

JT-G652

シングルモード光ファイバ及び ケーブルの諸特性

Characteristics of a single-mode optical fibre and
cable

第1. 1版

2018年5月24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
<G.652 (2016/11) 和訳>	5
1. 規定範囲	6
2. 参照	6
3. 定義	7
3.1 他で定義された用語	7
3.2 本標準で定義される用語	7
4. 略語	7
5. 慣例	7
6. ファイバの特性	7
6.1 モードフィールド径	7
6.2 クラッド径	7
6.3 コア偏心量	8
6.4 非円率	8
6.4.1 モードフィールド非円率	8
6.4.2 クラッド非円率	8
6.5 カットオフ波長	8
6.6 マクロベンド損失	8
6.7 ファイバの材料特性	9
6.7.1 ファイバ材料	9
6.7.2 保護材料	9
6.7.3 プルーフストレスレベル	9
6.8 屈折率分布	9
6.9 波長分散の長手依存性	9
6.10 波長分散	9
7. ケーブルの特性	10
7.1 損失係数	11
7.2 偏波モード分散係数	11
8. 規格表	11
付録 I システム設計に用いる光ファイバケーブルリンクに関する情報	15
I.1 損失	15
I.2 波長分散	16
I.3 群遅延時間差 (DGD)	16
I.4 典型値	16
I.5 非線形係数	17
I.6 統計的手法の一例	17
付録 II JT-G652.Dファイバの波長分散の最大値及び最小値特性に関する情報	19
参考文献	21

<参考>

1. 国際勧告との関係

本技術仕様は、ITU-T 勧告 G.652 (11/2016) 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	2017年8月29日	制定
第1.1版	2018年5月24日	用語を JT-G652、JT-G654、JT-G657 で統一。

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

ITU-T 勧告 G.650.1, G650.2

IEC 規格 IEC60793-2-50

TTC 標準

6. 標準作成部門

光ファイバ伝送専門委員会

<G.652 (2016/11) 和訳>

シングルモード光ファイバ及びケーブルの特性

概要

TTC 標準 JT-G652 は、ゼロ分散波長が 1310nm の周辺であるシングルモード光ファイバ及びケーブルの幾何学的 (構造)、機械的、及び伝送の特性について記述する。JT-G652 ファイバは元々 1310nm 波長領域での使用に最適化されたものであったが、1550nm の波長領域においても使われる。本標準は、2016 年に改訂された ITU-T G.652 を和訳したものである。

キーワード

光ファイバ及びケーブル、シングルモード光ファイバ、非分散シフト光ファイバ

1. 規定範囲

本標準は、ゼロ分散波長が 1310 nm 付近であり、1310 nm 及び 1550 nm の波長領域で使用可能なシングルモード光ファイバとケーブルについて記述する。

幾何学的、光学、伝送、機械に関するパラメータは以下の 3つのカテゴリに記載される。

- ・ 「ファイバの特性」は、ケーブル化及び敷設によって変化しないものである。
- ・ 「ケーブルの特性」は、製造出荷時のケーブルに対して規定される。
- ・ 「リンクの特性」は、測定、モデリングなどに基づくシステムインターフェースパラメータの算出に使用する、接続されたケーブルの特性の事である。「リンクの特性」及びシステム設計の情報は付録 I に記載する。

本標準及び 8 章の規格表に見られる異なる特性カテゴリは以下の関連する ITU-T システム勧告をサポートしている。

カテゴリ	ITU-Tシステム勧告
光システムの特性	[b-ITU-T G.691], [b-ITU-T G.692], [b-ITU-T G.693], [b-ITU-T G.695], [b-ITU-T G.696.1], [b-ITU-T G.698.1], [b-ITU-T G.698.2], [b-ITU-T G.698.3]
デジタル伝送システム	[b-ITU-T G.957], [b-ITU-T G.959.1]
ローカル及びアクセスネットワークの光伝送システム	[b-ITU-T G.983.1], [b-ITU-T G.984.2], [b-ITU-T G.985], [b-ITU-T G.986], [b-ITU-T G.987.2], [b-ITU-T G.989.2]

注 リンク長によって、[b-ITU T G.691], [b-ITU-T G.692], [b-ITU-T G.959.1]のアプリケーションコードに対する分散値の調整が必要となる

本勧告において使われる用語の意味及び種々の特性の測定方法において適用されるガイドラインは、[ITU-T G.650.1] と [ITU T G.650.2] で示される。パラメータの定義、ファイバの試験方法、及び関連した値を含むファイバの特性は研究や経験によって改善される。

2. 参照

次の ITU-T 勧告および他の参考文献は、このテキスト中の参照を通じて、この標準の規定を構成する規定を含んでいる。出版時に示された版は有効であった。全の勧告と他の参考文献は改訂版を条件とする。この標準のユーザーは、以下でリストされた勧告、及び、他の参考文献の最新版を適用することの可能性を調査することを奨励する。現在の有効な ITU-T 勧告のリストは規則正しく出版される。この標準中のドキュメントの参照は、勧告の状態として、単独で使用するドキュメントを与えない。

[ITU-T G.650.1] Recommendation ITU-T G.650.1 (2010), Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable.

[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.

[IEC 60793-2-50] IEC 60793-2-50 Ed. 5.0 (2015), Optical fibres – Part 2-50: Product specifications – Sectional specification for class B single mode fibres.

