

機関番号：12601  
 研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20360182  
 研究課題名(和文) 光ファイバ加入者系ネットワークの診断のための光相関領域リフレクトメトリ  
 研究課題名(英文) Optical Coherence Domain Reflectometry for Diagnoses of Optical Fiber Subscriber Access Networks  
 研究代表者  
 何 祖源 (HE ZUYUAN)  
 東京大学・大学院工学系研究科・特任教授  
 研究者番号：70322047

## 研究成果の概要(和文)：

本研究では、光ファイバ加入者系ネットワークの診断を目指して、光周波数コム光源を活用し、高空間分解能・長測定レンジ・高精度、高感度・広ダイナミックレンジ、高安定・高速な高性能反射光分布測定法を創成している。さらに、本研究で確立する技術により、高機能な分布型・多点型光ファイバセンシング技術にも貢献している。本研究の研究成果と関連して、英文学会誌査読付論文18件、国内外学会論文62件を發表し、特許も5件出願した。

## 研究成果の概要(英文)：

For providing efficient solutions to the difficult problems in diagnoses of optical fiber subscriber access networks, this project proposed and established advanced optical reflectometry techniques by making use of optical frequency comb sources, realizing high performance optical reflectometry with fine spatial resolution, long measurement range and high accuracy, high sensitivity and large dynamic range, high stability and high speed, in parallel. Furthermore, the newly proposed and demonstrated techniques also contribute to the development of distributed and multiplexed fiber optic sensors. Related to the achievements of this project, 18 peer-reviewed journal papers and 62 international and domestic conference papers have been published, and 5 patents been filed.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2009年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2010年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：光計測，光ファイバ，光リフレクトメトリ，光デバイス，光ネットワーク，光ファイバセンサ，光ファイバ通信，光周波数コム

## 1. 研究開始当初の背景

近年、FTTH (Fiber to the Home) という加入者系光ファイバネットワークが急速に普及している。この急速なネットワークの拡大と契約者数の増加に伴い、光ネットワークに生じえる故障点の数も級数的に増大している。効率的かつ迅速にネットワーク故障点を診断することは、正に緊急な課題となっている。また、故障の発生前に、故障になり得る箇所を診断し排除することは、重要である。しかし、今現在、どの通信サービス業者でも、故障の報告を受けたあと、時間領域分布反射計で大まかな故障点位置の測定を行った後に人手により検査するのがほぼ唯一の手法であり、事前に故障になり得る箇所を診断し排除するまでは、程遠い現状である。

この状況に対して、国内外の研究者は、問題の解決に注力してきた。基本的な考え方として、反射光分布測定技術である光リフレクトメトリの機能向上を検討している。光リフレクトメトリは、光伝搬の経路に沿って、各空間位置で発生した反射や散乱を位置の関数として測定する技術であり、光ファイバや光コンポーネントの測定、そして分布型光ファイバセンシングの重要な基本技術として知られている。従来手法として、光時間領域リフレクトメトリ (OTDR)、コヒーレント光周波数領域リフレクトメトリ (C-OFDR)、ならびに低コヒーレンスリフレクトメトリ (OLCR) が研究・開発されている。光ファイバ線路中で光ファイバや光コンポーネントに断線や劣化が生じると、反射、後方散乱や損失に変動が発生するので、原理上、光リフレクトメトリ技術を用いて、光ファイバ線路の診断ができる。長尺光ファイバの測定や光ファイバ敷設工程に使われる OTDR はこの技術の応用の成功例である。しかし、光加入者ネットワークの診断には光ファイバに沿う約 10km 遠方で cm オーダーの空間分解能が必要になる。また、cm オーダーの光ファイバからの微弱な散乱を測るために、反射率感度 ( $<-90\text{dB}$ ) とダイナミックレンジ ( $>80\text{dB}$ )、反射率精度 ( $<0.1\text{dB}$ ) に厳しい要求が課される。測定の安定性や実用化を考えると、測定時間 ( $<10\text{s}$ ) も考慮しなければならない。現状では、研究段階で報告されたものも含めて、現存のすべての光リフレクトメトリ技術の性能は、光加入者系ネットワーク診断への要求に対応できない。

OTDR では、光パルスを入射して反射・散乱光を時間分解する。空間分解能数  $m$ 、測定感度約  $-50\text{dB}$ 、ダイナミックレンジ約  $-50\text{dB}$  などの性能が実現されているが、光加入者系ネットワークの診断には空間分解能だけでなく、感度、ダイナミックレンジ、測定時間ともに不足している。

連続光を用いる方法として、光源の周波数

を線形に変化させつつ反射・散乱情報を得てデータ処理を行う手法 (C-OFDR 法、FMCW 法ともいう) と低コヒーレンス分布反射計測法 (OLCR) が存在する。C-OFDR 法では、 $<-110\text{dB}$  の感度と  $>90\text{dB}$  のダイナミックレンジ、そして、数 km の測定レンジも達成されている。しかし、C-OFDR 法を光加入者系ネットワークの診断に応用するには、環境変動による光位相揺らぎという大変困難な制限がある。光加入者系ではフィールドに敷設されたファイバ長は 10km にも及ぶ。この長い光路は環境の影響を受けて、光路を伝搬している光の位相に揺らぎを与える。C-OFDR の場合、光源の周波数を線形に掃引させつつ反射・散乱分布情報を干渉信号の位相 (ビート周波数) として計測するので、掃引期間中の環境変動で誘起された位相揺らぎはそのままその干渉信号に含まれ、最後のデータ処理で得られる反射分布には誤差が生じる。また OLCR では機械的可動部分が不可避、測定距離レンジが短いという困難を伴っていた。また、本研究が目指している  $0.1\text{dB}$  レベルの反射率精度の実現も困難である。

一方、研究代表者の属している研究グループが発明した「光波コヒーレンス関数の合成法」(SOCF) は、干渉計において光源の周波数を時間的に変調し、位相変調も導入することで、干渉特性が任意に合成・掃引できるという独自の連続光による反射光分布計測法である。特に、SOCF 法には、反射分布情報が C-OFDR のように干渉信号の位相として計測されるのではなく、光源の光周波数の変調や参照光の位相変調によって決められるので、環境変動の影響に強い。

平成 16~17 年度、研究代表者は、基盤研究 (B) (一般)「光リフレクトメトリの高精度化と光ファイバ通信システムにおける多重経路干渉の評価」を行い、SOCF による光リフレクトメトリに対して、測定のばらつきを抑える方法を考案し、成果を蓄積した。SOCF に要する光周波数変調の上に連続的な光周波数掃引を加えることで、高精度反射率分布測定時間を数千秒から数十秒にまで、大幅に短縮することもでき、基礎実験にて、約  $0.08\text{dB}$  精度の反射率分布測定を 50s 程度で実施した。そのあと、平成 18~19 年度、基盤研究 (B) (一般)「光複合モジュールと光ファイバ加入者網診断用高速・高機能リフレクトメトリの研究」を行い、光ファイバ加入者系ネットワークの診断のためのリフレクトメトリに挑戦してきた。ダイナミックレンジを大幅に拡大させることができる適応型の光キャリア検出手法の提案と検証など、成果をあげている。また、SOCF における測定位置を決める光変調周波数の連続掃引法も新たに提案し、数 km 先にわたる反射分布の測定時間も数秒程度に抑えることに成功した。

これらの研究成果は、本研究が目指している光ファイバ加入者系ネットワークの診断に適用できる光リフレクトメトリが実現できる可能性を示している。これを実現するには、測定速度と測定感度（ダイナミックレンジ）の両立という難問をクリアしなければならない。SOCFによる光リフレクトメトリにおける光周波数の変調手法には、正弦波での連続変調と階段波形での離散変調の2種類がある。前者においては、測定位置（相関ピークの位置）は変調周波数により決められ、これまでの研究成果の蓄積により、数秒程度という高速測定が実現できている。ただし、測定感度（ダイナミックレンジ）に制限がある。理論上、アポダイゼーションによりダイナミックレンジを約40dBまで拡大できるが、そのための変調信号の制御は相当困難である。階段状の変調手法を用いる場合は、時間平均的に楕形のスペクトルが合成されるので、アポダイゼーションは比較的厳密にかけられる。これに対して、測定位置の掃引は、周波数変調波形に比例した参照光位相変調波形の変更によって行う（1波形と1測定位置が対応）ので、測定時間が相当長い。

本研究では、階段状の変調手法を用いたSOCFに着目し、新たに光周波数コムという楕型スペクトル多波長レーザ光源と可変な時間遅延、つまり、光周波数（波長）に比例した可変な位相遅延を導入するという手法を提案する。今までの光周波数変調に比例した参照光への位相変調の代わりに、この手法では、光周波数コムのコム間隔の制御によって測定位置を掃引する。よって、モードロックレーザ等楕型スペクトル多波長レーザ光源も適用できる。また、光周波数コムのスペクトルと可変な時間遅延を導入することで、光周波数領域リフレクトメトリのフェイディングノイズの低減にも有効である。今まで必要であった光周波数変調と位相変調波形の変更という時間のかかる処理から脱却できるので、測定位置の掃引の高速化が実現できる。

## 2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らにより成果を蓄積してきた独創技術であるSOCFによる光リフレクトメトリ技術に、新たに提案する光周波数コムと可変時間遅延を融合させ、測定位置の掃引の高速化を実現する。その上で、精密なアポダイゼーションも実施し、また、この新たな手法と光源に適應したデジタル信号処理手法も開発して、測定速度とダイナミックレンジの両立を実現する。これらの新たな提案の具体化によって、光ファイバ加入者系ネットワークの診断に十分な光リフレクトメトリを実現する。具体的には、光ファイバに沿う数 km 遠方で cm オーダーの空間分

