

# JT-G696.1

## 縦断的に相互互換のあるイントラ- ドメイン DWDM アプリケーション

〔 Longitudinally compatible intra-domain DWDM  
applications 〕

第 1 版

2012 年 2 月 23 日制定

一般社団法人  
情報通信技術委員会

THE TELECOMMUNICATION TECHNOLOGY COMMITTEE

本書は、一般社団法人情報通信技術委員会が著作権を保有しています。  
内容の一部又は全部を一般社団法人情報通信技術委員会の許諾を得ることなく複製、転載、改変、転用及びネットワーク上での送信、配布を行うことを禁止します。

## 目次

<参考>.....	4
要約.....	5
1 適用範囲.....	5
2 参考文献.....	5
3 定義.....	6
3.1 他の標準で定義される用語.....	6
3.1.1 ドメイン内インタフェース(IaDI).....	6
3.1.2 3R中継器.....	6
3.1.3 光チャネルデータユニット.....	6
3.1.4 光トリビュタリ信号.....	7
3.2 この標準で定義される用語.....	7
3.2.1 クライアントクラス.....	7
3.2.2 クライアントクラス 1.25G.....	7
3.2.3 クライアントクラス 2.5G.....	7
3.2.4 クライアントクラス 10G.....	7
3.2.5 クライアントクラス 40G.....	7
3.2.6 クライアントクラス 100G.....	7
4 略語.....	7
5 光インタフェースのクラス.....	9
5.1 アプリケーション.....	9
5.2 参照構成.....	9
5.3 専門語.....	10
6 縦断的相互互換性.....	11
7 パラメータ.....	11
7.1 スパン毎の最大および最小減衰量.....	12
7.2 ファイバ種類.....	12
7.3 運用波長範囲.....	12
7.4 スパン毎の最小および最大波長分散.....	13
7.5 最小局所波長分散係数.....	13
7.6 最大波長分散偏差.....	14
7.7 最大群遅延時間差.....	14
7.8 MPI-S <sub>M</sub> 点もしくはS <sub>M</sub> 点における最小光リターンロス.....	15
7.9 MPI-S <sub>M</sub> と MPI-R <sub>M</sub> 間の最大離散反射.....	15
8 光の安全上の注意.....	15
付録 I DWDMシステムにとっての論理的制限と設計の留意点.....	16
I.1 投入される技術とそれらの制限.....	16
I.2 伝送距離を制限する他の影響.....	19
I.3 障害を緩和するために用いられる手法.....	22
I.4 10 Gbit/s, 40 Gbit/s および 100 Gbit/s伝送波長の混合伝送.....	24
I.5 100Gアプリケーション.....	25
参考文献.....	26

## <参考>

### 1. 国際勧告との関係

本標準は、ITU-T 勧告 G.696.1 (07/2010)に準拠したものである。

### 2. 上記国際勧告等との相違

#### 2.1 オプション選択項目

なし

#### 2.2 ナショナルマター項目

なし

#### 2.3 追加項目

なし

#### 2.4 削除項目

なし

#### 2.5 変更項目

なし

#### 2.6 章立ての相違

なし

#### 2.7 その他

なし

### 3. 改版の履歴

版 数	制 定 日	改 版 内 容
第1版	2012年2月23日	制定

4. 工業所有権本標準に関わる「工業所有権等の実施の権利に係る確認書」の提出状況は、TTC ホームページでご覧になれます。

### 5. その他

#### (1) 参照する勧告、標準など

ITU-T 勧告 G.650.2,G.652,G.653,G.654,G.655,G.663,G.664,G.665,G.691,G.707,G.709,  
G.870,G.872,G.957,G.959.1

IEC 規格 IEC-60825-1,IEC-60825-2

TTC 標準 JT-G709,JT-G872,JT-G707,JT-G957,JT-G959.1

### 6. 標準作成部門

情報転送専門委員会

## 要約

本標準は、イントラ-ドメイン (IaD) DWDM 光ネットワーク アプリケーション用の物理層の仕様を提供する。単一の管理ドメイン内の長手方向に互換性のあるアプリケーションが、ラインアンプ有りまたは、無しのポイントツーポイント及びマルチチャネルラインシステム用に記述されている。この標準では、アプリケーションのコードは、DWDM 伝送システムとファイバリンクのカテゴリのセットを提供する。主な目的は、この標準に準拠しているファイバリンクのための DWDM 伝送装置のマルチベンダー化である。

## 1 適用範囲

本標準では、ドメイン内 (IaD) DWDM 光ネットワークアプリケーション用の物理層の仕様を示す。これらの仕様は、ラインアンプ有りまたは無しのポイントツーポイントおよびマルチチャネルラインシステムのために用意されている。ゴールは、単一の管理ドメイン内の縦断的に互換性のあるアプリケーションを有効にすることである。第一の目的は、複数のベンダーがこの標準に準拠している光ファイバリンクの伝送装置を提供できるようにすることである。

IaD アプリケーションの仕様のためのフレームワークを提供するために、この標準は、物理層アプリケーション用の一般的な参照モデルを含む。仕様はこのような光増幅器の動作波長範囲、チャネル数の組み合わせ、クライアントクラス、スパン距離、ファイバタイプやシステム構成といったパラメータを考慮したアプリケーションコードに従って整理されている。

この最初の標準は、光スイッチング素子を介在しない IaD のアプリケーションに焦点を当てている。将来のバージョンおよび/または他の新しい標準は、より複雑な物理層の構成に対応して/またはより高いレベルの互換性をサポートすることが期待される。これらのアプリケーションでは、ポイントツーポイント構成のために指定されているものを超えた異なるパラメータが必要になることがある。

## 2 参考文献

以下の ITU-T 勧告および他の参考文献は本書内で参照引用され、この標準の規定を構成する条項を含んでいる。発行時点では示された版が有効であった。すべての勧告および他の参考文献は改訂の対象であり、この勧告の利用者にはしたがって、これらの勧告および、以下にリスト化されたその他のリファレンスの最新版の適用の可能性を調査することを推奨する。現在、有効な ITU-T 勧告のリストは定期的に公開されている。この勧告内のドキュメントへの参照は独立した文書として、これら勧告の最新状況を与えるものではない。

- |                 |  |
|-----------------|--|
| [ITU-T G.650.2] | Recommendation ITU-T G.650.2 (2007), <i>Definitions and test methods for statistical and non-linear related attributes of single-mode fibre and cable.</i> |
| [ITU-T G.652]   | Recommendation ITU-T G.652 (2009), <i>Characteristics of a single-mode optical fibre and cable.</i>  |
| [ITU-T G.653]   | Recommendation ITU-T G.653 (2006), <i>Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.</i>                                     |
| [ITU-T G.654]   | Recommendation ITU-T G.654 (2006), <i>Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable.</i>  |

- [ITU-T G.655] Recommendation ITU-T G.655 (2009), *Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.*
- [ITU-T G.663] Recommendation ITU-T G.663 (2000), *Application related aspects of optical amplifier devices and subsystems* plus Amendment 1 (2003), *Amendments to Appendix II.*
- [ITU-T G.664] Recommendation ITU-T G.664 (2006), *Optical safety procedures and requirements for optical transport systems.*
- [ITU-T G.665] Recommendation ITU-T G.665 (2005), *Generic characteristics of Raman amplifiers and Raman amplified subsystems.*
- [ITU-T G.691] Recommendation ITU-T G.691 (2006), *Optical interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers.*
- [ITU-T G.707] Recommendation ITU-T G.707/Y.1322 (2007), *Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH).*
- [ITU-T G.709] Recommendation ITU-T G.709/Y.1331 (2009), *Interfaces for the Optical Transport Network (OTN).*
- [ITU-T G.870] Recommendation ITU-T G.870/Y.1352 (2010), *Terms and definitions for optical transport networks (OTN).*
- [ITU-T G.872] Recommendation ITU-T G.872 (2001), *Architecture of optical transport networks* plus Amendment 1 (2003) and Corrigendum 1 (2005).
- [ITU-T G.957] Recommendation ITU-T G.957 (2006), *Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy.*
- [ITU-T G.959.1] Recommendation ITU-T G.959.1 (2009), *Optical transport network physical layer interfaces.*
- [IEC 60825-1] IEC 60825-1 (2007), *Safety of laser products – Part 1: Equipment classification and requirements.*
- [IEC 60825-2] IEC 60825-2 (2007), *Safety of laser products – Part 2: Safety of optical fibre communication systems (OFCS).*

