون تكبد المزيد من الانحطاط.

ومجمل القول بالتالي هو إن أي وصلة باتساعات أطول يمكن أن تجبر النظام على دعم عدد أقل من الاتساعات، بينما يحتمل أن تسمح أي وصلة باتساع أقصر للنظام بدعم عدد أكبر من الاتساعات. وفي ضوء تعلق هذه المسألة تحديداً بتصميم أنظمة مقدمي الخدمات للأجهزة، فإنها لم تُذكر في هذا الموضع إلا لإعطاء رؤية أكثر شمولية عن هذه الأنواع من التطبيقات، ودون تقديم أية تفاصيل.

3.2.I اللاخطية البصرية

الآثار غير الخطية مثل التشكيل الذاتي الطور (SPM) و/أو التشكيل المتقاطع للطور (XPM) هي آثار تتراكم على الاتساعات وتتزايد أهميتها بزيادة عدد الاتساعات. ولذلك، لا يمكن التغاضي عن الانحطاط غير الخطي في أي نظام حقيقي.

وزيادة قدرة القناة أمر جيد لنسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR)، ولكنه ليس بالضرورة كذلك لنسبة الخطأ في البتات (BER). وهذا ناجم عن الآثار غير الخطية للألياف البصرية.

وبمراعاة نسق تشفير اللاعودة إلى الصفر (NRZ) بمتوسط قدرة قناة مقداره 3 dB على الليفة G.652 (المطابقة للقدرة المفترضة في الشكل 1.I)، يكون الطور (SPM) اللاخطي، $\Phi_{NL} = \gamma P_{ch} L_{eff} N_{span}$ المتراكم بعد 10 اتساعات مقارباً لمقدار زاوية نصف قطرية واحدة ويكون الإرسال في منطقة تسمى "تشوه لا خطي قوي" حيث يمكن أن تكون مسافة الوصلة محددة باللاخطية. وبالتالي، قد يكون طول الوصلة الكلي أقل بكثير من الطول الذي يقترحه الشكل 1.I على أساس حدود النسبة OSNR فقط.

ويرد المزيد من التفاصيل عن الآثار اللاخطية البصرية في التوصية G.663 والإضافة 39 الصادرتين عن قطاع تقييس الاتصالات، ويناقش البند 3.I بعض طرائق تخفيف هذه الآثار.