解能を持ち、反射率感度<-90dB、ダイナミックレンジ>80dB、反射率精度<0.1dB、測定時間<10s で、環境擾乱に強い光リフレクトメトリを目指している。

本研究は、研究代表者らの独創技術であるSOCF法をベースにして、新たに提案する光周波数コムと可変時間遅延を施すことによって、階段状変調光源、楕形スペクトル光源あるいは線形掃引光源を適用させ、光スペクトルアポダイゼーションと新しいデジタル信号処理手法も導入することで、従来技術に存在する様々な制限を打破し、光加入者系ネットワークの診断に必要な各種の高性能を併せ持つ光相関領域リフレクトメトリと光周波数領域リフレクトメトリを提案する。この獨創性・新規性に優れた技術の開拓により、光加入者系ネットワークの高空間分解能診断という産業界で難関となっている問題の解決に「使える」技術を創成する。日本は、FTTHの研究と普及で世界をリードしてきた。本研究によって、光加入者系ネットワークの診断でも、日本発の技術で世界をリードする。加えて、分布型光ファイバセンシング技術の発展にも貢献する。

## 3. 研究の方法

光ファイバ中では、屈折率の微細変動によりレイリー散乱が発生する。光ファイバ回線中の屈折率不連続点においては反射光が生じる。これらの距離分布を測定して、反射光の発生位置とレイリー散乱光の不連続位置を特定し、これらの強度・強度差を測ることにより、光ファイバ回線を診断することができる。研究代表者は以前、米国シエナ(CIENA)社にてC-OFDR法を用いて光ファイバモジュール中の反射・散乱光分布を測定し成果をあげた。反射・散乱の分布ならびに反射ピークより、コンポーネントの位置および断線の位置を特定することはできたが、故障診断・予測に求められている反射強度の測定やレイリー散乱の強度差によるファイバ接続損失の計測には、より高い反射率測定精度が必要である。光リフレクトメトリで加入者系光ファイバ回線を診断するには、0.1dB レベルの反射率測定精度が求められる。また、測定距離レンジとしては数 km 程度も必要で、C-OFDR法での実現は困難である。実応用において、この長い光路における環境擾乱による位相変動は基本的に避けられない影響である。

本研究は、反射光分布測定の諸性能の制限要因を検討・解析するとともに、SOCF法に基づいて、新たに提案する光周波数コムと可変時間遅延を施す手法等を融合させ、上記目標性能を達成できる反射光分布測定システムの創成を目指す。以下、本研究の目的を達成するための研究方法を詳述する。

(1) 光周波数コムを用いた光コヒーレンス領域リフレクトメトリ

当研究室独自の手法として光波コヒーレンス関数の合成法による光リフレクトメトリ (Optical Coherence Domain Reflectometry by Synthesis of Optical Coherence Function: OCDR-SOCF) は, レーザ光源の光周波数変調で作られるデルタ関数状のコヒーレンスピークを被測定光路に沿った任意の位置に合成・移動することで, 反射率を分布的に測定する技術である. OCDR-SOCF はランダムアクセスが可能で一点あたりの測定時間が極めて短いという特徴がある.

これまで, OCDR-SOCF は, km オーダーの測定レンジや cm オーダーの空間分解能, 45dB のダイナミックレンジと 5s 以内の分布測定を行ってきたが, 全てを同時に実現させることはできていない. これは, 光源の変調法 (階段型変調と正弦波変調) に起因する問題である. 階段型 SOCF では, スペクトラムの形状制御により, ダイナミックレンジは高くすることができるが, 干渉ピークを動かすためには, 光源の周波数とともに位相を変調する必要があるため, 分布測定に時間がかかってしまう. 一方, 正弦波型 SOCF では, 正弦波変調の変調周波数を線形掃引すれば, 干渉ピークを動かせるため, 測定速度は 5s 以内と速くすることが可能であるが, スペクトラムの形状により, ダイナミックレンジは高くすることは困難である.

#### ① 光コヒーレンス領域リフレクトメトリ

基本となるコヒーレンス関数の合成法について述べる. 光干渉計において, 光源から出た光はビームスプリッタにより二分され, それぞれ参照光路と信号光路を通った後に再び合波されてスクリーン上に干渉縞ができる. このときのスクリーン上での光強度  $I$  は,

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \operatorname{Re}[\gamma(\tau)] \quad (1)$$

と書ける. 第 3 項の干渉項により干渉縞の様子が決まり,  $\operatorname{Re}[\gamma(\tau)]$  が規格化された干渉縞強度をあらわし,  $|\gamma(\tau)|$  が規格化された干渉縞の包絡線に対応している. この  $\gamma(\tau)$  を光波コヒーレンス関数,  $|\gamma(\tau)|$  を光波コヒーレンス度と呼ぶ. ここで, 光波コヒーレンス関数と光源のスペクトル密度は,

$$|\gamma(\tau)| = \frac{\left| \int_0^\infty G(\nu) \exp(-j2\pi\nu\tau) d\nu \right|}{\int_0^\infty G(\nu) d\nu} \quad (2)$$

の関係を有する. ただし,  $G(\nu)$  は光源のスペクトル密度である. つまり, 光波コヒーレンス関数は光源のスペクトル密度のフーリエ変換によって決まる.

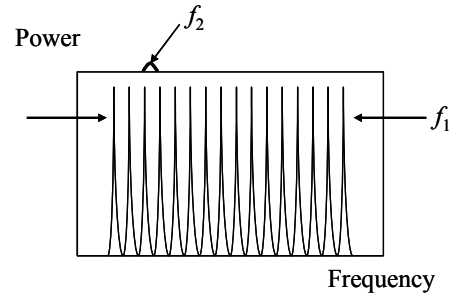


図 1 光周波数コムスペクトラム

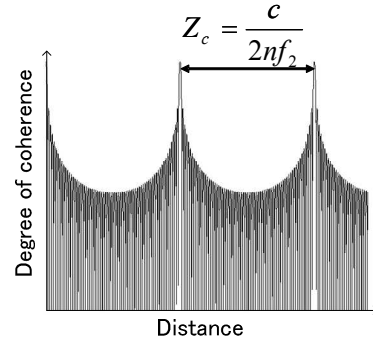


図 2 デルタ関数形状の光波コヒーレンス関数

したがって光源のスペクトル密度を変化させることで, 対応する様々な形状の光波コヒーレンス関数を生成することができる. デルタ関数形状のコヒーレンスピークは, 図 1 に示す櫛形のスペクトルにより得ることができる. 櫛型スペクトルの一本一本の間隔が  $f_2$  ごとに等間隔に並ぶようなスペクトルで, 櫛の本数が  $N$  本であったときの光波コヒーレンス関数は,

$$|\gamma(\tau)| = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N \exp(j2\pi n f_2 \tau) \right| \quad (3)$$

で与えられる.  $N=35$  のときでの光波コヒーレンス関数の形状を図 2 に示す. デルタ関数形状のコヒーレンスピークが一定の間隔  $Z_c$  で並んでいる. 図 2 におけるピーク間隔  $Z_c$  は, 信号光路の屈折率を  $n$ , 真空中の光速を  $c$  とすると,

$$Z_c = \frac{c}{2nf_2} \quad (4)$$

で与えられる.

#### ② 光周波数コムを用いた光コヒーレンス領域リフレクトメトリ

光コヒーレンス領域リフレクトメトリにおいて, 光源のスペクトルが櫛型であればデルタ関数形状のコヒーレンスピークを得るこ

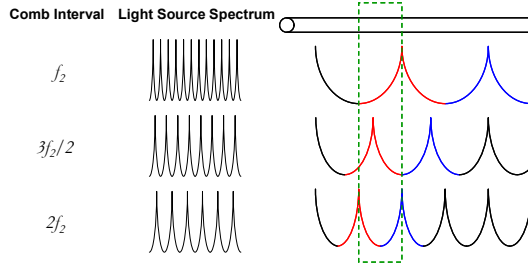


図3 光周波数コムを用いた光リフレクトメトリの測定概念図

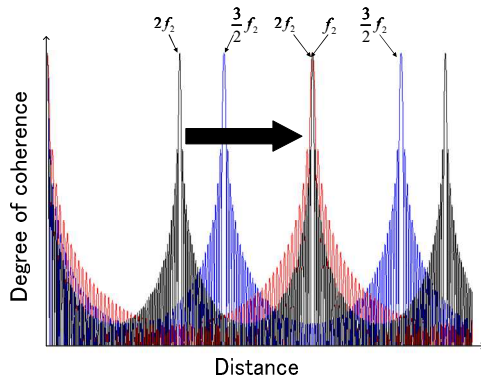


図4 コム間隔とコヒーレンスピーク位置

とができる。このコヒーレンスピークを利用することにより、被測定ファイバの反射位置を知ることができる。光源の櫛型スペクトルを得るために、光周波数コムを用いる。光周波数コムは、図1に示す櫛型のスペクトルを持つ光源である。光周波数コムを用いた光コヒーレンス領域リフレクトメトリの測定法の概念図を図3に示す。

