

# 博士論文概要

## 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
古敷谷	優介

2014年10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、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) 方式が主流である。これにより、通信事業者は、光ケーブルに代表される大量の光ファイバ網設備を保有する事となった。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近接する反射/故障イベントを数 km 以上の測定距離にわたって識別可能な光ファイバ網診断技術や、数十 km にわたる中継網では偏波モード分散 (PMD) 値の高い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いる。現在用いられている代表的な光反射測定法として、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  $\mu$ s 程度の光パルスを光ファイバの一端から入射し、光ファイバ内で生じるレイリー後方散乱光/反射光の強度を時間の関数として観測する。光パルスを入射してから光が観測端まで戻る時間は散乱点/反射点 (以下、総称して反射点) までの往復距離に比例するため、破断や損失増加等の故障地点を割り出すことができ、復旧に向けた迅速な対応が可能となる。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。さらに、パルス幅と受光帯域は受光感度を決定する一因であるため、空間分解能と測定可能距離 (受光感度に比例) はトレードオフになる。従って、一般的に OTDR は、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。OTDR はその簡易な構成から光ファイバ網の診断技術として広く利用されているものの、測定可能距離と空間分解能の両立は困難であり、近接反射イベントの識別や数十 km の距離にわたって数十 cm の分解能を必要とする高 PMD 区間の特定において、十分な特性を有しているとは言えない。

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等の測定対象の一端から入射し、測定対象内で生じるレイリー後方散乱光や反射光と、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。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、その適用分野は光デバイスや短距離光ファイバ網に限られる。以上の様に、**C-OFDR** は空間分解能において優れた特性を有するものの、測定可能距離の観点から通常の光ファイバ網診断への適用は難しいと考えられている。

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 8 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、光反射測定法に関する研究の経緯、基本原理および課題について述べる。また、本研究の目的、位置づけ、構成について述べる。

第 2 章では、**C-OFDR** において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光源位相雑音補償法（以下、連結参照法）を提案し、その原理について述べる。従来のコヒーレンス長内での位相雑音補償では、レーザ光のコヒーレンスの有限性によって生じるビート周波数の揺らぎ、すなわち位相雑音を、別に設けた参照干渉計でモニタし、補償のための信号（以下、参照信号）を得て、それを用いて位相雑音を補償する。提案手法は、得られた参照信号からコヒーレンス長を超えた領域での位相雑音補償に用いる参照信号（以下、連結参照信号）を計算にて導き出すことが特徴である。連結参照信号を用いて測定対象からのビート信号を補償することで、コヒーレンス長を越えた領域でも、参照干渉計が持つ遅延距離の整数倍の地点にて位相雑音を完全に補償できることを明らかにする。

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る。提案技術は、**SSB-SC** 変調によって生じる変調側波帯を試験光として利用し、変調周波数を掃引することで、ファイバレーザの高コヒーレンス性を維持したまま光周波数を掃引できることを特徴としている。**SSB-SC** 変調と **DSB-SC** 変調とを理論的に比較し、**SSB-SC** 変調方式が **C-OFDR** への適用において優位であることを明らかにする。また、本光源を用いた **C-OFDR** を構築し実験室環境での測定にて達成可能な測定距離、空間分解能、感度を明らかにする。

第 4 章では、第 3 章にて提案した周波数掃引光源と、第 2 章にて提案した連結参照法を適用した **C-OFDR**（**PNC-OFDR: Phase Noise Compensated OFDR**）の構成について述べる。また、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する。さらに、狭線幅レーザを使用したとしても、位相

雑音補償前においては音響雑音よりも光源位相雑音が支配的であることを示し、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する。また、FUTと参照干渉計の両方を音響波から遮断した際に理論空間分解能が達成されることを示し、連結参照法による光源位相雑音補償が40kmにわたり有効に作用することを明らかにする。

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る。空間分解能は光周波数掃引幅によって決定されるため、試験光として3次変調側波帯を用いて光周波数掃引幅を3倍に拡大することを検討する。3次側波帯は二台の強度変調器を直列に接続するだけの簡易な構成にて発生可能である事を理論的に明らかにし、実測定にてその妥当性を示す。この3次側波帯をPNC-OFDRに適用し、10 kmまでの光ファイバに対し測定を実施し、mmレベルの空間分解能、-25 dBの感度が達成されることを明らかにする。

