

博士論文

光ファイバ網における光分岐線路の

遠隔保守監視に関する研究

Remote Monitoring Technology

in Passive Optical Fiber Networks

国立大学法人 横浜国立大学大学院

工学府

本田奈月

目次

第1章 緒論

1.1 はじめに.....	1
1.2 研究の背景.....	1
1.2.1 光ファイバネットワークの発展	2
1.2.2 光アクセスネットワークの試験技術	9
1.2.3 光ファイバアクセスネットワーク遠隔監視の技術課題	14
1.3 本論文の構成.....	14
・文献	

第2章 光ファイバネットワークのインサービス試験

2.1 緒言.....	20
2.2 インサービス試験の構成.....	20
2.3 光学特性設計.....	22
2.3.1 透過・遮断波長条件.....	22
2.3.2 損失条件.....	23
2.3.3 反射条件.....	26
2.4 光コンポーネントの設計.....	31
2.4.1 FBG 技術を用いた広帯域試験光遮断フィルタ	31
2.4.2 FBG とサーキュレータを用いた広帯域光試験モジュール.....	36
2.5 広帯域光試験モジュールによるインサービス試験.....	37
2.6 結論.....	40
・文献	

第3章 インサービス試験のフィルタリング評価基準

3.1 緒言	43
3.2 実効遮断量の定義	43
3.3 フィルタリング評価.....	50
3.4 10Gbit/s SDH 伝送に対する評価	57
3.5 結論	60
・文献	

第4章 光分岐線路の遠隔監視方法 -ブリルアン散乱による識別-

4.1 緒言	62
4.2 光分岐線路の遠隔監視方法.....	62

4.2.1	分岐線路の監視リクワイヤメント	62
4.2.2	光ファイバ中の散乱光	63
4.3	ブリルアン周波数シフトによる光分岐線路の識別方法	68
4.4	ブリルアン周波数シフト間隔の設計	71
4.5	光ファイバのブリルアン周波数シフト制御	74
4.5.1	石英ガラス中の音速とブリルアン散乱周波数シフト	74
4.5.2	光ファイバコアドーパント設計	74
4.6	ブリルアン周波数シフト制御ファイバ	80
4.6.1	ブリルアン周波数シフト制御ファイバ評価	80
4.6.2	分岐線路の散乱信号識別	87
4.7	結論	90
	・文献	
第5章 光分岐線路のインサービス試験		
5.1	緒言	93
5.2	ブリルアン OTDR の基本原理	93
5.3	B-OTDR 試験システムパフォーマンス	95
5.4	B-OTDR を用いた光分岐線路下部の監視	96
5.4.1	B-OTDR ダイナミックレンジ	96
5.4.2	光分岐線路測定	99
5.4.3	高精度損失位置測定	102
5.4.4	温度変動安定化測定	102
5.5	GE-PON における分岐線路下部試験と伝送評価	106
5.6	結論	110
	・文献	
第6章 総括		
6.1	得られた成果のまとめ	112
6.2	今後の展望	115
	・文献	
■	発表論文リスト	118
■	謝辞	125

第 1 章

序論

1.1 はじめに

インターネットの普及によってデジタル通信データ量は爆発的に増加している。ブロードバンド契約者の利用トラフィック総量は2009年5月に1.2 Tbpsとテラビットを超えており[1-1]、さらには今後、動画配信等による大容量コンテンツとしてハイビジョンデータ放送配信への利用が期待されるなど通信容量拡大のニーズはさらに高まることが予想される。インターネットを利用する為のブロードバンドサービスには既設固定電話回線にデジタル情報を多重化したDSL(Digital Subscriber Line)や、CATV(Common Antenna TeleVision)、固定無線アクセスのFWA(Fixed Wireless Access, BWA(Broadband Wireless Access)、そして光ファイバにより個人ユーザ向けのサービスであるFTTH(Fiber To The Home)等多様なサービスが展開されている。中でも他方式と比較して収容局からの距離が長くとも伝送損失の影響が少なく、広帯域かつノイズの影響を受けにくいFTTHは近年次々と新しいサービス方式が商用化・導入され、その高速かつ低廉なサービス提供を背景に、これまでブロードバンドサービスの主流であったDSLに対して2008.6月末には加入数を逆転し、更に2009.6月末には全ブロードバンド加入世帯3014万の過半数を占めるメインサービスとなった[1-2]。

通信事業者と個人ユーザを光ファイバによって繋ぐFTTHサービスは1997年度、光ファイバネットワーク構築を大幅にコストダウンし従来のメタルケーブル並コストを実現したSTM(Synchronous Transfer Mode)方式により開始され、アナログ電話やISDN(Integrated Services Digital Network)データ通信等が提供された。その後インターネットアクセス用に高速伝送を実現するATM(Asynchronous Transfer Mode)方式、ギガビットEtherフレーム方式へと次々に、低廉化技術を進めるシステムが開発・導入されて現在に至る[1-3]-[1-12]。今日ではブロードバンドネットワークの利用形態はデータ通信だけでなく、IP(Internet Protocol)電話、TV等へと展開し生活のあらゆるシーンをサポートする必要不可欠なインフラとなっている。このような利用形態の発展に伴って光ファイバネットワークには高い信頼性が必要とされており、その為には詳細でリアルタイムにネットワーク状態を把握することが必要となる。第1章では、光通信ネットワークの発展と光ファイバネットワークの高信頼性を支える光ファイバ保守に関わる試験の技術課題を概説し、本研究の目的と位置づけについて述べる。

1.2 研究の背景

1.2.1 光ファイバネットワークの発展

光ファイバネットワークの構成を図 1.1 に示す。光ファイバネットワークは中継(コア)ネットワークとアクセス系に大別される。アクセス系光ファイバネットワークはユーザ宅(またはビル)と通信設備ビル間に設置された光ファイバケーブル網であり、通信設備ビル内の所内系、地下の幹線系、架空の配線系、引き込みからユーザ宅内のユーザ系に分けることができる。所内系には 100 心以下程度の所内光ケーブル、所内光ケーブルと所外光ケーブルを成端シクロスコネクタでできる光ファイバ配線モジュールがある。幹線系では最大 1000 心の幹線系光ケーブル、光ケーブル接続部として地下用クロージャがある。配線系では数 100 心以下の配線系光ケーブル、架空用クロージャ、ユーザ系では 8 心以下のドロップケーブルがある。アクセス系ではこれらの光コンポーネントが組み合わされ、接続されて面的に広がった光ファイバネットワークが形成されており、このネットワークによってユーザ宅に設置された加入者側終端装置: ONT (Optical network terminal)と、通信設備ビル所内に設置された収容局側終端端末: OLT (Optical Line termination)とがリンクされている、このような光アクセスネットワークを効率的に建設保守するためには、遠隔かつ詳細にネットワーク状態を把握する必要がある。光ファイバネットワークを監視する上で考慮すべきアクセス系光伝送システムの多様性・変化について示す。

a) 波長の変遷

光ファイバ通信に利用される伝送波長の決定要因は主な伝送媒体である光ファイバの低伝送損失帯域に対応する。光ファイバの種別には材料として石英、プラスチック、伝搬モードとしてシングルモード、マルチモード等があるが、光ファイバアクセスネットワークでは、伝送特性の長期安定性に優れ、長距離伝送可能な石英系シングルモードファイバが用いられる。石英光ファイバの伝送損失は図 1.2 に示すように、1) ガラス分子構造の熱的な乱れによる光波長よりも小さなレベルの密度揺らぎにより引き起こされるレイリー散乱、2) ガラス中に残留する OH 基による吸収、3) 石英ガラス固有の Si-O₂ 結合の格子振動による赤外吸収が主な要因であり、1310nm と 1550nm 付近に低損失帯域を持つ。光ファイバ通信の初期には材料中に含まれる残留 OH 基による吸収が大きく、また材料分散の小さくなる 1300nm 波長帯において 0.5dB/km の低伝送損失が得られたことと、高信頼性 GaInAsP 系の半導体 LD (Laser Diode)がいち早く実現されたことから、当初は 1310nm を用いた伝送が実用化された[1-13]-[1-15]。その後、研究の発展により光ファイバ製造技術の改良によって OH 基による吸収を抑えることで 1550 nm 帯における伝送損失はほぼレイリー散乱により損失下限に近い 0.15dB/km 以下が実現され[1-16]、また InGaAsP 系の LD 開発が発展したことで[1-17]、1550 nm 帯等の複数の波長を利用する伝送システムが商用化された[1-6]-[1-12]。

光アクセスサービスの推移と通信サービス波長の変遷を図 1.3, 1.4 に示す。日本では世界に先駆けて 1997 年度に λ システムと呼ばれる FTTH が商用化された[1-3]-[1-5]。 λ システムはユーザ

宅近傍の電柱等に光・電気変換装置を設置し、メタルケーブルを利用して複数ユーザへ配信する方式であり、光伝送信号は上り・下り共に 1310 nm を用いるが、上り信号と下り信号を時間分割して伝送することで 1 心双方向伝送を実現した。最大 1.5Mbit/s の伝送速度をもつシステムは FTTH のビジネスユーザから個人ユーザへのシフトの先駆けとなった。2001 年には ATM 転送フレームベースに設計された B-PON (Broadband - PON) システムが実用化され、上り信号に 1260 ~1360 nm, 下り信号には 1480~1580 nm の異なる光波長信号を用いた WDM(Wavelength Division Multiplexing: 波長多重分割)方式を採用することにより、上下双方向通信時の相互干渉を防ぎ同時に送受信可能とすることで 150Mbps のサービスが提供された[1-6]-[1-8]。さらに 2004 年には Ether 転送フレームをベースとして、1 心光ファイバで最大伝送速度 1Gbit/s を実現する GE-PON (Gigabit Ethernet - PON) サービスが開始された。イーサネット技術を光伝送区間に利用することで、シンプルかつフレーム変換による分割損やヘッダ通信効率低下が少ないという特徴を持ち、上り信号波長には 1310nm, 下り信号には 1490nm を使用している。また更に、1550nm のアナログ映像信号を重畳したトリプルプレイサービスも提供されている[1-10]-[1-12]。

このように光アクセスサービスで用いる波長帯域は 1310nm 帯から 1550nm, そして 1490nm 帯へと拡大しているが、これら光通信に用いる光波長のアロケーションは標準化に基づいて決定されている。図 1.5 に国際電気通信連合 電気通信標準化部門 (ITU-T: International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector)による通信波長アロケーションを示す[1-18]-[1-22]。ITU-T G. Supp.39 および ITU-T L.41 においては、シングルモードファイバシステムにおける波長帯を定義し、通信波長帯域としては 1260-1360, 1360-1460, 1460-1530, 1530-1565, 1565-1625 nm をそれぞれ O-band (Original-band), E-band (Extended-band), S-band (Short-band), C-band (Conventional-band), L-band (Long-band)と称する。また、1625-1675nm 波長は U-band (Ultra-long-band)と呼ぶ保守波長として定義し、光ファイバネットワークの構築、保守する際に用いる。また CWDM システムに用いる波長スペクトル・グリッドは 1271nm から 1611nm を中心とした 18 グリッド、20nm のチャンネル間隔が定義され、1261~1621nm が通信波長として利用される[1-21]。また、PON における波長標準化に関しては G983.3 では 波長配置によりサービスケーパビリティを強化した広帯域光アクセスシステムにおいても将来の拡張波長帯域として 1560nm を超える長波長帯の拡張の標準化が検討されている[1-20]。以上のように光ファイバネットワークでは種々の通信システムサービスが適用され、またシステムアップグレードが生じた際に伝送波長が追加されることが考えらる。その際には光線路を構成するコンポーネントに変更が発生することなくシステムが接続できるよう、波長に対して光学特性が無依存性であるように設計されることが望ましい。

b) ネットワーク構成の変遷

ネットワークトポロジーの変遷を図 1.6 に示す。光通信が早期に実用化されたメトロ幹線系では通信容量を確保するために伝送装置 OLT と ONT を図 1.6 a) のように 1 対 1(point-to-point)で接

続する SS (Single Star)方式が主流であった。しかし、アクセス系ネットワークの光化を実現するにあたっては低コスト化が重要な課題であり、これを解決するために図 1.6 b) のように複数のユーザで所内光通信装置をシェアする PON (Passive Optical Network) 方式の検討が進められた。STM-PON 方式を用いたシステムでは、OLT 近傍、伝送設備ビルの所内に光スプリッタと呼ばれる光合分岐器を設置することにより、1 台の OLT を最大 32 ユーザが共用するネットワーク構成を適用して低廉化を実現した[1-4]。さらに B-PON や GE-PON システムでは、図 1.6 c) に示すようにユーザ宅近傍の電柱などの設備ビル屋外にも光スプリッタを設置するカスケード接続 (point-to-multipoint) 構成を適用し、光幹線ケーブルに対しても複数ユーザによるシェア領域を拡大させた。このように光アクセスネットワークは単に接続点を多く含み、面的な広がりを持つだけでなく、光パワーを合分岐するコンポーネントを用いる複雑な物理ネットワーク構成となっている。

光スプリッタは石英系プレーナ光波回路(PLC)技術を用い、電気等を用いずにパッシブに光を分岐する光デバイスであり、Y 分岐を多段接続した構成によって上部 OLT からの伝送信号を下部ポートに等パワー分岐し、また下部 ONT から送出された複数光信号を合波して上部へ送る。光通信設備に用いるコンポーネントには高い信頼性が求められ、特に所外に設置する環境条件としては温度特性において所内に比較して厳しい $-40\sim 85^{\circ}\text{C}$ における安定性が要求される [1-19]。光アクセスネットワークで用いられている PLC 型スプリッタは 1200~1700nm までの広い波長範囲において出力ポート間損失のばらつきが 0.5 dB 以下[1-20]、温度安定性は 0.3dB 以下 [1-21] の極めて優れた特性を持つモジュールが用いられている。FTTH システムで現在主流となっている GE-PON システムでは所内に 4 分岐光スプリッタを、ユーザ宅近傍に 8 分岐光スプリッタを設置し、1 台の OLT に対して最大 32 台の ONT を対向設置が可能である[1-14]。

光ファイバネットワークを監視するには以上に述べた多様性、すなわち通信波長帯域の広帯域化に影響することなく、またそのネットワーク構成として多くの接続点に加え、光ファイバを透過するパワーが途中で合分岐される光コンポーネントを含む伝送路であることを考慮する必要がある。

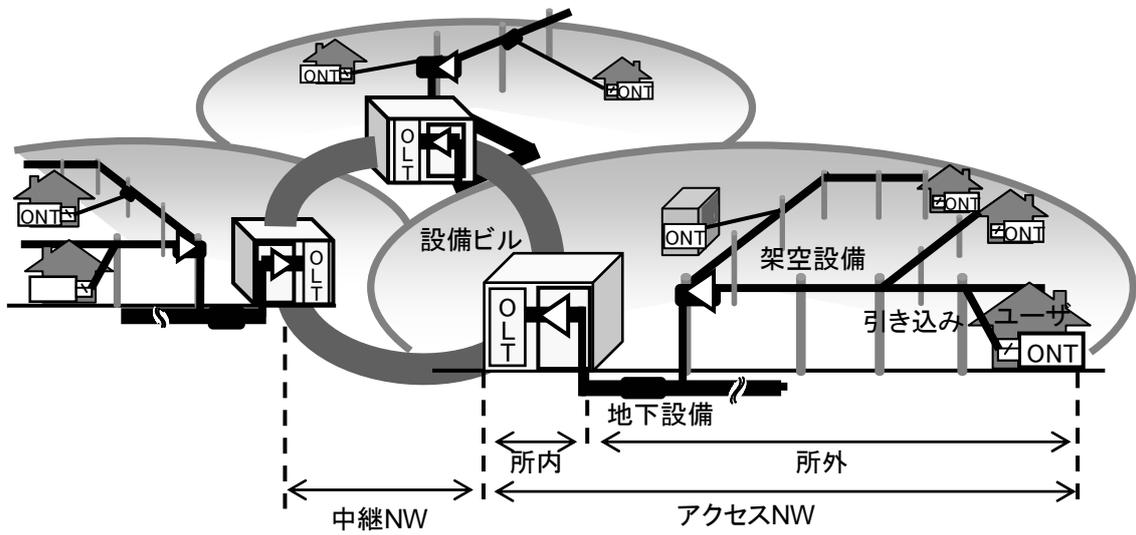


図1.1 光ファイバネットワーク構成

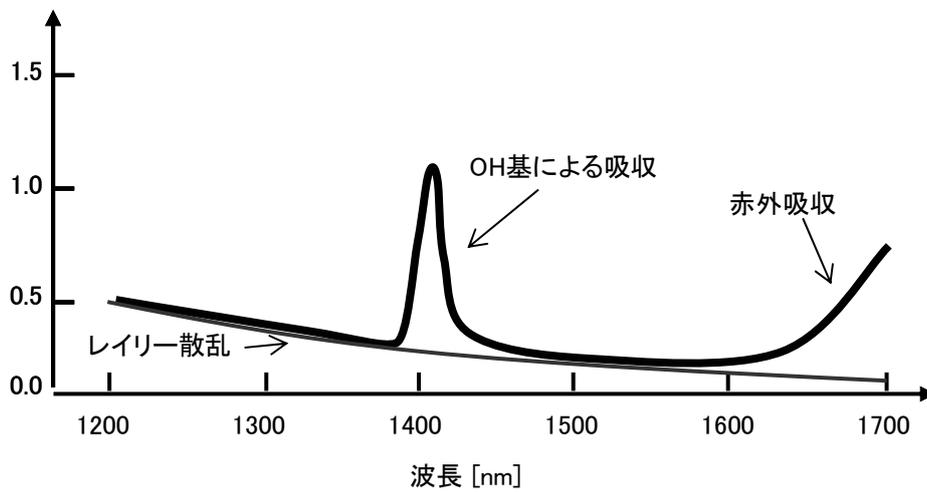


図1.2 光ファイバ伝送損失の要因と波長伝送損失特性

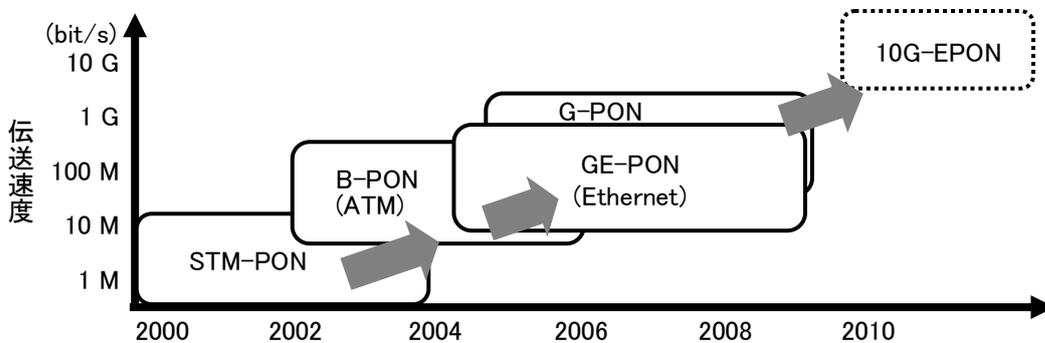


図1.3 光アクセスサービスの推移

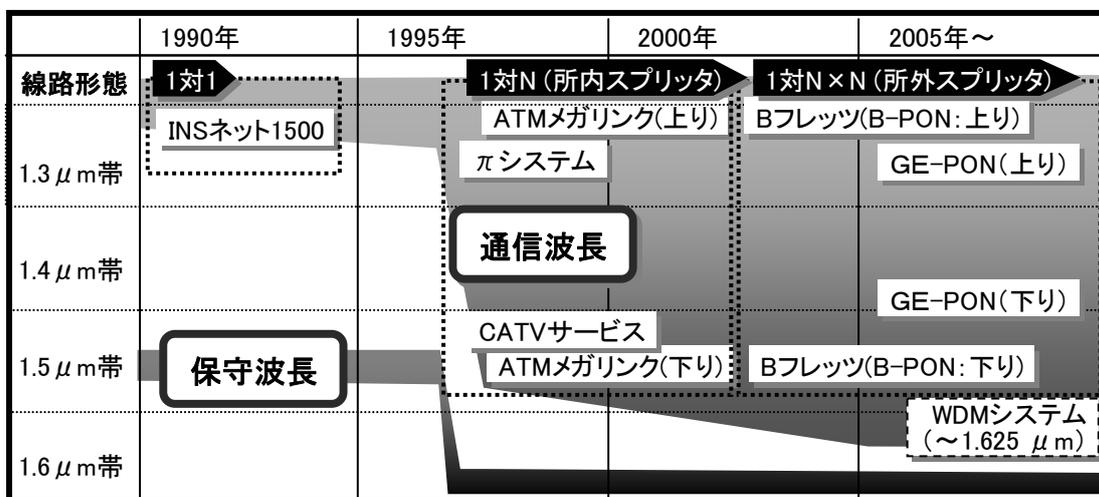
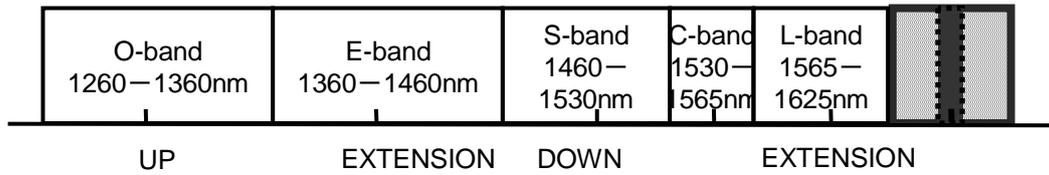
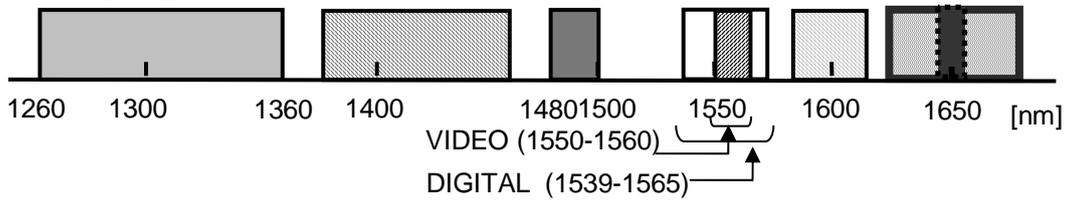


図1.4 通信波長の広帯域化

G.Sup39 and L.41



G983.3 (PON)



G694.2 (CWDM)

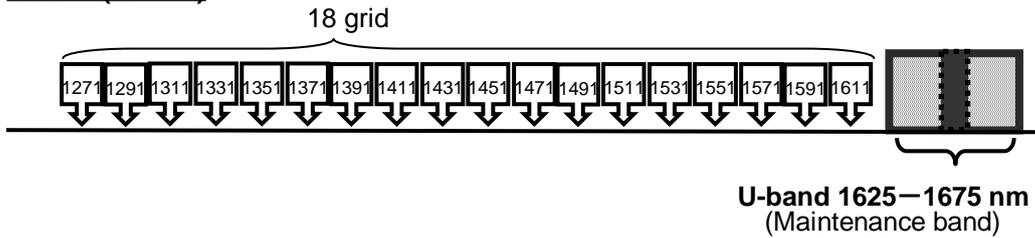
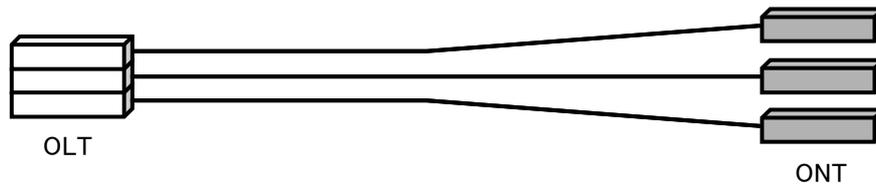


図1.5 通信波長アロケーション

(a) Point to Point

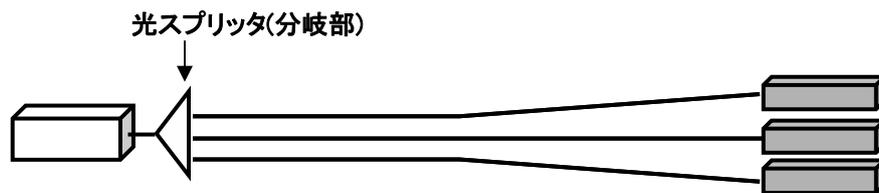


Single Star (SS)



Passive Optical Network (PON)

(b) Point to Multipoint



(c) Point to Multipoint (Cascade)

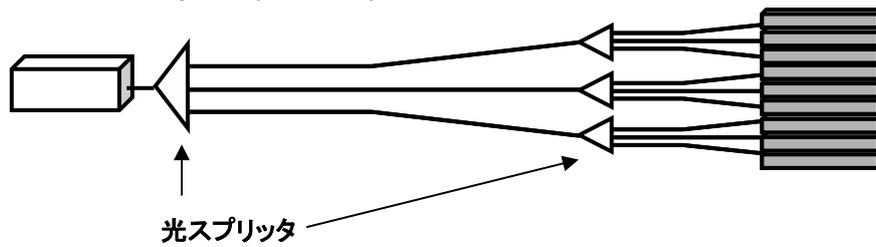


図1.6 ネットワークポロジーの変化

1.2.2 光ファイバネットワークにおける障害と試験技術

1) 光ファイバネットワークにおける障害

高品質な光ファイバネットワークを提供するためには、障害の発生を抑制し、また障害発生時にはその原因を特定して速やかに解消することが必要である。通信における障害は大きく分けて以下の要因に分けることができる。

- ・アプリケーション障害
- ・伝送システム障害
- ・物理媒体レイヤー障害

アプリケーション障害においてはユーザインターフェースを用いて障害が特定可能であり、伝送システムにおける障害はシステムの保守・管理機能: OAM (Operations, Administration, Maintenance) 機能によって、遠隔にあるスイッチ状態や途中の回線障害を切り分ける。例えば伝送フレームを送信し、ネットワーク遠端で折り返し同じフレームを戻す Loop Back 試験、経路探索や疎通性(相手との通信可能であるか)の確認をする Continuity Check などや OAM フレームが到達するまでに生じたフレームの欠落や遅延を ネットワークの End-to-end で調べる機能をシステム管理機能として備える。一方、ここでフレームの未達が発生すると、可能性として物理媒体での障害であるが推定されるが、媒体の故障原因や故障位置などの修復するために必要な情報は、システムで障害検出手段を備えることは困難である。つまり、障害検出機能として、

- ・伝送装置間の故障であるか、または光ファイバネットワークの媒体レイヤーでの故障であるかを見分ける機能

- ・光ファイバネットワークの故障位置を検出する機能

が必要である。光ファイバネットワークにおける物理層の障害としては光ファイバケーブルの破断、曲げによる損失の増大、クロージャ浸水によるコネクタ接続点の汚染による接続損失増加等が挙げられる。また光ファイバの長期的な劣化要因としては、光ファイバ表面のクラック発生により光ファイバの強度劣化が発生する。また、水の浸透による Hydrogen 吸収によって光ファイバの伝送損失が増加するなど、浸水障害が発生しているかどうかの予防保全的検査も重要な試験項目である。光ファイバネットワークの試験の項目を表 1.1 に示す。光ファイバ線路試験は主に、光ファイバネットワークを構築する新規敷設、そして線路切替、故障修理、予防保全において実施される[1-22]-[1-24]。

2) 光ファイバネットワークにおける試験技術

光ファイバの試験方法を図 1.7 に示す。光ファイバ線路の試験は大きく 3 つの形態に分けられる。まず、光ファイバ線路の建設において品質を確認する方法として End-to-end で透過損失を測定する損失試験、光ファイバ線路の両端にそれぞれ試験光源(LS: Light source)と受光部(OPM)を接続して光パワーの減衰を測定する。次に光ファイバ線路の接続や切断などの作業を行う際に、正しい光ファイバ心線であるかを確認するために実施する心線対照試験、光ファイバの切断を行わず、または光コネクタの無い状態で測定をするために、光線路の片端から入力した試験光を曲げによって漏洩させ検出する End to drop 試験である[1-25]-[1-27]。これらの試験は、測定を行うために光ファイバ線路の遠端または作業点へ作業者の派遣が必要である。3 つめの試験形態としては、光ファイバ線路で発生した故障位置を測定検出する手段として、片端から測定可能な OTDR (Optical Time Domain Reflectometry: 光パルス試験器) が用いられる。OTDR は 1976 年に Barnoski 等によって最初に報告され [1-28], Personick により様々な実験データとそのレイリー散乱光の公式が示された[1-29]。OTDR のシングルモードファイバ計測への適用は Brinkmeyer によってなされた[1-30]。1980 年代には OTDR のダイナミックレンジを拡大する研究が行われ、光ファイバ計測に広く適用されることとなった[1-31]-[1-34]。OTDR を用いた測定は、散乱光の損失傾斜から光ファイバの伝搬損失を長手方向に分析することが可能であり、また光ファイバ中に発生する損失や反射を位置と共に計測する非常に有用な計測技術である。特に、光ファイバアクセスネットワークにおいては、光ファイバの敷設状況を解析するために、光線路片端からの計測ができるため、遠隔かつ迅速に障害を検出する有用な試験技術であり、設備ビル内に OTDR を常時設置し、光スイッチと組み合わせた遠隔光試験システムが実用化されている[1-35]-[1-36]。

OTDR の原理について述べる。図 1.8 に OTDR の基本的な構成と典型的な OTDR 波形を示す。OTDR は試験光源(LD)と APD (Avalanche photodiode) を用いた受信部を備え、光ファイバに数 ns ~ 数十 μ s の光パルスを入射し、光ファイバ中で発生した戻り光を光カプラ等で受光部に結合して検出する。戻り光パワーは時間分割して検出し、光が戻る時間から距離を換算して、光ファイバ長手方向に発生する損失や反射分布を検出する。光パルス試験では主にレイリー後方散乱光及びフレネル反射を検出する。レイリー散乱光の反射率 R_{rs} は以下の式で与えられる。

$$R_{rs} = \frac{1}{2} (S \alpha_r W v_0) \quad (1-1)$$

α_r : レイリー散乱による光損失

S : レイリー散乱による後方に戻る光の割合

W : 入力パルスの半値全幅

v_0 : 光ファイバ中の光速

α_r は波長により係数が異なるが、1310, 1550, 1650 μm においてそれぞれ約 0.4, 0.25, 0.3dB/km 程度である。 S はシングルモードファイバの場合、以下で与えられる。

$$S = \frac{3}{2} \frac{1}{(w/a)^2 \nu^2} \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \quad (1-2)$$

w : ガウスビームスポットサイズ

a : 光ファイバのコア半径

ν : 正規化周波数

n_1, n_2 : 光ファイバコア、クラッドの屈折率

光ファイバ中を伝送する散乱光は光ファイバの伝送損失をうけて徐々にパワーが低下する。また光ファイバケーブルの接続においてコネクタ、融着等による損失やフレネル反射が発生すると、損失によるパワー低下や光パワーの急峻な増大を発生する。

計測光パワーと受光部に用いる APD の最小受光感度の差が、測定可能な光線路の損失、すなわち OTDR の測定ダイナミックレンジである。OTDR のダイナミックレンジ DR_o は以下の式で表せる。

$$DR_o = \frac{P_o + R_{rs} - P_{\min} + \frac{SNIR_{Ave}}{2}}{2} \quad (1-3)$$

P_o は光ファイバ入力パルスパワー、 P_{\min} は SNR (Signal-Noise Ratio) = 1 におけるレーザの最小受信感度、 $SNIR_{Ave}$ は散乱光信号レベルが非常に小さいため、多数回の測定を繰り返し散乱光データの平均をとることでノイズを低減する信号の平均化による受信感度の改善である。図 1.9 に OTDR 計測における平均化処理によるノイズ低減の様子を示す。OTDR 測定では送出パルス幅や送出間隔を計測する光ファイバ長や必要分解能によって適切なパラメータを設定する。距離分解能は光パルス幅によって決定され、短パルスを用いることで光ファイバに発生する近接した損失や反射等のイベントを詳細に検出することができるが、一方で式(1-1)に示すようにレイリー散乱光パワーはパルス幅に比例して減少するため、空間分解能とダイナミックレンジはトレードオフとなる。直接検波方式を用いた場合、平均化によって改善したレーザの最低受信感度約 -70dB、パルス幅 100ns (空間分解能 10m) の場合 $R_{rs} = -62\text{dB}$ を用いると、パルスピークパワー 15dBm のとき OTDR のダイナミックレンジは 11.5dB となり、光ファイバ線路の損失が接続損失を含めて 0.5dB/km とすると、23km の線路の監視が可能である。また光ファイバパルスの送出間隔は被測定ファイバを往復するよりも長く設定する必要がある。

表 1.1 光ファイバ線路の試験機能とネットワーク状態

Category	Function	Test Method	Network condition	
			SS	PON
新規敷設	・光損失測定 ・作業心線特定 ・損失, 反射測定	・OPM ・曲げ漏洩光検出 ・OTDR	Out-service	In-service
線路切替	・作業心線特定 ・反射損失測定	・曲げ漏洩光検出 ・OTDR	In-service	In-service
故障修理	・故障検出, 位置検出	・OTDR	Out-service	In-service
予防保全	・劣化診断	・OTDR	In-service	In-service

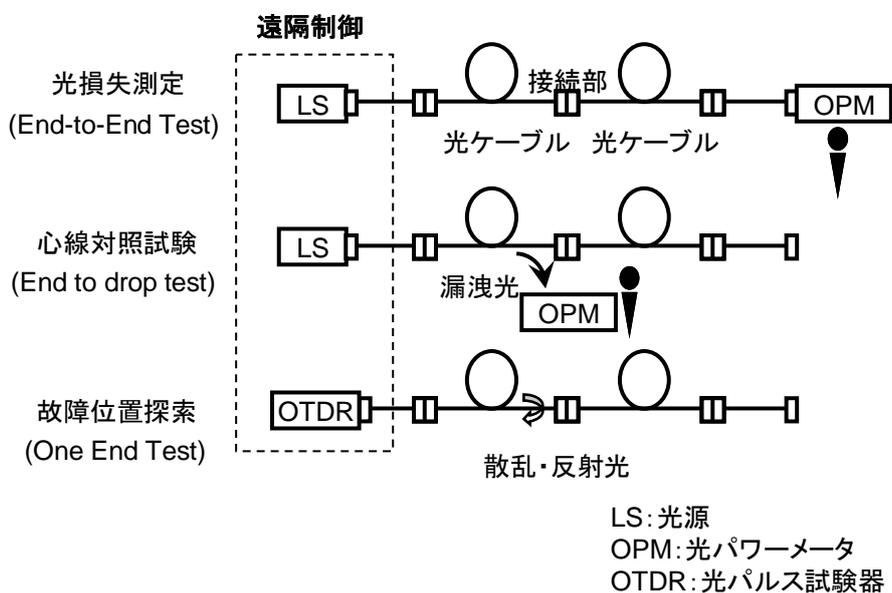


図1.7 光ネットワークの保守・監視方法

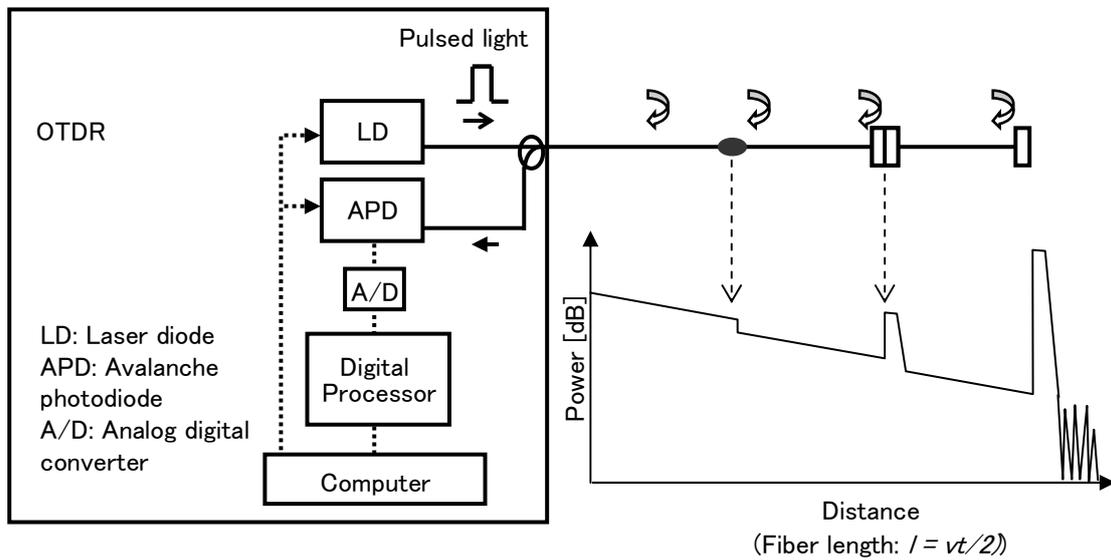


図1.8 OTDRの測定原理

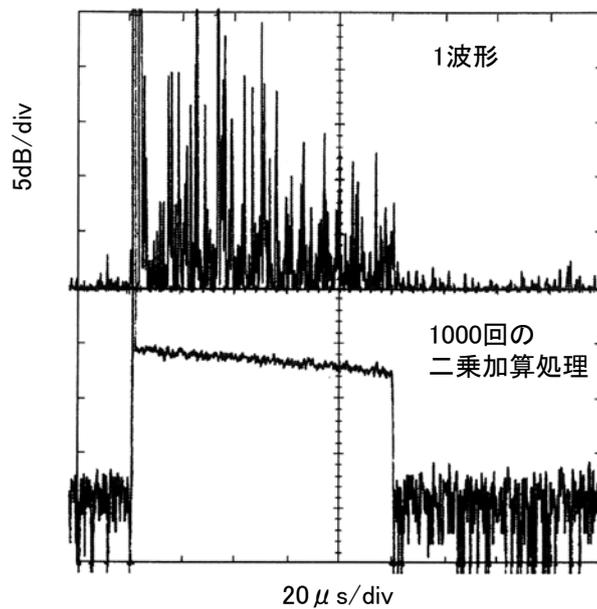


図1.9 OTDR計測における平均化処理によるノイズ低減

1.2.3 光ファイバアクセスネットワーク遠隔監視の技術課題

表 1.1 に光ファイバ線路の試験機能に対するネットワーク状態も合わせて示した。新規敷設時や故障時の光ファイバ試験の実施においては、光ファイバネットワーク構成が 1 対 1 の場合 (SS の場合)にはサービスが利用されていない"アウトサービス"状態であり、試験を実施するために光線路を一時的に切断しても通信システムへの影響は生じなかった。しかし、光線路の劣化予測や、複数光ファイバから作業心線を特定する心線対照ではサービスがアクティブである"インサービス"状態で光ファイバ線路に対して試験を実施する。このときユーザに対して影響を与えないためには光線路に対して断線させることなくアクセスする手段と、入力した試験光が通信信号に対してノイズとして重畳したときに符号化した伝送信号の符号誤りを引き起さないようにする必要がある[1-38], [1-39]。よって、通信システムに影響を与えることなく光試験を実行する為には、

- ・光アクセスネットワークのシステム構成
- ・システムに用いる光コンポーネントの光学特性

を検討する必要がある。

また、現在故障位置特定に用いられる OTDR では光スプリッタ上部から試験を実行すると光スプリッタ部で試験信号が等分され、各光ファイバ線路へ入射し観測する散乱信号がすべて重畳するため、その下部の光ファイバそれぞれで生じている損失や位置を個別に検出することが困難であり、

- ・分岐した心線毎に発生する散乱信号を識別可能な試験方法

の創出が求められる。

1.3 本論文の構成

本研究の目的は、汎用性ある光ファイバ試験技術の確立を通じ、高品質で信頼できる社会インフラとしての光ファイバネットワークを確立することにある。本論文には、そのために必要な検討として、以下の 3 点を具体的な目標とした。