### 3 定義

#### 3.1 他の標準で定義される用語

本標準は JT-G872 で定義される次の用語を使用する。

##### 3.1.1 ドメイン内インタフェース (IdI)

##### 3.1.2 3R中継器

本標準は ITU-T 勧告 G.870 で定義される次の用語を使用する。

##### 3.1.3 光チャネルデータユニット

本標準は JT-G959.1 で定義される次の用語を使用する。

### 3.1.4 光トリビュタリ信号

## 3.2 この標準で定義される用語

この標準では次の用語を定義する。

### 3.2.1 クライアントクラス

クライアントクラスは、光ネットワークを介して伝送される光チャネル内に配置されている単一の光トリビュタリ信号のクライアント信号のビットレートのクラスを指す。この標準中では、クライアントのビットレートは、FEC バイトが追加される前の連続的なデジタル信号のビットレートである。JT-G707 に従った信号の場合には、これは ODUk の速度である。

### 3.2.2 クライアントクラス 1.25G

公称 622Mbit/s から公称 1.25Gbit/s までのクライアントビットレートの連続デジタル信号に適用するこのクライアントクラス 1.25G は JT-G707 による STM-4 ビットレートを含む。

### 3.2.3 クライアントクラス 2.5G

公称 622Mbit/s から公称 2.5Gbit/s までのクライアントビットレートの連続デジタル信号に適用する。このクライアントクラス 2.5G は JT-G707 による STM-16 ビットレートと JT-G709 による ODU1 ビットレートを含む。

### 3.2.4 クライアントクラス 10G

公称 2.4Gbit/s から公称 10.5Gbit/s までのクライアントビットレートの連続デジタル信号に適用する。このクライアントクラス 10G は JT-G707 による STM-64 ビットレートと JT-G709 による ODU2 ビットレートを含む。

### 3.2.5 クライアントクラス 40G

公称 9.9Gbit/s から公称 42Gbit/s までのクライアントビットレートの連続デジタル信号に適用する。このクライアントクラス 40G は JT-G707 による STM-256 ビットレートと JT-G709 による ODU3 ビットレートを含む。

### 3.2.6 クライアントクラス 100G

公称 39Gbit/s から公称 105Gbit/s までのクライアントビットレートの連続デジタル信号に適用する。このクライアントクラス 100G は JT-G709 による ODU4 ビットレートを含む。

## 4 略語

本標準は次の略語を用いる。

3R (Regeneration) Re-amplification, Reshaping and Retiming

(再生) 再増幅、再形成、再同期

APR Automatic Power Reduction

自動出力低下

ASE Amplified Spontaneous Emission

増幅された自然放出光

ASK Amplitude Shift Keying

振幅偏移変調

BER            Bit Error Ratio  
ビット誤り率

DCM            Dispersion Compensation Module  
波長分散補償器

DEMUX        Demultiplexer  
デマルチプレクサ

DGD            Differential Group Delay  
群遅延時間差

DP             Dual Polarization  
偏波直交

DPSK          Differential Phase Shift Keying  
差動位相偏移変調

DQPSK        Differential Quadrature Phase Shift Keying  
差動四相位相偏移変調

DRA            Distributed Raman Amplification  
分布ラマン増幅

DWDM         Dense WDM  
高密度 WDM

EDFA          Erbium Doped Fibre Amplifier  
エルビウム添加光ファイバ増幅器

FEC            Forward Error Correction  
前方誤り訂正

FWM            Four-Wave Mixing  
四光波混合

IaD            Intra-Domain  
イントラ-ドメイン

IaDI           Intra-Domain Interface  
イントラ-ドメイン-インタフェース

MPI            Main Path Interface  
メインパスインタフェース

MUX            Multiplexer  
マルチプレクサ

NCG            Net Coding Gain  
実効符号化利得

NRZ            Non-Return to Zero  
非ゼロ復帰

OA             Optical Amplifier  
光増幅器

ODB            Optical Duobinary  
光デュオバイナリ

ODUk          Optical channel Data Unit k (k = 1, 2 or 3)  
光チャネルデータユニット k(k=1,2 or 3)



OPM	Optical Power Monitor
	光パワーモニタ
OSA	Optical Spectrum Analyser
	光スペクトラムアナライザ
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio
	光信号対雑音比
PDG	Polarization-Dependent Gain
	偏波依存利得
PDL	Polarization-Dependent Loss
	偏波依存損失
PM	Polarization Multiplexing
	偏波多重
PMD	Polarization Mode Dispersion
	偏波モード分散
PMD <sub>Q</sub>	Statistical parameter for link PMD
	リンク PMD のための統計パラメータ
PSK	Phase Shift Keying
	位相偏移変調
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
	四相位相偏移変調
RZ	Return to Zero
	ゼロ復帰
SOP	State of Polarization
	偏波状態
SPM	Self-Phase Modulation
	自己位相変調
VOA	Variable Optical Attenuator
	可変光減衰器
WDM	Wavelength Division Multiplexing
	波長分割多重
XPM	Cross-Phase Modulation
	相互位相変調

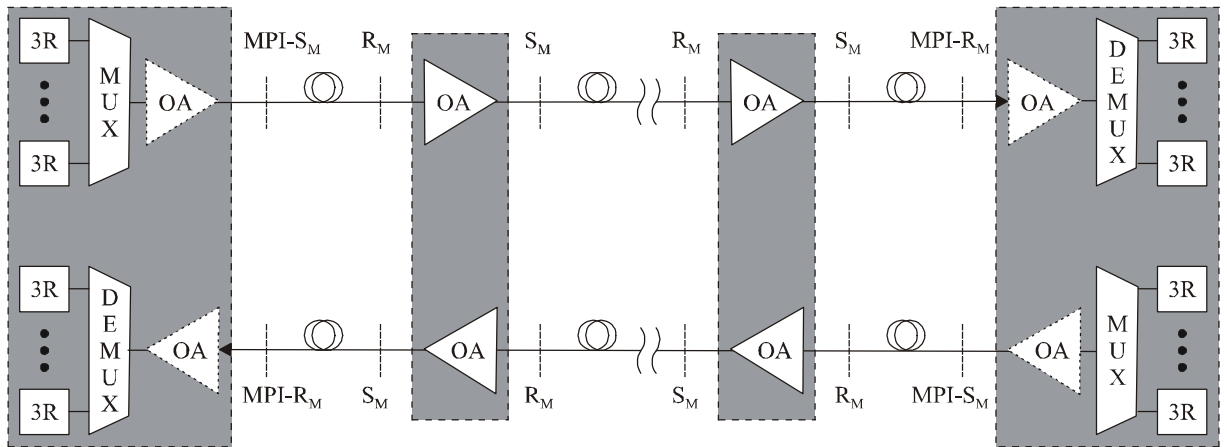
## 5 光インタフェースのクラス

### 5.1 アプリケーション

本標準は、光ラインアンプの有無に関係なく縦断的に互換性のあるイントラ-ドメイン DWDM アプリケーションに対応する。[ITU-T G.663]に説明されている特定の離散的なラインアンプや[ITU-T G.665]によるラマン増幅器などは別のラインアンプの種類が使用されるだろう。

### 5.2 参照構成

この標準の目的に沿ったイントラ-ドメイン DWDM インターフェイスのアプリケーションに適用される関連する参照点は、図 5-1 に示される。



G.696.1\_F5.1

図 5-1 / JT-G696.1 マルチスパン DWDM システムのための参照構成  
(ITU-T G.696.1)

図 5-1 に示す参照ポイントは JT-G959.1 の定義と同じく、次のように定義される。

- MPI-S<sub>M</sub> は、各光ネットワークエレメントのトランスポートインタフェースの出力光コネクタの直後の(多重チャネル)参照点である;
- MPI-R<sub>M</sub> は、各光ネットワークエレメントのトランスポートインタフェースの入力光コネクタの直前の光ファイバの(多重チャネル)参照点である;
- S<sub>M</sub> はライン多重 OA の出力光コネクタの直後の参照点である。
- R<sub>M</sub> はライン多重 OA の入力光コネクタの直前の光ファイバ上の参照点である。

### 5.3 専門語

アプリケーションコード表記法は以下のように構成されている。

#### **n.B-xWF(s)**

ここで、

**n** はアプリケーションコードによってサポートされた最大チャネル数である。

**B** はクライアントクラスを示す

-1.25G は 622Mbit/s から 2.5Gbit/s までの範囲にあるクライアントビットレートを示す

-10G は 2.4Gbit/s から 10.5Gbit/s までの範囲にあるクライアントビットレートを示す

-40G は 9.9Gbit/s から 42Gbit/s までの範囲にあるクライアントビットレートを示す

-100G は 39Gbit/s から 105Gbit/s までの範囲にはるクライアントビットレートを示す

**x** はアプリケーションコード内で許される最大スパン数である。

**W** は次ようなスパン減衰を示すレターである

S は短距離(スパン減衰量 11dB まで)