コム間隔が  $f_2$  の光周波数コム光源からの光を測定対象に入射した場合、測定対象上には  $Z_c$  間隔にコヒーレンスピークが立つ。つまり、式(4)より、コム間隔  $f_2$  を変化させることで、参照光と信号光の等光路点を基準に、コヒーレンスピークの間隔が変わることから、コヒーレンスピーク位置を動かすことが可能である。但し、反射率分布測定において、測定対象ファイバ上に複数のコヒーレンスピークが存在した場合、クロストークが生じ、反射率を正確に測定することができない。そのため、図3の点線で囲まれた部分が測定範囲となる。つまり、1次ピークを測定に用いる場合、光周波数コムのコム間隔は、 $f_2$  から  $2f_2$  まで掃引する必要がある。

コム間隔を  $f_2$  から  $2f_2$  まで線形掃引した時のコヒーレンスピーク位置をシミュレーションにより求め、図4に示す。コムの間隔を変化させることで、コヒーレンスピーク的位置が移動していることがわかる。また、コム間隔  $2f_2$  のときの2次ピークとコム間隔  $f_2$  のときの1次ピーク的位置が重なっていること

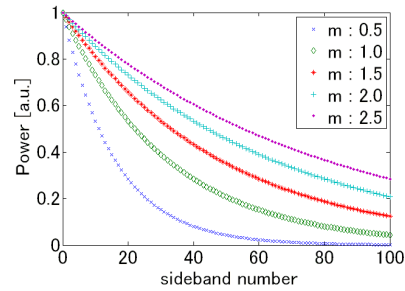


図5 変調指数  $m$  とサイドローブの関係

から、測定範囲が矢印の範囲であることがわかる。

そこで、本研究では、光周波数コムを用いた光コヒーレンス領域リフレクトメトリを提案する。本手法では、測定において、コム間隔を線形掃引することで分布測定が行えることから、正弦波型 SOCF と同等の高速測定が可能である。ダイナミックレンジは、コヒーレンス関数の形状、つまり、光源のスペクトラムの形状で決まることから、階段型変調型 SOCF と同等のダイナミックレンジで測定が可能である。そのため、高ダイナミックレンジと高速測定の両立が可能になる。

光周波数コムによる反射率分布測定において、干渉ピークをより遠方にするためには、光周波数コムの間隔を狭くする必要がある。しかし、空間分解能は、光周波数コムのコムスパンによって決まるため、光周波数コムの間隔を狭くすると、空間分解能は下がってしまう。そこで、空間分解能を保ちつつ、遠方を測定するためには、周波数コムの本数を増やすことが必要である。

これまで、位相変調器とリング共振器を用いた実験系を組み、光周波数コムを発生させた。位相変調器を用いた光周波数コムの  $k$  次サイドバンドの電界(キャリア周波数の電界で規格化)は式(5)で決まる。

$$E_{ok} = \exp\left(\frac{|k|\pi}{mF}\right) \quad (5)$$

式(5)より、位相変調器の変調指数  $m$  を大きくすることで、光周波数コムのコムスパンは拡大できる。変調指数  $m$  とサイドローブの関係を図5に示す。

(2) 多重位相変調および任意位相変調光周波数コムを用いた光リフレクトメトリ

光周波数コムを用いた光リフレクトメトリにおいては、空間分解能と測定レンジはトレードオフの関係を持つ。そのため、空間分解能を保ちつつ、測定レンジを延伸するには、サイドバンドの本数  $N$  を増やす必要がある。

これまでに、位相変調器の変調指数を拡大することで、光周波数コムのサイドローブを増やす方法を報告したが、ここで、新たに、多重位相変調による光周波数コムの本数を増加する方法を提案する。

まず、位相変調器を単一周波数  $\omega$  で駆動した場合、入射光の周波数を  $\Omega$ 、出力光の電界を  $E_o$  とすると、 $E_o$  は第一種ベッセル関数で与えられ、以下の式で表される。

$$E_o = \exp(j(\Omega t + m \sin(\omega t)))$$

$$= \sum_{a=-\infty}^{\infty} J_a(m) \exp\{j(\Omega + a\omega)t\} \quad (6)$$

式(6)より、位相変調で生じる  $k$  次のサイドバンドのパワーは、 $k$  次のベッセル関数で近似できる。位相変調器の変調指数  $m$  と  $k$  次のサイドバンドパワーの関係を図 6(a) に示す。変調指数を拡大するとより高次のサイドバンドが立ち上がってくる。位相変調器の変調指数は、半波長電圧  $V_\pi$  と LN 変調器の印加可能電圧  $V_{\text{Apply}}$  の比によって決まる。そのため、変調指数は、変調器ごとに決まる値より大きくすることはできない。使用している LN 位相変調器の変調指数は、4.5 であるので、一回の変調で 6 次のサイドバンドが立ち上がっている。

ここで、多重周波数で位相変調する場合(多重位相変調)を考える。例として、3 つの異なる角周波数  $\omega_1, \omega_2 (=p \times \omega_1), \omega_3 (=q \times \omega_1)$  で位相変調器を駆動すると、

$$E_o = \exp(j(\Omega t + m_1 \sin(\omega_1 t) + m_2 \sin(\omega_2 t) + m_3 \sin(\omega_3 t)))$$

$$= \sum_{a=-\infty}^{\infty} \sum_{b=-\infty}^{\infty} \sum_{c=-\infty}^{\infty} J_a(m_1) J_b(m_2) J_c(m_3) \exp\{j(\Omega + a\omega_1 + b\omega_2 + c\omega_3)t\}$$

$$= \sum_{a=-\infty}^{\infty} \sum_{b=-\infty}^{\infty} \sum_{c=-\infty}^{\infty} J_a(m_1) J_b(m_2) J_c(m_3) \exp\{j(\Omega + (a + pb + qc)\omega_1)t\} \quad (7)$$

のように、第一種ベッセル関数で与えられる。 $m_1, m_2, m_3$  は、位相変調器を駆動する各周波数の変調指数である。各周波数の振幅の和は、LN 変調器の  $V_{\text{Apply}}$  で決まるため、単一周波数の位相変調の変調指数  $m$  は、 $m = m_1 + m_2 + m_3$  である。多重位相変調における変調指数 ( $m_1 + m_2 + m_3$ ) とサイドバンドパワーの関係を図 6(b) に示す。単一周波数による位相変調に比べ、変調指数が低い値で、サイドバンドが立ち上がっているのがわかる。変調指数が 4.5 の場合、9 次のサイドバンドが立ち上がっており、このことより、多重位相変調した場合、一回の位相変調で生じるサイドバンドの本数が増えていることがわかる。

また、図 6(c) に、位相変調によって生じる各サイドバンドの立ち上りピークにおける変調指数を示す。このグラフから、多重位相変調の場合、単一位相変調に比べて、変調指数が低くても高次のサイドバンドが立ち上

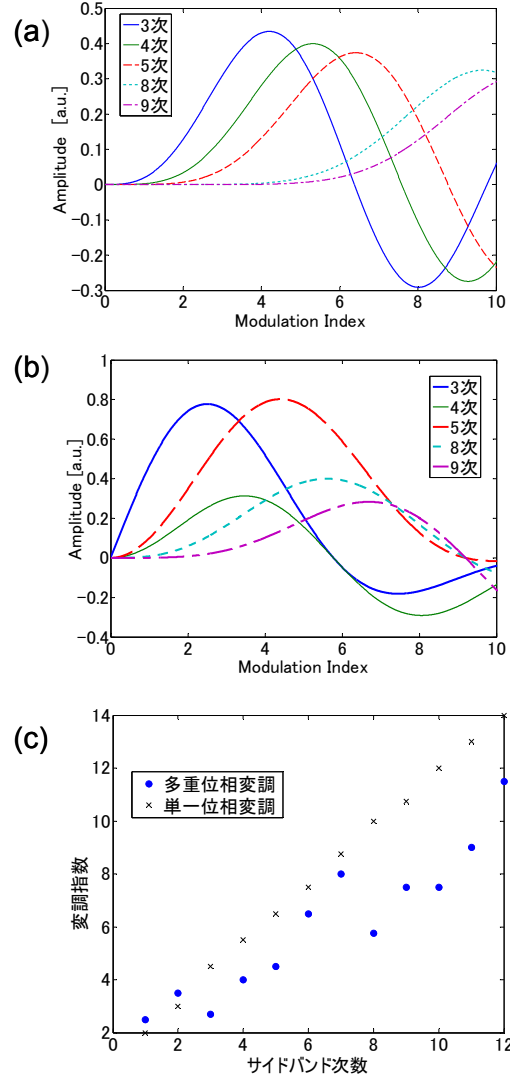


図 6 変調指数とサイドバンドの関係: (a) 単一周波数位相変調, (b) 多重周波数位相変調, (c) サイドバンド次数と変調指数の関係。

ることが確認できる。

多重位相変調を用いた場合の光周波数コムは、以下の式で与えられる。

$$E_o(t) = \sqrt{r_1 r_2} \exp(-j\pi) \sum_{n=1}^N A \exp(-jN F_x(t)) E_i(t) \quad (8)$$

$$F_x(t) = \sum_{l=1}^x m_l \sin(\omega_l t)$$

$$A = \sqrt{\alpha(1-r_1)(1-r_2)}$$

ここで、 $\alpha$  はリング 1 周の増幅率、 $r_1, r_2$  はカプラの分岐比を表している。

OCDR-OFC において、空間分解能を保ちつつ、遠方を測定するために、これまで、リング共振器内の位相変調器を多重周波数駆動することを提案した。しかし、多重周波数駆動には、多重数に応じて信号発生器が複数台必要になる。そこで、位相変調器を変調する波形を  $f_2, 3f_2, 5f_2$  の周波数成分を持つ任意波形



