

TR-GSup.41

光ファイバ海底ケーブルシステムの 設計ガイドライン

Design guidelines for optical fibre submarine cable
systems

第1版

2023年10月3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>	5
<ITU-T G Supplement 41(02/2018) 和訳>	6
1. 規定範囲	7
2. 参照	7
3. 定義	8
4. 略語・頭字語	8
5. システム要素のパラメータ	10
5.1 送信機のパラメータ	10
5.2 海底ケーブルのパラメータ	12
5.3 海底中継装置のパラメータ	15
5.4 ケーブルジョイントのパラメータ	17
5.5 受信機パラメータ	18
6. 光ネットワークトポロジ	19
6.1 ポイント・ツー・ポイント	19
6.2 スター	19
6.3 分岐スター	20
6.4 幹線・支線	20
6.5 フェストーン	20
6.6 リング	21
6.7 分岐リング	21
7. システム設計の考慮事項	21
7.1 光パワーバジェット	21
7.2 分散に関する考慮事項	35
7.3 給電サブシステムの設計	37
8. 前方誤り訂正	39
9. 信頼性の考慮	39
9.1 信頼性要件	39
9.2 内部故障	39
9.3 外部故障	42
9.4 故障の発生	43
10. アップグレード可能性に関する考慮事項	43
10.1 アップグレード定義	43
10.2 標準アップグレード	44
10.3 チャレンジングなアップグレード	44
10.4 結論	46
11. 物理層の互換性	46
11.1 単スパン縦方向互換性	46
11.2 単スパンブラックボックス横方向互換性	46
11.3 多スパンブラックボックス完全横方向互換性	47
11.4 多スパンブラックボックス単リンク横方向互換性	47
11.5 多スパンブラックボックス多リンク横方向互換性	47
11.6 単スパンブラックリンク横方向互換性	48

11.7 多スパンブラックリンク横方向互換性	48
参考文献.....	49

<参考>

1. 国際勧告との関係

本技術レポートは、ITU-T 補足文書 G Supplement 41 (10/2018) に準拠したものである。

2. 上記国際勧告等との相違

2.1 追加項目

なし

2.2 削除項目

なし

2.3 変更項目

なし

2.4 章立ての相違

なし

2.5 その他

なし

3. 改版の履歴

版 数	制 定 日	改版内容
第1版	2023年10月3日	制定 (ITU-T G.Supplement 41 (02/2018) に準拠)

4. 工業所有権

本標準に関わる「工業所有権等の実施に係る確認書」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

5.1 参照する勧告、標準など

本文「2. 参照」及び「参考文献」を参照

6. 標準作成部門

光ファイバ伝送専門委員会

光ファイバ海底ケーブルシステムの設計ガイドライン

概要

ITU-T G シリーズ勧告の補足 41 では、光海底ケーブルシステムで同期デジタルハイアラーク(SDH)及び光トランスポートネットワーク(OTN)信号をサポートする、有中継、無中継、及び光増幅システムの設計上の考慮事項について説明している。

1. 規定範囲

本補助文書では、光海底ケーブルシステムで同期デジタルハイアラキー(SDH)及び光トランスポートネットワーク(OTN)信号をサポートする、有中継、無中継、及び光増幅システムの設計上の考慮事項について説明する。特に、本補助文書は、光ファイバ海底ケーブルシステムに関連する特定の事項に焦点を当てる。

本補助文書では、光ファイバ海底ケーブルシステムの設計要件に関する一般的な考え方についても説明しており、[ITU-T G.971]、[ITU-T G.972]、[ITU-T G.973]、[ITU-T G.973.1]、[ITU-T G.974]、[ITU-T G.975]、[ITU-T G.975.1]、[ITU-T G.976]、[ITU-T G.977]、[ITU-T G.978]など、いくつかの勧告に関連する資料を統合し、拡大することを目的としている。

また、本補助文書により、ファイバ、コンポーネント、及びシステムインタフェースに関する推奨事項の仕様をよりよく理解できるようになると考えられる。本補助文書は、光ファイバケーブルシステム技術に関連する技術開発を妨げるものではない。

2. 参照

- [JT-G650.1] TTC 標準 JT-G650.1 (2022)、シングルモード光ファイバ及びケーブルの線形特性の定義及び試験方法
- [ITU-T G.650.2] Recommendation ITU-T G.650.2 (2015), Definitions and test methods for statistical and non-linear related attributes of single-mode fibre and cable.
- [JT-G652] TTC 標準 JT-G652 (2018)、シングルモード光ファイバ及びケーブルの諸特性
- [ITU-T G.653] Recommendation ITU-T G.653 (2010), Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.
- [JT-G654] TTC 標準 JT-G654 (2021)、カットオフシフトシングルモード光ファイバ及びケーブルの諸特性
- [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.656] Recommendation ITU-T G.656 (2010), Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport.
- [ITU-T G.661] Recommendation ITU-T G.661 (2007), Definitions and test methods for the relevant generic parameters of optical amplifier devices and subsystems.
- [ITU-T G.663] Recommendation ITU-T G.663 (2011), Application-related aspects of optical amplifier devices and subsystems.
- [ITU-T G.671] Recommendation ITU-T G.671 (2012), Transmission characteristics of optical components and 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.692] Recommendation ITU-T G.692 (1998), Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers.
- [JT-G693] TTC 標準 JT-G693 (2008)、局内システムのための光インタフェース
- [JT-G694.1] TTC 標準 JT-G694.1 (2012)、WDM用途のスペクトル・グリッド：DWDM周波数グリッド
- [JT-G694.2] TTC 標準 JT-G694.2 (2005)、WDM用途のスペクトル・グリッド：CWDM 波長グリッド
- [ITU-T G.826] Recommendation ITU-T G.826 (2002), End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections.
- [ITU-T G.828] Recommendation ITU-T G.828 (2000), Error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate synchronous digital paths.

- [ITU-T G.911] Recommendation ITU-T G.911 (1997), Parameters and calculation methodologies for reliability and availability of fibre optic systems.
- [JT-G957] TTC 標準 JT-G957 (2001)、SDH多重系光インタフェース条件
- [JT-G959.1] TTC 標準 JT-G959.1 (2019)、光伝送網の物理インタフェース
- [ITU-T G.971] Recommendation ITU-T G.971 (2016), General features of optical fibre submarine cable systems.
- [ITU-T G.972] Recommendation ITU-T G.972 (2016), Definition of terms relevant to optical fibre submarine cable systems.
- [ITU-T G.973] Recommendation ITU-T G.973 (2016), Characteristics of repeaterless optical fibre submarine cable systems.
- [ITU-T G.973.1] Recommendation ITU-T G.973.1 (2009), Longitudinally compatible DWDM applications for repeaterless optical fibre submarine cable systems.
- [ITU-T G.974] Recommendation ITU-T G.974 (2007), Characteristics of regenerative optical fibre submarine cable systems.
- [ITU-T G.975] Recommendation ITU-T G.975 (2000), Forward error correction for submarine systems.
- [ITU-T G.975.1] Recommendation ITU-T G.975.1 (2004), Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems.
- [ITU-T G.976] Recommendation ITU-T G.976 (2014), Test methods applicable to optical fibre submarine cable systems.
- [ITU-T G.977] Recommendation ITU-T G.977 (2015), Characteristics of optically amplified optical fibre submarine cable systems.
- [ITU-T G.978] Recommendation ITU-T G.978 (2010), Characteristics of optical fibre submarine cables.
- [ITU-T G.8201] Recommendation ITU-T G.8201 (2011), Error performance parameters and objectives for multi-operator international paths within optical transport networks.
- [TR-GSup.39] TTC 技術レポート TR-GSup.39 (2017)、光伝送システムの開発と技術的考察
- [IEC/TR 61282-3] IEC/TR 61282-3 (2006), Fibre optic communication system design guides – Part 3: Calculation of link polarization mode dispersion.
- [IEC 61709] IEC 61709 (2017), Electric components - Reliability - Reference conditions for failure rates and stress models for conversion.

3. 定義

正式な定義は勧告に記載されている。

4. 略語・頭字語

本補助文書では、次の略語及び頭字語を使用する。

3R	Regeneration of power, shape and timing	振幅再生、波形整形、タイミング再生
ASE	Amplified Spontaneous Emission	自然放射増幅光
BER	Bit Error Ratio	ビット誤り率
BoL	Beginning of Life	海底ケーブルシステムの初期寿命
BPSK	Binary Phase Shift Keying	2位相シフトキーイング
BU	Branching Unit	分岐ユニット
CF	Compression Factor	圧縮係数
CSF	Cut-off Shifted single mode Fibre	カットオフシフトシングルモードファイバ
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing	低密度波長分割多重

DCF	Dispersion Compensation single-mode Fibre	分散補償シングルモードファイバ
DGD	Differential Group Delay	群遅延差
DPSK	Differential Phase Shift Keying	差動位相シフトキーイング
DSF	Dispersion Shifted single mode Fibre	分散シフトシングルモードファイバ
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	高密度波長分割多重
EDF	Erbium-Doped Fibre	エルビウムドープファイバ
EDFA	Erbium-Doped Fibre Amplifier	
EoL	End of Life	長期寿命
ER	Extinction Ratio	消光比
FEC	Forward Error Correction	前方誤り訂正
FIT	Failure In Time	故障率を表す指標
FWM	Four-Wave Mixing	四光波混合
GF	Gain Flatness	利得平坦度
LOC	Line Optical Channel	ライン光チャネル
IrDI	Inter Domain Interface	ドメイン間インタフェース
MDC	Maximum Design Capacity	最大設計容量
MLM	Multi-Longitudinal Mode	マルチ縦モード
MPI-R	Multi-Path Interface at the Receiver	レシーバでのマルチパスインタフェース
MPI-S	Multi-Path Interface at the Source	送信元でのマルチパスインタフェース
MTBF	Mean Time Between Failures	平均故障間隔
MTC	Marinized Terrestrial Cable	陸上ケーブルをベースにした浅瀬の海底に敷設可能なケーブル
MTTR	Mean Time To Repair	平均修復時間
NDSF	Non-Dispersion Shifted single mode Fibre	非分散シフトシングルモードファイバ
NF	Noise Figure	雑音指数
NG	Nominal Gain	公称利得
NOTS	Nominal Operating Tensile Strength	公称動作張力強度
NRZ	Non-Return to Zero	非ゼロ復帰符号方式
NSIP	Nominal Signal Input Power	公称信号入力強度
NSOP	Nominal Signal Output Power	公称信号出力強度
NTTS	Nominal Transient Tensile Strength	公称過渡引張強度
NZDSF	Non-Zero Dispersion Shifted single mode Fibre	非ゼロ分散シフトシングルモードファイバ
OFA	Optical Fibre Amplifier	光ファイバ増幅器
OOK	On – Off Keying	オン - オフキーイング
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio	光信号対雑音比
OSR	Optical Submarine Repeater	光海底中継器
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry	光時間領域反射率計
OTN	Optical Transport Network	光トランスポートネットワーク
PBT	Power Budget Table	パワーバジェットテーブル
PDG	Polarization Dependent Gain	偏波依存利得
PDL	Polarization Dependent Loss	偏波依存損失
PFE	Power Feeding Equipment	給電装置
PHB	Polarization Hole Burning	偏波ホールバーニング
PMD	Polarization Mode Dispersion	偏波モード分散

QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	4 相位相シフトキーイング
R	Single channel optical interface point at the Receiver	レシーバのシングルチャネル光インタフェースポイント
RZ	Return to Zero	ゼロ復帰符号方式
S	Single channel optical interface at the Source	送信元の単一チャネル光インタフェース
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	同期デジタルハイアラキー
SEOI	Submarine Electro-Optic Interface	海底電気光学インタフェース
SHB	Spectral Hole Burning	スペクトルホールバーニング
SLD	Straight Line Diagram	ストレートラインダイアグラム
SLM	Single-Longitudinal Mode	単一縦モード
SoP	State of Polarization	偏波状態
SPM	Self-Phase Modulation	自己位相変調
SRS	Stimulated Raman Scattering	誘導ラマン散乱
SSG	Small Signal Gain	小信号利得
SWS	Single Wavelength System	単一波長システム
TS	Terminal Station	ターミナル局
TTE	Terminal Transmission Equipment	終端伝送装置
UC	Ultimate Capacity	最大容量
WDM	Wavelength Division Multiplexing	波長分割多重
XPM	Cross-Phase Modulation	相互位相変調

5. システム要素のパラメータ

5.1 送信機のパラメータ

これらのパラメータは、[JT-G957]、[ITU-T G.691]、[ITU-T G.692]及び[JT-G959.1]に示されているように、送信機出力基準点 S 又は MPI-S に定義されている。

5.1.1 システム動作波長範囲

10 Gbit/s までの単一チャネル SDH システムの動作波長範囲は、[ITU-T G.691]及び[JT-G957]に記載されている。50 Gbit/s までの単一チャネル及びマルチチャネル IrDI の動作波長範囲は、[JT-G959.1]に定義されている。その他の用途では、本補助文書に定義されているように、異なる波長帯域及び帯域内の波長範囲を使用することがある。

5.1.2 スペクトル特性

10 Gbit/s までの単一チャネル SDH インタフェースのスペクトル特性は[JT-G957]及び[ITU-T G.691]に記載されている。より高いビットレート及びより長い距離の場合、特に波長分割多重(WDM)環境では、追加の仕様が必要になることがある。

5.1.3 SLM 源の最大スペクトル幅

このパラメータは、[ITU-T G.691]で単一チャネル SDH システムに対して定義されている。

5.1.4 MLM 源の最大スペクトル幅

このパラメータは、[ITU-T G.691]で単一チャネル SDH システムに対して定義されている。

5.1.5 チャープ

このパラメータは[ITU-T G.691]に定義されている。より高いビットレート又はより長い距離のシステムでは、他の符号でも動作する可能性があり、時間分解動的動作の追加仕様が必要になる可能性がある。これには、このパラメータの測定と同様に、さらなる検討が必要である。

5.1.6 サイドモード抑制率

単一縦モード光源のサイドモード抑制比は、[JT-G957]、[ITU-T G.691]及び[JIT-G959.1]に定義されている。勧告値は最大 50 Gbit/s までの SDH 及び OTN ItDI システムに対して示されている。

5.1.7 最大スペクトルパワー密度

最大スペクトルパワー密度は[ITU-T G.691]に定義されている。

5.1.8 最大平均チャンネル出力強度

マルチチャンネル光信号の最大平均チャンネル出力強度は、[JT-G959.1]に規定及び定義されている。

5.1.9 最小平均チャンネル出力強度

マルチチャンネル光信号では[JIT-G959.1]に規定及び定義されている。

5.1.10 中心周波数

WDM 信号の中心周波数は[JIT-G694.1]に示されている。ここでは最小 12.5 GHz 間隔で周波数が与えられる。

5.1.11 チャンネル間隔

チャンネル間隔は、高密度波長分割多重(DWDM)の場合は[JIT-G694.1]に定義されており、低密度波長分割多重(CWDM)の場合は[JIT-G694.2]に定義されている。WDM システムの完全な分類は、[ITU-T G.671]に記載されている。

5.1.12 最大中心周波数偏差

NRZ 符号化光チャンネルの最大中心周波数偏差は[ITU-T G.692]及び[JIT-G959.1]に定義されている。非対称フィルタリングを使用する他の可能性では、別の定義が必要になる場合があり、これについてはさらなる検討が必要である。

5.1.13 最小消光比

NRZ 符号化 WDM システムのチャンネル当たりの値として、最小消光比は[JIT-G959.1]に定義されている。RZ 符号化信号の場合も同様である。その他の符号化については、さらなる検討が必要である。

5.1.14 アイパターンのマスク

単一チャンネル SDH システムのアイパターンマスクは、[JT-G957]、[ITU-T G.691]、[JT-G693]及びその他の勧告に記載されている。NRZ でコード化された ItDI マルチチャンネル及び単一チャンネルインタフェースのアイパターンマスクは、[JT-G959.1]に定義されている。

5.1.15 偏波

このパラメータは光信号の偏波分布である。このパラメータは PMD 許容度に影響する可能性があり、偏波多重伝送の場合に重要となる。

5.1.16 光源の光信号対雑音比

この値は、伝送路に接続された所定の帯域幅を有する光送信機の光ノイズ強度に対する光信号強度の比率である。光信号対雑音比の計算及び推定は[TR-GSup.39]に定義されている。

5.2 海底ケーブルのパラメータ

海底ケーブルは、ケーブルの設計期間を通じて、水圧、縦方向の水の伝搬、化学的浸食、及び水素汚染の影響に対する光ファイバの保護を確保するように設計されている。

また、このケーブルは、標準的な手段による敷設、埋設、修繕、運用の際に、ファイバの性能が低下しないように設計されている。

光ファイバ海底ケーブルの関連仕様及び実装関連は、[ITU-T G.978]に記載されている。

5.2.1 海底ケーブルの分類

5.2.1.1 用途による分類

水中光ファイバケーブルには、次のものがある。

- ・ 中継海底ケーブル;
- ・ 無中継海底ケーブル;
- ・ 海底敷設陸上ケーブル。

中継海底ケーブルは、深海での利用を主として、あらゆる水中用途に使用できる。

無中継海底ケーブルは、浅海と深海の両方での使用に適している。一般的に、湖や川の横断には、陸上ケーブルをベースにした浅瀬の海底に敷設可能なケーブル(MTC)が使用される。通常、すべての海底ケーブルは広範に試験されることで、最悪の気象条件でも、光学的、電氣的、又は機械的な性能や信頼性を損なうことなく、設置及び現場修理できることが示されている。

5.2.1.2 ケーブル保護に基づく分類

光ファイバ海底ケーブルは、海洋生物、魚の噛み傷や摩耗に対する保護、侵略や船舶活動に対する装甲など、利用される深さにおける環境要因の危険性に対する耐性を示す必要がある。[ITU-T G.978]では、さまざまなタイプの保護ケーブルが定義されている。

