

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 1日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560427

研究課題名（和文） 構造化光符号およびスペクトル制御技術を使用したブリルアンセンサ

研究課題名（英文） Brillouin Sensor Based on Structured Optical Code and Spectrum Control Technique

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

研究成果の概要（和文）：

光ファイバ中の誘導ブリルアン散乱信号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BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) と呼ぶ。本研究は、BOTDA のパルスポンプ光に適用する符号の構造に工夫を凝らすとともに、ポンプ・プローブ光の周波数を制御することにより、BOTDA の距離分解能の向上や測定時間の短縮が図れることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

BOTDA is an optical fiber sensor for measuring distributed temperature and strain by utilizing the dependence of stimulated Brillouin scattering frequency shift on them. In order to improve SNR and achieve faster measurement for BOTDA, this study has proposed two techniques: structured coding and spectrum control. It has been clarified theoretically and experimentally that both techniques are effective to improve the BOTDA performance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

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：計測工学、スマート情報センサシステム、リモートセンシング、応用光学、光ファイバセンサ、分布型センサ、ひずみセンサ、ブリルアン増幅

1. 研究開始当初の背景

(1) ブリルアン散乱を応用したひずみセンサ

本研究は、光ファイバをセンサとして、構造物のひずみ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に比例して変化する現象に着目し、研究代表者が最初に提案および実現したものである。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。本技術は通常の OTDR と同様に、測定信号の遅延時間差から、ひずみの発生位置も測定可能である。ブリルアン散乱に関与する音波の寿命が 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。構造物のひずみの分布測定技術の実用化には、距離分解能の向上とともに測定時間の短縮、測定距離の延伸が必要である。これまで距離分解能、測定時間の多くのトップデータは BOCDA で実現されている。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。しかしながら、建築物や移動体などのひずみの分布測定には、おおよそ、距離分解能 1cm、測定距離 1km、全点測定時間 0.1 秒以下という極めて高い性能が求められ、これまでどの技術もこの要求を満足していなかった。

(2) 研究代表者の研究開始当初の研究成果

研究代表者はこれまで BOTDA 方式を中心に研究を進めてきた。従来の BOTDA は、光ファイバの一端から孤立したパルス状のポンプ光を、また、他端から連続プローブ光を入射し、ポンプ光によりブリルアン増幅されたプローブ光を時間分解測定する。1 回のパルスポンプ光入射による測定だけでは SN 比が不足するため、繰り返しパルスポンプ光を入射し平均化処理を行う。この測定を、ポンプ光とプローブ光の周波数差を変化させて行うことにより、光ファイバ上の任意の点のブリルアン利得スペクトルの測定が可能となる。したがって、測定に要する総合時間は、(パルス繰り返し周期) x (平均化回数) x (周波数ポイント数) となる。研究代表者はこの測定時間を短縮するために、パルスポンプ光に Golay 相関符号を適用することを試み、測定時間を符号長に反比例して減少させることに成功している。

符号化方法は、パルス幅と音波の寿命 10ns の関係により異なる。研究代表者は、はじめに、パルス幅 > 10ns のとき、符号化パルス列をポンプ光とすることにより、SN 比が符号長に比例して増加し、単一パルス光と比較して格段に性能が向上することを実証した。

次に、パルス幅 < 10ns のときの新しい符号化方法を提案した。パルス幅 < 10ns のとき、

測定用パルスだけでは十分音波を成長させることができず、実効的なブリルアン利得係数が低下してしまう。そこで測定用パルスに先立ち、パルス幅 30ns 程度の音波生成用パルスも入射させる方法を採用した。そのとき、音波生成用パルスと測定用パルスによる応答を区別し、後者のみを取り出すため差分法を使う。しかし、それでは効率が悪いので、音波生成用パルスに対する測定用パルスの光位相を 0 ないし π だけシフトさせた二通りの測定を行い、その差信号を解析する方法(PSP-BOTDA)も提案した。研究代表者は、この位相シフトパルス法をさらに発展させ、符号に従って位相シフト変調したパルスをポンプ光に使用する 2 種類の方法(図 1(a), (b))を提案し、実験により BOTDA の距離分解能特性の向上を検証した。図 1(a)の方法は、音波生成用パルス一つと、符号 1 ビットを表す位相シフトパルス一つの組み合わせを、符号長の数だけ縦続させてポンプ光を構成する方法である。この方法は、制限なく長い符号を構成可能だが、符号 1 ビットあたり常に 30ns 程度のパルスを付加するため、符号化における時間効率が悪い。図 1(b)の方法は、音波生成用パルスの直後に符号ビット列に対応した位相シフトパルス列を付加し、ポンプ光を構成する方法である。この方法は、符号化における時間効率が優れる反面、位相シフトパルス列の時間幅は音波の寿命(10ns 程度)以下に制限される。