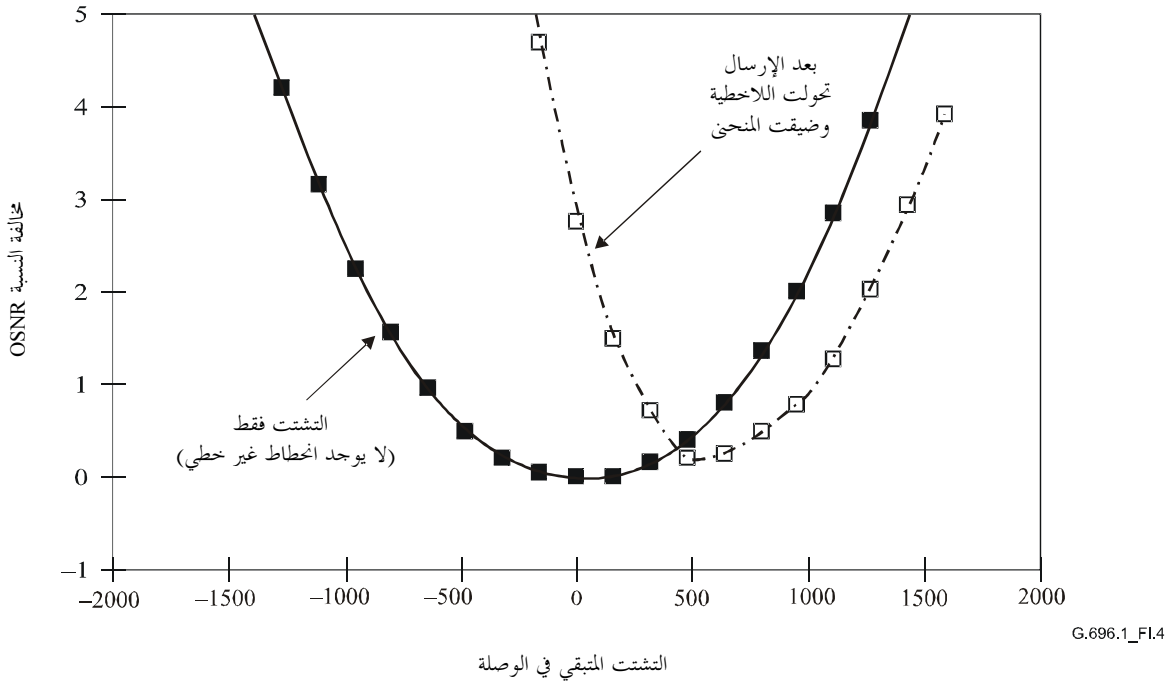
4.2.I التشتت المتبقي وتسامح التشتت

تفترض المنحنيات في الشكل 1.I أن كل قناة في نظام تعدد الإرسال WDM هي قنوات يُعوض عن تشتتها بشكل تام. ومع أنه يمكن استعمال وحدات تعويض تشتت (DCMs) بتشتت معكوس تماماً مقابل ميل طول موجة الليفة، إلا أن الحال ليس كذلك عموماً، وحتى إن كان كذلك، فقد يكون من الضروري مراعاة التشتت اللوني الأعلى رتبة عند زيادة عدد الاتساعات.

وبالإضافة إلى حالات الميل غير المتوائم التي تسبب التشتت المتبقي لبعض قنوات تعدد الإرسال WDM، يمكن أن يؤدي التشوه اللاخطي، في حال عدم تخفيفه، إلى توسيع نطاق الطيف وإلى التقليل بالتالي من تسامح التشتت بعد إرسال الألياف البصرية.

وتسبب مثلاً اللاخطية في وصلة ألياف بتعويض دوري عن التشتت تقلباً سلبياً يقلل تسامح التعويض عن التشتت وينقل موضع النقطة المثلى لتعويض التشتت إلى صافي تشتت إيجابي. وهذا الأثر موضح في الشكل 4.I.

ويستند هذا المثال إلى محاكاة نظام تعدد إرسال DWDM ذي ثمان قنوات بإشارات NRZ 10G على ليفة G.652 بطول 80×10 كم ومتوسط قدرة خرج 3 dB لكل قناة. وتفترض المحاكاة أن التشتت اللوني لكل قسم بطول 80 كم هو تشتت معوض عنه تعويضاً تاماً في كل مضخم خط.



الشكل G.696.1/4.I – مثال على أثر اللاخطية على تسامح التشتت بعد الإرسال

5.2.I الآثار المتراكمة للخسارة المعتمدة على الاستقطاب (PDL)

تبدي المكونات البصرية من قبيل مراشح WDM أو الموهنات البصرية المتغيرة (VOAs) أو المضخمات البصرية (OAs) خسارة منتهية تعتمد على الاستقطاب (PDL) يمكن أن تتراوح بين 0,1 إلى 0,3 dB لكل جهاز، أو تزيد على ذلك. وتسلط الخسارة PDL تشكيل كثافة عشوائي على الإشارات البصرية بسبب حالات تفاوت استقطاب الإشارات مع الزمن. وبفعل آثار الكسب المعتمد على الاستقطاب (PDG)، تُحول التقلبات المستحثة للقدرة داخل المضخمات البصرية (OAs) إلى تقلبات لنسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية (OSNR).

ويمكن أن يؤدي تراكم الخسارة PDL في نظام ممتد بعيد المدى يتفرع فيه الكثير من عناصر الشبكة البصرية إلى تقلب كبير في القدرة يمكن أن يعرض أداء النظام للانحطاط ويزعزع استقرار الشبكة. ومع ذلك، فإن العلاقة بين تقلبات القدرة وحالات تفاوت النسبة OSNR قد لا تكون بالضرورة علاقة متكافئة. ويمكن أن تحدث تقلبات القدرة بسرعة بالغة بحيث يتعذر التعويض عنها تعويضاً تاماً بواسطة تسوية الكسب الدينامي.