- ・ 単装甲ケーブル;
- ・ 二重装甲ケーブル;
- ・ ロックアーマーケーブル

5.2.1.3 ケーブル構造によるファイバ保護方法の分類

ケーブル構造の強度は、ファイバの強度と合わせて、ケーブルの全体の機械的挙動を決定する。それらは、敷設、復旧、修繕時にケーブルにかかる累積的な負荷の影響、及び設置されたケーブルにかかる恒久的な負荷又は残留伸びを考慮して、システム設計寿命を保証するように設計する必要がある。

光ファイバの保護には、一般的に次の2種類のケーブル構造が使用される。

- ・ ファイバの伸びが基本的にケーブルの伸びと等しくなるように、ケーブル内でファイバが強く維持されるタイトなケーブル構造;
- ・ ファイバの伸びがケーブルの伸びよりも低く、所定のケーブルの伸びとなるまでファイバの伸びないように、ケーブル内でファイバが自由に移動できるルースなケーブル構造。

5.2.2 海底ケーブルにおけるファイバの伝送パラメータ

一般的に、ケーブル化前のファイバの伝送特性は、[JT-G652]、[ITU-T G.653]、[JT-G654]、[ITU-T G.655]及び[ITU-T G.656]に規定されているものと類似しているか、又は同等である。ファイバの種類は、システム全体のコストと特性を最適化するように選択される。

基本ケーブル区間内のファイバの伝送特性は、ケーブル接続前のファイバの特性からの変動が規定の範囲内となることが望ましい。特に、ケーブル、ケーブルジョイント、及びファイバの設計では、ファイバの曲げとマイクロバンドによる損失増加が無視できることが望ましい。これは、ケーブル及び装置内(光ケーブル接続部、終端、中継器など)の最小ファイバ曲げ半径を考慮しなければならない。

ファイバ損失、波長分散、及び PMD は、システム設計寿命として規定された範囲内で安定していることが望ましい。特に、ケーブルの設計は、使用される水深でケーブルが破損した後でも、外部からの水素侵入とケーブル内での水素発生の両方を許容できるレベルに抑制することが望ましい。ガンマ線に対する光ファイバの感度も考慮する必要がある。

光ファイバを特徴付ける主なパラメータは次のとおりである。

- すべての動作波長における損失係数(dB/km);
- すべての動作波長における波長分散係数(ps/nm・km);
- 零分散波長 λ_0 (nm);
- 動作波長周辺の分散スロープ(ps/nm²・km);
- 非線形屈折率 n_2 (m²/W);
- 実効断面積 A_{eff} (μm²);
- 非線形係数 n_2/A_{eff} (W⁻¹);
- 全体平均偏波モード分散(PMD) (ps/(km)^{1/2}).

これらのパラメータに関して、海底システム設計者はいくつかのタイプの光ファイバを区別する。その中には次のようなものがある。

- [JT-G652]に定義されている非分散シフトシングルモードファイバ(NDSF);
- [ITU-T G.653]に定義されている分散シフトシングルモードファイバ(DSF);
- [JT-G654]に定義されているカットオフシフトシングルモードファイバ(CSF);
- [ITU-T G.655]及び[ITU-T G.656]に定義されている非ゼロ分散シフトシングルモードファイバ(NZDSF);
- 分散補償シングルモードファイバ(DCF);
- 負分散スロープファイバ;
- 実効断面積拡大ファイバ。

システム仕様(データのビットレートとコーディング、波長数、増幅スパン、増幅器出力強度、リンク長など)に応じてシステム性能を確保するために、これらのファイバタイプのさまざまな組み合わせが用いられる。この場合、システムは分散制御されていると言う。

5.2.2.1 ファイバ損失

光ファイバの損失は、dB/km(log 値)又は km⁻¹(線形値)で表される損失係数によって特徴付けられる。

5.2.2.2 ファイバ非線形性

長距離光リンクを高出力光ファイバ増幅器(OFA)で設計する場合は、非線形効果を考慮する必要がある。これらの効果は光リンクに沿って累積され、伝搬特性を大幅に低下させ得る。単一波長システム(SWS)では、主な非線形効果は、一般に、非線形係数(n_2/A_{eff})に規格化振幅の 2 乗を乗じた値に比例する、信号の自己位相変調である。この非線形性は、波長分散が存在すると、時間領域でのパルスの広がりを誘発し、その結果、

システムの性能を低下させる。WDM システムや DWDM システムでは、通常、隣接する波長の存在による相互位相変調が主な影響である。この非線形性は性能劣化を引き起こす。

5.2.2.3 偏波モード分散(PMD)

ファイバコアの完全な円筒対称性からのわずかな逸脱は、基本モードの直交偏波成分に関連する異なるモード屈折率により複屈折をもたらす。PMD はパルスの広がりや誘発し、最大値に制限されることが望ましい。この値はリンク全体で決まり、一般的にはビットタイムスロットの特定の比率に固定される。PMD は $\text{ps}/(\text{km})^{1/2}$ で表される。

5.2.2.4 波長分散

波長分散とは、光信号のすべての波長成分が異なる速度で伝搬することによる、群速度の波長依存性である。これはパルスの広がりや誘発し、大きな障害となりうる。システム設計と、特に波長の数(WDM システム)によっては、パルスの広がりやその他の伝搬効果を制限するために、まったく異なる方法で制御される。一般に、この制御はリンク全体に沿って分散がどのように制御されるかを示す分散マップを用いる。

5.2.3 ファイバの機械的パラメータ

ファイバの機械的性能は、ファイバの全長に対するブルーテストの適用に大きく依存する。光ファイバ耐力試験は、ファイバにかかる負荷又はファイバの伸び、及び適用時間で特徴付けられる。ブルーテストのレベルは、ケーブル構造に対して決定されることが望ましい。ファイバ融着も同様にブルーテストを行う必要がある。ブルーテストの期間は、できるだけ短くすることが推奨されている。

ファイバ及び融着の機械的強度は、ケーブル及び装置内(中継器、分岐ユニット、ケーブル接続ボックス又はケーブル終端)のファイバの最小曲げ半径を考慮することが必要である。

5.2.4 ケーブルの機械的パラメータ

ケーブルは、ケーブル接続ボックス、ケーブルカプラ、及びケーブルトランジションとともに、敷設及び修理作業中はケーブル敷設船で安全に扱われることが望ましい。また、ケーブルはケーブル敷設船の船首を何度通過しても耐える必要がある。

ケーブルは修理可能であり、良好な作業条件での修理中に船内でケーブル接続を行う時間は合理的な短さにすることが望ましい。

ケーブルがグラブネル、アンカー、又は釣り具によって引っ掛けられた場合、通常、直線状態での破断荷重の割合(ケーブルの種類とグラブネルの特性に依存)とほぼ等しい荷重で破断する。この場合、特にファイバに加えられる応力又は水の浸透により、破断点付近のファイバ及びケーブルの寿命と信頼性が低下するリスクがある。ケーブルの破損部分を交換する必要がある。また、長さは指定された値内に収まることを望ましい。

いくつかのパラメータが、ケーブルの機械的特性と、ケーブルの設置、復旧、修理の能力を特徴付けるように[ITU-T G.972]に定義されており、ケーブルの取り扱いの指針として使用される。

- ・ 品質試験で測定したケーブル破断荷重;
- ・ 品質試験で測定されたファイバ破断ケーブルの荷重;
- ・ 特に復旧作業中に偶発的に遭遇する可能性のある公称一時引張強度;
- ・ 修理中に遭遇する可能性のある公称動作引張強度;
- ・ 敷設後のケーブルの状態を特徴付ける公称定常引張強度;
- ・ ケーブルの取り扱いの目安となるケーブルの最小曲げ半径。

5.2.5 ケーブル電気パラメータ

このケーブルは中継器や分岐器の遠隔給電を可能にし、線抵抗の低い電導体と電圧絶縁容量の高い絶縁体を含む必要がある。

5.2.6 海底ケーブルの工場出荷長

海底ケーブルの工場出荷長はできるだけ長くする必要がある。工場出荷長は 25 km 以上が一般的である。

5.2.7 海底ケーブルの物理パラメータ

海底ケーブルの物理的パラメータには、外径、大気中の重量、水中の重量などがある。

5.2.8 修理ケーブル

海底ケーブルが破損・損傷した場合は、修理用ケーブルを使用する。修理用ケーブルは、[ITU-T G.978]に定める光学的特性、電気的特性、機械的特性について、修理対象のケーブルに一致していることが望ましい。

5.3 海底中継装置のパラメータ

海底中継装置のパラメータは、[ITU-T G.974]及び[ITU-T G.977]を参照。

5.3.1 中継装置の種類

中継装置には次の 3 種類がある。

- ・ 3R 電気再生光中継装置;
- ・ EDF 増幅光中継装置;
- ・ ラマン増幅光中継装置。

注:本補助文書の他項では、OFA に EDFA とラマンアンプを含めて使用する。

5.3.2 3R 電気再生光中継装置のパラメータ

5.3.2.1 光学パラメータ

光インタフェースの信号は、光セクションのパワーバジェットを満たす必要がある。特に、システム構築時には、以下の制限を遵守する必要がある。

- ・ 光中継装置の最小平均入力光強度(dBm) :リンク構成時に、中継装置の光入力インタフェースで、ケーブル部の光パワーバジェットに十分なマージンを確保するのに必要な光ライン信号の平均光強度。
- ・ 光中継装置の最小平均出力光強度(dBm) :リンク構成時に、中継装置の光出力インタフェースで、ケーブル部の光パワーバジェットに十分なマージンを確保するのに必要な光ライン信号の平均光強度。

複数の光インタフェースが統合されたシステムでは、上記と同様のパラメータを統合ライン光インタフェースの仕様の一部として規定する必要がある。

5.3.2.2 ジッタパラメータ

光インタフェースにおける中継器のジッタ性能(ジッタトレランス、最大出力ジッタ、ジッタ転送特性)は、システム仕様と互換性を有する必要がある。

複数の光インタフェースが統合されたシステムでは、中継器出力のジッタスペクトル密度、及びアラインメントジッタを、統合ライン光インタフェースの仕様の一部として規定する必要がある。

5.3.3 EDFA 内蔵光中継器のパラメータ

5.3.3.1 光学パラメータ

[ITU-T G.661]では、EDFA の汎用パラメータの定義とテスト方法を規定している。光中継器の EDFA は以下のパラメータを考慮する必要がある。

- ・ 小信号利得(SSG);
- ・ 公称利得(NG);
- ・ 雑音指数(NF);
- ・ 公称信号出力強度(NSOP);
- ・ 公称信号入力強度(NSIP);
- ・ 圧縮係数(CF);
- ・ 最小中継器平均入力強度(単位:dBm);
- ・ 最小中継器平均出力強度(単位:dBm);
- ・ ジッタ性能;
- ・ 移相器の性能。

更に、WDM システムの場合、次のことも考慮する必要がある。

- ・ 利得平坦度(GF)を得る。

5.3.3.2 偏波依存性

システム要件に応じて、EDFA では PDL や PMD などの偏波依存性が十分に小さい光学部品が利用される場合がある。PDG や PHB などの偏波依存性は個別の現象であり、例えば、TTE 送信機における信号偏波スクランプリングの使用など、追加の手段を講ずることによってのみ回避又は抑制することができる。

5.3.4 ラマン増幅器内蔵光中継器のパラメータ

検討中である。

5.3.5 光中継器の機械的パラメータ

5.3.5.1 光中継器の筐体

光中継器の筐体は、機械的、電氣的、光学的性能の低下を生じることなく、大深度で光中継器の動作、敷設、回収、中継を可能にするように設計されなければならない。

光中継器筐体の技術的な設計上の考慮事項は次のとおりである。

- ・ 基本構造設計や部品配置の決定には、性能、信頼性、製造の容易さを考慮すること;
- ・ 効果的な熱分散構造と衝撃吸収構造を有すること;
- ・ 光ファイバ及び電力線の光中継器筐体への通線を可能とする、高信頼性、耐圧性、気密性、低損失のフィードスルーを有すること;
- ・ 耐圧性と十分な引張強度を備えた信頼性の高い低損失ケーブル結合を可能とすること;
- ・ ケーブルと中継器のジョイント構造を有すること。

5.3.5.2 内部ユニット

光中継器筐体内では、内部ユニットに複数の給電モジュールと OFA ペアを収容して、1つ又は複数のファイバペアからの光信号を双方向に増幅することができる。

5.3.5.3 腐食防止

OSR の外部筐体は、海水による腐食を受けないように設計されることが好ましい。

5.3.5.4 水圧抵抗

OSR は、深海中の大きな圧力強度に耐性を有するように設計されなければならない。

5.3.5.5 高電圧絶縁

光中継器の動作保証のため、光中継器筐体と内部ユニットとの間には高電圧絶縁が必要である。

5.3.5.6 熱管理

OSR 内の電子部品によって発生した熱は、光中継器筐体の熱伝導を介して十分に放散される。

5.3.5.7 光中継器筐体の密閉

光中継器は、海水の直接的な侵入と、光中継器近傍におけるケーブル断線による侵入の双方に対し、水とガスの侵入に対する保護を有する必要がある。

5.3.5.8 大気制御

コンポーネントの信頼性と適切な動作には、相対湿度、又は中継器内で発生する可能性のあるガスに対し、内部雰囲気制御が必要になる場合がある。

5.3.6 光中継器の電氣的パラメータ

5.3.6.1 電源モジュール

OSR は、海底ケーブル内の電気伝導体を介して定電流で陸揚げ局から電力を供給される。電源モジュールは、光増幅を行うために OFA ペアに給電する。OSR は両方の電気極性を対応できる。

5.3.6.2 サージ保護

OSR は、海底ケーブルを介した高電圧電源の突然の遮断(ケーブル切断又は PFE ショート)によって発生する可能性のある電力サージから保護する必要がある。

5.4 ケーブルジョイントのパラメータ

ケーブルジョイントは、2 つのケーブルセグメントを結合し、隣接ケーブル区間の光学的、電氣的、及び機械的な連続性を担保する。ケーブルジョイントにより、次のことが可能になる。

- ・ ケーブルのサブセクションを接続してセクションを形成する；
- ・ システム構築時にケーブルを中継器に接続する；
- ・ システムの設置時にケーブル端を終端して、後でケーブル間ジョイントに変換する；
- ・ 海底ケーブルを接続して、海底ケーブルを海岸結合部に陸揚げする。

海底ケーブルジョイントは、船への積み込み、敷設、回収、修理、再敷設の最大 7500 メートルの深さでの過酷な作業中に、ケーブル又は光中継器とケーブルの間の信頼性の高い接続を可能とするように設計されている。装甲海底ケーブルのさまざまな要件を満たすために、適切なケーブルジョイント設計が利用可能である。

5.4.1 光学パラメータ

5.4.1.1 スプライス損失

スプライス損失とは、ケーブルを接続したときにファイバの接続や過剰な光ファイバにより損失が増加することを意味する。スプライス損失は最小限に抑えることが望ましい。その試験方法は、必要に応じて

[JT-G650.1]に従う必要がある。

5.4.2 機械パラメータ

5.4.2.1 強度

ケーブルの抗張力体は、プラグインソケット設計で終端されており、その破壊強度はケーブルに必要な最小破壊強度の90%を超えている。

5.4.2.2 引張強度

引張強度は[ITU-T G.972]に定義されている。その他の可能性については検討中である。

5.4.2.3 腐食防止

結合部は海水による腐食を防ぐために保護されなければならない。

5.4.2.4 水圧抵抗

結合部は大きな圧力強度に耐性を有するように設計する必要がある。

5.4.2.5 結合部の密閉

結合部には、周囲の海水やガスの侵入に対する保護が必要である。

5.4.2.6 曲げ特性

曲げ制限ブーツは、結合部全体の緩やかな曲がりを保証し、敷設船のケーブル処理機械を通過するように設計される。

5.4.3 電気パラメータ

この接続によってケーブルの電気伝導体が終端され、接続部全体で電氣的な連続性が得られる。

5.4.3.1 高電圧絶縁

共同敷設を実現するために、ケーブルの電源導体と海の間には高電圧の絶縁が必要である。

5.4.4 物理パラメータ

ケーブルジョイントの物理パラメータには、長さ、外径、大気中の重量、水中の重量などがある。

5.5 受信機パラメータ

これらのパラメータは、[JT-G957]、[ITU-T G.691]、[ITU-T G.692]及び[JT-G959.1]に示されているように、受信機の参照点 R 又は MPI-R に定義されている。

5.5.1 感度

10 Gbit/s までの単一チャネル SDH システムの受信感度は、[JT-G957]及び[ITU-T G.691]に定義されている。SDH 及び OTN IrDI 受信機の感度は、[JT-G959.1]に定義されている。

受信感度は、製品寿命、経年劣化と温度マージンを考慮した最悪値、及び特定のインタフェースの送信機仕様によって与えられる送信機の不完全性から生じる最悪条件のアイマスクと消光比ペナルティとして定義されている。

ただし、パス効果に関するペナルティは、基本感度値とは別に規定されている。

5.5.2 過負荷

10 Gbit/s までの単一チャネル SDH システムの受信機過負荷の定義と値は、[JT-G957]及び[ITU-T G.691]に定義されている。50 Gbit/s までの SDH 及び OTN IrDI 受信機の過負荷の定義と値は、[JT-G959.1]に定義されている。

