
通信分野で用いられる光ファイバセンサ

千葉大学工学部画像工学科

立田 光 廣

日本電信電話株式会社 アクセス網研究所

小山田 弥平

Optical fiber sensors used in communication systems

Mitsuhiro Tateda

*Department of Image Science, Faculty of
Engineering, Chiba University*

Yahei Koyamada

NTT Access Network Systems Laboratories

Abstract

More than 10 years have passed since optical fiber transmission systems were introduced into communication networks. During the ensuing years, the possibility of applying optical fibers for purposes other than communication has also been intensively investigated. This paper reviews optical fiber sensors and the related techniques used in communication systems for their maintenance.

1. はじめに

低損失、広帯域で、かつ細径、軽量、無誘導といった数々の特徴にめぐまれた光ファイバを用いた光通信システムが実用段階に入ってから久しく、今やその末端は家庭にまで及ぼうとしている。光ファイバが光通信システムにおいて果たす、最も基本的な役割が、発信者と受信者を結ぶ通信信号伝送媒体であることはいまでもないが、光ファイバがそれ自体でセンサとしての機能をもつことを利用して、数十km以上に及ぶ広大な地域に面的に広がる通信システムの保守・運用に果たしている役割も見逃せない。

本稿では、光ファイバ自身を通信システムの特長センサと見立て、通信信号伝送媒体として以外の光ファイバの役割と関連技術について述べる。

2. FITASとAURORA

現在、NTTの市外中継系光ファイバケーブル伝送路では、支障移転工事の迅速化、光線路の高信頼化等を目的として、光線路切替試験システム（FITAS: Fiber Transfer And Test System）が導入されている⁽¹⁾。また、アクセス系光ファイバケーブル伝送路では、建設稼働の削減や予防保全の高度化を目的として、光線路試験管理システム（AURORA:

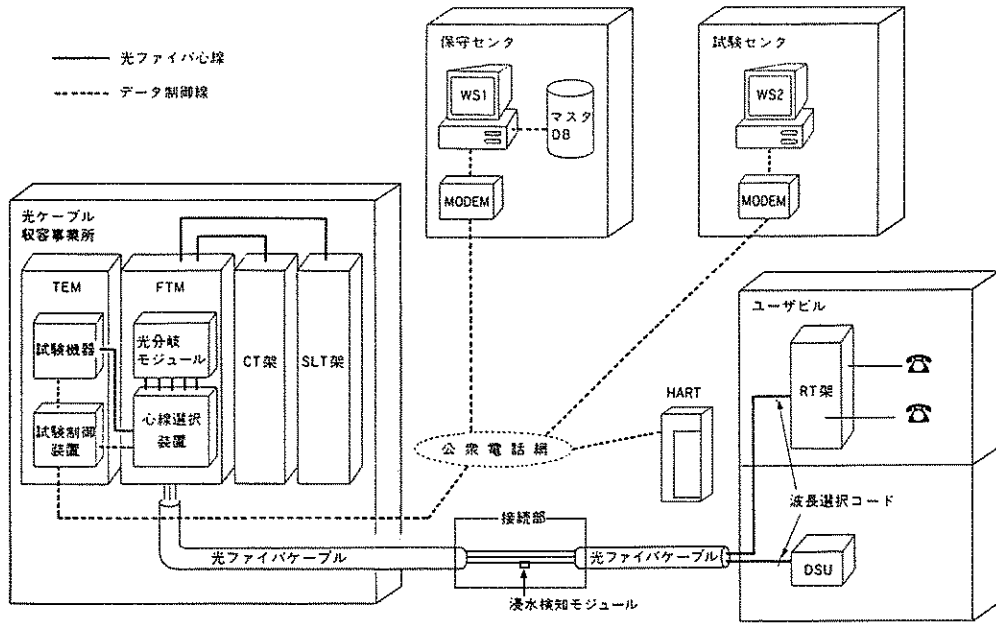


Fig. 1. System configuration of AURORA⁽¹⁾

Automatic optical fiber operations support system)の導入が進められている(Fig.1)⁽¹⁾。これらはいずれも光パルス試験器(OTDR: Optical Time Domain Reflectometer)を基本ツールとし、任意の光ファイバ線路の損失分布、接続点における接続損失、反射量等を保守局から遠隔操作で測定できるようにシステム化している。

