

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 25 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420418

研究課題名(和文) 遅延積演算処理を応用した高距離分解能ブリルアンリフレクトメトリ

研究課題名(英文) High spatial resolution Brillouin reflectometry based on the product of delayed signals

研究代表者

堀口 常雄 (HORIGUCHI, TSUNEO)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：70348902

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：光ファイバ中の自然ブリルアン散乱を時間領域で測定し、その散乱光の周波数シフトの温度・ひずみ依存性を利用して、その分布を測定するセンサをBOTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectometry)と呼ぶ。本研究は、BOTDRのプロブ光を位相シフト変調した短・長パルスで構成し、後方ブリルアン散乱信号に対して遅延積演算を応用した信号処理を行うことにより、BOTDRの距離分解能や周波数測定精度の向上が図れることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：BOTDR is an optical fiber sensor for measuring distributed temperature and strain by utilizing the dependence of spontaneous Brillouin scattering frequency shift on them. In order to improve spatial resolution and frequency measurement accuracy for BOTDR, this study has proposed to employ phase-modulation pulse probe with and without pi-phase shift. This study has also proposed a new signal processing method based on multiplying delayed signals sampled with narrow- and wide-width window functions. Experiments have clarified that the proposed method is effective to improve the BOTDR performance

研究分野：計測工学

キーワード：計測工学 スマートセンサ情報システム リモートセンシング 応用光学・量子光学 光ファイバセンサ

1. 研究開始当初の背景

本研究は、光ファイバをセンサとして、構造物のひずみや温度の分布を測定する技術に関するものである。この技術は、ブリルアン散乱の周波数シフトが光ファイバのひずみや温度に比例して変化する現象を応用している。ひずみの発生位置は、測定信号の遅延時間差から測定可能である。ブリルアン増幅を利用したものは BOTDA(Brillouin Optical Time Domain Analysis)、自然ブリルアン散乱を利用したものは BOTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectometry)と呼ばれている。ブリルアン散乱に關する音波の寿命が 10ns 程度であることから、当初、本技術の距離分解能は 1m 程度が限界と考えられた。しかしその後の実験および理論的研究により、測定用光パルスの入射前に音波を十分に励起しておくことにより過渡的なブリルアン増幅係数の減少を防ぎ、cm オーダーの距離分解能の測定も可能であることが明らかとなった。よって本技術は、通信用光ケーブルにとどまらず、橋梁、高層ビル、パイプライン設備などの健全性の監視・保証システムや、油井探査など、幅広い分野への応用が可能である。そのため、日本発の、このブリルアン散乱を応用した光ファイバ型分布測定技術は各国で盛んに研究されている。cm オーダーの距離分解能を実現する方法としては上述の時間軸領域で測定する方法(BOTDA, BOTDR)と FM 変調された光波のブリルアン利得をコヒーレンス領域で測定する方法(BOCDA, BOCDR)に大別される。これまで距離分解能、測定速度の多くのトップデータはコヒーレンス領域測定法で実現されているが、距離分解能と測定距離の間にトレードオフの関係がある。一方、BOTDA は測定距離に優れており、距離分解能特性の向上も進んでいるが、光ファイバの両端から光信号を入射する必要があり、その適用分野が制限される。一方、BOTDR は、光ファイバの片端から測定することが可能であるが、これまでの最良の距離分解能は 20cm 程度に留まっており、より一層の距離分解能の向上が求められていた。

2. 研究の目的

高距離分解能測定を最初に実現した BOTDR は、ダブルパルス BOTDR(DP-BOTDR)である。DP-BOTDR では、2つの短パルスをわずかな間隔 d をあけて光ファイバに入射し、そのブリルアン散乱光をヘテロダイン検波する。そしてその検波信号と d だけ遅延させたものを『加算』し、二乗検波する。遅延加算によって時間的に重なった信号同士は音波の寿命時間以内であれば干渉するので、その干渉スペクトルの特徴からブリルアン周波数シフトを従来の BOTDR よりも高精度に測定可能である。しかし、DP-BOTDR には、測定されるブリルアン散乱光のスペクトルにはリップル成分が含まれ、またわずかながら似非信号も

