

光通信線路システムにおける光ファイバーセンシング

堀 口 常 雄

1981年に光ファイバーが初めて公衆通信に使用されて以来、伝送品質の向上、通信価格の低減を目的に、光ファイバーは積極的に日本の通信網に導入されてきた。敷設された中継系光ファイバーケーブルの延長はすでに10万kmにのぼる。また、マルチメディア社会における高速・広帯域通信の需要に応えるためには、延長100万kmにも及ぶメタリックケーブルを有する、アクセス系の高度化が必須である。そのため、近年、細径化を図った最大1000心収容の光ファイバーケーブル¹⁾が、アクセス系に本格的に導入されつつある。このような大量の光ファイバーを効率的に保守運用するために、光ファイバーの自動試験システムが実用化されている²⁾。この光ファイバーの自動試験システムには、1990年の導入当初から、図1に示すように数多くの光ファイバーセンシング（OTDR: optical time domain reflectometer）による光ファイバーの遠隔障害点探索、光ファイバーセンサーによる浸水検知、光ファイバーの曲げによる放射光を利用した心線対照、試験光反射型光フィルターによる光線路とユーザー伝送装置の故障切り分けなど）が応用されている。

本稿では、その後の光通信システムの急速な高度化および多様化に対応した光ファイバーセンシングと、通信はもとよりそれ以外の分野にも幅広い応用の可能性のある新しい光センシング技術について解説する。

1. 光通信システムの高度化・多様化に対応した光ファイバーセンシング

1990年代、光通信システムは大きく変遷した。1980年代末に、1.55 μm帯においてすぐれた増幅特性を有する

EDFA (erbium-doped fiber amplifier) が開発され、中継伝送システムの中継間隔の拡大や、光増幅多中継システムの開発が行われた。さらに、光ファイバーが中継系だけでなく、アクセス系にも導入され始めた。このような光通信システムの高度化および多様化は、光ファイバー自動試験システムに、新たな技術による光ファイバーセンシングを要求した。以下にその研究開発例を述べる。

1.1 高ダイナミックレンジ/高速リフレクトメトリー

光ファイバー増幅器の出現は、光伝送システムの中継間隔を80kmから160kmに延長した。それに対応して、ダイナミックレンジ(DR)を拡大したOTDRが求められた。アクセス網においては、収容光ファイバー数が増加するにつれ、よりいっそうの試験の高速化が求められた。これらの要求に応え、1.55 μm帯のリングレーザーOTDR³⁾およびC-OTDR (coherent-OTDR)⁴⁾が開発された。リングレーザーOTDRは、パルス光源に、従来の半導体レーザーに代えて、EDFAを含むQスイッチ・リングレーザーを使用したものである。高出力光源の採用により、DR=34dB(距離分解能100mのとき)が達成された。この値は、従来の半導体レーザー型OTDRに比べ、9dBすぐれている。これは、試験時間が1/4000に短縮されたことと等価である。また、C-OTDRでは、コヒーレント検波技術による量子雑音限界に近い受信感度の達成と、光増幅器によるパルス出力の向上により、DRが14dB拡大(試験時間が1/400,000に短縮)された。

サービス状態の光ファイバーをOTDRで試験するためには、通信波長(1.3 μm, 1.55 μm)と異なる波長の光源を使用したOTDRが必要である。そこで、高出力な1.6 μm帯半導体レーザーを適用した1.6 μm帯OTDRが開発された⁵⁾。さらに、上記Qスイッチ・リングレーザーを励起光源とした、1.6 μm帯ファイバーラマン増幅器、レーザ