[ISO 80000-1] ISO 80000-1 (2009), Quantities and units – Part 1; General

3. 定義

3.1 他で定義された用語

本標準の目的として、[ITU-T G.650.1] と [ITU T G.650.2] で示す定義を適用する。

3.2 本標準で定義される用語

なし。

4. 略語

本標準は以下の略語と頭文字を使用する。

Aeff	Effective Area	実効断面積
DGD	Differential Group Delay	群遅延時間
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	高密度波長分割多重
PMD	Polarization Mode Dispersion	偏波モード分散
PMD _Q	Statistical parameter for link PMD	統計的リンク PMD
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	同期デジタルハイアラーキ
WDM	Wavelength Division Multiplexing	波長分割多重

5. 慣例

標準への適合性を評価する際、数値は規格値の表で示された桁の数に近似される。一般的な四捨五入が使われ、それは ISO 80000-1 付録 B、ルール B において記述される。有効数字の桁を超えた最初の桁だけが、四捨五入を決定する際に使われる。

6. ファイバの特性

本章では、ファイバ製造にとって最小限で必須であるファイバの諸特性だけが規定される。数値に対する範囲または制限は、8 章の表に示される。ケーブル製造や敷設は、これら数値のうちケーブル化されたカットオフ波長と PMD に重大な影響を及ぼす場合もあるが、規定された特性は、個々のファイバ、ドラム巻のケーブル中のファイバ、敷設されたケーブルのファイバに等しく適用する。

6.1 モードフィールド径

標準値と標準値の公差の両方に関し、1310nm において規定される。規定された標準値は 8 章で述べられる範囲内でなければならない。規定された公差は 8 章で述べられる値を超えてはならない。標準からの偏差は公差を超えてはならない。

6.2 クラッド径

クラッド径の標準値は 125 μm である。公差は 8 章で記載されており、そこから逸脱してはならない。クラ

ッド径の標準値からの偏差は定義された公差を逸脱してはならない。

6.3 コア偏心率

コア偏心率は 8 章で述べられた値を超えてはならない。

6.4 非円率

6.4.1 モードフィールド非円率

実質的には、標準的な円形モードフィールド形状を持つファイバのモードフィールド非円率は、信号伝搬や接続には影響がない程度に十分に小さい。従って、モードフィールド非円率の勧告値は必要がないと考えられる。検取目的のために、モードフィールド非円率を測定する事は、一般的には不要である。

6.4.2 クラッド非円率

クラッド非円率は 8 章で述べられる値を超えてはならない。

6.5 カットオフ波長

2つのタイプのカットオフ波長が区別される。

- a) ケーブルカットオフ波長 λ_{cc}
- b) ファイバカットオフ波長 λ_c

注 - 特定の海底ケーブルアプリケーションにおいて、異なるケーブルカットオフ波長の値が要求される場合がある。

λ_c と λ_{cc} の測定値の相関は、ファイバとケーブル設計、テスト条件に依存する。一般的には $\lambda_{cc} < \lambda_c$ だが、汎用的かつ定量的な関係は簡単には求められない。接続されたケーブルの中で最も短いケーブルが、最も短い使用波長におけるシングルモード伝搬を保証する事が重要である。これは、ケーブル化されたシングルモードファイバの最長ケーブルカットオフ λ_{cc} を 1260nm 以下にする事、或いは長さや曲げの条件が最悪のケースを想定した際にも、最長ファイバカットオフ λ_c を 1260nm 以下にする事を推奨する事によって実現できる。

ケーブルカットオフ波長は 8 章で記された最大値未満でなければならない。

6.6 マクロベンド損失

マクロベンド損失は、波長、曲げ半径、及びその半径のマンドレルへのターン数で変化する。マクロベンド損失は、特定された波長、曲げ半径、ターン数に対して 8 章の最大値を超えてはならない。

注 1- 認証試験は、この必要条件を保証する必要がある。

注 2 - 勧告でのターン数は、典型的なリピータスパン中で発生する大凡のターン数と一致する。勧告での半径は、静疲労破断を起こさない、長期敷設される実用的なシステムで広く受け入れられた最小曲げ半径に等しい。

注 3 - もし実用的理由の為に、規格よりも少ないターン数が使われる場合、40 ターン以上であって、ターン数に比例した損失増加であることを推奨する。

注4 - マクロベンド損失規格は、実用的なシングルモードファイバの敷設に対するものである。ケーブル化シングルモード光ファイバの撚合に関連した曲げ径の損失特性の影響は、ケーブル化ファイバの損失仕様値に含まれる。

注5 - ルーチンテストである場合には、正確さと測定の簡略化のために、小さな曲げ径による数回のターンが使用されても良い。この場合、曲げ直径、ターン数、最大許容曲げ損失は、勧告テスト条件での最大許容曲げ損失と相關するように選定されなくてはならない。

6.7 ファイバの材料特性

6.7.1 ファイバ材料

ファイバを構成する物質は示されねばならない。

注 - 異なる物質のファイバの融着接続において、注意が必要である場合がある。実験からは、異なる高純度な石英ガラスファイバを接続する際に、十分な接続損失と強度が得られると考えられている。

6.7.2 保護材料

プライマリコーティングに使われる材料の物理的、化学的特性と、(もし必要であれば) プライマリコーティングの除去方法は示されるべきである。シングルジャケットファイバの場合においては、同様の表示を与えなければならない。

6.7.3 プルーフストレスレベル

特定のプルーフストレス σ_p は8章で示される最小値以上でなければならない。

注 - 機械的パラメータの定義は [ITU T G.650.1] の3.2章及び5.6章に含まれている。

6.8 屈折率分布

ファイバの屈折率分布は、一般的には開示の必要は無い。

6.9 波長分散の長手依存性

検討中。

注 - ある波長において、局所的な波長分散値は長尺での測定値とは異なる場合がある。波長分割多重(WDM)システムにおいて、動作波長に近い波長で値が小さくなる場合、四光波混合によって他のWDM動作波長(動作以外の波長の場合もある)に光パワーの伝搬を誘発しうる。四光波混合の大きさは、その波長分散係数、波長分散スロープ、動作波長、光パワー、四光波混合の起こる距離、の絶対値の関数である。

1550nm領域における高密度波長分割多重の動作にとっては、JT-G652ファイバの波長分散は、四光波混合が発生しない程に十分大きい。従って、波長分散の一様性は伝送上の問題とはならない。

6.10 波長分散

測定した群遅延若しくは波長に対する波長分散係数は、[ITU-T G.650.1]のAnnex Aで定める適切な数式

によって算出される。(未測定波長に対しては、分散値の内挿法のガイダンス [ITU-T G650.1] の 5.5 章参照)