- 1) 光アクセスネットワークの遠隔監視要件の確立
- 2) 通信システムの波長多重化への対応

3) 通信システムのネットワーク構成変遷への対応

本論文の構成を図 1.10 に示す。第 1 章の緒論では光ファイバアクセスネットワークの現状について述べ、特に重要な技術背景として、光アクセスネットワークで用いられる通信サービスの変遷について概説した。また、光ファイバ網の遠隔監視技術について現在の研究状況を示し、課題点を述べ、本研究の位置づけと目的を述べた。第 2 章では、光ファイバネットワークのインサービス試験を実施するための線路構成とその構成要素について損失、反射等の光学特性における必要条件を明らかにする。第 3 章では、インサービス試験を実施するために求められる OTDR 試験光源のリクワイヤメントとともに、フィルタリング評価基準を示す。第 4 章では、光分岐線路の遠隔監視方法として、ブリルアン散乱をパラメータとした PON 分岐線路下部の識別方法を提案し、ブリルアン散乱周波数を光ファイバに付与し、かつ光アクセス網線路として適用可能な設計条件の提示とブリルアン散乱周波数制御ファイバの製作評価を行った。第 5 章では、第 4 章で作成したブリルアン散乱周波数制御ファイバを用いて光アクセスネットワークを詳細に遠隔監視可能な高信頼性を得られる光分岐線路を構築し、この光分岐線路に対して第 2, 3 章で議論したインサービス試験条件を適用したブリルアン散乱光計測により、遠隔監視結果について報告する。第 6 章の総括では、以上の検討結果を要約するとともに、今後の展望を示す。

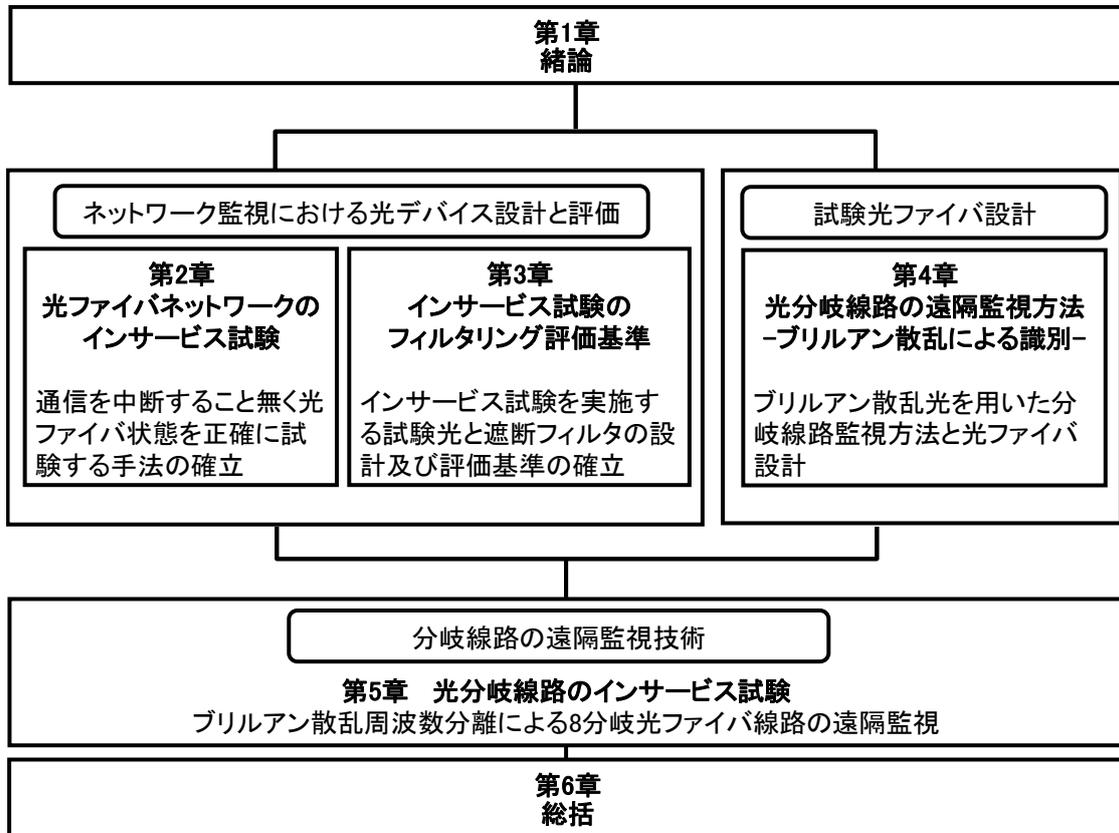


図1.10 論文の構成

文 献

- [1-1] 総務省, "情報通信統計データベース", Feb. 2009, [Online] Available: <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/tsuushin01.html>
- [1-2] 総務省, "ブロードバンドサービスの契約数等(平成21年6月末)", Jun. 2009 [Online]. Available: http://www.soumu.go.jp/main_content/000049043.pdf
- [1-3] O. Kawata, I. Sankawa, and K. Okada, "Access Network Evolution Scenario and Key Technological Concepts for the Broadband Network", GLOBECOM 97, IEEE, vol.3, 3-8, pp.1471-1475, Nov. 1997.
- [1-4] 張替, 柴田, 松雪, 千葉, "FTTHを推進する新光アクセスシステム(π システム)の開発・実用化", NTT技術ジャーナル vol. 9, no. 12, pp.89~94, 1997.
- [1-5] "新光アクセスシステム【通称: π (パイ)システム】を神戸に導入", NTT News Release, Mar. 1998 [Online]. Available: <http://www.ntt.co.jp/news/news98/9803/980317b.html>
- [1-6] H. Ueda, K. Okada, B. Ford, G. Mahony, S. Hornung, D. Faulkner, J. Abiven, S. Durel, R. Ballart and J. Erickson, "Deployment Status and Common Technical Specifications for a B-PON System", IEEE Comm. Mag., IEEE vol. 39, no. 12, pp. 134-141, 2001.
- [1-7] 堺, "ブロードバンド光アクセス「Bフレッツ」の概要", NTT技術ジャーナル 2003.1, pp.20-23, Jan. 2003.
- [1-8] "Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)", ITU-T Recommendation G 983.1, Oct. 1998.
- [1-9] "Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON)", ITU-T Recommendation G 984.1, Mar. 2003.
- [1-10] D. Faulkner, and Y. Maeda, "PON system standards developments in FSAN and ITU-T", Eur. Conf. Optical Communications (ECOC) 2003, Mo3.1.4, pp. 20-23, 2003.
- [1-11] "「Bフレッツ ハイパーファミリータイプ」の提供開始等について ", NTT News Release, Nov. 2004 [Online]. Available: <http://www.ntt-east.co.jp/release/0411/041129.html>
- [1-12] IEEE Standards 802.3ah, 2004.
- [1-13] K. Oe, K. Sugiyama, "GaInAsP-InP Double Heterostructure Lasers Prepared by a New LPE Apparatus", Japan J. Appl. Phys. vol.15 no. 5, 1977.
- [1-14] T. Yamamoto, K. Sakai, S. Akiba, "Fast pulse behavior of InGaAsP/InP double-heterostructure lasers emitting at 1.27 μ m", Electron. Lett. 3rd Mar. 1977 vol.13, no.5, pp.142-143, 1977.
- [1-15] Y. Itaya, Y. Suematsu, K. Iga, "Carrier Lifetime Measurement of GaInAsP/InP Double-Heterostructure Lasers", Japan J. Appl. Phys. vol.16, no.6, pp.1057-1058, 1977.
- [1-16] T. Miya, Y. Terumura, T. Hosaka and T. Miyashita, "Ultimately low-loss single-mode fiber at 1.55 μ m", Electron. Lett. , vol.15, no.4, pp. 106-108, 1979.
- [1-17] O. Mikami, "1.55 μ m GaInAsP/InP Distributed Feedback Lasers", Japan, J. Appl. Phys., vol. 20,

- no. 7, pp.L488-L490, 1981.
- [1-18] "Optical system design and engineering considerations", ITU-T Recommendation G. Sup. 39, Dec. 2008.
- [1-19] "Maintenance wavelength on fibres carrying signals", ITU-T Recommendation L.41, May 2000.
- [1-20] "A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation", ITU-T Recommendation G 983.3, Apr 2001.
- [1-21] "Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid", ITU-T Recommendation G 694.2, May 2002.
- [1-22] "Optical branching components (non-wavelength selective) ", ITU-T Recommendation L.37, Feb. 2007.
- [1-23] Y. Hibino, F. Hanawa, H. Nakagome, M. Ishii, and N. Takato, "High reliability optical splitters composed of silica-based planar lightwave circuits", *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 8, pp. 1728-1735, 1995.
- [1-24] 渡辺, 荒木, 東, "高信頼性を有する架空用光スプリッタモジュール", 2008年電子情報通信学会 総合大会, B-10-12, 2008年3月.
- [1-25] K. Arakawa, K. Yoshida, and H. Ikeya, "A method for identifying single-mode fibers in an operating fiber cable system," in *Proc. Int. Wire Cable Symp. (IWCS)*, pp.88 -93, 1989.
- [1-26] A. Natsume, K. Suzuki and Y. Kozawa, "Fiber identification technique for bending insensitive optical fiber", in *Proc. 56th Int. Wire & Cable Symp.(IWCS)*, 10-3, pp.359-362, 2007.
- [1-27] Y. Aoyagi, K. Shiraki, H. Yamamoto, and M. Nakamura, "Low insertion loss optical fiber identifier realized by using asymmetric bending," in *Proc. Int. Wire & Cable Symp.(IWCS)*, pp.484-488, 2003.
- [1-28] M. K. Barnoski and S. M. Jensen, "Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics", *Appl. Opt.* vol.15, no.9, pp. 2112-2115, Sep. 1976.
- [1-29] S. Personick, "Photon probe-An optical-fiber time-domain reflectometer", *Bell Syst. Tech J.* 56, pp. 355-366, 1979.
- [1-30] E. Brinkmeyer, "Backscattering in Single-mode Fibers", *Elect Lett.* vol. 16, no. 9, pp. 329-330, 1980.
- [1-31] M. Rouke "An overview of optical time-domain reflectometry", in *Proc. Amer. Ceramic Soc. Meet. Physics*, pp.252-272, 1980.
- [1-32] P. Healey, "Review of long wavelength single-mode optical fiber reflectometry techniques", *IEEE, J. Lightwave Technol.*, vol.3, no.4 pp.876-886, 1985.
- [1-33] P. F. A. Adams, D. A. Ferguson, J. Mellis, "Commissioning and maintenance of optical fibers in Access Networks", *Proc. 6th Intl. Workshop on Optical Access Networks*. Oct. 1994.
- [1-34] M. Tateda and T. Horiguchi, "Advances in Optical Time-Domain Reflectometry", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-7, No.8, pp. 1217-1224, 1989.

- [1-35] N. Tomita, H. Takasugi, N. Atobe, I. Nakamura, F. Takaesu, and S. Takashima, "Design and performance of a novel automatic fiber line testing system with OTDR for optical subscriber loops," *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 717–726, May 1994.
- [1-36] N. Nakao, H. Izumita, T. Inoue, Y. Enomoto, N. Araki, and N. Tomita, "Maintenance method using 1650-nmwavelength band for optical fiber cable networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 19, no. 10, pp. 1513–1520, Oct. 2001.
- [1-37] H. Izumita, "Recent development in fiber optic monitoring system for access networks", in *Proc Optical Fiber Sensor-16, We1-1*, 2003.
- [1-38] E. Cottino, D. Dellera, and S. De Paoli, "1625-nm monitoring system design for preventative maintenance of fiber optics plants", in *Proc Int. Wire & Cable Symp.(IWCS) 1993*, pp. 799-804, 1993.
- [1-39] P. Kjeldsen, M. Obro, J. Madsen, and S. Nielsen, "Bit-error-rate degradation due to on-line OTDR monitoring above 1.6 μm ", in *Proc. Optical Fiber Communication (OFS) on 97*, pp. 95 - 96, 1997.

第 2 章

光ファイバネットワークのインサービス試験

2.1 緒言

光ファイバネットワークの保守運用においては、光ファイバ伝送媒体の状態を監視するためにサービスを中断することなくモニタリングすることが求められることを第 1 章で述べた。光ファイバを監視するためには、光ファイバに対してアクティブに試験光を入射するが、このとき正常に通信している(インサービス)ユーザに対して影響を与えないようにするためのネットワーク設計が必要である。本章ではインサービス試験を実施するための光ファイバネットワーク構成とその構成要素となる光コンポーネント設計に必要な条件を明確化し、光コンポーネントの実現手段の提案及び評価方法について述べる。

2.2 インサービス試験の構成

光ファイバアクセスネットワークにおける伝送は伝送路を広帯域に用いること、また光源として用いる半導体レーザの電流-光出力特性に非線形領域が存在するためデジタル変調、その中でも多値変調よりも半導体レーザの駆動電流で発光と消光を制御する安価な直接変調方式が主流である。二値変調とはデジタル信号の"1"と"0"または値の変化を光"ON"と"OFF"に割り当てた方式であり、インサービス試験を行うには光ファイバ線路に入射した試験光が OLT または ONT で受信する通信信号の 0,1 情報に重畳してこれらの符号情報が誤検出されないことがないよう、通信システムの受光部における通信光と試験光において十分なクロストークが得られるよう設計する必要がある。

インサービス試験を実施するための光線路構成例を図 2.1 に示す。OLT と ONT は通信光波長 λ_s の信号を送受信している。この信号を伝送する光ファイバ線路には予め波長 λ_t の試験光を合分波する光試験モジュールを設置し、通信線路に対して常時アクセス可能なポートを設けることで通信線路を切断することなく試験可能とする。試験ポートから試験光 λ_t を入射すると、光試験モジュールで通信光と試験光が合波され、光ファイバ線路に入射する。試験光 λ_t は通信光 λ_s と異なる波長を用いる。光ファイバ線路の遠端である ONT の直前では試験光 λ_t をのみ減衰させる試験光遮断フィルタを設置し、通信光に比較して十分に試験光パワー小さくすることで、通信光の重畳するノイズを低減させることで符号誤りの発生を抑制する。

以下に試験光遮断フィルタ及び光試験モジュールに必要な光学特性設計について述べる。

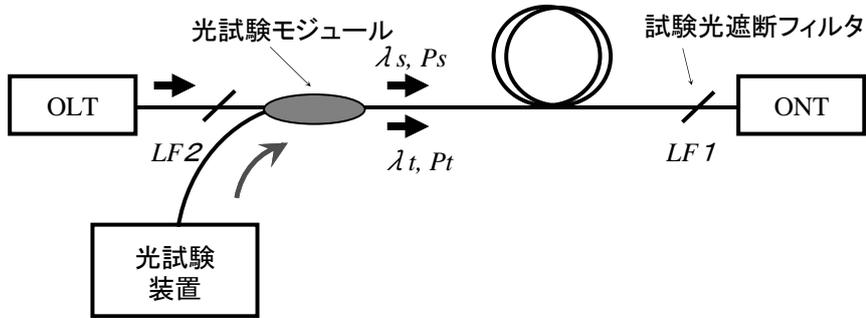


図2.1 インサーブス試験の光線路構成

表2.1 Maintenance wavelength assignment (ITU-T L.41)

	1310 nm-window	1550 nm-window	1625 nm-window	1650 nm-window
Case 1	Active	Unused or maintenance	Unused or maintenance	Unused or maintenance
Case 2	Unused or maintenance	Active	Unused or maintenance	Unused or maintenance
Case 3	Active	Active	Unused or maintenance	Unused or maintenance
Case 4	Active or unused	Active	Active	Unused or maintenance

2.3. 光学特性設計

光通信ネットワークに用いるコンポーネントに必要な設計は、透過・遮断波長条件及び波長に対する反射条件、損失条件である。以下に試験光遮断フィルタと光試験モジュールの設計の違いを比較し、設計条件について述べる。

2.3.1. 透過・遮断波長条件

a) 試験光遮断フィルタ

試験光波長 λ_t は ITU-T L.41 勧告[2-1]に基づき、通信信号に用いない空き波長帯を用いるよう設計する。表 2.1 に Maintenance wavelength assignment を示す。Case 1 のように通信光が 1310nm-window のみを利用している場合には、1550nm window, 1625 nm -window, 1650nm-window は利用されておらず、試験光波長として利用可能である。しかし、例えば 1550 nm window を試験波長として設計した後、通信光波長帯が Case 3 または Case 4 のように拡大すると、光ファイバネットワークコンポーネントの帯域設定を変更する必要が生じ、変更するためには多大な労力を要する。試験波長 λ_t として 1650nm window (U-band 帯: 1625-1675 nm)を用いれば、全ての通信システムにおいて光線路コンポーネントの波長特性を再設計することなく適用し、システムアップグレードにも対応可能である。

試験光遮断フィルタの波長条件は、試験光源波長の中心波長の設計マージンと駆動中の波長変動に対して十分な帯域が必要である。O～L-band 波長(1260 - 1625 nm)を透過し、U-band を遮断する試験光遮断フィルタの透過特性を図 2.2 a)に示す。U-band には試験光フィルタに生じる波長-損失特性の立ち上がりを Guard band として含む。図 2.2 b)に試験光光源と遮断フィルタの波長アロケーションを示す。試験光遮断フィルタ遮断帯域の帯域 $\lambda_{fd} - \lambda_{fu}$ は、試験光源の帯域 $\lambda_{td} - \lambda_{tu}$ に対して以下の関係を満たす必要がある。

$$\lambda_{fd} < \lambda_{td} < \lambda_t < \lambda_{tu} < \lambda_{fu} \quad (2-1)$$

試験波長 λ_t は、フォトディテクタの波長量子効率特性も考慮する必要がある。フォトディテクタでは波長が長い場合には光がディテクタの深部に到達し、中性領域内の奥でキャリアを発生させるため、再結合してしまい電流として取り出されない。通信で用いられる InGaAs 系のフォトディテクタでは受光感度特性が 1610nm 付近から急激に低下する[2-2]。試験ダイナミックレンジが低下することを考慮し、InGaAs 系フォトダイオードの感度が 3dB 劣化する 1650nm を試験光中心波長 λ_t とした。また、光源の中心波長の設計精度 $\pm 3\text{nm}$ および波長安定度 2 nm を考慮して試験波長を $1650 \pm 5\text{nm}$ とした。このとき Guard band は 20nm となる。

b) 光試験モジュール

光試験モジュールの波長条件も、試験光遮断フィルタと同様に1625nmまでの通信波長を透過し、U-band試験波長帯を狭帯域に遮断することが求められる。

2.3.2 損失条件

a) 試験光遮断フィルタ

インサービス試験が可能であるための伝送装置の受光部における試験信号遮断の条件は、試験光の符号間干渉による S/N 比 (Signal-to-Noise Ratio) の劣化が無視できることである。まず、伝送装置受光部における通信光パワー P_s と試験光パワー P_t は、それぞれ OLT、光試験装置からの出力パワー P_{s0} と P_{t0} に対して、以下のように表される。

$$P_s = P_{s0} \cdot L_s \quad (2-2),$$

$$L_s = L_{cs} \cdot L_{fs} \cdot L_{ds} \cdot L_{F1s} \cdot L_{rs} \cdot R_{ss}$$

$$P_t = P_{t0} \cdot L_t \quad (2-3),$$

$$L_t = L_{ct} \cdot L_{ft} \cdot L_{ts} \cdot L_{F1t} \cdot L_{rt} \cdot R_{st}$$

L_s と L_t は光線路で生じる通信光と試験光の減衰であり、光試験モジュールにおける損失(L_{cs} , L_{ct})、光ファイバケーブルにおける損失(L_{fs} , L_{ft})、光コンポーネントにおける損失(L_{ds} , L_{ts})、試験光遮断フィルタによる損失(L_{Fs} , L_{Ft})、伝送装置内に設置される光コンポーネントの損失(L_{rs} , L_{rt})、伝送装置における受信感度(R_{ss} , R_{st})に分類することができる。

ここで伝送装置において許容される通信光と試験光の最小パワー比(伝送装置耐力)を SX とすると、その設計条件は式(2-2), (2-3)より

$$SX < \frac{P_{s0} L_{cs} L_{fs} L_{ds} L_{Fs} L_{rs} R_{ss}}{P_{t0} L_{ct} L_{ft} L_{ts} L_{Ft} L_{rt} R_{st}} \quad (2-4).$$

となる。それぞれの項について、通信光波長と試験光波長に対する損失差について述べる。 L_{fs}/L_{ft} , L_{ds}/L_{dt} は、光アクセスネットワークの地下ケーブル、架空ケーブルにおいて <0.06dB, <0.05dB と非常に小さい[2-3]。また光ファイバ線路に適用される光コンポーネントの損失は波長に対して無依存な設計を行っており、例えば光スプリッタでは 1200 から 1700 nm の広い波長帯域において波長損失ばらつきが 1dB 以下の極めてフラットな特性が得られている[2-4]。よって L_{fs}/L_{ft} と L_{ds}/L_{dt} は 1 に近似でき、試験光を遮断する光フィルタに必要な遮断量 $LF = L_{Fs}/L_{Ft}$ は

$$LF > \frac{Pt0}{Ps0} \frac{Lct}{Lcs} \frac{Lrt}{Lrs} \frac{Rst}{Rss} SX \quad (2-5).$$

となる。Ps0, SX, Lrs/Lrt, Rss/Rst は各通信システムにおいて個別のパラメータを持つ、また Pt0, Lcs/Lctは試験システムのダイナミックレンジを考慮して決定されるパラメータである。

ONT直前に設置する試験光遮断フィルタの必要遮断量LF1について述べる。1心の光ファイバを上下信号の伝送で共用し、上りと下り信号を1心双方向で通信を行う場合、光伝送装置内では送信波長と受信波長をそれぞれLDとPDに接続する光カップラが配置される。特に上り下りで異なる波長を用いるWDM(Wavelength Division Multiplexing)伝送システムではポート間で波長透過特性が異なるWDMカップラが用いられる。一般的にはユーザ宅に設置するONTのコストを考慮し、上り波長を安価なファブリペロー光源が入手可能な1310nm帯とし、下り光源には長波長帯を用いるため、ONT内のWDMカップラPDポートでは長波長を透過するHigh pass filterとなるから、最も長いU-band波長帯を用いる試験光とOLTからの下り信号光の波長透過損失差はほぼ同等であり、ONT内ではLrs/Lrt は1となる。またInGaAs系PDの感度特性を考慮した伝送装置耐力をSX2とすると、ログスケール変換を行い(以下ログスケール変換したパラメータを太字で示す)、以下の式で表すことができる。

$$LF1 > SX2 - (Ps0 + Lcs) + (Pt0 + Lct) \text{ [dB]} \quad (2-6).$$

(2-6)式は試験光遮断フィルタの評価において、光試験モジュールで合波された後の通信光パワーと試験光パワーの比が伝送装置の耐力よりも上回るように設計すればよいことを示している。Lcs, Lctは、試験光モジュールの透過比であり設計OTDRに求められるダイナミックレンジによって設計されるが、一般的には通信と試験光を8:2で透過する波長無依存フィルタまたは、通信光と試験光を同程度の損失で合波するWDMフィルタが用いられており、0~7dB 程度の損失差である[2-5]。試験光入力パワーは光ファイバにおける非線形効果による制限を考慮して[2-6]、17dBm程度に設計される。LF1の適応値については実用化伝送システム個別にパラメータが異なり、またSXが規定されないこともあるが、例えばATM 10Gbps 伝送システムでは必要遮断量40dB以上[2-7]、上り1310nm、下り1550nm信号を用いるONT内WDMフィルタを備えた伝送システムでは必要遮断量20dB以上[2-8]が報告されている。

OLT直前に設置する光試験モジュールにおいても試験光の遮断は必要であるが、この遮断特性LF2の場合には、OLT伝送装置内のWDMフィルタ特性はONTと異なり Loss pass filter となるため、U-band長波長を用いる試験光に対しては損失が大きく、LF1よりも必要遮断量は軽減される傾向にある。

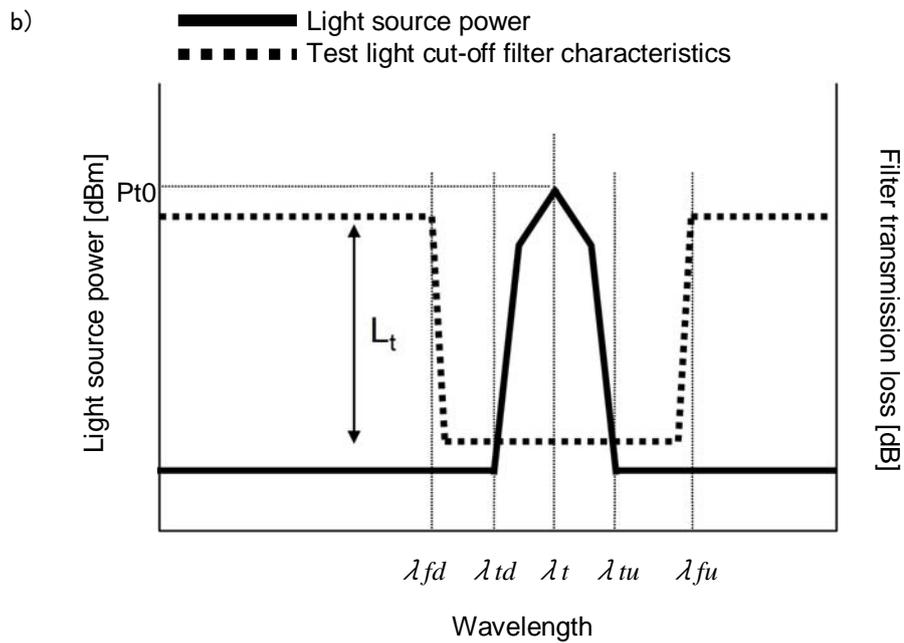
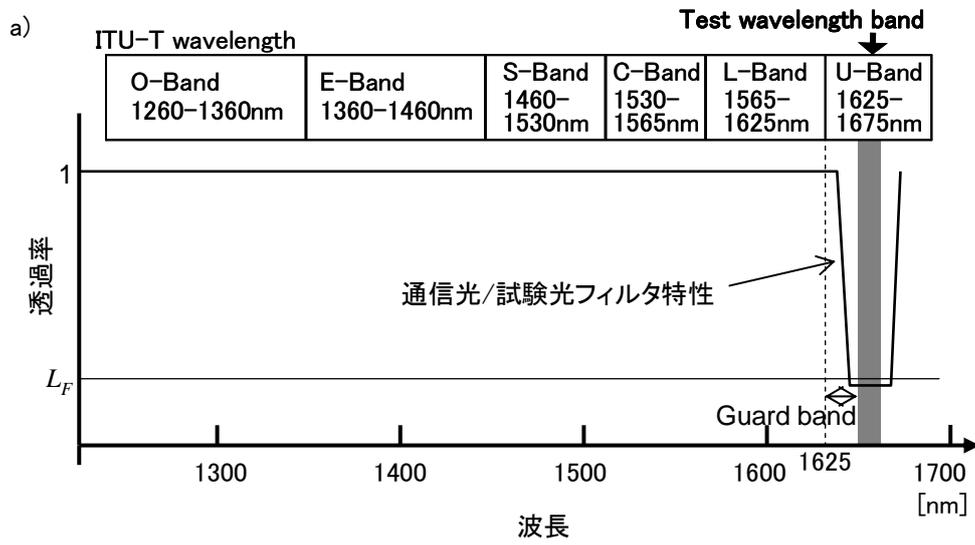


図 2.2 試験光源と試験光遮断フィルタの波長アロケーション

2.3.3 反射条件

a) 試験光遮断フィルタ

インサーブス試験において試験光を遮断するフィルタは伝送装置でのエラー発生を抑制する機能と同時に、故障原因の切り分け機能を有する。試験光遮断フィルタは通信システム受光部の直前、言い換えると保守・監視する光ファイバ線路の遠端部に位置する。ここで、試験光遮断フィルタにおいて試験光を減衰させると同時に高反射を発生させることで、光ファイバ線路の終端として識別することが可能となり、高反射の発生有無によって光ファイバ遠端までの線路が正常であるかの判断基準とできる。試験光遮断フィルタ以外に光ファイバ線路において生じる反射は、光コネクタまたは光ファイバの破断によって異なった屈折率の境界面に光が入射する際に生じるフレネル反射であり、光ファイバコアの屈折率 n_{core} と、空気の屈折率 n_{air} の垂直断面ではフレネル反射減衰量 RF は、

$$RF = -10 \log \frac{(n_{core} - n_{air})^2}{(n_{core} + n_{air})^2} \quad (2-5),$$

と表せる。光ファイバコアの屈折率を 1.46、空気の屈折率を 1 とすると光ファイバ線路において発生しうる反射減衰量は $R_F = 14.6$ dB となる。試験光遮断フィルタに設計する反射としては、これより小さい反射減衰量を設定すればよい。OTDR による反射の変動を 2.5dB とすると、反射量 $RF2$ の設計値は、

$$0 < RF2 < 12 \text{ [dB]}. \quad (2-7),$$

となる。

b) 光試験モジュール

光ファイバ線路モニタに用いられる OTDR 試験は非常に微弱なレイリー散乱光を観測するため、光ファイバ中で発生する試験光自身の反射ゴーストによる擾乱が引き起こす測定波形劣化を考慮する必要がある。この擾乱について図 2.3 を用いて説明する。OTDR を用いた光ファイバからの反射光として最も高いパワーを持つ光コンポーネントは、ONT 直前の試験光遮断フィルタであり、最大反射量 0 [dB] の反射を生じる。光ファイバ線路において高反射点が複数存在すると、図 2.3 a) のように試験装置側へ戻る光がさらに反射を受け、再度光線路遠端側へ向かう多重反射の発生を引き起こす。OTDR 測定は OTDR から送出した光パルスによって引き起こされる反射(後方散乱光)情報を計測しており、光ファイバ線路長 L とすると、計測信号を得るために $2L/v$ のサンプリング時間をとる。ただし v は光ファイバ中の高速である。また OTDR ではダイナミックレンジ改善の

為, 図 2.3 b)に示すように光パルスを次々と送出して測定を繰り返し, 平均化処理を行っている. このとき, 光ファイバ線路に高反射が存在し, 光ファイバ線路中で幾度も反射を繰り返すゴースト信号が残存すると, 図 2.3 c)に示すように n 回目のパルス送出に対する反射光計測時に, $n-1$ 回目以前のゴースト信号が重畳する. このときの光パルスの送出間隔を tp , 試験光遮断フィルタにおける光ファイバ遠端からのゴースト反射は反射回数を n ($2 \leq n$) とすると, 試験光遮断フィルタ反射に対して,

$$n \cdot (tp - \frac{2l}{V}) \quad (2-8),$$

の位置にあたかも線路上に接続点が存在するようにピークを生じさせる. このようなゴースト反射は光線路に存在するコネクタ接続点の識別精度を劣化させる. 以上より, 光試験モジュールでは波長および損失条件については, 試験光遮断モジュールと同等の設計でよいが, 試験波長ゴースト反射を抑止するためには, 試験光反射条件については大きく減衰させる設計を適用する必要がある.

多重反射を抑止する反射減衰量設計について述べる. OTDR で計測する微弱なレイリー散乱信号パワーを P_{rs} , ゴースト反射パワーを R_g , OTDR 計測に影響しないための散乱光とゴースト信号のパワーレベル差を R_d とすると,

$$P_{rs} > R_g + R_d \quad [\text{dB}] \quad (2-9),$$

レイリー散乱光パワーはレイリー散乱光反射率 R_{rs} とすると入力パルス試験光パワー P_t に対して

$$P_{rs} = P_t - R_{rs} \quad [\text{dB}] \quad (2-10),$$

また n 回反射で生じたゴースト信号パワー(ただし n は 2 以上)は, 光ファイバネットワーク損失 L_{ft} , 光試験モジュールにおける反射減衰量 $RF1$, 試験光遮断フィルタにおける反射減衰量 $RF2$ とすると下記で表される.

$$R_g = P_t - n(L_{ft} - RF2) - (n-1)(L_{ft} - RF1) \quad [\text{dB}] \quad (2-11)$$

第一項は光ファイバ遠端側へ向かうときに受ける損失, 第二項は OLT 側へ戻るときに受ける損失である. 以上より $RF1$ は,

$$RF1 > \frac{R_{rs} + (1 - 2n) L_{ft} - nRF2 + Rd}{n - 1} \quad (2-12)$$

となる.

(2-12)式を用いて OTDR で計測するレイリー散乱光パワーに対する, 光試験モジュールの反射

減衰量をシミュレーションした。ここで各パラメータについて検討する。ゴースト信号の抑制条件としては、散乱光にゴースト信号が重畳した場合のパワー変動差が、OTDR の測定精度である 0.2dB 以下とすると、散乱光とゴースト信号のパワーレベル差は $Rd = 5\text{dB}$ 以上となる。またレイリー散乱光の反射率 R_{rs} は式(1-1)を適用した。

計算結果を図 2.4 に示す。 R_{rs} は OTDR 試験光パルス幅に大きく依存する。光ファイバを計測する際、パルス幅は試験パラメータとして被測定ファイバ毎に条件設定を行う。このときパルス幅を小さく設定するほど空間分解能が高くなるが、入力する光エネルギーが減少することでレイリー散乱光パワーも比例して減少するので、光試験モジュールで発生する反射も大きく抑制する必要がある。ここでは OTDR 試験に用いられる最小パルス幅として、半導体レーザによる直接パルス変調を想定し 10ns におけるゴーストノイズの解消をターゲットとする。

式(2-12)において、試験光フィルタ反射減衰量 $RF2$ 、と線路損失 Lft はゴースト反射を減衰させ、 $RF1$ 条件を緩和する要素となる。試験光遮断フィルタにおいて全反射が生じる場合、光ファイバ線路が短く損失が最小となる場合を考慮してそれぞれ 0~1dB 程度としたときの影響を示した。

さらに、OTDR では、光パルスを連続して送出し散乱光を積算しているが、光パルスの送出間隔を広げることで、ゴーストノイズの反射回数 n が増加して伝送による減衰を受けるため、反射量条件が緩和される。一方で、パルス送出間隔の拡大は OTDR 測定時間の長延化を招く。パルス送出間隔は $n = 2$ つまり、光パルスが線路を 1 往復した直後に次の試験光パルスを送出する場合、光ファイバ線路長が 10km では約 0.1 ms である。また光ファイバ線路中に存在する光コネクタ接続における反射量は 40dB 程度であり、これより非常に低い反射設計は意味を持たない。よって、 $n = 3$ を最適設計とし、 $RF1$ の設計目標を 反射量 37dB 以上とした。

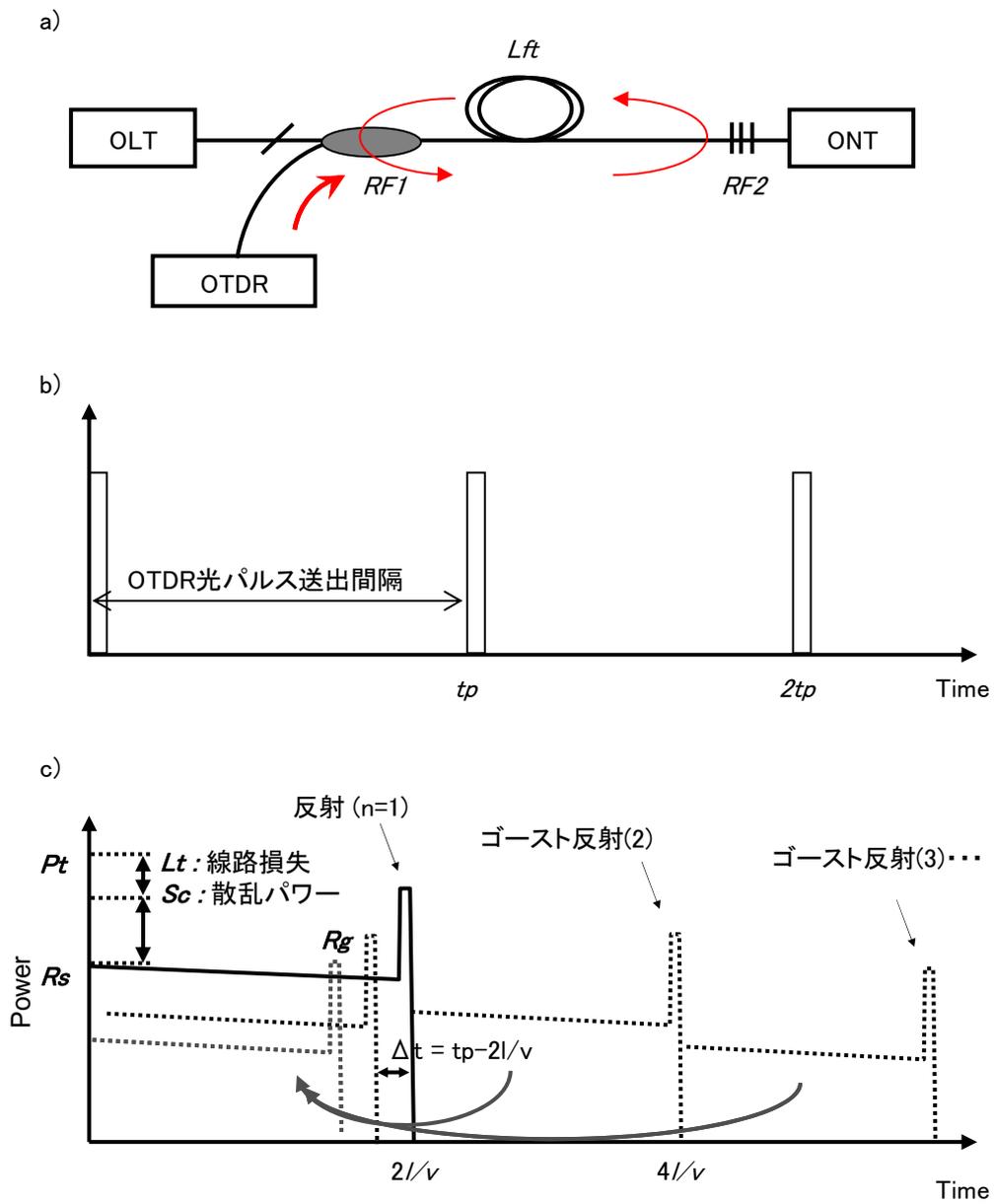


図2.3 OTDR波形に重畳するゴースト反射

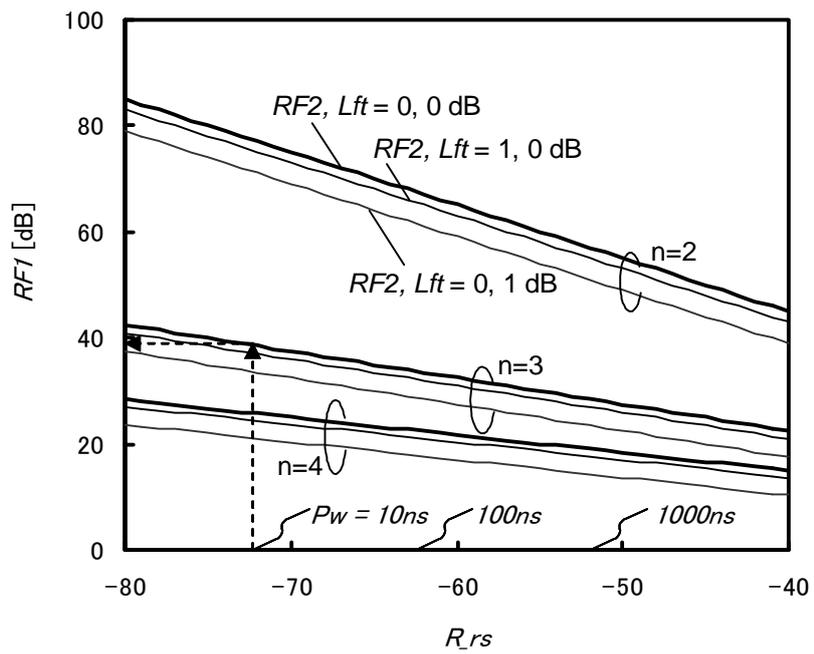


図2.4 レイリー散乱光係数に対する光試験モジュールの必要反射減衰量 $RF1$

2.4. 光コンポーネントの設計

2.4.1 FBG技術を用いた広帯域試験光遮断フィルタ

前節で述べたようにONTの直前に設置する試験光遮断フィルタには, 1260-1625nmの広い透過帯域で通信光を透過し, 非常に狭い1650±5nm帯の遮断帯域で試験光を減衰させるとともに, 故障を切り分ける為に高い試験光反射特性を持つことが必要であり, なおかつ低廉な製造コストで実現できる光フィルタ技術が必要である.