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る。PNC-OFDRはコヒーレント検波方式を用いているため、フェーディング雑音によりレイリー散乱レベルの測定結果に偏差が生じる。フェーディング雑音低減には、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）が有効である。そこで、PNC-OFDRの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の低減を実現する。また、一般的に光ファイバのような分散媒体を広帯域な試験光にて測定する場合、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。しかし、PNC-OFDRにおいては、参照干渉計によって位相雑音補償と同時にGVDによる波形広がりが補償され、高分解能測定と高精度なレイリー散乱レベル測定とが両立できることを明らかにする。

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実施したPNC-OFDRによる高PMD区間の検出実験について説明する。実環境下の光ファイバケーブルに加わる音響雑音影響を最小化するため、光周波数掃引を高速化して測定帯域を広帯域化する構成を提案し、高PMD区間の特定が可能なことを示す。

第8章は、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。

上記で述べたように、PNC-OFDRは測定可能距離、空間分解能、感度という光反射測定技術における主要な性能指数を、光ファイバ網診断に要求されるレベルで同時に満足させることが可能な技術である。本研究は、既設光ファイバ網の効率的な保守運用に必要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ことで、光通信産業の発展に寄与することが期待される。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 古敷谷優介 印

(2014年 10月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論 文	<p>(PAPER)</p> <p>○ Y. Koshikiya, X. Fan, F. Ito, Z. He, and K. Hotate, "High resolution PNC-OFDR with suppressed fading noise for dispersive media measurement," <i>IEEE J. Lightw. Technol.</i>, vol. 31, no. 6, pp. 866-873, Mar. 2013.</p> <p>F. Ito, X. Fan, and Y. Koshikiya, "Long-range coherent OFDR with light source phase noise compensation (invited)," <i>IEEE J. Lightw. Technol.</i>, vol. 30, no.8, pp. 1015-1024, Apr. 2012.</p> <p>○ X. Fan, Y. Koshikiya, and F. Ito, "Centimeter-level spatial resolution over 40 km realized by bandwidth-division phase-noise-compensated OFDR," <i>Opt. Express</i>, vol. 19, pp. 19122-19128, Sep. 2011.</p> <p>○ Y. Koshikiya, X. Fan, and F. Ito, "Influence of acoustic perturbation of fibers in phase-noise-compensated optical-frequency-domain reflectometry," <i>IEEE J. Lightw. Technol.</i>, vol. 28, no. 22, pp. 3323-3328, Nov. 2010.</p> <p>○ X. Fan, Y. Koshikiya, and F. Ito, "Phase-noise-compensated optical frequency-domain reflectometry," <i>IEEE J. Quantum Electron.</i>, vol. 45, no. 6, pp. 594-602, Jun. 2009.</p> <p>○ Y. Koshikiya, X. Fan, and F. Ito, "Long range and cm-level spatial resolution measurement using coherent optical frequency domain reflectometry with SSB-SC modulator and narrow linewidth fiber laser", <i>IEEE J. Lightw. Technol.</i>, vol. 26, no. 18, pp. 3287-3294, Sep. 2008.</p> <p>○ Y. Koshikiya, N. Araki, H. Izumita, and F. Ito, "Newly developed optical fiber line testing system employing bi-directional OTDRs for PON and in-service line testing criteria," <i>IEICE Trans. Commun.</i>, vol. E90-B, no. 10, pp. 2793-2802, Oct. 2007.</p> <p>(LETTER)</p> <p>○ X. Fan, Y. Koshikiya, N. Araki, and F. Ito, "Field trials of PNC-OFDR in different environments for detecting short beat lengths," <i>IEEE Photon. Technol. Lett.</i>, vol. 24, no. 15, pp. 1288-1291, Aug. 2012.</p> <p>○ X. Fan, Y. Koshikiya, and F. Ito, "Full polarimetric phase-noise-compensated optical-frequency-domain reflectometry for distributed measurement of high-PMD fibers," <i>Opt. Lett.</i>, vol. 35, no. 1, pp. 25-27, Jan. 2010.</p> <p>○ X. Fan, Y. Koshikiya, and F. Ito, "Phase-noise-compensated optical frequency domain reflectometry with measurement range beyond laser coherence length realized using concatenative reference method," <i>Opt. Lett.</i>, vol. 32, no. 22, pp. 3227-3229, Nov. 2007.</p> <p>(国際会議)</p> <p>F. Ito, X. Fan, and Y. Koshikiya, "Identification of high-PMD sections along installed optical cables with long range OFDR," in <i>Technical Digest of the Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC 2013)</i>, OW4H.2, Anaheim, USA, Mar. 2013.</p> <p>X. Fan, Y. Koshikiya, K. Okamoto, H. Iida, H. Takahashi, and F. Ito, "Field trial of cm-level resolution PNC-OFDR for identifying high-birefringence section," in <i>Proceeding of the 37th European Conference on Optical Communication (ECOC'2011)</i>, Tu.6.LeCervin.6, Geneva, Switzerland, Sep. 2011.</p> <p>F. Ito, X. Fan, and Y. Koshikiya, "Long-range coherent optical frequency domain reflectometry and its applications (invited)," in <i>Proceeding of the 21st International Conference on Optical Fibre Conference (OFS-21)</i>, Proc. of SPIE, 77533F-1, Ottawa, Canada, May 2011.</p>
講 演	