NTTアクセス網研究所(〒319-1193茨城県那珂郡東海村白方白根162)
E-mail: horiguti@ansl.ntt.co.jp

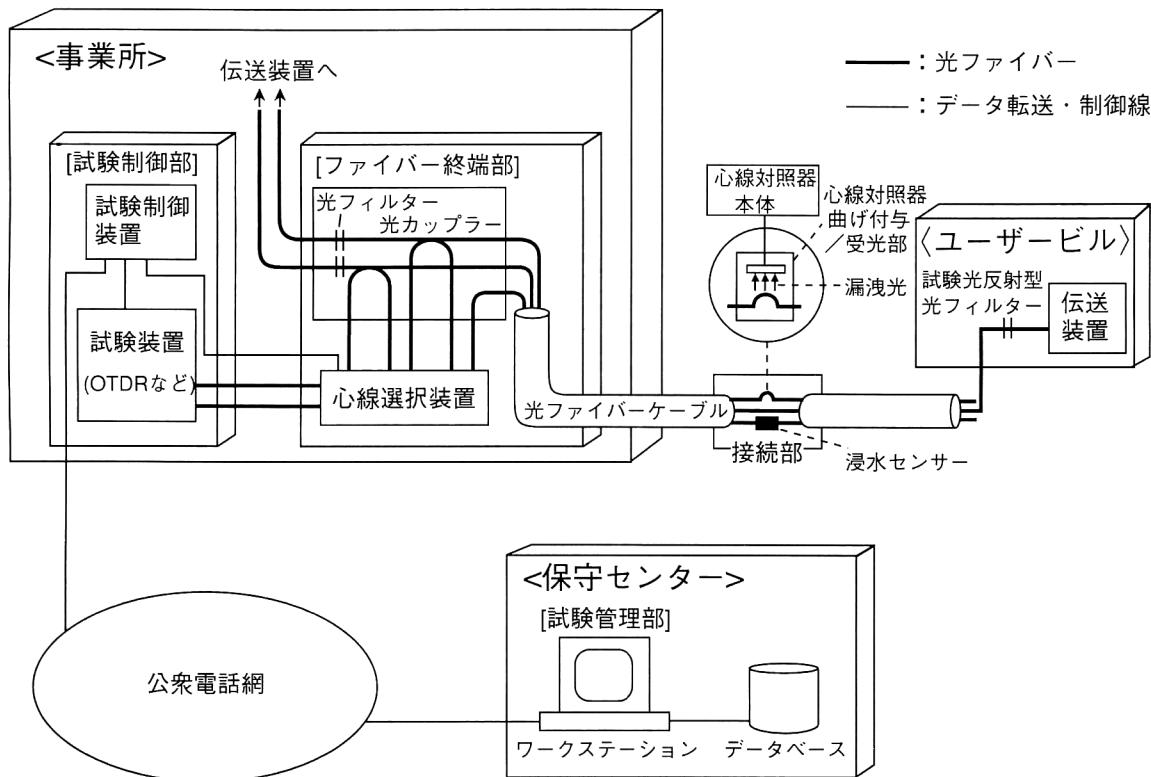


図1 光ファイバー自動試験システムの構成例。

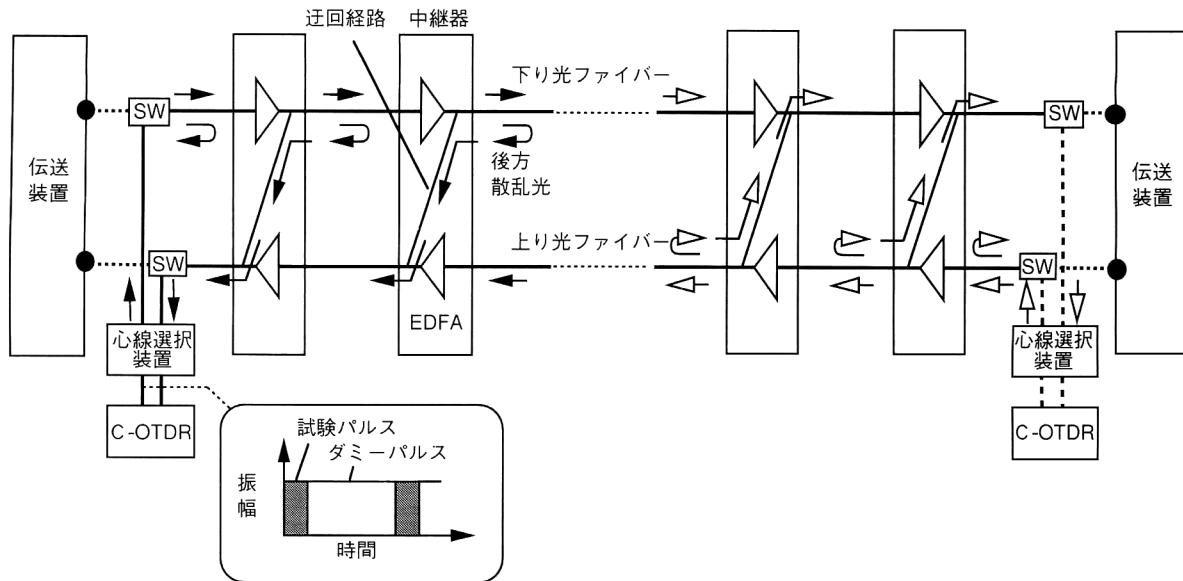


図2 光増幅多中継線路の試験システム構成。

ーおよびそれを使用したOTDRの研究が行われている⁶⁻⁸⁾。

1.2 光増幅多中継システムにおけるリフレクトメトリー

中継システムにおける光増幅中継器の採用は、従来の再生中継システムでは不可能であった、全中継区間の光ファイバーの障害点探索の道を開いた。このような光線路試験システム構成を図2に示す⁹⁾。光アイソレーターが組み込

まれた光増幅器は、一方向にしか光信号を通過させないので、後方散乱光を迂回して戻すための経路を、上り線と下り線の間に設けた。上り線と下り線の障害点の探索のために、両端局それぞれにOTDRを設置する。OTDRには、光増幅器からの雑音光による性能劣化が少なく、またDRが大きなC-OTDRが採用されている^{9,10)}。また、OTDRからの光パルスが多中継光増幅されることによる光サージの発