生じることから、周波数測定精度が劣化するという問題があった。

3. 研究の方法

本研究の柱は、(1)似非信号を含まず“クリーン”であり、かつ、位相シフト情報を検出可能とする、BOTDR 受信信号の処理技術の実現、(2)位相シフト変調符号を、(1)の信号処理を行った BOTDR へ適用する技術の実現、(3)高強度パルス光を使用可能とする BOTDR の実現である。(1)の研究では、BOTDR のヘテロダイン受信信号を遅延積演算処理する方法を提案し、その検証を行う。(2)の研究では、報告者らがこれまで BOTDA 用に開発した位相シフト変調技術と、差分処理技術を BOTDR に適用し、それらの有効性を明らかにする。(3)の研究では、入射光の信号波形およびスペクトルを制御する技術を提案し、高強度で符号長の長い符号化パルス光を BOTDR へ適用可能とする。

4. 研究成果

(1)遅延積演算処理

似非信号を含まず“クリーン”であり、かつ、位相シフト情報を検出可能とするために、遅延積演算処理の有効性を検討した。そのために、まず、図 1 に示すように、位相を変化させたパルス幅 10 ns の光パルス $W_1 \sim W_4$ を長さ 20 m の光ファイバに入射し、その後方ブリルアン散乱光をヘテロダイン検出した。さらにその信号を 5 ns 遅延させたものと、元の信号との積を計算し、それらを 1 万回平均化処理した。その結果を図 2 に示す。光パルス $W_1 \sim W_4$ に対応する後方ブリルアン散乱光の遅延積演算処理結果が $S_1 \sim S_4$ である。位相変化がない入射光パルス W_1, W_2 に対応した積信号 S_1, S_2 は正となる一方、位相をシフトさせた入射光パルス W_3, W_4 に対応した積信号 S_3, S_4 は負となっていることが確認できる。すなわち、遅延積演算処理により、提案どおり、後方ブリルアン散乱光の位相シフト情報を検出可能となることが検証できた。また、光ファイバ以外の区間からの

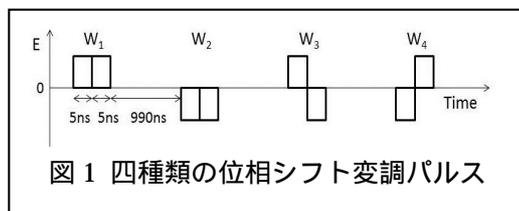


図 1 四種類の位相シフト変調パルス

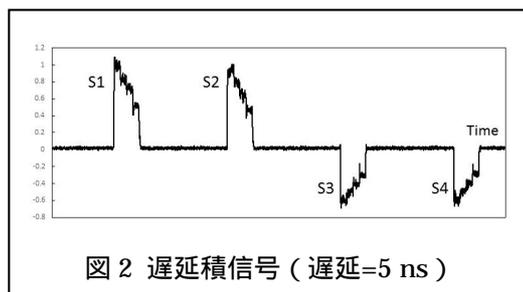


図 2 遅延積信号 (遅延=5 ns)

信号、すなわち、雑音など、無相関の信号の処理結果は零となっていることがわかる。これによって、統計的に独立な、異なる区間からのブリルアン散乱光を、遅延積演算処理によって取り除くこと、すなわち、似非信号を含まず“クリーン”な信号を得る可能性が示された。

(2)FFT によるブリルアン散乱光のスペクトル解析

BOTDR では、ブリルアン散乱スペクトルを測定するために、多数の周波数において後方ブリルアン散乱光の信号波形を測定する必要がある。そのため、高速な光周波数切り替えが自動化されていない場合、測定に長時間を要する。そこで、本研究では、高速フーリエ変換(FFT)を使用した周波数分析を行うこととし、光周波数切り替え過程をなくして研究を進めることにした。しかしながら、FFTを応用したBOTDRの先行研究の報告は少なく、また、周波数測定精度を保ちながら、高距離分解能を可能とするFFTによる信号処理方法についての報告例はこれまでなかった。