光フィルタとしては誘電体多層膜型を用いた Low pass filter を光ファイバコネクタフェルールに埋め込むことにより実現したものがある. 誘電体多層膜フィルタとは屈折率の異なる層をガラス基板の上に光学薄膜を積層し, 積層界面で生じる反射が干渉することを利用したものである. 光ファイバに対して2~3°の挿入角度を持たせることにより, 50dBの遮断量とともに10dB以下の反射減衰量を実現できる[2-9], [2-10]. しかし誘電体多層膜による光フィルタは膜内での回折により, 透過帯域から遮断帯域までの立ち上がりに約30nmの帯域を要する. 図2.5に従来の通信波長1550nmを透過し, 1650nmを遮断する誘電体多層膜型フィルタの波長-損失特性を示す. 誘電体多層膜フィルタの遮断帯域は1650±5nmの遮断帯域を設計するとき, 1600nmから立ち上がりを持つため~1625nm波長のL-band通信システムに用いることはできない. 誘電体多層膜をグリーンレンズと組み合わせてフィルタを透過するビームスポット径を拡大することによって遮断特性をシャープにすることは可能であるが, 光アクセスネットワークにおけるコンポーネントとしては非常に高価である.

ファイバブラッググレーティング(FBG: Fiber Bragg Grating)はGe添加コア光ファイバに紫外線を照射すると, コア部の屈折率が上昇することを利用し, 光ファイバ長手方向に周期的な屈折率変化を形成することで回折格子を形成して, 特定波長の光に反射または損失を与えるファイバ型デバイスであり[2-11]-[2-16], 光ファイバに直接フィルタを形成できることから製造が容易なデバイスである. FBGの製造方法の一例を図2.6に示す. 紫外線光源を回折グレーティングにより, 干渉させ光ファイバの側面から照射することで紫外光干渉パターンを形成させる. FBGのブラッグ反射波長 λ_{FBG} は,

$$\lambda_{FBG} = 2n_{eff}Pi \quad (2-13)$$

で表される. ただし n_{eff} は光ファイバの実効屈折率, Pi はグレーティングピッチである. 光ファイバコアの屈折率が正弦波状に変化しているとすると反射スペクトルの帯域幅 $\Delta\lambda_{FBG}$ は

$$\Delta\lambda_{FBG} = \frac{\lambda_{FBG}}{\pi L} \sqrt{\pi^2 + \left(\frac{\pi\Delta n L g}{\lambda_{FBG}}\right)^2} \quad (2-14)$$

Lg : グレーティング長

Δn : 屈折率の変化幅

と表される。またグレーティングの反射率 R_{FBG} は

$$R_{FBG} = \tanh^2\left(\frac{\pi\Delta n L}{\lambda_{FBG}}\right)^2 \quad (2-15)$$

で表される。式(2-14)から求められるように反射率 R_{FBG} はグレーティング長 Lg および屈折率変化幅 Δn に依存する。通常のシングルモードファイバへの紫外光照射では、屈折率変化量 Δn は 10^{-5} 程度であるが、光ファイバを高圧水素雰囲気中に曝すことで 10^{-3} を超える屈折率変化を得ることができる[2-17]。ここで反射減衰量12dB以下のグレーティングは Lg を10mm程度とすれば容易に作成可能である。FBGフィルタを透過するときの試験光パワーの減衰は全て光ファイバ内に反射させるものとする、反射量 R_{FBG} と透過損失 L_{FBG} は、

$$10 \log (R_{FBG}) = 10 \log (1-L_{FBG}) \quad (2-16)$$

で表されるから20dB, 40dBの場合反射率はそれぞれ, -0.04, -0.0004 dBが得られる。さらにチャープドFBG技術を用いて連続的に λ_B を変化させると、広い反射・遮断波長帯域が確保できる。

短周期グレーティングのBragg波長には $0.01\sim 0.015\text{nm}/^\circ\text{C}$ の温度依存性があるが、グレーティング周期に負の温度依存性を与える実装手法によって温度無依存化できる。光線路におけるコンポーネントへの実装として容易な手段としては、FBGを光ファイバコネクタ内に実装する。チャープを付与した1cmのグレーティングを光コネクタフェルール内に配置することで、遮断中心波長の温度依存性を $\pm 0.5\text{nm}$ 以下とした温度変化に耐性のあるフィルタが得られる[2-18]-[2-20]。図2.7に試作した試験光遮断用FBGの外観と光学特性例を示す。中心波長 $\lambda_{FBG}=1650\text{nm}$ 、反射帯域は10nm、反射帯域外では反射率は-30dB以下に抑制されている。また表2.2, 2.3に試作したFBGフィルタの試験光遮断量20dB及び40dBを目標とした試験光遮断フィルタの光学特性を示す。それぞれ目標とした透過損失ならびに、2.3.3章で示した反射減衰量条件 $0 < \text{RF1} < 12\text{dB}$ が得られた。式(2-16)で求めたようにファイバブラックグレーティングは最大反射量としてほぼ0dBをとる

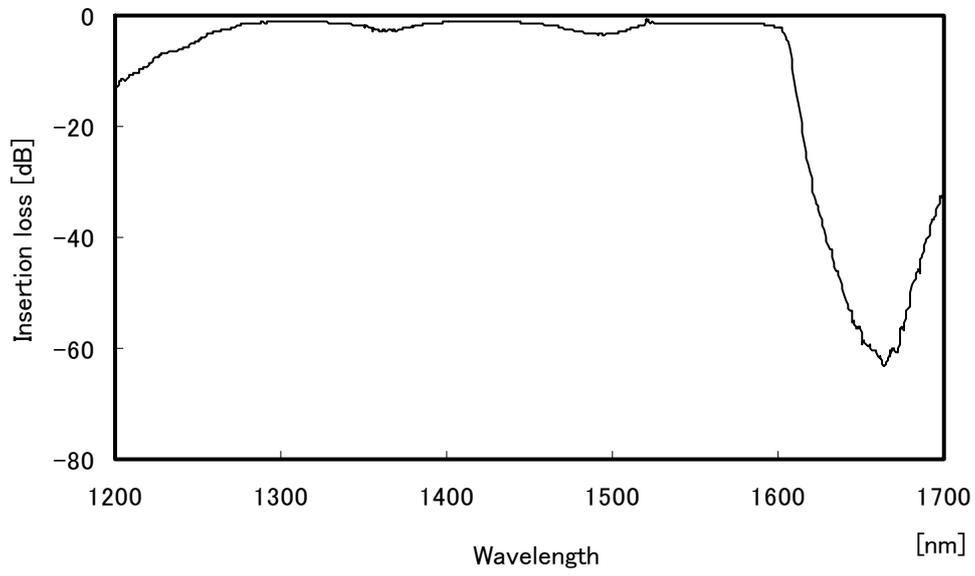


図2.5 誘電体多層膜フィルタ特性

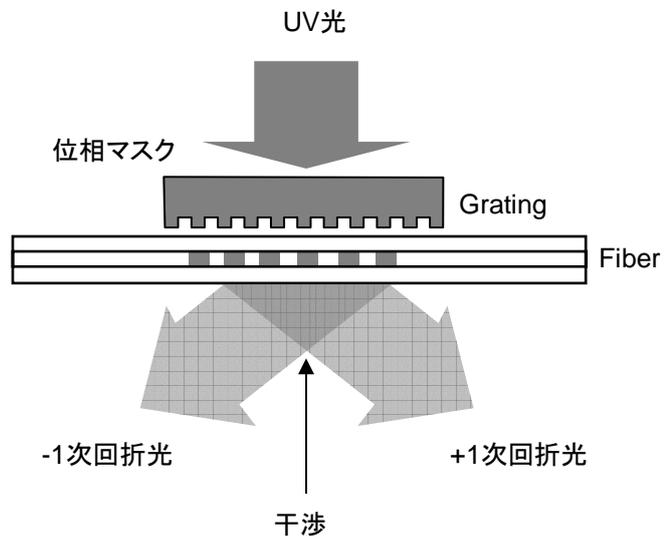
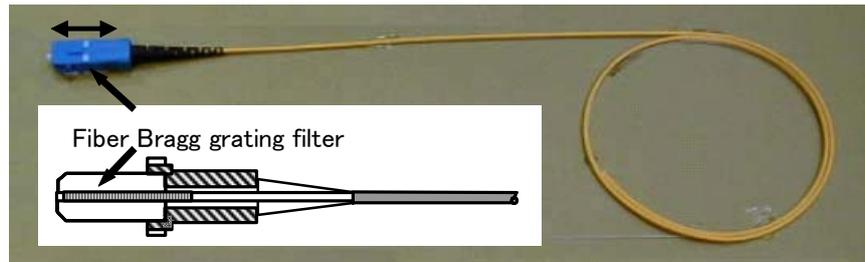


図2.6 位相マスク法によるFBG作製

a) Fiber Bragg grating (FBG) filter embedded termination cord



b) Insertion loss spectrum of FBG filter

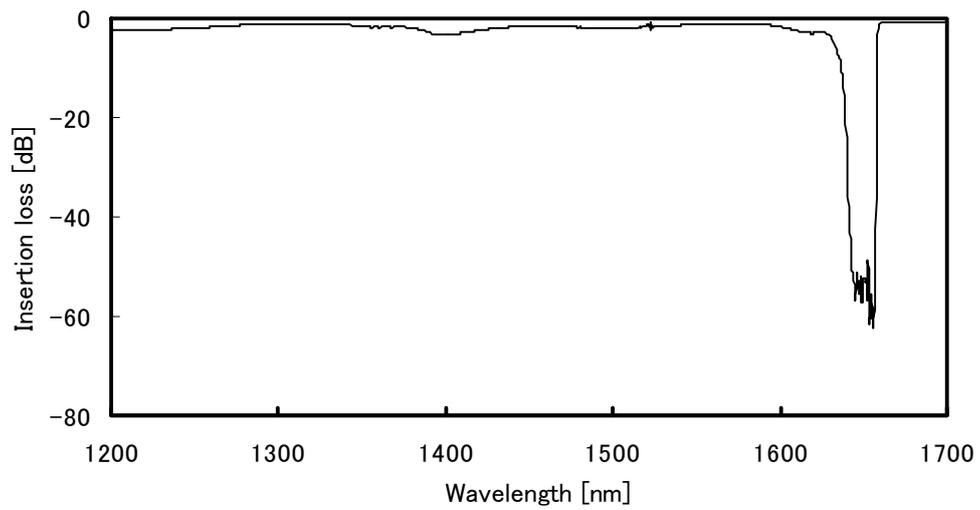


図 2.7 FBGフィルタを用いたターミネーションコード外観と光学特性

表2.2 FBGフィルタを用いた試験光遮断フィルタ(LF=40dB)の光学特性 n=10

波長帯域	透過損失[dB] (試験波長は遮断量)		反射減衰量[dB]	
	通信波長帯	最大	1.08	最大
最小		0.80	最小	35.50
平均		0.44	平均	36.71
試験波長帯	最大	47.30	最大	1.15
	最小	43.50	最小	0.53
	平均	44.89	平均	0.87

表2.3 FBGフィルタを用いた試験光遮断フィルタ(LF=20dB)の光学特性 n=30

波長帯域	透過損失[dB] (試験波長は遮断量)		反射減衰量[dB]	
	通信波長帯	最大	1.53	最大
最小		0.41	最小	35.00
平均		0.81	平均	36.41
試験波長帯	最大	28.81	最大	10.21
	最小	21.56	最小	0.25
	平均	23.91	平均	3.12

2.4.2 FBG とサーキュレータを用いた広帯域光試験モジュール

OLT側に設置する光試験モジュールには、1260-1625nmの広い透過帯域で通信光を透過し、非常に狭い1650±5nm帯の遮断帯域で試験光を減衰させるとともに、光ファイバ線路内で発生する反射ゴーストを低減させる光学特性が必要である。この設計条件を満たす光試験モジュールの実現手段について検討した。急峻かつ遮断量の大きい光学フィルタとしては、FBGフィルタが好適であるが、高い反射を伴う。そこでFBGによる反射を光ファイバ線路に戻すことなく、かつOTDR試験が可能な手法として、4ポートサーキュレータとFBGを用いた光試験モジュールを検討した。

図 2.8 に FBG を利用した狭帯域遮断、かつ高反射減衰量を実現する光試験モジュールの構成を示す。E および F に示した 2 つの FBG の光学特性は等しく 1625nm までの通信光を透過し、1650nm の試験光を反射する試験光遮断フィルタと同等の設計を適用する。光試験モジュールのポート A-B は通信光が透過するポートであり、C は OTDR 試験光用のポートである。OLT で発光した通信光は A ポートから入り FBG filter 1 (E)を透過して B ポートへ抜け、光線路 SMF を通って ONT へ至る。ONT から OLT へと送信される上り信号は、サーキュレータの特性によって下りとは異なる経路を通る。すなわち、ONT から発光した通信光は、B ポートから F へと進み FBG filter 2 を透過してさらにサーキュレータによって A ポートへ至り、OLT で受信される。また、OTDR 試験光は C ポートから入射し、FBG filter 1 で反射されて B ポートへ導かれ光線路 SMF へ入射する。OTDR で観測する試験光の後方散乱光(または線路から戻る反射光)は、サーキュレータの作用により B ポートから F へ導かれ、そのうち FBG filter 2 により反射されて、C ポートへ戻る。サーキュレータの作用により、FBG での反射光は C ポートへ導かれ、光ファイバ線路へ戻ることはないため、多重を抑制することができる。

この光試験モジュールを用いたときの多重反射抑制条件は、4ポートサーキュレータの B ポート→FBG filter1 における試験光のアイソレーション I_{BE} が十分大きければよい。1650nm における反射量 -0.4 dB、-0.3 dB である FBG filter 1、FBG filter2 及び挿入損失 1dB 以下、アイソレーション 50 dB 以上を持つ 4 ポートサーキュレータにより光試験モジュールを構成し、透過及び損失スペクトルを測定した結果を図 2.9 に示す。FBG のクラッドモード結合の影響により、1600nm から損失が徐々に増加しているが、1625nm での透過損失は 4.8dB に抑制され、且つ 10nm 程度立ち上がり特性を示し、1650nm 帯での遮断量は非常に大きい 52.7 dB の特性を得られた。また反射量は 1650±5nm において 38.0dB であり、反射減衰量として設定した目標値 37dB を満たす光試験モジュールを得ることができた。

2.5 広帯域光試験モジュールによるインサービス試験

OTDR の多重反射の影響と、提案したインサービス試験構成とを比較するために、まず図 2.3 のように単純に FBG を光試験モジュールに適用した場合の OTDR 波形を測定した。光試験モジュールとして光分岐結合率=8:2 の波長無依存特性を持つ光カプラを用い、また OLT と光カプラの間に FBG を接続した。1650nm における光カプラの OTDR 接続ポートから光ファイバ線路までの挿入損失は 7.84dB、OLT 側から光ファイバ線路までの挿入損失は 1.95 dB、光ファイバ線路の試験光遮断フィルタに用いた FBG の試験光 1650nm における反射量は-0.4 dB であった。また OLT 側に配した FBG の反射量は-0.3 dB であった。光試験モジュールと試験光遮断フィルタの間に設置した光ファイバは 2 km のシングルモードファイバボビン二つを融着により接続したのを用い この線路の透過損失は 1.4 dB であった。また、OTDR の各測定パラメータは、試験光波長 1650nm、光パルスピークパワー17dBm、パルス幅 1 μ s、距離レンジ 5km、光パルスの送出間隔 100 μ s とした。この光線路を OTDR で測定した波形を図 2.10 a)に示す。0km には試験光入力ポートである光試験モジュールでのコネクタ接続で生じるフレネル反射部での反射ピークが現れている。また、4.02km には接続した光ファイバ線路遠端に配置した試験光遮断フィルタで生じる反射が現れている。さらに、OTDR 波形の 3.33km 3.67km 付近にそれぞれゴースト信号が現れている。

次に光カプラと FBG フィルタを組み合わせた光試験モジュールから、4 ポートサーキュレータと FBG を組み合わせた広帯域光試験モジュールへ交換し、同条件で OTDR 試験を行い波形の取得を行った。この測定結果を図 2. 10 b) に示す。広帯域光試験モジュールに設計した 38dB の反射減衰率によって光ファイバ線路内に生じる多重反射が減衰され、ゴーストによる反射が解消された。以上により、ゴースト反射劣化の無い高精度な OTDR 計測が実行できることを確認できた。

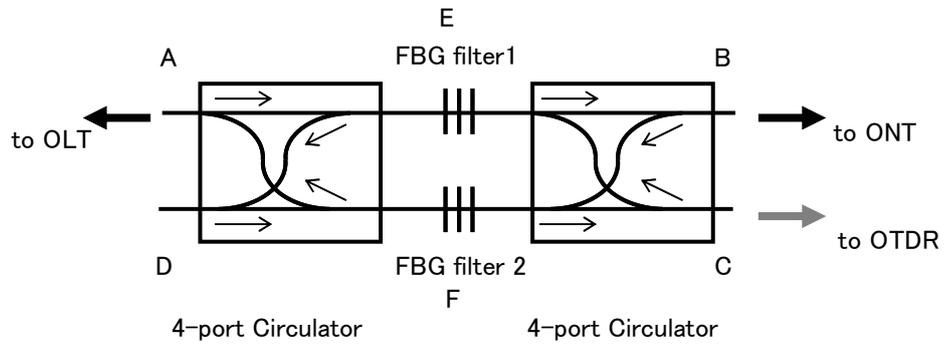


図2.8 広帯域光試験モジュールの構成

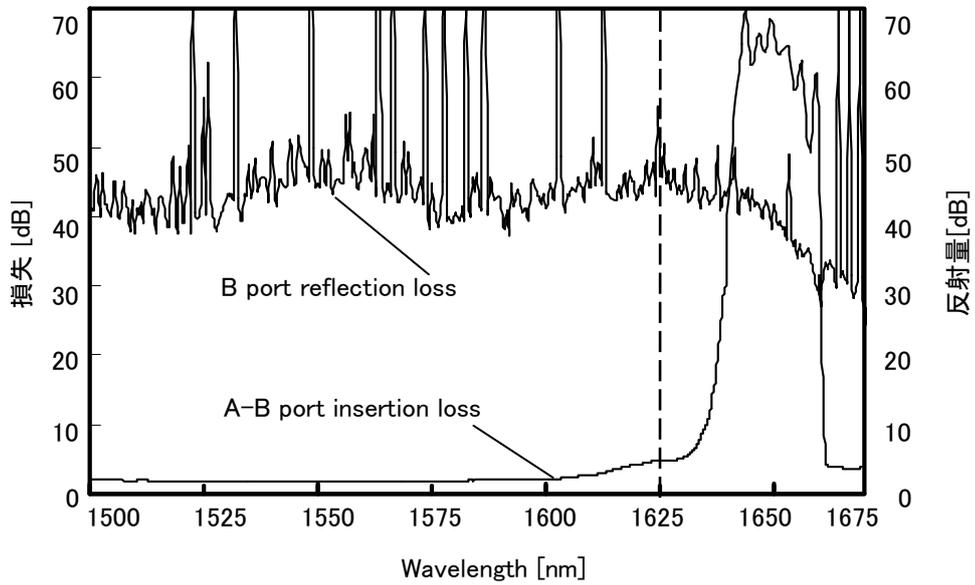


図2.9 広帯域光試験モジュールの反射減衰量

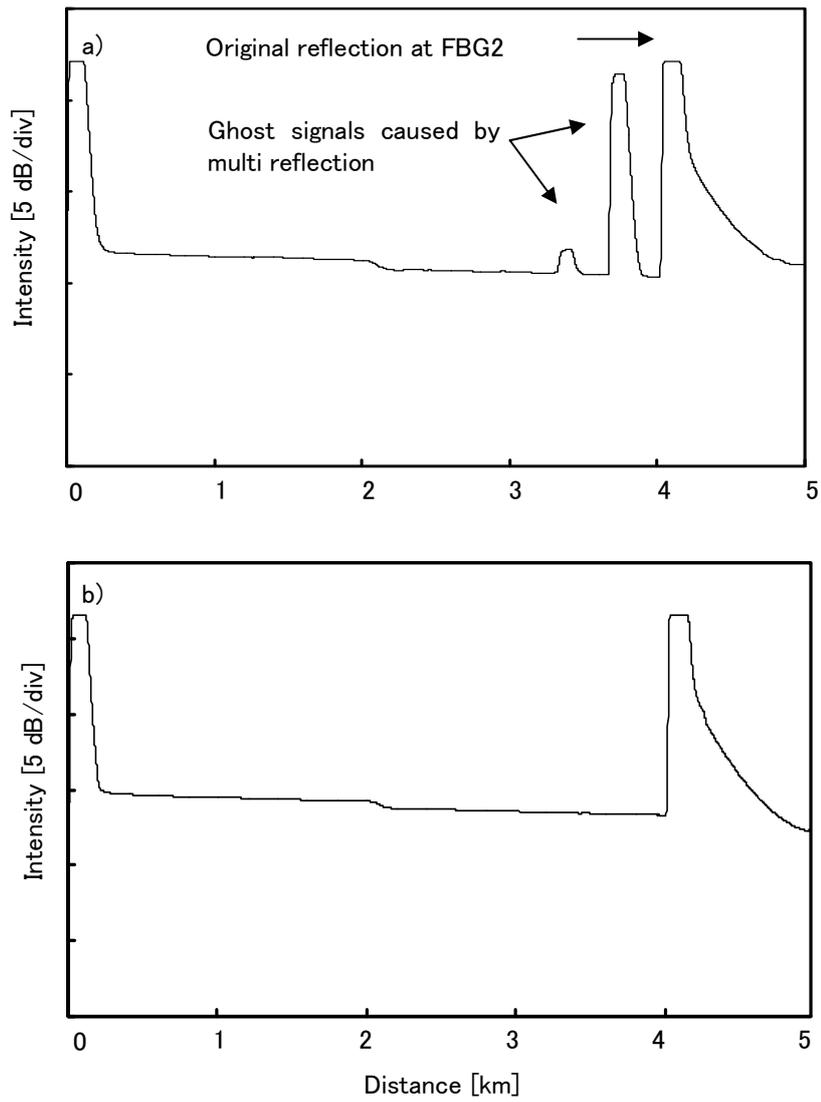


図2.10 a) 光ファイバ線路両端にFBGフィルタを適用したOTDR波形
及び b) 広帯域光試験モジュールを用いたOTDR波形

2.6 結論

第 2 章では、インサービス試験を実現する光ファイバ線路の構成として、予め試験光を光ファイバ網に合分波する光試験モジュールと、ユーザ側伝送装置(ONT)の受光ポート直前に試験光を遮断するフィルタを設置する構成を挙げ、ONT 受光部における通信光と試験光のクロストークと、通信光受光部の信号雑音比特性をパラメータとしたインサービス試験必要条件の定式化を行った。

またインサービス試験条件式に基づき、光ファイバ線路の構成要素である、光試験モジュールと試験光遮断フィルタの設計として、損失、反射光学特性を決定した。試験光遮断フィルタでは 1) 通信光広帯域化への対応による狭帯域設計、2) 光ファイバに直接書き込むシンプルな構成による低コスト化が可能であること、3) 高反射特性を持つことから FBG (Fiber Bragg Grating) フィルタが最適であるとした。一方、光ファイバ線路の OTDR 試験では FBG フィルタと光試験モジュールとの間で生じる多重反射を抑制する設計を行った。OTDR の試験条件として、波長 1650 nm、パルス幅 10ns、光パルスの送出間隔としては、測定距離レンジの倍程度を想定し、光試験モジュールの反射減衰量は 37dB 以上が必要であるという設計を示した。

さらに以上の設計で明らかになった必要光学特性と、1260-1625nm を透過し、1650nm 帯試験光を遮断し、低反射量を実現する L/U-band 光試験モジュールとして、4 ポートサーキュレータと FBG による構成を提案し、遮断帯域 10nm、試験光遮断量 50dB 以上、反射減衰量 38dB をもつモジュールを用いて、光ファイバ線路に対するインサービス試験を実行し、ゴースト反射劣化の無い高精度な OTDR 計測が可能であることを確認した。これにより、インサービス試験を実施するための光ファイバネットワーク構成とその構成要素となる光コンポーネント設計に必要な条件を明確化し、光コンポーネントの実現手段を確立した。

文 献

- [2-1] “Maintenance wavelength on fibres carrying signals”, ITU-T Recommendation L.41, May 2000.
- [2-2] H. Takasugi, N. Tomita, J. Nakano, and N. Atobe, "design of a 1.65- μ m-band optical time-domain reflectmeter", J. Lightwave Technol, vol.11, no.11, pp 1743-1748, Nov. 1993.
- [2-3] K. Hogari, S. Tetsutani, J. Zhou, F. Yamamoto and K. Sato, "Optical-transmission characteristics of optical-fiber cables and installed optical-fiber cable networks for WDM systems," J. Lightwave Technol., vol. 21, no. 2, pp. 540-545, Feb. 2003..
- [2-4] 井上, 石井, 肥田, 柳澤, 榎本, "FTTHを支える光アクセス用PLC技術", NTT技術ジャーナル 2005.5, pp16-19, May, 2005.
- [2-5] N. Tomita, H. Takasugi, N. Atobe, I. Nakamura, F. Takaesu, and S. Takashima, “Design and performance of a novel automatic fiber line testing system with OTDR for optical subscriber loops,” J. Lightwave Technol., vol. 12, no. 5, pp. 717–726, May 1994.
- [2-6] H. Izumita, Y. Koyamada, S. Furukawa, and I. Sankawa, "The Performance Limit of Coherent OTDR Enhanced with Optical Fiber Amplifiers due to Optical Nonlinear Phenomena", J. Lightwave Technol., vol. 12, no. 7, Jul. 1994.
- [2-7] N. Araki, N. Honda, H. Izumita and M. Nakamura, “Extended optical fiber line testing system using new eight-channel L/U-band crossed optical waveguide coupler for L-band WDM transmission”, J. Lightwave Technol. vol. 21, no. 12, pp 3316-3322, Dec. 2003.
- [2-8] N. Nakao, H. Izumita, T. Inoue, Y. Enomoto, N. Araki, and N. Tomita, "Maintenance Method Using 1650-nm Wavelength Band for Optical Fiber Cable Networks", J. Lightwave Technol, vol.19, no.10, pp 1513-1520, Oct. 2001.
- [2-9] T. Oguchi, J. Noda, H. Hanafusa, and S. Nishi, “Dielectric multilayered interference filters deposited on polyimide films,” Electron. Lett., vol. 27, no. 9, pp. 706–707, Apr. 1991.
- [2-10] 富田, "光フィルタ形故障切分け装置の設計と特性", 1990年電子情報通信学会 全国大会, B-691, 1990年3月.
- [2-11] K. Hill, Y. Fujii, F. Johnson and B. Kawasaki, "Photosensitivity in optical waveguides: Application to reflection filter fabrication", Appl. Phys. Lett. 32, pp. 647-649, 1978.
- [2-12] G. Meltz, W. More, and W. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method", Opt. Lett. vol. 14, no. 15, pp. 823-825, 1989.
- [2-13] K. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. Johnson and J. Alber, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask", Appl. Phys. Lett. vol. 62, no. 10, pp. 1035-1037, 1993.
- [2-14] P. J. Lemaire, R.M. Atkins, V. Mizrahi and W. Reed, "High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical

- fibres", *Electron. Lett.* vol. 29 no.13, pp.1191-1193, 1993.
- [2-15] K. Hogari, Y. Miyajima, S.Furukawa, N. Tomita, K.Tomiyama, and M. Ohashi, "Wideband and highly reflective step-chirped fibre grating filter embedded in an optical fibre connector", *Electron. Lett.* vol. 32, no. 13, pp.1230-1231, 1996.
- [2-16] 荒木, 村上, "広帯域ファイバグレーティングフィルタの熱劣化特性の確認", 2000年電子情報通信学会 総合大会, B-10-33, 2000年3月.
- [2-17] 奥出, 和田, "ファイバグレーティング技術とその動向", 電子情報通信学会論文誌 C, vol.J83-C, no. 12, pp.1060-1068, 2000年12月.
- [2-18] 富山, 古川, 保莉, 富田, "1.65 μ m試験光遮断グレーティングターミネーションの検討", 1997年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-45, 1997年9月.
- [2-19] 本田, 荒木, 荒木, 泉田, 中村, "光線路試験システムに用いる1.65 μ m帯遮断用ターミネーションコードの検討", 2001年電子情報通信学会 通信ソサイエティ大会, B-10-24, 2001, 9月.
- [2-20] 本田, 荒木, 泉田, 中村, "光線路試験システムにおけるFBG型1650nm帯ターミネーションコードの検討", 2002年電子情報通信学会 通信ソサイエティ大会, B-10-20, 2002年9月

第3章

インサービス試験のフィルタリング評価基準

3.1 緒言

通信に影響を与えることなく光ファイバ線路の状態をモニタする"インサービス試験"を実施するためには、光ファイバ線路に入力した試験光パワーを伝送装置の受光部において十分低くなるように遮断する試験光遮断フィルタを設置する[3-1]-[3-3]。しかし、フィルタの帯域は通信光波長帯域により制限され[3-4]、またレーザ光源が放出する光には、通常発光波長として扱う中心スペクトルの他に、発光ピーク波長を中心としてその近傍の広い帯域に分布するASE(Amplified Spontaneous Emission)光を有してしており[3-5]、センシティブな受光部を持つ伝送システムに対する試験光遮断フィルタ、すなわち、高遮断特性の適用においては、試験光源のASE光の影響も含めた設計が必要となる。本章では試験光遮断量に対して必要となる、試験光光源のスペクトラムと試験光遮断フィルタの遮断帯域について述べ、インサービス試験におけるフィルタリングのクライテリアについて論じる。

3.2 実効遮断量の定義

光学フィルタによる試験光の遮断量は、試験光光源の波長スペクトルと試験光遮断フィルタの遮断帯域そして各波長における透過損失によって決定する。試験光遮断フィルタに用いられる光学フィルタは誘電体多層膜型[3-6],[3-7] 及び Fiber Bragg Grating (FBG) 型[3-8]-[3-10]が報告されているが、ここではO~L-bandの波長を用いた通信システムを考慮し、第2章にて設計したFBG技術を用いた試験光遮断フィルタを適用することを前提とする。

試験光遮断フィルタの実効遮断量の定義について述べる。図 3.1 にサイドバンドノイズを持つ試験光と狭帯域試験光遮断フィルタの簡単なスペクトルモデルを用いて示した。図 3.1 a) は λ_t を中心波長として P_{λ_t} の発振ピークパワー持ち、また中心波長に対してサイドバンドノイズ帯域 D においてサイドバンドノイズ抑制比(SBSR: Side Band Noise Suppression Ratio) s のASE光を持つ試験光波長特性である。

図 3.1 b) は遮断帯域 d 、遮断量 I_{FBG} の試験光遮断フィルタが持つ透過スペクトラムである。FBGフィルタの帯域 d が D よりも十分大きい場合、つまり $D \leq d$ 、であれば試験光の実効的な遮断量はFBGフィルタの遮断量 I_{FBG} に当然等しい。しかし、試験光源のスペクトル帯域幅 d は FBG フィルタの U-band 試験光帯域に対して大きく、試験光の実行遮断量は FBG フィルタを透過する試験光のトータルパワーに依存する。

図3.1 c) はサイドバンドノイズ帯域 D の試験光スペクトラムが、遮断帯域 d のFBG フィルタを透過した後測定される試験光スペクトラムである。このときのFBG フィルタ透過後のトータルパワー (P_{TL}) は以下の式で示す事ができる。

$$\begin{aligned}
 P_{TL} &= \int_{\lambda_t - D/2}^{\lambda_t + D/2} (Pt(\lambda)l(\lambda))d\lambda \\
 &= \int_{\lambda_t - d/2}^{\lambda_t + d/2} Pt(\lambda)l(\lambda)d\lambda + \int_{\lambda_t - D/2}^{\lambda_t - d/2} Pt(\lambda)l(\lambda)d\lambda \\
 &\quad + \int_{\lambda_t + d/2}^{\lambda_t + D/2} Pt(\lambda)l(\lambda)d\lambda,
 \end{aligned} \tag{3-1}$$

ここで、 $Pt(\lambda)$ は試験光パワーのスペクトラム、 $l(\lambda)$ はFBGの損失スペクトラムである。第一項はFBG フィルタの遮断帯域内の試験光パワーを示し、第二項と第三項はFBG フィルタの遮断帯域外における試験光のサイドバンドノイズパワーを示している。

波長 $\lambda_t \pm d/2$ における試験光はFBG フィルタによって $l_{FBG} \cdot Pt$ に減衰されるが、それ以外の試験光はFBG フィルタによる影響を受けない。計算においてはFBG フィルタを通過するトータルの試験光パワーは $Pt(\lambda)$ と $l(\lambda)$ が λ_t において対称であるとする。よって第二項、第三項の合計は以下のように表すことができる。

$$2 \int_{\lambda_t - D/2}^{\lambda_t - d/2} Pt(\lambda)d\lambda \tag{3-2}$$

つまり、FBG フィルタを透過するトータル試験光パワーは

$$P_{TL} = l_{FBG} \int_{\lambda_t - d/2}^{\lambda_t + d/2} Pt(\lambda)d\lambda + 2 \int_{\lambda_t - D/2}^{\lambda_t - d/2} Pt(\lambda)d\lambda \tag{3-3}$$

$d \leq D$ における試験光の実効遮断量 R_{eff} は、

$$R_{eff} = -P_{TL} / \int_{\lambda_t - D/2}^{\lambda_t + D/2} P_t(\lambda) d\lambda$$

$$= \left(l_{FBG} \int_{\lambda_t - d/2}^{\lambda_t + d/2} P_t(\lambda) d\lambda + 2 \int_{\lambda_t - D/2}^{\lambda_t - d/2} P_t(\lambda) d\lambda \right) / \int_{\lambda_t - D/2}^{\lambda_t + D/2} P_t(\lambda) d\lambda \quad (3-4)$$

となる。式(3-4)の第二項は試験光のサイドバンドノイズを示す。ピークパワーに対してサイドバンドノイズが十分小さいときには R_{eff} は l_{FBG} にほぼ等しくなるが、サイドバンドが無視できない場合には、 R_{eff} と l_{FBG} は異なり、 R_{eff} は十分な遮断量を持たなくなる。ただし、レーザの発光中心ピークスペクトラムは Lorentz 関数を用いて、以下の式で表すことができるとした[3-11],

$$P(\lambda) = 10 \log P_{\lambda_t} \left(\frac{B_{\lambda_t}^2}{\lambda^2 + B_{\lambda_t}^2} \right) \quad (3-5)$$

ここで、FWHM (Full Width at Half Maximum) は 0.1 nm 帯域は $\pm 5\text{nm}$ 、また $\lambda = \lambda_t - D/2$ から $\lambda_t - d/2$ 、及び $\lambda = \lambda_t + d/2$ から $\lambda_t + D/2$ においては、ピークパワー P_{λ_t} 、に対して一定値 $s \cdot P_{\lambda_t}$ のサイドバンドノイズを持つことを想定した。

式(3-4)を用いて、 l_{FBG} の遮断量をもつ狭帯域バンドパス FBG フィルタの実効遮断量 R_{eff} について遮断帯域比 d/D に対して計算し、さらにサイドバンドノイズ $SBSR = s$ をパラメータとして変化させ、結果を図 3.2 に示した。 l_{FBG} と R_{eff} 、 $SBSR$ は対数変換を行っている。インサービス試験において要求される実効遮断量としては受信部がセンシティブな ATM 10Gbps システムにおける 40dB [3-12] を用い、また DFB レーザが持つ ASE ノイズ帯域は 100 nm とした。 $SBSR$ は 40~80dB のモデルについて検討した。遮断帯域と ASE ノイズ帯域との比 d/D が 1 より小さくなると、実効遮断量は急激に劣化し、U-band 帯で最大確保可能な遮断帯域 50nm (1625~1675 nm, $d/D = 0.5$) を確保しても、遮断量は 15dB 程度まで大きく劣化する。これは U-band 帯による試験光遮断フィルタのみならず、ITU-T L.41 [3-4] に提案されている Case 1~4 における全ての波長 window を試験光として用いる場合において、フィルタ帯域が制限されることを考慮して考慮しなければならない要素であることを示しており、インサービス試験において試験光を遮断するためのフィルタリングクライテリアは、試験光がもつサイドバンドノイズ $SBSR$ 設計と言い換えることができる。

次に必要遮断量 R_{eff} に対する $SBSR$ の設計値について、 $SBSR$ を 40dB~80dB まで変化させ、狭帯域試験光遮断フィルタによる実効遮断量について計算した。U-band 試験光を用いたインサー

ビス試験では波長を $1650\pm 5\text{nm}$ としていることから[3-8], $d/D=0.1$ とした.

シミュレーション結果を図 3.3 に示す. SBSR 40 では ASE ノイズの影響が大きく, I_{FBG} が 20dB 程度であったとしても, 所望の実効遮断量は得られず, 十数 dB 程度に劣化し, 試験光遮断フィルタの遮断特性 I_{FBG} のみを高遮断にしても, 実効遮断量を増加させることはできず, R_{eff} は飽和する. SBSR を 60dB 以下に設計すると, 実効遮断量の飽和レベルは SBSR の低減に比例して改善し, ほぼ劣化無く R_{eff} 20dB を得ることができる. さらに SBSR = 80dB まで抑制することによって, 狭帯域 U-band フィルタ遮断量 $I_{FBG} = 40\text{dB}$ の設計に対しても, ほぼ $R_{eff} = 40\text{dB}$ の実効遮断量が得られる. 実効遮断量が大きく必要とされる場合には, 試験光として用いる試験光光源のサイドバンドノイズを抑制する設計が重要となる.