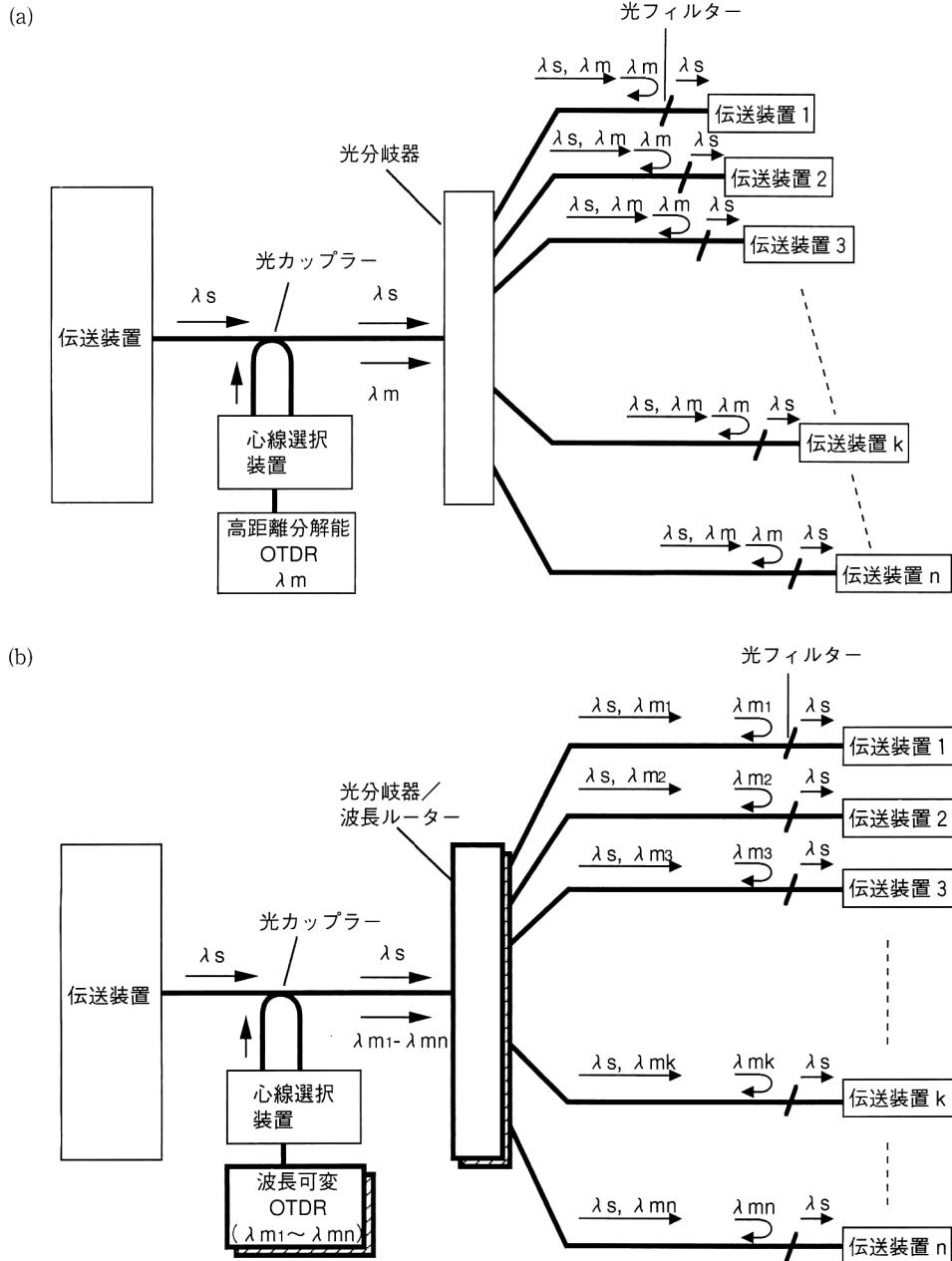


図3 分岐光線路の試験システム構成。(a) 高距離分解能 OTDR 応用, (b) 波長ルーティング応用。

生を抑圧するために、繰り返し送出されるプロープ光パルスの隙間に、波長がわずかに異なるダミー光を挿入し、OTDR 送出光の振幅を一定としている。

1.3 分岐光線路試験技術

アクセス系システムでは、事業所側光伝送装置を複数の加入者が共有することによりシステムコストの低減を図った、分岐光線路が検討されている。このようなシステムにおいて、信号光の分岐のためのスプリッターを事業所外に設置した場合、分岐光ファイバーを識別して測定することが大きな課題のひとつとなる。この課題の解決のために、高距離分解能 OTDR 応用技術¹¹⁾、波長ルーティング応用