5.5.3 最小平均チャネル入力強度

マルチチャネル受信機の最大 10 Gbit/s の光多重化 IrDI の最小平均チャネル入力強度は、[JT-G959.1]に定義されている。

5.5.4 最大平均チャネル入力強度

マルチチャネル受信機の最大 10 Gbit/s の光多重化 IrDI の最大平均チャネル入力強度は、[JT-G959.1]に定義されている。

5.5.5 光パスペナルティ

最大 10 Gbit/s の単一チャネル SDH システムの光パスペナルティの定義と値は、[JT-G957]及び[ITU-T G.691]に定義されている。10 Gbit/s までの単一チャネル及びマルチチャネル OTN IrDI 受信機のパスペナルティの定義と値は、[JT-G959.1]に定義されている。50 Gbit/s までの単一チャネル SDH 及び OTN IrDI 受信機のパスペナルティの定義と値も[JT-G959.1]に定義されている。

5.5.6 最大チャネル入力強度差

このパラメータは、光多重化された信号のチャネル間の最大強度差を示し、[JT-G959.1]に定義されている。

5.5.7 受信機入力での最小 OSNR

この値は、OSNR 制限(ライン増幅)システムにおいて、所定の電力レベルで受信機参照点で所望の BER を達成するために必要な最小の光信号対雑音比を定義する。これは設計パラメータであることに注意されたい。

6. 光ネットワークトポロジ

光ファイバ海底ケーブルシステムの光ネットワークトポロジの種類は、ポイント・ツー・ポイント、スター、分岐スター、幹線・支線、フェストーン、リング及び分岐リングである。この項は[b-Zsakany]で与えられた情報に基づく。

6.1 ポイント・ツー・ポイント

このトポロジは、2つの異なるターミナル局(TS)に配置された2つの終端伝送装置(TTE)間の直結海底リンクを構成する。



図6-1 ポイント・ツー・ポイントトポロジ

6.2 スター

このトポロジは、複数の他の TS と個別のケーブルでリンクするメインターミナル局(TS)とで構成される。

基本スタートポロジでは、トラフィックはメイン TS の TTE から他の TS の TTE に独立して直接送信される。そのため、スターネットワークポロジでは TS ごとに個別のケーブルが必要となり、特に TS が地理的に離れている場合は、比較的成本のかかる構成になる。

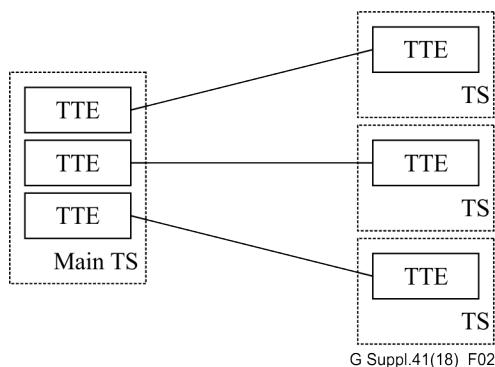


図6-2 スタートポロジ

6.3 分岐スター

このトポジでは、トラフィックの分割が水中で行われることを除き、基本的なスター型と同じ伝送容量が提供され、遠隔地に配置された TS 間の個別のケーブルのコストが最小限に抑えられる。トラフィックの分割は、1本のトランクケーブルのファイバを2つ以上の分岐内の個別のファイバと相互接続する分岐ユニット(BU)によって行われる。

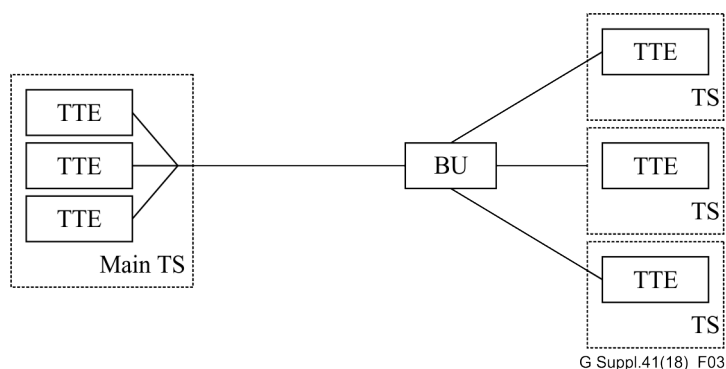


図6-3 分岐スタートポロジ

6.4 幹線・支線

このトポジでは、分岐ユニットを使用して、TTE を含む複数の TS を単一の幹線ケーブルに接続し、支線の TS 方向のトラフィックの一部を抽出できるようにする。

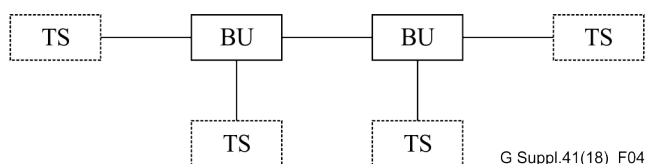


図6-4 幹線・支線トポロジ

6.5 フェストーン

フェストーンは基本的には沿岸の主要な上陸地点間をループするものであり、常にではないが、しばしば無中継システムとして配備される。将来の伝送容量要件の増加を見越して、これらの無中継アプリケーションは通常、サービス黎明期に必要なケーブル心数よりも多いケーブル心数で設計されている。したがって、

追加の伝送容量が必要な場合、必要な追加投資は端末機器だけである。フェストーンのアーキテクチャは、一般的な地上設置型のものとよく似ている。このようなアーキテクチャは、既存陸上システムへの補助的で多様なルート構成手段として使用されることが多い。この構成は、特に陸上の地形的要因により設置と保守が困難な場合に、陸上システムの代替としてますます一般的になっている。

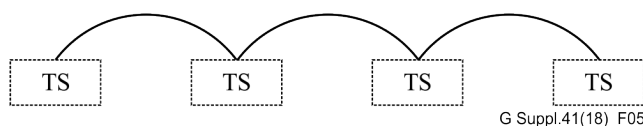


図6-5 フェストーントポロジ

6.6 リング

リングトポロジは、基本的に、必要な伝送容量の2倍の接続されたポイント・ツー・ポイントケーブルのセットである。リング内でケーブル切断などの単一障害が発生した場合、トラフィックはリングを迂回して、動作不能なセグメントから離れ、元の宛先にルーティングされる。陸上の伝送装置は、呼ドロップすることなく、リング全体の自動障害検出と切り替え制御を提供する。

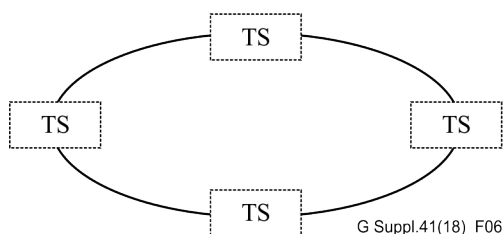


図6-6 リングトポロジ

6.7 分岐リング

このトポロジは、分岐ユニットの追加によってリングの基本的な能力を費用対効果の高い方法で拡張する。分岐リングトポロジは、リングの自己修復性を保持している。分岐リングは、幹線・支線トポロジとリングの組み合わせと考えることができ、それぞれの利点の大部分を保持する。この設定は、他のネットワークを介したフックなど、さまざまな方法で行うことができる。適切な計画があれば、ネットワークを分岐・支線トポロジとして設置し、後で分岐リングにアップグレードすることができる。

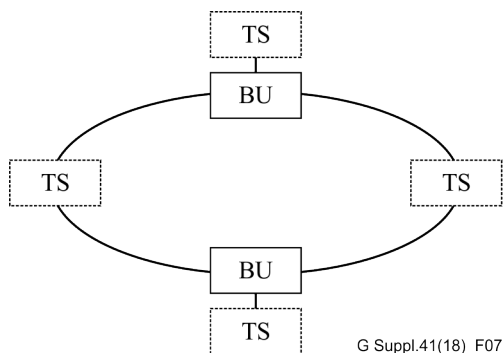


図6-7 分岐リングトポロジ

7. システム設計の考慮事項

7.1 光パワーバジェット

[ITU-T G.977]に定義されている光パワーバジェットは、[ITU-T G.826]及び/又は[ITU-T G.828]に定義されている最小必要 BER 性能よりも優れたシステム性能を保証する性能バジェットである。

光パワーバジェットの場合 1 は、増幅器の ASE ノイズ(平均 Q)による劣化のみを考慮した単純な線形品質係数(Q 値)から始まる。次に、光パワーバジェットは、すべての種類の劣化(伝送に起因するもの、端末装置等によるもの)に対するペナルティ/劣化を割り当てる。劣化は理論解析、コンピュータシミュレーション、実験用テストベッドでの測定を組み合わせで推定される。

光パワーバジェットの場合 2 は、SEOI(海底電気光学インタフェース)実装ペナルティ(対向 Q)に加えて、増幅器の ASE ノイズによる劣化を考慮した SEOI の線形品質係数(Q 値)から始まる。次に、光パワーバジェットは、すべての種類の劣化(伝送、プリエンファシス、製造誤差等に起因)に対するペナルティ/劣化を割り当てる。劣化は理論解析、コンピュータシミュレーション、実験用テストベッドでの測定を組み合わせで推定される。

各海底デジタル回線区間では、2 つの異なるパワーバジェットを設定することが推奨される。1 つは海底ケーブルシステムの初期寿命(BoL)で、もう 1 つは長期寿命(EoL)である。

- BoLのパワーバジェットは、コミッショニング中に測定される最悪ケースのデジタル回線区間の特性を提供する。
- EoLのパワーバジェットは、システム寿命の最後に想定される最悪ケースのデジタル回線区間特性を提供し、エージング、障害、及び修理マージンといった特性マージンを含む。

EoL マージンは、システム寿命の終わりに推定される最悪 Q 値と、必要な伝送特性を満たすための最小 Q 値との差である。更に、光パワーバジェットは、システムの指定されたエラー性能を得るために必要な最小 Q 値を明確に示し、FEC の使用によって提供されるマージンの改善を含める必要がある。

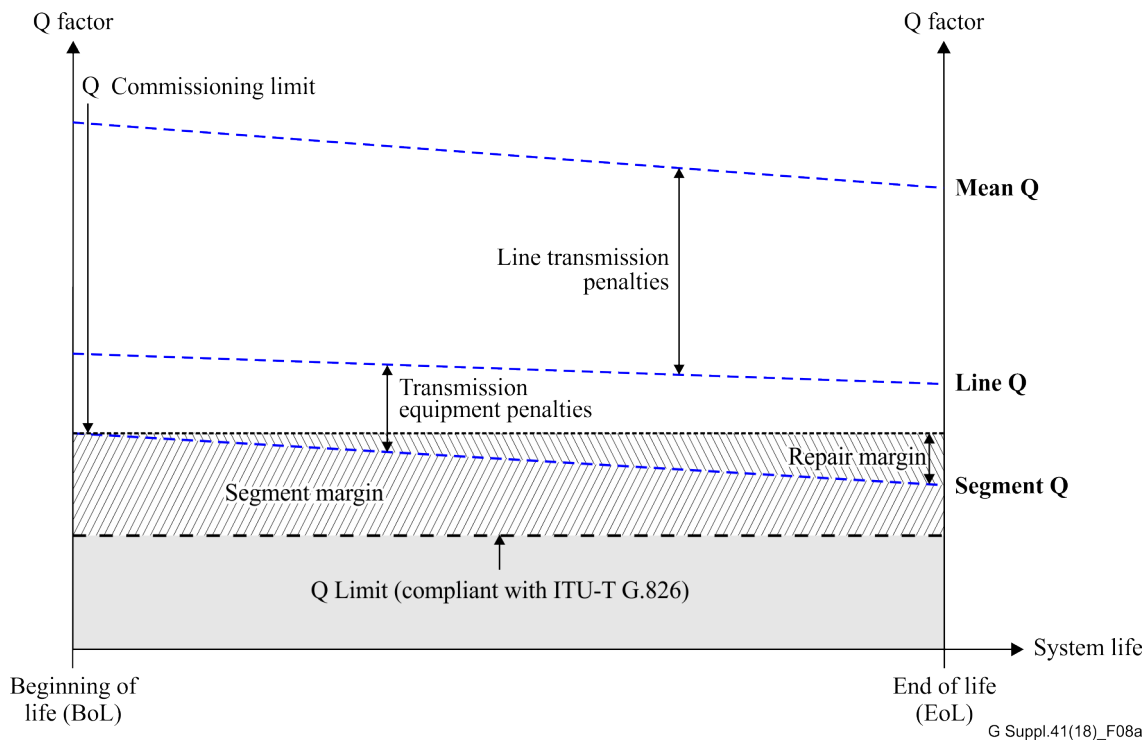


図7-1-a 例1のパワーバジェット構造

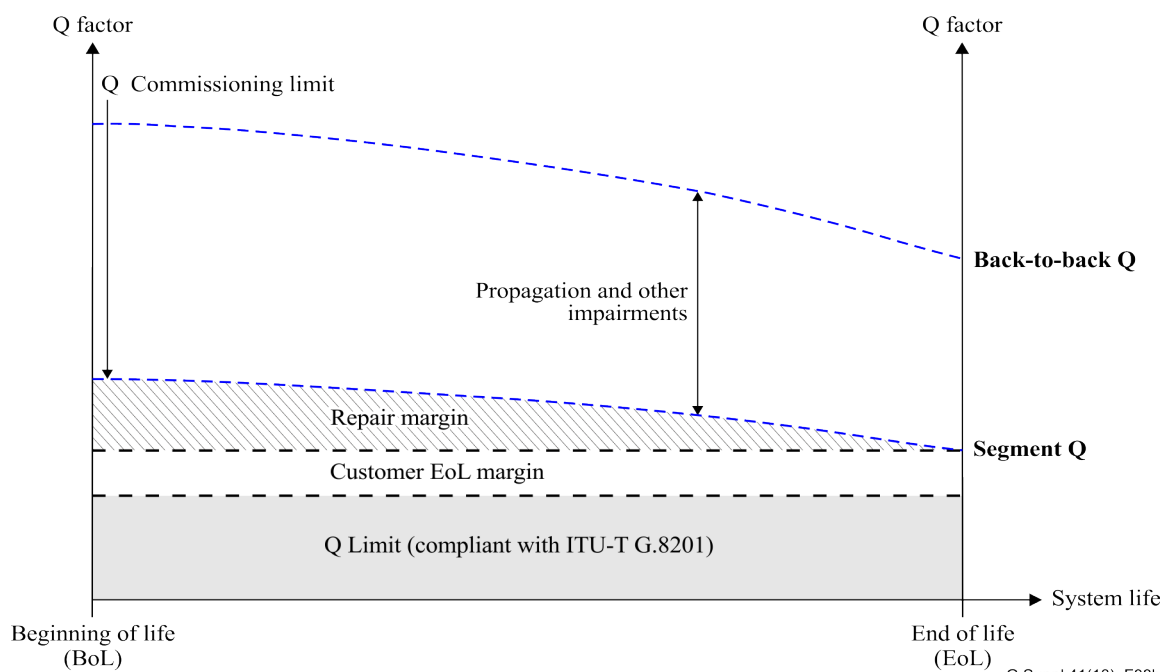


図7-1-b 例2のパワーバジェット構造

7.1.1 品質係数(Q 係数)

海底デジタル回線区間の光パワーバジェット表は、[ITU-T G.977]の付属書 A に記載されている Q 値を使用し、デシベル単位で表される。

Q 値は、[ITU-T G.976]の付属書 A に定義されており、電圧又は電流単位での決定回路における信号対雑音比であり、以下によって定義されている。

$$Q = \frac{(\mu_1 - \mu_0)}{(\sigma_1 + \sigma_0)} \quad (7-1)$$

ここで $\mu_{1,0}$ はマーク/スペース電圧又は電流の平均値、 $\sigma_{1,0}$ は標準偏差である。例えば、 10^{-12} の BER は $Q \approx 7.03$ に相当する。

実用的な Q 値推定技術では、最適なしきい値での信号品質を推測するために、受信したアイ波形の上部と下部の領域で測定を行う。そのため、Q 値は実際の BER の定性的な指標にすぎないと考えることができる。

しきい値を最適値に設定した場合の BER(FEC なしの場合)と Q 値との解析的数学関係は次のとおり。

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (7-2)$$

ここで、

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{\beta^2}{2}} d\beta \quad (7-3)$$

この関数の一般的に使用される近似値は次のとおり。

$$BER \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \quad (7-4)$$

(7-4)の適用条件は、 $Q > 3$ の場合(ガウスの仮定)となる。

Q [b-Spirit]の全範囲にわたって正確な値を与える別の式は次の式で与えられる。

$$BER \approx \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{\sqrt{2\pi} \left(\left(1 - \frac{1}{\pi}\right) Q + \frac{\sqrt{Q^2 + 2\pi}}{\pi} \right)} \quad (7-5)$$

Q 値が 5 以下の場合に対応する上述の 2 つの式で得られる近似値のグラフを図 7-2 に示す。

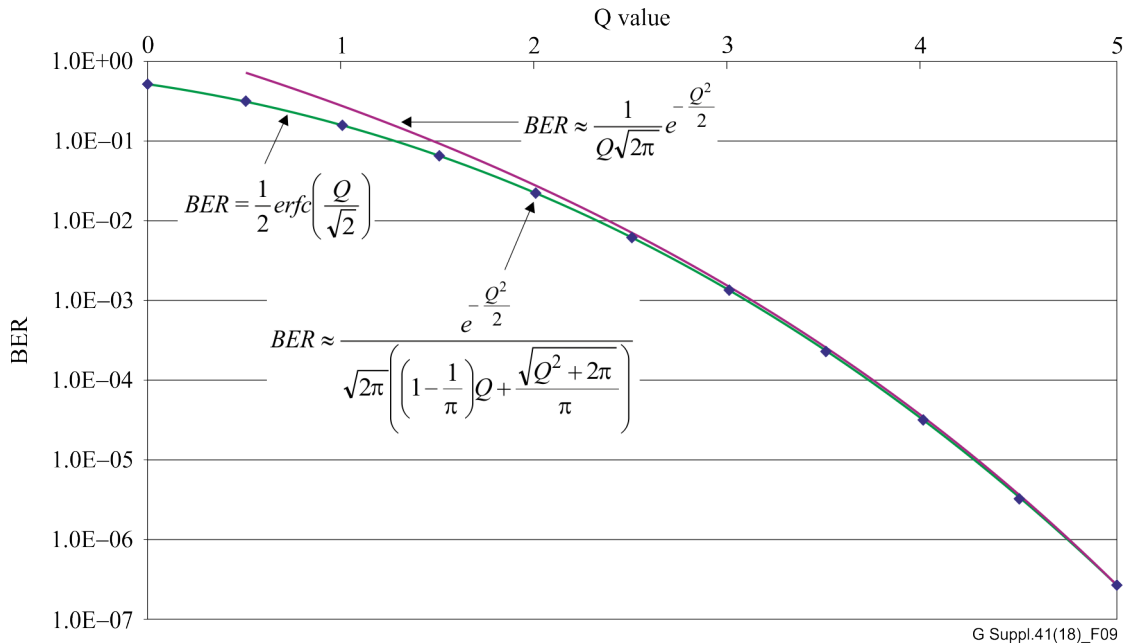


図7-2 BERとQに関する近似値

Q 値は、線形値ではなくデシベルで表される。

$$Q \text{ (デシベル)} = 20 \times \text{Log}_{10} Q \text{ (リニア)} \quad (7-6)$$

海底デジタル回線区間の性能は、その Q 値の測定、又は光パワーバジェットに示された契約上の Q 値試運転制限を満たす必要がある直接 BER 測定によって特徴付けられるべきである。