L は長距離(スパン減衰量 22dB まで)

V は超長距離(スパン減衰量 33dB まで)

**F** は G652.A...G652.D といった (完全に詳述された)光ファイバ種類を示す。これらはアプリケーションコード内でそれぞれ"652A"..."652D"と表記される。

**s** は各スペクトル帯における運用光波長範囲を示す([b-ITU-T G-Sup.39]を参照)

s	記述	範囲 (nm)
O	Original	1260 to 1360
E	Extended	1360 to 1460
S	Short wavelength	1460 to 1530
C	Conventional	1530 to 1565
L	Long wavelength	1565 to 1625

2つ以上のスペクトル帯域が使用されている場合、sは"+"で接続されたの帯域のレターになる。たとえば、C、Lバンドの両方の使用を必要とするアプリケーションにとってはsは"C+L"と記述する。2つ以上のスペクトル帯域が使用されているケースでは、使用されるレターの順序は、より低い波長からより高い波長の順で記述する。

下記のように、ラマン増幅 DWDM 伝送システムの場合には、レター"R"をアプリケーションのコードの最後に追加しなければならない。

### n.B-xWF(s)R

特殊なアプリケーションの例は下記のように表される。

#### 40.10G-20L652A(C)R

このアプリケーションでは 10G ペイロードクラスの信号を用いた 40 チャンネルシステムで、ラマンアンプを適用した G.652A 光ファイバのスパン数 20 の長距離区間システムを表す。運用波長範囲として C バンドが用いられる。

## 6 縦断的相互互換性

本標準で網羅されるアプリケーションは[b-ITU-T G-Sup.39]で与えられる定義に関連した縦断的相互互換性を持つ。

## 7 パラメータ

本標準で用いられているアプリケーションコード(n.B-xWF(s))は、2つの部分からなる。前半部分(n.B)は光伝送システムに関連し、後半部分(xWF(s))はファイバの構成に関連する。

本標準は縦断的相互互換システムを取り扱っているため、表 7-1 に記載されているパラメータは、ファイバの構成のみに関連する。但し、アプリケーションコードのシステムに関連する部分がファイバ要求に影響を与える場合を除く。

表 7-1 / JT-G696.1 イントラ-ドメイン DWDM アプリケーションのためのファイバパラメータ

パラメータ	節
スパン毎の最大減衰量	7.1
スパン毎の最小減衰量	7.1
ファイバ種類	7.2
運用波長範囲	7.3
スパン毎の最小波長分散	7.4
スパン毎の最大波長分散	7.4
最小局所波長分散係数	7.5

表 7-1 / JT-G696.1 イントラ-ドメイン DWDM アプリケーションのためのファイバパラメータ

パラメータ	節
最大波長分散偏差	7.6
最大群遅延時間差	7.7
MPI-SM または SM における最小光リターンロス	7.8
MPI-SM と MPI-RM 間の最大離散反射率	7.9

### 7.1 スパン毎の最大および最小減衰量

最大および最小スパン減衰量を表 7-2 に示す。

表 7-2 / JT-G696.1 最大および最小スパン減衰量

パラメータ	単位	アプリケーションコードでの "W" の値		
		S	L	V
スパン毎の最大減衰量	dB	11	22	33
スパン毎の最小減衰量	dB	ffs	11	22

### 7.2 ファイバ種類

本標準は、ITU-T 勧告 G.65x シリーズのすべてのファイバの種類を取り扱う。これは、現在表 7-3 で与えられている種類を含む。

表 7-3 / JT-G696.1 ファイバ種類

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

### 7.3 運用波長範囲

運用波長範囲は、[b-ITU-T G-Sup.39]に定義されている 1 つ以上の波長帯からなる。表 7-4 を参照。

表 7-4 / JT-G696.1 波長範囲

s	記述	範囲 (nm)
O	Original	1260 to 1360
E	Extended	1360 to 1460
S	Short wavelength	1460 to 1530
C	Conventional	1530 to 1565
L	Long wavelength	1565 to 1625

#### 7.4 スパン毎の最小および最大波長分散

スパン毎の最小および最大波長分散(分散補償量は除く)は、(ITU-T 勧告 G.65x シリーズから)標準的なファイバパラメータを用いて算出されるか、または実測される。多スパンの 40G もしくは 10G システムでは、実測することが現実的な選択としてよく使われる。

スパン毎の最小および最大波長分散の算出は、ITU-T 勧告 G.65x シリーズの勧告からファイバパラメータを用いて実行される。詳細については、次のように算出される。スパン毎の最大波長分散( $CD_{\max}^{(span)}$ )は、次式で与えられる。

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

ここで、

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

上式は、“W”の文字で定義される最大スパン減衰量  $A_{\max}(W)$  (表 7-2 参照)と運用波長範囲“s”での減衰量係数 $\alpha(s)$ (5.3 節参照)で決まる最大スパン長を示す。ここで、 $\alpha(s)$ は、ITU-T 勧告 G.65x シリーズで定義されている値である。運用波長範囲“s”での最大波長分散係数は、 $D_{\max}(s)$ で表示される。同様に、スパン毎の最小波長分散は、次式で与えられる。

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

ここで、

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

上式は、“W”の文字で定義される最小スパン減衰量  $A_{\min}(W)$  (表 7-2 参照)と運用波長範囲“s”での減衰量係数 $\alpha(s)$ (5.3 節参照)で決まる最小スパン長を示す。ここで、 $\alpha(s)$ は、ITU-T 勧告 G.65x シリーズで定義されている値である。運用波長範囲“s”での最小波長分散係数は、 $D_{\min}(s)$ で表示される。波長分散係数は、リンク属性に用いられている ITU-T 勧告 G.65x シリーズのファイバ種類によって見つけることができる。最大および最小スパン減衰量は表 7-2 で定義される。

#### 7.5 最小局所波長分散係数

マルチスパン伝送システムの個別チャネルの性能を考える場合、エンド・ツー・エンドの残留波長分散(補償を含む)は容認できるシステム運用を許すための厳密な制限の中に維持しなければならない。

しかしながら、狭いチャネル間隔(例えば 100GHz)長距離 DWDM 伝送システムの許容できる運用では、伝送ファイバには四光波混合(FWM)および相互位相変調(XPM)のような非線形効果を避けるための最小の局所波長分散係数の要求がある。

これらの効果による大幅なペナルティを避けるために必要な局所波長分散係数の値は、チャネル間隔、パワーレベル、リンク長などのような伝送システム設計の多くの要素に依存する。それゆえ、局所波長分散係数の値は本標準の範囲外である。

これらの非線形効果のさらなる詳細は、ITU-T 勧告 G.663 および[b-ITU-T G-Sup.39]に記載されている。そして、それらを軽減するいくつかの方法については、付録 I.3 節にて議論している。

## 7.6 最大波長分散偏差

最大波長分散偏差の要求は、さらなる研究課題である。

## 7.7 最大群遅延時間差

最大群遅延時間差(DGD)は、送信器(図 5-1 の MUX へ接続される”3R”として示される)と対応する受信器(図 5-1 の DEMUX へ接続される”3R”として示される)の間の全リンクに適用される。

下記の式は、超過確率で定義された(多重化部品とファイバ部分を含む)リンクの最大 DGD の計算に使用される。

$$DGD_{\max_{link}} = \left[ DGD_{\max_F}^2 + S^2 \sum_i PMD_{Ci}^2 \right]^{1/2}$$

ここで:

$DGD_{\max_{link}}$  は最大リンク DGD である。(ps)

$DGD_{\max_F}$  は連結されている光ファイバケーブルの最大 DGD である。(ps)

$S$  はマクスウェルの調整係数である。(表 7-5 参照)

$PMD_{Ci}$  は  $i$  番目の部品の PMD の値である。(ps)

この式は、瞬時 DGD の統計値が表 7-5 から得られるマクスウェルの調整係数の値によって調整される  $DGD_{\max_{link}}$  を超える瞬時 DGD の確率を含む、マクスウェル分布に近似することを仮定している。

表 7-5 / JT-G696.1 S の値と確率

最大値と平均値の比率 (S)	最大値を超える確率	最大値と平均値の比率 (S)	最大値を超える確率
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	$5.1 \times 10^{-8}$		

