

最近の技術から

OTDR——光ファイバの後方散乱光解析技術

野口 一博

NTT 電気通信研究所 〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 162

光ファイバに対する OTDR (optical time domain reflectometry) 技術は、1976年の Barnoski らによる最初の実験¹⁾以来急速な進歩を遂げ、(1)ファイバの片端のみを用いて損失測定を行なうことができる、(2)ファイバの長手方向の損失分布の測定を行なうことができる、(3)ファイバの破断位置、終端位置の測定、ファイバ長の測定にも応用される、等の利点から、現在では光ファイバ伝送路の伝送損失、接続損失の測定に不可欠な測定法として広く適用されている。図1に、OTDRの測定系の構成を示す。被測定光ファイバ中に幅が数十 ns ~ 数 μ s の光パルスを伝播させ、レーリー散乱を受けてファイバ入射端に向かって伝播する後方散乱光を光方向性結合器を介して分離し、光検出器によって検出する。この後方散乱光の時間領域での強度の減衰は、そのまま被測定ファイバの損失の長手方向分布を示す。後方散乱光の信号は信号処理装置によって平均化、対数化等の処理を受け、表示装置によって表示される。

被測定ファイバの情報を含んだレーリー後方散乱光は、入射光パルスに比較しきわめて微弱である上、パルス光がファイバに入射する際にファイバ端面で発生する強度の大きいフレネル反射光パルスを伴っている。したがって、OTDR装置の高性能化には、不要なフレネル反射光を除去し、レーリー後方散乱光のみを透過する光方向性結合器が必要不可欠である。現在の OTDR 装置では、特殊なものを除いてほとんど超音波光偏向器形方向性結合器が用いられている。これは、超音波光ビーム偏向素子を用い、素子をドライブする超音波のスイッチングにより被測定ファイバと、パルス光源あるいは光検出器のいずれか一方とが結合するようにしたものである。この形の結合器は従来の偏光プリズム形の光方向性結合器と比較して、後方散乱光に対する挿入損失が小さい、超音波のスイッチングにより後方散乱光の任意の部分のマスキングを行なうことができる、等の利点を有している。

OTDR装置の受信系のSN比向上には、信号の平均化処理および光検出器の高感度化・低雑音化が重要であ

る。とくに、平均化処理によって微弱な後方散乱光信号のSN比を改善する技術はOTDRに不可欠なものである。たとえば、測定の繰返し速度を1,000回/秒とすると、5分間の測定によって理想的には 3×10^5 個の信号波形の平均化が可能であり、光レベルに換算して約27dBものSN比改善が達成される。初期のOTDRでは、Boxcar積分器によるアナログ方式の平均化処理が用いられていたが、この方式では等価的に信号1周期の中の1点のみをサンプリングするため測定の効率が悪い。そのため、現在では高速デジタルサンプリング装置および高速加算器を用いたデジタル方式によって処理の効率化が図られている。OTDRのような広いダイナミックレンジを必要とする測定にデジタル方式を適用すると、しばしば量子化ノイズが問題となるが、信号にランダム雑音を重畳した後に平均化する方式を採用することによって解決が図られている。

現在、 $1.3 \mu\text{m}$ 以上の長波長帯のOTDR用光検出器には通常Ge-APDが使用される。しかし、この素子は暗電流雑音が比較的大きく、OTDR用素子としてのNEP(noise equivalent power)は 1 nW 程度である。そこで、Ge検出器を冷却して暗電流を減少させる方法、暗電流の小さいInGaAs-APDを用いる方法等が提案され、いずれも 0.1 nW 以下のNEPが達成されている。したがって、将来的には、これらの高性能な素子が導入されると思われる。

OTDR用パルス光源には通常 $1.3 \mu\text{m}$ 帯、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯の半導体レーザーが用いられる。しかし、通常の半導体レーザーでは単一モード光ファイバへの入射光強度は最大でも数mW程度にしかならないため、より高出力なパルス光源を用いて後方散乱光強度の増大を図る方式が考えられる。そこで、QスイッチNd:YAGレーザー(波長 $1.32 \mu\text{m}$)、あるいはQスイッチEr³⁺ドープガラスレーザー(波長 $1.55 \mu\text{m}$)を用いて、ファイバ内光パルス入力を数W程度まで高めたOTDR方式が試みられ、実験的にはEr³⁺レーザーを光源に用いた、全長130km($1.55 \mu\text{m}$ での片道損失34dB)の単一モード光