技術¹²⁾などが提案されている。

高距離分解能 OTDR を適用した分岐光線路試験システム構成を図 3(a) に示す。各分岐光ファイバーの終端に取り付けられた反射フィルターからの反射光パルスを分離して測定可能とするために、各分岐光ファイバーの長さに 2 m 程度の差を設けるとともに、試験装置には距離分解能特性を向上させた OTDR を使用している。光線路の建設時と、光伝送システム故障発生時の反射光パルスを比較することにより、光線路の故障か、ユーザー伝送装置の故障かの切り分けを迅速に行うことが可能である。

波長ルーティングを適用した光線路試験システム構成を

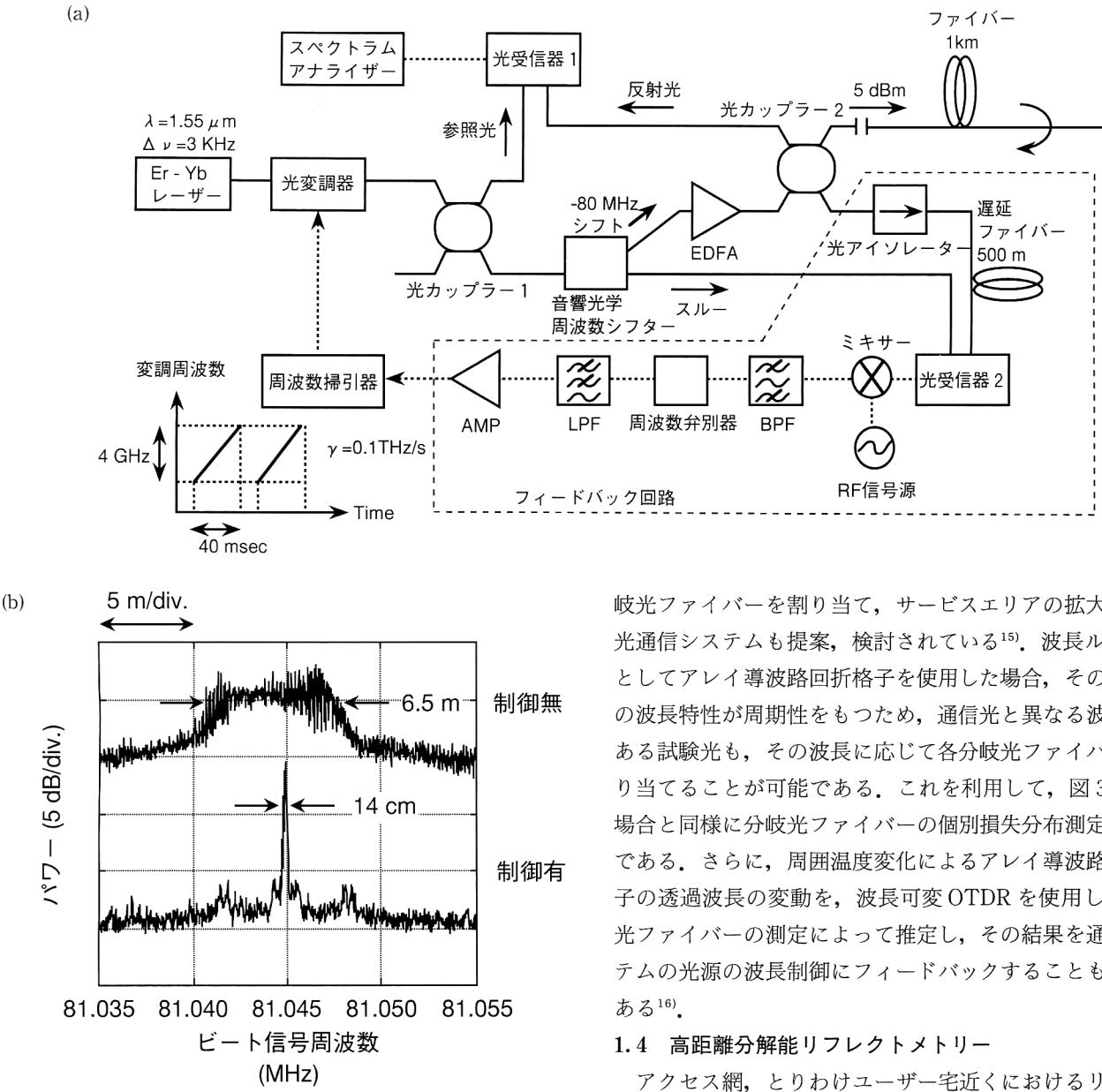


図4 C-OFDR. (a) 構成, (b) 光ファイバー終端の反射光の測定結果。

図3(b)に示す。本技術では、通信光は等分配し、試験光は、波長に応じて各分岐光ファイバーに割り当てる機能を併せてもつ光分岐器/波長ルーターが必要とされる。試験器の光源には、分岐数に対応した複数の波長を高精度に設定可能なことが要求される。PLC技術による光分岐器/波長ルーター¹³⁾と波長可変OTDRを使用することにより、光線路/伝送装置の故障切り分けに留まらず、図3(a)の構成では困難であった、分岐光ファイバーの個別損失分布測定が実現されている。同様にして、分岐光ファイバーの心線対照も実現されている¹⁴⁾。