さらなる詳細は、ITU-T 勧告 G.650.2 と ITU-TG.691 に記載されている。 $DGD_{\max_F}$  (ファイバ部分の最大 DGD)の値は測定されるか、もしくは、もう一方の手段として、上限値は対応するファイバ勧告の  $PMD_Q$  係数を用いて与えられたファイバ長から算出される。

全体のリンクの DGD 制限は、NRZ システムは表 7-6 に、RZ システムでは表 7-7 により与えられる。

表 7-6 / JT-G696.1 NRZでの最大リンク群遅延時間差

クライアントクラス	単位	値
1.25G	ps	240
2.5G	ps	120
10G	ps	30
40G	ps	7.5

表 7-7 / JT-G696.1 RZでの最大リンク群遅延時間差

クライアントクラス	単位	値
1.25G	ps	ffs
2.5G	ps	ffs
10G	ps	ffs
40G	ps	ffs

### 7.8 MPI-S<sub>M</sub> 点もしくはS<sub>M</sub>点における最小光リターンロス

反射は、光パスに沿った不連続な屈折率分布が原因で引き起こされる。これに対する如何なる措置もとられない場合には、戻り光による光源および光増幅器への悪影響、或いは受信器に干渉雑音をもたらす多重反射の影響により、システムのパフォーマンスは悪化する可能性がある。光パスからの反射は、以下を特定することにより、対処される。

- 伝送路の送信参照点（たとえば MPI-S<sub>M</sub>, S<sub>M</sub>）における、全てのコネクタを含めた最小光リターンロス
- 送信参照点（たとえば MPI-S<sub>M</sub>, S<sub>M</sub>）と受信参照点（たとえば MPI-R<sub>M</sub>, R<sub>M</sub>）の間の最大離散反射率

反射率はすべての単一離散反射点からの反射のことであり一方で、光リターンロスは離散反射点からの影響及びレイリー散乱などの逆散乱光を含めた全ファイバからの全反射光に対する入射光のパワーの比となる。

反射量の測定方法は、付録 I/JT-G957 で記述されている。反射率と光反射減衰量を測定する目的のために、参照点 MPI-S と MPI-R は各々のコネクタプラグの端面を想定している。運用システムでの各コネクタの実際の反射性能は含まないものとする。これらの反射量は、特定タイプのコネクタの使用に対し、反射量の公称値を持つとする。

MPI-S<sub>M</sub>と MPI-R<sub>M</sub>での伝送路の最小光リターンロスは、-24dB に制限される。

### 7.9 MPI-S<sub>M</sub> と MPI-R<sub>M</sub>間の最大離散反射

光の反射率とは、ある部位に入射する光のパワーに対して、その部位で反射される光のパワーの比として定義される。反射の抑制は、JT-G957 で広範囲に議論されている。光パス(例えば、分配架または WDM コンポーネント)に含まれる可能性があるコネクタあるいは離散反射点の最大個数は、指定された全光リターンロスを下回るようにしなければならない。これが、ここで引用される最大離散反射を満たすコネクタを使って実現できないならば、さらに反射によるロスが少ないコネクタを用いる必要がある。あるいは、根本的にコネクタの数を減らさなければならない。さらに、多重反射による悪影響を避けるために、コネクタの数を制限する、或いは反射率の小さいコネクタを用いる必要もある。

MPI-S<sub>M</sub>点と MPI-R<sub>M</sub>点の間の最大離散反射は、-27dB に制限される。

## 8 光の安全上の注意

本標準はファイバの構成について説明しているが、比較的高いパワーレベルを扱う光伝送システムの特性は規定していない。光の安全上の注意に関する情報は、ITU-T 勧告 G.664、IEC 規格 60825-1、IEC 規格 60825-2、IEC/TR 規格 61292-4 に記載されている。

本標準による IEC 勧告 60825-2 に定義されている伝送装置の危険レベルは、制約された場所で伝送装置が運用されるために(必要であれば APR 処置を使用して)危険レベル 1 M に制限される。

## 付録 I

### DWDMシステムにとっての論理的制限と設計の留意点

(この付録は本標準を構成する一部ではない)

この付録はイントラドメイン DWDM 光伝送システムの達成可能なリンク距離に対していくつかの物理的及び技術的制限を提示する。

I.1 節では ASE 雑音及び PMD による基本的な制限を論ずる。実際のシステムでの距離を制限する他の影響に関しては I.2 節で引き続き検討する。そして、I.3 節ではこれらの影響を緩和する手法について説明する。I.4 節では 10Gbit/s, 40Gbit/s および 100Gbit/s の混合伝送光波長を解析し、I.5 節では 100G アプリケーションを示す。

#### I.1 投入される技術とそれらの制限

この節では、DWDM アプリケーションの技術的実現性に対するいくつかの基本的な制約事項を示す。リンク光減衰量は光増幅器によって補償され、かつ光波長分散は光波長分散補償器によって補償されると仮定する。

ASE 雑音および PMD は DWDM アプリケーションの容量と伝送距離を制限する最も重大な 障害である。I.1 節の中での議論は NRZ ライン符号を参照する。なぜなら、DWDM アプリケーションではもっとも一般的に用いられるからである。その他のライン符号は異なる結果を与えるだろう。そして、いくつかのケースではより適切であるかもしれない(NRZ に対するいくつかの代替方式は I.3 節で議論する)。

##### I.1.1 ASE 雑音

ASE 雑音の影響は本質的に OSNR によって示される。[b-ITU-T G-Sup.39]に記述されるようにブースター、x-1 ラインアンプおよび、プリアンプを用いたマルチチャネル x スパンの参照システムにおける OSNR は次の式で与えられる。

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

$P_{out}$  はブースターとラインアンプの(チャンネル毎の)出力パワー、単位は dBm。L は、(ラインアンプのゲイン  $G_{LA}$  に等しいと仮定される) スパン損失、単位は dB。  $G_{BA}$  は、光ブースターの利得、単位は dB。  $NF_{eff}$  は光増幅器の雑音指数、単位は dB。  $h$  はプランク定数 (単位  $mJ^*s$ 。  $P_{out}$  の単位 dBm と一致するように)。  $\nu$  は光周波数、単位は Hz。  $\nu_r$  は基準帯域幅、単位は Hz。  $X - 1$  はラインアンプの総数。

式 I-1 は最も支配的に寄与する雑音としてショット雑音と信号自然放出ビート雑音を考慮する。他のノイズの寄与は、いくつかのケースで考えられるかもしれない。

この式は ASE 雑音はすべての x+1 増幅器から計算されることを示す。

この参照システムでは、主に次の仮定がなされている。

- ブースターとプリアンプを含む、チェーン内のすべての光増幅器は、同じ雑音指数を持っている。
- すべてのスパンの (チャンネルあたりの) 損失は、等しい。
- ブースターとラインアンプの (チャンネルあたりの) 出力パワーは等しい。

たとえば、光チャンネル出力パワー  $P_{out}=3dBm$ 、雑音指数  $NF_{eff}=6.5 dB$ 、基準帯域幅  $\nu_r=0.1 nm$ 、スパン損失  $L=22dB$  と仮定し 付図 I-1 に示すような具体化曲線を得る。