サブカテゴリ JT-G652.B ファイバに対しては、1310nm 領域における波長の関数である波長分散曲線の制限条件によって、波長分散係数 $D(\lambda)$ が明示される。どの波長 λ に対しても、波長分散係数の制限条件は、最小ゼロ分散波長 λ_{0min} 、最大ゼロ分散波長 λ_{0max} 、最小ゼロ分散スロープ S_{0max} で以下の通り計算される。

$$D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0min}}{\lambda} \right)^4 \right] \quad (6-1)$$

λ_{0min} , λ_{0max} 及び S_{0max} の値は、表 1 (8 章) で示される規格値の範囲内である。

サブカテゴリ JT-G652.D ファイバに対して、表 2 (8 章) で示される波長分散パラメータは 1260nm から 1625nm の波長分散値を決定するように規定される。これは波長分散補償が必要とされるシステムの正確な設計を可能にする。JT-G652.D ファイバの波長分散係数を 1310nm の領域における 3 項セルマイヤ係数だけで規定する場合、1550nm 領域への外挿では十分正確な分散係数が得られない可能性がある。JT-G652.D ファイバの波長分散係数の最小値と最大値を決定する為には、1260nm から 1460nm の群遅延における 3 項セルマイヤ近似の一次微分関数と、1460nm から 1625nm の波長分散の線形近似 (すなわち群遅延における二次曲線近似の一次微分関数) の組合せが適切である。

1260nm から 1460nm まで、波長 λ の波長分散係数 $D(\lambda)$ は以下の 3 つの不等式によって結び付けられる。

$$\frac{\lambda S_{0max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0max}}{\lambda} \right)^4 \right] \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0min}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0min}}{\lambda} \right)^4 \right] \quad (\lambda \leq \lambda_{0min}), \quad (6-2a)$$

$$\frac{\lambda S_{0max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0max}}{\lambda} \right)^4 \right] \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0min}}{\lambda} \right)^4 \right] \quad (\lambda_{0min} \leq \lambda \leq \lambda_{0max}), \quad (6-2b)$$

$$\frac{\lambda S_{0min}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0max}}{\lambda} \right)^4 \right] \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0min}}{\lambda} \right)^4 \right] \quad (\lambda_{0max} \leq \lambda). \quad (6-2c)$$

最小及び最大の波長分散係数の両方を結びつけるために、最小波長分散スロープ S_{0min} が加えられる。

1460nm から 1625nm まで、波長分散係数 $D(\lambda)$ は以下の不等式によって結び付けられる。

$$8.625 + 0.052(\lambda - 1460) \leq D(\lambda) \leq 12.472 + 0.068(\lambda - 1460) \quad (6-3)$$

波長分散パラメータの仕様及び分散カーブを決定する為、JT-G652.D 製品の調査が実施された。その結果は本標準の付録IIで要約されている。

注 - ルーチンベースでシングルモードファイバの波長分散係数を測定する必要は無い。

7. ケーブルの特性

6 章において述べられたファイバの幾何学的、光学的特性はケーブル製造プロセスによって殆ど影響を受けないため、この章では、製造されたケーブルにおけるファイバの伝送特性に主に関連する規定を示す。

環境及びテスト条件が主要部分であり、それらは試験方法のためのガイドラインにおいて記述される。

7.1 損失係数

損失係数は 1310nm 及び 1550nm の両方の領域において、一つまたは複数の波長での最大値で示される。光ファイバケーブルの損失係数値は 8 章で示される値を超えてはならない。

注 - 損失係数は、いくつかの (3 から 4) の予測波長での測定を基礎とした波長のスペクトルに渡って計算されても良い。この手順は [ITU T G.650.1] の 5.4.4 章に示され、例は [ITU T G.650.1] の付録 III に記載されている。

7.2 偏波モード分散係数

ケーブル化されたファイバの偏波モード分散は、個別のファイバでは無く、統計的に規定されねばならない。必要条件は、ケーブル情報から計算されたリンクの条件のみに関係する。統計仕様の測定基準は以下に示される。計算方法は [b-IEC/TR 61282-3] で示され、[ITU-T G.650.2] の付録 IV で要約されている。

製造メーカは、M 個のケーブル部の結合で定義される光ファイバケーブルリンクの PMD 係数の統計上の上限である、リンク設計 PMD 値 (PMD_Q) を提供せねばならない。上限値は、小さな確率水準 Q に関して定められる。Q とは、ケーブルを連結した際の PMD が PMD_Q を上回る可能性の事である。8 章で示される M 値及び Q 値に対して、PMD_Q の値は 8 章で示される最大の PMD 係数を超えてはならない。

ケーブル化されていないファイバの測定及び仕様は必要であるが、ケーブル化されたファイバの仕様を保証するには十分ではない。ケーブル化されていないファイバでの最大のリンク設計値は、ケーブル化ファイバにおける規定値以下でなければならない。ケーブル化ファイバに対するケーブル化されていないファイバの PMD 値の比率は、ケーブル化されていないファイバのモード結合条件に依存するのと同様に、ケーブルの構造やプロセスに依存する。[ITU-T G.650.2] は、ケーブル化されていないファイバの PMD 測定に際して、偏波モード結合が小さくなるように、大きな直径のポピンに低張力で巻き付けることを推奨している。

PMD 係数値の分布は、時間と波長でランダムに変わる群遅延時間差 (DGD) の統計的変動の範囲にほぼ等しいと解釈する事が出来る。PMD 係数の分布が光ファイバケーブルに対して規定されれば、等価的な DGD の変動範囲が決定される。リンク DGD 分布の範囲のための測定基準と値は、付録 I で示される。

注 1 - ケーブルが最大 DGD の仕様を有するシステムに使われる場合にのみ、PMD_Q 仕様が要求される。すなわち、例として、PMD_Q 仕様は [b-ITU-T G.957] において勧告されたシステムに適用されない。

注 2 - PMD_Q は、さまざまなタイプのケーブルに対して計算される。そしてそれらは、PMD のサンプル値を使用して通常計算されるべきである。このサンプルは類似した構造のケーブルから取られる。