なお、式 7-2~7-5 はガウス分布の場合のみ有効である。この近似は、海底システムで広く使用されている OOK 技術に基づく変調形式に受け入れられている。DPSK のような位相変調をベースにした変調フォーマットは、海中での応用のためにここ数年再研究されているが、さらなる研究が必要である。

7.1.2 光パワーバジェットの関連パラメータ

[ITU-T G.977]によると、光パワーバジェットは、少なくとも以下の効果と考慮から生じるインペアメントを考慮することが推奨される。

- ・ 光ノイズの蓄積(7.1.3 項) → 平均 Q 値の計算又は対向 Q 値;
- ・ 伝送インペアメント(7.1.4 項) → ライン Q 係数の計算:
 - 波長分散と非線形効果(自己位相変調、相互位相変調、ライン光チャネル間の4波混合効果、誘導ラマン散乱など)の複合効果による伝送インペアメント(7.1.4.1項);
 - 偏波モード分散(PMD)、偏波依存損失(PDL)、偏波依存利得(PDG)などの光偏波効果による伝送インペアメント。これらのインペアメントは時間とともに変動するため、時間による性能変動については明確な規定を設けるべきである(7.1.4.2項);
 - セグメント全体の累積利得曲線が平坦でないことによるインペアメント(7.1.4.3項);

- プリエンファシスが最適点からずれてしまったことに起因するインペアメント(7.1.4.4項);
- 海底デジタル回線区間の波長の調整ミスによるインペアメント(7.1.4.5項);
- 監視機能に起因するインペアメント(7.1.4.6項);
- 製造誤差等に起因するインペアメント(7.1.4.7項);
- 終端伝送装置の特性(終端伝送装置の対向 Q 値性能に関するもの)を考慮したインペアメント(7.1.5 項)→セグメント Q 値の計算;
- 具体的には、EoL のパワーバジェットのために、いくつかのマージンを追加する必要がある(7.1.6 項)→セグメントマージン:
 - 特定修理作業によるマージン(修理スプライス、修理後のケーブル余長追加に起因する損失増加と分散マップの変化など) (7.1.6.1項);
 - ケーブル及びコンポーネントの経年劣化によるマージン(7.1.6.2項);
 - ポンプレーザの故障(7.1.6.3項)などのように、部品の故障を想定したマージン;
 - 未割り当てマージン(7.1.6.4項)。

光チャネル間の相互位相変調や 4 波混合、誘導ラマン散乱、累積利得曲線の非平坦性、及び光チャネルの非最適相対パワーは、WDM や DWDM システムにおいて複数の光信号が同時伝搬する際に特に適用されるインペアメントである。

7.1.3 光ノイズの蓄積

7.1.3.1 光信号対雑音比の計算

光増幅器による中継伝送システムでは、各光増幅器の ASE ノイズが蓄積される。そのため、光信号対雑音比(OSNR)は各光増幅器を通過した後に減少する。このように、OSNR は光増幅器の性能を監視し、性能を示すための有用なパラメータである。図 7-3 は、ベンチマークとして使用されるマルチチャネルシステムを示す(N スパン、N-1 ラインアンプ)。

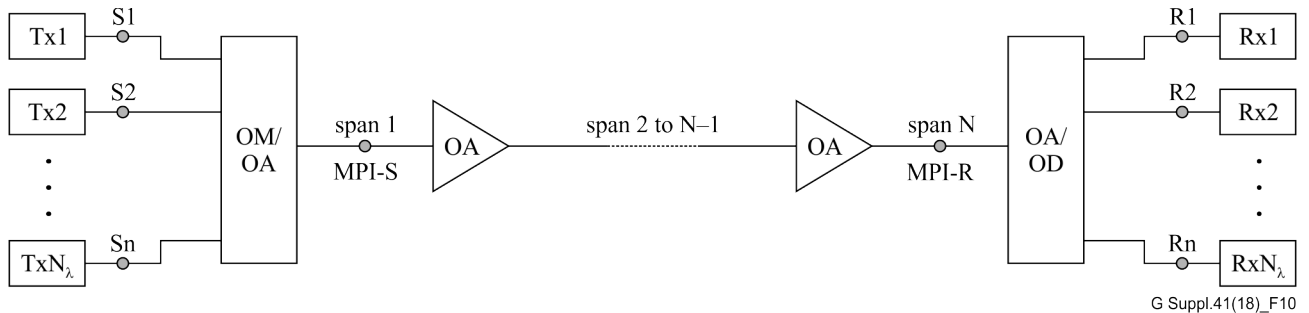


図7-3 光回線システムインタフェースの表現
(マルチチャネルNスパンシステム)

OSNR の計算には、次の 2 つの方法がある。

- i) 一定の信号パワーの場合の単純なノイズ蓄積
- ii) 総出力パワーが一定の場合のノイズ蓄積

もっとも現実的な仮定が ii) であっても、仮定 i) で得られる式は ii) の良い近似であり、広く用いられている。

ここでは、一定の信号パワーの場合のノイズ蓄積による OSNR の計算方法 i) について説明する。

図 7-3 のシステムでは、次の主な仮定がある。

- 中継システムに含まれるすべての光増幅器は同じ雑音指数(NF)を有する;
- 全スパンの損失は等しい;
- すべての中継器の総出力パワーは一定とする。

この場合、受信機(図 7-3 の点 R_i , $i = 1, \dots, n$)の入力における OSNR は、次の式で近似できる。

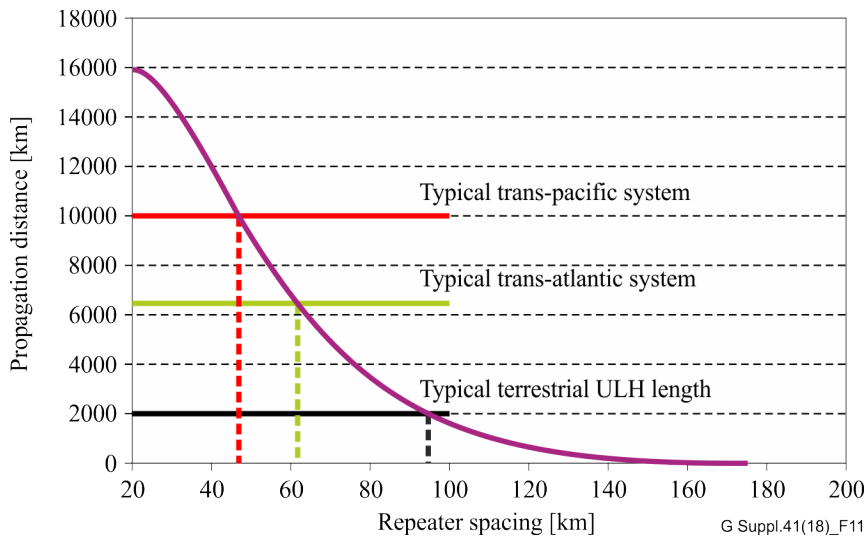
$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_{\lambda} \cdot N_{amp} \cdot \left(NF - \frac{1}{G} \right) \cdot G \cdot h\nu \cdot B_r} \quad (7-7)$$

ここで、 P_{out} は W における増幅器の総出力パワー、 G は増幅器の利得(全スパン損失に等しいと仮定)、 NF は光増幅器の雑音指数、 h は J におけるプランク定数、 ν は Hz における光周波数、 B_r は Hz における光帯域幅、 N_{λ} は波長の総数、 N_{amp} は増幅器の総数である。式 7-7 は、ASE ノイズがすべての N_{amp} アンプから蓄積されることを示している。

ラインアンプの利得が非常に高い場合、すなわち $G \gg 1$ の場合、式 7-7 は次のように単純化できる。

$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_{\lambda} \cdot N_{amp} \cdot NF \cdot G \cdot h\nu \cdot B_r} \quad (7-8)$$

ここで、利得 G は $e^{\alpha L}$ に等しく、 L はスパン長である。その結果、与えられた OSNR について、達成可能な全長はスパン長の関数となる。図 7-4 は、通常の実地システムと陸上伝送システムの典型的なスパン長の例を示している。



注:使用されるパラメータは、OSNR = 基準帯域幅で16 dB $B_r = 0.1$ nm、 $NF = 4.7$ dB、 $N_{\lambda} = 64$ チャンネル、 $P_{out} = 14$ dBm、ファイバ減衰 $\alpha = 0.21$ dB/km。

図7-4 一般的な海底及び陸上伝送システムの伝送距離を実現するために必要な中継間隔の例

システムが無中継でプリアンプのみを含む場合、式 7-8 は次のように修正できる。

$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_{\lambda} \cdot NF \cdot G_{pre-amplifier} \cdot h\nu \cdot B_r} \quad (7-9)$$

ここで、 L はケーブルの長さ(km)、 α は総損失(km^{-1})である。

リモート増幅と送信機での単一ブースターアンプを備えた無中継システムの場合、式 7-7 は次のように修正できる。

$$OSNR = \frac{P_{Trans} \cdot e^{-\alpha L}}{N_{\lambda} \cdot h\nu \cdot B_r \cdot \left(NF_1 + \frac{NF_2}{G_1} \right)} \quad (7-10)$$

ここで、 L はケーブルの長さ(km)、 α は総損失(km^{-1})、 P_{Trans} は送信機の実出力パワー(図 7-3 の MPI-S ポイン

ト)、NF₁とNF₂はリモートアンプとブースターアンプの雑音指数、G₁はリモートアンプの利得を示す。

備考：ラマン増幅を用いた無中海底ケーブルシステムの場合は、別途検討する必要がある。

7.1.3.2 Q 係数計算

受信機の熱雑音とショット雑音を無視し、7.1.1 項で与えられた近似を適用すると、理論的な線形 Q 値は次の関係で近似できる。

$$Q_{lin} = \frac{\frac{2 \cdot OSNR \cdot (1 - ER)}{1 + ER} \sqrt{\frac{B_r}{B_e}}}{\sqrt{1 + \frac{4 \cdot ER \cdot OSNR}{1 + ER}} + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot OSNR}{1 + ER}}} \quad (7-11 a)$$

別の近似を使用することもできる。

$$Q_{lin} = \frac{\frac{2M \cdot OSNR \cdot (1 - ER)}{1 + ER} \sqrt{\frac{B_r}{B_e}}}{\sqrt{1 + \frac{4M \cdot ER \cdot OSNR}{1 + ER}} + \sqrt{1 + \frac{4M \cdot OSNR}{1 + ER}}} \quad (7-11 b)$$

ここで、OSNR は光帯域幅 B_r で表現される光信号対雑音比、ER は線形単位で表現される送信機の消光比、B_e は Hz で表現される受信機の電気帯域幅、B_r は Hz で表現される受信機の光帯域幅、M は変調形式(式 7-11 b のみ、NRZ は M = 1、RZ は M~1.4 [b-Winzer])に関する係数である。係数 M は、光フィルタと電気フィルタの消光比パラメータと伝達関数にも依存することに注意が必要である。

コヒーレント信号に適用する場合(BPSK/QPSK)では、理論的な線形 Q 値は次の関係式[b-Gaudette]でより正確に表すことができる。

$$Q_{lin}^2 = \frac{EC}{\frac{B_e}{B_r \cdot OSNR_{ASE}} + \frac{1}{SNR_{MODEM}} + \frac{1}{SNR_{PROPAGATION}}}$$

ここで、EC は伝送装置の実装不完全性に起因する波形の歪みによる劣化を考慮したアイクロージャーファクター、SNR_{MODEM} は実装に起因するペナルティによって決定されるコヒーレント伝送装置の最大 Q²、SNR_{PROPAGATION} は OSNR 及び伝送装置の実装不完全性に起因する歪みを無視した場合の伝搬後に達成可能な最大 Q² であり、ファイバの非線形性、偏波依存損失(PDL)、及びフィルタのペナルティの寄与を含む。

7.1.4 伝送インペアメント

伝送インペアメントは、単純な ASE ノイズの蓄積を考慮して計算された平均 Q 値に対して、いくつかの追加のペナルティを引き起こす。PBT の例 1 では、Line Q 値を得るために Mean Q 値から差し引かなければならない(図 7-1 を参照)。PBT の例 2 では、BoL セグメント Q を取得するために、バックツーバック Q 値からそれらを差し引く必要がある。

7.1.4.1 非線形効果による伝送インペアメント

光信号電力密度が高くなると、信号と伝送媒体の間の非線形相互作用が現れ始める。スパン長を減らすことなく許容できる OSNR 値を得るためには、高い光信号電力が必要であることに注意する必要がある。その結果、ファイバ非線形性は、再生中継器のない大容量システム及び長距離ルートの方で、特に長い光増幅海底リンクの場合に重要な考慮が払われてきた。一般に、カー効果として知られるファイバの強度依存屈折率に関連する非線形性(自己位相変調、相互位相変調、四光波混合)と、散乱効果に関連する非線形性(主に誘導ラマン)の 2 種類が区別される。ファイバ分散特性、ファイバの有効面積と非線形屈折率、WDM システムにおけるチャネルの数と間隔、信号強度とデータレートを含むいくつかのパラメータが、これらの非線形効

果の大きさに影響を与える。これらの非線形効果については、[ITU-T G.663]の付録 II で説明されている。主な非線形効果のレビューを以下の項に示す(7.1.4.1.1、7.1.4.1.2、7.1.4.1.3 及び 7.1.4.1.4)。

7.1.4.1.1 自己位相変調(SPM)

以下の文章は[ITU-T G.663]の II.3.1 項に基づいており、読者のためにここに転載する。

光ファイバの屈折率は光信号強度に依存するため、光信号強度の時間的変動は自身の位相の変調を誘発する。この効果は自己位相変調(SPM)と呼ばれる。

光伝送システムでは、光強度変化による位相変化のため、自己位相変調によって信号スペクトルが徐々に広がる(図 7-5 参照)。SPM によって引き起こされるスペクトルの広がりが存在する場合、信号は、ファイバの正常分散領域(すなわち、ゼロ分散波長以下)において、波長分散の影響により、ファイバに沿って伝搬する間に時間的な広がりが大きくなる。逆に、異常分散領域では、波長分散と SPM は互いに補償しあい、時間的な広がりが少なくなる。この現象は、ソリトン伝送として知られている。

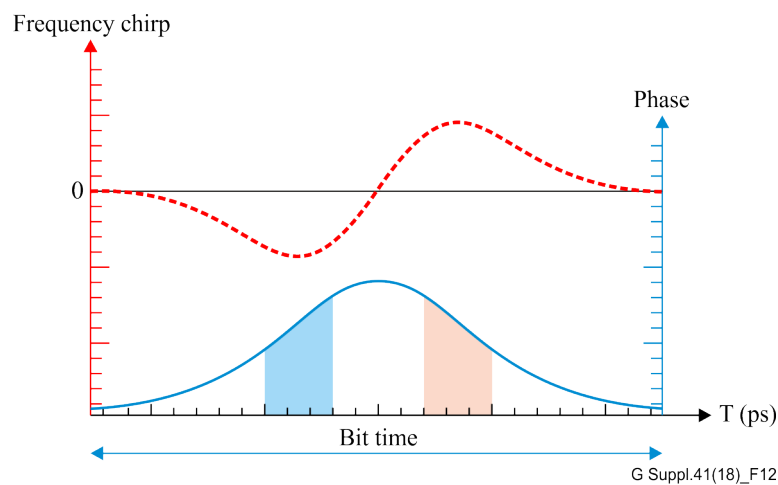


図7-5 位相シフトと周波数の時間変化
SPM [b-Agrawal] によって生じるチャープ

一般に、SPM の効果は、高い累積分散が生じるシステム、又は光学増幅海底システムのような非常に長い到達距離を必要とするシステムにおいてのみ重要である。分散が制限されている正常分散領域で動作するシステムは、SPM による追加の影響を許容しない場合がある。チャンネル間隔が非常に小さい WDM システムでは、SPM によって生じるスペクトルの広がりも隣接チャンネル間の干渉を発生させる可能性がある。SPM の効果は、狭帯域光フィルタリングと組み合わせた場合にも劣化を誘発する可能性がある。SPM は基本的に単一チャンネルの効果であるため、チャンネル数の増加に影響されない。SPM の歪ペナルティはより大きなファイバ入力チャンネルパワーにより増加する。また、ビットレートが高い信号ほどビットの立ち上がり/立ち下りの傾きが大きくなるため、チャンネルのビットレートが高くなることによっても増加する。