3.I تقنيات تستعمل لتخفيف حالات الانحطاط

يوجد العديد من التقنيات العملية التي يمكن أن تحسن أداء أي وصلة لسطح بيني بين الميادين (IaDI)، من قبيل اختيار ما يلي:

i) تسوية الكسب الدينامي؛

ii) تشفير الخط؛

iii) عدد القنوات البصرية والمباعدة فيما بينها؛

iv) أنماط الألياف؛

v) خلط أنماط مختلفة من الألياف ضمن نفس الاتساع.

1.3.I تسوية الكسب الدينامي

من أجل التعويض عن ميل الكسب الذي تسببه سلسلة طويلة من المضخمات، يمكن استعمال محلل متكامل للطيف البصري (OSA) أو مرقاب للقدرة البصرية (OPM) ومراشح إزالة كسب قابلة للضبط لضمان تحقيق تسوية مرضية تشمل جميع قنوات الإشارات المركبة لتعدد الإرسال بتقاسم مكثف لطول الموجات (DWDM).

2.3.I نسق التشكيل

استعمال أنساق تشكيل تختلف عن أنساق اللاعودة إلى الصفر (NRZ) يمكن أن يحقق بعض الفوائد في ظل ظروف معينة.

ومثلما تصف الإضافة 39 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات، تتسم أنظمة العودة إلى الصفر (RZ) للتشفير الخطي بكونها أكثر تسامحاً إلى حد بعيد مع التشتت PMD من الرتبة الأولى من أنظمة اللاعودة إلى الصفر (NRZ). كما يمكن أن تحقق الأنساق المعدلة للتشفير RZ، مثل أنساق RZ المشكلة الطور، فوائد إضافية من حيث تعزيز التسامح اللاخطي. وتشجع هذه الخصائص على استعمال تشفير الخط RZ في المسافات الطويلة جداً للوصلة حيث تكون فيها آثار التشتت بأسلوب الاستقطاب (PMD) وآثار اللاخطية كبيرة على وجه الخصوص.

ومن جهة أخرى، يحتمل أن يشوب التشفير RZ عيب (ناجم عن ضرورة استعمال عرض نطاق أوسع) يتمثل في قلة كفاءته الطيفية مقارنة بالتشفير NRZ (انظر الإضافة 39 الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات) وعادة ما يكون التشفير الأول (RZ) أكثر حساسية لباقي التشتت اللوني من التشفير الأخير (NRZ). ولهذا السبب، فإن الأنظمة التي تعتمد نسق تشكيل العودة إلى الصفر (RZ) تحتاج إلى دقة أكبر في تحديد خصائص التشتت المصاحب للوصلة وفي التعويض عن هذا التشتت.

ويمكن أيضاً تطبيق شفرات خط خلاف شفرات NRZ وRZ على أنظمة تعدد الإرسال DWDM، ولكل واحدة منها مزاياها وعيوبها. وبالنسبة للمسافات الطويلة جداً للوصلة وإشارات تعدد الإرسال DWDM ذات السعة الكبيرة للغاية، فإن اختيار شفرة خط معينة فيها يعتمد تحديداً على التصميم الفردي الأمثل للنظام المعني.

3.3.I عدد القنوات البصرية والمباعدة فيما بينها

ثمة اتجاه عام مفاده أن الحد الأقصى لعدد قنوات DWDM التي تسمح بتحقيق أداء مرض هو حد يميل إلى النقصان بزيادة طول الوصلة و/أو تضاؤل مسافة المباعدة فيما بين القنوات البصرية، وذلك بسبب تزايد تأثير اللاخطية البصرية.

4.3.I أنماط الألياف

يمكن أن يتسم نمط معين من الألياف البصرية بميزة أو يشوبه عيب مقارنة بنوع آخر في ظل ظروف معينة. وفي النطاق C مثلاً، يكون التشتت اللوني لليفة G.652 أكبر منه في الليفة G.655 أو الليفة G.653، وبالتالي، قد يؤدي ذلك إلى تقليل آثار اللاخطية. غير أن كسب رامان يعتمد اعتماداً كبيراً على نوع الليفة، وبالنظر إلى كبر أقطار مجال أسلوب الألياف G.652، فإنها تبدي مستوى أقل من هذا الكسب (رامان) من الألياف الأخرى بالنسبة لقدرة ضخ معينة.