距離分解能を高めるために、入射光パルスの幅を短くし、ブリルアン散乱信号のサンプリング時間をそれと同じに設定すると、FFTによって得られたスペクトルの周波数間隔が粗くなり、周波数測定精度が劣化することが分かった。そこで、本研究ではサンプリングしたブリルアン散乱信号に零信号を補填し、合計の時間を 200 ns 程度としたデータをFFT処理する方法を提案した。

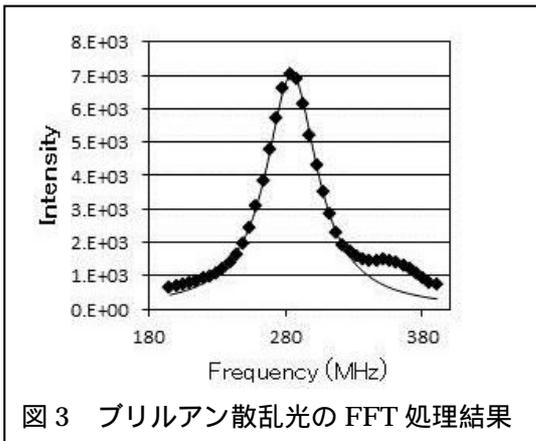


図3 ブリルアン散乱光のFFT処理結果

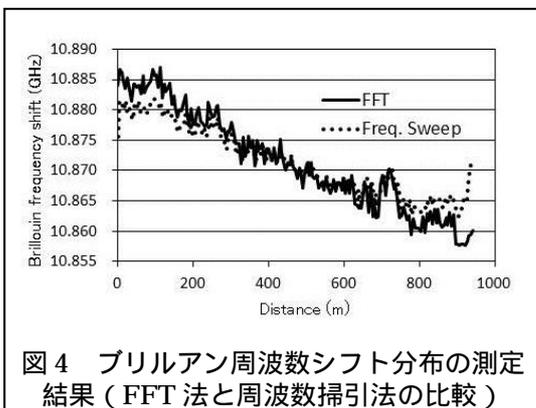


図4 ブリルアン周波数シフト分布の測定結果 (FFT法と周波数掃引法の比較)

ブリルアン散乱光の一部を入射パルス光の時間幅 50 ns で切り出し、提案に従い零補填した 200 ns データをFFT処理した結果を図3に示す。処理結果は、実線で示したローレンツ型のスペクトルとよく一致することが分かる。また、光ファイバの各位置におけるスペクトルの中心周波数からブリルアン周波数分布を求めた結果を図4に実線で示す。合わせて、従来よく使用される周波数掃引法による測定結果も破線で示す。両者はよく一致した。以上の結果、FFTを使用して周波数測定精度を保ちながら高距離分解能測定を実現するための知見が得られた。

(3)PSP-BOTDR

以上の(1)の研究成果を踏まえ、短パルスと長パルスを組み合わせた光パルスプローブを使用する測定方法を提案した。また、以下に示すように、このパルスプローブを位相シフト変調するので、提案法を位相シフトパルスBOTDR(PSP-BOTDR)と呼ぶことにする。さらに、提案した光パルスプローブによって測定したブリルアン散乱光のスペクトルを、FFTによって解析する方法についても提案した。以下にその詳細を説明する。

