

学 位 論 文 題 名

A Study on Brillouin OTDR Measurement Technology
for Efficient Maintenance of Optical Fiber Networks(光ファイバ網の効率的な保守運用に向けたブリルアン散乱OTDR測定技術
に関する研究)

学位論文内容の要旨

近年、光ファイバを用いたブロードバンド通信サービスの需要は非常に大きく、FTTH (Fiber To The Home) サービスの利用者数は急激に増加している。局内には数千～数万という膨大な数の光ファイバが収容されている。現在のこのような大規模な FTTH サービスの主流は、一つの局内端末と光ファイバを複数の顧客で共有する PON (Passive Optical Network) 方式の線路を用いたものである。この方式では、光ファイバを分岐する光スプリッタが顧客の家から近くの光クロージャに配置されている。このように、低コストで光ファイバ網を普及させるために、分岐を用いた光ファイバ網が顧客と接続されていることが現在の FTTH サービスの大きな特徴である。

このような大規模な FTTH サービスの普及が進んだ現在、このネットワークを効率的に維持していくことが大きな課題となりつつある。つまり、光ファイバ網の保守運用コストを低減することが、将来、光ファイバ網を現在の固定電話並みに普及・維持していくための重要な課題となっている。特に、保守運用コストに占める割合が大きい監視・故障位置探索技術のコストを低減させることが重要である。このためには、損失だけでなく光ファイバの歪などを測定することによる予防保全技術や、分岐が存在する現在の FTTH ネットワークにおける効率的な故障位置探索技術などが必要である。

一方、関心を集めている光ファイバ測定技術として、ブリルアン OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) という測定技術がある。この測定では、光ファイバ中のブリルアン散乱光のパワーとその反射位置を測定する。ブリルアン散乱では、散乱される光の周波数がドップラー効果によりシフトされる。この周波数シフト量をブリルアン周波数シフトと呼ぶ。光ファイバ内でのブリルアン周波数シフトは温度や歪に依存するため、光ファイバセンサとして応用されている。この周波数シフトの温度や歪への依存性は光ファイバ内の原子の振動によるものであるため、ブリルアン周波数シフトは光ファイバ内の屈折率制御のための添加物 (ドーパント) の濃度にも依存する。

本研究では、上述のような大規模光ファイバ網の監視維持コストの低減に対して、ブリルアン OTDR を活用した監視技術の高度化、高精度化、簡易化を目指し、今後の光ファイバ網の効率的な運用と信頼性の高い FTTH ネットワークの実現を目的としている。本論文は 6 章から構成されており、各章を要約すると以下になる。

第 1 章は序論であり、光ファイバ網の監視・試験技術の背景および課題、ブリルアン散乱の研究動向について述べている。また、本研究の目的、位置づけ、構成について述べている。

第 2 章では、ブリルアン散乱を用いた分岐光ファイバの試験技術を提案し、その原理を述べている。光ファイバのドーパントを制御することにより、分岐先からのブリルアン散乱光の周波数シフトを固有な値に制御し、その周波数により散乱された光ファイバを識別できることを明らかにしている。実際にドーパントを制御してブリルアン周波数シフトを設計した光ファイバを試作し、さらに、

それらを分岐により複数がつながった線路に用いて、分岐先に曲げなどの損失がある場合に、光ファイバの識別と故障位置の特定が可能であることを明らかにしている。

第3章では、ブリルアン散乱をブリルアン OTDR で分布計測する際にノイズとして現れる光ファイバ接続部や遠端でのフレネル反射との関係について述べている。フレネル反射は入射光と同じ周波数で、ブリルアン散乱は入射光より 10GHz シフトした散乱光であるが、フレネル反射は非常に大きい反射であるため、ブリルアン散乱光測定に影響する。光ファイバ遠端でのフレネル反射光の大きさをいくつかの値に変化させてブリルアン散乱光を測定し、ブリルアン散乱光測定に影響するフレネル反射のしきい値について、実験と理論の両面から明らかにしている。

第4章では、第2～3章において用いたブリルアン散乱光測定方法の簡易化・低廉化について述べている。上述のブリルアン散乱測定では 10GHz 帯の非常に広帯域な測定を行う必要があるため、測定そのものにコストがかかってしまう。ここでは、ブリルアン散乱測定方法を、高コストな物品を使わずに低周波数化する技術について検討している。参照とする光ファイバを測定系内に追加することにより、測定帯域を 1GHz 以下に低減させ、測定系を簡易化、低廉化できることを明らかにしている。また、実際の温度センサとしても、従来のものと同等の精度で利用できることを明らかにしている。

第5章では、第4章で考案したブリルアン散乱測定方法の OTDR 化について提案している。通常のブリルアン OTDR の測定帯域 10GHz から 1GHz 以下への大きく帯域を小さくしたブリルアン散乱光スペクトルを光ファイバ上の分布として測定できることを明らかにしている。従来のブリルアン OTDR と同様に温度分布測定が可能であるとともに、追加した参照光ファイバの温度揺らぎを補正できることも明らかにした。

第6章では、以上の章の結論として、本研究で得られた結果の要点を述べる。

本研究は、光ファイバ網の効率的な保守運用に必要不可欠な試験技術および測定技術に寄与するとともに、次世代の大規模光ファイバ網の安定した普及ならびに維持に貢献することが期待される。