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	<p>X. Fan, Y. Koshikiya, and F. Ito, "2-cm spatial resolution over 40 km realized by bandwidth division phase-noise-compensated OFDR," in <i>Technical Digest of the Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC 2011)</i>, OMF3, Los Angeles, USA, Mar. 2011.</p> <p>F. Ito, X. Fan, and Y. Koshikiya, "Long-range coherent OFDR with light source phase noise compensation (invited)," in <i>Proceeding of the 9th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON 2010)</i>, pp. 5-8, Nanjing, China, Oct. 2010.</p> <p>○ Y. Koshikiya, X. Fan, F. Ito, Z. He, and K. Hotate, "Fading-noise suppressed cm-level resolution reflectometry over 10-km range with phase noise and chromatic dispersion compensation," in <i>Proceeding of the 36th European Conference on Optical Communication (ECOC'2010)</i>, Tu.3.F.2, Turin, Italy, Sep. 2010.</p> <p>X. Fan, Y. Koshikiya, and F. Ito, "Noise of long-range optical frequency domain reflectometry after optical source phase noise compensation," in <i>Proceeding of the 20th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-20)</i>, Proc. of SPIE, 75032E, Edinburgh, UK, Oct. 2009.</p> <p>○ Y. Koshikiya, X. Fan, and F. Ito, "Sub-cm spatial resolution reflectometry over 10 km based on phase noise compensated OFDR with third order sideband sweeping," in <i>Proceeding of the 35th European Conference on Optical Communication (ECOC'2009)</i>, Tu.4.1.1, Vienna, Austria, Sep. 2009.</p> <p>X. Fan, Y. Koshikiya, and F. Ito, "10 cm spatial resolution and 20 km range full polarimetric reflectometry for distributed DGD measurement of high PMD fibres," in <i>Proceeding of the 35th European Conference on Optical Communication (ECOC'2009)</i>, Tu.4.1.2, Vienna, Austria, Sep. 2009.</p> <p>○ Y. Koshikiya, X. Fan, and F. Ito, "40-km Range, 1-m Resolution Measurement Based on Phase-noise-compensated Coherent Optical Frequency Domain Reflectometry," in <i>Proceeding of the 34th European Conference on Optical Communication (ECOC'2008)</i>, vol. 5, P.1.11, pp. 21-22, Brussels, Belgium, Sep. 2008.</p> <p>X. fan, Y. Koshikiya, and F. Ito, "Evolution of Backscattered Polarization in High-PMD Fibres Measured by Phase-Noise Compensated Optical Frequency Domain Reflectometry," in <i>Proceeding of the 34th European Conference on Optical Communication (ECOC'2008)</i>, vol. 5, P.1.12, pp. 23-24, Brussels, Belgium, Sep. 2008.</p> <p>X. fan, Y. Koshikiya, and F. Ito, "Highly sensitive reflectometry over 20 km with submeter spatial resolution based on phase-noise-compensated optical frequency domain reflectometry and concatenative reference method," in <i>Proceeding of the 19th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-19)</i>, vol. 7004, pp. 7004 3L, Perth, Australia, Apr. 2008.