SPM の影響は、ITU-T G.655 ファイバのゼロ分散波長を超える波長で動作させることによって緩和できる可能性がある。ファイバ有効断面積の増加、又は非線形屈折率の減少という特性を持つファイバも、SPM ペナルティを減少させる。システム設計の傾向では、スパン距離を長くできるように電力を大きくする必要があるが、すべてのファイバ設計で、ファイバ入力チャンネルパワーを減らすことで SPM の影響を減らすことができる。

7.1.4.1.2 相互位相変調(XPM)

以下の文章は[ITU-T G.663]の II.3.3 項に基づいており、読者のためにここに転載する。

マルチチャンネルシステムでは、相互位相変調(XPM)は、時間的な光強度の変化が隣接チャンネル間の相互作

用による位相の変化をもたらし、信号スペクトルを徐々に広げる。XPM によって生じるスペクトルの広がり量は、チャンネル間隔とファイバの波長分散に関連している。これは、分散によって生じる群速度の差分によって、相互作用するパルスをファイバ伝搬に従い、分離させるためである。XPM によってスペクトルの広がりが生じると、信号は波長分散の影響により、ファイバ伝搬に従い、より大きな時間的広がりが生じる。

XPM からのシステムペナルティは、チャンネル間隔を小さくすることで増加する。SPM について述べたように、信号位相の変化はファイバ屈折率の変化に関連しており、これはチャンネル電力に関連している。平均ファイバ入力電力が大きいほど位相シフトが大きくなり、分散効果と組み合わせるとシステムペナルティが大きくなる。

XPM によるインペアメントは、ITU-T G.653 及び ITU-T G.655 ファイバシステムと比較して、ITU-T G.652 ファイバシステムでより重大である。XPM によるスペクトル広がり量は、WDM システムで隣接するチャンネル間の干渉を引き起こす可能性がある。

システム設計の傾向では、より長いスパン距離を可能にするためにより大きな電力が求められているが、すべてのファイバ設計では、ファイバ入力チャンネル電力を減らすことで XPM の影響を減らすことができる。

7.1.4.1.3 四光波混合(FWM)

以下の文章は[ITU-T G.663]の II.3.5 項に基づいており、読者のためにここに転載する。

四光波混合(FWM)は、四光子混合とも呼ばれ、異なる波長の2つ又は3つの光波の相互作用によって、他の波長で混合積又はサイドバンドと呼ばれる新しい光波が生成される。この相互作用は、主に WDM システムの信号間で発生する。

2つの信号の場合、ビート周波数での強度変調は、ファイバ屈折率を変調し、異なる周波数で位相変調を生成する。位相変調は、この差によって与えられる周波数で2つのサイドバンドを作成する。3つの信号の場合、より多くのより強力な混合生成物が生成され(図 7-6 参照)、チャンネル間隔が周波数で等しい場合には、隣接する信号チャンネルに干渉する。ファイバに沿って伝搬する2つの光波は、サイドバンドと初期信号の間で位相整合条件が満たされれば、高効率で FWM を発生させる。

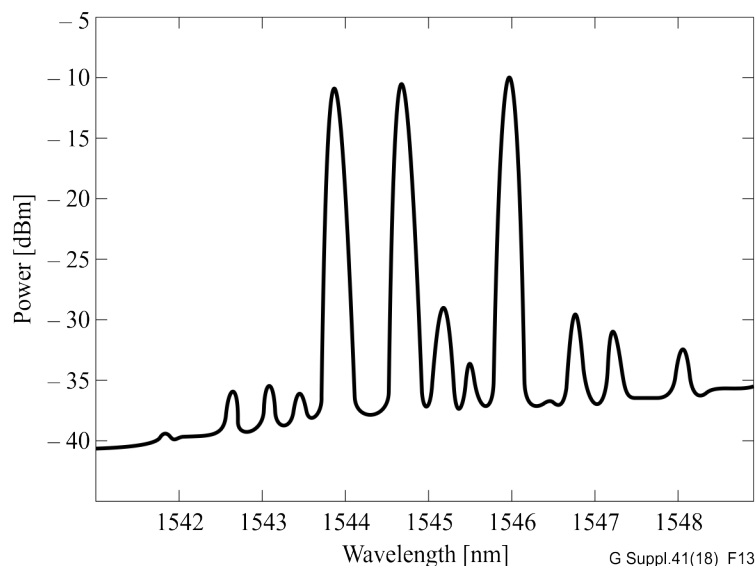


図7-6 分散シフトファイバ 25 kmの出力で測定された光パワースペクトル
(中心チャンネルで $D = -0.2 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$)
3 mW/チャンネル使用時 [b-Tkach]

FWM サイドバンドの生成により、信号電力が大幅に減少する可能性がある。更に、混合生成物が信号チャ

ネルに直接干渉すると、信号とサイドバンドの位相相互作用に応じて信号パルスの振幅利得又は振幅ロスとして現れるパラメトリック干渉が発生する。

パラメトリック干渉によって受信機出力でアイパターンが閉じられるため、ビット誤り率(BER)の特性が低下する。マルチチャネルシステムでは、チャネル数が多くなり、信号チャネルに干渉する可能性のある混合生成物の数が増える傾向にある。

相互作用する光波の間の位相整合を不一致させるため周波数間隔と波長分散を増加させることにより、FWM によって引き起こされるシステムペナルティを減らすことができる。しかし、システムは、同じ光帯域幅に対してより多くのチャネルを使用できるように、周波数間隔を小さくする傾向にある。更に、ファイバ入力チャネル電力が増加すると、FWM の効率(したがってシステムペナルティ)も増加する。

7.1.4.1.4 誘導ラマン散乱(SRS)

以下の文章は[ITU-T G.663]の II.3.7 項に基づいており、読者のためにここに転載する。

誘導ラマン散乱は光とシリカ分子の振動モードの相互作用を含む広帯域性を持つ効果である。SRS は、他の信号チャネル又は自発的に散乱されたラマンシフト光のいずれかの長波長に対して、信号波長をラマンポンプとして動作させる。いずれにせよ、短い波長の信号はこのプロセスによって減衰され、長い波長の信号が増幅される。

誘導ラマン散乱(SRS)は主に大きな帯域幅を持つ WDM システムに影響を与える。WDM システムの短い波長の信号は、その電力の一部が SRS を介して長い波長のチャネルに転送されるため、信号対雑音性能が低下する可能性がある。これにより、チャネルの総数、チャネル間隔、平均入力電力、及びシステム全体のファイバ長に基づいて、システムの総容量が制限される。

WDM システムにおける SRS の影響を除去する実用的な技術は報告されていない。利得フィルタを使用して、誘導された OSNR の傾きを修正できる。SRS の影響は、入力光パワーを減らすことによっても緩和される可能性がある。

7.1.4.1.5 非線形効果の影響

完全分散補償を備えたマルチスパン高速伝送システムは、一般的に単一チャネルシステムの SPM や WDM システムの XPM や FWM などの非線形光学現象の影響を受ける。これらの影響は光入力電力とともに増加する。その結果、ファイバ入力光パワーが非常に高くなると、このような非線形効果によってシステム性能が強く劣化する可能性がある。

通常、WDM システムに対する非線形効果の影響は、スプリットステップフーリエ法[b-Agrawal]に基づく数値シミュレーションツールによって評価される。結果は、ほとんどの場合、周回ループ[b-Bergano]やテストベッドなどの実験ツールによって検証される。

伝送線路の終端で受信される光信号対雑音比が低いため、光入力電力が低いとシステム性能が明らかに低下する(7.1.3 項)。

したがって、低い入力パワー(OSNR 制限)と高い入力パワー(非線形効果制限)の間にはトレードオフが存在する。最良のシステム性能を保証するために、最適な動作点を見つけるために次の点が考慮されている。

- ・ 伝送に使用されるファイバの種類;
- ・ 分散補償方式;
- ・ スパン長;
- ・ インライン光出力電力;
- ・ チャネル間隔。

7.1.4.1.6 結論

与えられた Q 値、例えば 7 より大きい値を達成するための最小光学入力パワーの値を 1 つ選ぶことは不可能である。この最小値と劇的な非線形ペナルティの前に達成可能な最大電力値との間で、所望のシステムパラメータ(ファイバの種類、分散補償、増幅器間隔、チャンネル間隔など)を用いた予備的シミュレーションによって、システムの最良性能領域を決定することができる。

7.1.4.2 光偏波効果による伝送インペアメント

以下の文章は[ITU-T G.663]の II.4.1 項に基づいており、読者のためにここに転載する。

光学部品やサブシステムは、光信号の偏波状態に多かれ少なかれ敏感であることはよく知られている。これらの偏波効果は次の 3 つの部分に分けることができる。

- PMD:偏波モード分散;
- PDL:偏波依存損失;
- PDG:偏波依存利得。

これらについては、[ITU-T G.663]、[ITU-T G.671]、[ITU-T G.650.2]及び[IEC/TR 61282-3]に詳述されている。

これらの影響はすべて、光信号に何らかのペナルティをもたらす、光海底伝送システムの回線設計において考慮されなければならない。特に、温度などの外部条件に依存し、時間とともに性能が変動する。生じたペナルティの計算には統計的手法が推奨される。

7.1.4.2.1 偏波モード分散(PMD)

製造プロセス中に発生する不均一な幾何学的特性のために、光ファイバ複屈折は、偏波状態(SoP)に依存する伝搬時間差を誘発する。偏波モード分散値は、2 つの直交偏波モード間の平均群遅延差(DGD)時間であり、光伝送システムでパルス拡散を引き起こす。

以下の文章は[TR-GSup.39]に基づいており、読者のためにここに転載する。

DGD は PMD 値によって特徴付けられるマクスウェル分布を記述する時間的にランダムに変化する。光ファイバケーブルの PMD は、確率限界として定義される最大 DGD を決定するために、リンクを構成する他の要素の PMD と組み合わせることができる統計的振る舞いとしても表わされる。一方、光ファイバケーブル用 PMD の統計仕様については、[ITU-T G.650.2]の付録 I 及び[ITU-T G.663]の付録 II を参照。一方、[ITU-T G.671]には、他のリンク要素の PMD 仕様と光ファイバケーブルの PMD 仕様を組み合わせ、リンクの合計最大 DGD を決定する方法が記載されている。

$$DGD \max_{link} = \left[DGD \max_F^2 + S^2 \sum_i PMD_{Ci}^2 \right]^{1/2} \quad (7-12)$$

ここで、

$DGD \max_{link}$ はリンクの最大DGD(ps)

$DGD \max_F$ は、光ファイバケーブルを接続した後に得られる最大DGD(ps)

S はマクスウェル調整係数(表7-1参照)

PMD_{Ci} はi番目の成分のPMD値(ps)

この式では、瞬間的な DGD の統計はマクスウェル分布で近似でき、瞬間的な DGD が $DGD \max_{link}$ を超える確率は表 7-1 から得られるマクスウェル調整係数の値によって制御されると仮定している。

表7-1 DGDの平均値と発生確率（参照[JIT-G959.1]）

最大値と平均値の比	最大値を超える確率
3.0	4.2×10^{-5}
3.5	7.7×10^{-7}
4.0	7.4×10^{-9}

したがって、システムが許容できる最大 DGD がわかっている場合、 DGD_{max} を許容可能な確率に対応する最大と平均の比率で割ることによって、等価平均 DGD を導出できる。

詳細については、[TR-GSup.39]及び[JIT-G959.1]を参照。これには、 1×10^{-5} の確率で 10 Gbit/s の NRZ アプリケーションに対して 30 ps の DGD 最大値の計算が含まれる。

PMDパワーペナルティ

[TR-GSup.39]で説明されているように、受信点 R で DGD によって発生する電力ペナルティ(図 7-3 参照)は、2 つの直交偏波モードの相対電力の関数である。このギャップは、光ファイバケーブルの主な偏波軸と信号偏波軸の相対的な関係が変化するため、時間によって変化する。最大リンク DGD は、最悪の場合の電力分割比(両方のモードで等しい電力)で、指定された一次電力ペナルティを超えないように設定される。最悪の場合の一次電力ペナルティは、伝送形式 NRZ 又は RZ の影響も受ける。

10 Gbit/s NRZ アプリケーション([ITU-T G.691]及び[JIT-G959.1]で言及されている)の場合、許容 1 dB の一次ペナルティは、受信点 R での DGD の 30 ps 制限に対応する。

RZ の場合はさらなる研究が必要である。

7.1.4.2.2 偏波依存損失(PDL)

偏波依存損失は、[ITU-T G.971]で、すべての SoP にわたる偏波状態(SoP)の変動による挿入損失の最大変動として定義されている。増幅システムでは、増幅器制御の 1 つのモードは一定の信号電力で動作することである。信号とノイズはどちらも偏波依存損失の影響を受ける。ただし、ノイズは無偏波であるため、信号とノイズの影響は異なる。ノイズは信号に平行な成分と信号に直交する成分に分解できる。PDL と光増幅の組み合わせ効果は常に信号に直交する雑音の成分を増加させることを示すことができる。更に、直交ノイズ成分の大きさは、偏波モード分散による信号偏波の変化に伴って時間とともに変化する。これにより、受信側での OSNR と Q 値が減少する。更に、変動時間は受信機での OSNR と Q 値のフェージングにつながり、どちらもシステム性能のインペアメントにつながる。

各光学部品の累積 PDL によって引き起こされるシステムペナルティは、それぞれの PDL を最小化することによって低減することができる。PDL がシステム性能に与える影響は、増幅器の数が増えるほど大きくなることに注意する必要がある。長距離海底システムでは、増幅器の数が数百にもなるため、その要求は非常に厳しい。偏波変調、すなわち偏波スクランブルは、偏波変動の影響を減らし平均 Q を改善することによってシステム性能を改善することが示されている。

7.1.4.2.3 偏波依存利得(PDG)

偏波依存利得は、[ITU-T G.661]において、公称動作条件における入力信号の偏波状態の変動による利得の最大変動として定義される。偏波依存利得によって引き起こされるシステムペナルティの検討は今後の課題である。

7.1.4.3 累積利得曲線の非平坦性によるインペアメント

累積利得曲線の非平坦性によるインペアメントは、非最適ブリエンファシスインペアメント(7.1.4.4 項)とされる。

7.1.4.4 非最適プリエンファシスインペアメント

プリコライゼーション又はプリエンファシスをインタフェース MPI-S で使用することで、システム内の伝搬中に発生する可能性のあるインラインアンプの利得変動及び利得チルトによる影響を軽減できる。

プリエンファシスは、次のスキームを使用して、アンプの利得変動と利得チルトを部分的に補正する。

MPI-S で最も高い光パワーは、インラインアンプの利得が最も低いチャンネルに割り当てられ、MPI-S で最も低い光パワーは、インラインアンプの利得がより高いチャンネルに割り当てられる。光パワーの最大値と最小値の差は、波長ごとにプリエンファシス値と呼ばれる。

これにより、チャンネル電力のプリエンファシスにより、すべてのチャンネルのシステム伝送性能を均等化することができる。それにもかかわらず、各チャンネルの電力レベルが異なるため、光ファイバ内での伝搬によってさらなるペナルティが発生する。

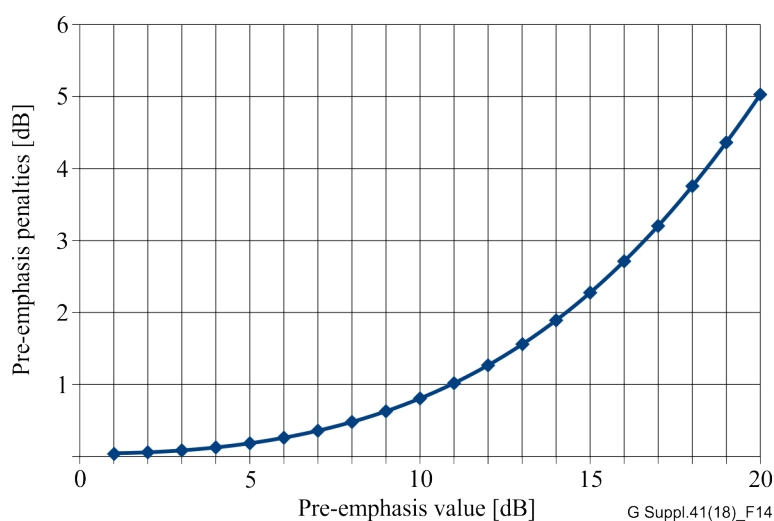


図7-7 プリエンファシス調整によって発生するペナルティの例

7.1.4.5 波長の調整ミスによるインペアメント

信号波長又はフィルタリング機能を担うすべての光学部品(光フィルタ、合波器及び分波器)の調整ミスによって、更にインペアメントが発生することがある。例えば、レーザーと対応する合波器帯域幅の間との間の波長シフトは、Q 値の劣化の原因となる過剰の損失をもたらす可能性がある。

7.1.4.6 監視機能によるインペアメント

これらのインペアメントは、特定の海底機器を監視するために回線上で送信される光学コマンドの使用に関連している。例えば、海底システムで使用されている中継器のほとんどは、光信号を低周波で変調することによって機器状態を問い合わせることができる。この変調振幅はデータ変調振幅に比べて小さく、信号の性能をできるだけ妨害しない。この付加変調によるインペアメントは評価され、回線 Q 値の見積りに考慮される。

7.1.4.7 製造及び環境インペアメント

製造工程では、製造されるすべての機器が全く同じ動作をする、つまり同じ性能を発揮することを保証することはできない。そのため、これらの違いによる伝送性能の変動を考慮して、何らかのインペアメントを割り当てる必要がある。この項目は、システムで発生する可能性のある環境条件の変動(温度や圧力など)にも関係する。

7.1.5 終端伝送装置の不備によるインペアメント

終端伝送装置によるインペアメントは、通常、送信機と受信機をバックツーバック配置した場合に測定される Q 値で表される。セグメント全体の実際の Q 値を計算するには、送信機と受信機の実際特性を考慮する必要がある。次の計算式を用いる。

$$\frac{1}{Q_{Segment}^2} = \frac{1}{Q_{Line}^2} + \frac{1}{Q_{TTE \text{ back-to-back}}^2} \quad (7-13)$$