3. 光パルス試験器(OTDR)

OTDR⁽²⁾⁽³⁾は、光ファイバに入射した光パルスから生じて、光入射端にもどってくるレイリー散乱光強度の時間変化およびフレネル反射光を測定し、これより光ファイバ損失等を求める装置である。光ファイバの接続位置や接続損失、破断点位置なども非破壊かつ光ファイバの一端にて測定できるため、光ファイバの製造時のみならず、光線路の建設・保守等、広い分野で用いられる。これまでダイナミックレンジ(測定可能な光ファイバの最大損失)を拡大するため、入力光パワの増大、受光感度の改善等、さまざまな工夫が試みられてきた⁽⁴⁾。以下に、

最近の技術進展についてのべる。

(1) 光増幅とコヒーレントOTDR

近年進展のめざましい光増幅技術と、光信号の受信感度を改善するコヒーレント受信技術の組み合わせによるOTDRのダイナミックレンジ拡大が検討されている⁽⁵⁾。最近の報告(Fig.2)⁽⁶⁾では、波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯において、[i]ヘテロダイン検波によるショット雑音限界の受信感度達成、[ii]自然放出光遮断スイッチを用いたEDFA縦列接続による高出力パルスの実現、[iii]自己位相変調、四波混合、誘導ラマン散乱、誘導ブリルアン

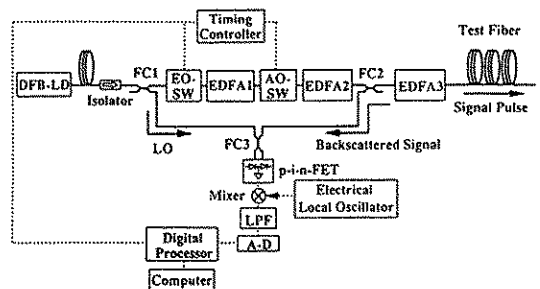


Fig. 2. Coherent OTDR enhanced with EDFA's⁽⁶⁾

散乱等の非線形光学効果による有効入力限界の明確化、などにより、総合性能として、距離分解能0.1kmで39dBのダイナミックレンジ（1kmで48dB）を実現している。

(2) 光パルス圧縮技術を用いたダイナミックレンジ向上

通常のOTDRでは、距離分解能を向上させるためには入射光パルス幅を狭くする必要はあるが、一定のピークパワー制限のもとでは必然的にダイナミックレンジが減少する。この限界をこえる手段として、光パルス圧縮技術を用いた高距離分解能化の試みがなされている⁽⁷⁾。すなわち、Fig. 3に示すように、波長の異なる複数の狭光パルスを隣接して入射し、これらから得たレイリー散乱信号光を受信端で分散媒質（実験では高分散ファイバ）を通過させて光パルス圧縮を行い、幅の広い入射パルスを用いながら、高距離分解能を実現する原理実験に成功している。

4. OTDRを用いた各種センサ

OTDRは、主に、光線路の損失分布を測定するために用いられるが、これに工夫を加えることにより、通信システムの各種センサとしての特殊機能をもたせることができる。以下にそ

の代表例を紹介する。

(1) 浸水センサ

非ガス光ケーブルの接続点には、Fig. 4に示すような浸水検知モジュール^{(1) (8)}が設置されている。このモジュールの膨潤材が水にふれると膨張し、可動部を押し上げてモニタ用光ファイバに曲がりを与え、損失増をもたらす。そこでOTDRにより定期的にモニタ用光ファイバの損失測定を行うことにより、浸水の有無と場所を検知できる。