なお、通信光を等分配するのではなく、上述の試験光と同様に、波長ルーターによって通信光の波長に応じて各分

岐光ファイバーを割り当て、サービスエリアの拡大を図る光通信システムも提案、検討されている¹⁵⁾。波長ルーターとしてアレイ導波路回折格子を使用した場合、その透過率の波長特性が周期性をもつため、通信光と異なる波長帯にある試験光も、その波長に応じて各分岐光ファイバーに割り当てることが可能である。これを用いて、図3(b)の場合と同様に分岐光ファイバーの個別損失分布測定が可能である。さらに、周囲温度変化によるアレイ導波路回折格子の透過波長の変動を、波長可変OTDRを使用した分岐光ファイバーの測定によって推定し、その結果を通信システムの光源の波長制御にフィードバックすることも可能である¹⁶⁾。

1.4 高距離分解能リフレクトメトリー

アクセス網、とりわけユーザー宅近くにおけるリフレクトメトリーには1 m以下の距離分解能が必要とされる。しかし、OTDRのそれは通常10~100 mである。これは、距離分解能を高めるためにより広帯域な受信器を使うと、受信感度が劣化し、DRが減少してしまうためである。この問題点を解決するために、C-OFDR (coherent-optical frequency domain reflectometer)¹⁷⁾や、OCDR (optical coherence domain reflectometry by synthesis of coherence function)¹⁸⁾が研究されている。ここでは、筆者らが進めているC-OFDRの研究を紹介する。

C-OFDRでは、光の周波数を時間に対して直線的に掃引した連続光を光ファイバーに入射し、そこからの戻り光とオリジナルな光である参照光との干渉によるビート信号を測定する。ビート信号のパワーは反射点までの損失に対応して減衰し、ビート周波数は、反射点までの距離に比例す

