

博士論文審査報告書

論文題目

A Study on Long-Range High-Resolution
Coherent Optical Frequency Domain
Reflectometry Method with Applying
Light-Source Phase-Noise Compensation

光源位相雑音補償を適用した
長距離高分解能コヒーレント光周波数領域反射測定法
に関する研究

申請者

Yusuke	KOSHIKIYA
<small>こしきや</small> 古敷谷	<small>ゆうすけ</small> 優介

電子光システム学専攻

2015年 2月

光ファイバ網は、まず中継伝送路、海底伝送路において実用化が進められ、通信の大容量化に貢献してきた。近年ではブロードバンドサービスの利用拡大が急速に進み、アクセス系においては通信事業者と各家庭を光ファイバで直接接続する FTTH (Fiber To The Home) 方式が広く普及している。同時に、高品質なブロードバンドサービスを継続的に提供し続けるために、膨大な光ファイバ網に対する効率的な保守運用が求められている。アクセス網においては数 km 以上の測定距離にわたって故障箇所の識別可能な光ファイバ網診断技術や、中継網では偏波モード分散 (PMD) 値の高い数十 km にわたる光ケーブル区間の把握が必要になっている。

光反射測定法はそのような要求に対応し得る技術として期待されており、代表的な方法として光時間領域反射測定法 (OTDR: Optical Time Domain Reflectometry) がある。OTDR は、パルス幅数 ns~数 μ s 程度の光パルスを入射し、反射光の強度を時間の関数として観測することにより破断や損失増加等の故障地点を割り出すことができる。しかし、OTDR の空間分解能は入射光パルス幅によって決定され、かつ、パルス幅は装置受光帯域によって制約されることから、空間分解能と測定可能距離はトレードオフになり、一般的に数 km~数十 km の測定可能距離にて 1~10m 程度の空間分解能を実現するに留まっている。

一方、高空間分解能測定を実現する手法として、コヒーレント光周波数領域反射測定法 (C-OFDR: Coherent Optical Frequency Domain Reflectometry) がある。C-OFDR は、光周波数が時間に対して線形に掃引される試験光を光ファイバの一端から入射し、測定対象内で生じる反射光と、予め分岐させておいたローカル光とをコヒーレント検波する事でビート信号スペクトルを測定する方法である。観測されるビートスペクトルの周波数は反射点までの往復距離に、各周波数成分の強度は反射点での反射率にそれぞれ比例するため、ビート信号のスペクトル解析にて反射率分布を得ることができる。C-OFDR の理論空間分解能は周波数掃引幅で決まり、1mm 以下の高空間分解能も報告されている。一方、測定可能距離は光源のコヒーレンス長にて制限される。すなわち、反射点までの往復距離が光源のコヒーレンス長を超えると、光源の位相雑音によりビート周波数に揺らぎが生じ、空間分解能が大きく劣化する。このような理由から、C-OFDR において高分解能測定可能な距離は一般的なレーザのコヒーレンス長と同等の 1~2km 程度であり、その適用分野は短距離光ファイバ網に限られるという問題点があった。

本研究の目的は、C-OFDR において、光源コヒーレンスに起因した測定可能距離制限を打破することで長距離・高分解能・高感度測定を実現し、光ファイバ網診断技術への適用可能性を明らかにすることにある。本論文は全 8 章から構成されており、以下に各章を要約し評価を加える

第 1 章は序論であり、光反射測定法に関する研究の経緯、基本原理および課題、

そして本研究の目的、位置づけ、構成について述べている。

第 2 章では、C-OFDR において光源のコヒーレンス長を超えた領域での高分解能測定を可能にする新たな光源位相雑音補償法 (PNC:Phase Noise Compensation) OFDR を提案し、その原理について述べている。従来の PNC-OFDR 法は参照干渉計を導入して、そこからのビート信号をクロックとしてサンプリングしていたが、参照干渉計の遅延ファイバが測定点距離に近い場合にしか有効で無かった。他方、本研究の提案手法は、遅延ファイバ長をコヒーレンス長程度とし、その遅延時間による参照時間の整数倍ごとに連結させた連結参照信号を逐次的に計算にて導き出し位相雑音補償に用いることに特徴がある。これにより、コヒーレンス長を超えた領域でも位相雑音を完全に補償できることを明らかにした。この新たな PNC-OFDR 法の提案は大きな評価に値するものであり、以後の章で述べられるさらなる測定性能向上技術のベースとなる。