にすることで、多重位相変調と同様の効果を得る。入力光電界を  $E_i$  とし、任意波形  $F_3(t)$  の周波数成分を  $f_{21}=f_2$ ,  $f_{22}=3f_2$ ,  $f_{23}=5f_2$ , 周波数成分毎の振幅を  $m_1, m_2, m_3$ , 周波数成分毎の位相シフトを  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ , リング 1 周の増幅率を  $\alpha$ , カプラの分岐比を  $r_1, r_2$  とすると、光周波数コム出力光電界  $E_o$  は以下の式で与えられる。

$$E_o(t) = \sqrt{r_1 r_2} \exp(-j\pi) \sum_{n=1}^N \alpha \exp(-jnF_3(t)) E_i(t) \quad (9)$$

$$F_3(t) = \sum_{k=1}^3 m_k \sin(2\pi f_{2k} t + \theta_k) \quad (10)$$

(3) 光周波数コムと可変光遅延線を用いた OFDR におけるフェーディング雑音低減手法  
光ファイバ故障診断技術として光周波数領域分布反射計 (Optical Frequency Domain Reflectometry: OFDR) がある。OFDR の精度を制限する主な要因として、ファイバ中のレイリー散乱のランダム性によるフェーディングノイズが知られている。このノイズを低減するためには入射する光の周波数を変えて複数回測定を行い、平均する必要がある。

光源に光周波数コムを用いて光フィルタで 1 波ずつ切り出して OFDR 測定をし、平均することで、単一光源に比べて高精度な結果が得られたことは既に報告されている。本研究では光フィルタを用いずに可変光遅延線を用いることで高精度な OFDR の測定結果を得る手法を提案する。

OFDR は周波数を線形に掃引された光をファイバ中に入射し、測定ファイバからの反射光と参照光とのビート周波数を観測する技術である。ビート周波数が測定ファイバの反射点の距離に比例することを利用してフーリエ変換により反射光強度の位置分解を行う。OFDR における周波数平均法は、光源の周波数掃引幅はそのままに掃引開始点をずらしていき複数回の測定を行い、平均化処理により、反射率精度を向上させる。

光周波数コムは周波数間隔の等しい櫛の歯状のスペクトル形状を有した多波長光源である。図 7 は本実験で用いた光周波数コム発生系を表したものであり、位相変調器と強度変調器を直列に接続して平坦な光周波数コムを発生させた。図 8 は発生させた光周波数コムのスペクトルである。コム間隔は 9.8GHz であり、13 波程平坦性の保たれた光周波数コムが得られた。

この光周波数コムを光源とし、OFDR の参照経路側に可変光遅延線を用いる。コム間隔とコムの歯数の積の逆数を遅延量とし、測定毎にこの分の遅延量を変化させてコムの歯数分の測定を行い、得られた結果を加算平均処理する。これにより、光周波数コムの歯数

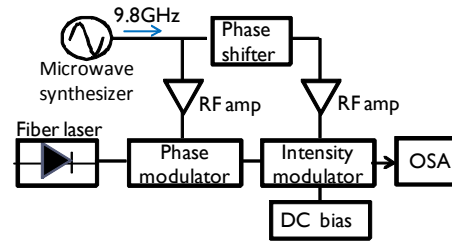


図 7 光周波数コム発生器の構成

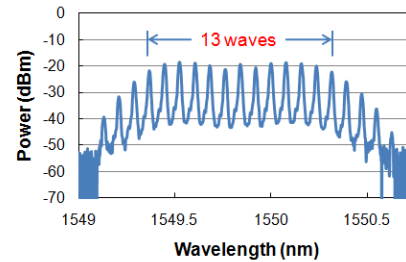


図 8 発生した光周波数コムのスペクトル

分の周波数平均効果があり、以降の実験結果により実証する。

(4) 光コム光源を用いた PNC-OFDR におけるフェーディング雑音低減

コヒーレント検波方式を用いた反射測定では、異なる位置での後方散乱光電界の不均一によって生じるフェーディング雑音が強度揺らぎとして反射分布波形に重畳され測定精度が劣化する。フェーディング雑音低減には、周波数シフト平均法 (FSAV) が有効であるが、位相ノイズ補償 OFDR (PNC-OFDR) では長距離測定のために光源に高コヒーレンス性を有する狭線幅ファイバレーザを用いており、その周波数可変幅は数十 GHz 程度と、FSAV を用いたフェーディング雑音低減には不十分である。そこで、本研究では狭線幅ファイバレーザからの出力光を光コム化し、その単一輝線スペクトルを光源として PNC-OFDR におけるフェーディング雑音を抑制したので報告する。

図 9 に PNC-OFDR の構成を示す。狭線幅ファイバレーザの出力光に対し 50% デューティ比にて強度変調を施した後、比較的大きな変調度にて位相変調して、フラットかつ広帯域な光コムを得た。光コム間隔は 25GHz であり光フィルタによって単一輝線スペクトルのみ透過される。図 10 に示すように、フラットネス 5dB 以内の輝線スペクトルは 27 本 (帯域: 650GHz) あり、それらを試験光として採用した。また、光フィルタの遮断量は 50dB 以上であり、対象とする輝線スペクトル以外の成分は十分遮断され測定に影響しない。なお、光フィルタの透過帯域をシフトさせる事で、測定毎に異なる輝線スペクトルを

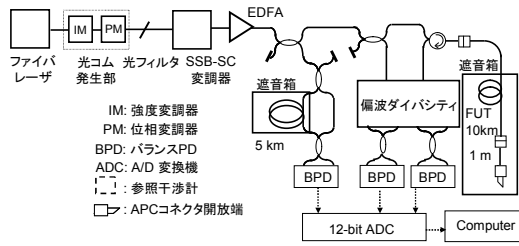


図 9 光コム光源を用いた PNC-OFDR の構成

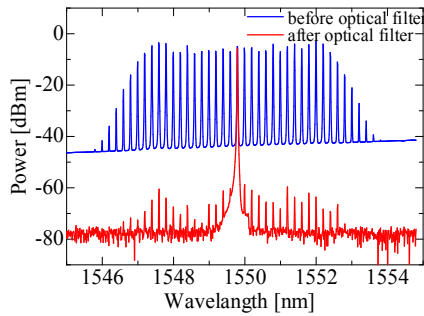


図 10 光コムスペクトル

取り出した．光コム発生部からの出力光を SSB-SC 変調器にて 5 から 7GHz まで 0.02s 間、周波数掃引した（掃引率: 100GHz/s, 掃引幅: 2GHz, 理論分解能: 5cm）．SSB 変調は掃引帯域全体に渡って 20-25dB の良好な抑圧比を得た．被測定ファイバ (FUT) からのビート信号を偏波ダイバシティ構成にて受光した後、AD 変換器にてサンプリングレート 30MS/s で同期サンプリングした．得られた信号に連結参照法を適用し PNC-OFDR 反射分布波形を得た．参照干渉計の遅延ファイバ長は 5km, FUT 長は 10km とした．また、参照干渉計は常時遮音し、FUT の遮音条件を変えて測定を実施する事で、FUT に加わる音響波のフェーディング雑音に対する影響も検証した．

#### 4. 研究成果

(1) 光周波数コムを用いた光コヒーレンス領域リフレクトメトリ

反射率分布測定の実験のために、まず、光周波数コム発生の実験系を図 11 に示す．種レーザは、DFB-LD (NTT Electronics Corp., NLK1C6DAAA) を使う．DFB レーザの光を共振器に入射し、共振器の FSR (Free Spectrum Range) とちょうど合う変調周波数で位相変調器 (PM) により変調すると光周波数コムが発生する．変調周波数は、信号発生器 (FG) により 40MHz-80MHz まで線形に掃引する．また、光周波数コムのコム間隔を kHz-MHz オーダーの光源が必要であるため、共振器にはファイバリング共振器を用い、リング内に 10km のファイバを入れることで、共振器の FSR はおよそ 10kHz となり、FSR と合う位相変調周

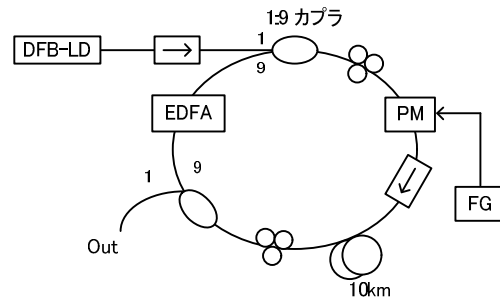


図 11 光周波数コム発生の実験系．DFB-LD: 分布帰還半導体レーザ, EDFA: Er 添加光ファイバ増幅器, PM: 位相変調器, FG: 信号発生器．

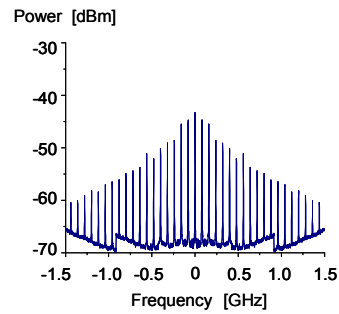
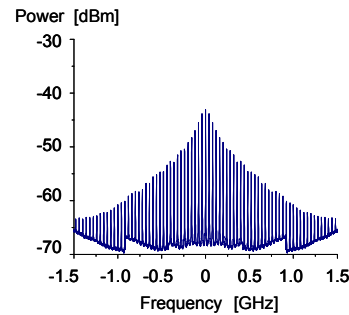


図 12 光周波数コムスペクトラム測定結果．上：周波数間隔 40 MHz, 下：周波数間隔 80 MHz.