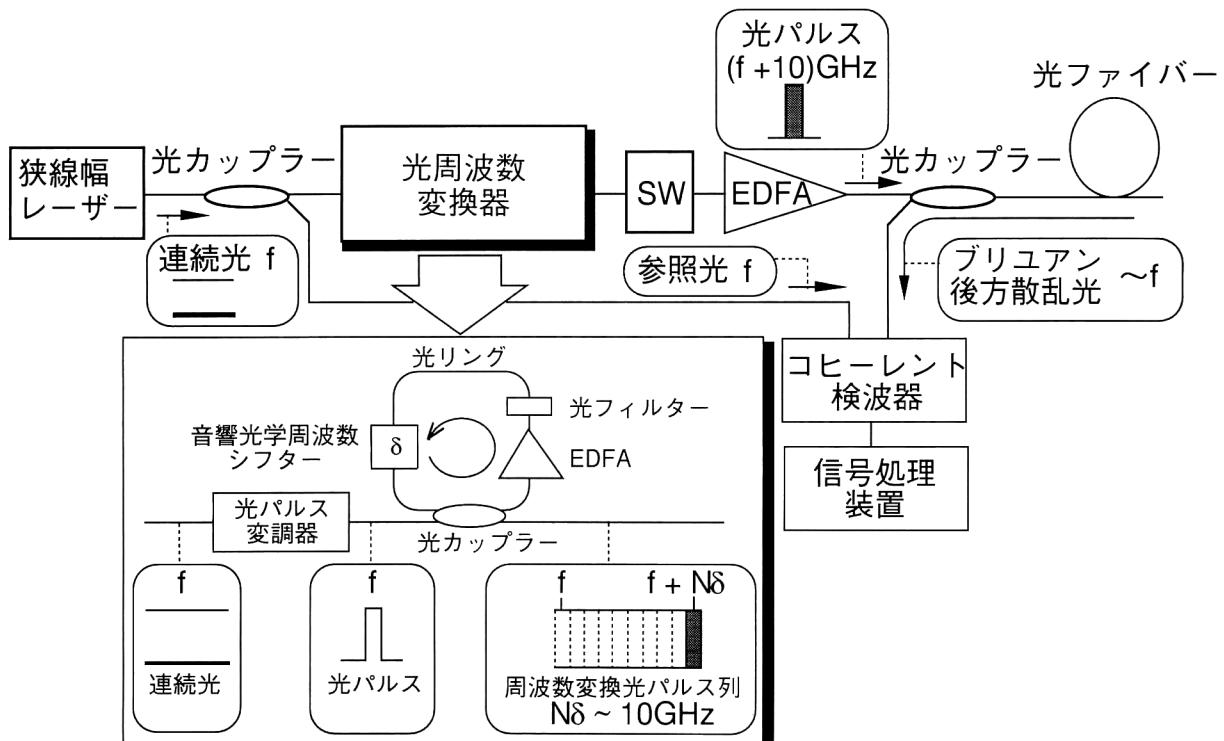


図5 BOTDR および光周波数変換器の構成。

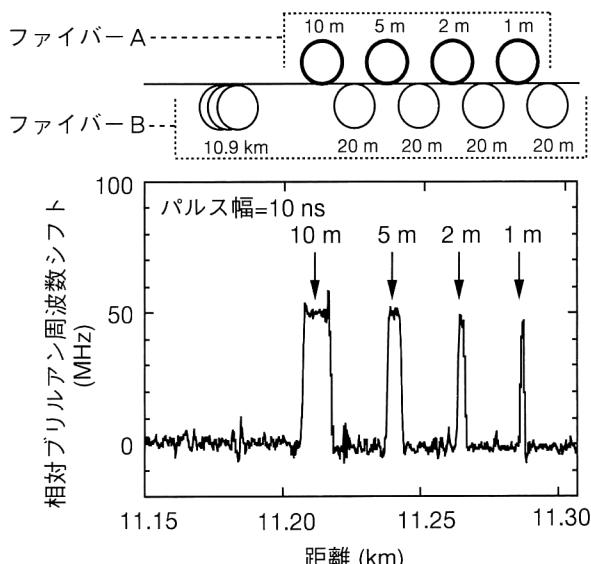


図6 BOTDA による 1 m 距離分解能測定。

る。したがって、C-OFDR では距離分解能を向上させることは、受信帯域を狭めることに対応するので、OTDR の場合と異なり、高距離分解能化により受信器の感度が劣化することではなく、むしろ向上する。しかしながら、C-OFDR は干渉を利用するため、その測定対象の寸法が光源の可干涉距離以下の微小なものに限られ、屋外光ファイバーの測定には不向きだと思われていた。しかし、最近、周波数掃引の高速化により、可干涉距離以上の長さの光ファイバー

においても、高距離分解能で測定可能なことが指摘された¹⁷⁾。実際、30 km の光ファイバーに対して 5 m の距離分解能が報告されている¹⁷⁾。また、図4に示すように、フィードバック回路を設け、光周波数掃引の直線性を改善することにより、1 km の光ファイバーに対して 14 cm の距離分解能が達成されている¹⁹⁾。

2. 新しい光センシング技術

2.1 光ファイバー歪み分布測定技術

光ファイバーの機械的信頼性を評価するにあたり、その歪み分布を知ることは非常に重要である。そこで、光ファイバー歪み分布測定装置として、BOTDA (Brillouin optical-fiber time domain analyzer) と BOTDR (Brillouin optical time domain reflectometer) が開発された²⁰⁾。それぞれ、ブリュアン利得および自然ブリュアン散乱光の周波数シフトの歪み依存性を利用して、歪みの変化量を測定する。また、歪みの発生位置は、光パルスを入射してからブリュアン信号が光パルス入射点で検出されるまでの遅延時間から測定している。BOTDR の構成を図5に示す。ブリュアン散乱光の周波数シフトは 10 GHz にも達するため、そのコヒーレント検波のためには、高速な光受信器と電気回路が必要である。そこで、本構成では、光周波数変換器により、あらかじめ光周波数を 10 GHz シフトさせた光パルスを光ファイバーに入射させる。後方ブリ