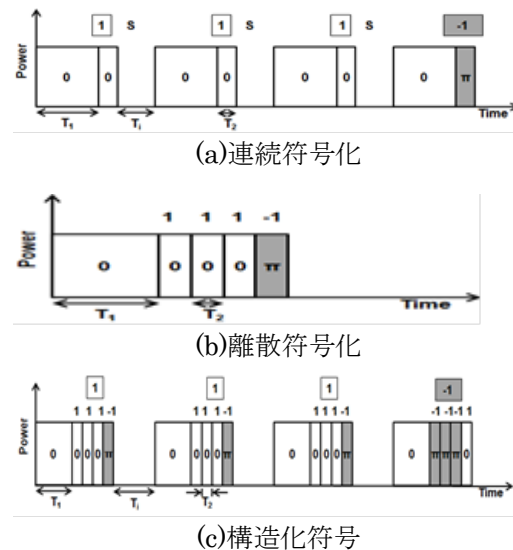


図 1 PSP-BOTDA における、既開発の符号化方法(a), (b)と、本研究の符号化方法(c)

2. 研究の目的

本研究では、(1)この 2 種類の符号化方法を組み合わせる技術の研究し、効率的に符号化する方法を実現する。2 種類の符号を入れ子構造とした符号パルス列案を図 1(c)に示す。従来符号に比べ、本提案の符号は、同一測定

時間に、ブリルアン増幅信号観測のための数多くの符号 bit を利用可能とし、高距離分解能 BOTDA の測定に有効であることを実証する。

一方、音波生成用パルスを使用する方法では、BOTDA の性能が、誘導ラマン散乱現象などの他の非線形現象により制限される前に、音波生成用パルスによる誘導ブリルアン散乱に基づくポンプ減衰(pump depletion)が生じ、入射可能最大光パワーが制限されることが予想される。そこで本研究では、(2)パルス光のスペクトル制御技術も研究開発し、入射可能最大光パワーを増加可能とする方法を実現する。以上の(1)(2)の研究により BOTDA の極限性能を追求する。

3. 研究の方法

(1) 構造化光符号

図 1(c)に示した方法で2つの符号を入れ子構造にした、構造化光符号を研究した。2つの符号には、同種のものや、異種のものとの組合せが考えられるが、本研究では、研究代表者が、一重構造の符号(図 1(a)(b))の研究において採用した実績のある、相補相関符号

(Golay 符号) を使用することにした。そして、2つの相補相関符号の長さを変えて組合せ、SN 比の改善率 SNIR (Signal-to-Noise-Improvement -Ratio)のそれぞれの符号の長さ依存性を検討した。研究は、数値計算によるシミュレーションを行い、その結果を実験によって検証することにより進めた。

(2) スペクトル制御技術

BOTDA の場合、入射する光信号のパワーを制限する要因として、誘導ラマン散乱以外に、測定対象である誘導ブリルアン散乱もある。そこで、この両者の影響を軽減する方法として、BOTDA のポンプ光とプローブ光の周波数を複数次とした、多周波数 BOTDA を実験的に検討した。一つの半導体レーザ出力から、多数の線スペクトルを得るために、電気光学効果型光変調器を使用した多数周波数発生技術を応用することにした。