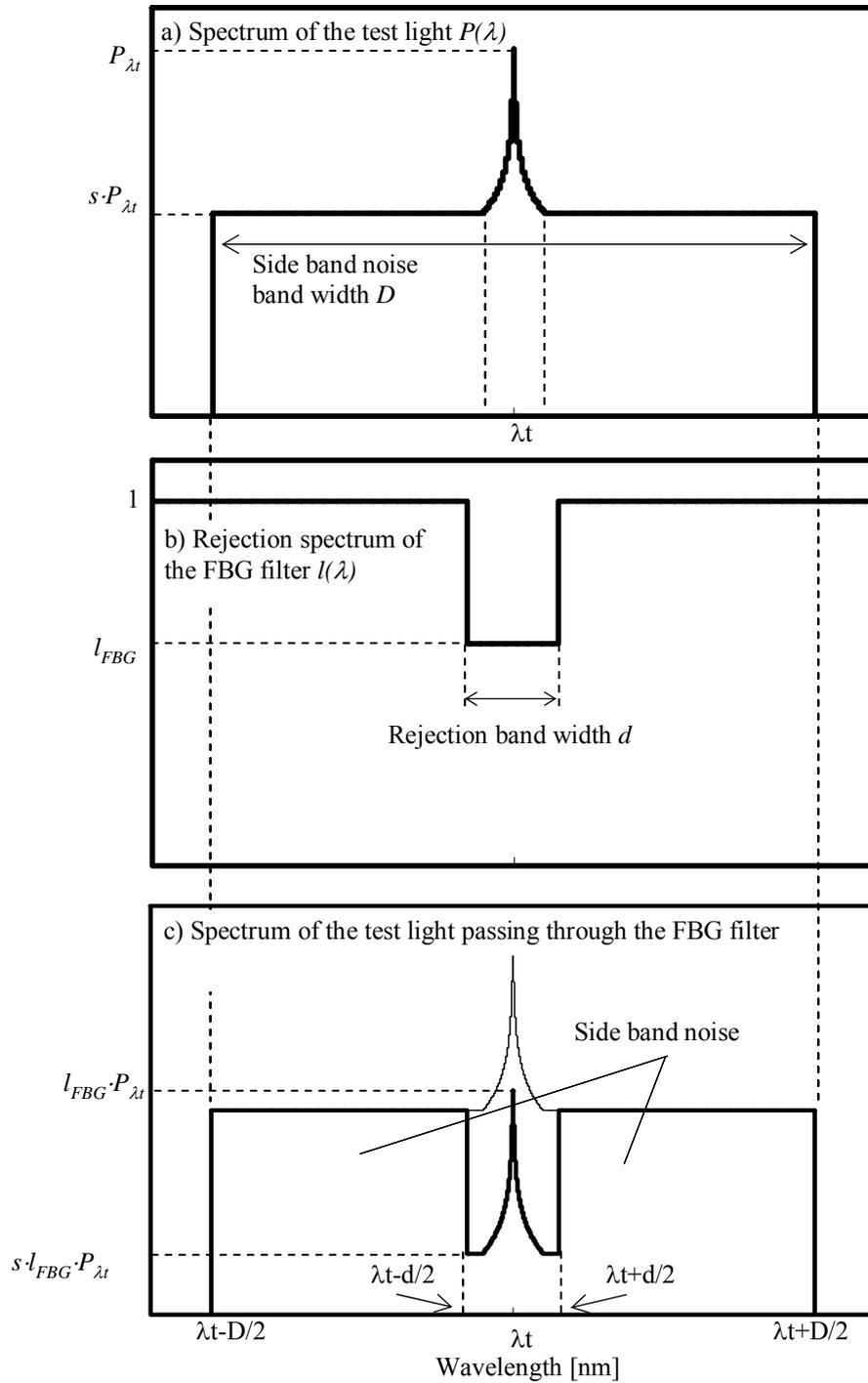


図3.1 a) 試験光源と b) 試験光遮断フィルタの透過スペクトル及び c) フィルタを透過した試験光のスペクトルモデル

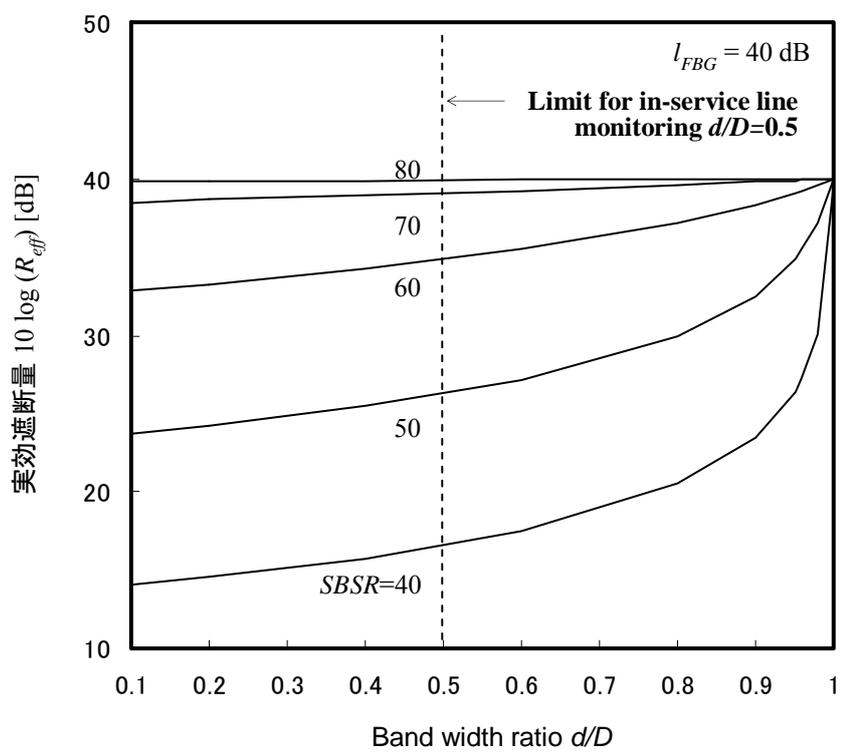


図3.2 フィルタ遮断帯域/光源帯域比に対する実効遮断量

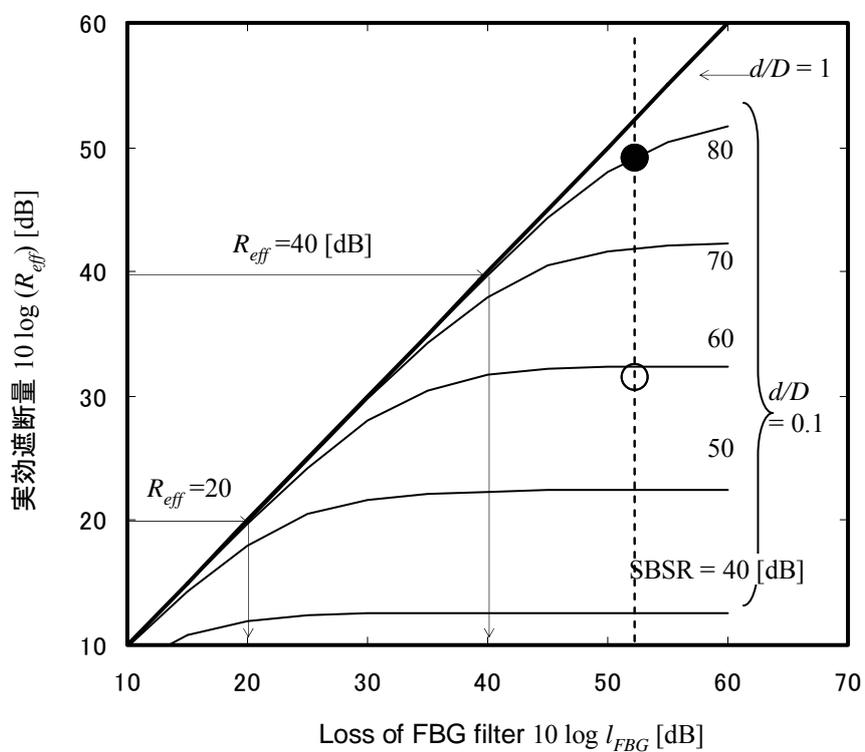


図3.3 フィルタ期待遮断量 I_{FBG} [dB] に対する実効遮断量

3.3 フィルタリング評価

3.2節において算出した試験光のSBSR設計のフィジビリティを確認するため、まずサイドバンドノイズの高い従来試験光源を用意して、フィルタリング期待値の劣化を確認した。図3.4に実効遮断量の測定系を示す。OTDRより出力した試験光をFBGフィルタの前後で測定し、パワーの差分を求める。

まず、OTDR試験光のサイドバンドノイズパワーを確認するために、パワースペクトラムを測定する。試験光スペクトラム計測にはDutyが1%程度の非常に低いパルス光源であるため、入力光に対して時間平均パワーを示す光パワーメータ(OPM: Optical power meter)である必要がある。また短いパルス幅による計測では、パルス幅 p_w を検出するために十分に広い帯域を持つ必要がある。また同様に光スペクトラムアナライザ (OSA: Optical spectrum analyzer) についても、Dutyの低い光源を評価するために、一定のゲート時間において最大の光パワーを示すピークホールド等の機能が必要となる。

試験光源とフィルタの特性全体を図3.5、図3.6に、また試験光ピークを中心とした詳細スペクトラムをそれぞれ図3.7 a), b)に示す。1650nm試験光源に用いたDFB-LDは外部共振器として約 3 nm の反射キャビティを持つFBGを接続した構成をとり[3-13]、中心波長1650.0 nm、パルスピークパワー 15.85dBm、中心波長線幅 3 nmであった。また、試験光遮断ケーブルに埋め込んだFBGフィルタの光学特性は O~L-band の 1200 nm から1625 nm までの平坦な透過特性、損失0.5dB以下と、1649.3 ± 7.8 nmで高い遮断特性、40dB、1650.0 nmでは52.48dB であった。この試験光光源をFBGフィルタでフィルタリングした後、光スペクトラムアナライザ (OSA) で測定した試験光スペクトラムを図3.7 c)に示す。測定条件はRes = 0.07 nm , VBW = 10 Hz, であった。OTDR のSBSRは50dB、パルス幅は 1 μ s、パルス送出間隔 225 μ s (duty: 0.4%)。中心波長と半値全幅は1650.53 nm, 0.18 nm であった。光パワーメータ (OPM) を用いてP0とP1における光パワーを測定したところ、FBGによる実効遮断量は32.10dBであり、試験光源中心波長では50dB以上の遮断量が得られたが、フィルタリング特性では約20dBの遮断量劣化が生じた。この実効遮断量の劣化は、図3.7. a) 試験光透過スペクトルにおいて、中心波長ピークに対して約50dBで存在するサイドバンドノイズの透過漏洩光によるものである。

サイドバンドノイズにより劣化した実効遮断量を○で図3.3にプロットしたところ、実効遮断量の劣化はSBSR=60に相当し、計算値より遮断量は若干良好な値を示した。これは設計モデルの再度バンドノイズパワーが全帯域で一定であるのに対し、実際には図3.7に見られるように、試験光のサイドバンドノイズが発光中心ピークより離れるにしたがって徐々に減少しているためと考えられる。

次にサイドバンドノイズを抑制した試験光を用いて、同一のFBGフィルタに対して実効遮断量を確認した。サイドバンドノイズ抑制試験光は、OTDRの出力ポートにレンズコリメータと誘導バンドパス電体多層膜によるパッチコードを設置することにより得た。パッチコードのフィルタ特性を図3.8に示す。1640.6～1657.8nmで0.69 dBの損失、1640nm以下と1660nm以上において30dB以上の損失を持つ。これを従来OTDR試験光に組み合わせることで、前述の試験光源と組み合わせることでSBSR=80dBを達成することが可能となり、3.1～3.2章の設計に基づき、伝送システムが要求する40dBの実効遮断量が実現可能となる。

図3.9 a) にSBSR=80dBの試験光源スペクトルと、試験光遮断フィルタ透過後の試験光スペクトラムを示す。またこの試験光源を、FBGフィルタにより遮断した後の光スペクトルを図3.9 b) に示す。パッチコードを用いてSBSRを80dBに抑制した光源では50.78dBの遮断量が得られFBGの遮断帯域に設計した50dB以上の遮断量を得ることができた。このSBSR=80dBの実験結果についても図3.3の計算結果上に●でプロットした。パッチコードを用いてサイドバンドノイズを改善した(SBSR=80dB)の試験光源を持つOTDRではFBGの実効遮断量はシミュレーション結果によく一致した。

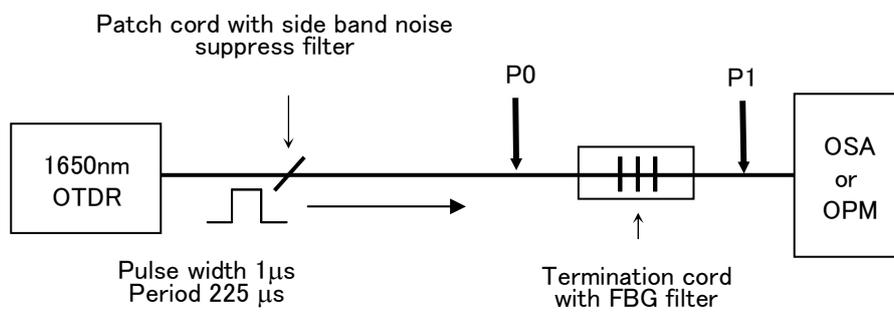


図3.4 実効遮断量の測定系

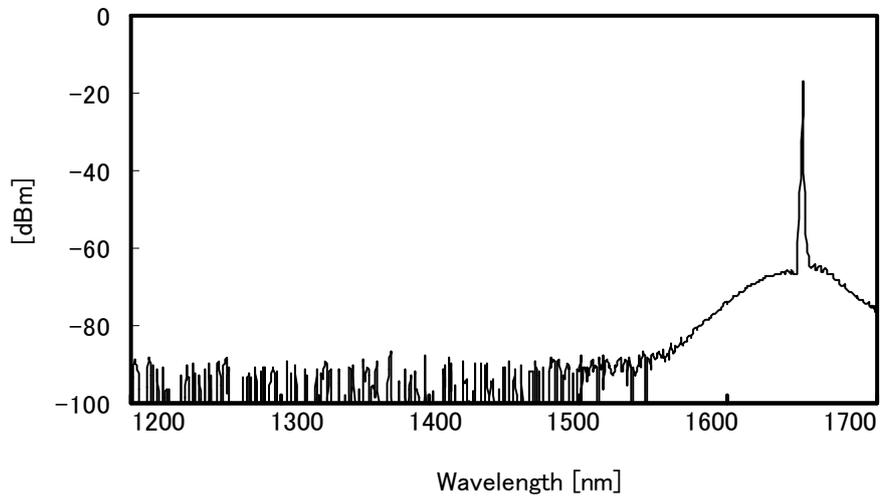


図3.5 従来 1650 nm OTDR 試験光のスペクトラム

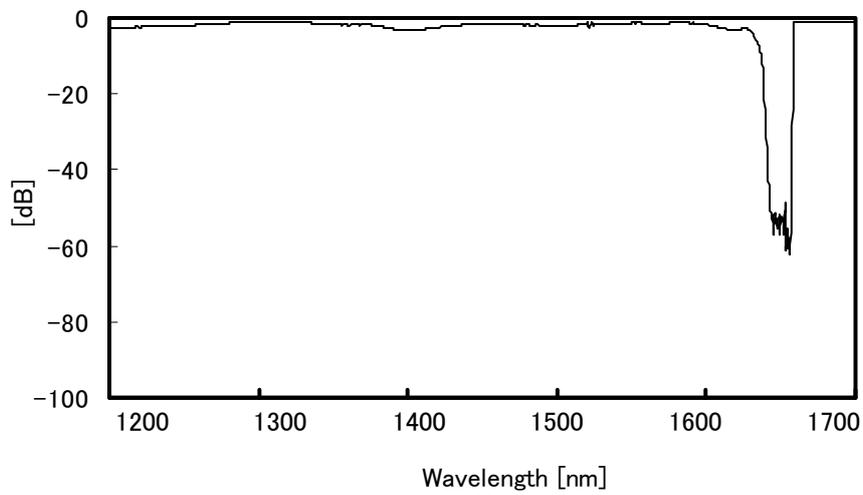


図3.6 光ファイバ全帯域におけるFBGフィルタの損失スペクトラム

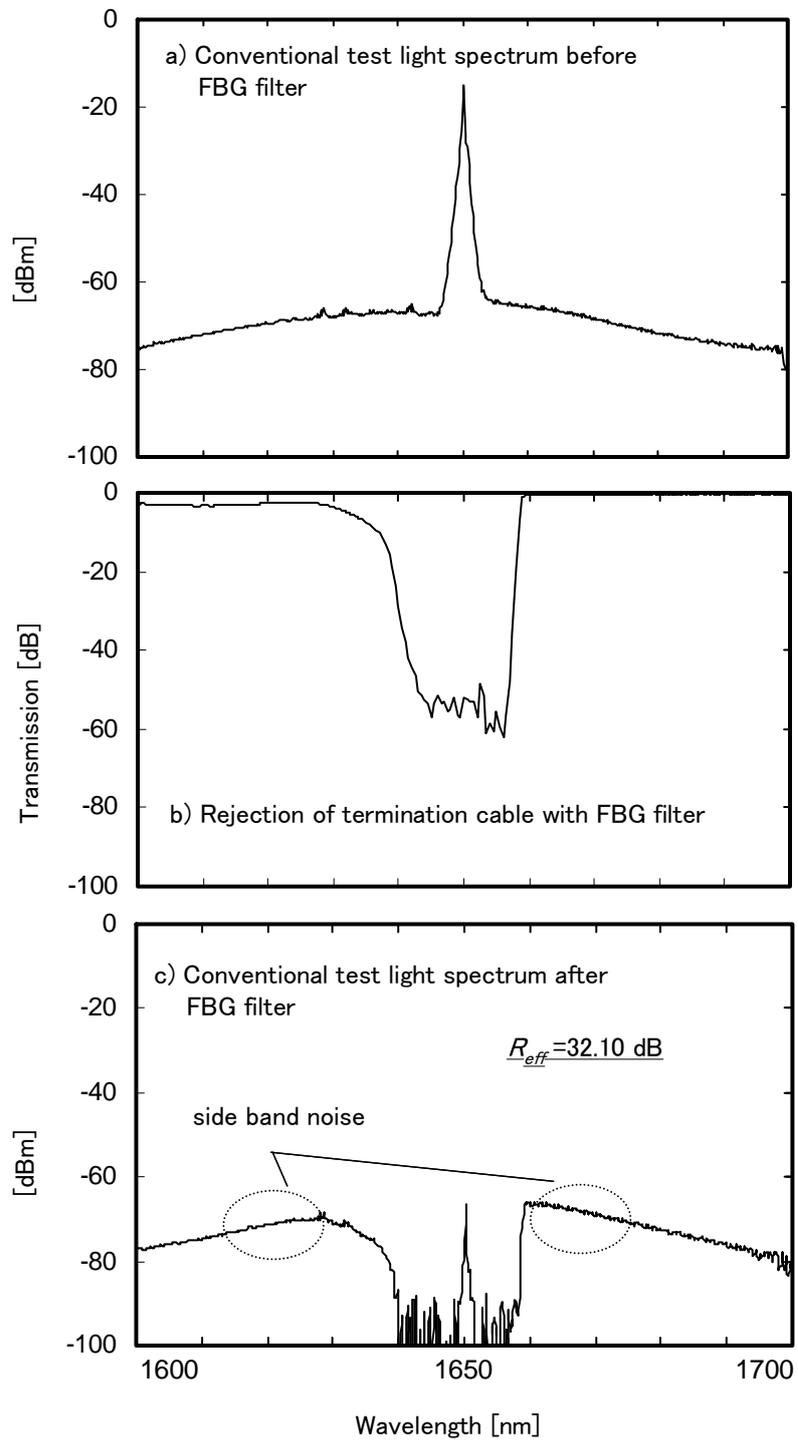


図3.7 FBGフィルタ前(P0)後(P1)における 従来 1650 nm OTDR 試験光源スペクトラム

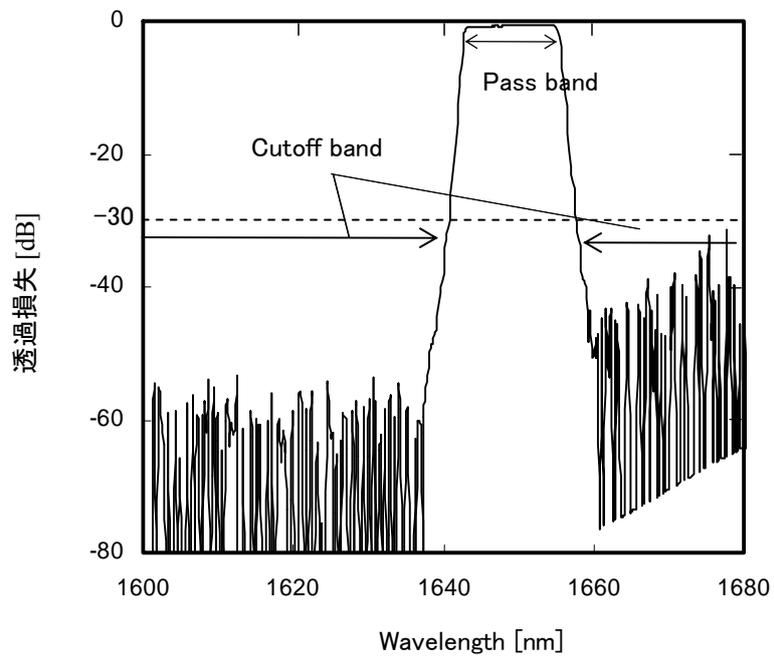


図3.8 パッチフィルタコード特性

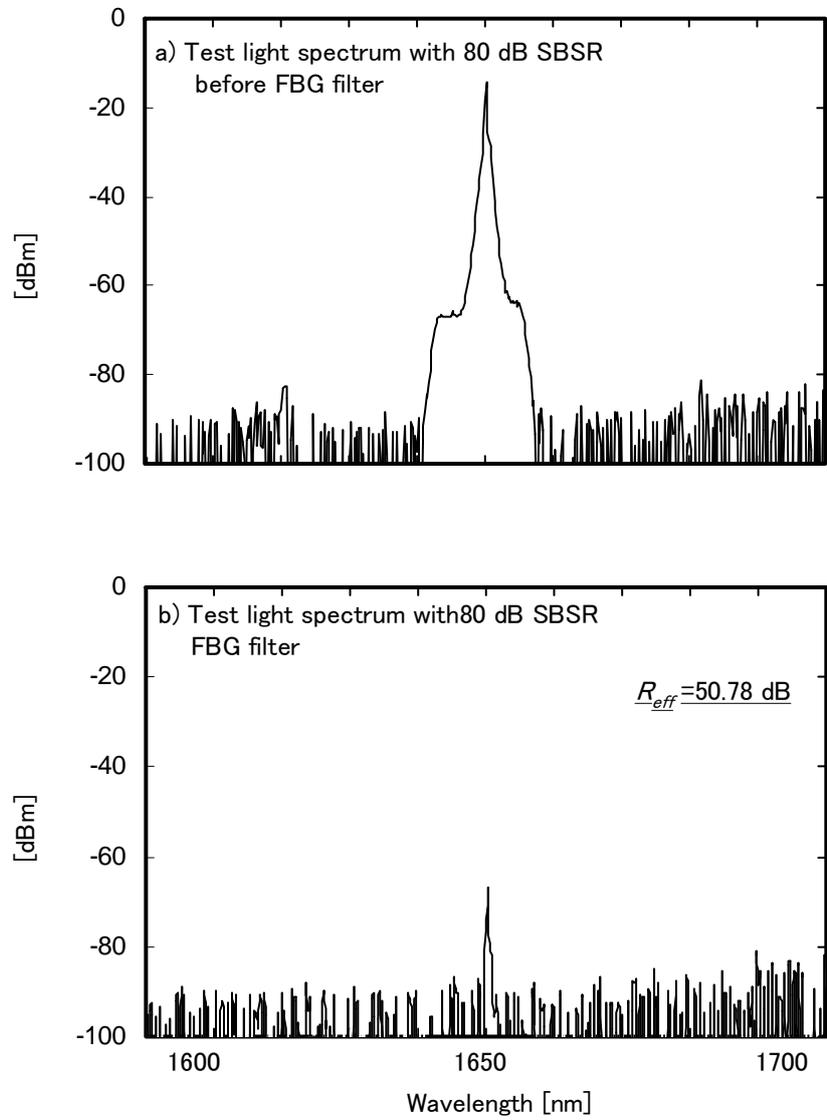


図3.9 80 dB SBSR の試験光源のフィルタリングスペクトラム

3.4 10Gbit/s SDH伝送に対する評価

OTDR試験による通信システムへの影響についてサイドバンドノイズの影響を明確にするために、前章で議論した従来OTDRと改良したOTDRを用いてBERの測定を行った。図3.10は10 Gb/sシステムに対するインサービス試験実験の実験系である。SDHアナライザから出射する1535.92nm 通信光は光試験モジュール[3-7] によって 2km, 2km, 5km をカスケード接続したシングルモードファイバ線路へと導かれる。通信光パワーはアッテネータによって調整され、試験光遮断フィルタを通り抜け、アナライザの受信ポートへ入射する。1650 nm 試験光もまた、光試験モジュールの試験用ポートから入射し、試験光遮断フィルタで損失を受ける。FBGフィルタの遮断量は、それぞれ 1535.92 nm で -1.23 dB, 1649.3 ± 7.8 nm の帯域で40 dB以上であった(図3.7 a))。1535.92 nm 波長通信光は ノンフレーム 2^{31-1} の9.995 Gb/s 疑似ランダムビットストリームに変調した。通信信号の平均パワーは-3.58 dBm であった。

図3.11 はOTDR試験信号無し、従来SBSR=50dBのOTDR、及びSBSR80dBのOTDR試験信号があるときのBER測定結果である。SBSR=50dBのOTDR信号がある場合は、ONTの平均受信パワー19dBm以下においてBERが劣化しONTの受信光パワーを上げてもエラーが改善しない。実効的な試験光遮断ケーブルによる試験光の遮断量は32dBであり、漏洩光がONTへノイズとして影響していると考えられる。一方で、SBSR80dBに改善されたOTDRによるインサービス試験実行時には、実効遮断量は51dBとなり、BERにおける影響は見られなかった。

以上により、インサービス試験時に、試験光のサイドバンドノイズが試験信号のBERに与える影響とSBSRが80dB以上必要であることを確認した。この結果は3章 式(3-7)を用いて得られた計算結果通りであった。

図3.12 は図3.11においてインサービス試験を実施したときに測定したOTDR波形である。測定条件は、パルス幅1 μ s 距離レンジ10kmであった。OTDR波形のダイナミックレンジの劣化はオリジナルの波形に比べて僅かにフィルタパッチコード損失0.2dB分減少したのみであった。

以上より、SBSR = 80dBに抑制された試験光を用いることでBERの劣化無くインサービス試験が実行可能であることを示し、インサービス試験設計に重要なパラメータである試験光の遮断設計は、漏洩光を考慮した波長設計とフィルタリングのクライテリアを必要とすることを明確にした。

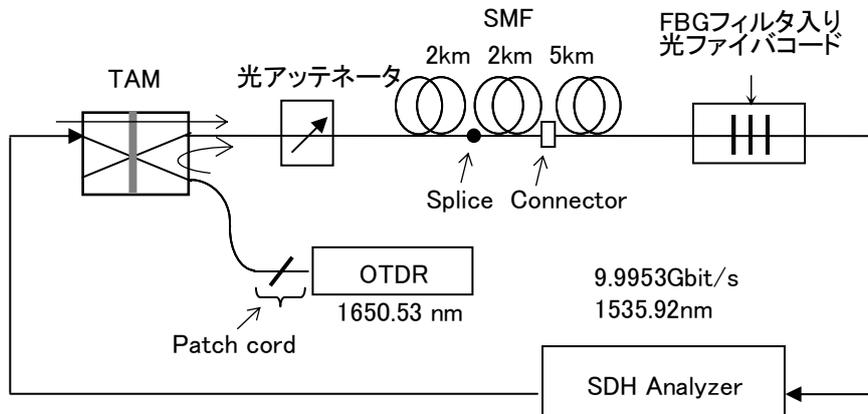


図3.10 インサーブ試験に対する10Gb/s伝送システム評価系

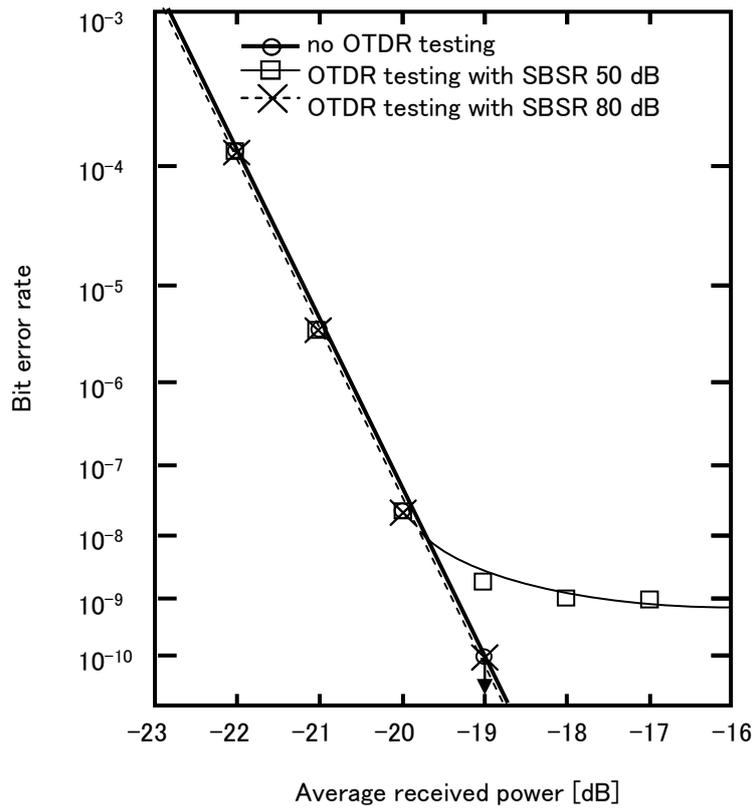


図3.11 インサーブ試験有無に対するBER 測定結果

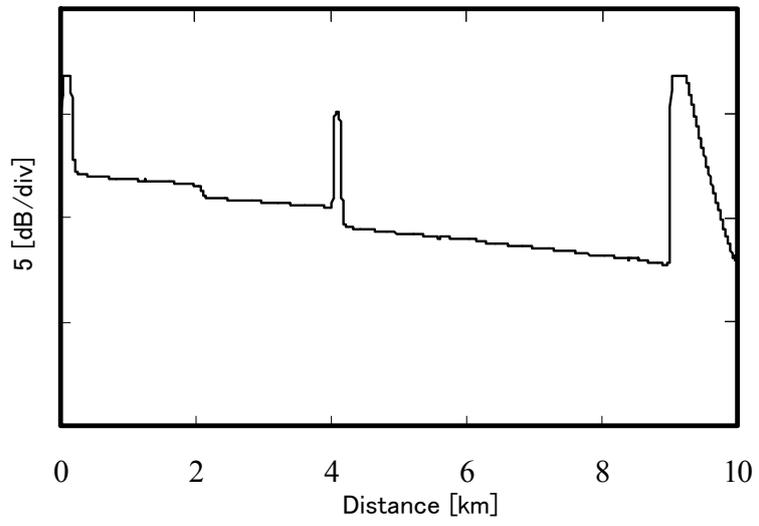


図3.12 サイドバンドノイズ抑制光源を用いたOTDR試験結果

3.5 結論

第3章では、2章で論じたインサービス試験に必要な試験光遮断フィルタの損失条件に対し、現実には、レーザ光源には発光ピーク波長近傍に広いASE(Amplified Spontaneous Emission)光を有すること、また試験光遮断フィルタの設計可能な遮断帯域には制限があることから、キーパラメータとなるASE帯域、試験光源ピークに対するサイドバンドノイズの抑圧比、SBSR(Sideband Suppression Ratio)、及び試験光遮断フィルタの遮断帯域を設定してフィルタリングによる実効遮断量のシミュレーションを行った。

インサービス試験において要求される最大実効遮断量である40dBを目標とすると、DFBレーザが持つASEノイズ帯域100nm、SBSR40dBモデルに対して、遮断帯域がASEノイズとの比が1以下になる場合には、実効遮断量が急激に劣化し、最大確保可能な遮断帯域50nmを確保しても、40dBの遮断量を得られない。そこでSBSRを抑制することによって得られる実効遮断量の改善について検討し、SBSR80dBまで抑制することによって、狭帯域U-bandフィルタに設計した遮断量とほぼ同等の実効遮断量を得られることを明確にした。この設計の妥当性を確認するために、SBSR50dB、80dBの試験光源によるインサービス試験を実施し、フィルタリング特性がほぼシミュレーション通りであること、SBSRの抑制設計により、感度な受光部を持つ10Gb/s伝送システムにおけるインサービス試験実施でも影響無く実効できることを確認した。またSBSR抑制設計したOTDRはレンズコリメートを用いた誘電体多層膜フィルタで容易に実現することが可能であり、このフィルタによるOTDRダイナミックレンジの劣化は0.2dB程度と僅かであった。以上に述べた結果はITU-T Recommendation L. 66の策定にあたって、インサービス試験のフィルタリング基準に適用された[3-14]。

文 献

- [3-1] Y. Koyamada, N. Ohta, and N. Tomita, "Basic Concepts of Optic Subscriber Loop Operation System", Proc. Int. Conf. Commun. 4, pp. 1540-1544, 1990.
- [3-2] 向井, 富田, 高杉, 千田, "光パルス試験器を用いたインサービス光線路特性測定法", 1990 電子情報通信学会 春期全国大会, B-989, pp4-77, 1990.
- [3-3] E. Cottino, D. Dellera, and S. De Paoli, "1625-nm monitoring system design for preventative maintenance of fiber optics plants", in Proc. International Wire & Cable Symposium Conference. (IWCS) 1993, pp. 799-804, 1993.
- [3-4] "Maintenance wavelength on fibres carrying signals", ITU-T Recommendation L.41, May 2000.
- [3-5] 例えば, 松本, "光測定器ガイド", pp.13, オプトロニクス社, 2004.
- [3-6] H. Takasugi, N. Tomita, H. Suzuki, and T. Akai, "A new fault-identification method using a dichroic reflective optical filter in optical subscriber loops", J. Lightwave Technol. vol. 11, no. 2, pp. 351-357, 1993.
- [3-7] T. Oguchi, J. Noda, H. Hanafusa, and S. Nishi, "Dielectric multilayered interference filters deposited on polyimide films," Electron. Lett., vol. 27, no. 9, pp. 706-707, Apr. 1991.
- [3-8] N. Nakao, H. Izumita, T. Inoue, Y. Enomoto, N. Araki, and N. Tomita, "Maintenance method using 1650-nm wavelength band for optical fiber cable networks", J. Lightwave Technol. vol. 19, no. 10, Oct. 2001.
- [3-9] 本田奈月, 荒木則幸, 泉田史, 中村稔, "光線路試験システムにおける FBG 型 1650nm 帯ターミネーションコードの検討", 2002 年電子情報通信学会 通信ソサエティ大会, B-10-20, 2002.
- [3-10] 本田奈月, 荒木栄次, 荒木則幸, 泉田史, 中村稔, "光線路試験システムに用いる 1.65 μ m 帯遮断用ターミネーションコードの検討", 2001 年電子情報通信学会 通信ソサエティ大会, B-10-24, 2001
- [3-11] 多田, 神谷, "ヤリーヴ 光エレクトロニクス 展開編", pp. 521, 丸善株式会社, 2000.
- [3-12] N. Araki, N. Honda, H. Izumita and M. Nakamura, "Extended optical fiber line testing system using new eight-channel L/U-band crossed optical waveguide coupler for L-band WDM transmission", J. Lightwave Technol., vol. 21, no. 12, pp. 3316-3322, Dec. 2003.
- [3-13] 茂原, 井上, 服部, "波長安定型狭帯域 OTDR 光源", 1997 電子情報通信学会 総合大会, C-3-155, pp340, 1997.
- [3-14] "Optical fibre cable maintenance criteria for in-service fibre testing in access networks", ITU-T L.66, May, 2007.

第4章

光分岐線路の遠隔監視方法 -ブリルアン散乱による識別-

4.1 緒言

光アクセスネットワークの主流な配線構成は、光ファイバ線路のユーザ宅近傍の所外に光パワー分岐点を持つ光分岐線路である。所外に設置された光分岐点より下部の光ファイバ線路は設備が露出しているため故障が多く、面的に広がっているため、故障位置を迅速に特定して修復することがメンテナンス稼働を大きく抑制する。一般的に光ファイバ線路の遠隔監視技術としては、OTDRによる光ファイバ線路からの反射(散乱)光モニタを行うことで光ファイバ長手方向の損失分布を得ることで、光ファイバ線路の故障発生位置特定ができるが、光スプリッタによる分岐点を含む光ファイバ線路には OTDR を適用すると、光スプリッタ下部に接続された複数の光ファイバで発生したレイリー後方散乱光が重畳して計測されるため、下部分岐線路状態を個別に識別することは困難である。本章では光ファイバ線路の中途に光スプリッタを含む光分岐線路の遠隔監視の実現方法について検討する。

4.2 光分岐線路の遠隔監視方法

4.2.1 分岐線路の監視リクワイヤメント

光分岐線路より下部の光ファイバ線路監視に必要な条件は、

- ・遠隔でモニタが可能であること
- ・通信に影響を及ぼさないこと
- ・線路条件の影響無く試験ができること

である。これらリクワイヤメントと従来提案されている光分岐線路の遠隔監視方法の試験機能を表 4.1 にまとめた。現在、光分岐線路の分岐点よりユーザ側の光ファイバにおける故障の位置特定方法としては、故障が発生している線路に対して図 4.1 a)に示すように ONT 側の光線路端末の ONT を取り外して光線路に OTDR を接続し、分岐点までの光パルス試験を実施している [4-1][4-2]。分岐点より下部に生じた光ファイバ線路故障を検出する方法は多くの研究がなされている [4-3]-[4-10], [4-13]-[4-15]。特に分岐点より上部から検出する方法については、1990 年 Sankawa 等により分岐線路からの重畳したレイリー散乱光を解析し、1 線路において発生した損

失を微小な損失変化として検出する方法が提案されている[4-3]. しかし、スプリッタ下部の複数の心線のうち、故障が発生した心線がいずれであるかの特定はできない. また OTDR 波形を正常時に取得・記録し、故障発生時には履歴と比較することによって故障を特定する方法も提案されている[4-4]-[4-7]. この場合図 4.1.b)に示すように光ファイバ心線の長さを異なるように配置し、光ファイバ線路遠端の反射ピーク履歴と比較することで心線個別に故障が生じているかを検出することで故障が生じた心線を特定することが可能である. しかし、光ファイバ心線長を各個別に異なるように設計する必要があり、ファイバ長を調整する運用の煩雑さに加え、故障箇所を特定することができない、またスプリッタより下部の線路長差が OTDR の空間分解能より短い場合には故障発生切り分けが困難になるという課題がある. 分岐線路を個別にモニタする方法としては、分岐部にもちいる光スプリッタを波長によるルーティングによる散乱光分離方法がある[4-8]-[4-10]. 波長ルーティングデバイス例えば AWG (Arrayed Waveguide Grating)[4-11], [4-12] やそれぞれの分岐ポートに狭帯域フィルタを用いることにより図 4.1c)のように各光ファイバ線路に $\lambda t_1, \lambda t_2, \dots, \lambda t_n$ を割り付け、波長可変試験 OTDR によってそれぞれの波長に対応した分岐線路のみの情報を検出することができる. しかし、AWG 等の波長フィルタは計測する微弱な散乱光と他ポートに漏洩し反射点で生じた強い反射光を 70dB 以上の高クロストークでフィルタする必要があり、光アクセスネットワークに適用するにはデバイスコストが高価である. また線路中に波長特性をもつデバイスが埋め込まれると、通信波長が制限されるためサービスアップグレード時に障害となる.

以上従来の試験手法をふまえ、全てのリクワイヤメントをクリアする新たな試験方法を提案する.