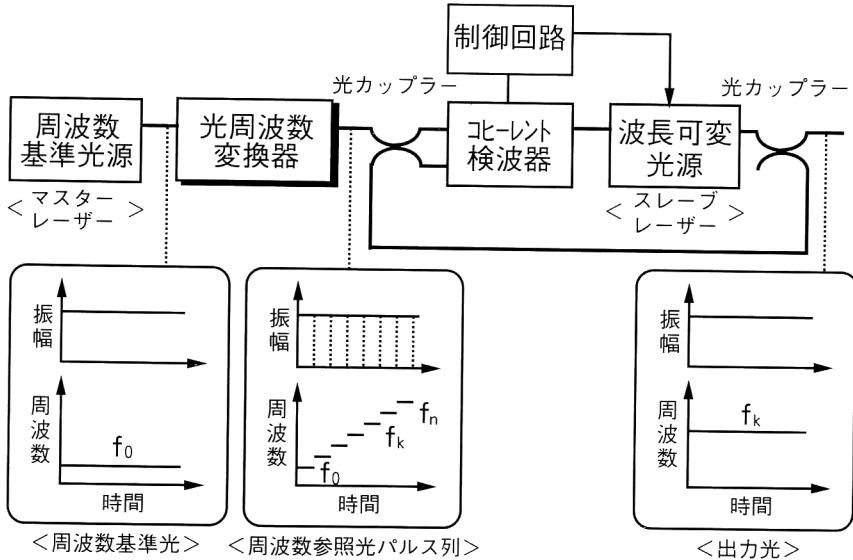


図7 光周波数シンセサイザーの構成。

ユアン散乱の過程で光周波数は約-10 GHz シフトするため、光受信器に入射する後方ブリュアン散乱光の周波数は、元の光信号とほぼ同一となる。そのため、低速の光受信器でブリュアン散乱光をコヒーレント検波できる。光周波数変換器は、光リング内に、100 MHz の光周波数シフトを与える音響光学周波数シフターと、光リングの損失を補償するための EDFA を配置したものである。光リング内に入射された光パルスは、100 回光リングを周回することにより、10 GHz の周波数シフトをうけることになる。このような構成をとることにより、高周波で動作する光・電気デバイスを使用することなく、ブリュアン散乱光を高感度で測定可能となった。

BOTDA の距離分解能を試験した結果を図 6 に示す。ここでは、ブリュアン周波数シフトが 50 MHz 異なった光ファイバー A, B を交互に接続することにより、分布した光ファイバーの歪みを模擬している。図より、距離分解能 1 m、歪み測定精度 2×10^{-4} (周波数測定精度 10 MHz に対応) が達成されていることがわかる。BOTDR も同様の性能が達成されている²¹⁾。

現在、BOTDA, BOTDR は、障害発生時の原因究明、地震などによって光ケーブルの敷設環境などに異変が生じたときの安全性の評価、新規開発ケーブルの機械特性の評価などに使用されている。将来、光線路の予防保全機能の充実を図るため、光ファイバーの自動試験システムに搭載することが検討されている²²⁾。また、超高層建築物やダムに代表される巨大構造物の診断など、光通信以外の分野への応用も期待されている。

2.2 光周波数シンセサイザー

超大容量光通信を実現する波長多重 (WDM) 方式では、光ファイバーを流れる信号の光周波数を精度よく計測、制御することが必要である。また、光伝送路を構成する光デバイスの光周波数特性の高精度測定も重要である。そのための基本装置である光周波数シンセサイザーの研究が行われている²³⁾。装置構成を図 7 に示す。アセチレンガスの吸収線を利用して周波数安定化されたマスターレーザー（周波数設定精度は数 MHz），超音波光変調器など周波数シフターと EDFA で構成される光周波数変換器（これは上記 BOTDR に使われたものと基本的に同一である），および周波数変換パルス列の中の任意のパルスの周波数を参考して周波数安定化されるスレーブレーザーで構成される。光周波数変換器は電気回路並みの精度で光周波数が変換できる。以上の構成で、100 GHz 以上の周波数変換が実現されている。光リング内のバンドパスフィルターの透過中心周波数を、信号パルスの周回に同期して変化させることにより、周波数変換幅をさらに拡大することが検討されている²⁴⁾。また、上記光周波数変換器の光リング内に、10 GHz 電気光学位相変調器と不要変調側帯波除去のためのファブリー・ペロー・フィルターを加えることにより、0.7 THz の周波数変換幅が達成されている²⁵⁾。今後、WDM 通信方式で使われる、数 THz にわたる光増幅器の帯域において、任意の周波数の光波を高精度で発生可能となることが期待される。

光通信線路を効率的に保守運用するために導入している光ファイバー自動試験システムへの応用に向けた、光ファイバーセンシングの研究開発例を紹介した。今後、マルチ

メディア社会における高速・広帯域通信サービスを提供するため、アクセス網の光化および超高速・WDM光伝送による中継網の大容量化がいっそう推進されてゆく。これら光通信システムを実現し、安定したサービスを低廉に提供する上で、光ファイバー自動試験システムと光ファイバーセンシングは必要不可欠なものである。光通信システムの進展に対応して、引き続き発展、高度化してゆくことが期待される。