7.1.6 セグメントマージン

海底システムの設計寿命は 25 年である。修理や経年劣化の対象となる。設計寿命は、いくつかの暫定マージンを満たす必要がある。このマージンをセグメントマージンという。

7.1.6.1 修理作業によるインペアメント

海底ケーブルが敷設された後、ケーブルの修理はその都度、ケーブルを追加する必要がある。この追加ケーブルはスパン損失を増大させ、結果として Q 値の低下を招く。

修理作業マージンは、システムの寿命中に必要な修理の総数を見積もることによって評価される。通常、次のシナリオが使用される。

- ・ 陸上ケーブルの修理:4 km ごとに 1 回、最低 2 回の修理;
- ・ 浅水修理:15 km ごとに 1 回、最低 5 回の修理;
- ・ 深海修理:1000 km ごとに 1 回の修理。

修理作業中は、ケーブルによって運ばれる引張強度を NOTS 及び NNTS 値以下に保つために、システムに予備ケーブルの長さを追加する必要がある。この予備ケーブルの長さは、修理場所の水深によって異なる。通常は、水深の 1.5 倍から 2.5 倍の値が使用される。

修理作業に必要なマージンを計算するには、推定されるすべての修理を追加したときに最悪の場合、追加ケーブルの合計長が評価される。別の Q ファクタは、初期ケーブルの全長と修理によって追加された最大追加ケーブルの合計で計算される。この Q 値と平均 Q 値との差が修理割当マージンに相当する。

7.1.6.2 設備の老朽化によるインペアメント

設備の老朽化によるインペアメントは主にファイバによるものである。実際のところ、その減衰は環境に関連する物理的影響によってゆっくりと増加する。通常、次の 2 つが考慮される。

- ・ ファイバ内の水素の影響:劣化は通常、約 0.003 dB/km の 25 年後の追加損失で近似される;
- ・ 放射線影響:光ファイバは高エネルギー放射線(ガンマ線)に損失を受けやすく、その起源は堆積物、海水、又は人工的な発生源(廃棄物サイト)に関連している可能性がある。25 年後の損失増加は 0.002 dB/km 以下と推定される;

修理作業のインペアメント(7.1.6.1 項)と同様に Q ファクタはこれらの追加損失を使って算出し、設備の経年劣化に必要な余裕値を求めるために、平均 Q 値と比較する。

7.1.6.3 部品の故障を想定したインペアメント

海底機器の交換や修理のための海上作業のコストと複雑さのため、可能な限り介入を避けるために、最も慎重に取り扱うべき構成要素は冗長である。考慮すべき主な障害は、中継器の励起光源の故障である。励起光源の冗長化により、励起光源障害時の出力電力の停止を回避できるが、このような事態は常に出力電力と雑音指数の低下をもたらし、Q ファクタの低下につながる。

これを考慮するために必要な追加マージンは、励起光源の信頼性と設定された冗長度によって異なる。

7.1.6.4 未割り当てマージン

暫定マージンは、耐用年数終了時のすべての修理マージンを考慮した後の残余マージンである。これらのマージンは、システムにより信頼性を持たせるため、又はシステムの最終的な予測外のアップグレードに対するマージンを維持するために、ほとんどの場合、購入者によって要求される。

7.1.7 結論

光パワーバジェット表は、システム特性がどのように満たされるかを示す。推奨される光パワーバジェットテーブルのテンプレートは、[ITU-T G.977]の付属書 A にある。

光増幅器([ITU-T G.973]及び[ITU-T G.977]を参照)を使用する海底システムでは、再生中継は終端伝送装置の海底電気光学インタフェースでのみ行われる。発光と受光間で光雑音の蓄積、伝搬(ファイバ非線形、波長分散など)などによってチャンネルがインペアメントを受ける。そのため、海底デジタル回線区間レベルで光パワーバジェットを設定することを推奨する。システムによっては、インペアメントの異なる複数の海底デジタル回線区間に対応できる場合があるため、更に、各海底デジタル回線区間に光パワーバジェットを設定することを推奨する。

更に考慮すべきことは、場合によっては(例えば WDM-BU の存在)、2つのルート(トランクとブランチ)が異なるインペアメントを受ける可能性があることである。この場合、ルートごとに個別のパワーバジェットを設定し、最悪の場合を考慮する必要がある。

更に、光信号対雑音比の劣化と中継間隔の点で、複数陸揚げ地点システムの設計が最長の海底デジタル回線区間に最適化されている場合、短いものには余分なマージンが利用できる場合がある。通常、未割り当てサプライヤー/セグメントマージンと呼ばれるこれらの追加マージンは、パワーバジェットテーブルで明確に報告される必要がある。

サプライヤーは、パワーバジェットテーブルの妥当性を裏付けるために十分な情報を提供すべきであり、特に以下に限定されない。

- 全体の伝送距離とスパン長の値;
- 送信波長数;
- 送信機での消光比;
- 公称中継器出力電力値;
- 公称雑音指数値;
- 受信機での光と電気の帯域幅の値;
- 端末のバックツーバック Q 仕様;
- 前方誤り訂正符号特性(FEC 前の BER と FEC 曲線後の BER を含む)。

供給者はまた、偏波スクランブラ及び/又はダミーチャンネルのような送信機/受信機端、又は利得等化フィルタ、チルト等化器及び/又は分散スロープ等化器のような海底プラント内のいずれかに位置する装置が伝送性能を改善するために使用されるかどうかを明確にすべきである。

7.2 分散に関する考慮事項

波長分散とは、光信号のすべてのスペクトル成分が異なる速度で伝搬することによる群速度の波長依存性である。これはパルスの広がりを誘発し、大きなインペアメントとなりうる。システム設計によって、特に波長の数(WDM システム)によっては、パルスの広がりやその他の伝搬効果を制限するために、それをまったく異なる方法で管理することが有意義な場合がある。一般に、この管理はリンク全体に沿って分散がどのように管理されるかを示す分散マップにつながる。

7.2.1 波長分散によるパルスの広がり

シングルモードファイバにおける波長分散は、材料分散と導波路分散の組み合わせであり、デジタル信号におけるパルスの広がりや歪みに寄与する。主な原因は、光源の光スペクトルに異なる波長が存在することである。各波長はファイバに沿って異なる位相遅延と群遅延を持つため、出力パルスは時間的に歪んでいる。

7.2.2 波長分散マッピング

単一チャネルシステムの場合は[ITU-T G.973]で、WDM システムの場合は[ITU-T G.977]で説明されているように、分散マップはシステムの波長分散特性を記述するための主要なツールである。累積分散は、終端送信機の出力と光パス内の他のポイントとの間で測定された分散と定義される。分散マップは、光送信機から光受信機までの距離の関数として、与えられた動作波長に対する局所的な波長分散のプロットである。分散マップは、主にシステムの種類(SWS 又は WDM システム)によって異なる。

SWS の場合、一般的に、0に近い負の波長分散が低いファイバがメインセクションに対応するリンクに沿って使用され、正の波長分散が高いファイバが分散補償のいくつかのセクションに対応するリンクに使用される。この管理の目的は、リンク全体の累積分散を 0 に近く保ちながら、局所波長分散を 0 以外に保つことである。

10 Gbit/s の WDM システムの場合、通常、ほとんどのセクション(場合によっては、有効面積の大きいファイバを含むセクションの始めと、分散スロープの小さいファイバを含むセクションの終わりの 2 種類のファイバを使用できる)には負の波長分散は低い(約 $-2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$)ファイバが使用され、分散補償セクションには正の波長分散が高いファイバが通常使用される。この管理の目的は、4 波混合と相互位相変調を制限するために、局所的な波長分散を高く、非ゼロに保ちながら、リンク全体の累積分散を 0 に近く保つことである。

多数のライン光チャネル(LOC)を備えた 10 Gbit/s の WDM システムの場合(図 7-8)、通常、波長分散の大きなファイバがすべてのセクションのリンクに沿って使用される。セクションの 1 つの部分は通常、正の勾配を持つ正の分散(通常は非常に大きな有効面積)であり、残りの部分は負の勾配を持つ負の分散(通常は非常に小さな有効面積)である。

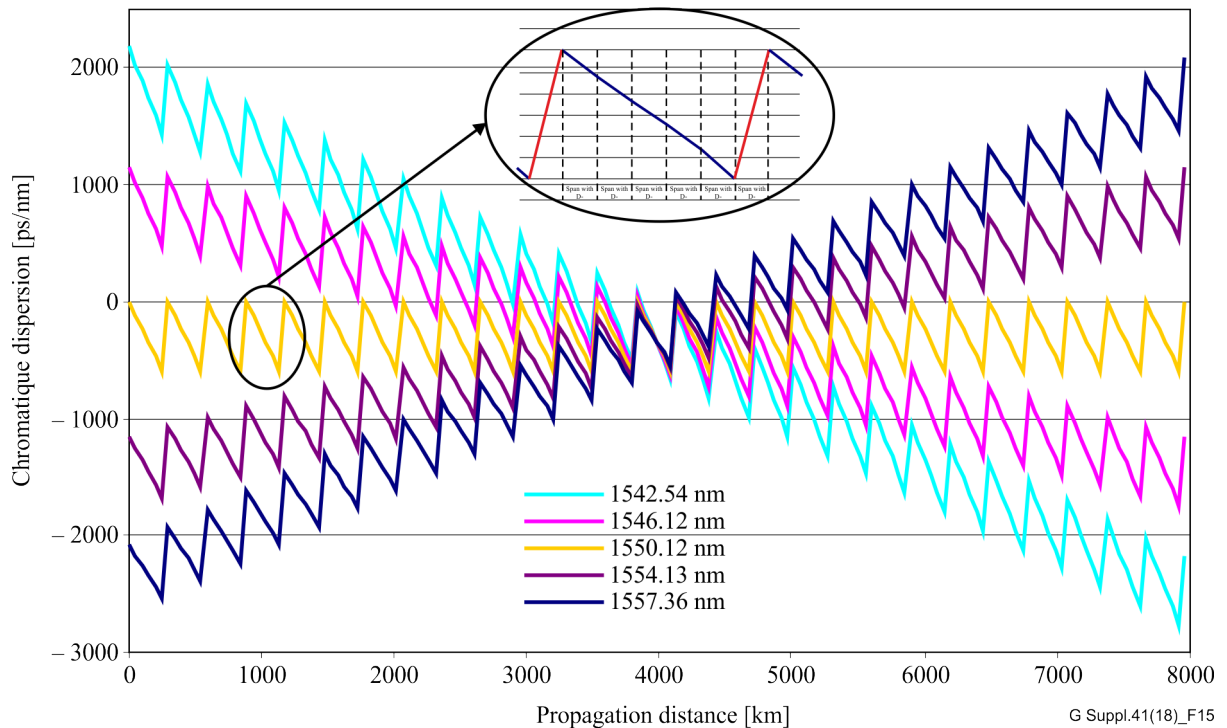


図7-8 1550.12 nmを中心とする40波長向けに設計された163スパン海底WDMシステムの一般的な波長分散マップ

7.2.3 分散管理の実装

各光セクションの分散マップの設計は、伝送要件(非線形効果の制限、パルスの広がりなど)に従っている必要がある。

各波長の残留累積分散は、海底伝送装置の送信側(前置補償)及び/又は受信側(後置補償)で、ある長さの等化ファイバ又は他の受動分散補償装置を使用して補償することができる。通常、単一チャネルシステムでは補償は受信側でのみ行われ、WDM システムでは送信側と受信側の両方で行われる。

システム設計では、計画された分散マップからの変動のすべての原因をランダム及び系統的に考慮する必要がある。以下を含むがこれに限定されない。

- ・ 構成要素 DSF、NDSF、DCF、NZDSF、CSF、負のスロープファイバ、EDF の零分散波長、分散、分散スロープの測定の不確実性など。
- ・ 要素ケーブルセクションのアセンブリにおけるファイバセットの部分の並べ替えと「ランダムな」選択から生じる不確実性;
- ・ ケーブル及び圧力容器内のこれらのファイバの温度、圧力、及びひずみ係数の不確実性;
- ・ 分散測定中のこれらのファイバの正確な温度とひずみの不確実性;
- ・ 設置されたファイバの温度の不確実性;
- ・ 老朽化;
- ・ 修理作業。

7.3 給電サブシステムの設計

7.3.1 給電サブシステムの構成

給電装置は中継装置に直流電力を供給する。PFE は海水を復路として使用し、ケーブルの金属導体を通して一定の直流電流を供給する。

1 つのセグメントの両局から電力を供給できる場合は、給電サブシステムを両端給電として設定し、他の局で PFE に障害が発生した場合やケーブル障害が発生した場合に、1 つの局からの片端給電をサポートでき

るようにする必要がある。1つのセグメントの一方の局からしか電力を供給できない場合は、給電サブシステムを片端給電として設定する必要がある。

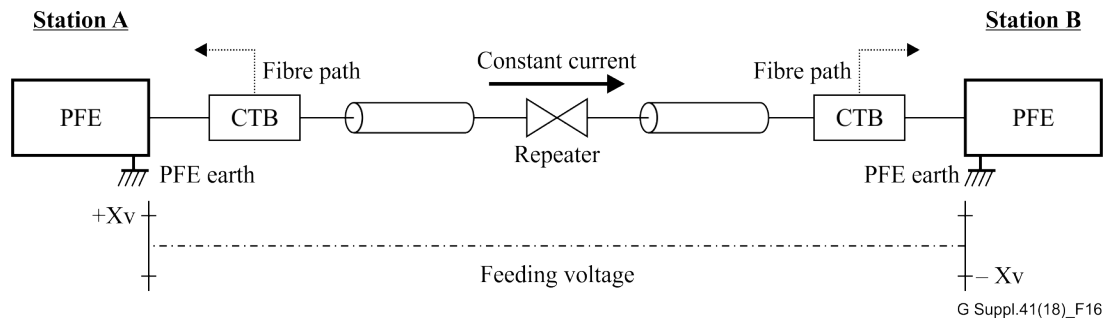


図7-9 両端給電

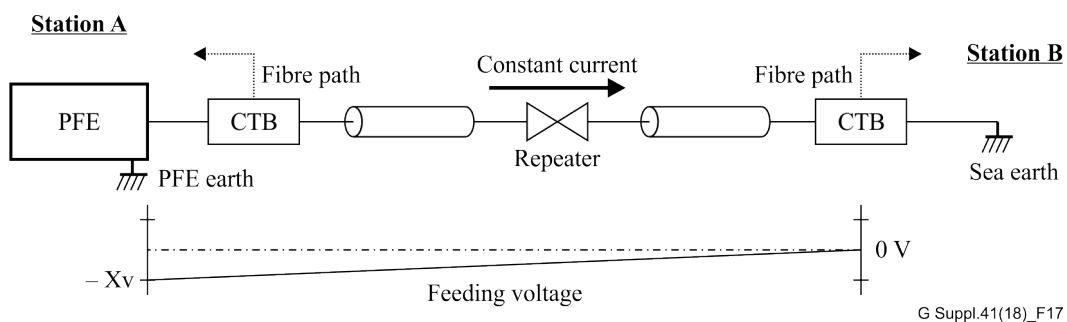


図7-10 片端給電

トランク及びブランチトポロジの場合、外部ケーブルの障害の影響を受けないセグメントに電力を供給できるように、給電構成を設計及び設定できるものとする。これを実現するには、給電経路の切り替えを可能にする切替式分岐ユニット(BU)を使用する必要がある。BUの片側でトランクケーブル障害が発生した場合、電源バスをトランクの反対側へのブランチの両局給電に切り替えることができる。又は、両方のブランチをBUに、トランクの反対側をBUに切り替えて単局給電とする。

BUの電力経路切り替えは、給電電流又は光経路を介して端末局から送信されるコマンドによって制御できる。PFEは極性切り替え機能、分岐セグメントの中継装置はバイポーラ型でなければならない。

PFEが両局給電から単局給電に切り替えられた場合、又はインサービス機器から冗長機器に切り替えられた場合、又はその逆の場合に、搬送されるトラフィックに誘発される可能性のある中断とエラーを最小限に抑える必要がある。

給電サブシステムは、インサービスモード及びアウトサービスモードでのケーブル障害の位置を特定するための電極機能を持つべきである。

7.3.2 給電バジェット

海底ケーブルシステムの給電サブシステムは定電流電気回路であるため、給電バジェットは、必要な冗長性を考慮した上で、電力経路の電圧降下を推定し、経路の両端のPFEの構成を確認するために行われる。バジェットの原則として、可能なすべての給電経路はシングルエンド給電が可能である必要があるが、経済的及びブルーティングに関する考慮事項に従う必要がある。

PFEの各エンドの給電バジェットは、次のように計算できる。

給電バジェット=ケーブル電圧降下+中継装置電圧降下+BU電圧降下+補修ケーブルの限界電圧降下+地電位差

ここでは、ケーブル設置地域での過去の経験に基づいて、kmあたりの接地電位差が0.1Vから0.3Vの間

になる可能性がある。

8. 前方誤り訂正

この項は今後の検討課題である。

9. 信頼性の考慮

海底ネットワークでは、WET プラントでの高額な修理を避けるために、信頼性が高く堅牢な光ファイバシステムが必要である。また、システム存続期間中に技術が変更される可能性を考慮し、システム寿命中に修理を行う場合は、システム寿命の初めの段階でメンテナンススキームを設定し、契約上のシステムの存続期間中に修理が行われるようにする。

システムの存続期間中に発生する障害は、内部障害(ジャント障害、ファイバ損失増加、中継器障害、カード障害など)又は外部からの攻撃(例:WET プラントに対する錨や漁労活動、ドライプラントに対する誤操作)による場合がある。