4.2.2 光ファイバ中の散乱光

後方散乱光を利用した光線路モニタは片端から計測が可能であるため、遠隔監視と相性がよい. 光ファイバ中の光波散乱の殆どは入力光波長に対して同じ波長を持つレイリー散乱光であるが、レイリー散乱光の他に、固体の光学的振動により発生するラマン散乱や、長波長の音響フォノンによって形成された周期的弾性歪みによって屈折率が変調された結果生じるブリルアン散乱が発生している. 光ファイバからの散乱光スペクトルと各種散乱光の特性を図 4.2 と表 4.2 に示す. ラマン散乱光は 50nm のスペクトル幅、入力光に対して約 100nm (1.5THz)の周波数変化を伴い、レイリー散乱光に対して 30dB 程微弱な信号である. ラマン散乱光は温度によって散乱光強度が変化する特徴を持つため、光ファイバをセンサとした温度分布計測に用いられる[4-16]. また、ブリルアン散乱は入力光に対して 50MHz のスペクトル幅、0.1nm (10GHz)の周波数変化を伴い、レイリー散乱光に対して 15dB 程微弱なパワーの散乱光であり、温度・歪みに依存して散乱光周波数シフトが変化することを利用して同じくセンシングに用いられる [4-17]-[4-19]. 光

分岐部より下部の個別モニタを実現するためには、複数散乱光信号の分離・識別が必要となる。

以上をふまえ、分岐線路の遠隔監視で重要となる分岐部からの試験光重畳を分離する方法として、光波の周波数は信号が重畳した場合に、フィルタリングによって分離が容易であることから、周波数シフト変化を伴うブリルアン散乱光をターゲットとした。ブリルアン散乱光の発生過程を図 4.3 に示す。光ファイバに光を入射すると速度 v_b で移動する弱いグレーティングが発生し、周波数シフト v_b を受けて入射方向に後方散乱する。つまり光ファイバ中の音響波速度により周波数シフトが決定されるため、これを制御することで散乱光信号を特徴づけることが可能である。

ブリルアン散乱光による分岐線路下部試験は、

- 1) 散乱光を用いることで、分岐部上部より遠隔監視を実行することができる、
- 2) ブリルアン周波数シフトを制御した光ファイバは散乱光の一部に周波数シフト変化が生じるが、透過波長には影響しないため通信への影響は生じない。
- 3) 分岐線路各々に固有の周波数を割り付けることで信号を分離し、故障位置探索を実施することが可能になる

であり、表 4.1 に示した分岐線路下部試験のリクワイヤメントを満たす遠隔試験を可能にする。

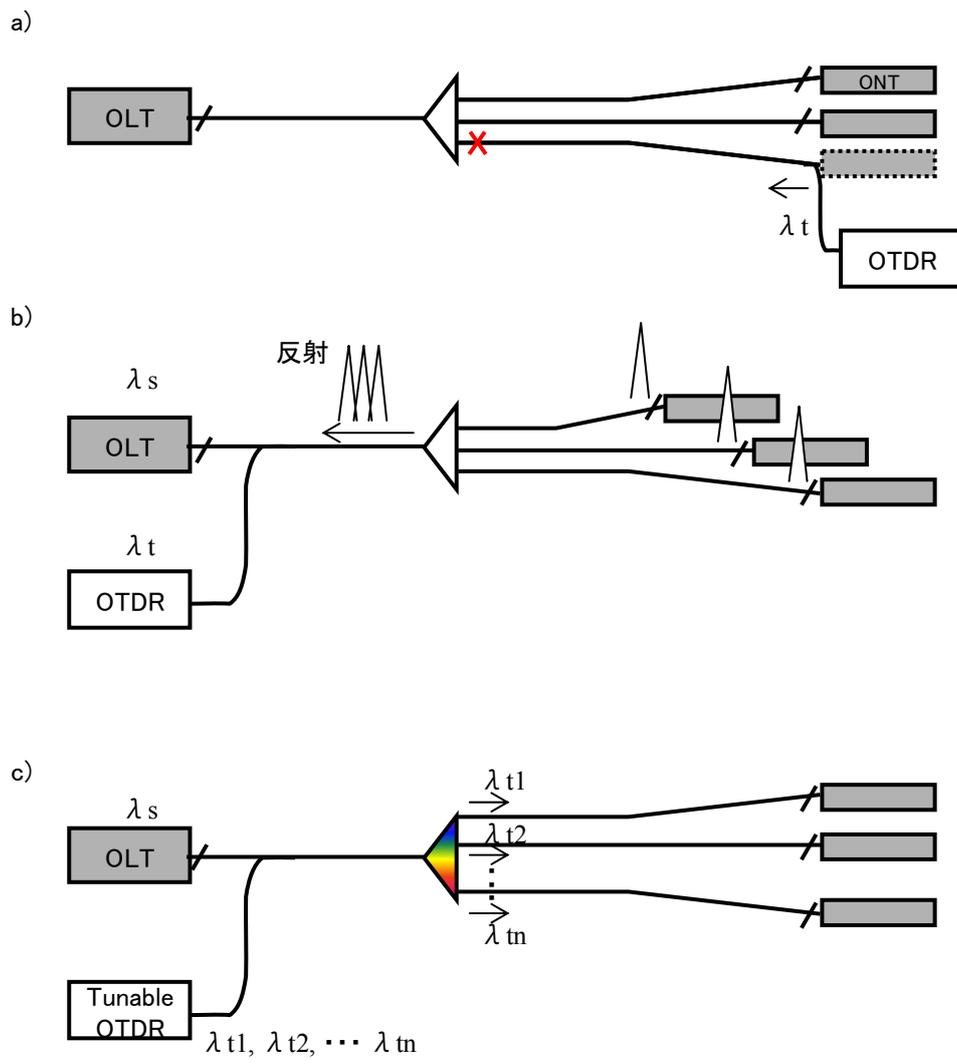


図4.1 従来のPON試験方法

表4.1 分岐線路下部試験のリクワイヤメントと従来方法の機能比較

試験技術	遠隔監視	通信への影響	故障位置探索
リクワイヤメント	可能	無し	可能
下部からのOTDR試験	不可	有り	可能
散乱光解析	可能	無し	不可
心線長差による反射検出	可能	無し	不可
分岐部における波長割り付け	可能	有り	不可

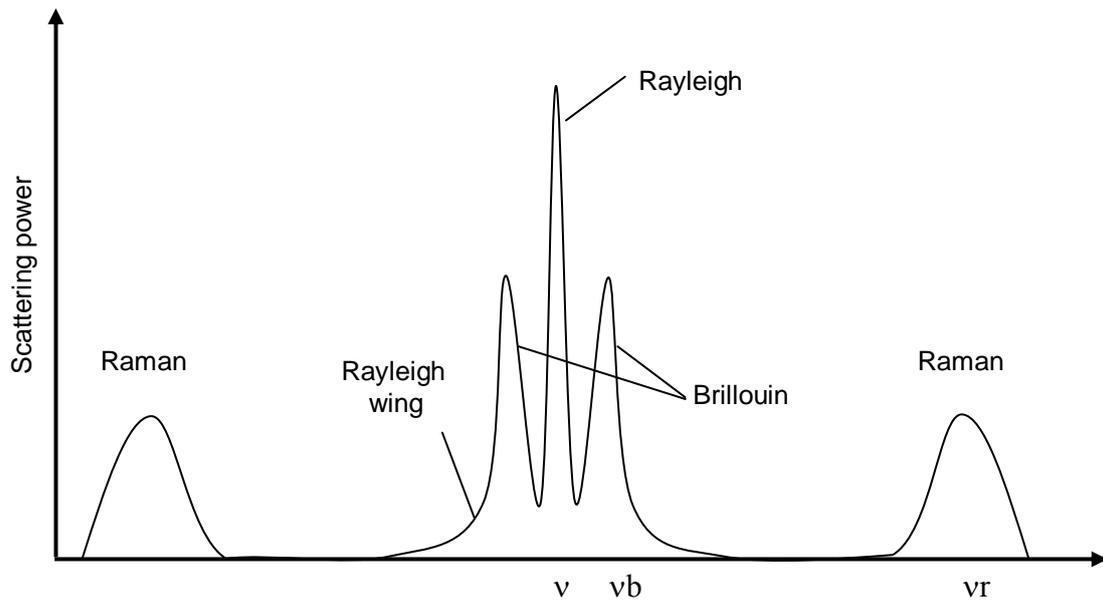


図4.2 光ファイバからの散乱スペクトル

表4.2 光ファイバ中の散乱プロセスにおけるパラメータ代表値

Process	周波数シフト (nm)	Linewidth (MHz)	散乱係数 (dB/m)
Rayleigh	0	5	75
Brillouin	0.1	50	90
Raman	100	5000000	105

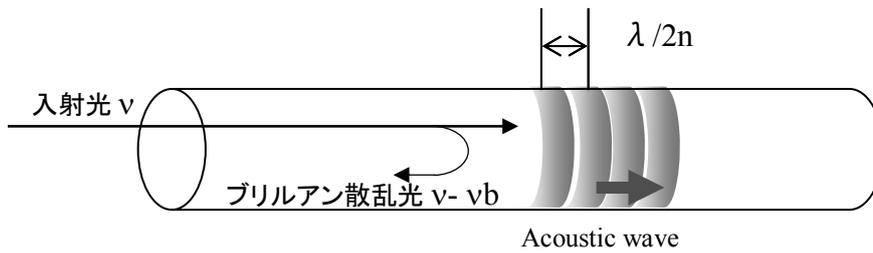


図4.3 ブリルアン散乱の発生プロセス

4.3 ブリルアン周波数シフトによる光分岐線路の識別方法

ブリルアン周波数をパラメータとした分岐線路下部試験の構成および故障検出について述べる。図 4.4 にユーザ宅近傍に所外光スプリッタが設置された分岐線路の線路構成と、光スプリッタ下部を所内からインサービス試験を行う光線路試験システムの構成を示す。伝送装置 OLT と ONT は光ファイバ線路によってリンクされている。OLT から送出された信号は設備ビル所内に設置した光パワースプリッタ(Sp-C)により分離され、地下光ケーブルを経由した後、ユーザ宅近傍の所外光スプリッタ(Sp-O)でさらに分離され各ユーザ宅の ONT に接続される。光線路試験システムは光試験モジュール(OTM)、被測定ファイバを選択するファイバセクタ(FS : Fiber Selector)、通信線路に試験光を入力する光試験モジュール(TAM: Test access module)、試験光を遮断し通信光のみを透過する試験光遮断フィルタを備えるターミネーションケーブルから構成される。OTDR 等の試験光源をもつ OTM は光スイッチであるファイバセクタにより、所内に収容された 10000 心を超える光ファイバ線路それぞれにアクセス可能である[4-19]。OTM はネットワーク(DCN)を介して、遠隔制御端末(Control terminal)からの指示により様々な試験を実行する。ここで試験システムでは、2章および3章に論じた U-band を保守波長とした OTM 試験光光源、光試験モジュール、試験光遮断フィルタを備える。

光分岐線路下部試験の原理詳細を図 4.5 に示す。1 台の OLT と複数台の ONT は、光スプリッタ上部ファイバに接続した光スプリッタと光スプリッタの分岐ポートにそれぞれ接続された光ファイバによってリンクされている。光ファイバおよび光スプリッタでは光ファイバの全伝送帯域に対してフラットな透過特性を持つように設計する[4-21]。よって 1260~1625nm に設計された通信光だけでなく、光カプラ等で光ファイバ線路に合波された 1650nm 帯試験光も光スプリッタで等しく分岐され、各光スプリッタ下部ファイバへ入射する。ここで光スプリッタより下部には後述詳細に述べるブリルアン散乱光の周波数シフトを調整した光ファイバをそれぞれ固有に設計し、散乱光の周波数をごく僅か(0.01nm 程度)変化させる。今、試験光 ν を入射すると、光スプリッタ下部の分岐線路よりそれぞれの心線に設計した周波数シフト($\nu \pm \nu_1, \nu \pm \nu_2, \dots, \nu \pm \nu_n$)を生じたブリルアン後方散乱光が生じ、この周波数シフトの違いにより各分岐線路の状態を識別する。

図 4.6 は光スプリッタより下部からのブリルアン散乱光信号のスペクトラムモデルである。例えば、ブリルアン周波数シフト(BFS): ν_3 を割り付けた心線で故障が発生した場合、周波数 ν_3 のみ光パワーが減少することで故障心線が特定され、さらに試験光をパルス化すれば、散乱光が戻るまでの時間をパラメータとして故障点までの距離を測定することができる。

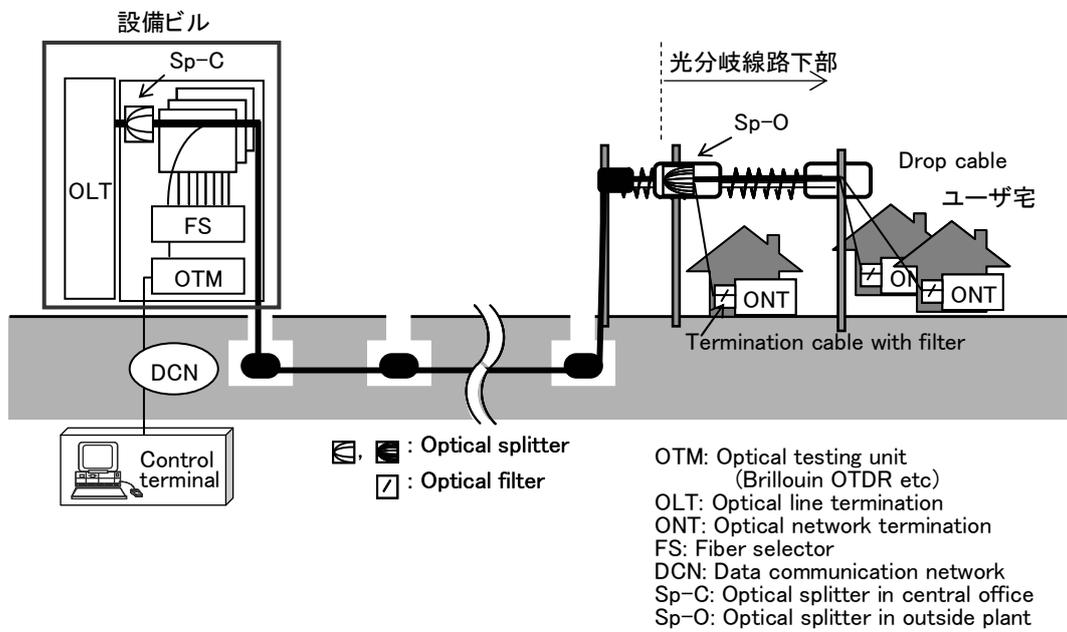


図4.4 光線路試験システムの構成

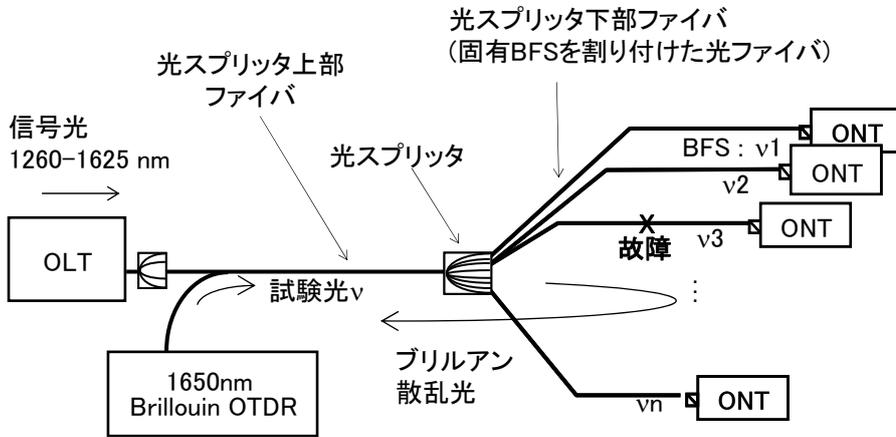


図4.5 固有のブリルアン周波数を有する光ファイバを用いた分岐部線路の試験方法

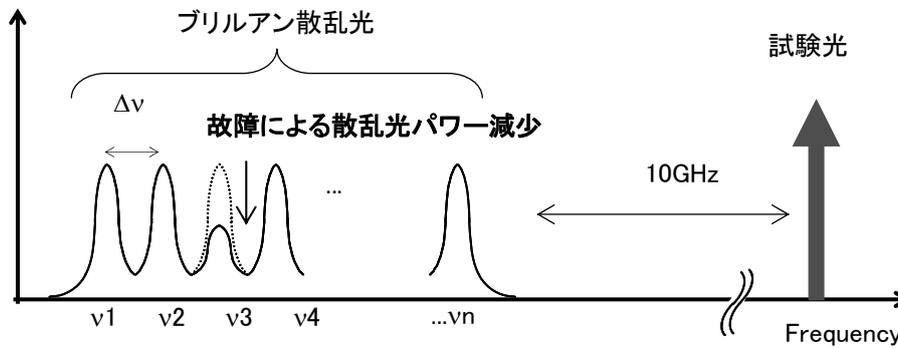


図4.6 光スプリッタ下部ファイバのブリルアン散乱光スペクトラム

4.4 ブリルアン周波数シフト間隔の設計

光試験システムに分岐線路の故障位置探査する機能をシステムに追加する為、所外光スプリッタ～ONT 区間に、固有のブリルアン周波数シフト(BFS: Brillouin Frequency Shift)を有する光ファイバを設置し、OTM にブリルアン後方散乱光を測定する試験装置を設置する。

図4.6に示したBFS間隔 $\Delta\nu$ はそれぞれの散乱信号を識別・検出するために必要なセパレーションであり、所外環境において発生する温度や歪みによって発生するBFSの変動を考慮して決定する。 $\Delta\nu$ は以下のように示すことができる、

$$\Delta\nu \geq w + \Delta S \cdot C_S + \Delta T \cdot C_T \quad (4.1).$$

ここで w , ΔS , C_S , ΔT , C_T はそれぞれ、ブリルアン利得スペクトラムの半値全幅 (FWHM), 歪み及び温度の変動, 及びブリルアン散乱における変動係数である。ブリルアン散乱光スペクトラムはLorentz関数を用いて

$$P_B = \frac{(w/2)^2}{\Delta f^2 + (w/2)^2} \quad (4.2)$$

により表すことができ[4-22], w のセパレーションは各ピーク間に生じる谷に1.5dBパワー差分を生じさせ識別可能とする。

ブリルアン周波数シフトは温度や歪みによって変化するが、その変化値はそれぞれ波長1650nmにおいて 温度変化1℃あたり 1.1 MHz/℃, 歪み1%あたり 500 MHzである[4-23]. 敷設光ケーブルにおける歪み変化は0.01%よりも小さいため[4-24], 式(4-1)の第二項に示した歪み要因による変化はほぼ無視できるとした。

次に温度変化パラメータについては、光ケーブルの所外における環境要因として、温度変化範囲はITU-Tによって-40 ～ 75 °C [4-25]が規定されている。図 4.7 にPON分岐線路(BFSs = $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots, \nu_m$)が-40 または 75 °C の所外環境から、室温25°C状態へ変化した場合のBFSスペクトルの最大変動を示した。ドロップケーブルはユーザ宅近傍に設置されるため室温への変化が最大であると想定し、最大変化幅を65°Cとした。これはブリルアン周波数シフト約70MHzに相当する。

以上の設計条件を式(4.1)に適用すると、それぞれのブリルアン周波数シフトを識別するために必要なBFS 間隔 $\Delta\nu$ はそれぞれ120 MHz 以上となる。所外スプリッタ n 分岐の分岐線路をモニタするためには、最大 $120 \times (n-1)$ MHz のブリルアン散乱周波数シフト割り付けが必要と

なる。

光分岐部の分岐数はユーザ収容率によって決定される。分岐数が少数の場合にはユーザ収容率が高くなり利用率が上がるが、OLT並びに幹線光ファイバのシェアによるコスト削減効果は減少する。一方で分岐数を増加させると、ユーザ収容率を高くすることが困難になる。GE-PONにおいてはユーザ宅近傍の架空クロージャに8分岐光スプリッタ、設備ビル内に4分岐光スプリッタを設置する32分岐構成が主流である [4-7]。そこで、所外に設置される分岐点からの散乱信号検出をターゲットとして8周波数を検出することを目標とした。

光アクセス網で用いられている所外8分岐スプリッタ線路への適用を目標としてブリルアン周波数シフトの総制御量は、840MHz以上を目標とした。

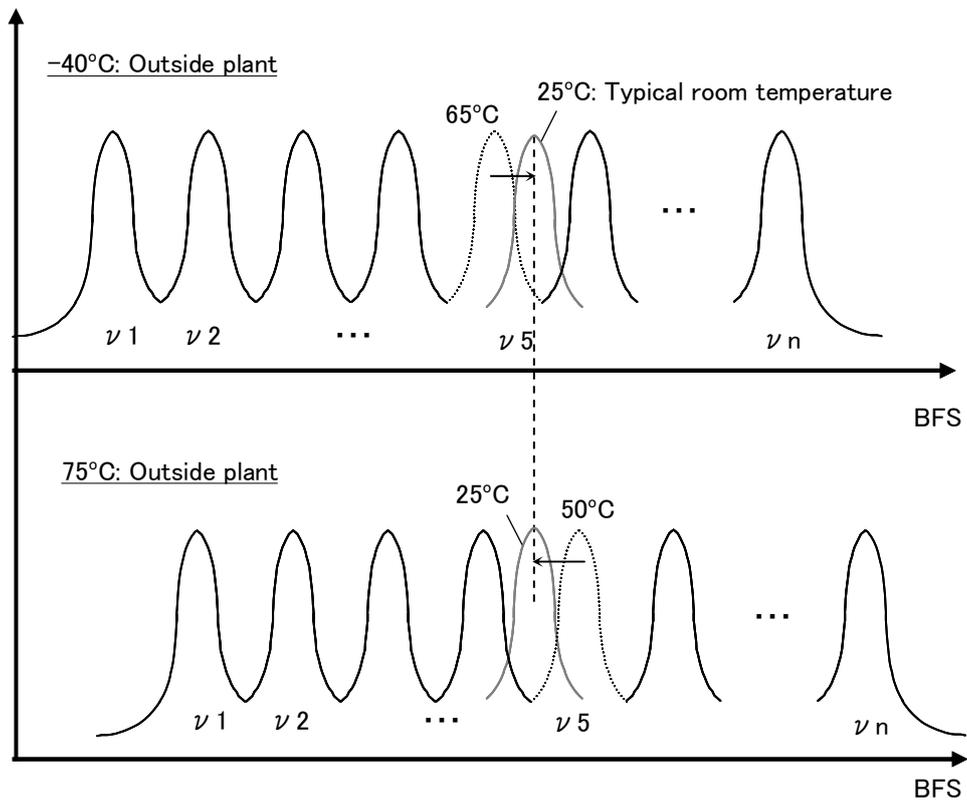


図4.7 外部環境条件におけるBFSの変動

4.5 光ファイバのブリルアン周波数シフト制御

4.5.1 石英ガラス中の音速とブリルアン散乱周波数シフト

約 1GHz のブリルアン周波数シフト制御について検討する。光ファイバで生じるブリルアン後方散乱光の周波数シフト ν_b は、光ファイバ中の音速 V_L に依存し、以下の関係式で表すことができる[4-22].

$$\nu_b = \frac{2nV_L}{\lambda} \quad (4.3)$$

光ファイバコアの音速 V_L は、光ファイバ中のコアドーパントの調整によって粘度を変えることで制御可能である。石英系ファイバへのドーパントとしては酸化ゲルマニウム GeO_2 、五酸化リン P_2O_5 、酸化チタン TiO_2 、酸化ホウ素 B_2O_3 、フッ素 F、酸化アルミニウム Al_2O_3 が知られている[4-26]-[4-29]。それぞれのドーパントによる音速の変化を図 4.8 に示す。またドーパント添加による屈折率変化(波長 0.5893 μm)を図 4.9 に示す。 GeO_2 、 P_2O_5 、 TiO_2 、 B_2O_3 、F の添加は音速を下降させ、 Al_2O_3 は上昇させる。また、 GeO_2 、 P_2O_5 、 TiO_2 、 Al_2O_3 は屈折率を上昇させ、 B_2O_3 、F は下降させる。これらのドーパントの特性を考慮して、添加量を決定しブリルアン周波数シフトを制御する。

4.5.2 光ファイバコアドーパント設計

まず利用するドーパントについて検討する。 TiO_2 は、 Ti^{3+} のような還元種が生成しやすいこと等により、必ずしも低損失な光ファイバを得ることは容易ではないこと[4-26]、また Al_2O_3 は GeO_2 に代わる安価なドーパントとして検討されたが、製造が容易では無いことから、通常の光ファイバでは GeO_2 がドーパントとして利用されている。ブリルアン周波数の微小なシフト制御には、通常シングルモードファイバ(SMF)に添加されている GeO_2 を高濃度添加すれば BFS の制御は可能である。しかし、屈折率を上昇させる GeO_2 のみの制御を行った場合、ドーパント濃度による光ファイバの閉じこめ効果を考慮するとモードフィールド径(MFD)の縮小を生じ、SMF との接続損失を増加させる。導波構造に対して、コアとクラッドの屈折率をそれぞれ n_{core} 、 n_{clad} とすると比屈折率差 Δ は以下で表される[4-30]、

$$\Delta = \frac{n_{core}^2 - n_{clad}^2}{2n_{core}^2} \approx \frac{n_{core} - n_{clad}}{n_{core}} \quad (4-4)$$

また、比屈折率差から求められる MFD 及び、MFD の不一致による損失 $Loss$ は以下の式で表

せる

$$Loss = \left(\frac{2W_B W_{SM}}{W_B^2 + W_{SM}^2} \right)^2 \exp \left[-\frac{2d^2}{W_B^2 + W_{SM}^2} \right] \quad (4-5)$$

W_B, W_{SM}, d はそれぞれコア濃度を制御した光ファイバ, SMF の MFD, 軸ずれであり, W は以下の式を用いて Δ から導くことができる.

$$v = vc \frac{\lambda c}{\lambda} \quad (4-6)$$

$$a = \frac{W}{0.65 + 1.619v^{-1.5} + 2.879v^{-6}} \quad (4-7)$$

$$\Delta = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda c vc}{2\pi a n} \right)^2 \quad (4-8)$$

$v, vc, \lambda c, \lambda, a, n$ はそれぞれ, 規格化周波数, 規格化カットオフ周波数, カットオフ波長, 測定波長, コア径であり, SMF の Δ を 0.35% として接続損失を計算した. 接続する 2 本のファイバの中心軸ずれ d が 0 および 1.6nm としたときの接続損失計算結果を図 4.10 に示す. 一般的にアクセス系で用いられるシングルモード光ファイバは, コアに GeO_2 を 3.5 wt% 程度添加してコアとクラッドの比屈折率を約 0.35% としている. GeO_2 の添加濃度を 1wt% 高くするとブリルアン周波数シフトを 100MHz 程度ダウンさせる[4-28]. ここで 1GHz 近いブリルアン周波数シフト量制御を行うためには, GeO_2 添加濃度が 14 wt% 以上つまり 1.4% 以上の Δ 制御が必要となる. しかし, GeO_2 のみ高添加制御すると, Δ が 0.35% から離れるほど接続損失が増加する. 例えば接続損失の上限を 0.5dB, ITU-T G.652 より 1 ファイバあたりの軸ずれを 0.8nm とすると, Δ は 0.178% より 0.568% の範囲に収める必要があり, GeO_2 単独添加では目標とする周波数制御が困難である. ここで, 屈折率を維持しつつ添加量を調整し, 接続損失に影響せずブリルアン周波数シフトの制御が可能な方法として, 屈折率を低下させる F を共添加することを検討した.

光ファイバへの添加濃度とブリルアン周波数シフトの関係について述べる. 石英の場合, ドーパントの濃度が低いときでは, 音速及び屈折率はドーパント濃度に比例して変化し,

$$n = n_0 + \alpha X \quad (4-9)$$

$$V_L = V_{L0} + \beta X \quad (4-10)$$

のように表される. ここで α, β はドーパント量に対する屈折率及び音速変化, X はドーパント

の濃度(wt%)である。また、多成分ガラスの音速、屈折率は加成則であり、

$$\sum_{i=1}^m k_i \cdot c_i \quad (4-11)$$

で表される[4-26]。ここで、m は成分数、 k_i , c_i は i 番目の成分の屈折率に対する寄与率と濃度である。よって GeO_2 , F を共添加した 2 成分系では、 α , β を実験定数として

$$n = n_0 + \alpha_{\text{GeO}_2} \cdot \text{wt}_{\text{GeO}_2} + \alpha_F \cdot \text{wt}_F \quad (4-12)$$

$$V_L = V_{L0} + \beta_{\text{GeO}_2} \cdot \text{wt}_{\text{GeO}_2} + \beta_F \cdot \text{wt}_F \quad (4-13)$$

で求めることができる。

最も代表的なドーパントである GeO_2 と F は石英ガラスの粘度を低下させるが、F の方がその効果は大きく、単位屈折率変化あたりの粘度変化量(粘度係数)で比較すると、F は GeO_2 の約 3 倍である。このときの光ファイバの比屈折率、 GeO_2 及び F を共添加させた光ファイバの音速は下記で表せる [4-29]、

$$\Delta = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{(1 + 1.0 \times 10^{-3} w_{\text{GeO}_2} - 3.3 \times 10^{-3} \cdot w_F)} \right\} \quad (4-14)$$

$$V_L = 5944(1 - 7.2 \times 10^{-3} w_{\text{GeO}_2} - 2.7 \times 10^{-2} w_F) \quad (4-15)$$

図 4.11 に式 (4-15)を用いた、 GeO_2 及び F 添加濃度に対するブリルアン周波数シフトの計算値を示す。図中に示す実線は SMF の Δ を 0.35% とし、この比屈折率を保つために GeO_2 と F を 3.3:1 の割合で添加量を増加させたときの共添加の目標値である。この実線からドーパントの配分率が離れるほど SMF との接続損失が増加することになる。

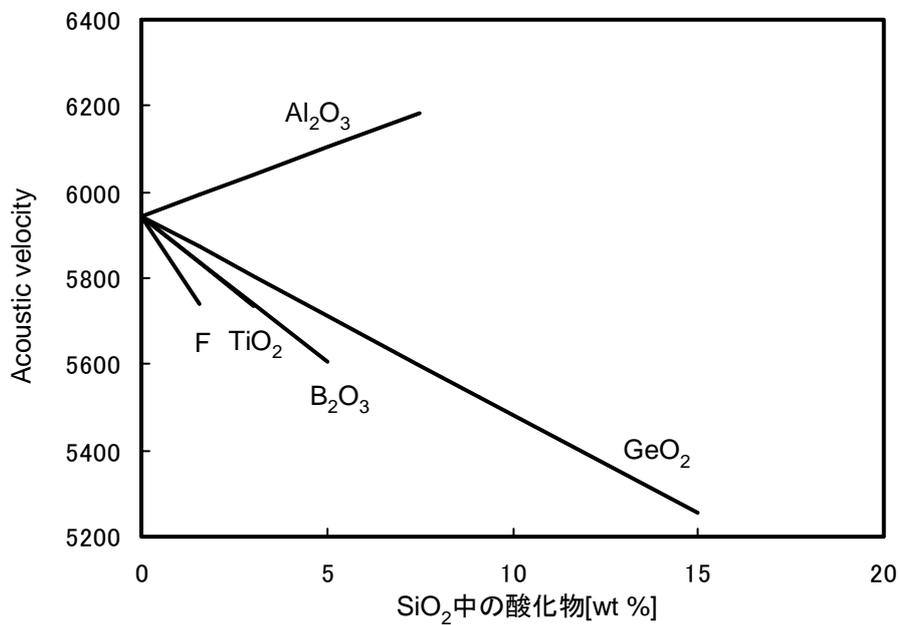


図4.8ドーパント濃度によるシリカガラスの音速変化
(ただしAl₂O₃はmol%)

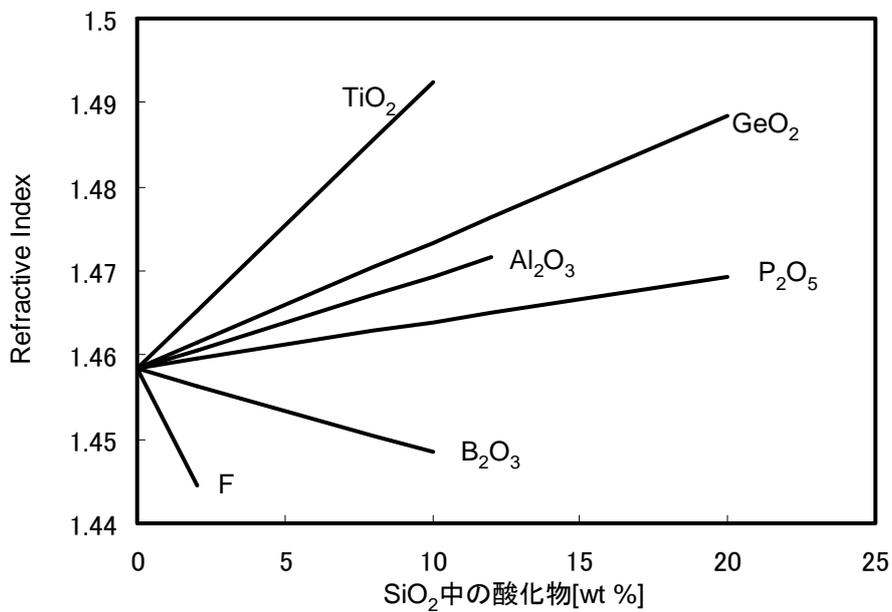


図4.9ドーパント濃度によるシリカガラスの屈折率変化

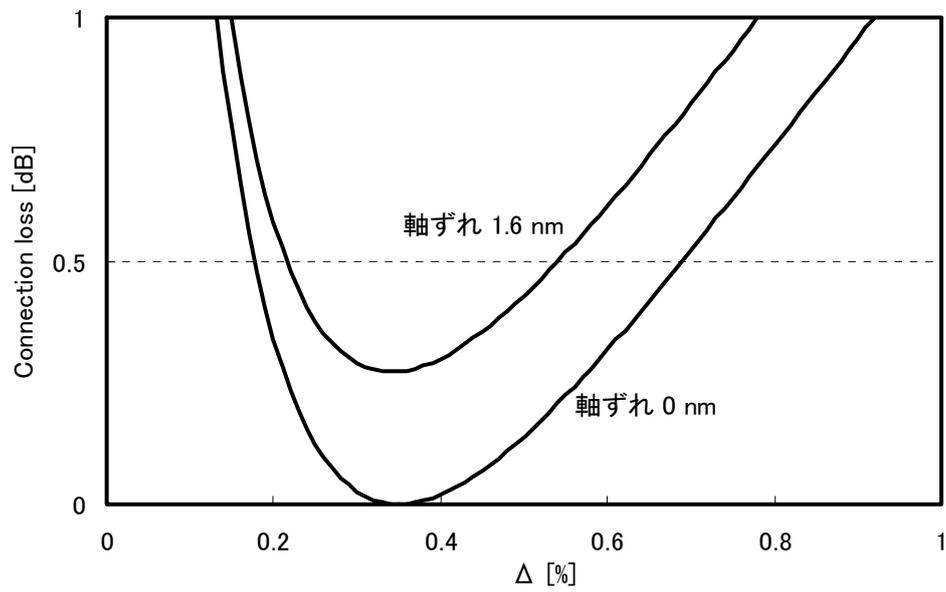


図4.10 比屈折率に対するシングルモードファイバとの接続損失

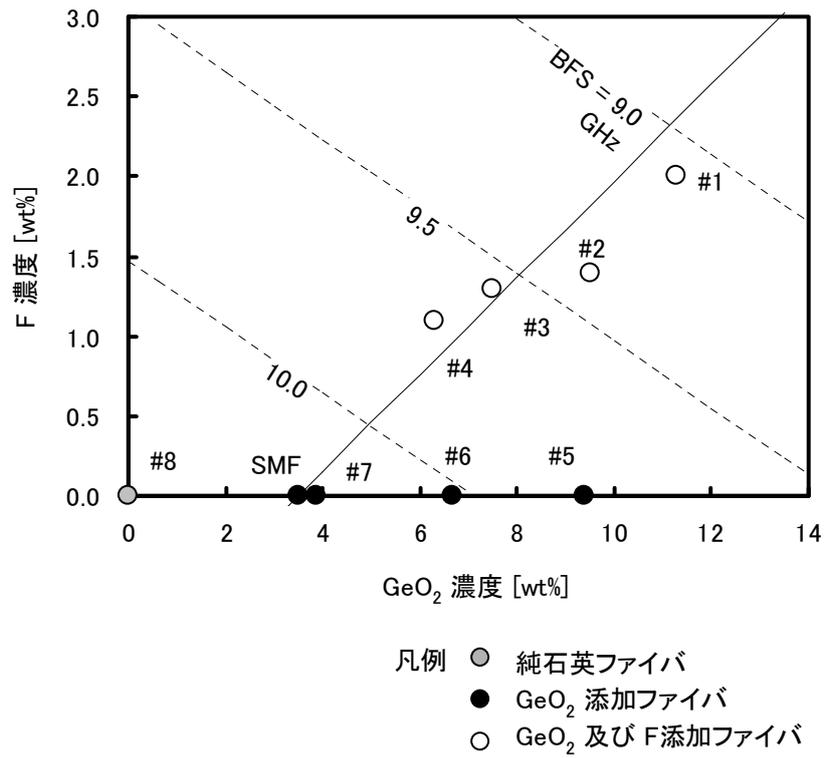


図4.11 光ファイバコアに添加した GeO_2 及び F の濃度に対する光ファイバで発生するブリルアン周波数シフト

4.6 ブリルアン周波数シフト制御ファイバ

4.6.1 ブリルアン周波数シフト制御ファイバ評価

分岐線路下部に適用するブリルアン周波数シフト制御ファイバとしては以下3種類を検討した。

- ・純石英ファイバ
- ・GeO₂シングルドーパント制御ファイバ
- ・GeO₂, F共添加ファイバ

純石英ファイバは、コアに純石英、クラッドにFを添加して屈折率を下げることにより導波構造を形成し、コアのドーパントによるレイリー散乱を低損失化させた超長距離伝送用ファイバで実用化されている。またGeO₂シングルドーパント制御ファイバは、製造の容易な通常SMFと同じドーパントを用いたもので、コアの屈折率分布をグレーデッドインデックス型にすることでMDF縮小を緩和させる検討を行い、最も単純なGeO₂制御のみで得られるブリルアン周波数シフト制御の下限を確認した。またGeO₂・F共添加ファイバは4.5節による設計に基づき、VAD法によるF添加の限界である $w_F=2.0$ wt%まで検討を行う。試作したブリルアン周波数シフト設計ファイバの屈折率プロファイルを図4.12-14に示す。

図4.12は純石英コアファイバについて比屈折率差0%はクラッドを基準として測定したものであり、コア部が純石英のステップインデックス形状であった。この純石英ファイバのブリルアン周波数シフトを、測定周波数 1650 nm を用いて測定したところ、石英ガラスの音響速度5944m/sで発生する周波数シフト10.435GHzが得られた。

また、図4.13はGeO₂シングルドーパント制御ファイバであり、10.0095, 9.990, 9.825GHzの周波数シフトを得た。屈折率プロファイルピークから計算できるGeO₂の濃度は3.88wt%(Step index), 6.68wt%(Step index), 9.38wt%(α 値:2)であり、図4.11にプロットしたところブリルアン周波数シフトの測定結果とよく一致した。図4.10で計算したステップインデックス型では最大6%程度であったが、コア屈折率分布をグレーデッド型にすることでMFDはそれぞれ10.3, 7.6, 6.9 μ mに縮小を緩和させ、約0.5dBの接続損失においてSMFより0.45GHzの周波数シフトまで実現することができた。

図4.14はSMFと同等のMFDとなるように GeO₂とFを共添加したファイバの屈折率プロファイルである。共添加ファイバの製造方法として、VAD法によりGeを添加したコアのみを作成し、そこへフッ素を添加してスートガラス化し、さらに石英のみのクラッドを添加する手法を用いた。このためクラッドに屈折率が下がるデプレスト層が生じている。屈折率プロファイルは

GeO₂による屈折率上昇とFによる下降が重畳して計測されたものである。計測されたブリルアン周波数シフト, 9.730, 9.535, 9.380, 9.055GHzと接続損失並びにMFDより, コア添加物濃度を計算すると(GeO₂, F)濃度はそれぞれ(6.3, 1.1), (7.5, 1.3), (9.5, 1.4), (11.3, 2.0) wt% となり, Fの添加上限まで適用したブリルアン周波数シフトファイバを作成し, 最大1.5GHzの周波数シフト制御を得ることができた。

試作ファイバのパラメータを表4.3に示した。w_Fとw_{GeO₂}の添加比はほぼSMFにおける比屈折率と同等の値に作製でき接続損失は0.2dB以下であった。伝送損失は#1を除いて0.26~0.5dB/kmであり, 高濃度添加ファイバではドーパントによる散乱により通常SMFより損失が上昇している。#1のファイバでは伝送損失が高く, 1.91dB/kmであったが, これは高濃度に添加した場合に発生するGe-Fの化合物生成によるガラス中の泡によるものと考えられる。ブリルアン周波数シフト制御ファイバの伝送損失はSMFよりも高いが, 適用範囲を考慮すると, 分岐線路より下部の光ファイバ線路長は長くとも1km程度であるため, 0.数dB程度の損失上昇による影響は殆ど無視できると考えられる。