(2) 分岐光線路用の保守センサ

Fig. 5に示すような、光線路中に分岐素子（スターカプラ）を含む分岐光線路は、新しい通信線路形態として注目され、新世代通信

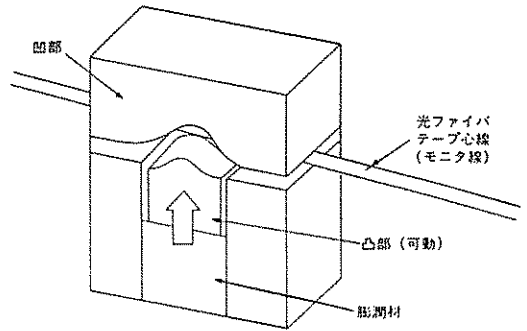


Fig. 4. Water sensor module^{(1) (8)}

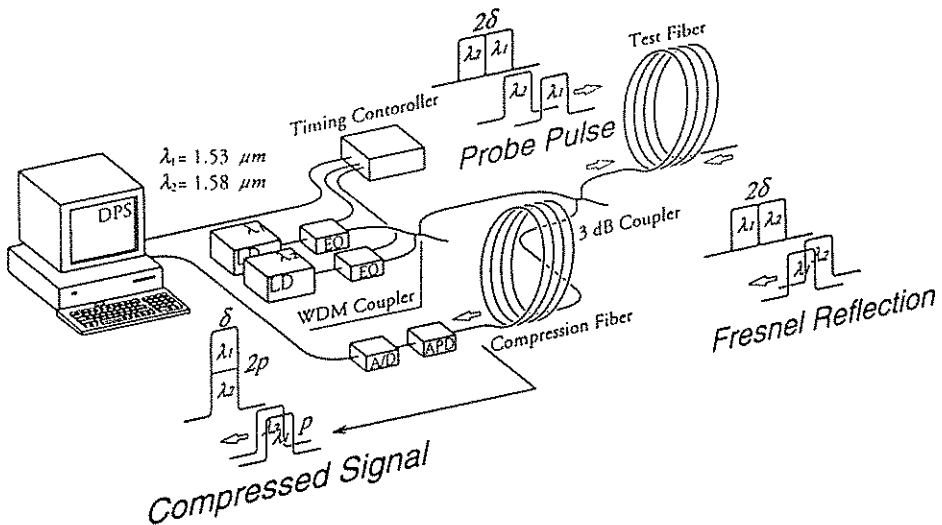


Fig. 3. OTDR with optical pulse compression⁽⁷⁾

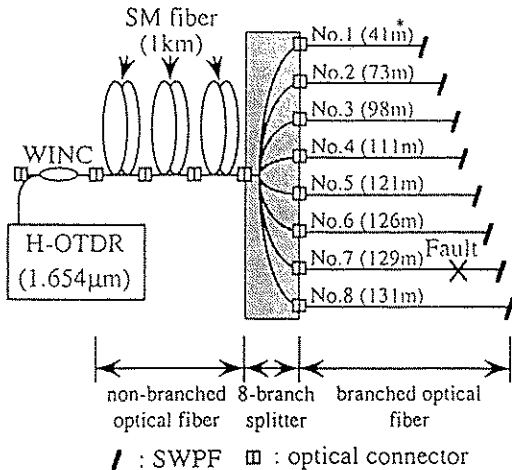


Fig. 5. Experimental setup for passive branched optical networks fault location⁽¹²⁾

網パイロットモデル事業⁽⁹⁾として京阪奈地区で実験がすすめられている。このような線路構成では、分岐素子以降の線路特性の評価手段が重要な課題である。

(i)故障切り分け

故障箇所が宅内装置内にあるのか線路区間内にあるのかの判別は故障切り分け試験と呼ばれ、迅速な故障復旧に必要である。これには高距離分解能のOTDRが用いられる。すなわち、分岐後の光ファイバ長がすべて異なるように設計し、その各々の終端部(光加入者ネットワーク装置[ONU]の直前)に試験光反射フィルタを挿入する。これにより、OTDR波形に含まれる端末反射の位置とそのピークレベルの故障前後の変化から、故障位置を判別する。Fig. 6に示すように、10 nsパルスを用いた高距離分解能OTDRにより分岐後線路長差2 m以上で設計した8分岐型光線路の故障切り分け試験を可能としている⁽¹⁰⁾。

(ii)個別損失分布測定

Fig. 7に示すような構成で、波長可変OTDRと、試験波長に応じて各分岐線路に試験光を振り分ける波長依存性光分岐素子とを組

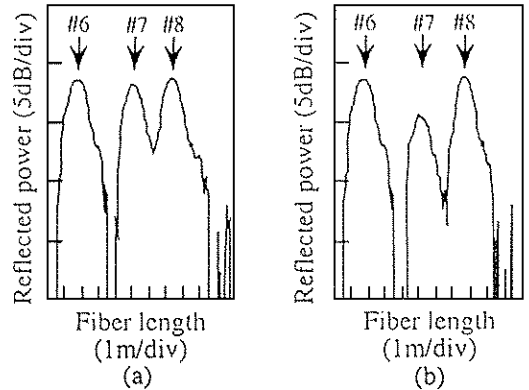


Fig. 6. OTDR traces (a) with and (b) without fiber fault⁽¹⁰⁾.