学位論文審査の要旨

主査教授	小柴正則
副査教授	宮永喜一
副査教授	野島俊雄
副査教授	小川恭孝
副査准教授	齊藤晋聖

学位論文題名

A Study on Brillouin OTDR Measurement Technology for Efficient Maintenance of Optical Fiber Networks

(光ファイバ網の効率的な保守運用に向けたブリルアン散乱OTDR測定技術
に関する研究)

近年、光ファイバを用いたブロードバンド通信サービスの需要は非常に大きく、FTTH (Fiber To The Home) サービスの利用者数は急激に増加している。局内には数千～数万という膨大な数の光ファイバが収容されている。現在のこのような大規模な FTTH サービスの主流は、一つの局内端末と光ファイバを複数の顧客で共有する PON (Passive Optical Network) 方式の線路を用いたものである。この方式では、光ファイバを分岐する光スプリッタが顧客の家から近くの光クロージャに配置されている。このように、低コストで光ファイバ網を普及させるために、分岐を用いた光ファイバ網が顧客と接続されていることが現在の FTTH サービスの大きな特徴である。

このような大規模な FTTH サービスの普及が進んだ現在、このネットワークを効率的に維持していくことが大きな課題となりつつある。つまり、光ファイバ網の保守運用コストを低減することが、将来、光ファイバ網を現在の固定電話並みに普及・維持していくための重要な課題となっている。特に、保守運用コストに占める割合が大きい監視・故障位置探索技術のコストを低減させることが重要である。このためには、損失だけでなく光ファイバの歪などを測定することによる予防保全技術や、分岐が存在する現在の FTTH ネットワークにおける効率的な故障位置探索技術などが必要である。

一方、関心を集めている光ファイバ測定技術として、ブリルアン OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) という測定技術がある。この測定では、光ファイバ中のブリルアン散乱光のパワーとその反射位置を測定する。ブリルアン散乱では、散乱される光の周波数がドップラー効果によりシフトされる。この周波数シフト量をブリルアン周波数シフトと呼ぶ。光ファイバ内でのブリルアン周波数シフトは温度や歪に依存するため、光ファイバセンサとして応用されている。この周波数シフトの温度や歪への依存性は光ファイバ内の原子の振動によるものであるため、ブリルアン周波数シフトは光ファイバ内の屈折率制御のための添加物 (ドーパント) の濃度にも依存する。

本研究では、上述のような大規模光ファイバ網の監視維持コストの低減に対して、ブリルアン OTDR を活用した監視技術の高度化、高精度化、簡易化を目指し、今後の光ファイバ網の効率的な運用と信頼性の高い FTTH ネットワークの実現を目的としている。本論文は 6 章から構成されており、各章を要約すると以下ようになる。

第1章は序論であり、光ファイバ網の監視・試験技術の背景および課題、ブリルアン散乱の研究動向について述べている。また、本研究の目的、位置づけ、構成について述べている。

第2章では、ブリルアン散乱を用いた分岐光ファイバの試験技術を提案し、その原理を述べている。光ファイバのドーパントを制御することにより、分岐先からのブリルアン散乱光の周波数シフトを固有な値に制御し、その周波数により散乱された光ファイバを識別できることを明らかにしている。実際にドーパントを制御してブリルアン周波数シフトを設計した光ファイバを試作し、さらに、それらを分岐により複数がつながった線路に用いて、分岐先に曲げなどの損失がある場合に、光ファイバの識別と故障位置の特定が可能であることを明らかにしている。

第3章では、ブリルアン散乱をブリルアン OTDR で分布計測する際にノイズとして現れる光ファイバ接続部や遠端でのフレネル反射との関係について述べている。フレネル反射は入射光と同じ周波数で、ブリルアン散乱は入射光より 10GHz シフトした散乱光であるが、フレネル反射は非常に大きい反射であるため、ブリルアン散乱光測定に影響する。光ファイバ遠端でのフレネル反射光の大きさをいくつかの値に変化させてブリルアン散乱光を測定し、ブリルアン散乱光測定に影響するフレネル反射のしきい値について、実験と理論の両面から明らかにしている。

第4章では、第2～3章において用いたブリルアン散乱光測定方法の簡易化・低廉化について述べている。上述のブリルアン散乱測定では 10GHz 帯の非常に広帯域な測定を行う必要があるため、測定そのものにコストがかかってしまう。ここでは、ブリルアン散乱測定方法を、高コストな物品を使わずに低周波数化する技術について検討している。参照とする光ファイバを測定系内に追加することにより、測定帯域を 1GHz 以下に低減させ、測定系を簡易化、低廉化できることを明らかにしている。また、実際の温度センサとしても、従来のものと同等の精度で利用できることを明らかにしている。

第5章では、第4章で考案したブリルアン散乱測定方法の OTDR 化について提案している。通常のブリルアン OTDR の測定帯域 10GHz から 1GHz 以下への大きく帯域を小さくしたブリルアン散乱光スペクトルを光ファイバ上の分布として測定できることを明らかにしている。従来のブリルアン OTDR と同様に温度分布測定が可能であるとともに、追加した参照光ファイバの温度揺らぎを補正できることも明らかにした。

第6章では、以上の章の結論として、本研究で得られた結果の要点を述べている。

これを要するに、著者は、光ファイバ網の効率的な保守運用に必要な不可欠な試験技術および測定技術に関する研究を、理論と実験の両面から詳細に行っており、次世代の大規模光ファイバ網の安定した普及ならびに維持のための有益な知見を得ており、光通信工学の学術分野に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。