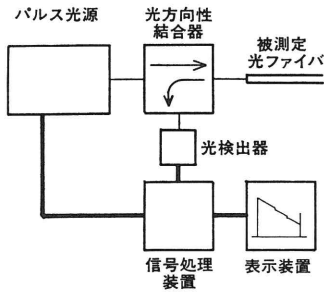


図 1 OTDR 装置の概観

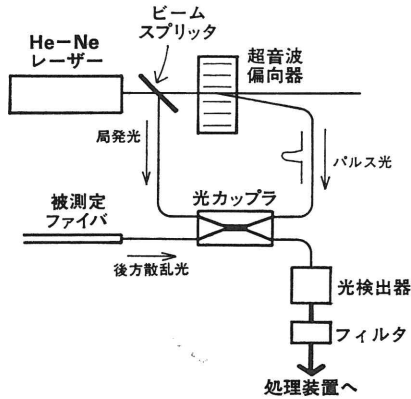


図 2 コヒーレント OTDR

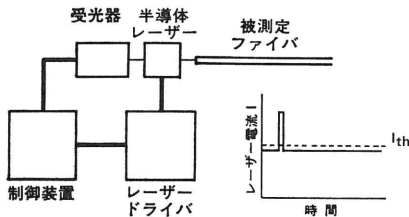


図 3 後方散乱光直接増幅 OTDR

ファイバの測定の報告がある²⁾。

将来に向けての興味ある OTDR 技術として、コヒーレント OTDR および後方散乱光直接増幅 OTDR がある。これらは、ともに高出力光源を用いずに、後方散乱光の検出方式の改良により高性能化をめざしている。図

2 に、ヘテロダイン検波コヒーレント OTDR の測定系を示す³⁾。単一縦モード He-Ne レーザー光を二分し、一方を超音波偏向器を介してパルス光源とし、もう一方は局発光源とする。超音波偏向器により偏向した光は、その周波数が超音波のドライブ周波数 ω_0 だけシフトするため後方散乱光と局発光との間には ω_0 の周波数差が生ずる。そこで、後方散乱光と局発光とをカップラを介して結合し、その信号の ω_0 成分を検出する。このようなコヒーレント検波による SN 比は理想的には光検出器のショット雑音限界にまで到達し、通常の方式に比べて光レベルで 20 dB 以上の改善が期待される。現在、波長 $1.15 \mu\text{m}$ の He-Ne レーザーを用いて 8 pW の NEP が実験的に得られており、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯で単色性の優れた光源を用いれば、非常に高性能な OTDR 装置が実現されると思われる。図 3 に、後方散乱光直接増幅 OTDR の測定系の一例を示す⁴⁾。この方式では、一個の半導体レーザーをパルス光源として用いると同時に後方散乱光の増幅器としても利用する。これにより、測定系から方向性結合器を省き系の簡素化を図っている。実験的には、レーザーにしきい値電流 I_{th} の 95% の電流を印加することにより、15 dB 以上の後方散乱光の増幅が確認され、レーザーとファイバとの結合効率の改善等の技術的改良により、装置の高性能化・簡素化が期待される。

文 献

- 1) M. K. Barnoski and S. M. Jensen: "Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics," *Appl. Opt.*, **15** (1976) 2112.
- 2) M. Nakazawa, M. Tokuda, K. Washio and Y. Asahara: "130-km-long fault location for single-mode optical fiber using $1.55\text{-}\mu\text{m}$ Q-switched Er^{3+} glass laser," *Opt. Lett.*, **9** (1984) 312.
- 3) S. Wright, K. Richards, S. K. Salt and E. Wallbank: "High dynamic range coherent reflectometer for fault location in monomode fibers," *9th European Conference on Optical Communication* (1983) p. 177.
- 4) K. Suzuki, T. Horiguchi and S. Seikai: "Optical time, domain reflectometer with a semiconductor laser amplifier," *Electron. Lett.*, **20** (1984) 714.

(1986年4月19日受理)