注 3 - PMD_Q 仕様は、ジャンパケーブル、インドアケーブル、ドロップケーブル等のショートリンクケーブルには適用されるべきではない。

注 4 - PMD 要求が厳しくないシステム (例えば、ショートリンク、或いは高 PMD を許容可能なシステムなど) に対しては、高 PMD 係数を有する光ファイバ及びケーブル が使用可能である。

8. 規格表

以下の表は、本標準の目的を満たすファイバカテゴリの為に、規格値を要約するものである。これらのカ

テゴリは、1383nm の損失要求に基づいて主に区別されたものである。最大 PMD_Q 値とサポートするビットレートとの関係は、本標準の付録 I で示される。

表 1 (JT-G652.B ファイバの特性) は、[b-ITU-T G.691] や [b-ITU T G.692] において述べられる STM-64、[b-ITU-T G.693] と [b-ITU-T G.959.1] で述べられる STM-256 に及ぶより高いビットレートのアプリケーションをサポートするために必要とされる推奨特性や値を含む。アプリケーションに従い、波長分散の調整が必要となる場合がある。

表 2 (JT-G652.D ファイバの特性) は、JT-G652.B ファイバと類似しているが、1260nm から 1625nm に渡る波長範囲における伝送を可能とする。

IEC ファイバカテゴリと ITU-T G.65x ファイバタイプ間のクラス参照表は、[b-ITU-T G-Sup.40] の付録 V において、表 V.1 で示される。

表1-JT-G652.B ファイバの特性

ファイバ規格			
規格	詳細	値	単位
モードフィールド径	波長	1310	nm
	標準値の範囲	8.6 - 9.5	μm
	公差	± 0.6	μm
クラッド径	標準	125.0	μm
	公差	± 1	μm
コア偏心量	最大	0.6	μm
クラッド非円率	最大	1.0	%
ケーブルカットオフ波長	最小	1260	nm
マクロバンド損失	半径	30	mm
	ターン数	100	
	1625nmでの最大	0.1	dB
ブルーフトレス	最小	0.69	GPa
波長分散パラメータ	λ _{0min}	1300	nm
	λ _{0max}	1324	nm
	S _{0max}	0.092	ps/(nm ² × km)
ケーブル規格			
規格	詳細	値	単位
損失係数 (注1)	1310nmでの最大	0.4	dB/km
	1550nmでの最大	0.35	dB/km
	1625nmでの最大	0.4	dB/km
PMD係数 (注2, 3)	M	20	cables
	Q	0.01	%
	最大PMD _Q	0.20	ps/√km
<p>注1 - この表で述べられる損失係数値は、短いケーブル (例えばジャンパケーブル、インドアケーブル、ドロップケーブル) には適用してはならない。例えば [b-IEC 60794-2-11] は、インドアケーブルの損失係数として1310nmと1550nmの両方において1.0dB/km以下を許容している。1625nmよりも長波長 (保守目的に利用される) の損失係数はよく知られていない。一般に、波長が増加すると損失は増加する。そしてそれは、マクロバンド損失及びマイクロバンド損失により強い波長依存性を示す場合がある。</p> <p>注2 - ケーブルPMD_Qにおける基本 requirements をサポートするために、7.2章に従って、ケーブル化されていないファイバの最大PMD_Q値が明記される。</p> <p>注3 - より高いPMD係数の光ファイバケーブルは、より厳しくないPMD要求のシステムに使われる。</p>			

表 2 – JT-G652.D ファイバの特性

ファイバ規格			
規格	詳細	値	単位
モードフィールド径	波長	1310	nm
	標準値の範囲	8.6 - 9.2	μm
	公差	± 0.4	μm
クラッド径	標準	125.0	μm
	公差	± 0.7	μm
コア偏心量	最大	0.6	μm
クラッド非円率	最大	1.0	%
ケーブルカットオフ波長	最大	1260	nm
マクロバンド損失	半径	30	mm
	ターン数	100	
	1625nmでの最大	0.1	dB
ブルーストレス	最小	0.69	GPa
波長分散パラメータ 3項セルマイヤ近似 (1260 nm to 1460 nm)	λ_{0min}	1300	nm
	λ_{0max}	1324	nm
	S_{0min}	0.073	ps/(nm ² × km)
	S_{0max}	0.092	ps/(nm ² × km)
線形近似 (1460 nm to 1625 nm)	1550nmでの最小	13.3	ps/(nm × km)
	1550nmでの最大	18.6	ps/(nm × km)
	1625nmでの最小	17.2	ps/(nm × km)
	1625nmでの最大	23.7	ps/(nm × km)
ケーブル特性			
特性	詳細	値	単位
損失係数 (注1)	1310nmから1625nmの最大(注2)	0.40	dB/km
	水素エージング後、1383nm±3nmでの最大 (注3)	0.40	dB/km
	1530nmから1625nmの最大	0.30	dB/km
PMD係数 (注4、5)	M	20	cables
	Q	0.01	%
	最大PMD _Q	0.20	ps/√km
<p>注1 - この表で述べられる損失係数値は、短いケーブル (例えばジャンパケーブル、インドアケーブル、ドロップケーブル) には適用してはならない。例えば [b-IEC 60794-2-11] は、1310nmと1550nmの両方において1.0dB/km以下としてのインドアケーブルの損失係数を示している。(監視目的のための) 1625nmよりも長波長の損失係数はよく知られていない。一般に、波長が増加すると損失は増加する。そしてそれは、マクロバンド損失及びマイクロバンド損失により強い波長依存性を示す場合がある。</p> <p>注2 - この波長範囲は、1310nmでの損失値に対しレイリー散乱損失を考慮して0.07dB/kmを加える事によって、1260nmまで広げることができる。</p> <p>注3 - 水素エージングはサンプルファイバのセットに対して行われる試験であり、[IEC 60793-2-50] B1.3ファイバカテゴリに従うものである。</p> <p>注4 - 7.2章により、ケーブル化されていないファイバの最大PMD_Q値は、ケーブルPMD_Qにおける基本 requirements をサポートするために明記される。</p> <p>注5 - より高いPMD係数の光ファイバケーブルは、より厳しくないPMD要求のシステムに使われる。</p>			

付録 I

システム設計に用いる光ファイバケーブルリンクに関する情報

(この付録は本標準に必須の構成要素ではない)