9.1 信頼性要件

信頼性は、コンポーネント又はサブシステムが特定の条件下で特定の期間にわたって必要な機能を実行する確率として定義される。これは異なる指標で表すことができる。

- ・ 一般に FIT(failure in time)で表される故障率(λ); 1 FIT は、1 時間の動作中に 10^{-9} の確率で障害が発生することを表す。この値は温度に依存し、動作温度で記録する必要がある。
- ・ 平均故障間隔(MTBF): 故障から次の故障までに予想される間隔。

なお、これらの統計値は個々のデバイスとしては意味を持たず、絶対的な期待値ではなく故障に関する性能確率のみを示していることに注意する必要がある。

最初に、全体的な信頼性制約を使用して、各サブシステムで許容される信頼性を推定し、次に各コンポーネントで許容される信頼性を推定する。次に、所定のシステム寿命に対するコンポーネントの必要な信頼性が、故障率 (λ) 又は MTBF に変換される。

システム又はサブシステムの場合、次のようなものが定義される。

- ・ 平均修復時間(MTTR): 故障の修復に必要な予想時間で表す。
- ・ 停止時間 = MTTR/MTBF: 通常、ネットワークがその機能を実行できない年間当たりの時間を分単位で表す。
- ・ ネットワークの可用性(%) = (合計時間-停止時間)/合計時間*100%。

9.2 内部故障

海底システムの信頼性目標(内部故障の最小化)を達成し、システムの全寿命にわたって適用可能なメンテナンスポリシーを確立するために、故障の根本原因をコンポーネント、サブシステム、及びシステムレベルで特定する必要がある。したがって、システム内で使用されるすべてのコンポーネントの信頼性は、契約上のシステム寿命(一般に 25 年)の間実証されなければならない。予測される信頼性は、多くの場合、[ITU-T G.911]、[IEC 61709]、[b-Telcordia SR-332]、及びコンポーネントのサプライヤーデータに基づいている。

9.2.1 故障率分析

9.2.1.1 初期故障

稼働初期条件下には、海底システムで使用されるユニット又はコンポーネントの故障率は、時間とに減少する。この短い期間を初期故障期間(通常は 1~2 年)という。主に理想的でない製造プロセス(原材料の欠陥、不適切な操作、汚染された製造環境、電力サージ、不十分な検査又は不十分な出荷と取り扱い)によるもので

ある。初期故障率はデバイスの一括ロットと関連しており、単一のデバイスの振る舞いを反映することはできないことに注意する必要がある。単一のデバイスの品質試験では、合格若しくは不合格のいずれかであり、一定数のユニット失敗率は減少曲線に従う。水中設備については、認定プロセスによってこのような初期の高故障率を回避することができる。

9.2.1.2 ランダム障害

初期故障の後の期間は、故障率が低いという特徴がある。この期間は、耐用年数と呼ばれ、最終フェーズの開始(消耗期間)まで故障率がほぼ一定である。一定の故障はランダムなプロセスに従い、一般に高度に制御されたプロセスでも検出できない。

9.2.1.3 エージング

最後の期間は、システムと関連コンポーネントが使用中に摩耗し始めるときに発生する。故障は、経年劣化、材料疲労、過度の摩耗、環境腐食、望ましくない環境又は累積的な損傷に起因する場合がある。

故障率の挙動は、従来、図 9-1 に示すように、システムの寿命中のバスタブ曲線として記述される。

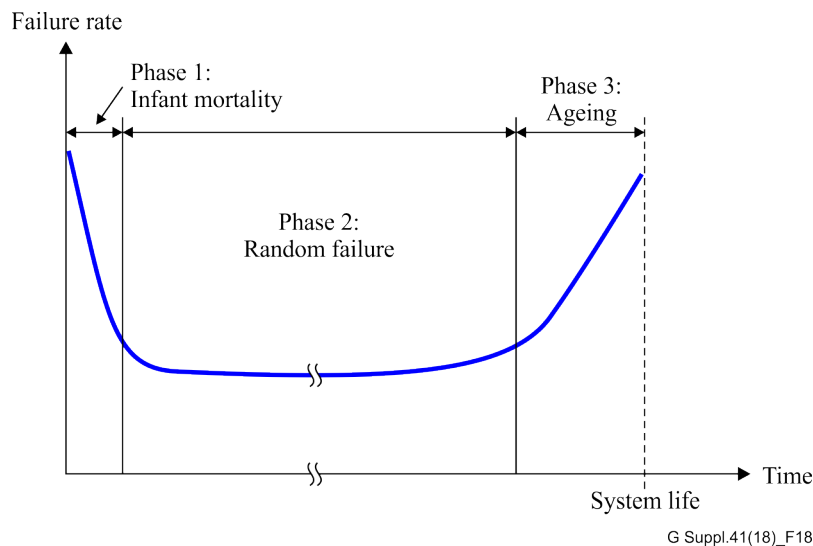


図9-1 システムの寿命中の一般的な故障率

9.2.2 WET プラントの信頼性

WET プラントは MTTR が大きいため、信頼性の面でドライプラントよりも重要である。一般的な MTTR 値では、WET プラントの修理に約 2 週間かかるが、ドライプラントの修理には 2 時間程度である。信頼性の観点から、中継器内で使用されるポンプレーザの故障率がシステムにとって敏感な問題である理由はこのためである。たとえば、地上ネットワークのアンプの一般的な故障率は 1000 から 1 万 FIT 以内であるのに対し、海底アンプは 10 から 100 FIT 以内である(およそ二桁低い)。

超高信頼な海底システムを設計するという事は、システムの寿命の間に発生する摩耗故障の確率はほぼ存在せず、ランダムな故障の確率は可能な限り最小にしなければならないということである。

中継器は電子部品、光学部品、光電子部品を含む重要な装置である。また、原因が何であれ、内部の損傷が伝送品質に直接影響を与える可能性があることに留意する必要がある。そのため、障害の発生を防ぎ、リスクを軽減するための注意が必要である。特に、特定のファイバで発生した障害が、他のファイバのシステム特性に影響を与えないようにする必要がある。ケーブルの取り付け前と取り付け中に必要なテストについては、[ITU-T G.976]で詳しく説明している。

9.2.2.1 一般要件

低い故障率は、厳密に選別された部品の使用、原材料の厳密な管理、堅牢でシンプルな設計、注意深い製造プロセス、徹底した品質管理によって得られる。

予測可能で理解可能な方法で故障までの時間を加速するためには、試験条件が必要であることは明白である。また、システムにはさまざまな製造プロセスや組み立て手順が含まれており、それぞれを試験する必要があることも認識すべきである。各故障は、単一の障害メカニズムに起因するものでなければならず、試験対象のデバイスと試験手順自体との間の潜在的な相互作用に関連付けてはならない。経済的な目的と技術的な実現可能性の両方のために、信頼性要件は加速試験を必要とする。

9.2.2.2 冗長性

要求される信頼性を達成し、それに応じてサブシステムの故障率を低減するために、一般に冗長構成が使用される。例えば、増幅器の信頼性目標を確実に達成するために、冗長ポンプレーザ構成が通常採用される。

9.2.3 信頼性の計算例

4つのポンプレーザの冗長構成で設計された中継器の場合、25年の寿命を仮定した場合の各ポンプレーザの故障確率は次のようになる(一定の故障率を仮定)。

$$p = 1 - e^{-21.9 \times 10^{-5} \lambda} \quad (9-1)$$

上記の式で考慮される故障率の値(109個のデバイスに対して定義)は、4つのポンプレーザですべてで等しくなる。式9-1の 21.9×10^{-5} の値は次の式から求められる。

$$\frac{25 \text{ years} \times 365 \text{ days} \times 24 \text{ hours}}{10^9 \text{ devices}} = 21.9 \times 10^{-5} \text{ h/device} \quad (9-2)$$

図9-2は、単一のファイバペアのみを使用した一般的な大西洋横断ケーブル(150中継器)の25年間のシステム寿命中に障害が発生したポンプレーザの数を示している。海底線用ポンプレーザの典型的な故障率は25FITと想定されている。故障したポンプレーザの数は、 p とポンプレーザの総数の間の積によって推定される。

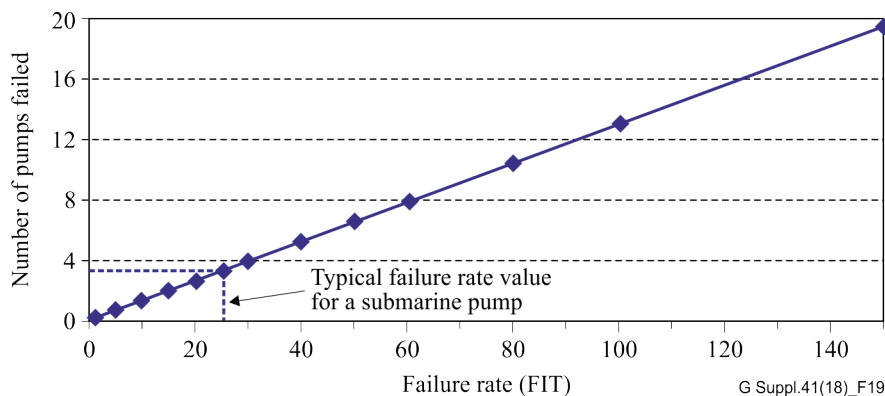


図9-2 一般的な大西洋横断システムで25年間に故障するポンプレーザの推定数
(1ファイバペアと、それぞれ4つのポンプレーザを含む150個の中継器で構成されるリンク)

これらの障害は伝送システム内にランダムに発生するため、影響を受ける中継器や伝送ペナルティのいずれについても発生箇所を想定することはできない。

ポンプレーザの故障確率を p と仮定し、 N をポンプレーザの総数(中継器数の4倍)とすると、システ

ム全体で正確に1つの故障に対する確率を表すことができる。

各ポンプレーザをランダム変数 X_i で表すと、次の法則に従う N 個の確率変数として表すことができる。

- i) ポンプレーザ X_i が故障している ($X_i=0$) 確率 p ($X_i=0$) = p
- ii) ポンプレーザ X_i は、確率 p ($X_i=1$) = $1-p$ ($X_i=0$) = $1-p$ で動作 ($X_i=1$)

ポンプレーザの推定故障数は $N \cdot p$ (図 9-2)、分散は $Np(1-p)$ である。この確率法則は二項則に従い、システム寿命中に正確に n 個のポンプが故障する確率は次のようになる。

$$P(n, N) = \frac{N!}{(N-n)!n!} p^n (1-p)^{N-n} \quad (9-3)$$

中継器ですでに1つのポンプが故障していると仮定すると、同じ中継器で2番目のポンプレーザが故障する確率は次のようになる。

$$P_2(N) = P(1,3) = 3p(1-p)^2 \quad (9-4)$$

図 9-2 で使用されているものと同じ典型的なシステムで、式 9-4 を使用すると、この確率は、図 9-3 で表されている同じ中継器の最初の障害と2番目の障害の間の MTBF 値になる。25 FIT に等しい典型的な故障率に対して得られる MTBF は 1500 年以上となる。

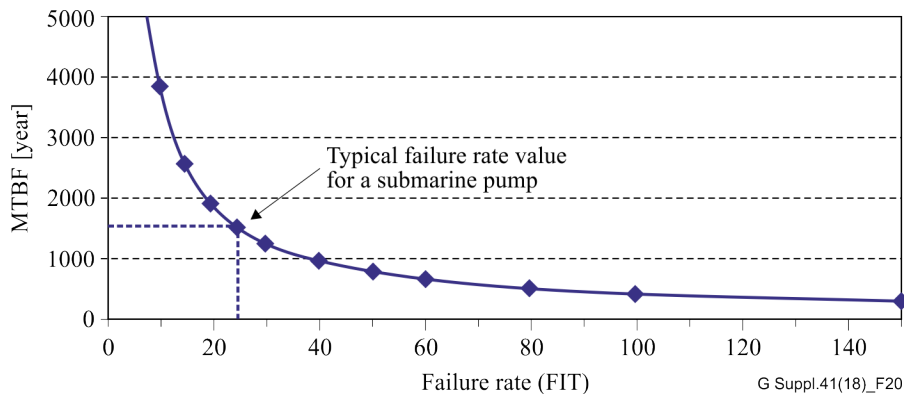


図9-3 同じ中継器内の2番目のポンプレーザ障害に対するMTBF
(1ファイバペアと4つの冗長ポンプレーザを有する150台の中継器で構成される
典型的な大西洋横断リンク)

9.3 外部故障

外部故障は通常、ケーブル区間で発生する。故障の主な原因は、トロール漁船の底引き網による損傷、海流、地質学的事象(地震や火山)等による破壊である。故障の90%近くは漁業活動や船の錨による損傷が原因である。これらのさまざまな要因からケーブルを保護するために、ケーブル埋設ができない岩場を除き、ケーブルが浅瀬に埋設される。更に、ケーブルルートは可能な限り地質学的な危険を避けるために選択される。

WET プラントで故障が発生した場合は、海上での作業が必要であり、ケーブル船が修理に動員される。損傷したケーブル部分は切断されるとともに回収され、船上でスペアに交換される。平均修理期間(MTTR)は、故障の場所、水深、船の利用状況、損傷の根本原因、気象によって異なり、1週間から3週間と推定されている。天候の悪化により、海上作業が大幅に遅延する可能性もある。

このような故障がトラフィックへに与える影響を最小限に抑えるために、可能な場合はルートのダイバーシティによってネットワーク全体の可用性を向上させる(サブマリンネットワークトポロジの詳細については、6項参照)。WET プラントの故障によって通信の接続性が失われた場合、通常、トラフィックは保護パスに再ルーティングされる。

9.4 故障の発生

ほとんどの場合、慎重に設計しても予期せぬ故障を防ぐことはできない。トラフィックの中断を最小限に抑えるには、迅速な故障診断と故障の除去が必要である。したがって、主要なパラメータを(監視メカニズムを使用して)監視し、突然又は徐々に発生する故障とその発生場所を検出する必要がある。

[ITU-T G.976]に詳述されているように、ターミナル局で行われる一部の試験は、状況に応じてサービス中に実施される場合とサービス外で実施される場合がある。(OTDR、コヒーレント OTDR、導体上の抵抗又は静電容量測定などによる中継器監視)。これらの試験方法は、高精度で故障を特定するために使用される。一般的に、OTDR は、TTE と第 1 中継器の間にあるケーブルの品質をチェックするために使用され、コヒーレント OTDR は長距離中継システムの障害位置を確認するために用いられる。

修理中、ケーブルルートを特定するために船から電極技術(適用可能な場合)を使用することがある。これにより、ケーブルの故障部分や水中機器を迅速に復旧できる。

10. アップグレード可能性に関する考慮事項

ほとんどの海底伝送システムは当初設計された最終的な能力以下で運用されるため、通信事業者はよく知られた「pay-as-you-grow」の概念を適用することができる。当初の供給契約は、商業的にも技術的にも進歩的な機器を対象としている(標準的なアップグレード)。場合によっては、端末装置の高度化した技術を使用することで、設計された容量を超えることができる。アップグレードは「チャレンジング」になる。これらは、システム設計と、考慮される時点で利用可能なマージンに依存する。

この 2 種類のアップグレードでは、「アップグレード」という単語自体の意味を指定する必要がある。この項は[b-André]で与えられた情報に基づいている。

10.1 アップグレード定義

10.1.1 最大設計容量(MDC)

最大設計容量(MDC)は、システムの元の設計で許容される最大容量である。

10.1.2 標準アップグレード

標準アップグレードは、契約した際の技術を使用した初期ロード(BoL)から MDC への容量増加によって定義される。

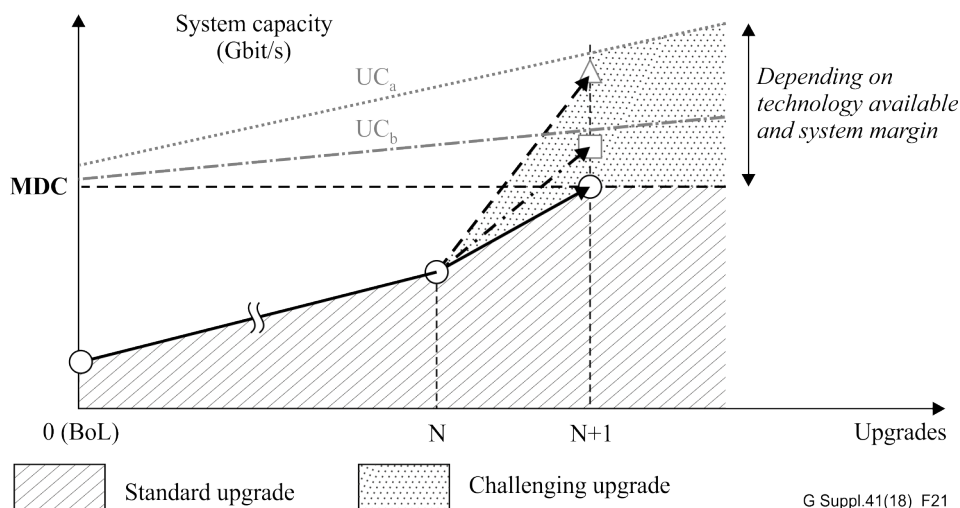
10.1.3 チャレンジングなアップグレード

チャレンジングなアップグレードは、実行されるたびに、端末装置の代替技術を使用して実行される。

10.1.4 最大容量(UC)

最大容量(UC)は、1 回又は数回のアップグレード後に達成可能な最大容量として定義される。

定義上、UC は MDC よりも大きい。なお、UC は既存の端末機器を取り外して新技術を最大限に活用するかどうかの選択に依存するため、単一の値として予測することはできない(図 10-1)。UC は技術の向上に基づいているため、時間にも依存する。基本的には海底プラントの設計によって制限される。