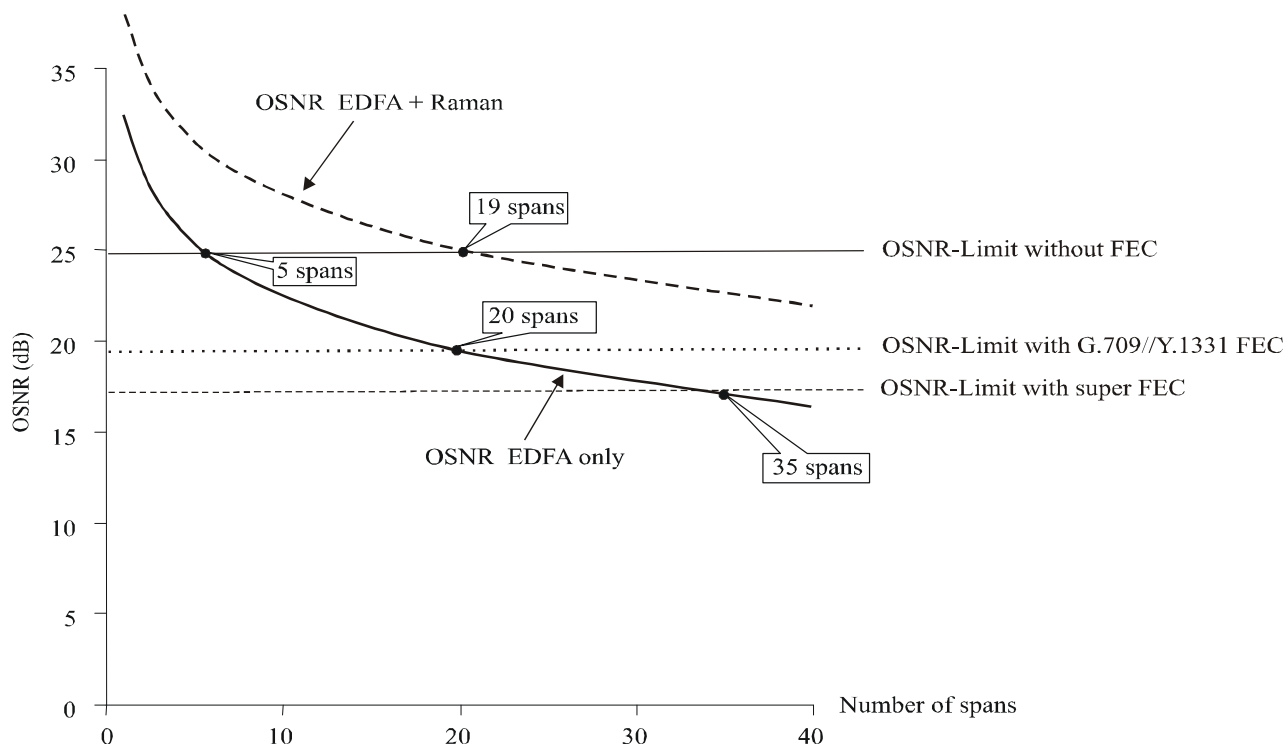
データレート 10Gbit/s で FEC 無しの場合のビット誤り率  $10^{-12}$  での OSNR 限界は 25dB と見積もった場



合、論理的な距離限界は 5 スパンを得る。

もし、JT-G709]準拠の実効符号化利得(NCG)5.6dB の FEC を用いると仮定した場合、OSNR 限界は 19.4dB となり 20 スパン伝送可能である。

例えば[b-ITU-T G.975.1]の付録 I に見られる方式の一つであるストロング FEC を使った場合、8dB 付近の実効符号化利得(NCG)が得られる。その場合、OSNR 限界は 17dB となり 35 スパン伝送可能である。



G.696.1\_F1.1

付図 I - 1 / JT-G696.1 参照システムにおけるOSNRリミット、ラマン増幅有り及び無しの場合のスパン数の関数としてのOSNR

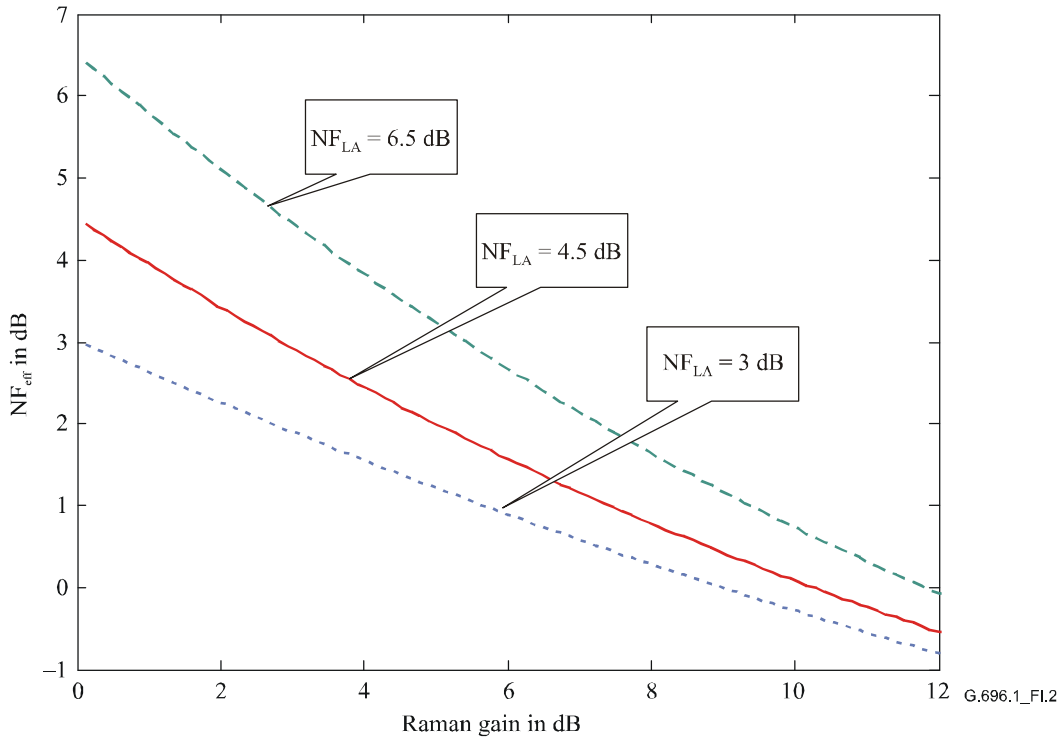
(ITU-T G.696.1)

分布ラマン増幅(DRA)は伝送距離拡張のためのさらなるオプションである。後方励起構成の DRA によって期待される OSNR 改善要因は式 I-2 [b-Islam]で示される有効雑音指数( $NF_{eff}$ )によって計算可能である。

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

ここで、 $NF'_{LA}$  は分離されたラインアンプの線形雑音指数である。 $G'_{Raman}$  は DRA の線形利得、 $P_{ASE,Raman}$  は DRA から結果として生じる ASE 出力、 $\nu_r$  は基準帯域幅。式  $NF_{LA} = 10 \cdot \log(NF'_{LA})$  が成り立つ。ここで、 $NF_{LA}$  は分散ラインアンプの雑音指数、単位 dB。

$P_{ASE,Raman}$  and  $G_{Raman} = 10 \log(G'_{Raman})$  が分析的に計算される [b-Aoki]



付図 I - 2 / JT-G696.1 ラマン利得の関数としてのNF<sub>eff</sub>  
(ITU-T G.696.1)

ラマン利得  $G_{\text{Raman}}$  の関数として  $NF_{\text{eff}}$  を付図 I-2 に示す。ここでは、次のパラメータが仮定される：ファイバー長 80km、信号と励起波長のための減衰係数はそれぞれ 0.275dB/km、0.3dB/km、ファイバの有効断面積  $80\mu\text{m}^2$ 、ラマン利得係数  $3.1\text{E-}14$ 。EDFA の雑音指数は、それぞれ 3dB、4.5dB、6.5dB。ラマンと EDFA を組み合わせた増幅システムでの最大伝送距離は OSNR の式 I-1 における式 I-2 から  $NF_{\text{eff}}$  を挿入し、 $L = G_{\text{Raman}} + G_{\text{LA}}$  を使用して計算する。ここで  $G_{\text{LA}}$  はラインアンプの利得で単位は dB。

ラマン利得を約 9.3dB、EDFA の雑音指数を  $NF_{\text{LA}} = 6.5 \text{ dB}$  と仮定した場合、実行雑音指数  $NF_{\text{eff}} = 1\text{dB}$  を得る。これは付図 I-1 において点線で示される。

結果として、FEC 無しでの論理限界距離は 19 スパンに制限される。JT- G709] FEC を追加した場合は 40 スパンを超える距離が許容されるだろう。

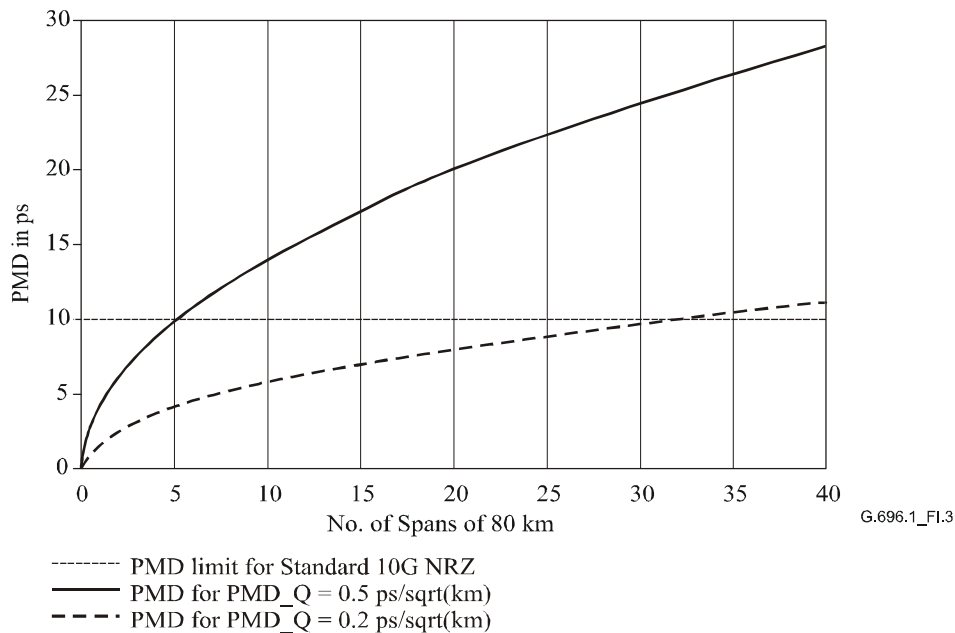
### I.1.2 PMD

全長  $L$  と個々のケーブルセクション PMD 係数  $\text{PMD}_Q$  を有するファイバリンクの合計 PMD は、

$\text{PMD} = \sqrt{L} \cdot \text{PMD}_Q$  で与えられる。10 Gbit/s の NRZ インタフェースの場合、合計 PMD は、10 ps