ファイバの特性、即ち波長分散、偏波モード分散、伝送損失、非線形性による伝送の制限を推定するために、「最悪値」と「統計」によるシステム設計を考えることが出来る。これらについては [b-ITU-T G-Sup.39] の9章、10章にそれぞれ記述されている。最悪値設計は、最大値と最小値を使用した決定論的な手法であり、少数の部品と光ファイバケーブルからなる伝送システムに対して有用である。一方、多数の光ファイバケーブルを含むリンクの場合、その伝送パラメータは、個々のケーブル長での決定論的な特性だけでなく、連結によるリンクの統計性が考慮されていなくてはならない。光ファイバケーブルに対する要求事項は、6章、7章に記述されている。

光ファイバケーブルの伝送特性は一定の確率分布をもつことになり、最も経済的に設計しようとする時には、それを考慮することができる。この付録は、様々なパラメータの統計的性質を念頭に読まれるべきである。

「リンクの特性」、例えば末端間の伝送損失、波長分散、偏波モード分散あるいは非線形性は光ファイバケーブル以外の要因にも影響を受ける。例えば、接続部、受動的な部品そして敷設である。これらの要因は、本標準では規定されていない。

伝送損失と波長分散に関する統計的な「リンクの特性」の推定のために、光ファイバリンクの典型値を I.4 章の表 I.1 に記載する。システム設計に必要なリンクパラメータの推算手法は測定、モデリング、その他の考慮すべきことを基礎としている。

I.1 損失

リンクの平均損失 A は、以下の式で与えられる。

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

ここで

- α リンク内のケーブルの平均損失係数；
- α_s 平均接続損失；
- x リンク内の接続の数；
- α_c コネクタの平均損失；
- y リンク内のコネクタの数 (もし与えられているなら)；
- L リンクの長さ。

将来のケーブル構成の修正のために適切なマージンが配分されるべきである (追加の接続点、ケーブル余長、経年変化、環境温度の変動、等)。上記の式には、装置のコネクタの損失が含まれていない。I.4 章にある典型値は光ファイバリンクの損失係数のためのものである。実際のシステムを設計する際に使われる損失の割当量は、これらのパラメータに含まれる統計的な変動分を考慮するべきである。

1.2 波長分散

ps/nm で表わされる波長分散は、ケーブルの波長分散係数から計算できる。その際、条長依存性が線形であることを仮定し、変数の符号に注意をしている (6.10 章参照)。

光ファイバが 1550 nm 帯の伝送に使用される場合、いくつかの形式での分散補償がされている。この時、リンクの平均分散が設計のために使用される。1550 nm 帯の波長分散の測定値は、1550 nm 帯における波長に対する線形性で特徴づけられる。その関係は、1550 nm の典型的な波長分散係数と波長分散スロープ係数によって記述される。

1550 nm での波長分散係数 D_{1550} と波長分散スロープ係数 S_{1550} の典型値は表 I.1 に記載されている。これらの数値とリンク長さ L_{Link} を使用して、リンク設計のための波長分散の典型値が計算できる。

$$D_{Link}(\lambda) = L_{Link} [D_{1550} + S_{1550}(\lambda - 1550)] \quad [\text{ps/nm}] \quad (\text{I-2})$$

注 - JT-G652.D ファイバの標準的な波長分散の規格値が改訂された。そのため上記の式は、このタイプのファイバに対する代表的なものではない。

1.3 群遅延時間差 (DGD)

群遅延時間差とは、特定の波長の、特定の時点における二つの偏波モードの到着時間の差である。偏波モード分散はその原理から考えて統計的であり、DGD は光ファイバケーブルのどの地点においてもランダムに変動している。そのため、一定の長さあるいは連結された複数の光ファイバケーブルのリンクについて考える場合には、統計的リンク設計の方法論は偏波モード分散の影響を見極めるために不可欠なものである。

特定の偏波モード分散係数をもつリンクに対して、リンクの群遅延時間差は時間と波長に伴ってランダムに変化する。その変化は単一のパラメータを含むマクスウェル分布に従い、そのパラメータは、リンクの偏波モード分散係数とリンクの長さの二乗根との積である。特定の時点と波長における偏波モード分散に起因するシステム障害は、その時点と波長における群遅延時間差に依存している。

そのため、光ファイバケーブルの偏波モード分散係数の分布と関係している群遅延時間差の分布に関して有用な範囲設定をする方法とその範囲に関しては、既に構築されており、[b-IEC/TR 61282-3] 中に記載され、あるいは [ITU T G.650.2] の付録IVに要約されている。群遅延時間差の分布範囲の評価基準は以下の通り：

注 - 光ファイバケーブル以外の構成要素の影響分に関しては、本勧告の範囲を超えているが、[b-IEC/TR 61282-3] で議論されている。

参照リンク長さ, L_{Ref} : 群遅延時間差と確率の最大値が適用される最大のリンク長さ。より長いリンク長さに対しては、群遅延時間差の最大値に、参照長さに対する実際の長さの比率の2乗根をかける。

典型的最大ケーブル長さ, L_{Cab} : 最大値であることは、連結内の典型的な個々のケーブルあるいは偏波モード分散係数の分布を決定する際に測定されたケーブル長がこの値よりも短いことによって分かる。

最大群遅延時間差, DGD_{max} : 光学システム的设计を考える際に使うことが出来る群遅延時間差の値。

最大確率, P_F : 実際の群遅延時間差が DGD_{max} を超える確率。

1.4 典型値

表 I.1 と I.2 の値は、章 I.1 と I.3 それぞれに従って連結された光ファイバリンクの代表値である。表 I.2 に

ある最大群遅延時間差は、リンク内にあるかもしれない他の光学要素への要求に関する指針になることを意図されている。この章で提示されている値は JT-G657.A を含む、JT-G652 に準拠する全てのファイバに適用される。

注 - $0.10 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ かつ $>4000 \text{ km}$ のリンクはケーブル長が 25km 、誤り確率の水準は 6.5×10^{-8} に設定されているが、これを除いてケーブル長は 10km である。