文 献

- 1) H. Iwata, M. Tsutsumi, E. Nakamura, N. Matsumoto, M. Nozawa, S. Hayami, S. Nagasawa and T. Tanifugi: "Preconnectorized 1000-fiber single slotted core cable," *44th International Wire and Cable Symposium (IWCS)* (1995) pp. 627-634.
- 2) N. Tomita, K. Sato and I. Nakamura: "Optical fiber line support system—AURORA & FITAS," *NTT Rev.*, **3** (1991) 97-104.
- 3) 木村 桂, 富田信夫, 榎本圭高, 中西 功: "高ダイナミックレンジパッケージ型OTDRの設計と特性", 1995年電子情報通信学会総合大会 (1995) 講演番号 B-1052.
- 4) Y. Koyamada and H. Nakamoto: "High performance single mode OTDR using coherent detection and fiber amplifiers," *Electron. Lett.*, **26** (1990) 573-575.
- 5) H. Takasugi, N. Tomita, J. Nakano and N. Atobe: "Design of a 1.65-μm-band optical time-domain reflectometer," *J. Lightwave Technol.*, **11** (1993) 1743-1747.
- 6) T. Sato, T. Horiguchi and Y. Koyamada: "A 1.6 μm band OTDR using a synchronous Raman fiber amplifier," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **4** (1992) 923-924.
- 7) T. Horiguchi, T. Sato and Y. Koyamada: "A 1.6-μm-band OTDR using a Raman fiber laser pumped by a Q-switched Er³⁺-doped fiber ring laser," *Symposium on Optical Fiber Measurements* (1992) pp. 11-14.
- 8) H. Izumita, T. Sato, M. Tateda, T. Horiguchi and Y. Koyamada: "1.65-μm Brillouin optical time domain reflectometry employing a Raman fiber amplifier and a lithium-niobate phase-modulator," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '97* (1997) WJ7, pp. 159-160.
- 9) S. Furukawa, K. Tanaka, Y. Koyamada and M. Sumida: "Enhanced coherent OTDR for long span optical transmission lines containing optical fiber amplifiers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **7** (1995) 540-542.
- 10) Y. Horiuchi, S. Yamamoto and S. Akiba: "Highly accurate fault localization over 4580 km optical amplifier system using coherent Rayleigh backscatter reflectometry," *European Conference on Optical Communication (ECOC) '93* (1993) pp. 5-8.
- 11) F. Yamamoto, S. Furukawa, H. Suda and Y. Koyamada: "Fault isolation technique using high resolution 1.6 μm-band OTDR for passive double star networks," *IEEE Workshop on Optical Access Networks* (1994) 6.2-1/6.2-7.
- 12) K. Tanaka, M. Tateda and Y. Inoue: "Measuring the individual attenuation distribution of passive branched optical networks," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **8** (1996) 915-917.
- 13) Y. Inoue, A. Himeno, K. Moriwaki and M. Kawachi: "Silica-based arrayed-waveguide grating circuit as optical splitter/router," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 726-727.
- 14) 田中郁昭, 立田光廣, 井上靖之, 須田裕之: "分岐光線路の心線対照", 1996年電子情報通信学会ソサイエティ大会 (1996) 講演番号 B-977.
- 15) M. Okayasu, N. Tamaki, N. Shibata and I. Yamashita: "Performance evaluation of an upgradable passive access network employing downstream WDM packet routing," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '97* (1997) TuK5, pp. 56-57.
- 16) K. Tanaka, H. Izumita, N. Tomita and Y. Inoue: "Inservice individual line monitoring and a method for compensating for the temperature-dependent channel drift of a WDM-PON containing an AWGR using a 1.6 μm tunable OTDR," *European Conference on Optical Communication (ECOC) '97* (1997) pp. 295-298.
- 17) K. Tsuji, K. Shimizu, T. Horiguchi and Y. Koyamada: "Coherent optical frequency domain reflectometry using phase-decorrelated reflected and reference lightwaves," *J. Lightwave Technol.*, **15** (1997) 1102-1109.
- 18) T. Saida and K. Hotate: "High-spatial resolution reflectometry by synthesis of optical coherence function for measuring reflectivity distribution at a long distance," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **10** (1998) 573-575.
- 19) K. Tsuji, K. Shimizu, T. Horiguchi and Y. Koyamada: "Spatial-resolution improvement in long-range coherent optical frequency domain reflectometry by frequency-sweep linearisation," *Electron. Lett.*, **33** (1997) 408-410.
- 20) T. Horiguchi: "Brillouin scattering for measuring strain and temperature," *Optical Fiber Sensors Volume Four Applications, Analysis, and Future Trends*, eds. J. Dakin and B. Culshaw (Artech House, Boston, 1997) pp. 313-329.
- 21) 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 Photonics Technol. Lett.*, **9** (1997) 360-362.
- 22) N. Tomita: "Future prospects of automatic fiber testing systems for fiber-optic subscriber loops," *Optoelectronics and Communications Conference (OECC) '96* (1996) 17C1-1, pp. 134-135.
- 23) K. Shimizu, Y. Sakai, T. Horiguchi and Y. Koyamada: "Continuous-wave frequency synthesis of a laser diode based on discrete-time negative frequency feedback: I Experiment," *IEEE J. Quantum Electron.*, **31** (1995) 1038-1046; "Continuous-wave frequency synthesis of a laser diode based on discrete-time negative frequency feedback: II Theory," *IEEE J. Quantum Electron.*, **32** (1996) 620-627.
- 24) 武居弘樹, 山本文彦, 清水 薫, 堀口常雄: "同期フィルタリング法を用いた周波数掃引光リンク回路", 1998年電子情報通信学会総合大会 (1998) 講演番号 B-10-152.
- 25) K. Shimizu, T. Horiguchi and Y. Koyamada: "Broad-band absolute frequency synthesis of pulsed coherent lightwaves by use of a phase-modulation amplified optical ring," *IEEE J. Quantum Electron.*, **33** (1997) 1268-1277.

(1998年3月10日受理)