波数の時、光周波数コムが発生する．1:9 のカプラにより 10% の光を出力しているため、損失を補うためにエルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA) をリング内に入れている．

実験において、位相変調器の変調周波数を 40MHz から 80MHz まで掃引した．発生したスペクトラムは図 12 である．コム間隔が 40MHz と 80MHz で楕型のスペクトラムを得ることができ、コム間隔を 40MHz-80MHz まで可変にすることができている．

図 13 に、光周波数コムによる反射率分布測定を行う実験系を示す．光源として光周波数コムを用いたヘテロダイン干渉計である．光源には、図 12 で発生した光周波数コムを用いる．光源から入射した光は 3dB カプラにより分割され、FUT (Fiber under Test) と参照光路に入射される．FUT から反射・散乱された光と、参照光側で音響光学素子 (AOM) によって周波数シフトさせた光を合波し、フォト



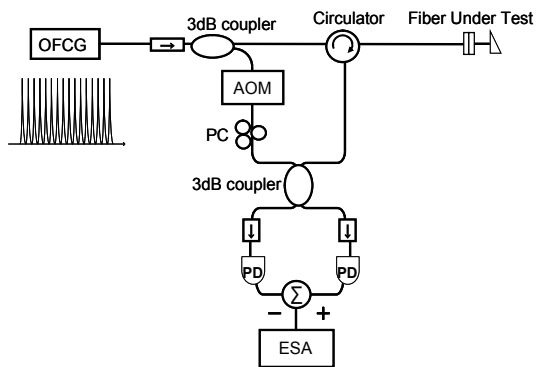


図 13 光周波数コムを用いた光リフレクトメトリのシステム構成. OFCG: 光周波数コム発生器, AOM: 音響光学変調器, PC: 偏波コントローラ, PD: 光検出器, ESA: 電気スペクトルアナライザ.

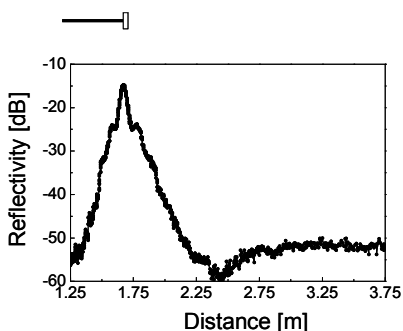


図 14 光周波数コムを用いた反射率分布測定結果

ディテクタで電気信号に変える。AOM は、周波数シフトが 40MHz のものを使用し、フォトディテクタは、DC から 80MHz の帯域で使用できる Balanced PD を用いている。フォトディテクタからの電気信号の AOM によってシフトした 40MHz の周波数成分を電気スペクトラムアナライザ (ESA) で観測する。このビート周波数成分が光波コヒーレンス関数に比例することから、位置分解が可能になる。反射率分布測定のすべての実験において、コヒーレンスピークは 1 次ピークを用いている。

図 14 に、測定した FUT の構成と反射率分布測定結果を示す。図 14 は、FUT として、1.75m の SMF のオープンエンドを測定した結果である。反射ピークの 3dB 幅に相当する空間分解能は 5cm である。また、ピークからノイズフロアまで 45dB 差がある。サンプル数 1500 点、測定時間は 10 秒で測定できている。

図 15 は、FUT として、1.75m の SMF と FC/PC コネクタ、50cm の SMF と FC/APC コネクタのオープンエンドを測定した結果である。図 15(a)は、正弦波型 SOCF によるリフレクトメトリを用いて FUT を測定した結果で、図 15(b)は、光周波数コムによるリフレクトメトリを用いて FUT を測定した結果である。

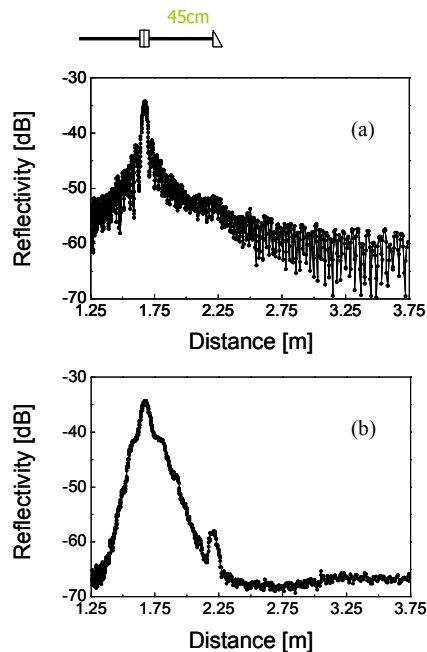


図 15 正弦波 SOCF によるリフレクトメトリを用いた測定結果(a)および光周波数コムによるリフレクトメトリを用いた測定結果(b)の比較

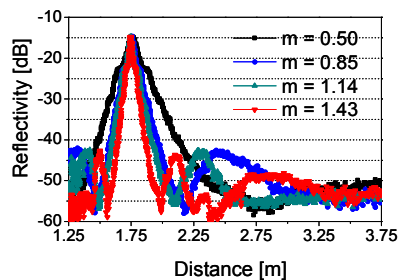


図 16 変調指数  $m$  を変化させた反射率測定結果

正弦波型 SOCF による反射率分布測定ではピークとノイズフロアの差が 25dB 程度のため、PC(反射率: -34dB)のピーク近傍において、APC(反射率: -58.1dB)の反射を正確に測定できていないのに対し、光周波数コムを用いた反射率分布測定では、ピーク近傍においても、ピークとノイズフロアの差が 35dB 程度であるため、PC の反射と同時に APC の反射も測定できている。

位相変調器の変調指数  $m$  を大きくすることで、光周波数コムのコムスパンは拡大できる。シングルモードファイバ 1.75m の終端を開放したものを測定対象として反射率分布を測定した結果を図 16 に示す。位相変調器に印加する変調信号の振幅を 3.5V から 10V まで変化させた。印加する変調信号の振幅に対して、変調指数  $m$  は 0.5 から 1.5 まで変化する。これにより、空間分解能は 7cm から 2cm まで向上することができた。

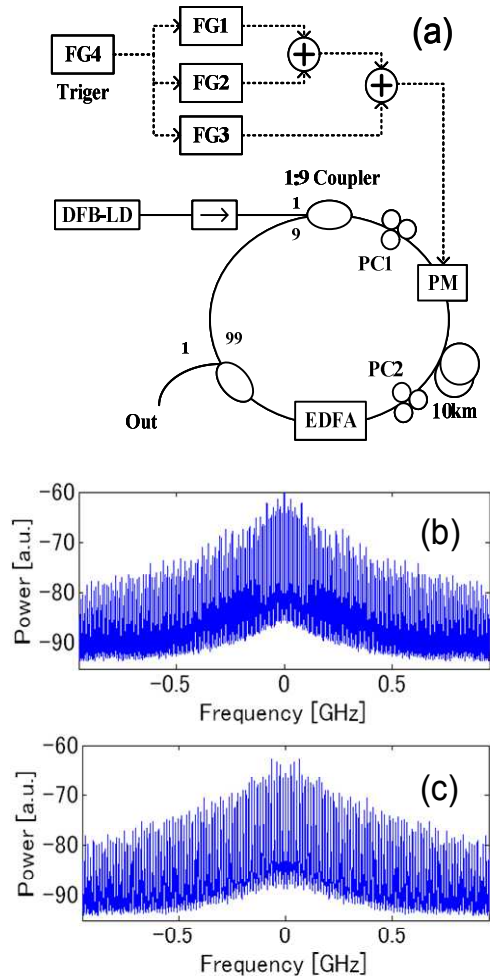


図 17 多重位相変調光周波数コム発生器の実験系: DFB-LD, 分布帰還半導体レーザー; FG, 信号発生器; PC, 偏波コントローラ; PM, 位相変調器; EDFA, Er 添加光ファイバ増幅器. (b)-(c) 光周波数コムの RF ビートスペクトル (b) コム間隔: 13.199680 MHz (c) コム間隔: 10.099850 MHz.

(2) 多重位相変調および任意位相変調光周波数コムを用いた光リフレクトメトリ

多重位相変調光周波数コム発生の実験系を図 17(a)に示す. 種レーザーは, DFB-LD (NTT Electronics Corp., NLK1C6DAAA)を使う. DFB レーザの光をリング増幅器に入射し, 増幅器の FSR(Free Spectrum Range)とちょうど合う変調周波数で位相変調器(PM)により変調すると光周波数コムが発生する. 多重位相変調のために, 信号発生器(FG1-3)を 3 台使用し, それぞれの周波数は,  $f_1, 3f_1, 5f_1$  としている. この 3 つの FG からの信号を足し合わせた信号を用いて位相変調器を駆動する. また, 反射率分布測定を行うためには, 変調周波数を掃引する必要があるため, FG4 をトリガとして使用し, FG1-3 の掃引のタイミングを合わせている. 実験において, 位相変調器の変調周波数  $f_1$  を 5.263157MHz から 14.285714MHz

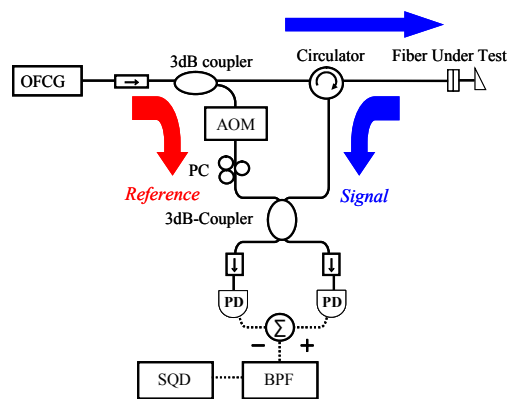


図 18 光周波数コムを用いた光リフレクトメトリの実験系: OFCG, 光周波数コム発生器; AOM, 音響光学変調器; PC, 偏波コントローラ; PD, 光検出器; BPF, バンドパスフィルタ; SQD, 自乗検波器.