また, 図4.15にドーパント濃度, 温度に対するブリルアン周波数のスペクトラム幅と散乱光パワーを示す。低温になるに従い, またドーパント濃度が高くなるに従ってスペクトラム幅は増加した。これはブリルアン散乱が生じる際に音響フォノンによる分子振動幅が小さくなるためと考えられる。試作したファイバではコアへの高濃度添加により5MHz, 温度変化により±3MHz程度のスペクトラム広がり確認された。また, 図4.16にドーパント濃度, 温度に対するブリルアン周波数のシフト量を示す。温度変化における周波数シフトはドーパント濃度によらず1.2MHz/°C (1.1MHz/°C@1550nm)とSMFと同等であり, ファイバ中の添加濃度に対して周波数シフトは依存性が殆どみられなかった。

ドーパント濃度や温度変化によるスペクトル幅のFWHM広がり考慮すると, 4.4にて議論した周波数セパレーション120MHzに対して, さらに10MHz程度の周波数間隔が必要となる。また, ブリルアン周波数シフトの適用においては, 製造における周波数のばらつきも考慮する必要がある。今回作成したブリルアン周波数シフト制御ファイバでは最大1.5GHzの制御を実現しており, これを8分岐線路の周波数制御に用いる場合には200MHz以上の帯域が確保可能となる。以上より, 共添加ファイバ技術を適用することで, 分岐線路を識別するブリルアン周波数シフトファイバが実現可能であることを示した。

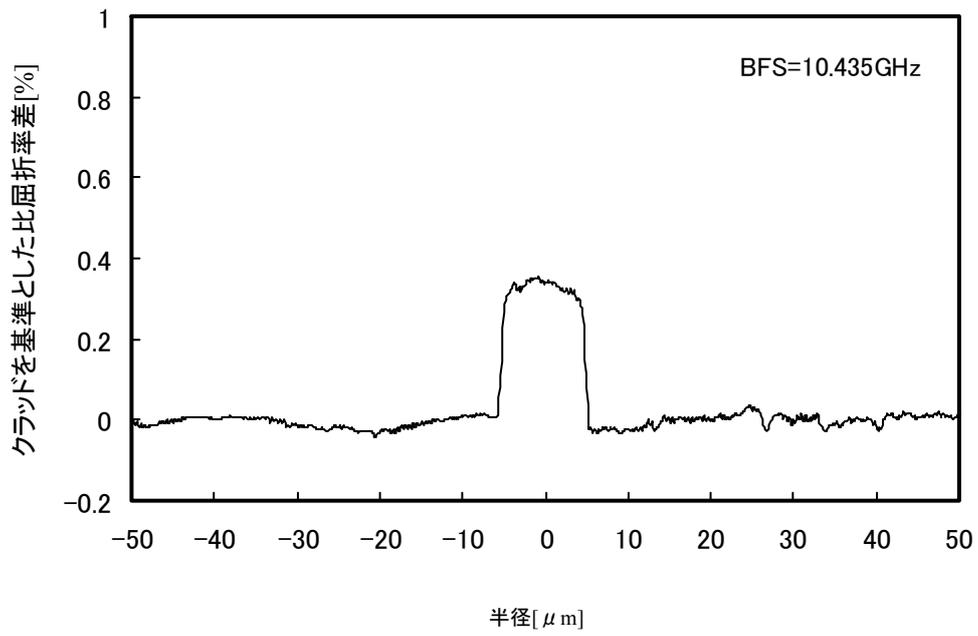


図4.12 光ファイバの屈折率プロファイル (純石英ファイバ)

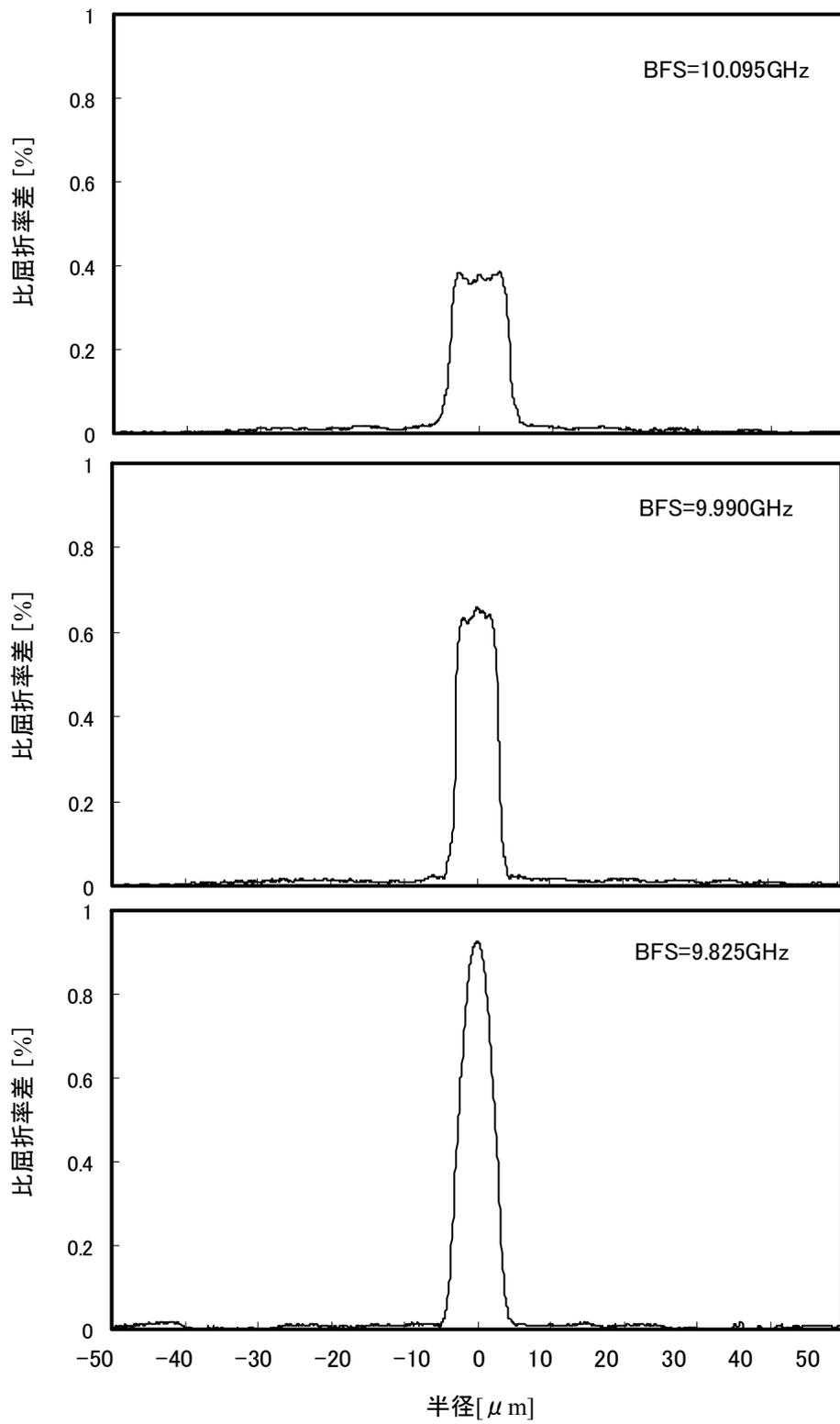


図4.13 光ファイバの屈折率プロファイル (GeO₂添加ファイバ)

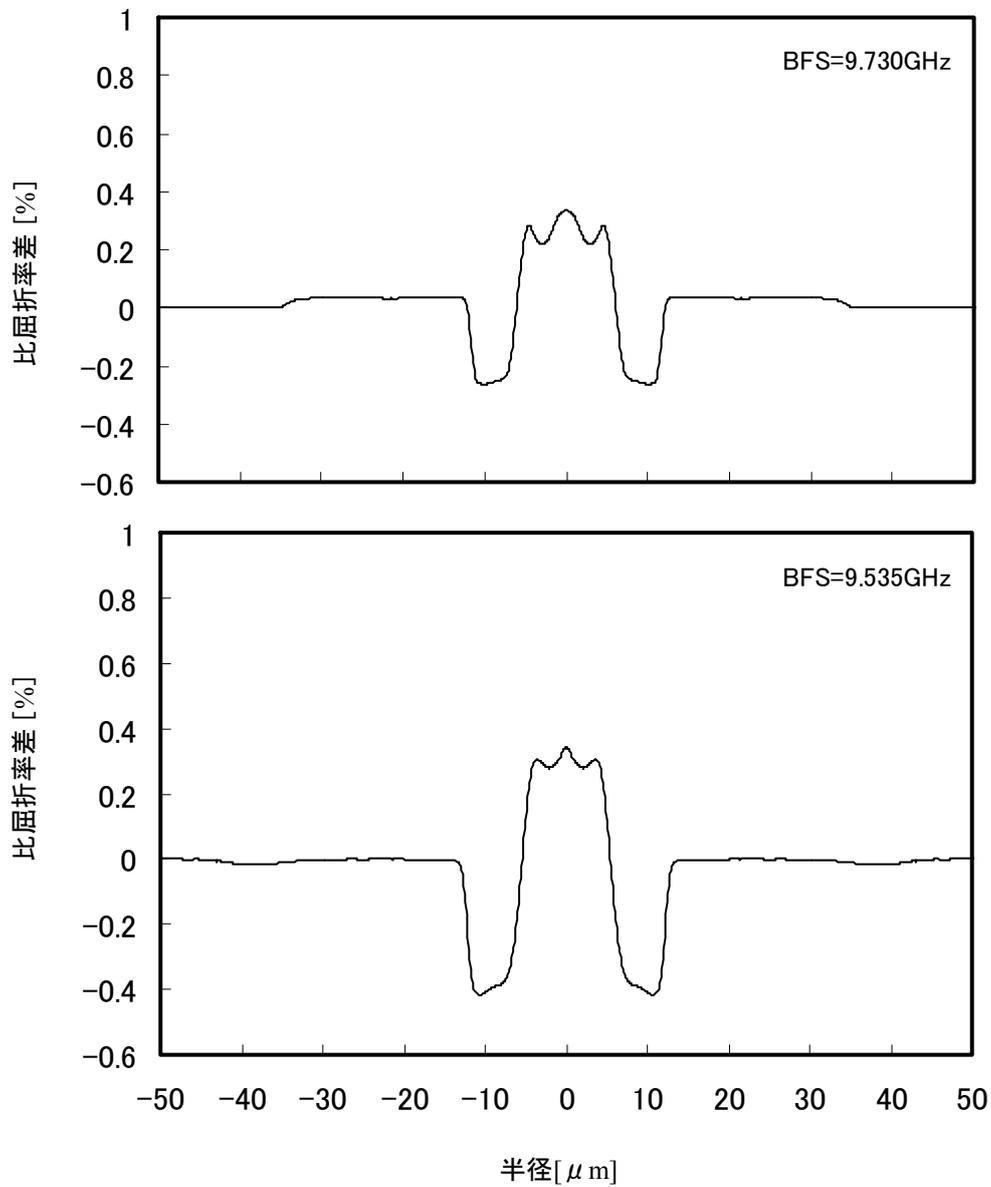


図4.14 a) 光ファイバの屈折率プロファイル (GeO₂・F共添加ファイバ)

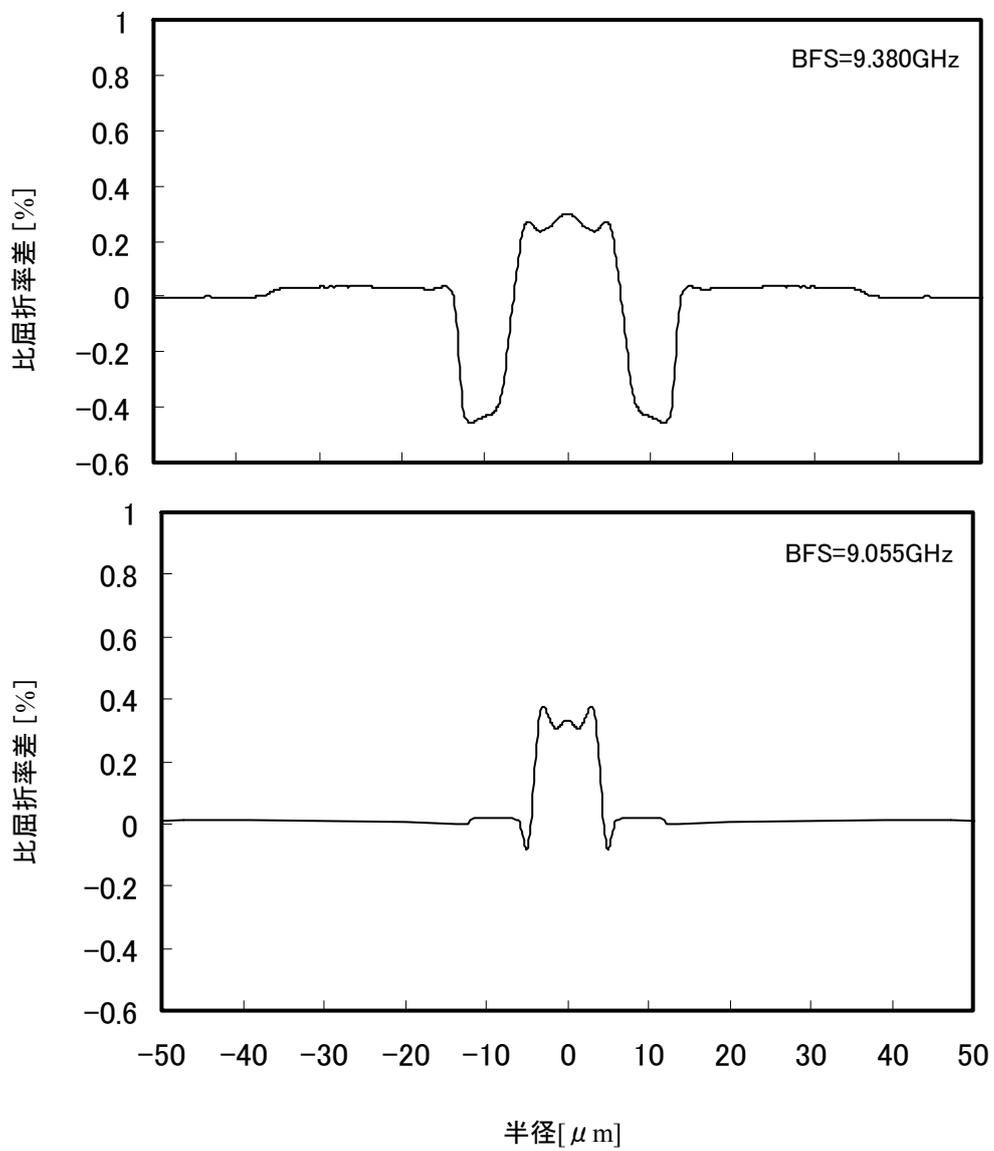


図4.14 b) 光ファイバの屈折率プロファイル (GeO₂・F共添加ファイバ)

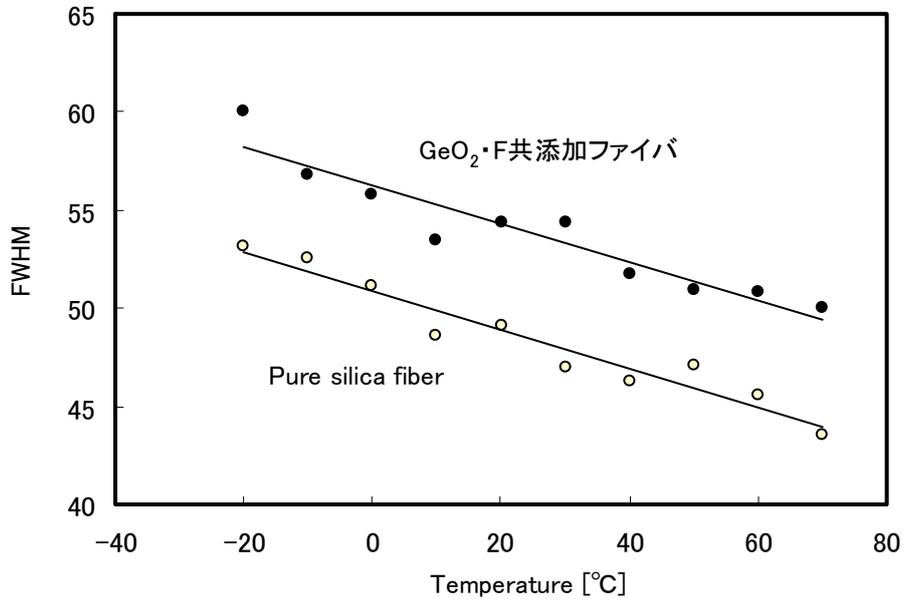


図4.15 添加濃度, 温度に対するブリルアン周波数スペクトラム幅

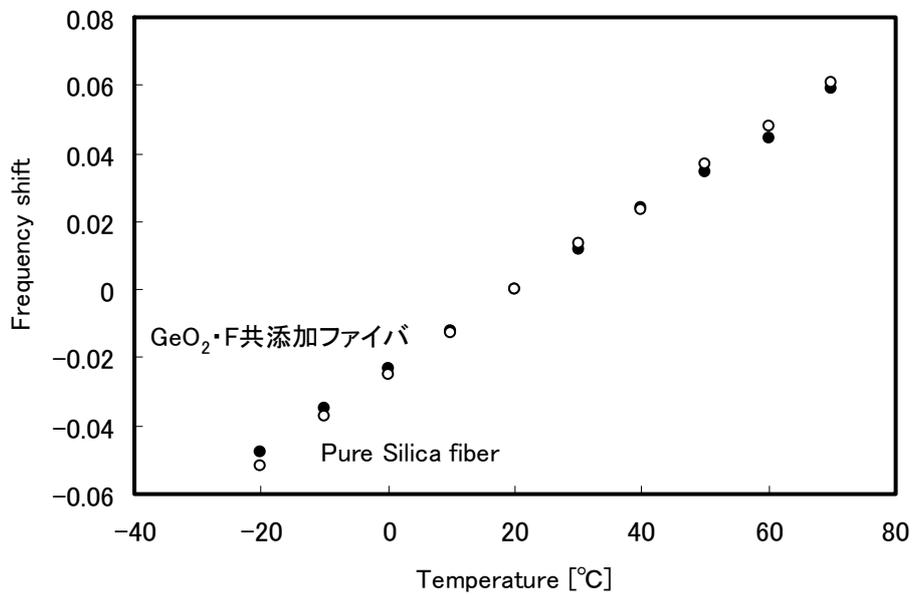


図4.16 添加濃度, 温度に対する周波数シフト

4.6.2 分岐線路の散乱信号識別

ブリルアン周波数シフト制御ファイバを用いて光分岐線路下部の散乱信号の識別を行った。実験系を図4.17に示す。図4.11に示した8種類の光ファイバを8分岐光スプリッタに接続し、1650 nm 光源をスプリッタ上部から入射した。スプリッタ下部で発生した散乱光を前述の1650nm光源と光カップラで合波し、スペクトラムアナライザで周波数-パワー特性を測定した。測定したスペクトラムを図4.18に示す。9.0~10.5GHzの間に8ピークを検出することができた。スペクトル間の最小間隔は#3~#4における120MHzであり、4.2において設計したセパレーションを実現することができた。各ピーク間に生じる谷は最小3.2dBであり、光分岐線路より下部に8種類の光ファイバが接続されていることを明確に検出することができた。

本技術の適用範囲として分岐数について考察する。ブリルアン周波数シフトを精度よく設計すると、1.5GHzの制御幅を利用して120MHzのセパレーションでは最大13種類の光ファイバを作成することが可能である。しかし光ファイバネットワークにおける分岐は、等分岐が最も効率よく信号を振り分けることができることから2の倍数で増加するため、所外での分岐数を増加させる場合には2, 4, 8, に続いて16, 32, 64 ...分岐が適用範囲となる。このため、120MHzのセパレーション設計では、本手法による分岐数の対応は8分岐が上限となる。本提案の手法で示した13を肥えたさらなる分岐数の対応としては、1) 光ファイバの設計としてより高濃度添加を実現する製造方法の検討、2) 温度条件の緩和によるセパレーションの圧縮、を行うことによって16分岐程度までの拡張が可能と考えられる。ただし、前述したように光ファイバアクセスネットワークにおける分岐数は、シェアによるコスト分割とユーザ収容効率のトレードオフにより決定されるため、今日のネットワーク設計では所外において8分岐への対応が可能であれば、光アクセスネットワークの監視としては十分であると考えられる。

表4.3 試作したブリルアン周波数付与ファイバのパラメータ

Fiber #	Peak BFS [GHz] at 25°C 1650 nm	Concentrations in optical fiber core [wt%]		接続損失 [dB/pt]	伝送損失 [dB/km] @1550nm
		GeO ₂	F		
1	9.055	11.3	2.0	0.04	1.91
2	9.380	9.5	1.4	0.08	0.48
3	9.535	7.5	1.3	0.18	0.47
4	9.730	6.3	1.1	0.06	0.26
5	9.825	9.38	0	0.47	0.36
6	9.990	6.68	0	0.30	0.22
7	10.095	3.88	0	0.18	0.19
8	10.435	0	0	0.07	0.17

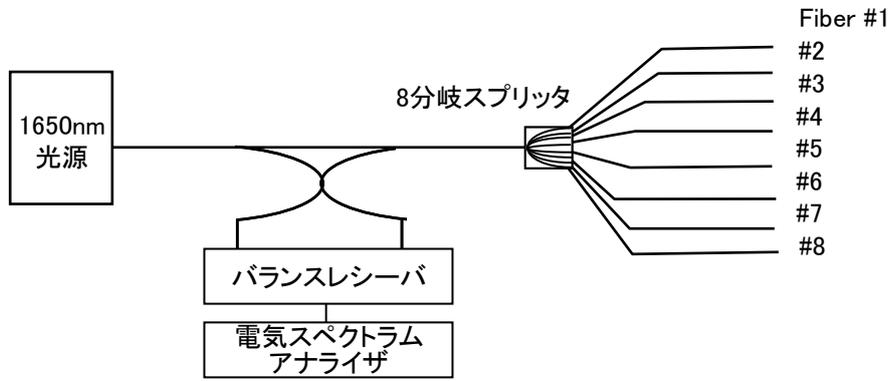


図4.17 1650 nm 試験光に対する8分岐線路下部のブリルアン散乱光測定系

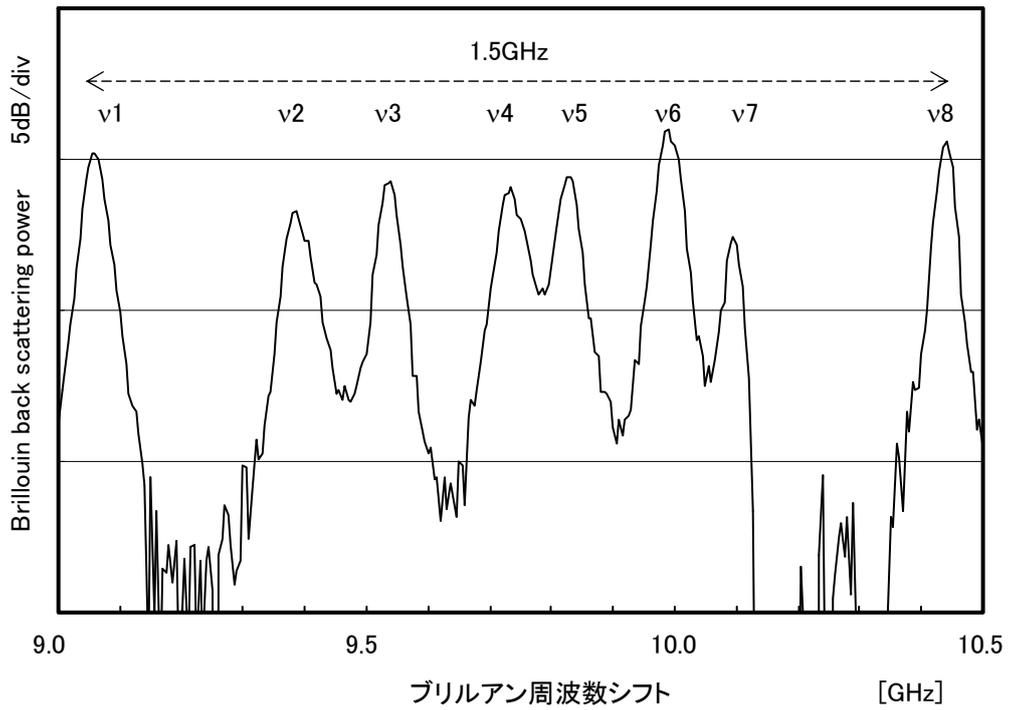


図4.18 8分岐線路のブリルアン散乱光スペクトラム

4.7 結論

第4章では光スプリッタによって光信号が分岐されるそれぞれの光ファイバからの散乱光を分離して識別するために、ブリルアン散乱周波数シフトを各光ファイバに付与することを提案した。付与するブリルアン散乱周波数シフトには、光ファイバ線路で発生する周波数変化擾乱よりも各々のセパレーションを大きく設計する必要があることを考慮し、主に温度と歪みにより発生するブリルアン散乱周波数の擾乱として、それぞれ最大 45°C 、 0.01% と見込み、セパレーションを 120MHz 以上と設計した。この設計により必要となるブリルアン周波数シフトの制御量は、光アクセス網で用いられている8分岐線路への適用を目標として 840MHz 以上の周波数制御を目標設定した。

ブリルアン散乱周波数シフトの広帯域制御を実現するにあたり、安定的かつデバイス構成がシンプルな手段として光ファイバコアドーパントの調整による制御を検討した。広い周波数シフト制御を実現するために、純石英ファイバ、 GeO_2 シングルドーパント制御ファイバ、 $\text{GeO}_2 \cdot \text{F}$ 共添加ファイバの3種類を検討し、さらに一般的にアクセス系で用いられるシングルモード光ファイバとの接続損失抑制を考慮した制約条件を設定した。 GeO_2 の添加濃度を $1\text{wt}\%$ 高くするとブリルアン周波数シフトを 100MHz ダウンさせるが、 1GHz 近いシフト量制御を行う為には、 GeO_2 添加濃度が $14\text{wt}\%$ 必要となり、一方で GeO_2 の高添加は比屈折率差を増大させ MFD が縮小してしまうため接続損失が劣化する。これを回避するために、屈折率を減少される F を GeO_2 に共添加する設計を行った。VAD法による F 添加の限界である $2.0\text{wt}\%$ とシングルモードファイバと同等のコア屈折率となる GeO_2 $11.5\text{wt}\%$ を添加した光ファイバを作製し、最小周波数シフト 9.0GHz を実現した。またクラッドに F を添加した純石英コアファイバのものは、最大 1.5GHz の周波数シフト制御を得ることができた。このブリルアン周波数シフト制御技術を用いて8種類の周波数シフト付与ファイバを8分岐光スプリッタ下部にそれぞれ接続し、各光ファイバからの散乱光が識別できることを確認した。

文献

- [4-1] Y. Koshikiya, N. Araki, H. Izumita, F. Ito, "Simple and Cost-effective Fault Location Technique Using Bi-directional OTDR and In-service Line Testing Criteria for PONs", in Proc European Conference and Exhibition on Optical Communication 2005, vol.1, Mo 4.3.2, 2005.
- [4-2] 鈴木, 荒木, 夏目, 小澤, "PONにおける所外スプリッタ下部故障位置探索用OTDR", 2008年電子情報通信学会 総合大会, B-10-7, 2008年3月
- [4-3] I. Sankawa, S. Furukawa, Y. Koyamada, H. Izumita, "Fault location technique for in-service branched optical fiber networks", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 2, no. 10, October 1990, pp 766-768, 1990.
- [4-4] F. Yamamoto, S. Furukawa, Y. Suda, Y. Koyamada, "Fault Isolation Technique Using High Resolution 1.6 μ m-band OTDR for Passive Double Star Networks", IEEE Workshop on Optical Access Networks, 6, 1994
- [4-5] J. Laferriere, M. Saget, and A. Champavere, "Original method for analyzing multipaths networks by OTDR measurement", in Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC) '97, TuT4, pp.99-101, 1997
- [4-6] N. Araki, Y. Enomoto, N. Tomita, "Improvement of fault identification performance using neural networks in passive double star optical networks", in Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC) '98., pp. 223 - 224, 1998
- [4-7] Y. Enomoto, H. Izumita, M. Nakamura, "Over 31.5 dB Dynamic Range Optical Fiber Line Testing System with Optical Fiber Fault Isolation Function for 32-Branched PON" in Proc., Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2003, ThAA3, 2003
- [4-8] F. Yamamoto, I. Sankawa, S. Furukawa, and Y. Koyamada, "In-service remote access and measurement system for passive double star networks", J. Opt. Commun., vol. 16, no. 4, pp. 131-137, Nov. 1993.
- [4-9] K. Tanaka, M. Tateda, and Y. Inoue, "Measuring individual attenuation distribution of passive branched optical networks", IEEE Photon, Technol. Lett., vol.8, no.7, pp915-917, July 1996
- [4-10] N. Tomita, Y. Enomoto, K. Tanaka, T. Kurashima, K. Hogari, S. Furukawa, N. Nakao, "Future targets and technologies for an optical fiber line remote testing system", in Proc., Networks and Optical Communications (NOC) '97, pp. 209-217, 1997.
- [4-11] Y. Inoue, A. Himeno, K. Moriwaki, and M. Kawachi, "Silica-based arrayed-waveguide grating circuit as optical splitter/router", Electron. Lett., vol. 3, no. 9, pp. 726-727, Apr. 1995.
- [4-12] Y. Hibino, F. Hanawa, H. Nakagome, M. Ishii, and N. Takato, "High reliability optical splitters composed of silica-based planar lightwave circuits", J. Lightwave Technol., vol. 13, no. 8, pp. 1728-1735, 1995.
- [4-13] T. Pfeiffer, J. Hehmann, H. Schmuck, W. Freude, J. Vandewege, Hiroki Yanagisawa, "Monitoring and protecting the optical layer in FTTH networks", in Proc. the FTTH Conference and Expo, Las Vegas, Nevada, 3-6 October 2005.
- [4-14] B. Mulder, W. Chen, J. Bauwelinck, J. Vandewege, and X. Qiu, "Nonintrusive fiber monitoring of TDM optical networks", J. Lightwave Technol., vol. 25, no. 1, pp 305-317, Jan 2007.
- [4-15] F. Caviglia, V. Biase, and A. Gnazzo, "Optical maintenance in PONs," Opt. Fiber Technol., vol. 5, pp. 329-362, 1999.

- [4-16] J. Dakin, D. Pratt, G. Bibby, J. Ross, "Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector", *Electron. Lett.*, vol. 21, no. 13, pp. 569 - 570, 1985.
- [4-17] T. Kurashima, M. Tateda, T. Horiguchi, and Y. Koyamada, "Performance Improvement of a Combined OTDR for Distributed Strain and Loss Measurement by Randomizing the Reference Light Polarization State", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 3, pp. 360-362, 1997.
- [4-18] 大野, 成瀬, 安江, 宮島, 内山, 坂入, 李, "マイクロ波ヘテロダイン検波を用いたBOTDRの開発", *電子情報通信学会技術研究報告. OFT, 光ファイバ応用技術 101(454)*, 7-12, 2001.
- [4-19] H. Naruse, H. Uehara, T. Deguchi, K. Fujihashi, Y. Ishikura, M. Onishi, R. Espinoza, C. Guzman, C. Pardo, C. Ortega, M. Pinto, and F. Galvez, "Underground Mine Monitoring Using Distributed Fiber Optic Strain Sensing System", *Optical Fiber Communication Conference (OFC)-18, ThD5*, 2006.
- [4-20] M. Tachikura, K. Mine, H. Izumita, S. Uruno, and M. Nakamura, "Newly developed optical fiber distribution system and cable management in central office", in *Proc. International Wire & Cable Symp. (IWCS) 2001*.
- [4-21] 井上, 石井, 肥田, 柳澤, 榎本, "FTTHを支える光アクセス用PLC技術", *NTT技術ジャーナル* 2005.5, pp16-19, 2005.
- [4-22] T. Horiguchi, "Development of a Distributed sensing Technique Using Brillouin Scattering", *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 7, pp1296- 1302, July, 1995.
- [4-23] H. Izumita, T. Horiguchi, and T. Kurashima, "Distributed sensing technique using Brillouin scattering", *Optical Fiber Sensors (OFS) 12th, OWD1-1*, 1997.
- [4-24] J. Kawataka, K. Hogari, H. Iwata, H. Hakozaiki, M. Kanayama, H. Yamamoto, T. Aihara, and K. Sato, "Novel optical fiber cable for feeder and distribution sections in access network", *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, no. 3, Mar. 2003, pp. 789-796, 2003.
- [4-25] "Characteristics of a single-mode optical fibre cable", *ITU-T Recommendation G-652*, Oct., 2000.
- [4-26] 葛生, "非晶質シリカ材料応用ハンドブック", *リアライズ理工センター*, 1995.
- [4-27] C. K. Jen, A. S. Jazi, and G. W. Farnell, "Leaky modes in weakly guiding fiber acoustic waveguides," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. UFFC-33, no. 6, p. 634, Nov. 1986.
- [4-28] M. Nikles, L. Thevenaz, P. Robert, "Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers", *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 10, pp. 1842 - 1851, 1997.
- [4-29] Y. Koyamada, S. Nakamura, H. Sotobayashi, and W. Chujo, "Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers," *J. Lightw. Technol.*, vol. 22, no. 2, p. 631, Feb. 2004.
- [4-30] D. Marcuse, "Loss analysis of single-mode fiber splice," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 56, no. 5, pp. 703-718, 1977.

第5章

光分岐線路のインサービス試験

5.1 緒言

本章では、分岐線路下部のインサービス試験を行うにあたり、U-band 試験波長を光源としてもつ 1650nm 波長 B-OTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) の技術とその適用範囲について明らかにし、光アクセスサービスで主流である GE-PON への適用を図る。4章で確立したブリルアン周波数シフト制御光ファイバを分岐線路下部それぞれに割り付け、1650 nm B-OTDR によって、固有のブリルアン散乱周波数シフト信号を識別し、更にこの散乱信号のパワー分布を時分割して検出することで、光スプリッタより下部の光ファイバ長、さらには光ファイバに発生する損失と位置の検出についてデモンストレーションを行う。さらに光ファイバが敷設される外部環境、特に温度において発生する周波数変動ノイズの抑制について検討する。また本試験方法を用いて GE-PON 伝送システムに対してインサービス試験実行可能であることを確認するために、試験光遮断フィルタを設計・実装し、B-OTDR 試験に対する伝送品質に劣化の有無について評価を行う。

5.2 ブリルアン OTDR の基本原理

光ファイバ分岐線路で発生するブリルアン散乱光をモニタするために B-OTDR 技術を用いる [5-1]-[5-3]。B-OTDR は OTDR と同様に光ファイバにパルス光を入射し、散乱光を計測するが、ブリルアン散乱光はレイリー散乱光の検出よりもさらに 15dB 微弱な信号であり、これを検出するためにはコヒーレント検波技術を用いる。ブリルアン散乱光測定の基本構成を図 5.1 に示す。LD からの連続光(CW)信号をプローブ光と参照光に分岐し、プローブ光は変調器にてパルス化した後光増幅器を用いて増幅する。光ファイバに入射したプローブ光はブリルアン散乱光を発生させ、ブリルアン後方散乱信号は、カプラにより参照光と合波され、PD で受光する。このとき、PD で得られるビート信号は試験光信号と散乱光信号の差分であるから、つまり約 10GHz 程度の信号となる。ここで得られた電気ビート信号は、さらに散乱光信号成分の周波数スペクトラムを検出するため電気段にローカルオシレータとのミキシング信号を検出する回路を設置する。検出信号は加算回路によって積算され、ブリルアン散乱波形が得られる。各距離位置におけるブリルアン散乱光のスペクトル波形は、ローカルオシレータによってミキサ信号を僅かに変化させながら、繰り返し測定した複数のブリルアン散乱波形から求まる。光ファイバ各距離位置におけるブリルアン散乱光シフトピークは予め設計したブリルアン周波数に基づいて検出し、光ファイバ各々で発生する固有ブリルアン散乱信号を分布的に測定する。

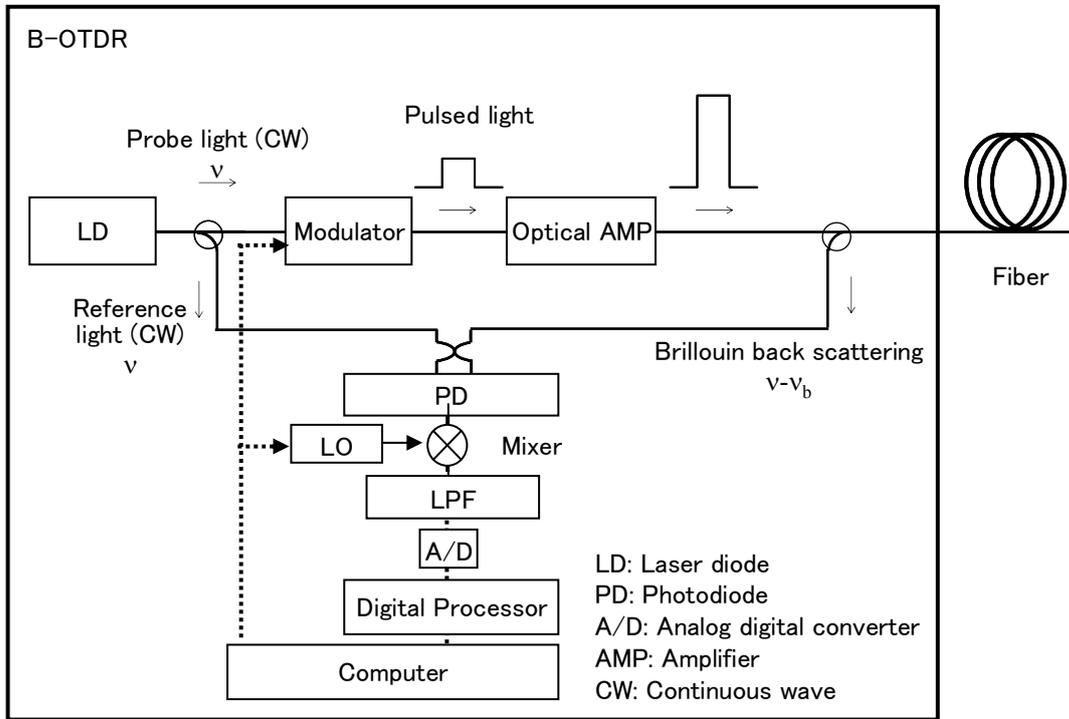


図 5.1 B-OTDR の基本構成

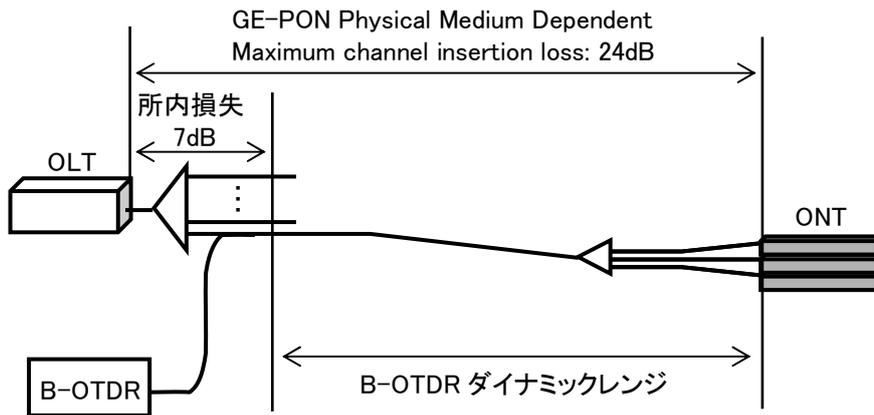


図 5.2 B-OTDR 必要ダイナミックレンジ

5.3 B-OTDR 試験システムパフォーマンス

ブリルアン散乱光モニタによる分岐線路下部の遠隔監視を実現可能とするために、B-OTDR が計測可能なダイナミックレンジ及び、光ファイバアクセスネットワークの損失について議論し、提案した試験システムの適用範囲について述べる。

B-OTDRのsingle-way ダイナミックレンジ (SWDR) 設計において、B-OTDRの試験光パルスパワーは線路に入射する際に光試験モジュールによる損失を受けるが、以下測定器のダイナミックレンジ設計においては、試験光出力を通信光と合波した後の設計とし、光試験モジュールの損失項を含まない。従来の歪みと温度を測定するB-OTDRのSWDRは以下の式で示される [5-2].

$$SWDR = \frac{1}{2} (Pt + BS + Ts - Lc - R_{min} + \frac{SNIR_{ave}}{2}) \quad (5-5)$$

ただし

$$BS = 10 \log(0.5 \alpha_b S W v o) \quad (5-6)$$

$$Ts = 10 \log \frac{2B}{\pi \Delta v} \quad (5-7)$$

$$R_{min} = Bhv / \eta \quad (5-8)$$

ここで Pt は入射試験光のピークパワー、 Lc は B-OTDR の出射端に設置した 1:1 カプラの損失、 R_{min} は photo diode の受光感度である。 BS は Brillouin scattering coefficient である。 α_b は $7.1 \times 10^{-30} / \lambda^4 \text{ m}^{-1}$ で与えられるブリルアン後方散乱係数である。 Ts はブリルアン散乱光の selection ratio であり、ブリルアン散乱の一部によって生じる受光パワーの減少を示す。線幅広がりを持つブリルアン散乱信号の周波数を検出する為に、その信号は帯域 $2B$ [Hz] の電気バンドパスフィルタにより必要信号のみ検出する。 $SNIR_{ave}$ は平均化による S/N (signal-to-noise) 比改善を表し、 N 回の平均化により S/N は $\frac{1}{2} \cdot 10 \log \sqrt{N}$ dB 改善される。また、 $W, v o, B, \Delta v, h, v, \eta$ はそれぞれ、パルス幅、光

ファイバ中の光速、受信部の帯域、ブリルアン線幅、プランク定数、光の周波数、光受光部の量子効率である。 R_{min} は微小信号であるブリルアン散乱光を測定する為、コヒーレント検波における受光感度として議論する。信号雑音比は 1 として最小受信感度を設計する [5-4].