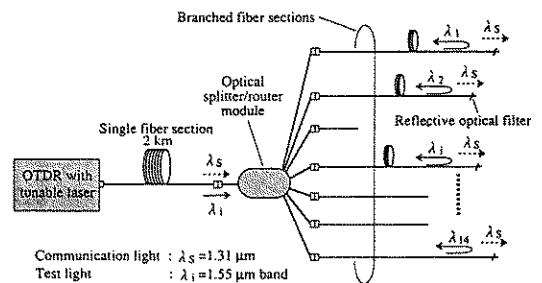


Fig. 7. Experimental setup for testing passive branched optical networks⁽¹¹⁾

み合わせて用いることにより、分岐後の線路の損失分布を個別に測定することが可能となる⁽¹¹⁾。ここで、通信波長光に対しては分岐後線路に一樣に分配することが必要であり、Fig. 8に示すような波長ルーティング機能付き光分岐回路⁽¹²⁾が用いられる。Fig. 9はその透過特性であり、14分岐線路の個別OTDR測定が確認されている。

分岐素子の透過波長は一般に温度に依存して変化するが、分岐後線路の一本をモニタ用として選んで反射鏡をとりつけ、反射光の試験波長依存性から試験波長の温度補正を行い、温度変化に追従して分岐後線路の個別損失測定が実施できることが確認されている⁽¹³⁾。

(iii)心線対照

光線路の建設・保守にあたり、作業現場で

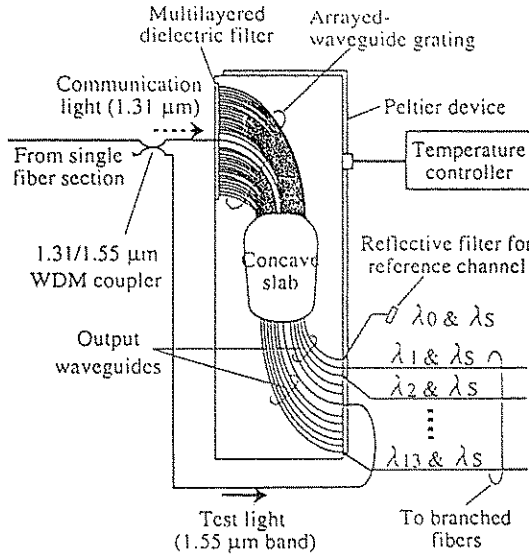


Fig. 8. Structure of optical splitter/router module ⁽¹²⁾

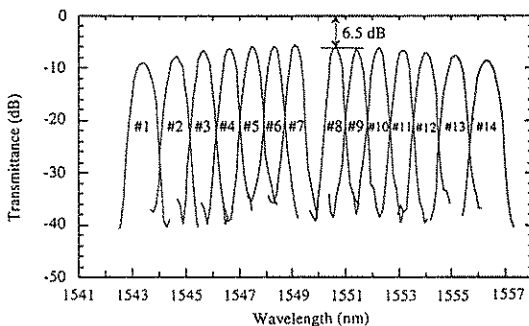


Fig. 9. Transmission spectra for the 14 channel wavelength router ⁽¹¹⁾

個別の心線識別番号を確認することが必要となり、これを心線対照と呼んでいる。従来は伝送装置側から建設・保守対象の光ファイバに心線対照用の光信号を入射し、これを現場で曲げ放射により取り出して確認信号としていた。分岐光線路網においては従来法をそのまま適用できないが、前節で述べた波長依存性分岐素子を用いて実現することができる⁽¹⁴⁾。すなわち、分岐素子で各心線に振り分けられた波長毎に異なる変調信号を心線対照信号として割り当てると、心線対照現場では、曲げ放射光に含まれる変調信号から個別