表 I.1 - 光ファイバリンクの典型値

損失係数	波長範囲	典型値
(注)	1260 nm-1360 nm	0.5 dB/km
	1530 nm-1565 nm	0.275 dB/km
	1565 nm-1625 nm	0.35 dB/km
波長分散パラメータ	D_{1550}	17 ps/(nm × km)
	S_{1550}	0.056 ps/(nm ² × km)
注 - [b-ITU-T G.957] と [b-ITU-T G.691] で使用されるリンク損失係数に対応するリンクの典型値		

表 I.2 - 群遅延時間差

統計的偏波モード分散 の最大値 [ps/√km]	リンク長さ [km]	最大群遅延時間差 [ps]	伝送速度
No specification			Up to 2.5 Gbit/s
0.5	400	25.0	10 Gbit/s
	40	19.0 (Note) (注)	10 Gbit/s
	2	7.5	40 Gbit/s
0.20	3000	19.0	10 Gbit/s
	80	7.0	40 Gbit/s
0.10	>4000	12.0	10 Gbit/s
	400	5.0	40 Gbit/s
注 - この値は10Gbitイーサネットシステムにも適用される。			

I.5 非線形係数

非線形光学効果によって誘発されたシステム障害という点で、波長分散の効果は非線形係数、 n_2/A_{eff} と相互に関係している ([b-ITU-T G.663] と [ITU T G.650.2] を参照)。典型値は実際の値とは異なる。非線形係数の測定方法は研究段階にある。

I.6 統計的手法の一例

リンクを設計する際にランダムネスが仮定できる場合 (例えば、比較的多い数のケーブルがリンクを形成してランダムに連結している場合) には、統計的リンク設計に対する数学的アプローチをとることができる。ただしその適用可能範囲に関しては、さらなる研究が必要である。例えばあるリンクが、限定された数の個々のファイバからなるケーブルで構成されている場合、ランダムネスは限定されており、合理的なシステムマージンを得るためには最悪値設計が好ましい。

統計的システム設計の一般的な手法は、[b-ITU-T G-Sup.39] に記載されており、以下ではファイバあるいはケーブルのパラメータの統計的な上限を導くひとつの方法を提供する。計算は統計的な分布を確立することから始まる。 x_i と L_i をそれぞれ、あるファイバのパラメータにおける単位長さあたりの値、ケーブル長

さに対する値とし、そのファイバは N 本のケーブルからなる連結されたリンクの i 番目のケーブル内にあるとする。この場合、リンク全体における包括的なファイバパラメータ x_N はその長さに比例する、即ち x_N は以下のように表現される。

$$x_N = \frac{\sum_{i=1}^N L_i x_i}{L_{Cab}} = \frac{1}{L_{Cab}} \sum_{i=1}^N L_i x_i \quad (I-3)$$

もし全てのケーブルがある値 L_{Cab} よりも短く、同時に、予想されるケーブルの数が $M = L_{Link}/L_{Cab}$ までに減ることが想定されるなら、同じ長さ $L_i = L_{Cab}$ のケーブルで構成されるリンクに対しては、上記の式が以下のようになる。

$$x_N \leq x_M = \frac{L_{Cab}}{L_{Cab}} \sum_{i=1}^M x_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \quad (I-4)$$

連結されたリンクパラメータにおける分散、 x_M 、は、連結されているファイバを平均した値であるため、個々のケーブルにおける分散、 x_i 、よりも小さくなるだろう。

一度ファイバパラメータの分散を確定してしまえば、リンクの形に関して何も仮定することなく、連結されたリンクのファイバパラメータの確率密度、 f_{link} 、を決定するためにモンテカルロ法が使用できる。この方法は、測定されたファイバパラメータの母集団を繰り返しサンプリングすることで、リンクの形成プロセスをシミュレートしている。

その分布を特徴づけるために、ファイバパラメータは十分に多くの区画に関して測定される。このデータは連結されたリンクにおける単一のパスに関するファイバパラメータを計算するために使用される。

計算は測定されたファイバパラメータから M 個の値をランダムに選択し、式 (I-4) に従ってそれらを足していくことで成り立っている。計算された連結された損失は、他のランダムサンプリングから導かれた値の表あるいはヒストグラム内に配置される。この計算プロセスは、ファイバパラメータの分布の密度の高いヒストグラムが作成されるための、十分な数のロスの値が計算されるまで繰り返される。ガウス近似などの追加的な特徴づけを行わずにヒストグラムを直接使用した場合、リサンプルの数は少なくとも 10^4 にすべきである。

中心極限定理により、リンクにおけるファイバパラメータの統計的値のヒストグラムは、二つのパラメータのうちの最小値によって記述できる分布に収束しようとする傾向がある。

そのためヒストグラムは、サンプルサイズによって暗示されるものよりも小さな確率水準への外挿を可能とするようなパラメトリックな分布に近似することが可能である。二つのパラメータは、そのまま分布の二つの側面を表現している：中心値と中心値の変動性である。

$Q = 10^{-3}$ の確率水準を得るために純粋に数値的なアプローチを使う場合は、サンプル数が少なくとも 10^4 であるようなモンテカルロ計算を必要とする。一度この計算が完了すると、損失及び/あるいは波長分散の分布を、関係する累積確率密度関数からの内挿によって得ることが出来る。

上に例示された手法の適用可能性に関しては、今後も研究が必要な段階にある。

付録 II

JT-G652.D ファイバの波長分散の最大値及び最小値特性に関する情報

(この付録は本標準に必須の構成要素ではない)

2014年11月、SG15/Q5は、既存のJT-G652.Dファイバの波長分散の仕様を改善し、新しい仕様を1270 - 1625 nmの波長域における最大・最小値の線で表現することを決定した。この目的のため、ファイバ供給会社8社(その会期におけるITU-T SG15/Q5の全メンバー)の協力のもと、波長分散の調査が行われた。この調査には、JT-G657.AファイバとJT-G652.Dをベースとするピュアシリカコアファイバを含む、全てのJT-G652.Dタイプのファイバが含まれていた。調査は匿名で行われた。