第 3 章では、C-OFDR の基本性能の向上を目的として、狭線幅ファイバレーザおよび片側波帯搬送波抑圧 (SSB-SC: Single Sideband with Suppressed Carrier) 変調器にて構成される高コヒーレントな周波数掃引光源を提案し、C-OFDR への適用について述べている。提案技術は、ファイバレーザの高コヒーレンス性を維持したまま SSB-SC 変調によって生じる変調側波帯の周波数を掃引することで、簡易な構成で光周波数を掃引できることを特徴としている。SSB-SC 変調の+1 次側波帯において 20~25dB の抑圧比、5km の距離において 3cm 以下の平均分解能を -30dB の感度を達成し、その有効性を実証したことは評価に値する。

第 4 章では、第 3 章にて提案した高コヒーレント周波数掃引光源と、第 2 章にて提案した連結参照法を適用した PNC-OFDR の構成と意義について述べている。すなわち、光源位相雑音補償後の分解能を決定するのは被測定ファイバ (FUT: Fiber Under Test) に加わる音響波によって誘起される音響雑音であることを実験的に明らかにし、その中でも連結参照法による位相雑音補償が空間分解能改善において極めて有効であることを明らかにし、40km にわたる連結参照法による光源位相雑音補償に成功した。

第 5 章では、空間分解能向上を目的とし、光周波数掃引幅を拡大するための変調器構成について述べている。空間分解能は光周波数掃引幅によって決定されるが、試験光として 3 次変調側波帯を用いることにより光周波数掃引幅を 3 倍に拡大可能であることを示した。3 次側波帯発生は 2 台のニオブ酸リチウム強度変調器を直列に接続するだけの簡易な構成にて実現している。この 3 次側波帯を PNC-OFDR に適用し、10 km に渡る光ファイバに対し、mm レベルの空間分解能が -25 dB の感度で達成されることを明らかにしたことは優れた成果の一つである。

第 6 章では、測定精度の向上を目的とし、光コム光源を用いることで PNC-OFDR の特性を犠牲にすることなく、フェーディング雑音が効果的に低減されることについて述べている。すなわちフェーディング雑音低減法として、異なる光周波数

で測定した複数の結果を平均化処理する手法（FSAV: Frequency Shift Averaging）を提案し、光源として光周波数コム光源を採用し、測定毎に異なる輝線スペクトルを試験光として利用してFSAVを適用することで、フェーディング雑音が2.5dBから0.6dBまで低減可能なことを示した。また、一般的に光ファイバでは群速度分散（GVD: Group Velocity Dispersion）によって波形が広がり空間分解能が劣化するが、GVD係数が同等な遅延ファイバをPNC-OFDRに用いることにより、位相雑音補償と同時にGVDによる波形広がりが補償され、高分解能と高精度測定とが両立できることを明らかにした。

第7章では、実フィールドの光ファイバケーブルに対して提案したPNC-OFDRが有効性であることについて述べている。すなわち実フィールドにおいては音響振動が問題である事を見出し、その対策として光周波数掃引を高速化して測定帯域を広帯域化すると同時に、測定信号の帯域を分割して受信器への負担を軽減し、40km光ファイバ長に渡り10cmの空間分解能を実現した。さらに実際に存在しうる高偏光分散ファイバについて、20cm程度の空間分解能で高分散区間の検出実験に成功した。

第8章は、本研究で得られた成果の要点をまとめている。

以上を要約するに、本論文は膨大な光ファイバ網に対する効率的な保守運用技術として、新規な位相雑音補償技術によるコヒーレント光周波数領域反射測定法（PNC-OFDR）を提案したものであり、約10~40kmの長距離に対してこれまでにない数mm~数十cmの高い空間分解能で高感度測定を達成し、光ファイバ網診断に要求されるレベルを十分に満足することが可能な技術であることを実証した。これらの成果は、既設光ファイバ網の効率的な保守運用に必要な実用的な網診断技術を提供し得ると同時に、次世代光ファイバネットワークの安定した普及および維持に貢献するものであり、光通信産業の一層の発展に寄与することが大である。よって、本論文は博士（工学）に値するものと認める。

2015年2月

審査員

主査	早稲田大学教授	工学博士（東京工業大学）	宇高 勝之
	早稲田大学教授	博士（工学）早稲田大学	松本 充司
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	加藤 勇
	早稲田大学教授	博士（工学）早稲田大学	中島 啓幾