心線番号を知ることができる。

以上のべたように、分岐線路の個別損失分布測定や心線対照が可能となったことから、分岐素子の設置場所や、分岐後の線路長等に対する設計上の制約が緩められ、自由度の高い分岐光線路の実現が期待できる。

5. 歪分布センサ

光ファイバの強度保証をする上で、光ファイバ内の歪分布測定が重要である。ブリルアン散乱にともなう光周波数のシフト量が光ファイバの歪量に比例することに着目し、OTDRと類似の手法で歪分布の測定が可能であることが示された⁽¹⁵⁾。すなわち、Fig. 10に示すように、光ファイバの両端から周波数の異なるパルス及びCW光を入射して誘導ブリルアン散乱を生じさせ、受信光量を最大とする光周波数差から、各場所毎の歪を検出する(BOTDA)。

その後の改良により、空間分解能1 m、歪分解能 2×10^{-4} 程度の高感度測定が実現している⁽¹⁶⁾。この技術は、管路、海底への光ケーブル敷設にともなう残留歪みの評価、管路内溜水の凍結にともなう光ファイバの損失増加メカニズムの解明、阪神大震災被災ケーブルの異常歪みの測定などに利用されている。更に、本技術とコヒーレントOTDR技術の融合をはかり⁽¹⁸⁾、あるいは、Fig. 11に示すように、更に

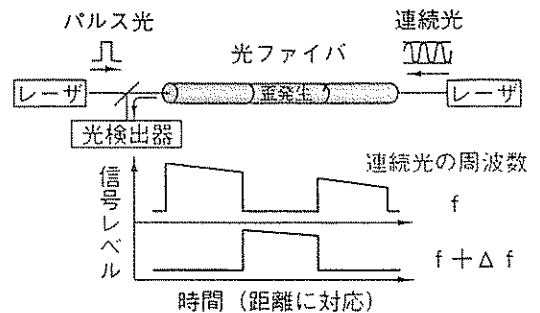


Fig. 10. Strain distribution measurement using stimulated Brillouin scattering ⁽¹³⁾

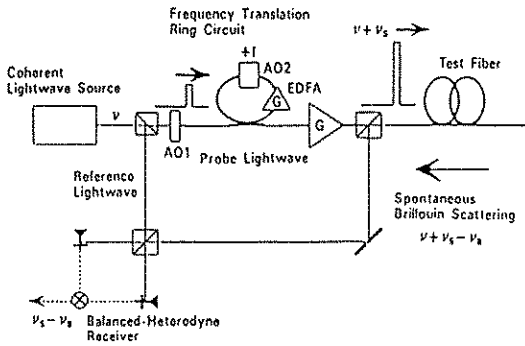


Fig. 11. Brillouin OTDR utilizing optical frequency translation ring circuit (19)

光周波数センササイズ技術⁽¹⁸⁾との融合をはかり⁽¹⁹⁾、自然ブリルアン散乱光の高感度測定によって、OTDRと同様に光ファイバの一端から歪分布を測定することに成功している(BO TDR)。

6. OTDR技術の新展開

AURORAの普及に伴い、小型化、高分解能化、高速化、高ダイナミックレンジ化等、OTDRの高性能化要求はますます強くなる。また、損失と歪の測定を別々の装置ではなく、一体となった装置で測定できることが、コストダウン、あるいは遠隔測定の実現等の観点から望まれる。前述のBOTDRとコヒーレントOTDRでは共通する光学部分が多いことに着目し、周波数シフタの動作モードの切り替えにより、損失(レイリー散乱光)と歪(ブリルアン散乱光)を選択して測定する装置が開発され、10km長ファイバに対して、歪み分解能0.01%、空間分解能1.5m、損失に関しては、10m分解能で24dBのダイナミックレンジが確認されている⁽²⁰⁾。

一方、光ファイバの低損失性、高帯域性を十分生かすためには、1.3μm帯および1.55μm帯の波長多重通信が魅力的である。このようなシステムでは、通信をさまたげない保守波長として1.6μm帯が着目されており、損失のみならず、歪分布もこの波長域での測定が望まれる。