文献 [5-1] において、Horiguchi 等は B-OTDR を用いた歪み・温度計測における $SWDR$ ダイナミックレンジ劣化を考慮している。しかし、B-OTDR を用いて分岐線路をモニタする場合には、分岐線路に付与した BFS は互いに重ならないように設計されるため、歪み・温度変動による劣化は非常に小さい。よって、本研究における方法ではダイナミックレンジを大きくとることが

可能であり、これは本方式の大きなアドバンテージである。

測定に必要なダイナミックレンジは、適用する伝送システムが規定する最大線路損失より求める。GE-PONにおける線路構成とデバイス損失を図 5.2 に示す。GE-PON は 1 つの OLT につき最大 32 ユーザを収容するが、設備ビル内に 4 分岐光スプリッタ、ユーザ宅近傍の架空クロージャに 8 分岐光スプリッタを設置する。また、光アクセスネットワークをインサービス試験する為に設置される、試験光を合分波する光試験モジュールは 4 分岐スプリッタによる分岐後に設置されている[5-5]。

PON 分岐線路をモニタするのに必要なダイナミックレンジは、OLT と ONT の最大線路損失から導くことができ、GE-PON の場合は 24dB である[5-6]。この損失には、所内で発生する 4 分岐スプリッタやコネクタ接続の挿入損失約 7dB が含まれており、実質的に B-OTDR に必要とされる *SWDR* は 17dB である。B-OTDR の *SWDR* は試験条件として主にパルスパワー、パルス幅、平均化回数によって決定される。これらのパラメータについては 5.4 で詳説する。

5.4 B-OTDR を用いた光分岐線路下部の監視

5.4.1 B-OTDR ダイナミックレンジ

1650nm B-OTDR が実現可能なパフォーマンスを確認するために、図 5.3 の構成によりダイナミックレンジ測定を行った。10 kHz の狭線幅 DFB レーザにより 1651.3 nm のコヒーレント光源を発生させ、プローブ光と参照光に分配する。プローブ光は Lithium-niobate (LN)変調器によりパルス変調され、TDFFA (Thulium Doped Fiber Amplifier) と Raman から成る 1650 nm 2 段光増幅器により増幅した。TDFFA は Tm^{3+} イオンを添加した ZBLAN ($ZrF_4 \cdot BaF_2 \cdot LaF_2 \cdot LaF_3 \cdot YF_3 \cdot AlF_3 \cdot NaF$) ファイバを用い、1220nm, 49.7mW のポンプ光により $^3H_6 \rightarrow ^3H_5$ を励起し $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$ の 3 準位系遷移を用いた増幅を利用している。TDFによる増幅帯域は 1.75~2.0 μm に自然放出光(ASE)を持つが、クラッドに長波長領域を吸収する Tb^{3+} を添加することで、1650 nm 帯の光増幅器として動作する[5-7]。TDFFA に用いた Tm - Tb 添加ファイバは、コアに Tm 2000 ppm (parts per million)、クラッドに Tb 4000 ppm を添加しており、ファイバ長は 13m、コアとクラッドの比屈折率は 3.7%、コア直径は 1.8 μm であった。発生した自然放出光は 3 nm のバンドパスフィルタと 1650nm 帯のバンド反射フィルタによって抑制し、この構成により高利得且つ低ノイズ光増幅器を構成した。さらに 1650 nm 光 の増幅技術として励起光源 1550 nm 及び、高非線形光ファイバ 1.4 km を用いた Raman AMP を構成し、TDFFA 出力にカスケード接続して試験光入力パワーを非線形効果の生じる入力限界[5-8]まで増幅制御可能な構成とし、1650nm ブリルアン散乱光の測定を可能にした。増幅信号には光増幅器の自然放出光が Continuous wave として出力されているが、この自然放出光は計測時のノイズとなるため、光増幅器の出力部においても LN

変調器を用い時間領域でノイズをカットした。この増幅した光パルスをもつて 3dB カプラで被測定光ファイバに接続し、後方散乱光をヘテロダイン検波した。

以上の構成による B-OTDR でダイナミックレンジを測定した。5.3 節にて述べたように 17dB 以上のダイナミックレンジを実現できれば、GE-PON 分岐線路下部を遠隔監視可能である。B-OTDR の測定条件はダイナミックレンジと距離分解能を勘案して決定する。B-OTDR のダイナミックレンジは OTDR と同様に入力試験光パワーと受光部の感度に依存し、入力試験光パワーは式(5-6)に示されるようにパルス幅が広いほど高い。一方で距離分解能を高くするためにはパルス幅を細くするため、ダイナミックレンジと距離分解能はトレードオフである。さらに B-OTDR では試験パルス幅を狭くすると、ブリルアン増幅係数の低下とブリルアンスペクトル幅の増大が生じ、測定精度が低下するがパルス幅 100ns 程度までは影響が小さい[5-18]。光スプリッタより下部における線路長は長くても 1 km 程度であり、概ね 10m 程度の距離分解能が得られれば、線路設備における架空、ドロップユーザ宅などの故障区間を検出可能であると考えパルス幅条件は 100ns とした。光源の信号帯域は CW 10kHz から変調によって 10MHz 程度に広がるが、ブリルアン周波数スペクトラム幅が数十 MHz 程度であり、200ns 以上のパルスによって測定されたブリルアン周波数スペクトルと同等の結果が得られた。

入力パルスピークパワーは非線形効果の発生による制限を受け、1 μ s 以上では自己位相変調による伝送パルスが歪みを生じ、また 100ns 以下では四光波混合の発生により制限を受ける[5-8]。実際に計測を行ったところ、100ns、27dBm のパルス試験において、波形の歪みが発生した。よって線路入力パルスピークパワーは非線形効果が生じない上限である 26dBm を用いた。

B-OTDR に 10km の Single mode fiber (SMF) と Sp-O(8)、5km の SMF を接続し、SMF の散乱周波数ピークであるブリルアン周波数シフト(BFS) = 10.17 GHz で光ファイバ長手方向におけるパワー分布を測定した。図 5.4 に測定した B-OTDR 波形を示す。平均化回数は 2^{22} とし、入力部からノイズピークまでの差分、 $SWDR = 17.22$ dB を得た。Eq.(5-2)～(5-5) による計算ではダイナミックレンジ 17dB を得る為に、入力パワー 26dBm において必要平均化回数は 2^{12} であったが、計算値より平均化回数を要した。要因としては、2 段構成光増幅器はその大きな Gain に併せて大きな雑音指数を持つため、ASE パワーがレシーバの受光感度を劣化させたことにあり、 $SWDR$ 改善の為に平均化回数を要したためと考えられる。

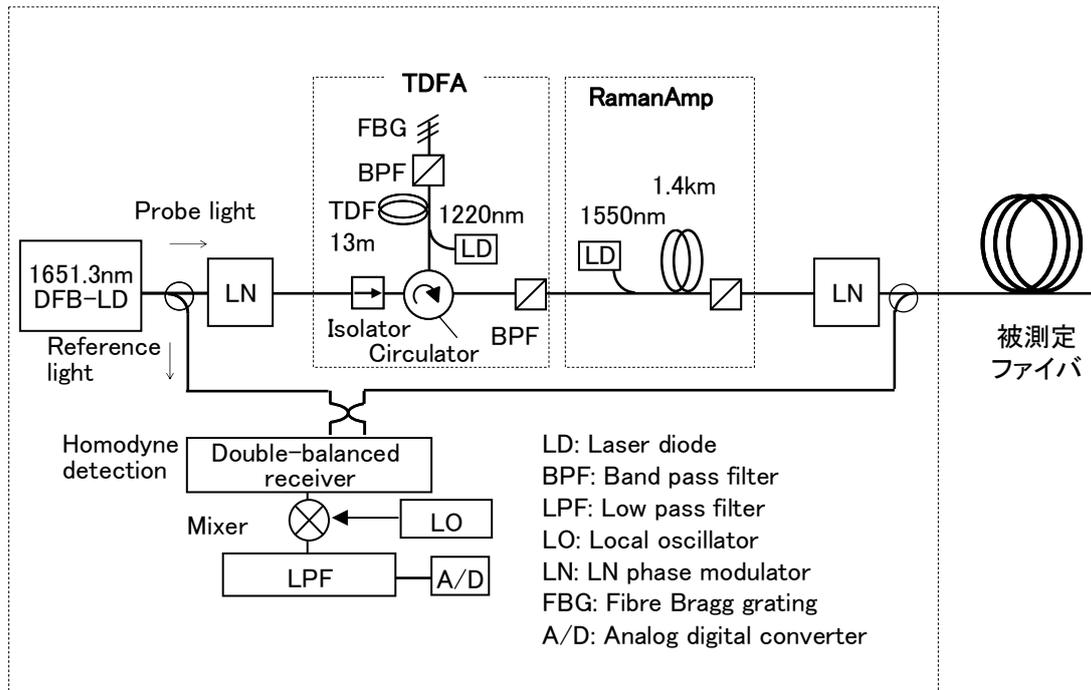


図 5.3 TDFAとRaman光増幅器を用いた1650 nm B-OTDR の構成

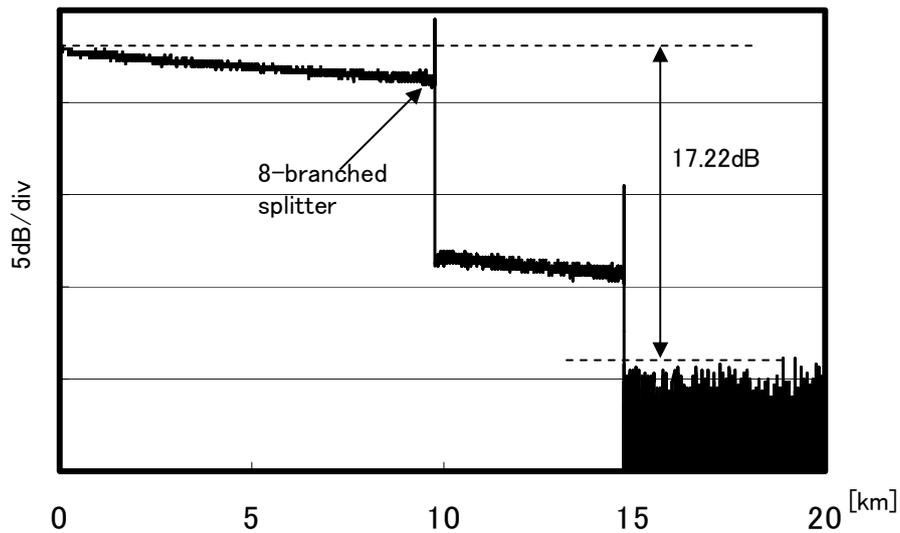


図5.4 パルスピーク26dBm, パルス幅100nsのプローブ光により測定した B-OTDR波形

5.4.2 光分岐線路測定

図 5.4 に示した高ダイナミックレンジ 1650 nm B-OTDR を用い、GE-PON 分岐線路下部モニタの実行性を確認した。実験系を図 5.5 に示す。8 分岐光スプリッタの上部に 500m の SMF とその口元に 1650nm B-OTDR を、WDM カプラを用いて接続し、光スプリッタの下部に図 4.11 に示した#1～8 のファイバを接続した。光ファイバアクセスネットワークにおいては、光分岐線路下部の線路長は長くても 1km 程度であり、また設備区間において電柱設備やドロップ区間は概ね 10m 以上の間隔であるため、故障設備を切り分ける際には 10m の距離分解能が得られる光パルス幅 100ns であれば切り分けが可能であると考えられる。光スプリッタファイバに接続するそれぞれのファイバ長は空間分解能の十倍～程度である 200, 100, 200, 200, 200, 200, 100, 200m とした。

B-OTDR で測定したブリルアン散乱光 3D グラフを図 5.6 に示す。縦軸は散乱光パワー、手前横軸は B-OTDR からの距離、奥行き方向は散乱信号の周波数を示す。0～500m 区間では SMF で生じるブリルアン周波数シフトピークの 10.2 GHz が分布している。500m 地点では試験光が 8 分岐スプリッタによって各スプリッタ下部ファイバに分配され、約 10dB の損失が発生するため、ブリルアン散乱光パワーも低下する。500m より下部の区間では、8 分岐スプリッタ下部それぞれに接続された 8 種類の光ファイバの BFS ピーク(BFS=9.07, 9.40, 9.54, 9.74, 9.84, 9.99, 10.10, 10.40, GHz)がさらに長手方向にそれぞれ分布している。このそれぞれのピークにおける強度分布は、スプリッタ下部に接続したファイバ長に対応している。

光スプリッタ上部と下部ファイバそれぞれのブリルアン散乱光ピークを長手方向に抽出した B-OTDR 波形を図 5.7a) 及び b)～i)に示す。それぞれの光ファイバ長を、個別に確認することができた。さらに分岐線路下部において故障が発生した場合の検出を模擬し、#6 ファイバ光スプリッタより 50m 地点に曲げによる損失を与えて、B-OTDR 波形を比較した。黒線は正常時、青線は故障発生時を示す。図 5.7 g)において履歴波形と取得波形に差分が発生しており、故障した心線番号と故障位置が特定された。パワーメータにより計測した 1650 nm の曲げ損失は 3.0 dB、また B-OTDR 波形から計測した損失は 3.3dB であり、光損失の発生位置および損失を詳細に検出した。

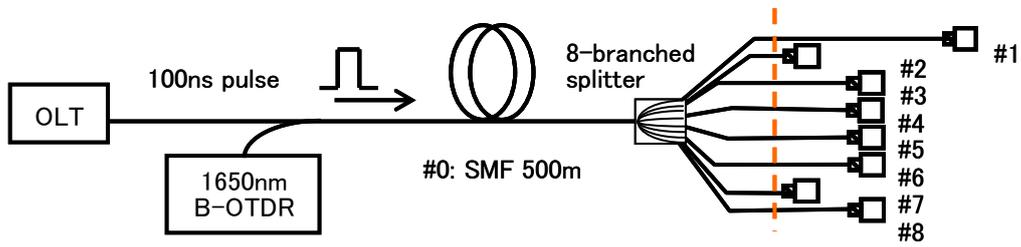


図5.5 B-OTDRを用いた8分岐線路測定

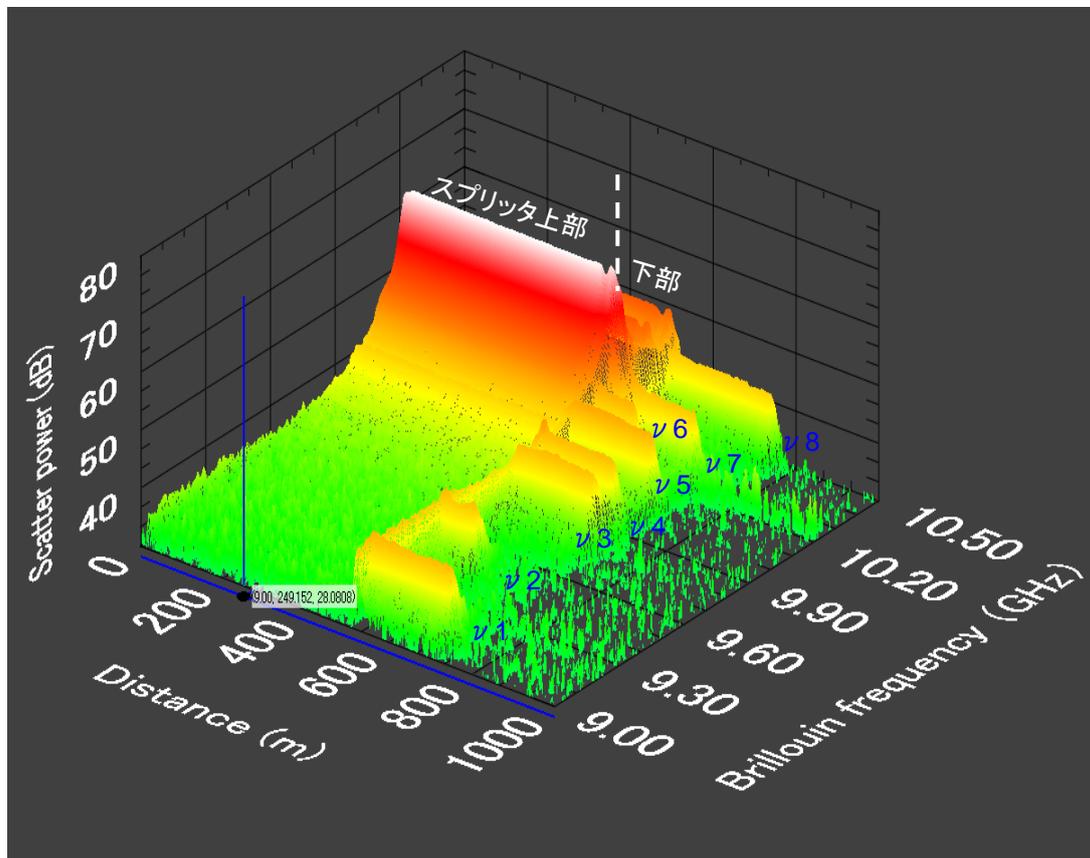


図5.6 B-OTDR波形 (3D)

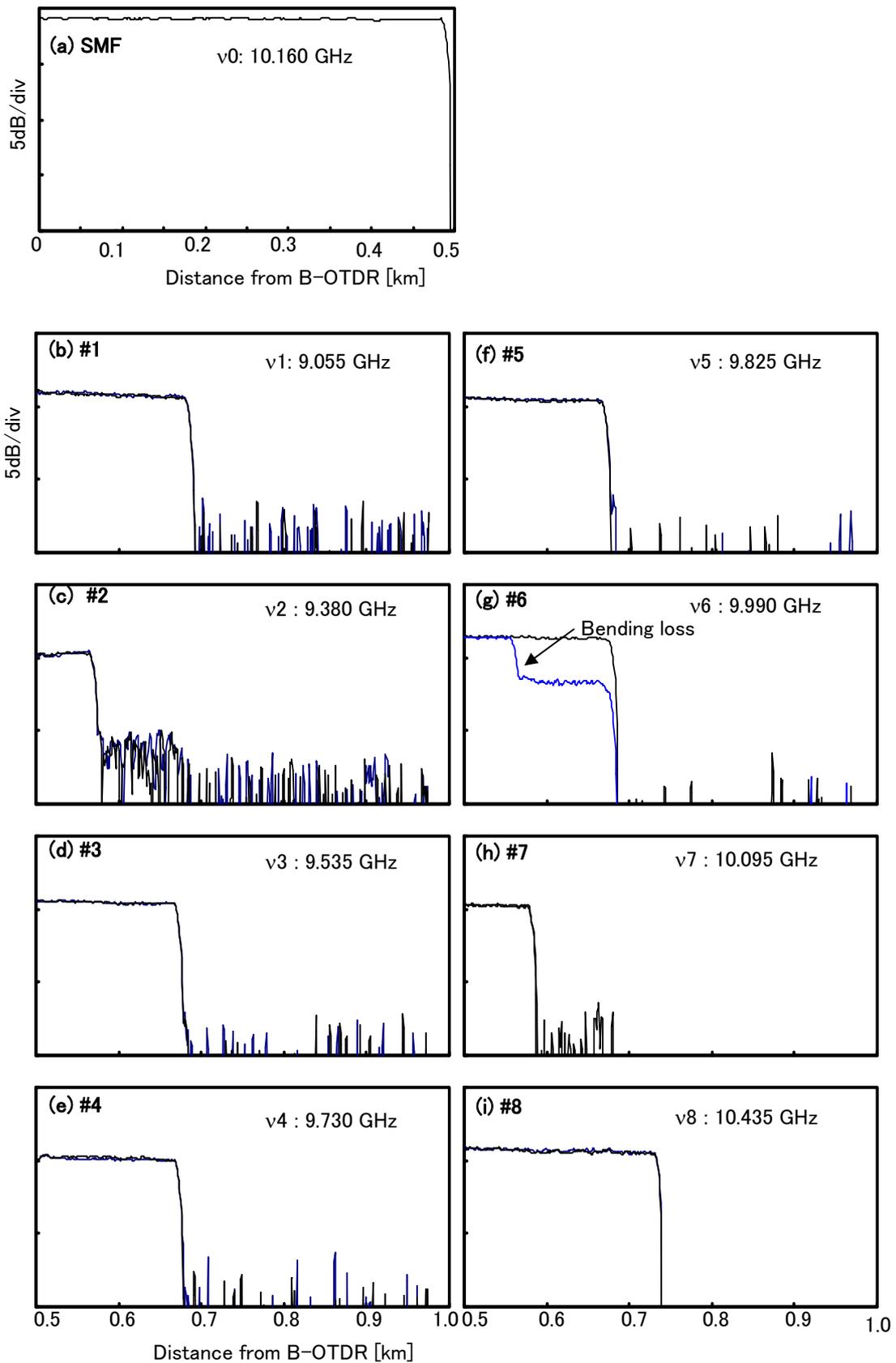


図5.7 B-OTDR波形(2) a) 光スプリッタ上部, b)-i) 光スプリッタ下部

5.4.3 高精度損失位置測定

B-OTDRによる分岐線路下部モニタは微小損失検出を可能にする。OTDRによるレイリー散乱光解析では分岐線路から重なる場合には、分岐線路で発生している損失は見かけ上小さくなる[5-9]。このとき実際に発生している損失を α [dB]、分岐数を N 、OTDR波形上に現れる損失を δ とすると、複数の分岐線路から重畳したレイリー散乱光における変化は

$$\delta = -10 \log \left(\frac{N-1}{N} + \frac{1}{N} 10^{-2\alpha/10} \right) \text{ [dB]} \quad (5-6)$$

に劣化する[5-5]。例えば光ファイバコネクタで発生する損失は高々0.5dBであるため、8分岐線路で発生した場合、この損失は見かけ上0.02 dB となるが、OTDRで測定可能な損失は、ノイズによりレイリー散乱光計測時のばらつきである0.2dB程度に制限されるため、これまでの測定方式ではスプリッタ下部のコネクタ接続を検出することは困難であった。B-OTDRによる損失測定では分岐線路個別の散乱光解析ができるため、高精度な損失測定が可能である。図5.8に光分岐線路区間にMTコネクタによる接続点を設けた線路のB-OTDR波形拡大図を示す。測定条件はパルス幅100nsを用いた。550mと580mの位置にそれぞれ0.32dB、0.18dBの微小な損失を検出し、分岐線路より下部の高精度な損失位置測定が可能であることを示した。

またOTDR測定を行うとコネクタ点では「光ファイバ - 空気 - 光ファイバ」の境界面と有するため、フレネル反射が発生して20~40 dB程度のスパイクがOTDR波形上に発生し、電気信号処理において飽和を発生させるため10~100m程の損失検出不能なデッドゾーンを生じさせる。しかしB-OTDRによる計測では、レイリー散乱光より10GHz離れた信号を分離して計測しているため、反射デッドゾーンを生じることなく計測することが可能である。これらはB-OTDRを用いた分岐線路下部試験方式の大きなメリットであり、分岐線路の故障箇所を特定するだけでなく、故障による損失量も正確に取得することが可能となる。

5.4.4 温度変動安定化測定

光分岐線路下部の計測は光ファイバの敷設環境が外部であることから特に温度変化が大きく発生し、散乱光スペクトラムが変動する。このとき設計したブリルアン散乱周波数シフト ν_1 , ν_2 , ν_3 , ... ν_n に基づいた計測ではピークシフトによる散乱光強度の低下が発生する。そこで、光スプリッタ下部に割り付けるブリルアン散乱光周波数の設計範囲において散乱光パワーの積分を行うことによる低ノイズ化を検討した。ピーク周波数 ν_b のブリルアン散乱光のパワースペクトラムを $\pm B/2$ において積分することでピークシフトによるパワー変化を吸収することが

できる.

$$P_{B\nu} = \sum_{\nu-B/2}^{\nu+B/2} P_B(f) \quad (5-7)$$

図 5.9 に 0~70°C までの温度変化を与えて測定した分岐線路下部の B-OTDR 波形を示す. ブリルアン散乱周波数ピークはおよそ 1°C の変化に対して, 1MHz の変化を発生させる [5-10]. ブリルアン散乱光が半値幅 50MHz の Lorentz 関数とすると, 周波数シフト変化によるピークパワー減少は 0.5dB であり, 図に示したパワー変動の要因であることがわかる. そこで予め設定したブリルアン周波数シフトの中心ピークに対して ±30MHz の範囲でパワー積分を行い, この変化を図 5.7b) にプロットした. 周波数変動によるパワー変動を 0.25dB まで抑制することができた.

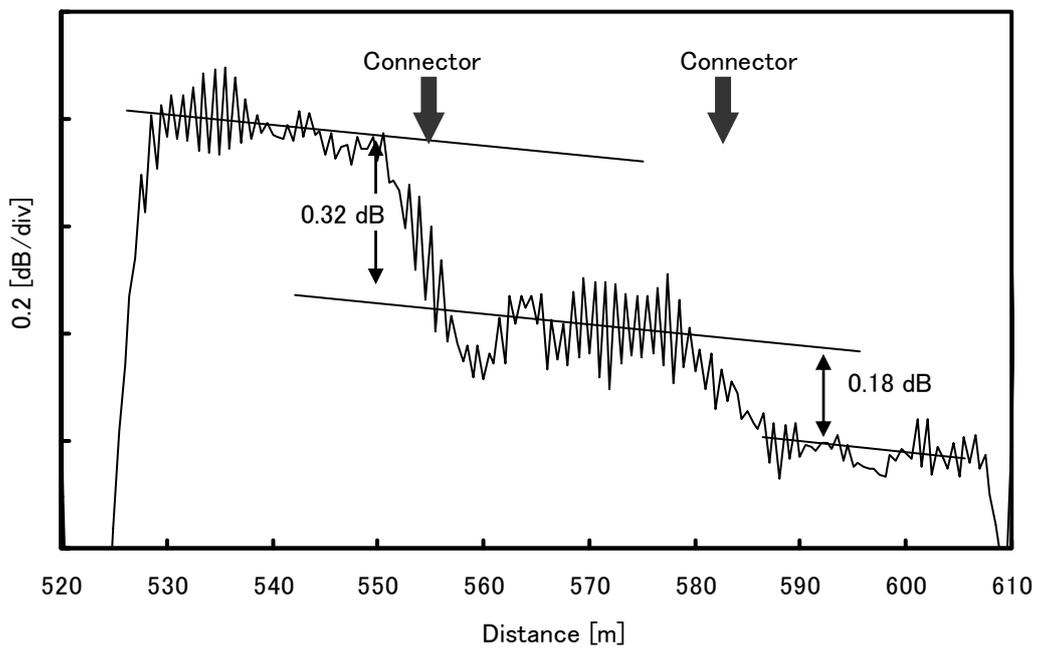


図.5.8 2つのコネクタ接続を含むスプリッタ下部ファイバの損失拡大図

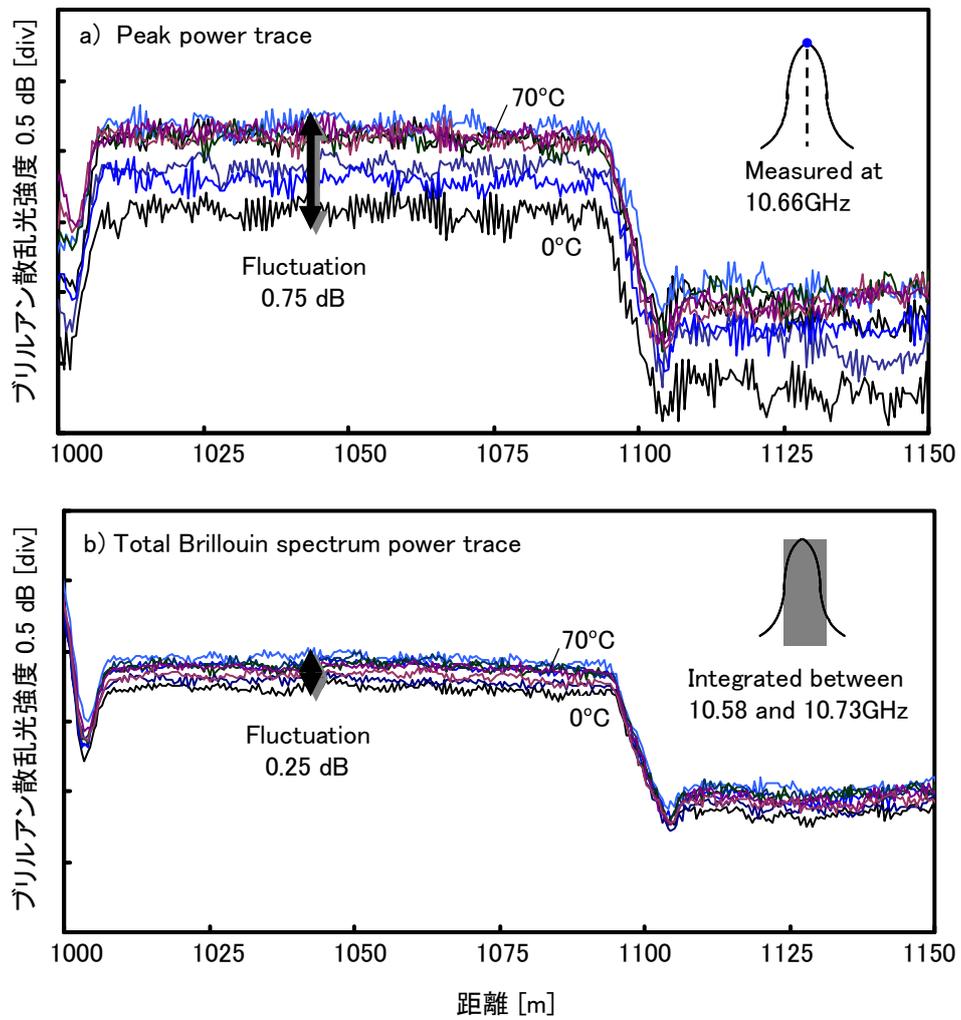


図5.9 ブリルアン散乱光の積分検出によるノイズ低減

5.5 GE-PON における分岐線路下部試験と伝送評価

インサージブス試験の為には, ONT へ到達する試験光パワーが ONT の最小受信感度 (P_s [dBm]) に対して 十分小さい値を取ればよいことを第 2 章で述べた. この条件に基づき, 必要フィルタ遮断量を設定し, インサージブス試験の影響を確認する. 試験システムを設計する際には, P_{s0} の最小値と P_{t0} の最大値を考慮し, 必要となる R_{eff} を決定するが, GE-PON の定義では, OLT から送出する平均信号パワーの最小値は+2 dBm (ピークパワー +5 dBm) [5-6]であり, 所内の損失は 7 dB 程度が生じる. また試験光ピークパワーは 26 dBm であるから, $LF > 28 + RS/X$ となる. Signal-to-noise ratio (SX) が 10 dB の ONT を用いると, 試験光遮断フィルタの遮断量 LF は 38dB 以上必要となる.

1650 nm 試験光のB-OTDRを用いて, インサージブス試験のデモンストレーションを行った. 図5.10に示したGE-PONシステムに対するインサージブス試験実験構成により, 通信信号の符号誤り変化を計測し, インサージブス試験による影響を確認する. OLTから出射される平均パワー 4.9 dBm の信号光を, 光アッテネータによりOLTの最小送信信号パワーの2.0dBmに調整し, 実験用光線路に入射する. 線路の構成としては所内4分岐光スプリッタ, 10km SMF, 所外8分岐スプリッタ, 分岐線路として BFS=9.990GHz を付与した光ファイバ200 m, そしてONT直前にターミネーションフィルタを設置する. ターミネーションフィルタには通信光を透過し, 試験光を遮断するFBG (fiber Bragg grating) フィルタを用いた. 実験に用いたFBGフィルタの透過損失特性を図5.11に示す. ONT直前の1492.25 nm 通信光パワーはアッテネータにより, 光線路の損失分だけ減衰される. 1650 nm 試験光は, 光カプラにより信号光と合波され, 通信光と同様に光ファイバ, 8分岐スプリッタ並びにアッテネータで損失を受ける. GE-PONのレシーバ特性, 最大受信感度とBER (Bit Error Rate) のエラーフリー条件はそれぞれ -24 dBm と 10^{-12} 以上と規定される[5-6]. 伝送評価には光の"0", "1"信号が誤りなく送受信されているか, レイヤー1のビット列での評価を行う. しかしGE-PONシステムではEtherフレームをそのまま送受信しているためデータ送信によるロスが無く, さらにOLTやONTがEtherポートを持つためEtherフレームによる評価は親和性がよくFER (frame error rate) 計測により, BER計測と同等の評価が可能である. ただし, 実験系の条件として,

- 1) 各パケットにはエラーを含まないかまたは1bitエラーのみを含むものとする,
- 2) パケットレイヤープロトコルはエラー検出機能のみを持ち, 前方誤り訂正(forward error correction)や再送等のエラー修復機能は持たないものとする.