注:既存の装置を交換する場合、UC_a (若しくはUC_b)が最大容量となる。
 曲線UC_bは、曲線UC_aと実際のシステム負荷から推定される。曲線UC_aは準線形と仮定している。

図10-1 アップグレードと容量の定義

10.2 標準アップグレード

10.2.1 パワーバジェットの側面

光パワーバジェット(7項参照)の計算は、使用開始時と使用終了時(25年の寿命)の両方で適切かつ保証された特性をシステムに提供する供給業者の責任が伴うため、非常に重要である。特に、FEC Q制限とさまざまなEoLマージンの追加である試運転制限が含まれる。定義上、動作制限はチャンネル数に依存せず、最小ターゲットとして使用されることに注意されたい。

10.2.2 プログレッシブローディング

通常、システムは拡張性をもったモジュール型の構成であり、標準アップグレードは契約によって計画される。実際、MDCまでに何度か発生する可能性がある。既存の設備にフィールド実証済みの技術を導入して容量を増やしているため、大きな問題はないと思われる。アップグレード計画は、追加するチャンネルの順序を定義するためのガイドラインとして契約に添付されることがある。大帯域システムの場合、スペクトルホールバーニング(SHB)効果を避けるために、チャンネルは帯域幅に均一に分散されるべきである。

標準的なアップグレードは、例えば、プリエンファシス調整(オンラインで行われる自動処理)、WETプラントに組み込まれているアクティブイコライザの特性、及びトーン信号の不可(必要な場合)など、いくつかの設定の変更を意味する場合がある。

異なるサプライヤーからの機器を統合することは常に可能であるが、責任と保証の観点からいくつかの特別なルールを誘発する。また、何らかの機器の互換性も必要である(11項参照)。

10.3 チャレンジングなアップグレード

チャレンジングなアップグレードは、システムの所有者の利益になる。なぜなら、設計よりも高い能力を持つ海底システムの開発を維持できるからである。これにより、当初予想されていたよりもはるかに良い投資収益を得ることができる。

10.3.1 データ収集

UCを決定するプロセスの最初のステップは、システム上で可能な限り多くの情報を収集することである。契約数値による見積もりよりも実際のデータが好まれる。次のものを含める必要があるが、これに限定され

ない。

- i) 送信機と受信機の光スペクトルブリエンファシス設定、エンドツーエンドの利得形状、チャンネルスペクトル広がり、光信号対雑音比性能);
- ii) ストレートラインダイアグラム(SLD)データ(波長分散マップ);及び
- iii) Q 値の経時的な特性(Q 分布形状、システム安定性、FEC 限界に対する平均マージン又は更新された試運転限界)。

10.3.2 使用可能マージンの見積り

データ収集の目的は、システムの全体的なマージンがどの程度であるか、容量を増やすためにどのように使用できるかを詳細に評価することである。マージンは、アップグレードをチャレンジする上で実際に重要な問題である。ここでは、次の 4 種類のマージンを考慮する必要がある。

- i) 修理マージン;
- ii) 購入者が当初のパワーバジェットで必要とすることが多い 1 dB の EoL マージン;
- iii) パワーバジェットに計上される未割り当てと「セキュリティ」マージン;及び
- iv) パワーバジェットで行われた仮定と機器製造中に測定された実際の数値を比較するときに、WET プラントから得られるマージン。

10.3.3 技術的なソリューション

システム UC の評価に使用できる 2 番目の指標ツールは、ライン光信号対雑音比(OSNR)の計算である。これは、平均 Q 値を計算するときに、パワーバジェットの最初の行で非明示的に参照される(7 項参照)。現在の/新しいチャンネル機能に応じて、さまざまなシステム構成を評価できる。次に、線形及び非線形伝搬効果に基づく Q ペナルティ推定により、最適なアップグレードシナリオを評価する。

10.3.3.1 データレートの増加

全体的な容量を増やす 1 つの手法は、端末装置のトランスポンダを交換することによって、一部(又はすべて)のチャンネルのデータレートを増やすことである。場合によっては、新しいチャンネル帯域幅に対応するために、既存の端末内の光学フィルタ又は合波器、分波器の帯域幅を変更する必要がある。OSNR 感度は、常にバイトレートとともに直線的に増加し、伝搬の影響がより大きくなり、ほとんどの場合、データレートの増加の制限要因となる。ただし、難易度の高いアップグレードを行った後でも、標準の陸上機器との互換性を確保するために、TTE 出力のビットレートは SDH 仕様に準拠する必要がある。

10.3.3.2 変調形式

基本的なチャンネルの特徴は、変調形式の選択である。新しい変調フォーマットの使用は、チャンネルにかかる OSNR 感度や非線形効果の制約を緩和することができる。

10.3.3.3 FEC

トランスポンダのもう一つの中心的な側面は誤り訂正能力である。たとえば、Slim、Enhanced、又は Super FEC [ITU-T G.975.1]などの第 2 世代バージョンは、[ITU-T G.975]で標準化された RS(255, 239)と比較して、BER = 10⁻¹³ で約 3 dB の Q 制限しきい値利得を提供する。元のシステムで使用されていたものよりも優れた FEC を使用すると、使用可能なマージンが劇的に増加する可能性がある。

10.3.3.4 追加チャンネル

エンドツーエンドの ASE 利得形状と既存のチャンネルのマージンが許容される場合、端末装置に追加のチャ

ネルが挿入されることがある。この場合、より効率的な FEC と変調形式を使用して、新しいチャンネルの受信 Q 値の要件を緩和できる。その結果、補正後の BER に影響を与えることなく、通常はチャンネルが追加されたときに発生する受信 OSNR を減らすことができる。

チャンネル追加法は重要な管理項目になる。2 つの極端な解決策は、チャンネル間隔をそのままにして、それに応じて帯域幅を拡張するか、帯域幅を変更せずにチャンネル間隔を変更することである。ほとんどの場合、両方のソリューションは補完的な方法で使用される。次に、新しいチャンネルの波長分散の蓄積に関連するペナルティ、それらの相対的な出力、及びそれらの間隔は、実験室での実験及び/又は数値シミュレーションで確立されたエンジニアリングルールによって推定できる。

なお、実際には古い機器をそのまま使用する場合(既存のチャンネル)と新しい機器を接続する場合(追加されたチャンネル)には、カプラーを使用する。局で保持する古い機器の割合は、容量、価格、設置面積の観点から調査する必要がある。

10.4 結論

標準アップグレードは当初の契約で計画されており、特定の問題は想定されていない(通常及び予測されるステップ)。一方、チャレンジングなアップグレードは自動ではなく、新しいテクノロジーを使用する場合はリスクがあるが、システムの期待される特性を向上させることができる。

11. 物理層の互換性

この項は、陸上システムの勧告([JT-G957]、[ITU-T G.691]、[JT-G693]及び[JIT-G959.1])で使用されている用語と同じ用語を使用して、物理層の縦方向及び横方向の互換性について説明する。また、中継及び無中継海底ケーブルシステムの将来の標準化の基礎となる可能性のある構成についても定義が提供されている。

ここで説明する構成は、すべてポイント・ツー・ポイントシステム用である。これより複雑な配置はさらなる研究用である。

11.1 単スパン縦方向互換性

システムは、光セクションの両端が同じメーカーの機器によって終端されている場合に、「縦方向に互換性がある」と定義されている。異なるベンダーのシステムをケーブルのさまざまな光ファイバにインストールできる。この場合、ケーブル特性(減衰、分散、DGD、反射)のみが指定される。単スパン縦方向互換システムを図 11-1 に示す。

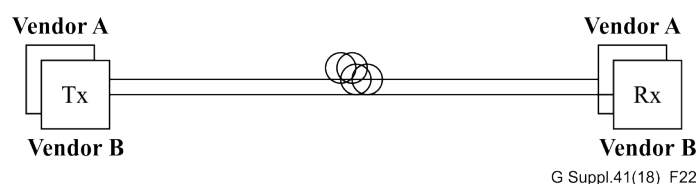


図11-1 単スパン縦方向互換性

注:多スパンシステムでは、すべてのファイバペアが同じ中継器を使用するため、縦方向互換性を実現することは今のところ不可能である。これは、各ファイバの各アンプモジュールが、単一のベンダーによって供給される同じ中継装置に配置されていることを意味する。WET プラントのその他の機器(例:イコライザ、分岐ユニット)についても同様である。

11.2 単スパンブラックボックス横方向互換性

システムは、光セクションの両端が異なるメーカーの機器によって終端されている場合に、ブラックボックスアプローチによる「横方向に互換性がある」と定義されている。これを図 11-2 に示す。

このようなインタフェースを有効にするには、インタフェースポイント MPI-S 及び MPI-R でのパラメータ定義と関連する値の完全なセットが必要である。

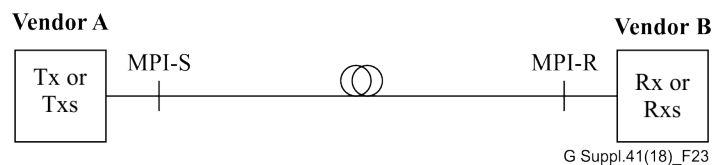


図11-2 単スパンブラックボックス横方向互換性

11.3 多スパンブラックボックス完全横方向互換性

図 11-3 は、すべての異なるタイプの海底機器が終端機器から異なるベンダーによって提供されるブラックボックスアプローチによる完全な横方向互換性のケースを示している。

この場合、損失やパワーレベルなどの一部のパラメータをスパン単位で指定したり、波長分散、累積利得形状、PMD、非線形性などの他のパラメータをリンク全体で「管理」する必要がある場合もある。

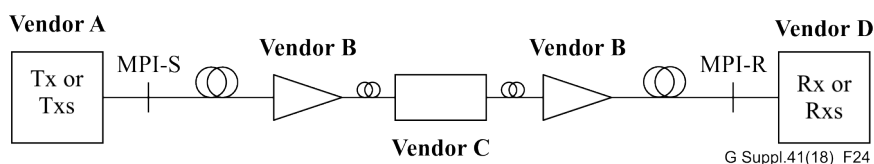


図11-3 多スパンブラックボックス完全横方向互換性

11.4 多スパンブラックボックス単リンク横方向互換性

リンクの両端の終端機器が単一のベンダーによって提供され、回線機器が別の単一のベンダーによって製造されている場合、部分的な横方向互換性を持つ追加の構成を定義することもできる。これをブラックボックス単リンク横方向互換性と呼び、図 11-4 に示す。

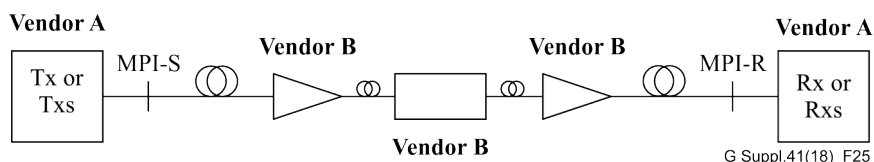


図11-4 多スパンブラックボックス単リンク横方向互換性

この代替の可能性では、正確なチャネル計画を指定する必要がないことを除いて、多スパン完全横方向互換性の物理特性の仕様とほとんど同じになる必要がある可能性がある。システムの動作波長範囲が必要になる。

11.5 多スパンブラックボックス多リンク横方向互換性

部分的な横方向互換性を持つ追加の構成を定義することもできる。この場合、すべての海底プラントはすべてのファイバ対に対して単一のベンダーによって提供されるが、端末機器は異なるベンダーによって提供される場合がある。この構成は、多スパンブラックボックス多リンク横方向互換性と呼ばれ、図 11-5 に示されている。

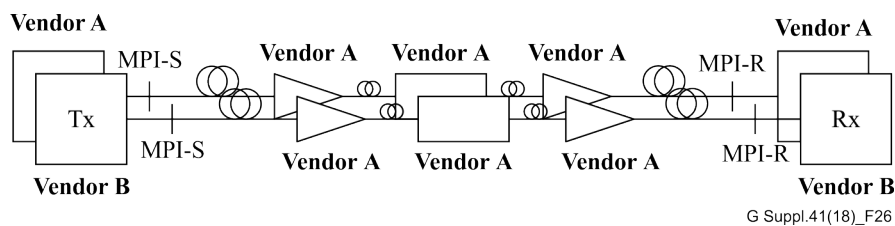


図11-5 多スパンブラックボックス多リンク横方向互換性

11.6 単スパンブラックリンク横方向互換性

「横方向に互換性のある」システムを定義する別の方法は、図 11-6 に示すように、ブラックリンクアプローチで可能である。この場合、光セクションの両端にあるトランシーバのベンダーは、DWDM 光海底リンクの機器のベンダーとは異なる場合がある。

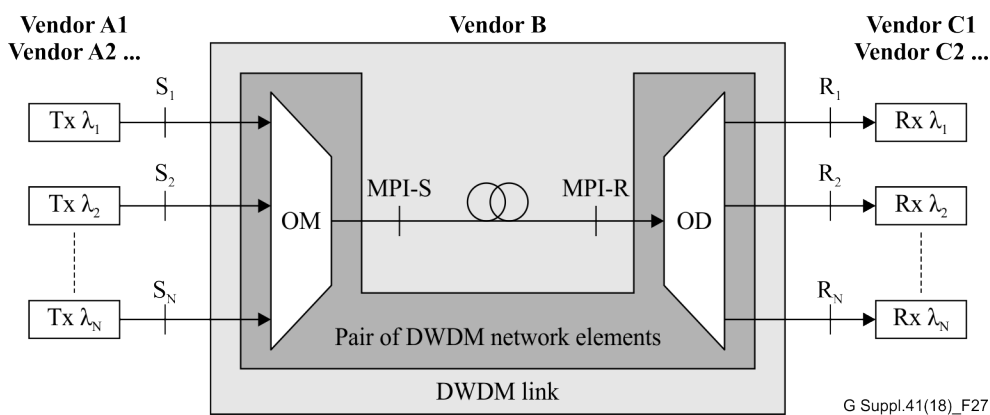


図11-6 単スパンブラックリンク横方向互換性

11.7 多スパンブラックリンク横方向互換性

代替のブラックリンクアプローチは、図 11-7 に示すように、多スパンシステムに対しても「横方向に互換性のある」システムを定義するために適用できる。この場合、光セクションの両端にあるトランシーバのベンダーと DWDM 光海底リンクの機器が異なる場合がある。

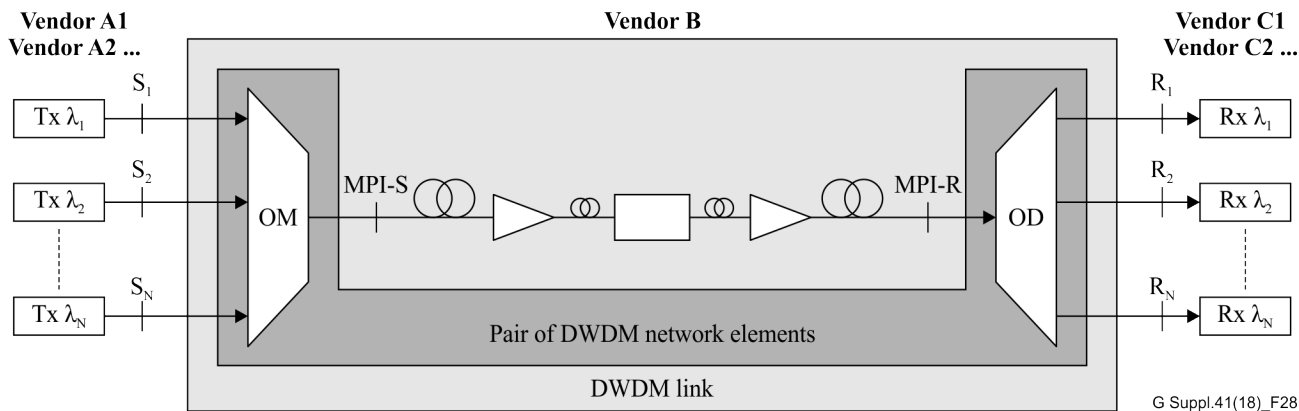


図11-7 多スパンブラックリンク横方向互換性

参考文献

- [b-Agrawal] Agrawal, G.P. (1989), *Nonlinear Fibre Optics*, Academic Press.
- [b-André] André, M., Brochier, N. (2007), Overview of submarine system upgrades, *SubOptic 2007*, ThB1.1, May.
- [b-Bergano] Bergano, N.S., Aspell, J., Davidson, C.R., Trischitta, P.R., Nyman, B.M., Kerfoot, F.W. (1991), Bit Error Rate Measurements of 14000 km 5 Gbit/s Fibre-Amplifier Transmission System using Recirculating Loop, *Elec. Letters*, Vol. 27, No. 21, October.
- [b-Spirit] Spirit, D.M., O'Mahony, M.J., (1995), *High Capacity Optical Transmission Explained*, John Wiley & Sons.
- [b-Telcordia SR-332] Telcordia technologies Special Report SR-332 (2001), Reliability procedure for electronic equipment, Issue 1.
- [b-Tkach] Tkach, R.W., Chaplyvy, A.R., Forghieri, F., Gnauck, A.H., Derosier, R.M. (1995), Four Photon Mixing and High-Speed WDM Systems, *JLT*, Vol. 13, No. 5, May.
- [b-Winzer] Winzer, P.J., Kalmár, A. (1999), Sensitivity Enhancement of Optical receivers by impulse Coding, *JLT*, Vol. 17, No. 2, February.
- [b-Zsakany] Zsakany, J.C., Marshall, N.W., Roberts, J.M., Ross, D.G. (1995), The Application of Undersea Cable Systems in Globe Networking, *AT&T Technical Journal*, January/February, Vol. 74, No. 1, pp. 8-15.
- [b-Gaudette] Gaudette, J., Booi, P., Hartling, E.R., Andre, M., O'Sullivan, M. (2013), Using Coherent Technology for Simple, Accurate, Performance Budgeting, *SubOptic 2013*, We1A-2, April.