損失分布測定については、ラマンファイバ増幅器を用いたコヒーレントOTDRで、波長1.65μm帯において0.1km分解能で30dBのダイナミックレンジを実現している⁽¹⁴⁾。また、歪み分布測定についても、10GHz帯高速位相変調器を光周波数シフタとして用い、これをラマンファイバ増幅器と組み合わせて、30km長ファイバの歪み分布を歪み精度0.03%で、100km長ファイバの損失分布を100m分解能で測定できることを示している⁽²²⁾。これを前述のAURORAやFITASで用いれば、損失のみならず歪分布も遠隔自動測定が可能となり、予防保全機能の一層の充実が期待できる。

7. まとめ

光通信システムの保守・運用を目的とした、センサとしての光ファイバの役割と、その関連技術について述べた。

参考文献

- 1) 富田他、「今、光線路のオペレーションが変わる」、NTT技術ジャーナル、2、8、10、1990。
- 2) M. K. Barnoski et al., "Fiber wave guides: A novel technique for investigating attenuation characteristics", Appl. Opt., 15, 9, 2112, 1976。
- 3) S. D. Personick, "Photon probe-An optical-fiber time-domain reflectometer", Bell Syst. Tech. J., 56, 3, 355, 1977。
- 4) M. Tateda et al., "Advances in optical time domain reflectometry", J. Lightwave Technol. 7, 8, 1217, 1989。
- 5) Y. Koyamada et al., "High performance single mode OTDR using coherent detection and fiber amplifiers", Electron. Lett. 26, 9, 573, 1990。
- 6) H. Izumita et al., "The performance limit of coherent OTDR enhanced with optical fiber amplifiers due to optical nonlinear phenomena", J. Lightwave Technol. 12, 7, 1230, 1994。
- 7) T. Sato et al., "Chirp optical time-domain

- reflectometry", OFC'95, ThD4, 1995.
- 8) F. Ashiya et al., "Water-brooking optical fiber cable system for subscriber networks", NTT Review, 3, 1, 110, 1991.
 - 9) 飯田、「F T T H時代に向けた通信と放送の融合—新世代通信網パイロットモデル事業の概要」, O plus E, No. 170, 65, 1994.
 - 10) F. Yamamoto et al., "Fault isolation technique using high resolution 1.6 μ m band OTDR for passive double star networks", 6th International workshops on Optical Access Networks, 6.2, October 1994.
 - 11) K. Tanaka et al., "Measuring the individual attenuation distribution of passive branched optical networks", IEEE Photonics Tech. Lett., 8, 7, 915, 1996.
 - 12) Y. Inoue et al., "Silica-based arrayed-waveguide grating circuit as optical splitter/router", Electron. Lett. 3, 9, 726, 1995.
 - 13) 田中他、「試験波長割り当て法による分岐光線路の個別損失分布測定」平成8年電気学会電子・情報・システム部門大会 A-9-4, 165, 1996.
 - 14) 田中他、「分岐光線路の心線対照」, 信学ソサイエティ大会 B-977, 1996.
 - 15) 堀口他、「ブリルアン分光による光ファイバのひずみ分布測定」, 信学論 J73-B-I, 2, 144, 1990.
 - 16) T. Horiguchi et al., "1 m spatial resolution measurement of distributed Brillouin frequency shift in single-mode fibers", Tech. Digest, Symposium on Optical Fiber Measurements, 73, 1994.
 - 17) T. Kurashima et al., "Brillouin optical-fiber time domain reflectometry", IEICE Trans. Commun. E76-B, 4, 382, 1993.
 - 18) K. Shimizu et al., "Technique for translating light-wave frequency by using an optical ring circuit containing a frequency shifter", Optics Lett. 17, 18, 1307, 1992.
 - 19) K. Shimizu et al., "Coherent self-heterodyne Brillouin OTDR for measurement of Brillouin frequency shift distribution in optical fibers", IEEE J. Lightwave Technol. 12, 5, 730, 1994.
 - 20) T. Kurashima, et al., "A high performance OTDR for measuring distributed strain and optical loss", ECOC'96, TuD3.7, 1996.
 - 21) 泉田他、「ラマン増幅器を用いた1.65 μ m帯 C-OTDR ダイナミックレンジ拡大に関する検討」, 信学秋季大会、B-657, 1995.
 - 22) H. Izumita et al., "1.65 Brillouin optical time domain reflectometry employing a Raman fiber amplifier and a lithium niobate phase modulator", to be presented at OFC'97, WJ7, 1997.