この調査の結果は図II.1で示されている。

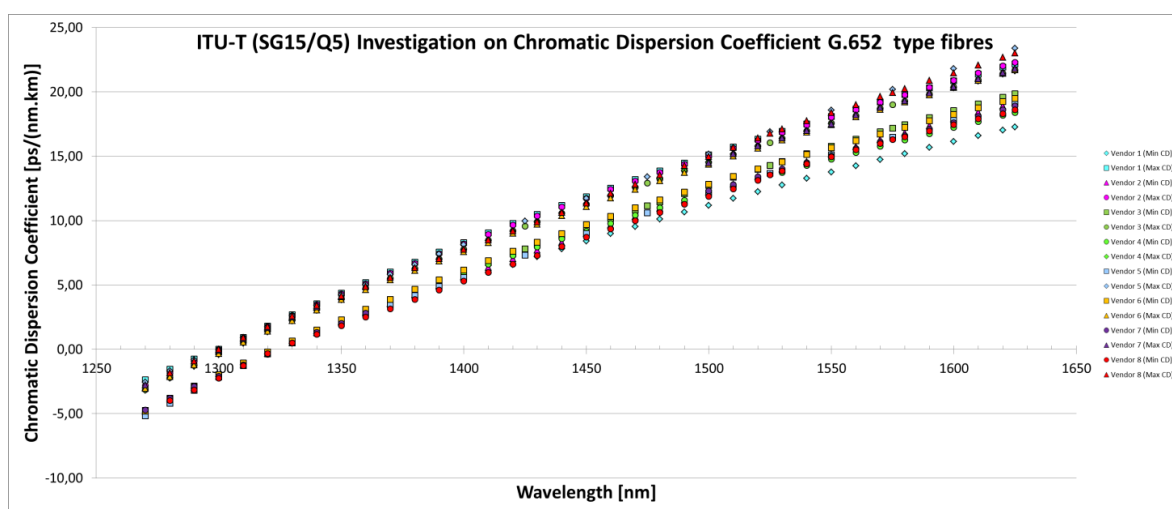


図 II.1 波長 1270 から 1625 nm における JT-G652.D ファイバの波長分散係数の最大値と最小値の調査

表 II.1 は、ファイバ供給会社 8 社から提供された 1270 から 1625 nm の波長範囲における波長分散のデータである。

このデータに基づいて、JT-G652.D ファイバの分散の最大値と最小値を示す境界線が特定された。9 版 (2016 年) から記載されている 8 章の表 2 を参照のこと。

表 II.1. 波長 1270 から 1625 nm における JT-G652.D ファイバの波長分散係数の最大値と最小値の調査

ITU-T SG15/Q5 Chrom. Dispersion data gathering G.652 type fibre manufacturers											Date: 2015-04-21																					
Chromatic Dispersion Coefficient [ps/(nm.km)]																																
Wavelength (nm)	Vendor 1 (Min CD)		Vendor 1 (Max CD)		Vendor 2 (Min CD)		Vendor 2 (Max CD)		Vendor 3 (Min CD)		Vendor 3 (Max CD)		Vendor 4 (Min CD)		Vendor 4 (Max CD)		Vendor 5 (Min CD)		Vendor 5 (Max CD)		Vendor 6 (Min CD)		Vendor 6 (Max CD)		Vendor 7 (Min CD)		Vendor 7 (Max CD)		Vendor 8 (Min CD)		Vendor 8 (Max CD)	
1270	-4,96	-2,36	-4,82	-2,83	-4,74	-3,14	-4,83	-3,38	-5,38	-2,54	-4,80	-3,05	-4,70	-2,76	-3,99	-1,83																
1280	-3,99	-1,56	-3,87	-1,88	-3,79	-2,18	-3,87	-2,26	-4,18	-1,68	-3,83	-2,12	-3,80	-1,82	-3,16	-0,92																
1290	-3,05	-0,77	-2,96	-0,94	-2,86	-1,25	-2,94	-1,34	-3,19	-0,83	-2,89	-1,21	-2,90	-0,91	-2,25	-0,80																
1300	-2,12	0,00	-2,06	-0,02	-1,96	-0,33	-2,03	-0,43	-2,17	-0,01	-1,97	-0,32	-2,10	-0,10	-1,28	-0,92																
1310	-1,23	0,91	-1,18	0,88	-1,08	0,56	-1,14	0,46	-1,28	0,89	-1,07	0,55	-1,20	0,84	-0,32	1,77																
1320	-0,35	1,81	-0,33	1,76	-0,22	1,44	-0,28	1,33	-0,35	1,75	-0,20	1,41	-0,40	1,68	0,48	2,60																
1330	0,45	2,68	0,50	2,62	0,61	2,29	0,56	2,19	0,49	2,61	0,65	2,24	0,50	2,50	1,17	3,42																
1340	1,19	3,53	1,31	3,47	1,43	3,13	1,38	3,03	1,25	3,41	1,49	3,06	1,30	3,30	1,84	4,15																
1350	1,92	4,37	2,10	4,29	2,23	3,94	2,19	3,85	2,01	4,25	2,30	3,86	2,00	4,08	2,49	4,88																
1360	2,63	5,19	2,87	5,10	3,01	4,75	2,97	4,65	2,75	5,04	3,10	4,64	2,80	4,90	3,13	5,59																
1370	3,32	5,99	3,55	5,90	3,79	5,51	3,73	5,44	3,47	5,83	3,88	5,39			3,87	6,33																
1380	4,00	6,78	4,28	6,68	4,55	6,27	4,47	6,21	4,17	6,58	4,65	6,13			4,59	7,05																
1390	4,67	7,54	4,98	7,44	5,29	7,02	5,19	6,97	4,88	7,39	5,41	6,86			5,29	7,77																
1400	5,32	8,30	5,68	8,19	6,02	7,76	5,91	7,72	5,58	8,14	6,15	7,58			5,96	8,49																
1410	5,96	9,04	6,37	8,92	6,74	8,48	6,60	8,45			6,88	8,30			6,61	9,20																
1420	6,58	9,76	7,05	9,65	7,44	9,19	7,27	9,18			7,60	9,01																				
1425					7,79	9,55			7,31	9,97																						
1430	7,20	10,47	7,72	10,35	8,14	9,89	7,94	9,89			8,31	9,71			7,29	9,91																
1440	7,80	11,17	8,31	11,05	8,82	10,58	8,58	10,58			9,00	10,40			7,99	10,64																
1450	8,39	11,86	8,99	11,73	9,50	11,26	9,18	11,27	8,98	11,71	9,67	11,08			8,71	11,35																
1460	8,97	12,53	9,66	12,41	10,16	11,93	9,79	11,94			10,33	11,76			9,35	12,11																
1470	9,54	13,19	10,32	13,07	10,82	12,59	10,40	12,61			10,98	12,42			9,98	12,82																
1475					11,15	12,92			10,60	13,40																						
1480	10,10	13,84	10,96	13,72	11,45	13,22	10,99	13,26			11,61	13,08			10,63	13,54																
1490	10,65	14,48	11,59	14,36	12,10	13,87	11,57	13,90			12,23	13,73			11,26	14,27																
1500	11,19	15,10	12,21	14,99	12,74	14,51	12,13	14,53	12,16	15,16	12,83	14,37	12,30	14,50	11,87	14,99																
1510	11,72	15,72	12,82	15,61	13,36	15,14	12,68	15,15			13,42	15,00	12,80	15,20	12,45	15,68																
1520	12,24	16,33	13,42	16,23	13,98	15,76	13,21	15,76			14,00	15,63	13,40	15,80	13,11	16,40																
1525					14,28	16,06			13,66	16,89					13,55	16,79																
1530	12,76	16,93	14,01	16,83	14,59	16,37	13,74	16,36			14,56	16,25	14,00	16,40	13,84	17,12																
1540	13,26	17,51	14,59	17,43	15,18	16,97	14,27	16,94			15,12	16,85	14,50	17,00	14,40	17,76																
1550	13,76	18,09	15,16	18,02	15,76	17,56	14,78	17,52	15,10	18,56	15,66	17,45	15,00	17,50	14,94	18,39																
1560	14,25	18,66	15,73	18,60	16,33	18,14	15,28	18,10			16,20	18,05	15,60	18,20	15,50	19,01																
1570	14,73	19,22	16,28	19,18	16,89	18,71	15,78	18,66			16,73	18,63	16,10	18,80	15,99	19,63																
1575					17,17	18,99			16,48	20,20					16,29	19,93																
1580	15,20	19,78	16,82	19,76	17,45	19,27	16,27	19,21			17,24	19,21	16,60	19,30	16,49	20,25																
1590	15,67	20,32	17,36	20,33	17,99	19,83	16,75	19,76			17,75	19,77	17,10	19,90	16,95	20,88																
1600	16,13	20,86	17,89	20,89	18,53	20,37	17,23	20,30	17,81	21,81	18,25	20,33	17,60	20,40	17,46	21,45																
1610	16,59	21,39	18,41	21,45	19,06	20,91	17,70	20,83			18,75	20,89	18,10	21,00	17,89	22,08																
1620	17,03	21,91	18,92	22,01	19,58	21,44	18,17	21,36			19,23	21,43	18,60	21,50	18,31	22,69																
1625	17,25	22,17	19,17	22,28	19,84	21,71	18,40	21,62	19,09	23,38	19,47	21,70	18,90	21,80	18,60	23,01																