まで掃引した. 発生したスペクトラムは図 17(b),(c)である.

図 18 に, 多重位相変調光周波数コムによる反射率分布測定を行う実験系を示す. 光源には, 図 17 で発生した多重位相変調光周波数コムを用いる. 光源から入射した光は 3dB カプラにより分割され, FUT (Fiber under Test) と参照光路に入射される. FUT から反射・散乱された光と, 参照光側で音響光学素子 (AOM) によって周波数シフトさせた光を合波し, フォトディテクタで電気信号に変える. AOM は, 周波数シフトが 40MHz のものを使用し, フォトディテクタは, DC から 80MHz の帯域で使用できる Balanced PD を用いている. フォトディテクタからの電気信号の AOM によってシフトした 40MHz の周波数成分をバンドパスフィルタ (BPF) と自乗検波 (SQD) で観測する. 今回は, BPF と SQD の代わりに電気スペクトラムアナライザ (ESA) を用いた. BPF と SQD により観測したビート周波数成分が光波コヒーレンス関数に比例することから, 位置分解が可能になる. 反射率分布測定のすべての実験において, コヒーレンスピークは 1 次ピークを用いている.

図 19 に, 測定した FUT の構成と反射率分布測定結果を示す. 図 19 (a)は, FUT として, 10m の SMF と FC/PC コネクタのオープンエンドを測定した結果である. FC/PC のオープンエンドからの反射は, -14.7dB である. SMF の終端において, 反射ピークが観測できており, 反射ピークからノイズフロアまでの差が 45dB 以上あることが確認できる. また, 空間分解能は 5cm, 測定時間は 10 秒である.

図 19 (b)は, FUT として, 10m の SMF と FC/PC コネクタ, 0.5m の SMF と FC/APC コネクタ, さらに, 1m の SMF と FC/APC コネクタのオープンエンドを測定した結果である. 一般的に, 接続した FC/PC からの反射は, -35dB 以下であり, 接続した FC/APC からの反射は, -60dB 程度である. FC/PC と 2 つの



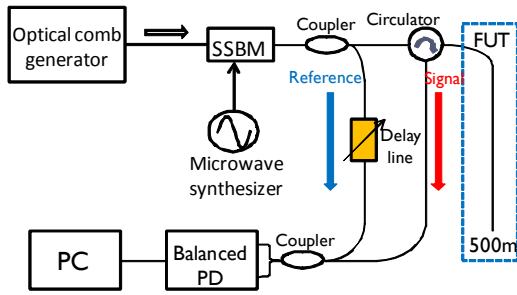


図 22 光周波数コムと可変光遅延線を用いた OFDR のシステム構成。

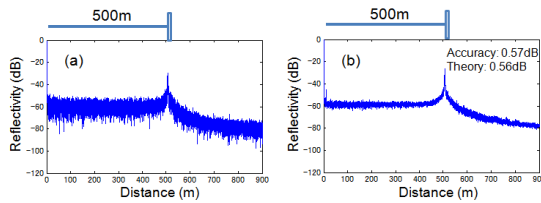


図 23 光周波数コムを用いた反射率分布測定結果。(a) 平均なし、(b) 光周波数コムと可変光遅延を用いた 13 回平均。

#### (4) 光コム光源を用いた PNC-OFDR におけるフェーディング雑音低減

図 24 に参照干渉計、FUT 共に遮音した状態での、単一試験波長における 27 波形の加算平均処理結果および光コム光源を用いて取得した 27 波形の加算平均処理(FSAV)結果を示す。前者のフェーディング雑音による揺らぎが 2.5dB であるのに対し、光コム光源を適用した場合は 0.9dB (計算値と一致)となった。遮音条件に拠らず光コム光源を用いる事でフェーディング雑音が低減した。また、FUT に音響波が加わる場合は遮音した場合と比較して、フェーディング雑音が低減した。これは、音響波によるファイバ振動にて空間的な平均化効果が加わったためであると考えられる。さらに、10km に渡り理論分解能を達成しており、光コムを用いる事による PNC-OFDR 特性の劣化は無い。このように、光コムを用いる事で狭線幅ファイバレーザにおける高コヒーレンス特性を保ったまま測定波長を変化させる事が可能となり、長距離・高分解能かつフェーディング雑音を抑制した PNC-OFDR を実現した。

PNC-OFDR の光源に光コムを用いる事で、PNC-OFDR の諸特性を損なう事無く、フェーディング雑音による強度揺らぎを 0.9dB まで低減した。また、音響波によるファイバの振動にてフェーディング雑音が空間的に平均化され揺らぎが低減する事を明らかにした。

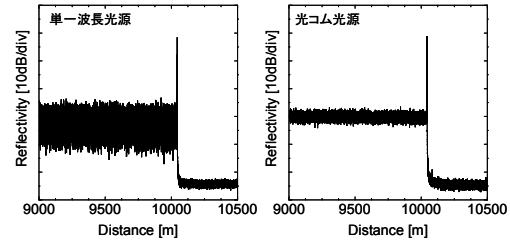


図 24 光コム光源を用いた PNC-OFDR による反射分布測定結果。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 18 件)

- [1] Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “One-laser-based generation/detection of Brillouin dynamic grating and its application to distributed discrimination of strain and temperature,” *OSA Optics Express*, Vol. 19, No. 3, pp. 2363-2370, Jan. 2011 (査読有)
- [2] Yosuke Mizuno, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “Operation of Brillouin optical correlation-domain reflectometry: Theoretical analysis and experimental validation,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 28, No. 22, pp. 3300-3306, Nov. 2010 (査読有)
- [3] Zuyuan He and Kazuo Hotate, “Dynamic gratings in optical fibers: synthesis and sensing applications,” *Photonic Sensors*, Vol. 1, DOI: 10.1007/s13320-010-0008, Springerlink, Nov. 2010 (invited) (査読有)
- [4] Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “Single-end-access correlation-domain distributed fiber-optic sensor based on stimulated Brillouin scattering,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 28, Issue 18, pp. 2736 - 2742, Sept. 2010 (査読有)
- [5] Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “Demonstration of Brillouin distributed discrimination of strain and temperature based on a polarization-maintaining optical fiber,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 22, No. 8, pp. 526-528, Apr. 2010 (査読有)
- [6] Yosuke Mizuno, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “Distributed strain measurement using a tellurite glass fiber with Brillouin optical correlation-domain reflectometry,” *Optics Communications*, Vol. 283, No. 11, pp. 2438-2441, Apr. 2010 (査読有)



- [7] Yosuke Mizuno, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on double-modulation scheme," *OSA Optics Express*, Vol. 18, No. 6, pp. 5926-5933, Mar. 2010 (査読有)
- [8] Yosuke Mizuno, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "Stable entire-length measurement of fiber strain distribution by Brillouin optical correlation-domain reflectometry with polarization scrambling and noise-floor compensation," *Applied Physics Express*, Vol. 2, Paper No. 062403, Jun. 2009 (査読有)
- [9] Yosuke Mizuno, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on temporal gating scheme," *OSA Optics Express*, Vol. 17, No. 11, pp. 9040-9046, May 2009 (査読有)
- [10] Yosuke Mizuno, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "Polarization beat length distribution measurement in single-mode optical fibers with Brillouin optical correlation-domain reflectometry," *Applied Physics Express*, Vol. 2, Paper No. 046502, Apr. 2009 (査読有)
- [11] Yosuke Mizuno, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "One-end-access high-speed distributed strain measurement with 13-mm spatial resolution based on Brillouin optical correlation-domain reflectometry," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 21, No. 7, pp. 474-476, Apr. 2009 (査読有)
- [12] Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "Complete discrimination of strain and temperature using Brillouin frequency shift and birefringence in a polarization-maintaining fiber," *OSA Optics Express*, Vol. 17, No. 3, pp. 1248-1255, Jan. 2009 (査読有)
- [13] Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "Experimental study of Brillouin scattering in fluorine-doped single-mode optical fibers," *OSA Optics Express*, Vol. 16, No. 23, pp. 18804-18812, Nov. 2008 (査読有)
- [14] Xinyu Fan, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "A novel distributed strain sensor based on dynamic grating in polarization-maintaining erbium-doped fiber," *OSA Optics Letters*, Vol. 23, No. 14, pp. 1647-1649, Aug. 2008 (査読有)
- [15] Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "Investigation of strain- and temperature-dependences of Brillouin frequency shifts in GeO<sub>2</sub>-doped optical fibers," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol.26, No.3, pp.1854-1861, July 2008 (査読有)
- [16] Yosuke Mizuno, Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "Proposal of Brillouin optical correlation-domain reflectometry (BOCDR)," *OSA Optics Express*, Vol.16, No. 16, pp. 12148-12153, July 2008 (査読有)
- [17] Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "Acoustic modal analysis and control in w-shaped triple-layer optical fibers with highly-germanium-doped core and F-doped inner cladding," *OSA Optics Express*, Vol. 16, No. 14, pp. 10006-10017, June 2008 (査読有)
- [18] Kwang-Yong Song, Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "All-optical dynamic grating generation based on Brillouin scattering in Polarization-maintaining fiber," *OSA Optics Letters*, Vol. 33, No. 9, pp. 926-938, May 2008 (査読有)
- [学会発表] (計 6 2 件)
- [1] Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "Enlargement of measurement range by double frequency modulations in one-Laser Brillouin correlation-domain distributed discrimination system," CLEO 2011, CThL5, Baltimore, May 2011
- [2] Zuyuan He and Kazuo Hotate, "Advances in optical reflectometry for diagnoses of optical devices and networks," 9th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON 2010), Nanjing, Oct. 24-26, 2010 (**invited**)
- [3] Kazuo Hotate and Zuyuan He, "Fiber optic distributed sensing for smart structures and smart materials," 9th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON2010), Nanjing, Oct. 24-26, 2010 (**invited**)
- [4] Zuyuan He and Kazuo Hotate, "Brillouin optical correlation domain distributed fiber sensors," ECOC 2010, WS1-3, Torino, Sept. 19-23, 2010 (**invited**)
- [5] Hiroshi Takahashi, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "Optical coherence domain reflectometry by use of optical frequency comb with arbitrary-waveform phase modulation," Proc. ECOC 2010, Tu.3.F.4, Torino, Sept. 19-23, 2010
- [6] Yusuke Koshikiya, Xinyu Fan, Fumihiko Ito, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, "Fading-noise suppressed cm-level