4. 研究成果

(1) 構造化光符号

①符号化・復号化

図 1(c)に示した構造をもつ構造化符号パルスをポンプ光とした PSP-BOTDA を研究した。符号要素+1, -1 に対応し、音波生成用パルスに対して、測定用パルスのポンプ光の位相を、それぞれ 0, π だけシフトさせる変調を行い、符号化光パルスを発生させた。このとき、プローブ連続光のパワーは、符号要素+1, -1 のパルスポンプ光により増加および減少する。そこで、このプローブ連続光のパワー変化を検出し、相補相関符号の復号処理である相関処理を、組み合わせた2つの符号に対応して

二段階にわたって行うことにより、構造化光符号の復号が完了する。相補相関符号は線形符号であるので、2つの符号の復号の順番を変えても復号結果に影響はない。これを、実際に誘導ブリルアン散乱も含めたシミュレーションを行うことによって確認した。

②SNIR の符号長依存性

シミュレーションに使用した光ファイバの構成を図 2 に示す。ここでは、10m の間隔で存在する、0.3m, 1m, 3m, 10m の長さの 4 つの区間においてひずみが生じていることを模擬している。

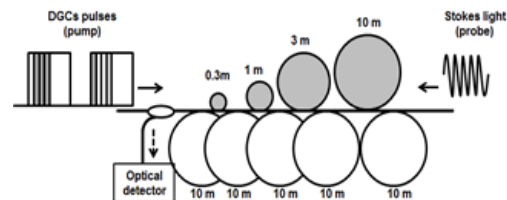


図 2 光ファイバのモデル

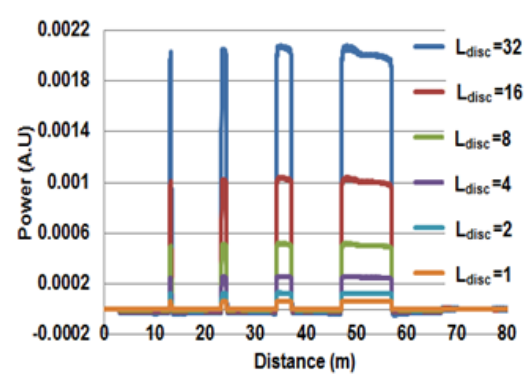


図 3 ブリルアン信号波形 (計算)

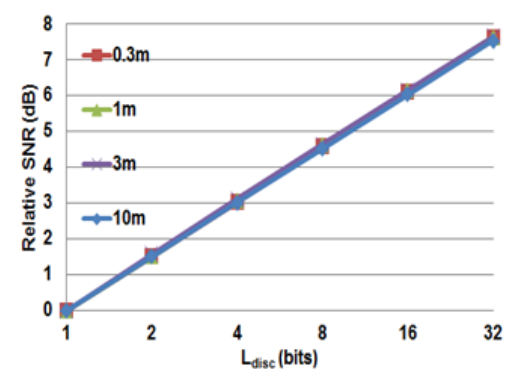


図 4 相対 SNR の L_{disc} 依存性 ($L_{cont}=4$)

図 3 は、このひずみ発生区間でブリルアン増幅が生じるように、ポンプ光とプローブ光の周波数差を設定して計算したブリルアン信号の波形を示している。図 1(a)の符号 (連続符号) の長さは、 $L_{cont}=4$ 一定とし、図 1(b)の符号 (離散符号) の長さは、 $L_{disc}=1, 2, 4, 8, 16, 32$ bit としている。図 3 より、ブリルアン信号は、 L_{disc} に比例して増加していることがわかる。白色雑音を仮定して、この

ときの相対 SNR を計算した結果が図 4 である。これより構造化符号の場合も、離散符号部分による SNIR は、 $SNIR=(L_{disc})^{1/2}$ であることが明らかとなった。

一方、図 5 は、 $L_{disc}=4$ 一定とし、図 1(b) の連続符号の長さは、 $L_{cont}=1, 2, 4, 8, 16, 32$ bit として計算した相対 SNR の L_{cont} 依存性を示している。このとき 0.3m 区間の相対 SNR は、 $L_{cont}=8$ bit のとき最大となり、それ以上、 L_{cont} を増やすと、相対 SNR は減少した。また、その他の区間では、 $L_{cont}=16$ bit で最大となるが、それ以上 L_{cont} を長くすると、相対 SNR は減少した。これは、音波励起用パルスによって生じた音波の減衰が原因である。その時定数 (約 10ns) よりも総合の符号化パルス時間が長くなると、符号化パルス列の後方部分は、プローブ光を有効にブリルアン増幅できなくなるからである。そこで、この場合は、音波の減衰による効果も考慮したパラメータ η を導入し、 $SNIR=\eta (L_{cont})^{1/2}$ と表すことが適切であることが分かった。