を超えてはならない(最大 DGD= 30 ps を誘導されたファイバにとって不稼働確率 99.999%に相当する)。

PMD 係数  $\text{PMD}_Q$  の値が  $0.5 \text{ ps/km}^{1/2}$  を超えない場合、これは 400 キロの合計のリンクの長さを示す。そして最大の PMD 係数  $\text{PMD}_Q = 0.2 \text{ ps/km}^{1/2}$  の場合、総リンク長は 2500 キロとなる。付図 I-3 を参照のこと。



付図 I - 3 / JT-G696.1 有用度99.999%の10Gbit/s NRZシステムにおけるPMDとPMD係数の違い及び限界PMDによる距離との関係  
(ITU-T G.696.1)

付図 I-3 は、その 1 次の DGD 耐力に基づいた NRZ ライン符号の最大 PMD<sub>Q</sub> に応じて許容される最大距離についての指標を提供する。この図では機器の PMD の寄与を含まない。  
実際の光ファイバリンク上の実際のシステムは、ファイバリンクとリンクのすべてのノードを構成する機器の両方の組み合わせで PMD 制限を考慮する必要がある。  
一部の環境では、高次 PMD も考慮する必要がある。

## 1.2 伝送距離を制限する他の影響

前節において算出されたリンク距離限界は、理想的環境下において得られうる距離である。しかしながら、実用システムにおいては、最大リンク長を制限するいくつかの要因が存在する。

### 1.2.1 多段接続 EDFA により蓄積されたゲインリップルとラマン効果による誘発されたチルト

実リンク中の実システムではリップルの累積や誘発されたラマン効果によるチャネル間のパワーばらつきを考慮する必要がある。

ゲイン平坦化フィルタ、動的ゲイン/パワー均一化のような技術は、このような効果の影響を軽減するために使用することが可能である。しかし、依然として幾分かの影響が残るであろう。これにより、付図 I-1 に示された伝送可能距離はさらに減少するであろう。

### 1.2.2 非一様スパン長

本標準のアプリケーションコードは、スパン長が同じである場合を考慮している。本付録での議論では、スパンあたり 22 dB の等減衰量が使われている。実システムにおいて、スパン長は通常全て等しくはなく、実際には実ネットワークの形状及び形状的制約に依存する。

一般的な手法でこの「非理想的」な制約を補償することは困難である。これは、同一システムに対して、より長いスパンでは OSNR 「不足」を生じ、より短いスパンでは OSNR 「余裕」に変わるためである。長スパンによる OSNR 「不足」は、スパン前段におけるアンプの出力パワーを増大させることで部分的或

いは完全に補償することが可能である。ただし、増大させたパワーにより余分なペナルティをもたらす非線形効果が引き起こされないことを仮定した。

したがって、一般的に、より長距離のスペンを持つリンクを用いたシステムでは、スペン数はより少なくなければならない。一方、より短距離のスペンを持つリンクを用いたシステムでは、より多いスペン数が許容される。この要件が装置ベンダにおける特定システム的设计に反映されるなら、如何なる詳細を述べるまでも無く、これらのタイプのアプリケーションに関するより包括的な見解がここで単に述べられる。

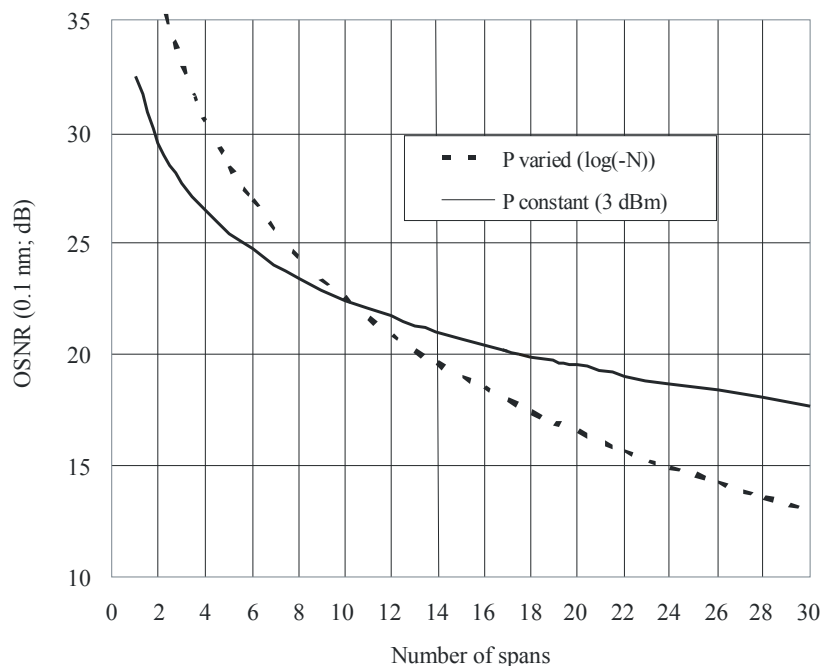
### 1.2.3 光の非線形性

自己位相変調や相互位相変調などの非線形効果はスペンにわたって累積され、スペン数が増大するにつれて深刻となる。したがって、非線形ペナルティは実リンク上では無視出来ない可能性がある。

高いチャネルパワーにより OSNR は良好となるが、必ずしも良好な BER をもたらさない。これは、ファイバの非線形効果に起因する。

ITU-T における G.652 ファイバにおいて平均チャネルパワー3dBm の NRZ 信号の伝送を考えると、10 スペン後に累積した非線形位相シフト  $\Phi_{NL} = \gamma P_{ch} L_{eff} N_{span}$  は、およそ 1 ラジアンであるため、リンク距離が非線形性により制限され、正確な分散マネージメントが必須となる強非線形歪領域における伝送となる。合計スペン数に関係なく、出力パワーを+3 dBm に保つ場合、非線形 SPM シフトは 1 ラジアンをはるかに超える。合計スペン長に関係なく全伝送リンクに対して常に 1 ラジアンを得るためには、入力パワーとスペン数の最適化が必要となる。

付図 I-4 は、付図 I-1 からの OSNR 曲線(EDFA のみ考慮)に対して、3dBm の一定入力パワーを適用した場合(実線)と、ファイバへの入力パワーを  $\log(-N)$ により適応化した場合(破線)の比較を示す。非線形 SMP 雑音の累積が、非線形位相シフト 1 ラジアンに対応する(統合化パワー積) (13dBm) である場合を想定した。したがって、10 スペン目で両曲線が交差しており、破線に比較した実線の悲観的及び楽観的領域を示している。



G.696.1(10)\_Fl.4

付図 I-4 / JT-G696.1 スペンあたり3dBmの一定入力パワー及び非線形(SPM)位相累積を考慮し、スペンあたり  $\log(-N)$ に従い入力パワーの減衰を引き起こす場合のスペン数に対する OSNR (ITU-T G.696.1)

さらなるファイバ非線形性は、[ITU-T G.663]及び[b-ITUT G-Sup.39]で述べられている。また、非線形効果を軽減するための手法はI.3節で議論される。