- resolution reflectometry over 10-km range with phase noise and chromatic dispersion compensation,” Proc. ECOC 2010, Tu.3.F.2, Torino, Sept. 19-23, 2010
- [7] Zuyuan He, Quang Nam Ho, Weiwen Zou, Koji Kajiwara, Hiroshi Takahashi, and Kazuo Hotate, “Optical coherence tomography based on optical frequency comb generator with single-sideband modulator,” OECC 2010, 9C3-2, Sapporo, July 5-9, 2010
- [8] Zuyuan He and Kazuo Hotate, “Advances in optical reflectometry for reliability and security: optical coherence-domain reflectometry by use of optical frequency comb,” APOS 2010, Guangzhou, June 28-30, 2010 (6/29) **(invited)**
- [9] Zuyuan He, Hiroshi Takahashi, and Kazuo Hotate, “Optical coherence-domain reflectometry by use of optical frequency comb,” CLEO/IQEC 2010, CFH4, San Jose, May 17-21, 2010 (5/21)
- [10] Yosuke Mizuno, Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “Spatial resolution limitation by Rayleigh scattering-induced noise in Brillouin optical correlation-domain reflectometry,” CLEO/IQEC 2010, JWA54, San Jose, May 17-21, 2010 (5/19)
- [11] Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “Single-ended distributed temperature or strain sensor based on stimulated Brillouin scattering,” Proc. SPIE, vol. 7503, 20th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS -20), Edinburgh, 7503-222, Oct. 5-9, 2009 (10/7)
- [12] Yosuke Mizuno, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation-domain reflectometry using tellurite glass fiber,” Proc. SPIE, vol. 7503, 20th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS -20), Edinburgh, 7503-10, Oct. 5-9, 2009 (10/6)
- [13] Kazuo Hotate and Zuyuan He, “Fiber-Optic Nerve Systems for Safety and Security,” 14th Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2009), Hong Kong, July 13-17, 2009 (7/17) **(invited)**
- [14] Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “Realization of high distributed sensing speed based on Brillouin optical correlation domain analysis,” CLEO/IQEC 2009, CMNN5, Baltimore, May 31-Jun. 5, 2009 (6/1)
- [15] Yosuke Mizuno, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “Polarization beat length distribution measurement in single-mode optical fibers with Brillouin optical correlation-domain reflectometry,” OFC/NFOEC 2009, OMP5, San Diego, Mar. 24-26, 2009 (3/25)
- [16] Zuyuan He and Kazuo Hotate, “Dynamic grating in optical fiber, synthesis and sensing applications,” 1st Asia-Pacific Optical Fiber Sensors Conference (APOS-2008), Chengdu, Nov. 7-9, 2008 (11/8) **(invited)**
- [17] Yosuke Mizuno, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “Enlargement of measurement range of Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on temporal gating scheme,” ECOC 2008, We.3.B.7, Brussels, Sept. 24 (21-25), 2008
- [18] Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “Fiber-optic Brillouin distributed discrimination of strain and temperature with 11-cm spatial resolution using correlation-based continuous-wave technique,” ECOC 2008, We.3.B.3, Brussels, Sept. 24 (21-25), 2008
- [19] Yosuke Mizuno, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “Brillouin Optical Correlation-Domain Reflectometry with 13-mm Spatial Resolution and 50-Hz Sampling Rate,” CLEO/IQEC 2008, San Jose, CMZ2, May 5-8, 2008 (5/5)
- [20] Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “High-precision characterization of dynamic acoustic grating induced by stimulated Brillouin scattering in a high-birefringence optical fiber,” CLEO/IQEC 2008, San Jose, CThE2, May 5-8, 2008 (5/8)
- [21] Weiwen Zou, Zuyuan He, Kwang-Yong Song, and Kazuo Hotate, “Correlation-based distributed measurement of SBS-generated dynamic grating spectrum in a polarization-maintaining fiber,” 19th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS-19), Perth, PD3, 7004-305, Apr. 14-18, 2008 (4/17)
- [22] Zuyuan He, Masatoshi Konishi, and Kazuo Hotate, “A high-speed sinusoidally-frequency-modulated optical reflectometry with continuous modulation-frequency sweeping,” 19th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS-19), Perth, 7004-201, Apr. 14-18, 2008 (4/17)
- [23] Yosuke Mizuno, Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “Proposal and

- experiment of BOCDR-Brillouin optical correlation-domain reflectometry-,” 19th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS-19), Perth, 7004-122, Apr. 14-18, 2008. (4/17)
- [24] Weiwen Zou, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “High-accuracy discriminative sensing of strain and temperature by use of birefringence and Brillouin scattering in a polarization- maintaining fiber,” 19th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS-19), Perth, 7004-105, Apr. 14-18, 2008. (4/17)
- [25] 風間拓志, 何 祖源, 古敷谷優介, 樊 昕昱, 伊藤文彦, 保立和夫, “光周波数コムと可変光遅延線を用いた OFDR におけるフェーディング雑音低減手法,” 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会 (OFT), 長崎県勤労福祉会館, OFT2010-54, pp. 37-42, 2011 年 1 月 27-28 日. (1/27)
- [26] 鄒 衛文, 何 祖源, 保立和夫, “Brillouin scattering property in highly nonlinear photonic crystal fiber with hybrid-core,” 応用物理学会第 45 回光波センシング技術研究会, 静岡文化芸術大学, LST-45-4, pp. 27-32, 2010 年 6 月 8-9 日. (6/8)
- [27] 水野洋輔, 鄒 衛文, 何 祖源, 保立和夫, “ブリルアン光相関領域リフレクトメトリにおけるレイリー散乱誘起雑音と空間分解能に関する考察,” 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, 大濱信泉記念館 (石垣島), 信学技報 OFT2009-66, pp. 21-26, 2010 年 1 月 21-22 日. (1/21)
- [28] 鄒 衛文, 何 祖源, 保立和夫, “誘導ブリルアン散乱に基づいた単一入射型光ファイバ分布センサ,” 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, 大濱信泉記念館 (石垣島), 信学技報 OFT2009-67, pp. 27-32, 2010 年 1 月 21-22 日. (1/21)
- [29] 高橋 央, 何 祖源, 保立和夫, “多重位相変調光周波数コムを用いた光リフレクトメトリ,” 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, 大濱信泉記念館 (石垣島), 信学技報 OFT2009-72, pp. 55-60, 2010 年 1 月 21-22 日. (1/21)
- [30] 梶原康嗣, 保立和夫, 何 祖源, “外部位相変調と光波コヒーレンス関数の合成法の組合せによる長尺 FBG センシングシステムの空間分解能向上,” 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, 大濱信泉記念館 (石垣島), 信学技報 OFT2009-76, pp. 77-82, 2010 年 1 月 21-22 日. (1/22)
- [31] 水野洋輔, 何 祖源, 保立和夫, “二重周波数変調を用いたブリルアン光相関領域リフレクトメトリの測定レンジの延伸,” 応用物理学会第 44 回光波センシング技術研究会, 東京理科大学森戸記念館, LST-44-8, 2009 年 12 月 8-9 日. (12/8)
- [32] 何 祖源, 沼澤正和, 保立和夫, “光コム光源を用いた多点型 FBG センシングシステム,” 応用物理学会第 43 回光波センシング技術研究会, 埼玉大学ステーションカレッジ, LST-43-2, pp. 15-20, 2009 年 6 月 9-10 日. (6/9)
- [33] 水野洋輔, 何 祖源, 保立和夫, “テルライトファイバにおけるブリルアン周波数シフトの歪および温度依存性とその BOCDR への応用,” 応用物理学会第 43 回光波センシング技術研究会, 埼玉大学ステーションカレッジ, LST-43-24, pp. 161-165, 2009 年 6 月 9-10 日. (6/10)
- [34] 何 祖源, 高橋 央, 保立和夫, “光周波数コムを用いた光コヒーレンス領域リフレクトメトリ,” 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, 住友電工南箱根セミナーハウス, OFT2009-12, pp. 55-60, 2009 年 5 月 28-29 日. (5/29)
- [35] 何 祖源, 山下健二, 保立和夫, “High-accuracy optical frequency domain reflectometry by single-sweep frequency-averaging,” 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, 住友電工南箱根セミナーハウス, OFT2009-11, pp. 51-54, 2009 年 5 月 28-29 日. (5/29)
- [36] 鄒 衛文, 何 祖源, 保立和夫, “High-Speed Distributed Sensing Based on Brillouin Optical Correlation Domain Analysis,” 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, 住友電工南箱根セミナーハウス, OFT2009-13, pp. 61-66, 2009 年 5 月 28-29 日. (5/29)
- [37] 水野洋輔, 何 祖源, 保立和夫, “Stable entire-length measurement of fiber strain distribution by Brillouin optical correlation-domain reflectometry with polarization scrambling,” 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 機会振興会館, OPE2008-193, pp. 31-38, 2009 年 3 月 6 日.
- [38] 水野洋輔, 鄒 衛文, 何 祖源, 保立和夫, “Brillouin optical correlation-domain reflectometry utilizing optical heterodyne detection,” 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, 日本文理大学湯布院研修所, OFT2008-53, pp. 33-38, 2008 年 11 月 20 日.
- [39] 鄒 衛文, 何 祖源, 保立和夫, “Fiber-optic Brillouin distributed discri-