参考文献

- [b-ITU-T G.663] Recommendation ITU-T G.663 (2011), Application related aspects of optical amplifier devices and subsystems.
- [b-ITU-T G.691] Recommendation ITU-T G.691 (2006), Optical interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers.
- [b-ITU-T G.692] Recommendation ITU-T G.692 (1998), Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers.
- [b-ITU-T G.693] Recommendation ITU-T G.693 (2009), Optical interfaces for intra-office systems.
- [b-ITU-T G.695] Recommendation ITU-T G.695 (2015), Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications.
- [b-ITU-T G.696.1] Recommendation ITU-T G.696.1(2010), Longitudinally compatible intra-domain DWDM applications.
- [b-ITU-T G.698.1] Recommendation ITU-T G.698.1 (2009), Multichannel DWDM applications with single-channel optical interfaces.
- [b-ITU-T G.698.2] Recommendation ITU-T G.698.2 (2009), Amplified multichannel dense wavelength division multiplexing applications with single channel optical interfaces.
- [b-ITU-T G.698.3] Recommendation ITU-T G.698.3 (2012), Multichannel seeded DWDM applications with single-channel optical interfaces.
- [b-ITU-T G.957] Recommendation ITU-T G.957 (2006), Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy.
- [b-ITU-T G.959.1] Recommendation ITU-T G.959.1 (2016), Optical transport network physical layer interfaces.
- [b-ITU-T G.983.1] Recommendation ITU-T G.983.1 (2005), Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON).
- [b-ITU-T G.984.2] Recommendation ITU-T G.984.2 (2003), Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification.
- [b-ITU-T G.985] Recommendation ITU-T G.985 (2003), 100 Mbit/s point-to-point Ethernet based optical access system.
- [b-ITU-T G.986] Recommendation ITU-T G.986 (2010), 1 Gbit/s point-to-point Ethernet-based optical access system.
- [b-ITU-T G.987.2] Recommendation ITU-T G.987.2 (2016), 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification.
- [b-ITU-T G.989.2] Recommendation ITU-T G.989.2 (2014), 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification.
- [b-ITU-T G-Sup.39] Recommendation ITU-T G-Sup.39 (2016), Optical system design and engineering considerations.
- [b-ITU-T G-Sup.40] Recommendation ITU-T G-Sup 40 (2010), Optical fibre and cable Recommendations and

standards guideline.

[b-IEC 60794-2-11] IEC 60794-2-11 (2012), Optical fibre cables – Part 2-11: Indoor cables – Detailed specification for simplex and duplex cables for use in premises cabling.

[b-IEC/TR 61282-3] IEC/TR 61282-3 (2006), Fibre optic communication system design guides – Part 3: Calculation of polarization mode dispersion.