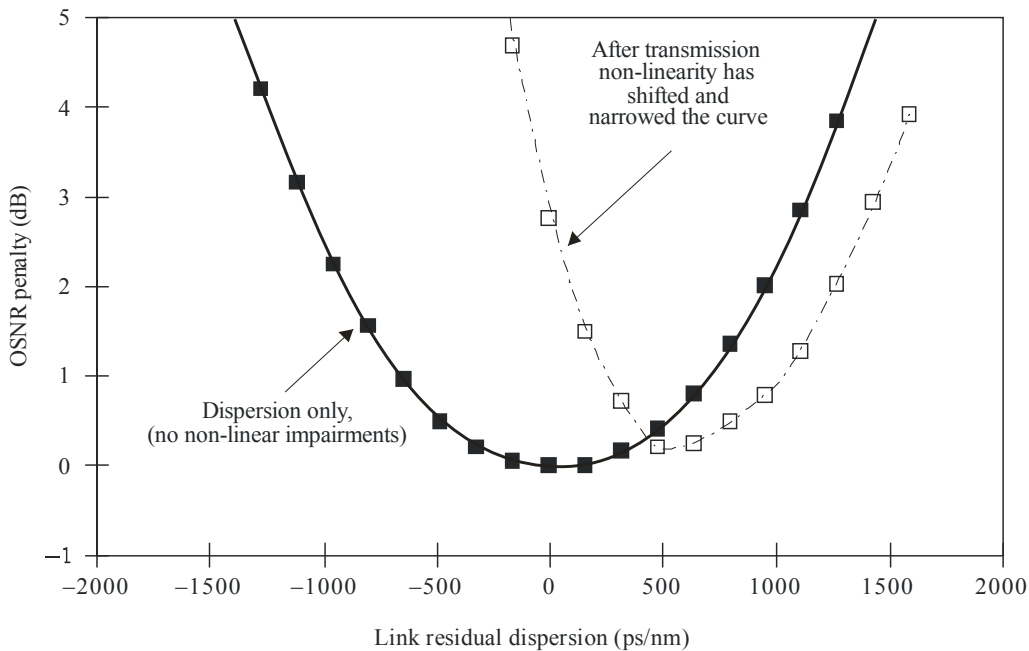
#### 1.2.4 残留分散と分散耐力

付図 I-1 中の曲線では、WDM システムにおいて各チャンネルが過不足なく分散補償されていることを想定している。ファイバにおける分散と、波長スロープと正確に逆特性を持つ分散補償モジュール(DCMs)が使われうる。これは通常の場合ではないが、スパン長の増加に伴い、高次分散を考慮する必要性が出てくる可能性がある。

さらに、いくつかの WDM チャンネルに対して分散を残留させる不適当なスロープは、軽減されなければ、スペクトルを広げ、ファイバ伝送後の分散耐力を下げうる。

例えば、周期的分散補償ファイバリンクに対して、非線形性は分散耐力を狭める負のチャープを引き起こし、最適分散補償点を総分散が正の領域に移す。この効果を、付図 I-5 に示す。

この例は、チャンネルあたりの平均出力パワー3dBmにおいて、ITU-T G.652 ファイバ 10 × 80 km を用いた 10G NRZ による 8 チャンネルの DWDM システムに対するシミュレーションに基づいている。シミュレーションでは、それぞれの 80km 区間における波長分散は、それぞれのラインアンプの部分において正確に補償されていることを想定した。



G.696.1(10)\_Fl.5

付図 I-5 / JT-G696.1 伝送後における分散耐力に対する非線形性の影響例 (ITU-T G.696.1)

#### 1.2.5 累積した PDL の影響

WDM フィルタ、VOA 或いは OA は、デバイスあたり 0.1~0.3dB 或いはこれ以上の偏波に依存した有限なロスを持つ。時間に依存した信号偏波の変動のため、PDL は、統計的に変動する強度変調を光信号に施す。誘起されたパワー変動は、偏波依存利得 (PDG) の影響下にある OA において OSNR 変動へ変換される。

多くの光ネットワーク要素が連結され、拡張された長距離システムでは、累積した PDL は深刻なパワー

変動を引き起こす可能性があり、それはシステム効率と安定性を低下させる場合がある。しかし、パワー変動と OSNR 変動の相関は、必ずしも一対一に対応するわけではない。パワー変動は急激なため、動的なゲイン均一化によって完全に補償されない可能性がある。

偏波多重信号を利用している WDM システムでは、PDL は偏波状態 (SOP) を変動させ、偏波直交性にずれをもたらし、システム効率を低下させ得る。

### 1.2.6 フィルタリングとクロストーク

伝送システムのシンボルレートが増加するにつれ、スペクトル幅は広くなり、光多重器や分離器の動作帯域により制限される可能性がある。位相偏移変調 (PSK) フォーマットは、光フィルタの位相応答に対してより敏感である。その結果、信号は、光多重器や分離器により帯域が侵食される可能性があり、伝送距離が減少される。

さらに、幅広いスペクトル帯域幅を持つ信号では、光多重器や分離器の光絶縁が有限であることに起因し、チャンネル間クロストーク ([b ITU-T G-Sup.39] 9.6.2 を参照) を引き起こす。従って、伝送距離が減少される。

### 1.3 障害を緩和するために用いられる手法

IaDI リンクパフォーマンスを向上させることができる実用的な方法をいくつか示す。

- i) ダイナミックゲイン (利得) の等化
- ii) 変調フォーマット
- iii) 光チャンネル数と間隔
- iv) ファイバの種類
- v) 1 区間内での各種ファイバの混在
- vi) 受信器 (検出方式)
- vii) デジタル等化

#### 1.3.1 ダイナミックゲイン (利得) の等化

アンプの連続使用によってもたらされる利得傾斜を補償するために、統合型光スペクトラムアナライザ (OSA)、または光パワーモニタ (OPM) と調整可能なゲイン平坦化フィルタは、DWDM で集約された信号のすべてのチャンネルにわたって良好な等化を確保するために使用することができる。

#### 1.3.2 変調フォーマット

NRZ 以外の変調フォーマットは、特定の状況下である利点を供給する。

[b-ITU-T G-Sup39]で説明されている、ReturntoZero (RZ) 線形符号化システムは、NRZ システムより、一次 PMD (Physical Medium dependent) 耐性をはるかに優れている。位相変調 RZ のような、変調 RZ 符号化においてさえも、拡張非線形耐性の観点から、より有利になる。これらの特性は、PMD と非線形効果が超長距離における RZ ライン符号化の使用を促進する。

一方、RZ 符号化は、(より広い帯域幅に使用されることに起因する) 潜在的な欠点を持っている。NRZ (b-ITU-T G-Sup.39 参照) に比較して、スペクトラルの効率が悪く、一般的には、NRZ より残留波長分散特性が高感度である。この理由から、RZ 位相フォーマットを採用しているシステムは、より正確な特性とリンクに関連する分散補償が要求される。

NRZ や RZ のほかの線形符号は、DWDM システムに適用することができ、それぞれが利点と欠点を持

つ。特に、超リンク長や DWDM 信号の超高容量においては、特定の線形符号の選択は、独自の最適システム設計に依存している。

### 1.3.3 光チャネル数と間隔

一般的な傾向として、許容可能な DWDM チャネルの最大数は、光非線形効果の増大により、リンク長の増加や、光チャネル間隔の減少により減少する傾向にある。

### 1.3.4 ファイバーの種類

ひとつのファイバ種類は、特定の条件下では他と比較して、有利な点、不利な点がある。

C-Band を例にすると、ITU-T G.652 では、ITU-T G.655 や ITU-T G.653 ファイバよりも大きな分散特性を持ち、非線形効果が低い。

しかしながら、ラマンゲイン増幅はファイバ種類に強く依存しており、ITU-T G.652 ファイバはその大モードフィールド径により、他のファイバより同じ励起光パワーであれば、より小さなラマン利得を示す。

### 1.3.5 1 区間の異種ファイバ混合

光ファイバの非線形効果の影響を軽減するための手段の一つは、1 区間の間に異なる特性を持ったファイバを意図的に混在させることである。例えば、正と負の分散をもつ 2 つのファイバを含む区間は、局所分散 (XPM 効果と四光波混合 (FWM) の影響を軽減することが望ましい) は高く、総分散は低い結果となる (分散補償要求は低減される)。

この場合において、異なる区間で異なるファイバ種類を持つリンクの場合、非線形ゆがみを最小にするためには、入射光パワーはそれぞれの区間の最初の 20km のファイバ種別によって、それぞれの区間において最適化されなければならない。

### 1.3.6 受信器 (検波手段)

一部の高速伝送システムにおいて、特別な受信器は、IaDI リンクの性能を向上させるために使用される。単一のフォトダイオードを使用した簡易な従来型の直接検波受信器 (NRZ 受信器) より高い受信感度や OSNR 許容値を供給する差動検出とコヒーレント検出受信器が、一般的であり、これらは超長距離伝送の実現につながる。

差動検出受信器においては、受信器より前に遅延 (1 ビット遅延のような) が混合されている。差動位相変調光信号は、遅延光光学干渉計と調整された受信器を使用した電気信号変調増幅に変換される。倍の振幅の信号を受信することが可能なため、差動検出は直接検出よりも、約 3 dB 高い感度を提供する。