- mination of strain and temperature using correlation-based continuous-wave technique,” 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会，北海道大学，OFT2008-28, pp. 61-64, 2008年8月28-29日.
- [40] 鄒 衛文, 何 祖源, 保立和夫, “A novel discriminative sensing of strain and temperature by use of a Panda-type polarization-maintaining fiber,” 応用物理学学会第41回光波センシング技術研究会, 東京理科大学森戸記念館, LST-41-25, pp. 167-176, 2008年6月11日.
- [41] 水野洋輔, 鄒 衛文, 何 祖源, 保立和夫, “ブリルアン光相関領域リフレクトメトリ(BOCDR)の測定レンジの拡大,” 応用物理学学会第41回光波センシング技術研究会, 東京理科大学森戸記念館, LST-41-24, pp. 161-166, 2008年6月11日.
- [42] 何 祖源, 高橋 央, 保立和夫, “Optical coherence domain reflectometry by use of optical frequency comb with arbitrary-waveform phase modulation,” 2011年度電子情報通信学会総合大会, 東京都市大学, C-4-1, 2011年3月14-17日. (3/15) (依頼講演)
- [43] 風間拓志, 何 祖源, 古敷谷優介, 樊 昕昱, 伊藤文彦, 保立和夫, “光周波数コムと可変光遅延線を用いた OFDR におけるフェーディング雑音低減手法,” 2011年度電子情報通信学会総合大会, 東京都市大学, C-3-19, p. 194, 2011年3月14-17日. (3/14)
- [44] 高橋 央, 何 祖源, 保立和夫, “光周波数コムを用いた光コヒーレンス領域リフレクトメトリ,” 2010年度電子情報通信学会ソサイエティ大会, 大阪府立大学, C-3-30, p. 151, 2010年9月14-17日. (9/15) (依頼講演)
- [45] 風間拓志, 何 祖源, 古敷谷優介, 樊 昕昱, 伊藤文彦, 保立和夫, “光周波数コムを用いた高精度光周波数領域分布反射計,” 2010年度電子情報通信学会ソサイエティ大会, 大阪府立大学, C-3-27, p. 148, 2010年9月14-17日. (9/15)
- [46] 古敷谷優介, 樊 昕昱, 伊藤文彦, 何 祖源, 保立和夫, “PCN-OFDRを用いた屋外環境に敷設された光ケーブルの反射測定,” 2010年度電子情報通信学会ソサイエティ大会, 大阪府立大学, B-13-44, p. 351, 2010年9月14-17日. (9/16)
- [47] 鄒 衛文, 何 祖源, 保立和夫, “ハイブリッドコア構造の高非線形フォトニック結晶ファイバ中におけるブリルアン散乱の特性,” 2010年電子情報通信学会総合大会, 東北大学, BS-6-3, 2010年3月16-19日. (3/17) (シンポジウム講演)
- [48] 古敷谷優介, ファンシンユウ, 伊藤文彦, 何 祖源, 保立和夫, “光コム光源を用いた PNC-OFDR におけるフェーディング雑音低減,” 2010年電子情報通信学会総合大会, 東北大学, B-13-13, 2010年3月16-19日. (3/18)
- [49] 何 祖源, ホーワン ナム, 鄒 衛文, 梶原康嗣, 保立和夫, “SSB 変調器による光周波数コムを用いた光コヒーレンストモグラフィ,” 2010年電子情報通信学会総合大会, 東北大学, C-3-30, 2010年3月16-19日. (3/18)
- [50] 高橋 央, 何 祖源, 保立和夫, “任意波形状位相変調光周波数コムを用いた光リフレクトメトリ,” 2010年電子情報通信学会総合大会, 東北大学, C-3-31, 2010年3月16-19日. (3/18)
- [51] 高橋 央, 何 祖源, 保立和夫, “光周波数コムを用いた光リフレクトメトリにおける空間分解能の向上,” 2009年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 新潟大学, C-3-28, p. 183, 2009年9月15-18日. (9/15)
- [52] 水野洋輔, 何 祖源, 保立和夫, “酸化ビスマスファイバにおけるブリルアン周波数シフトの温度依存性,” 2009年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 新潟大学, B-13-41, p. 330, 2009年9月15-18日. (9/18)
- [53] 鄒 衛文, 何 祖源, 保立和夫, “Single-End-Incident Distributed Temperature or Strain Sensor Based on Stimulated Brillouin Scattering,” 2009年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 新潟大学, B-13-40, p. 329, 2009年9月15-18日. (9/18)
- [54] 水野洋輔, 何 祖源, 保立和夫, “ノイズフロア補正による偏波スクランプリングを用いた BOCDR の S/N 比の向上,” 56 回応用物理学関係連合講演会, 日本大学, 2a-P15-12, 2009年3月30日-4月2日. (4/2)
- [55] E29 保立和夫, 何 祖源, “光波コヒーレンス関数の合成法を利用した光ファイバ神経網,” 光波センシング技術研究会企画「光ファイバセンサの新展開」56 回応用物理学関係連合講演会, 日本大学, 31p-K-9, 2009年3月30日-4月2日. (3/30)
- [56] 水野洋輔, 何 祖源, 保立和夫, “偏波スクランプリングを用いたブリルアン光相関領域リフレクトメトリによる歪分布全長測定の安定化,” 2009年電子情報

通信学会総合大会, 愛媛大学, C-3-89, p. 240, 2009年3月20日.

- [57] 水野洋輔, 何 祖源, 保立和夫, “ブリルアン光相関領域リフレクトメトリによるシングルモード光ファイバ中の偏波ビート長の分布測定,” 2009年電子情報通信学会総合大会, 愛媛大学, C-3-88, p. 239, 2009年3月20日.
- [58] 水野洋輔, 鄒 衛文, 何 祖源, 保立和夫, “光ヘテロダイン検波を用いたブリルアン光相関領域リフレクトメトリ,” 2008年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 明治大学, C-3-70, p. 192, 2008年9月19日.
- [59] 水野洋輔, 何 祖源, 保立和夫, “時間ゲート法を用いたBOCDRの測定レンジの拡大,” 2008年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 明治大学, C-3-69, p. 191, 2008年9月19日.
- [60] 鄒 衛文, 何 祖源, 保立和夫, “Fiber-optic Brillouin distributed discrimination of strain and temperature using correlation-based continuous-wave technique,” 2008年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 明治大学, B- 13-9, p. 263, 2008年9月16日.
- [61] 何 祖源, 保立和夫, “光ファイバ中におけるダイナミックグレーティングの合成とセンシング応用,” 2008年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 明治大学, BS-11-7, p. S-117, 2008年9月18日. (招待講演)
- [62] 水野洋輔, 何 祖源, 保立和夫, “ブリルアン光相関領域リフレクトメトリによるリアルタイム歪分布測定の実証,” 第69回応用物理学学会学術講演会, 中部大学, 4p-ZM-8, 2008年9月4日.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計5件)

- [1] 名称: 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  
発明者: 古敷谷優介, ファン・シンユウ, 伊藤文彦, 何 祖源, 保立和夫  
権利者: 日本電信電話株式会社, 国立大学法人東京大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2011-014148  
出願年月日: 2011-01-26  
国内外の別: 国内
- [2] 名称: 光周波数領域反射測定方法および光周波数領域反射測定装置  
発明者: 古敷谷優介, ファン・シンユウ, 伊藤文彦, 何 祖源, 保立和夫  
権利者: 日本電信電話株式会社, 国立大学法人東京大学

種類: 特許

番号: 特願 2010-037762

出願年月日: 2010-02-23

国内外の別: 国内

- [3] 名称: 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

発明者: ファン・シンユウ, 伊藤文彦, 古敷谷優介, 何 祖源, 保立和夫, 高橋 央  
権利者: 日本電信電話株式会社, 国立大学法人東京大学

種類: 特許

番号: 特願 2009-169162

出願年月日: 2009-07-17

国内外の別: 国内

- [4] 名称: 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

発明者: 古敷谷優介, 伊藤文彦, ファン・シンユウ, 何 祖源, 保立和夫, 山下 ケンジ ホドリーゴ

権利者: 日本電信電話株式会社, 国立大学法人東京大学

種類: 特許

番号: 特願 2009-122286

出願年月日: 2009-05-20

国内外の別: 国内

- [5] 名称: 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

発明者: ファン・シンユウ, 伊藤文彦, 古敷谷優介, 何 祖源, 保立和夫, 高橋 央  
権利者: 日本電信電話株式会社, 国立大学法人東京大学

種類: 特許

番号: 特願 2009-122269

出願年月日: 2009-05-20

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sagnac.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

何 祖源 (HE ZUYUAN)

東京大学・大学院工学系研究科・特任教授

研究者番号: 70322047

(2) 連携研究者

保立 和夫 (HOTATE KAZUO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 60126159