</p> <p>F. Ito, Y. Koshikiya, and X. Fan, "High-resolution fiber line measurement based on optical frequency domain reflectometry," in <i>Proceeding of the 8th Chitose International Forum on Photonics Science &amp; Technology (CIF'8)</i>, pp. 71-77, Chitose, Japan, Nov. 2007.</p> <p>○ Y. Koshikiya, X. Fan, and F. Ito, "Highly sensitive coherent optical frequency-domain reflectometry employing SSB-modulator with cm-level spatial resolution over 5 km," in <i>Proceeding of the 33rd European Conference on Optical Communication (ECOC'2007)</i>, vol. 2, paper Tu.3.6.2, pp. 89-90, Berlin, Germany, Sep. 2007.</p> <p>○ Y. Koshikiya, N. Araki, H. Izumita, and F. Ito, "Simple and cost-effective fault location technique using bi-directional OTDR and in-service line testing criteria for PONs," in <i>Proceedings of the 31st European Conference on Optical Communication (ECOC'2005)</i>, vol. 1, paper Mo.4.3.2, pp. 83-84, Glasgow, U.K., Sep. 2005.</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他	<p>○ Y. Koshikiya, N. Araki, H. Izumita, and M. Nakamura, "New design for optical fiber line testing system employing two-wavelength bidirectional OTDR for PON," in <i>Technical digest of the 9th Optical Electronics and Communications Conf. (OECC'2004)</i>, no. 15A3-4, pp. 600-601, Yokohama, Japan, Jul. 2004.  （国内講演）</p> <p>○ 古敷谷優介, ファンシンユウ, 伊藤文彦, "音響雑音環境下における位相雑音補償 OFDR の特性に関する検討," 信学技報, OCS2010-87, pp. 177-182, 2010 年 10 月.</p> <p>○ 古敷谷優介, ファンシンユウ, 伊藤文彦, 何祖源, 保立和夫, "位相雑音および波長分散同時補償を適用した OFDR による 10km レンジ、cm 分解能反射測定," 信学技報, OCS2010-45, pp. 53-58, 2010 年 8 月.</p> <p>○ 古敷谷優介, ファンシンユウ, 伊藤文彦, "位相雑音補償光周波数領域反射測定法の高分解能化に関する検討," 信学技報, OFT2009-94, pp. 59-62, 2010 年 2 月.</p> <p>○ 古敷谷優介, ファンシンユウ, 伊藤文彦, "PNC-OFDR 法による 40km レンジ反射測定および分解能劣化要因の検討," 信学技報, OCS2009-30, pp. 5-11, 2009 年 8 月.</p> <p>○ 古敷谷優介, ファンシンユウ, 伊藤文彦, "位相雑音補償 C-OFDR による 40km レンジ、1m 分解能反射測定," 信学技報, OCS2008-46, pp. 69-72, 2008 年 8 月.</p> <p>○ 古敷谷優介, ファンシンユウ, 伊藤文彦, "高感度 SSB-OFDR を用いたレイリー後方散乱光の高空間分解能測定," 信学技報, OFT2007-27, pp. 71-76, 2007 年 8 月.</p> <p style="text-align: right;">その他、筆頭著者 9 件、第二著者 16 件</p> <p>（博士論文に直接関係する特許）  古敷谷優介他 5 名, 光周波数領域反射測定方法及び光周波数領域反射測定装置, 特許第 5207252, 2013 年 3 月  古敷谷優介他 2 名, 光周波数変調装置, 特許第 5193708, 2013 年 2 月  古敷谷優介他 2 名, 光周波数領域反射測定方法および装置, 特許第 4918523, 2012 年 2 月  ファンシンユウ, 伊藤文彦, 古敷谷優介, 光リフレクトメトリ測定方法および装置, 特許第 4917640, 2012 年 2 月  古敷谷優介他 1 名, 光周波数領域反射測定方法および装置, 特許第 5159255, 2012 年 2 月  古敷谷優介他 4 名, 光周波数領域反射測定方法及び光周波数領域反射測定装置, 特開 2012-154790, 2012 年 8 月  ファンシンユウ, 伊藤文彦, 古敷谷優介, 光周波数領域反射測定方法及び光周波数領域反射測定装置, 特開 2012-117886, 2012 年 6 月  古敷谷優介 他 4 名, 光周波数領域反射測定方法及び光周波数領域反射測定装置, 特開 2011-174760, 2011 年 9 月  古敷谷優介 他 2 名, 光周波数領域反射測定方法及び光周波数領域反射測定装置, 特開 2011-038839, 2011 年 2 月  ファンシンユウ, 伊藤文彦, 古敷谷優介 他 3 名, 光リフレクトメトリ測定方法及び光リフレクトメトリ測定装置, 特開 2011-022082, 2011 年 2 月  古敷谷優介 他 2 名, 光周波数領域反射測定方法及び装置, 特開 2010-185842, 2010 年 8 月</p>