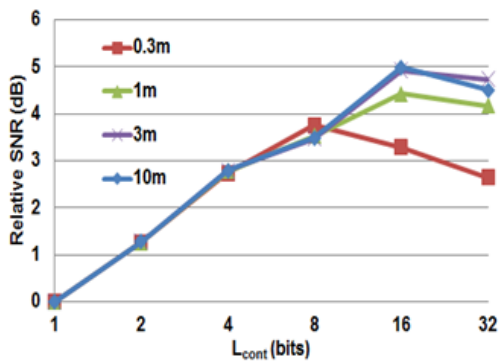


図 5 相対 SNR の L_{cont} 依存性 ($L_{disc}=4$)

以上の結果から、PSP-BOTDA における構造化光符号による SNIR は、 $\eta (L_{cont} \cdot L_{disc})^{1/2}$ で与えられ、 η は連続符号化パルスの総合時間がおおよそ音波の時定数とほぼ等しいとき最大値 0.7 をとることを明らかにした。

③ブリルアン周波数シフト分布の測定

図 2 と同様の構成の光ファイバを準備し、 $L_{disc}=8$ 、 $L_{cont}=8$ の構造化光符号を使用して、ブリルアン周波数シフト分布を測定した。その結果を図 6 に示す。

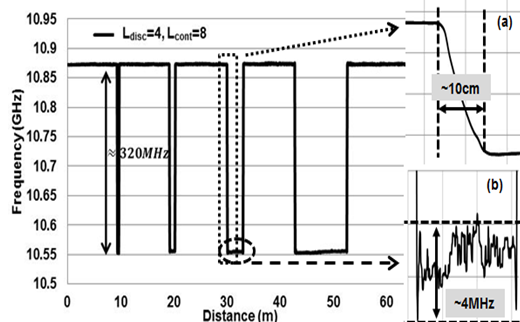


図 6 ブリルアン周波数シフト分布測定結果

ブリルアン周波数シフトの測定精度は、0.67MHz (標準偏差) であり、良好であった。また、挿入図に示すように、理論通りの 10cm 距離分解能が実現された。

以上の結果、本研究で提案した構造化光符号は、高距離分解能 BOTDA における SNIR の向上に有効であることが明らかとなった。

(2)スペクトル制御技術

本研究で提案した多周波数 BOTDA の構成とそこで使用するパルスポンプ光および CW プロブ光の周波数配置を図 7 に示す。周波数がおおよそブリルアン周波数シフトだけ離れた光波のペアを N 組使用する。N 組の光波ペアがそれぞれ独立にブリルアン増幅信号を発生させるので、1 組だけ使用する従来の方法に比べ、プローブ光の 1 波あたりのパワーを、1/N 倍に低くしても、従来と同じ大きさのブリルアン信号を得ることが可能となる。そのため、ポンプ光減衰を抑制でき、結果として測定レンジの拡大が可能となる。