ことが必要である。再送処理の無いNetwork testerとしてLAN アナライザを用い、Ethernetフレーム解析を行った。LANアナライザの試験条件は100 Mb/s , 64 byte, 最小インターバル は設定可能な0.96 μs のパケットを生成し、最大スループット of 148809 packets/secで送信した。

BERとFERの関係は以下のように与えられる

$$FER = 1 - (1 - BER)^{Frame\ length[bits]} \quad (5-7).$$

GE-PONのエラーフリー規定であるBER = 10^{-12} はFER= 5.1×10^{-10} に相当する。図5-12に、試験光無し及びB-OTDR試験光有りにて測定したFER特性を示す。□, ■で示す測定結果および○, ●はそれぞれDownlink, Up-linkのFERである。GE-PON ONTの最小受信感度は-24dBであるから、システムにおけるエラーフリー条件も問題なく伝送していることが得られた。また、Downlink, Up-linkのFERは、B-OTDR試験光有無によらず結果は一致しており、試験による伝送システムへの影響は無いことを確認した。以上より1650nmB-OTDRによる光分岐線路下部モニタにおいて、インサービス試験が可能であることを確認した。

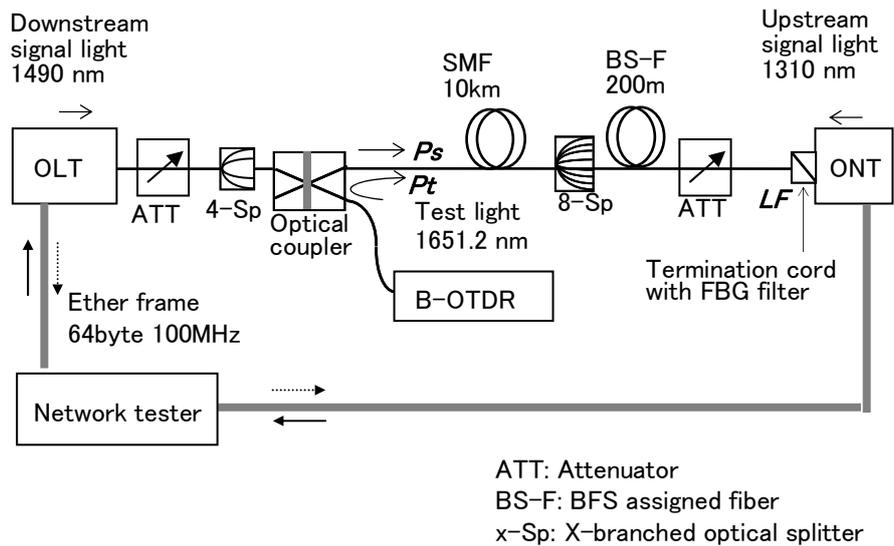


図5.10 インサービズ試験 実験系

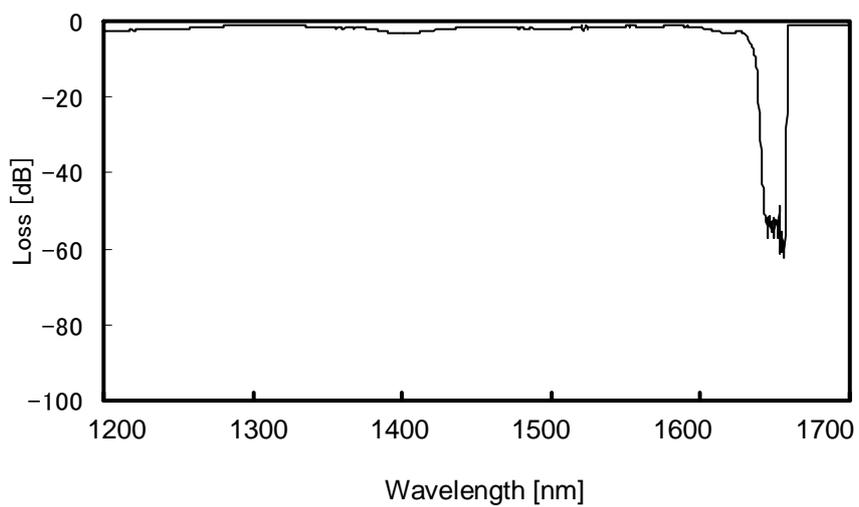


図5.11 FBGフィルタの波長-透過損失特性

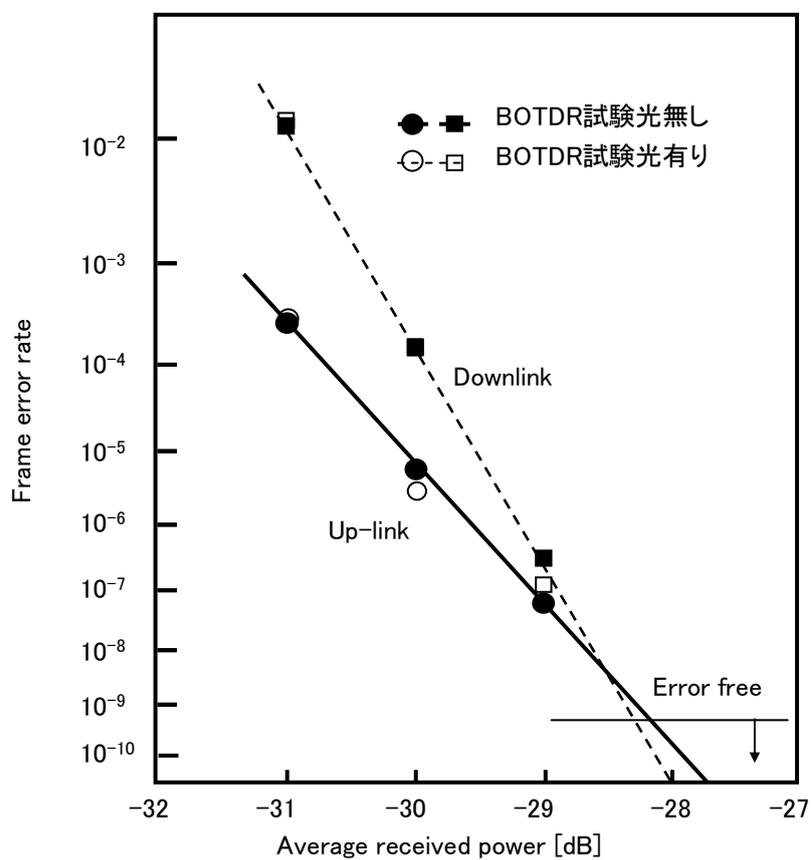


図5.12 BOTDR試験光の有無に対するFER

5.6 結論

本章では分岐線路下部のインサージス試験を実施した。最大1.5GHzのブリルアン周波数シフト間隔となる光ファイバを分岐線路下部それぞれに割り付け、パルスピーク26dBm、パルス幅100nsにおいて17dBのダイナミックレンジを持つ1650 nm B-OTDRを構成した。この1650nmB-OTDRを用いて、分岐線路下部に割り付けた固有のブリルアン周波数シフト信号を検出することで、8分岐光カプラより下部の光ファイバ長測定の測定に成功した。高ダイナミックレンジ1650 nm OTDRは、TDFAとラマン方式による2段構成による高増幅と、試験光プローブをLN変調器によるノイズ低減化により実現が可能となった。本方式は従来のOTDRを用いた1心光ファイバを測定すると同様に、複数線路に発生した損失を高精度に計測することが可能である。本方式は光ファイバが敷設された外部環境、特に温度に置いて周波数変動が発生することで、散乱光強度計測に変動が発生することを考慮し、設計周波数範囲におけるパワー積分を行うことで、低ノイズ化した安定波形を得ることができた。

さらに、現在のFTTHで広く用いられているGE-PON伝送システムに対し、光パルスパワー26dBm、1650 nm B-OTDRを用いた試験を行い、伝送品質に劣化を生じさせることなくインサージス試験が可能であることを示した。

文 献

- [5-1] T. Horiguchi, M. Tateda, "BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory", J. Lightwave Technol. vol. 7, no. 8, pp. 1170-1176, 1989.
- [5-2] T. Kurashima, T. Horiguchi, H. Izumita, S. Furukawa, Y. Koyamda, "Brillouin Optical-Fiber Time Domain Reflectometry", IEICE Trans. Commun. E76-B, No.4, pp.382-390, 1993.
- [5-3] 大野, 倉嶋, "光ファイバーひずみ評価技術", O plus E 2002 年 9 月, pp.1006-1011, 2002.
- [5-4] Y. Koyamada, H. Nakamoto, and N. Ohta, "High performance coherent OTDR enhanced with erbium doped fiber amplifiers", J. Opt. Com, 13, 4, pp. 127-133, 1992.
- [5-5] Y. Enomoto, H. Izumita, and M. Nakamura, "Highly developed fiber fault location technique for branched optical fibers of PONs using high spatial resolution OTDR and frequency domain analysis", The Review of Laser Engineering, vol. 33, no. 9 September 2005, pp. 609-614.
- [5-6] "Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications", IEEE Std 802.3ah,, 2004.
- [5-7] T. Sakamoto, M. Shimizu, M. Yamada, T. Kanamori, Y. Ohishi, Y. Terunuma, and S. Sudo, "35-dB Gain Tm-Doped ZBLYN Fiber Amplifier Operating 1.65 μm ", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 8, no. 3, pp. 349-351, Mar., 1996.
- [5-8] H. Izumita, Y. Koyamada, S. Furukawa, I. Sankawa, "The performance limit of coherent OTDR enhanced with optical fiber amplifiers due to optical nonlinear phenomena", J. Lightwave Technol., vol.12, no. 7, pp.1230 - 1238, 1994.
- [5-9] I. Sankawa, S. furukawa, Y. Koyamada, and H. Izumita, "Fault location technique for in-service branched optical fiber networks", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 2, no. 10, pp 766-768, Oct. 1990.
- [5-10] H. Izumita, T. Horiguchi, and T. Kurashima, "Distributed sensing technique using Brillouin scattering", Optical Fiber Sensors (OFS) 12th, OWD1-1., 1997.
- [5-11] M. Ishikura, Y. Ito, O. Maeshima, and T. Asami, "A traffic measurement tool for IP-based networks", IEICE Trans. Inf.&Syst., Vail. E82-D, no. 4, pp 756-760, Apr. 1999.
- [5-12] H. Nakamura, k.Tujikawa, Y. Nonoyama, K. Hogari, S. Tetsutani, C. Matsui, F. Yamamoto, and T. Sugie, "pass band WDM (WWDM) transmission in 1.5 μm wavelength region through optical fiber cables installed in access networks" in Proc of the 50th International Wire & Cable Sympo. (IWCS), 2000.

第 6 章 総括

6.1 得られた成果のまとめ

本研究では、光ファイバネットワークの高信頼性と保守運用効率化のために、光分岐線路に対する遠隔保守の実現を狙い、光ファイバ網を遠隔監視する試験構成を検討し、以下の内容を明らかにした。

第 1 章では、大容量光伝送システムの発展と光ファイバアクセス網の変遷を概説し、FTTH サービスにおける保守の課題として重要な技術背景である、光伝送の波長アロケーションより帯域拡張と、複雑化する FTTH ネットワークトポロジーの光分岐部を含むネットワーク構成を詳説し、光ファイバ監視技術の適用対象を明確にした。光ファイバ線路の保守・運用に有用な試験技術の中で、特に遠隔監視に有用な OTDR 試験技術について概説し、OTDR 試験を FTTH サービスへ適用する際の技術課題として、計測光が光分岐部において分割・重畳されることにより、分岐点より下部の光ファイバ計測が困難になることを示した。また、分岐線路により複数ユーザが伝送装置や光ファイバ線路をシェアして利用している場合には、1 ユーザ故障時に光試験を実施しても他ユーザへの影響を発生させないインサービス試験が重要であるが、伝送システムの波長帯域拡大はインサービス試験設計に制限を生じさせる。これらを本研究の課題として設定した。

第 2 章では、インサービス試験を実現する光ファイバ線路の構成として、予め試験光を光ファイバ網に合分波する光試験モジュールと、ユーザ側伝送装置である ONT の受光ポート直前に試験光を遮断するフィルタを設置する構成を挙げ、ONT 受光部における通信光と試験光のクロストークと、通信光受光部の信号雑音比特性をパラメータとしたインサービス試験必要条件の定式化を行った。この式に基づき、光ファイバ線路の構成要素である、光試験モジュールと試験光遮断フィルタに対する損失、反射光学特性を決定した。試験光遮断フィルタでは 1) 通信光広帯域化への対応による狭帯域設計、2) 光ファイバに直接書き込むシンプルな構成による低コスト化が可能であること、3) 高反射特性を持つことから FBG (Fiber Bragg Grating) フィルタが最適であるとした。一方、光ファイバ線路の OTDR 試験では FBG フィルタと光試験モジュールとの間で生じる多重反射を抑制する設計を行い、波長 1650 nm、パルス幅 20ns、入力パルスピーク 17 dBm において、光試験モジュールの反射減衰量が 37dB 以上必要であるという設計を示した。以上の設計で明らかになった必要光学特性と、1260-1625nm を透過し、1650nm 帯試験光を遮断し、高反射減衰量を実現する L/U-band 光試験モジュールとして、4 ポートサーキュレータと FBG による構成を提案し、遮断帯域 10nm、試験光遮断量 50dB、反射減衰量 40dB をもつモジュールを用いて、光ファイバ線路に対するインサービス試験を実行し、ゴースト反射劣化の無い高精度な OTDR 計測が可能であることを確認した。

第3章では、2章で論じたインサービス試験に必要な試験光遮断フィルタの損失条件に対し、現実には、レーザ光源には発光ピーク波長近傍に広い ASE (Amplified Spontaneous Emission) 光を有すること、また試験光遮断フィルタの設計可能な遮断帯域には制限があることから、キーパラメータとなる ASE 帯域、試験光源ピークに対するサイドバンドノイズの抑圧比、SBSR (Sideband Suppression Ratio) 及び試験光遮断フィルタの遮断帯域を設定してフィルタリングによる実効遮断量のシミュレーションを行った。インサービス試験において要求される最大実効遮断量である 40dB を目標とすると、DFB レーザが持つ ASE ノイズ帯域 100 nm, SBSR 40dB モデルに対して、遮断帯域が ASE ノイズとの比が 1 以下になる場合には、実効遮断量が急激に劣化し、最大確保可能な遮断帯域 50nm を確保しても、40dB の遮断量を得られない。そこで SBSR を抑制することによって得られる実効遮断量の改善について検討し、SBSR 80dB まで抑制することによって、狭帯域 U-band フィルタに設計した遮断量とほぼ同等の実効遮断量が得られることを明確にした。この設計の妥当性を確認するために、SBSR 50dB, 80dB の試験光源によるインサービス試験を実施し、フィルタリング特性がほぼシミュレーション通りであること、SBSR の抑制設計により、感度な受光部を持つ 10Gb/s 伝送システムにおけるインサービス試験実施でも影響無く実効できることを確認した。また SBSR 抑制設計した OTDR はレンズコリメートを用いた誘電体多層膜フィルタで容易に実現することが可能であり、このフィルタによる OTDR ダイナミックレンジの劣化は殆ど生じることなく、高精度に光ファイバ線路状態を計測することができた。

第4章では光スプリッタによって光信号が分岐されるそれぞれの光ファイバからの散乱光を分離して識別するために、ブリルアン散乱周波数シフトを各光ファイバに付与することを提案した。付与するブリルアン散乱周波数シフトには、光ファイバ線路で発生する周波数変化擾乱よりも各々の Separation を大きく設計する必要があることを考慮し、主に温度と歪みにより発生するブリルアン散乱周波数の擾乱として、それぞれ最大 65°C, 0.01% と見込み、Separation を 120MHz 以上と設計した。この設計により必要となるブリルアン周波数シフトの制御量は、光アクセス網で用いられている 8 分岐線路への適用を目標として 840MHz 以上の周波数制御を目標設定した。

ブリルアン散乱周波数シフトの広帯域制御を実現するにあたり、安定的かつデバイス構成がシンプルな手段として光ファイバコアドーパントの調整による制御を検討した。広い周波数シフト制御を実現するために、純石英ファイバ、GeO₂ シングルドーパント制御ファイバ、GeO₂・F 共添加ファイバの3種類を検討し、さらに一般的にアクセス系で用いられるシングルモード光ファイバとの接続損失抑制を考慮した制約条件を設定した。GeO₂ の添加濃度を 1wt% 高くするとブリルアン周波数シフトを 100MHz ダウンさせるが、1GHz 近いシフト量制御を行う為には、GeO₂ 添加濃度が 14 wt% 必要となり、一方で GeO₂ の高添加は比屈折率差を増大させ MFD が縮小してしまうため接続損失が劣化する。これを回避するために、GeO₂ と併せて屈折率を減少されるフッ素を共添加する設計を行った。本研究では VAD 法による F(フッ素)添加の限界である 2.0 wt% 並びに GeO₂ 11.5 wt% で作製し、最小周波数シフト 9.0GHz を実現した。またクラッドに F を添加

した純石英コアファイバの適用も検討し、最大 1.5GHz の周波数シフト制御を得ることができた。このブリルアン周波数シフト制御技術を用いて 8 種類の周波数シフト付与ファイバを 8 分岐光スプリッタ下部にそれぞれ接続し、各光ファイバからの散乱光が識別できることを確認した。

第 5 章ではブリルアン周波数シフトを制御した光ファイバを分岐線路下部に適用した光ファイバの計測と、GE-PON 伝送システムに対するインサービスタ試験の影響を確認した。最大 1.5GHz のブリルアン周波数シフト間隔となる光ファイバを分岐線路下部それぞれに割り付け、パルスピーク 26dBm、パルス幅 100ns において 17dB のダイナミックレンジを持つ 1650 nm B-OTDR によって、固有のブリルアン周波数シフト信号を検出することで、8 分岐光カプラより下部の光ファイバ長測定の測定に成功した。高ダイナミックレンジ 1650 nm OTDR は、TDFA とラマン方式による 2 段構成による高増幅と、試験光プローブを LN 変調器によるノイズ低減化により実現が可能となった。本方式は従来の OTDR を用いた 1 心光ファイバを測定すると同様に、複数線路に発生した損失を高精度に計測することが可能である。本方式は光ファイバが敷設された外部環境、特に温度に置いて周波数変動が発生することで、散乱光強度計測に変動が発生することを考慮し、設計周波数範囲におけるパワー積分を行うことで、低ノイズ化した安定波形を得た。さらに、現在の FTTH で広く用いられている GE-PON 伝送システムに対し、光パルスパワー 26dBm、1650 nm B-OTDR を用いた試験を行い、伝送品質に劣化を生じさせることなくインサービスタ試験が可能であることを示した。

本研究による光分岐線路の遠隔監視技術を実用に供するためには、現状の光アクセスネットワークより以下 2 点の変更点が必要である。1 つはブリルアン散乱周波数シフトを検出する B-OTDR の導入である。既に光設備ビル所内には光線路試験システムとして、遠隔自動で操作する OTDR や損失・対照用光源並びに光ファイバ線路 1 心ずつにアクセスするための光スイッチが導入されており、光スイッチと接続する光試験装置として B-OTDR を追加すればよい。B-OTDR は OTDR に比べて外部変調器、光増幅器やコヒーレント検波部を持つことから装置構成が複雑で部品点数が多いため、現在市販化されている 1550nm B-OTDR と OTDR を比較すると十倍程度のコストとなる。ただし、光試験装置で遠隔監視を実施する光ファイバは光スイッチによって約 1 万心を収容するため、1 ユーザあたりのコスト差は小さく分割されるため、ユーザあたりの負担は縮小される。しかし光試験装置の導入障壁を軽減するために、光源直接変調の適用等 B-OTDR の構成簡易化検討が望まれる。B-OTDR に用いられるコヒーレント検波技術については近年コア・メトロネットワークの高速化においてはデジタルコヒーレント技術が実用化検討されるなど[6-1]、利用が拡大されることによってコヒーレント検波器の低廉化が広がる可能性がある。

また、もう 1 つの必要な変更点は、光分岐線路へのブリルアン周波数シフト制御光ファイバのインストールすることであり、あらかじめ光線路構築時に適用させておく必要がある。ブリルアン周波数シフトファイバは、光ファイバ製造において母材作成時にコア添加物濃度を調整す

る必要があるが、製造条件が決定されれば光ファイバ線引き、コーティング、ケーブル化等においては大量生産される通常シングルモードファイバと同等の工程を適用することが可能であり、また光ファイバ形状であるため、既存光ファイバネットワークに導入に際して既存の融着やコネクタ接続技術が適用可能であり、非常によい親和性を持つ。運用面としては、光分岐線路下部それぞれにおいて全体に渡って、固有ブリルアン周波数シフトを割り付けた光ファイバを導入する必要がある。光分岐線路下部のケーブル種別は電柱からユーザ近傍までの架空ケーブル、架空からユーザ宅へ引き込むドロップケーブル、ユーザ宅内の配線ケーブルがある。架空ケーブルは多心ケーブルであり、あらかじめ光ファイバケーブル製造時にブリルアン周波数シフト制御ファイバを組み込むことで、光ケーブル種別を意識することなく線路構築が可能である。ドロップケーブルや配線ケーブルでは単心であるため、光ファイバ心線の周波数に応じた複数種別のケーブルを用意する必要があり、光コンポーネントの取り扱いは従来と比して多少煩雑になる。しかし、既に導入されている光ファイバ線路の遠隔監視においても、あらかじめネットワーク構築時に試験信号を合分岐する光試験モジュール(光カプラ)や、試験光遮断フィルタ等の光コンポーネントを埋め込んでおり、ネットワークの構築コストは増加するものの、ネットワークの高信頼性と保守運用稼働の低減には必要不可欠なものとなっている。FTTH時代のネットワークデザインには、保守運用コストまで含めた設計が必要であろう。

本研究による光分岐線路の遠隔監視技術により、光ファイバアクセス網で発生する故障の位置を高精度かつ詳細に検出することが可能となり、光ファイバネットワークの復旧を容易に且つ補修時間や管理コストを節減し、信頼性高い光アクセスネットワークを提供することにつながる。

6.2 今後の展望

本研究において、具体的な目的としたのは以下の3点である

- 1) 光アクセスネットワークの遠隔監視要件の確立
- 2) 通信システムの波長多重化への対応
- 3) 通信システムのネットワーク構成変遷への対応

上記の目標(1)及び(2)については、インサービス試験を実現する光アクセス網の構成とキー要素である光試験モジュール及び試験光遮断フィルタの設計を示し、その効果を実験的に確認することができた。本研究で示したインサービス試験の設計は、将来の光アクセス網において現在よりさらに波長を多重した高速伝送システムにおいても、伝送システムへの制限を加えることな

く監視を行うことが可能である。目標 3)についてはブリルアン散乱周波数に基づく僅かな光ファイバ線路からの散乱光を特徴付けることにより、分岐する心線を個別詳細に識別することが可能となった。今後、メタルネットワークからさらに光ネットワークへと通信設備が以降し、光設備が大量化する中でネットワークを保守・運用するコストを低減し、かつ効率的に信頼性の高いネットワークを提供し続けるための重要な技術となる。

以上に述べてきた、光ファイバ光試験技術が今後益々重要なインフラとなる光アクセスネットワークを高い信頼性を持って支え、光ネットワークの今後の発展に繋がっていくことを願って本論文の結びとする。

文献

- [6-1] 例えば, A. Jambriña, D. Zibar, and I. Monroy, "Digital coherent detection of Multi-Gigabit 16-QAM signals at 40 GHz carrier frequency using Photonic downconversion", in Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communication, PD3.4, pp. 56-57, 2009.

発表論文リスト

学術論文誌

[1-1] Nazuki Honda, Noriyuki Araki, Hisashi Izumita, and Minoru Nakamura, "Extended optical fiber line testing system with L/U-band optical coupler employing 4-port circulators and chirped fiber Bragg grating filters for L-band WDM transmission", IEICE Trans. Commun., Vol. E86-B, No. 5, pp.1562-1566, May 2003.

[1-2] Nazuki Honda, Hisashi Izumita, and Minoru Nakamura, "Spectral filtering criteria for U-Band test light for in-service line monitoring in optical fibre networks", J. Lightwave Technol. vol. 24, No. 6, pp. 2328-2335, Jun. 2006.

[1-3] Nazuki Honda, Daisuke Iida, Hisashi Izumita, and Yuji Azuma, "In-service Line Monitoring System in PONs using 1650 nm Brillouin OTDR and Fibers with Individually Assigned BFSs", J. Lightwave Technol, VOL. 27, NO. 20, pp. 4574-4582, OCTOBER 15, 2009

共著

[C1-1] Noriyuki Araki, Hisashi Izumita, Nazuki Honda, and Minoru Nakamura, "Extended Optical Fiber Line Testing System Using New Eight-Channel L/U-Band Crossed Optical Waveguide Coupler for L-Band WDM Transmission", J. Lightwave Technol, Vol. 21, No. 12, December 2003

[C1-2] Daisuke Iida, Nazuki Honda, Hisashi Izumita, and Fumihiko Ito, "Design of Identification Fibers With Individually Assigned Brillouin Frequency Shifts for Monitoring Passive Optical Networks", J. Lightwave Technol, Vol. 25, No. 5, May 2007, pp1290-1297

国際学会

[2-1] Nazuki Honda, Noriyuki Araki, Hisashi Izumita, and M. Nakamura, "Extended optical fiber line testing system with L/U-band optical coupler employing 4-port circulators and chirped grating fiber for L-band WDM transmission", OptoElectronics and Communications Conference (OECC) 2002, P580-581 12C1-3, Kanagawa, Japan, July 2002.

[2-2] Nazuki Honda, N. Araki, Hisashi Izumita, and Minoru Nakamura, "New test light spectrum design for L/U-band extended optical fiber line testing system", OECC 2003, P57-58 15A4-5, Shanghai, China, Oct. 2003.

[2-3] Nazuki Honda, Daisuke Iida, Hisashi Izumita, and Fumihiko Ito, "New function of optical fiber line testing system employing termination cable with individual Brillouin frequency shift and 1650 nm band in-service monitoring technique", OECC 2005, P364-365 7A2-3, Seoul, Korea, July 2005.

[2-4] Nazuki Honda, Daisuke Iida, Hisashi Izumita, and Fumihiko Ito, "Bending and Connection Loss Measurement of PON Branching Fibers with Individually Assigned Brillouin Frequency Shifts", Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2006, OThP6,

Anaheim, USA, May 2006.

[2-5] Nazuki Honda, Daisuke Iida, Hisashi Izumita, and Fumihiko Ito, "Optical fiber line testing system design considering outside environment for 8-branched PON fibers with individually assigned BFSs", Optical fiber sensors (OFS) 2006, ThE8, Cancun, Mexico, Oct. 2006.

[2-6] Nazuki Honda, Noriyuki Araki, and Yuji Azuma, "In-service Line Monitoring System using 1650 nm Brillouin OTDR for 8-branched PON Fibres with Individually Assigned BFSs", Proc. ECOC 33, Vol.3. 6.6.5 pp.121-122, Berlin, Germany, Sep. 2007.

[2-7] Nazuki Honda, Masaaki Inoue, Noriyuki Araki, and Yuji Azuma, "New Optical Fiber Line Testing System Function for Highly Accurate Facility Location Using Brillouin Frequency Shift Assigned Optical Fiber", OFC 2009, OWU3, San Diego, USA, May 2009.

[2-8] Nazuki Honda, Masaaki Inoue, Noriyuki Araki, and Yuji Azuma, "New Optical Fibre Line Testing System Function for Facility Location and Identification Using Multivalued Brillouin Frequency Shift Assigned Fibre", ECOC 2009, P6.02, Vienna, Austria, Sep. 2009.

共著

[C2-1] Yoshitaka Enomoto, Atsushi Daido, Noriyuki Araki, Nazuki Honda, and Nobuo Tomita, "Design and system configuration of optical fiber line testing system using test light bypass modules" OptoElectronics and Communications Conference (OECC),35-37 vol.1, Oct. 1999.

[C2-2] Yoshitaka Enomoto, Nazuki Honda, Hisashi Izumita, and Minoru Nakamura, "Optical fiber line testing system using test light bypass module for ADM ring networks", 27th ECOC'01, pp35-37 We.B.1.6, Amsterdam, Sep. 2001.

[C2-3] Noriyuki Araki, Hisashi Izumita, Nazuki Honda, and Minoru Nakamura, "Extended Optical Fiber Line Testing System Using L/U-Band Crossed Optical Waveguide Coupler for L-Band WDM Transmission", OFC2002,pp165-166 TuY2, USA, Mar. 2002

[C2-4] Noriyuki Araki, Hisashi Izumita, Nazuki Honda, and Minoru Nakamura, "In-service line monitoring of 10 Gbit/s L-band transmission using optical fiber line testing system enhanced with L/U-band crossed optical waveguide coupler", ECOC2002,1.2.3, Danmark, Sep. 2002.

[C2-5] Noriyuki Araki, Nazuki Honda, Hisashi Izumita, and Minorn Nakamura, "Add-on filtering technology for L/U-band extended optical fiber line testing system using wideband and high cutoff chirped FBG", OFC2004, ThW4, Los Angeles, USA, Feb. 2004.

[C2-6] Daisuke Iida, Nazuki Honda, Hisashi Izumita and Fumihiko Ito, "Identification fibers with individually assigned Brillouin frequency shifts for fault location in passive optical networks", OECC2006, 4E1-2-1, Kaoshiung, Tiwan, Jul. 2006.

[C2-7] Daisuke Iida, Yusuke Koshikiya, Nazuki Honda and Fumihiko Ito, "Detection Sensitivity of Brillouin Sensors Located Near Fresnel Reflection", OFC2007, OMQ2, Anaheim, USA, Mar. 2007

[C2-8] Koji Enbutsu, Noriyuki Araki, Nazuki Honda and Yuji Azuma, "Individual fiber line testing technique for PON using wavelength assigned FBG termination and TLS-OTDR enhanced with reflected trace analysis method", OECC2008, P-75, Australia, Jul. 2008

[C2-9] Koji Enbutsu, Noriyuki Araki, Nazuki Honda and Yuji Azuma, "Individual fiber line

testing technique for PONs using TLS-OTDR enhanced with reflected backward light analysis method", OFC2009, NWA1, San Diego, USA, Mar. 2009

[C2-10] Koji Enbutsu, Noriyuki Araki, Nazuki Honda and Yuji Azuma, "Novel Optical Fiber Identification Method for PONs Based on Polarization Modulation Caused by Pressure-Induced Retardation", ECOC2009, P6.07, Vienna, Austria, Sep. 2009.

[C2-11] Masaaki Inoue, Nazuki Honda, Noriyuki Araki, Koji Enbutsu, and Yuji Azuma, "Dynamic birefringence induced extensional stress in curled Hole-Assisted Fiber", OFC2010, OWS1, San Diego, USA, May 2010.

国内学会・研究会

[3-1] 本田奈月, 泉田史, 佐藤公紀, "双方向 Tm 添加増幅器の 1.6 μ m 帯パルス増幅特性", 2000 年電子情報通信学会 通信ソサエティ大会, B-10-37, 名古屋, 2000 年 9 月.

[3-2] 本田奈月, 泉田史, 中村稔, "Tm 添加増幅器を用いた 1.65 μ m C-OTDR の検討", 2001 年電子情報通信学会 総合大会, B-10-43, 京都, 2001 年 3 月.

[3-3] 本田奈月, 荒木栄次, 荒木則幸, 泉田史, 中村稔, "光線路試験システムに用いる 1.65 μ m 帯遮断用ターミネーションコードの検討", 2001 年電子情報通信学会 通信ソサエティ大会, B-10-24, 東京, 2001 年 9 月

[3-4] 本田奈月, 荒木則幸, 泉田史, 中村稔, "L-band 拡張型光カプラモジュールを用いた光線路試験システム", 光ファイバ応用技術研究会, B-10-17, 2002

[3-5] 本田奈月, 荒木則幸, 泉田史, 中村稔, "光線路試験システムにおける FBG 型 1650nm 帯ターミネーションコードの検討", 2002 年電子情報通信学会 通信ソサエティ大会, B-10-20, 宮崎, 2002 年 9 月

[3-6] 本田奈月, 荒木則幸, 泉田史, 中村稔, "L-band 拡張型光カプラモジュールを用いた光線路試験システム", 光ファイバ応用技術研究会, OFT2002-05, pp1-4, 富山, 2002 年 5 月

[3-7] 本田奈月, 荒木則幸, 泉田史, 中村稔, "L-band へ拡張した光線路試験システムの試験光スペクトル設計", 2003 年電子情報通信学会 全国大会, B-10-31, 宮城, 2003 年 3 月.

[3-8] 本田奈月, 泉田史, 中村稔, "所外用光スプリッタ下部区間における光試験方法", 2003 年電子情報通信学会 通信ソサエティ大会, B-10-5, 新潟, 2003 年 9 月

[3-9] 本田奈月, 荒木則幸, 泉田史, 中村稔, "L-band 通信へ対応するための既存光試験システムのアップグレード", 2004 年電子情報通信学会総合大会, B-10-34, 東京, 2004 年 3 月

[3-10] 本田奈月, 飯田大輔, 泉田史, 伊藤文彦, "双方向 Tm 添加ファイバ増幅器を用いた 1650nm 帯 C-OTDR の特性改善", 2005 年電子情報通信学会 総合大会, B-10-7, 大阪, 2005 年 3 月

[3-11] 本田奈月, 飯田大輔, 泉田史, 伊藤文彦, "固有ブリルアン周波数シフトを有する光マーカを用いた光試験システム", 2005 年電子情報通信学会 通信ソサエティ大会, B-10-10, 北海道, 2005 年 9 月

[3-12] 本田奈月, 飯田大輔, 泉田史, 伊藤文彦, "固有ブリルアン周波数シフトを有する光マーカを用いた光試験システムによる光スプリッタ下部の損失測定", 2006 年電子情報通信学会 通信ソサエティ大会, B-10-15, 金沢, 2006 年 9 月

- [3-13] 本田奈月, 飯田大輔, 泉田史, 伊藤文彦, "PON における所外 8 分岐線路を保守する固有ブリルアン周波数シフト光マーカを用いた光線路試験システム", 光ファイバ応用技術研究会(OFT), OFT2006-40, pp.1-4, 東京, 2006 年 11 月
- [3-14] 本田奈月, 荒木則幸, 東裕司, "固有ブリルアン周波数シフトを有する光マーカを用いた 1650nm 波長光試験システムによる光スプリッタ下部のインサービス試験", 2007 年電子情報通信学会 通信ソサエティ大会, B-10-3, 鳥取, 2007 年 9 月
- [3-15] 本田奈月, 荒木則幸, 東裕司, "固有ブリルアン周波数シフトを有する光ファイバを用いた 1650nm 波長光試験システムによる光スプリッタ下部のインサービス試験", 光ファイバ応用技術研究会(OFT), OFT2007-61, pp.59-64, 広島, 2008 年 1 月
- [3-16] 本田奈月, 荒木則幸, 東裕司, "1650nmBOTDR を用いたスプリッタ下部試験の適用領域", 2008 年電子情報通信学会 総合大会, B-10-3, 福岡, 2008 年 3 月
- [3-17] 本田奈月, 井上雅晶, 荒木則幸, 東裕司, "ブリルアン周波数シフトを割り付けた光位置マーカによる高精度設備識別方法", 2008 年電子情報通信学会 通信ソサエティ大会, B-10-12, 神奈川, 2008 年 9 月
- [3-18] 本田奈月, 井上雅晶, 荒木則幸, 東裕司, "ブリルアン周波数シフトを割り付けた光位置マーカによる高精度設備識別方法", 光ファイバ応用技術研究会(OFT), OFT2008-68, pp.107-111, 大分, 2008 年 11 月
- [3-19] 本田奈月, 井上雅晶, 荒木則幸, 東裕司, "ブリルアン周波数シフトを用いた光位置マーカの設計", 2009 年電子情報通信学会 総合大会, B-10-1, 愛媛, 2009 年 3 月
- [3-20] 本田奈月, 井上雅晶, 荒木則幸, 東裕司, "ブリルアン周波数シフトを用いた光 ID による設備識別方法", 2009 年電子情報通信学会 ソサエティ大会, B-10-5, 新潟, 2009 年 9 月
- [3-21] 本田奈月, 井上雅晶, 荒木則幸, 東裕司, "多値ブリルアン周波数シフトを用いた光 ID による設備識別技術", 光ファイバ応用技術研究会(OFT), OFT2009-33, 大分, 2009 年 10 月
- [3-22] 本田奈月, 井上雅晶, 荒木則幸, 東裕司, "ブリルアン散乱光モニタによる心線対照方法", 2010 年電子情報通信学会 総合大会, B-10-24, 仙台, 2010 年 3 月

共著

- [C3-1] 榎本圭高, 大堂淳司, 荒木則幸, 本田奈月, 富田信夫, "光線路試験システムの適応領域拡大をねらいとした試験光バイパスモジュールの設計", 1999 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-10-22, 1999 年 9 月
- [C3-2] 榎本圭高, 本田奈月, 泉田史, "試験光バイパスモジュール使用時における伝送特性評価実験", 2001 年電子情報通信学会 総合大会, B-10-44, 2001 年 3 月
- [C3-3] 荒木則幸, 本田奈月, 泉田史, 中村稔, "L-band 対応光線路試験システムの設計", 2002 年電子情報通信学会 総合大会, B-10-16, 2002 年 3 月
- [C3-4] 荒木則幸, 本田奈月, 泉田史, 中村稔, "L-band 対応 8 回路交差導波路型光カプラ", 2002 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-10-18, 2002 年 9 月
- [C3-5] 荒木則幸, 本田奈月, 泉田史, 中村稔, "交差導波路型光カプラを用いた Lバンド対応光線路試験システム", 光ファイバ応用技術研究会(OFT), OFT2002-55, pp.25-28, 2002 年 11 月

- [C3-6] 荒木則幸, 本田奈月, 泉田史, 中村稔, "L/U-band 交差導波路型光カプラを用いたインサービス試験", 2003年電子情報通信学会 総合大会, B-10-30, 2003年3月
- [C3-7] 榎本圭高, 本田奈月, 泉田史, "光スプリッタ下部心線の故障切り分け分解能の検討", 2004年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-10-12, 2004年9月
- [C3-8] 飯田大輔, 本田奈月, 泉田史, 伊藤文彦, "ブリルアン散乱光強度分布測定による PDS 線路の故障位置探査方法", 2005年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-10-11, 2005年9月
- [C3-9] 飯田大輔, 本田奈月, 泉田史, 伊藤文彦, "PDS 線路試験用ブリルアンマーカの設計と試作", 2006年電子情報通信学会 総合大会, B-10-1, 2006年3月
- [C3-10] 飯田大輔, 本田奈月, 泉田史, 伊藤文彦, "PON 試験に用いる固有ブリルアン周波数シフト光ファイバ", 光ファイバ応用技術研究会(OFT), OFT2006-3, pp.9-12, 2006年5月
- [C3-11] 飯田大輔, 本田奈月, 泉田史, 伊藤文彦, "PDS 線路試験用ブリルアンマーカの光学特性と設計法の検討", 2006年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-10-14, 2006年9月
- [C3-12] 飯田大輔, 古敷谷優介, 本田奈月, 伊藤文彦, "フレネル反射点近傍におけるブリルアンセンサの受光条件", 2007年電子情報通信学会 総合大会, B-13-33, 2007年3月
- [C3-13] 荒木則幸, 泉田史, 本田奈月, 東裕司, "光ファイバ網のインサービス試験基準", 2008年電子情報通信学会 総合大会, B-10-10, 2008年3月
- [C3-14] 圓佛晃次, 荒木則幸, 本田奈月, 東裕司, "波長可変 OTDR と光フィルタからの反射光の後方散乱光を用いた分岐線路試験と波形解析", 2008年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-10-11, 2008年9月
- [C3-15] 井上雅晶, 本田奈月, 荒木則幸, 東裕司, "ブリルアン周波数シフトを用いた光位置マーカの適用検討", 2008年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-10-13, 2008年9月
- [C3-16] 圓佛晃次, 荒木則幸, 本田奈月, 東裕司, "波長可変 OTDR と反射光の後方散乱光を用いた分岐線路試験", 光ファイバ応用技術研究会(OFT), OFT2008-3, pp.45-48, 2008年5月
- [C3-17] 圓佛晃次, 荒木則幸, 本田奈月, 東裕司, "波長可変 OTDR と反射光の後方散乱光を用いた分岐線路試験と参照波形解析法", 2009年電子情報通信学会 総合大会, B-10-2, 2009年3月
- [C3-18] 井上雅晶, 本田奈月, 荒木則幸, 東裕司, "光ファイバ曲げ収容部における偏光強度の周期性の解析", 2009年電子情報通信学会 総合大会, B-10-22, 2009年3月
- [C3-19] 井上雅晶, 本田奈月, 荒木則幸, 東裕司, "カールコードにおける偏光強度周期の伸長依存性", 2009年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-10-7, 2009年9月
- [C3-20] 圓佛晃次, 荒木則幸, 本田奈月, 東裕司, "カールコードにおける偏光強度周期の伸長依存性", 2009年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-13-10, 2009年9月
- [C3-21] 井上雅晶, 本田奈月, 荒木則幸, 東裕司, "光ケーブル敷設環境を識別する温度変化閾値の検討", 2009年電子情報通信学会 総合大会, B-10-15, 2010年3月

[C3-22] 圓佛晃次, 荒木則幸, 本田奈月, 東裕司, "ファイバへの側圧印加による偏波変調を用いた分岐線路用心線対照法", 2009年電子情報通信学会 総合大会, B-10-22, 2010年3月

謝辞

本論文をまとめるにあたって、終始懇切なご指導とご教示を賜りました横浜国立大学大学院物理情報工学専攻、馬場俊彦教授に厚く感謝申し上げます。また、有益な御討論、ご教示を頂いた國分泰雄教授、竹村泰司教授、高橋富士信教授、荒川太郎教授に謹んで感謝の意を表します。

本研究は日本電信電話株式会社アクセスサービスシステム研究所において行われたものであり、本研究を進める機会を与えて下さった、篠原弘道取締役(元アクセスサービスシステム研究所所長)、オリジン電気株式会社 佐藤登常務取締役(元アクセスサービスシステム研究所所長)、佐久田浩司 NTT アクセスサービスシステム研究所所長に深く感謝致します。

本研究を進めるにあたっては、アクセス網研究所当時並びにアクセスサービスシステム研究所の諸兄をはじめとして、多くの方々のご助力と御指導を頂きました。特に、通信電線線材協会 廣岡明専務理事(元 光アクセス網プロジェクト部長)、フジクラ佐藤公紀副事業部長(元 光アクセス網プロジェクト部長)、住友電気工業株式会社 山内修部長(元第二推進プロジェクト部長)、NTT アドバンステクノロジー 灰原正ユニット長(元 プロジェクト部長)、NTT-AT テクノコミュニケーションズ 清水正利事業本部長(元 プロジェクト部長)、坪川信アクセスメディアプロジェクト部長、有居正仁第二推進プロジェクト部長(元 ライフタイム削減推進 DP 長)、東日本電信電話株式会社 小澤裕部長(元 ライフタイム削減推進 DP 長)には多くのご指導をいただきました。

NTT エレクトロニクス 富田信夫部長(元 光所内系システムグループリーダー)、エヌ・ティ・ティ・レンタル・エンジニアリング株式会社 中村稔取締役(元 媒体網マネジメントグループリーダー)、アクセスメディア媒体運用グループリーダー 伊藤文彦主幹研究員、アクセスメディア媒体保守マネジメントグループリーダー 東裕司主幹研究員には日常的に懇切丁寧なご指導と多くの激励をいただき、本論文の内容についても貴重な御示唆をいただきました。ここに厚く御礼を申し上げます。

NTT アクセスサービスシステム研究所 泉田史主幹研究員、荒木則幸主任研究員には研究方針の策定から光計測器の設計・実験結果に至るまで本研究の主要な部分を共に進めて頂き、その中で多くの激励と貴重な御討論をいただきました。また、榎本圭高主任研究員には光線路試験システムの設計について多大なる御助言とご討論をいただきましたことに感謝いたします。また 圓佛晃次研究所員、飯田大輔研究所員、井上雅晶研究所員には実験を進める上で貴重な御討論をいただきました。

また、光ファイバ試作と光線路試験システムの試作・開発に多大なご協力を頂いた、古河電気工業株式会社、株式会社フジクラ、横河電気株式会社の関係各位様に厚く御礼申し上げます。

最後に、本研究遂行にあたり多くの励ましを下された友人の皆様、家族に深く感謝します。