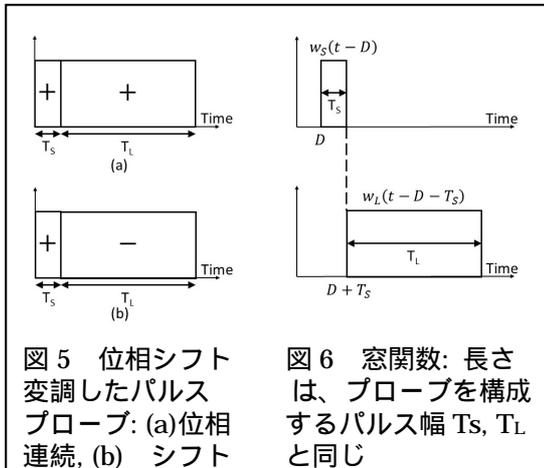


図5 位相シフト変調したパルスプローブ: (a)位相連続, (b) シフト

図6 窓関数: 長さ変調したパルスは、プローブを構成するパルス幅 T_S , T_L と同じ

提案した光パルスプローブの構成を図5に示す。提案法は、2種類の光パルスプローブを使用し、一方は短・長パルス光の位相は連続である(図5(a))。他方は両パルスの位相はシフトさせる(図5(b))。図5では位相連続を+、位相シフトを-で表している。これらの光パルスプローブを使用してヘテロダイン検出した後方ブリルアン散乱光信号を、図6に示した窓関数で切り出す。幅が短い窓関数 w_S と長い窓関数 w_L で切り出した信号を $b_{w_S}(t)$, $b_{w_L}(t)$ とし、上述の(1)の研究結果に基づき、両信号の遅延積 $b_{w_S}(t) b_{w_L}(t + \tau)$ を計算する。さらに、その遅延積を時間 t で積分したもの、すなわち、 $b_{w_S}(t)$, $b_{w_L}(t)$ の相互相関を多数回測定し、その平均を $C_{SL}(\tau)$ とする。このとき、 $C_{SL}(\tau)$ には、短い窓関数 w_S で切り出した、狭い区間からの後方ブリルアン散乱光以外に、長い窓関数 w_L で切り出した、広い区間からの後方ブリルアン散乱光の情

報も含まれる。そこで、本研究では、図5に示した二種類の光パルスプローブを入射して測定した $C_{SL}(\)$ の差分を求めることにする。上述の(1)の研究結果から分かるように、遅延積には位相の情報が記録されているので、 $C_{SL}(\)$ の差分には、広い区間からの後方ブリルアン散乱光の信号は打ち消されて含まれず、狭い区間からの後方ブリルアン散乱光の信号のみが2倍となって残る。すなわち短いパルスの時間幅 T_s (=狭い窓関数の時間幅) で決まる、高い距離分解能での測定が可能となる。

このようにして得た $C_{SL}(\)$ のフーリエ変換は、 $b_{WS}(t)$ と $b_{WL}(t)$ の一方のフーリエ変換と他方のその複素共役との積となるので、 $C_{SL}(\)$ のスペクトルは、ブリルアン周波数シフトを中心周波数とした狭い幅を有するものとなり、また、DP-BOTDR のときに観測されるリップルを含むこともない。その結果、ブリルアン周波数シフトの高精度な測定が可能となる。

原理検証実験では、光パルスプローブのパルス幅を、 $T_s=2$ ns, $T_L=32$ ns とした。また試験光ファイバには、長さ約 300 m の標準型の単一モード光ファイバ SMF1 の遠端付近に、ブリルアン周波数シフトが約 50 MHz 異なる光ファイバ SMF2 を接続したものを使用した。ブリルアン周波数シフト分布の測定結果を図7に示す。ブリルアン周波数シフトの変化が、 $T_s=2$ ns に対応した距離分解能 20 cm で測定されていることが分かる。