5.3.I خلط أنواع مختلفة من الألياف ضمن نفس الاتساع

تتمثل إحدى التقنيات التي يمكن استعمالها لتخفيف آثار اللاخطية البصرية في تعمد خلط ألياف لها خصائص مختلفة ضمن اتساع واحد. ويؤدي مثلاً وجود اتساع معين يضم ألياف متخالفة بتشتت إيجابي وسلبي إلى الحصول على اتساع بقيمة تشتت محلي عالية (وهي قيمة مرغوبة لتقليل آثار التشكيل المتقاطع الطور (XPM) وخلط الموجات الأربع (FWM)) ولكن بقيمة صافي تشتت منخفضة (تقلل متطلبات التعويض عن التشتت).

أما في الحالات التي يكون فيها للوصلة أنواع مختلفة من الألياف ضمن اتساعات مختلفة، فقد تختلف بالضرورة قدرة الحقن في كل اتساع باختلاف أنواع الألياف المستعملة عبر أول 20 كم من كل اتساع، وذلك من أجل تقليل التشوه اللاخطي إلى أدنى حد.

4.I مثال عملي

يتضح من المناقشة السابقة أن عدد الاتساعات التي يمكن بلوغها عملياً بخصوص المباعدة فيما بين القنوات ومنطقة طول موجة التشغيل ومعدل البتات وخسارة الاتساع تحديداً هو أمر يتوقف على الكثير من الخيارات المتعلقة بتصميم النظام، مثل ماهية مخطط التشفير بالتصحيح FEC المستعمل، وما إذا كان يتعين اللجوء إلى تسوية الكسب الدينامي أو استعمال تضخيم رامان، وما إلى ذلك.

ومع ذلك، وكمثال على التكنولوجيا المتيسرة، فإن بإمكان أي نظام يتسم بالنعوت التالية:

- حد أدنى للمباعدة بين القنوات: 100 GHz؛
- منطقة لطول موجة التشغيل: النطاق C (1530 إلى 1565 nm)؛
- صنف زبون: 10G؛
- خسارة الاتساع: 22 dB؛
- نوع الليفة G.652؛
- تصحيح أمامي للأخطاء (FEC) محدد في التوصية G.709/Y.1331،

أن يكون فعالاً من حيث التكلفة في الوقت الحالي إذ يوفر حداً أقصى يصل إلى 15 اتساعاً تقريباً.

ثبت المراجع

[1] ISLAM (M.N.) (Ed.): Raman Amplifiers for Telecommunications 2 Sub-Systems and Systems, *Springer Series in Optical Sciences*, Vol. 90/2, pp. 432, 2004 (ISBN:0-387-40656-5).

[2] AOKI (Y.) *et al.*: Properties of fibre Raman amplifiers and their applicability to digital optical communication systems, *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 6, pp. 1225-1239, 1988.

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 وتعدد الوسائط
السلسلة I	الشبكة الرقمية متكاملة الخدمات
السلسلة J	الشبكات الكبلية وإرسال إشارات البرامج الإذاعية الصوتية والتلفزيونية وإشارات أخرى متعددة الوسائط
السلسلة K	الحماية من التداخلات
السلسلة L	إنشاء الكبلات وغيرها من عناصر المنشآت الخارجية وتركيبها وحمايتها
السلسلة M	إدارة الاتصالات بما في ذلك شبكة إدارة الاتصالات (TMN) وصيانة الشبكات
السلسلة N	الصيانة: الدارات الدولية لإرسال البرامج الإذاعية الصوتية والتلفزيونية
السلسلة O	مواصفات تجهيزات القياس
السلسلة P	نوعية الإرسال الهاتفي والمنشآت الهاتفية وشبكات الخطوط المحلية
السلسلة Q	التبديل والتشوير
السلسلة R	الإرسال البرقي
السلسلة S	التجهيزات المطرافية للخدمات البرقية
السلسلة T	المطاريف الخاصة بالخدمات التلماتية
السلسلة U	التبديل البرقي
السلسلة V	اتصالات المعطيات على الشبكة الهاتفية
السلسلة X	شبكات المعطيات والاتصالات بين الأنظمة المفتوحة والأمن
السلسلة Y	البنية التحتية العالمية للمعلومات وملامح بروتوكول الإنترنت وشبكات الجيل التالي
السلسلة Z	لغات البرمجة والخصائص العامة للبرمجيات في أنظمة الاتصالات

طبعت في سويسرا
جنيف، 2005