コヒーレント検波受信器においては、信号光は、その信号と近い波長数を持ったローカル発振器と呼ばれる参照光と混合される。異なる周波数をもつ出力信号は、元の信号の位相情報を含んでいる。変換された光信号は、例えば、光ハイブリッドと調整された受信器を通して、電気信号に変換される。受信器において搬送波を推定するために使用されるアナログとデジタルの変換機とデジタル信号プロセッサを持つデジタルコヒーレント検波は、位相雑音を減少させるのに便利である。このプロセスは線形であり、波長分散や PMD の減衰を補償することができる。直接検波受信器で得られるものより 3 dB 高い感度が得られる。

### 1.3.7 デジタル等化

一部の高速伝送システムにおいて、ファイバの非線形効果を可能な限り軽減する目的で、ノーインライン波長分散補償は適用される。しかしながら、分散は、コヒーレント受信器に連結されたデジタル等化によって補償される一方、ほとんどの補償は受信器でのデジタル等化によってなされ、いくぶんかはインラインにて行われる分散補償によって行われる。デジタル等化は PMD を補償することができる。

## I.4 10 Gbit/s, 40 Gbit/s および 100 Gbit/s 伝送波長の混合伝送

### I.4.1 10G/40G/100G 混合伝送の動機

同一ファイバ上での 10G と 40G チャネルの伝送は、少なくとも 2 つの理由でオペレータにとって興味深い。第一に、10G 伝送用に設計された既設ネットワークは、40G トラフィックにアップグレードされうる。第二に、40G トラフィック用に設計されたネットワークは、低トラフィック装置からの 10G 波長を装備する可能性がある。

混在伝送の利点は、スペクトルが効率的な変調方式によりファイバ容量を最適化する可能性と、同時に 10G で十分な低コストのインタフェースを使用する可能性を含む。光伝達ネットワークを運用する場合、光機器のコストやファイバ所有権、電力消費や機器に必要な物理スペースなどを含むいくつかの要因が考慮されなければならない。よって、10G/40G 混在伝送は運用の総コストを最小化する魅力的な解でありうる。現行の DWDM ネットワークでは、ほとんどの波長は 10 Gbit/s で、変調方式は純粹に NRZ や RZ に基づく振幅偏移変調 (ASK) である。しかし、40 Gbit/s や 100 Gbit/s 以上を含むアプリケーションでは、光デュオバイナリ (ODB) や位相偏移変調 (PSK) 方式 ([b-ITU-T G-Sup.39] の 7 節参照) などを含む他の変調方式が使用されうる。

### I.4.2 ASK/PSK 信号混在伝送の議論と課題

ASK チャネル (NRZ や RZ) と (DPSK、RZ-DQPSK、DP-QPSK などの) PSK チャネルの相互作用は、下記のいくつかの要因に依存する。

- 変調方式
- チャネル設計 (すなわち、異なるフォーマットのチャネルの周波数間隔と位置)
- ファイバ種類 (すなわち、ITU-T G.652, ITU-T G.653, ITU-T G.654 または ITU-T G.655 あるいは混在)
- 分散マップ
- チャネルパワーレベル
- フィルタ反射
- チャネル間の偏波関係
- シンボルレート

シンボルレートに関して、より高シンボルレートの PSK 信号は、非線形性を緩和または分散ペナルティを最小化するため、しばしば 10G ASK 信号だけの場合よりもより正確な分散マネージメントを要求する。波長分散からのペナルティの追加源は、10GASK 信号に最適化されたネットワークで使用される粗い刻みの分散補償器でありうる。

関連する議論は、

- ASK/PSK 信号混在伝送に対する前置補償の最適な選択
- 10G ASK 伝送に最適化されたネットワークで PSK 伝送を許容または向上する分散補償器の再配置 (必要なら)
- 最適な後置補償

PSK 信号への XPM 影響は、PSK チャネルのシンボルレートが高いほど小さい傾向にあることも知られている。参考文献 [b-Spinnler], [b-Griesser], [b-Vassilieva] は更なる情報を含む。

一般に、XPM は所望のチャネルと他のチャネルが近いほど、他のチャネルのパワーが高いほど、2 信号間の偏波の整列がある場合により強くなる。これらは、混在システムで非線形ペナルティの緩和に利用される要因である。



### 1.4.3 PSK/PSK 信号混在伝送の議論と課題

異なるチャンネルが位相偏移変調 (PSK) を利用する場合、追加の課題が出現する。多種の可能な変調方式が b-ITU-T G-Sup.39 の 7 節に示されている。

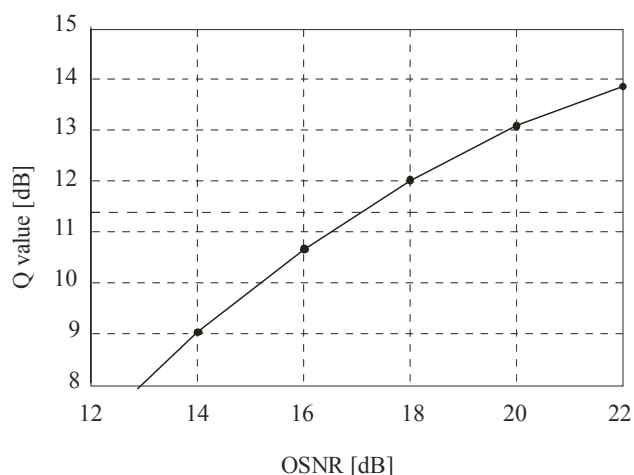
変調方式が PSK であっても、伝送中にフィルタやファイバの分散などによるパワー変動がありうる。これらのパワー変動は ASK 信号と似ており、他の PSK 波長に XPM を通じて劣化を引き起こしうる。

### 1.5 100Gアプリケーション

100 Gbit/s 伝送については、考慮されるべきポイントがある。OSNR 制限と PMD 制限はきわめて重要である。これらの障壁を克服するために、増幅器を使用した 100Gbit/s の長距離 (マルチスパン) 伝送には高度な設計が必要である。

例えば、偏波直交または偏波多重 (DP または PM) の 4 値位相偏移変調 (QPSK) 方式とデジタルコヒーレント受信器の組み合わせは、OSNR 耐性を向上し、また PMD と波長分散による障害を補償できる。

デジタルコヒーレント受信器 (とオフライン処理) を用いた 112 Gbit/s DP-QPSK の室内実験結果の例は、Q 値対 OSNR を示す付図 I-6 に示される。BER= $10^{-4}$  (Q=11.4)での OSNR 制限 (送受直結対向) はおよそ 17dB である。1dB ペナルティでの DGD 耐力は、50ps を超える。



G.696.1(10)\_Fl.6

付図 I - 6 / JT-G696.1 112 Gbit/s DP-QPSK 信号に対する Q 値対 OSNR の例 (ITU-T G.696.1)

## 参考文献

- [b-ITU-T G-Sup.39] ITU-T G-series Recommendations – Supplement 39 (2008), *Optical system design and engineering considerations*.
- [b-ITU-T G.975.1] Recommendation ITU-T G.975.1 (2004), *Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems*.
- [b-IEC/TR 61292-4] IEC/TR 61292-4 (2010), *Optical amplifiers – Part 4: Maximum permissible optical power for the damage-free and safe use of optical amplifiers, including Raman amplifiers*.
- [b-Islam] Islam, M.N., (Ed.) (2004), *Raman Amplifiers for Telecommunications 2 Sub-Systems and Systems*, Springer Series in Optical Sciences, Vol. 90/2, pp. 432, (ISBN:0-387-40656-5).
- [b-Aoki] Aoki, Y. *et al.* (1988), *Properties of fibre Raman amplifiers and their applicability to digital optical communication systems*, IEEE J. Lightwave Technol., Vol. 6, pp. 1225-1239.
- [b-Spinnler] Spinnler B., *et al.* (March 2004), *Nonlinear tolerance of differential phase shift keying modulated signals reduced by XPM*, OFC2004, Paper TuF3.
- [b-Griesser] Griesser H., and Elbers J.-P. (Sept. 2005), *Influence of Cross-Phase Modulation Induced Nonlinear Phase Noise on DQPSK Signals from Neighbouring OOK Channels*, ECOC2005, Paper Tu1.2.2.
- [b-Vassilieva] Vassilieva O., *et al.* (Sept. 2008), *Symbol Rate Dependency of XPM-induced Phase Noise Penalty on QPSK-based Modulation Formats*, ECOC2008, Paper We.1.E.4.