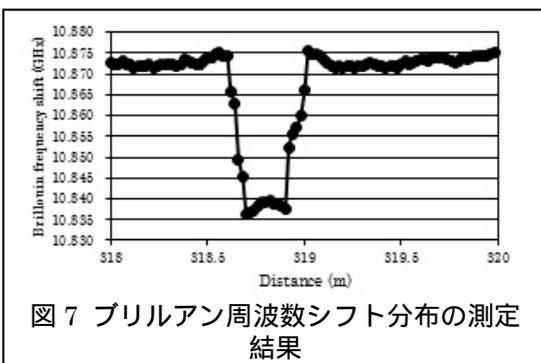


図7 ブリルアン周波数シフト分布の測定結果

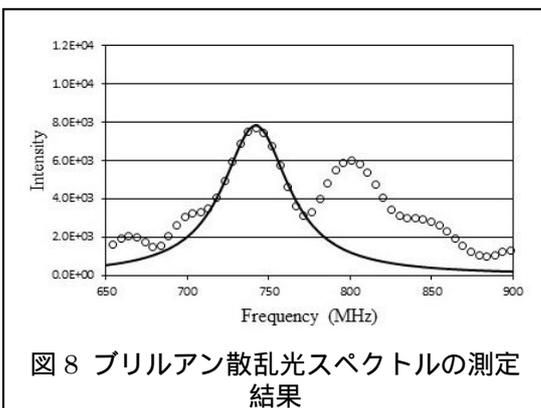


図8 ブリルアン散乱光スペクトルの測定結果

図8は、SMF2部分の信号を処理して得たスペクトルを示す。予想通り、連続光を入射した

ときに観測されるローレンツ型(実線)に近いスペクトルが、周波数約 740 MHz に大きく観測されていることが分かる。しかし、その SMF2 に対応したスペクトルの高周波数側に、SMF1 のスペクトルが漏洩して測定された。これは、光パルスプローブの発生に使用した外部光変調器の消光比が不十分であったことが主な原因であり、現在は、その問題の解決の見通しは得られている。

以上の(1)~(3)の研究から、後方ブリルアン散乱光に対して、本研究で提案した遅延積演算処理を行い、高距離分解能かつ高周波数測定精度でブリルアン周波数分布を測定可能となることを明らかにすることができた。

(4)今後の予定

当初計画したが、未達成となった、位相変調符号を適用した BOTDR、および、入射光の信号波形およびスペクトルを制御する技術の研究を、上述の研究結果(1)~(3)を反映させて進める予定である。上述(3)の研究結果から分かるように、本研究で提案した BOTDR で使用する光パルスプローブは、結果として、これまで報告者が別に研究してきた誘導ブリルアン散乱を応用した PSP-BOTDA と類似の構成となっている。一方、今回提案した PSP-BOTDR で利用する物理的メカニズムは PSP-BOTDA とは異なるため、信号処理方法は両者で大きく異なっている。相違点に注意を払いながら、共通点にも着目しつつ、今後、研究を進める予定である。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

Tsunao Horiguchi, "Coding techniques for distributed fiber sensors based on Brillouin scattering", 6th International Conference on Photonics (ICP2016), Mar. 14, 2016, Sarawak, Malaysia (invited paper)

Ryutaro Shibata, Hirofumi Kasahara and Tsunao Horiguchi, "Proposal and demonstration of high spatial resolution BOTDR by correlating signals sampled with narrow- and wide-width window functions", 6th International Conference on Photonics (ICP2016), Mar. 15, 2016, Sarawak, Malaysia

笠原寛史, 柴田龍太郎, 堀口常雄, 「相互相関に基づく高距離分解能 BOTDR」, 信学会総合大会, B-13-11, 2016年3月15日, 福岡市, 九州大学伊都キャンパス

柴田龍太郎，笠原寛史，堀口常雄，「高距離分解能 FFT-BOTDR の検討」，第 56 回 光波センシング技術研究会講演論文集，VOL.56，pp.133-139，2015 年 12 月 9 日，東京都，東京理科大学森戸記念館

笠原寛史，柴田龍太郎，堀口常雄，「FFT を応用した BOTDR の周波数測定精度の検討」，第 54 回 光波センシング技術研究会講演論文集，VOL.54，pp.185-190，2014 年 12 月 10 日，東京都，東京理科大学森戸記念館

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

research profile

<https://shibaura.pure.elsevier.com/en/persons/tsuneo-horiguchi>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀口 常雄 (HORIGUCHI TSUNEO)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：7 0 3 4 8 9 0 2