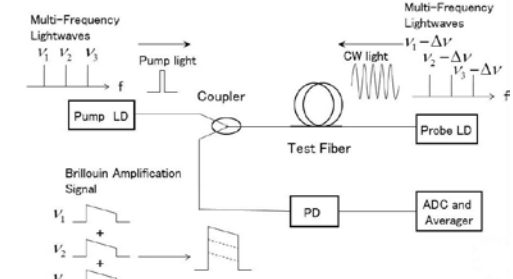


図 7 多周波数 BOTDA の構成と周波数配置

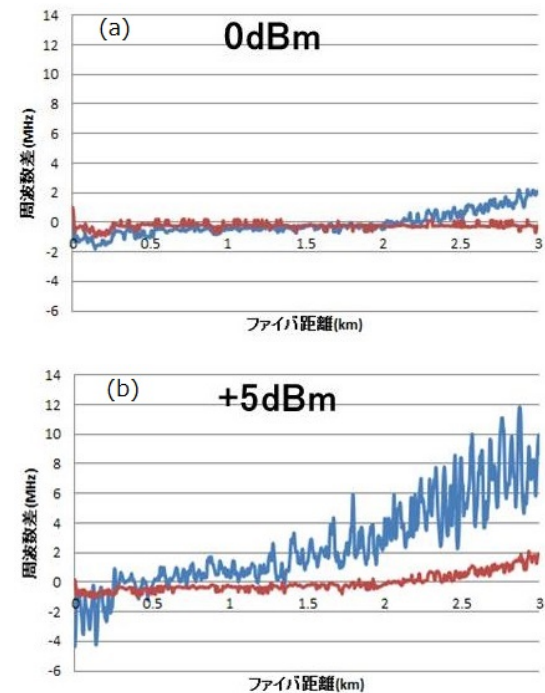


図 8 BFS 分布の測定結果。P_{cw}=-5dBm の場合の測定値を基準。青線: 従来 BOTDA, 赤線: 多周波数 BOTDA. (a) P_{cw}=0dBm, (b) P_{cw}=5dBm.

図 8 は、ポンプ光とプローブ光のペアを 3 組使用した BOTDA を構築し、ブリルアン周波数シフト(BFS)の測定精度を従来 BOTDA と比較、検証した結果を示している。図 8(a)は、プローブ光パワー $P_{cw}=-5\text{dBm}$ として測定した BFS を基準とし、プローブ光パワーを $P_{cw}=0\text{dBm}$ まで増加させて測定した BFS の相対値の分布である。 P_{cw} の増加により、SN 比は向上したが、従来法(青線)では光ファイバの後方部分で、BFS の測定誤差が発生し始めている。一方、提案法(赤線)では誤差はない。

図 8(b)はさらにプローブ光パワーを上げ、 $P_{cw}=5\text{dBm}$ とした場合の測定結果を示す。従来法では、非常に大きな誤差が発生したが、提案法での誤差は低く抑えられていることが確認できた。さらに図 8(a)の青線と、図 8(b)の赤線の比較から、ポンプ減衰による BFS の測定誤差は、 $P_{cw}=0\text{dBm}$ のときの従来 BOTDA と、 $P_{cw}=5\text{dBm}$ のときの多周波数 BOTDA はほぼ等しいことがわかる。すなわち、理論通り、ポンプ減衰の影響を一定に抑えながら、プローブ光パワーを 3 倍(3 は周波数の本数)に増加させ、精度の高い BFS 測定を実現したことがわかる。よってこのようにスペクトルを制御し、多周波数とすることは、BOTDA の性能向上に有効であることが明らかになった。

(3) 今後の研究

本研究期間では、構造化光符号については、相補相関符号を使用して、その有効性を明らかにした。本研究期間の最終年度である 2012 年度には、Walsh 符号の PSP-BOTDA への応用に関する研究にも着手し、これまで、相補相関符号に比較し、Walsh 符号は距離分解能特性に優れていることを見出している。今後は、Walsh 符号を使った構造化符号、相補相関符号と Walsh 符号を組み合わせた構造化符号など、種々の符号の組合せなども研究対象とし、さらに符号化 PSP-BOTDA の性能の向上を図っていく予定である。

また、上の(2)項で説明したように、本研究期間において研究したスペクトル制御技術によって、プローブ光のパワーを抑えた BFS 分布の測定に成功した。しかし、パルスポンプ光のピークパワーは、周波数のペアの数に比例して増大しており、非線形効果の抑圧の完全な解決にまだ至っていない。この課題は、周波数の違いを利用した WDM 技術の応用によって、パルスポンプ光は周波数ごとに時間シフトさせ、かつ、受信プローブ光信号は周波数ごとに逆時間シフトさせる方法が有効である。このときは、パルスポンプ光のピークパワーは増大しないので、今回よりもさらに性能を向上させることが期待できる。これについてもすでに良好な実験結果を得ている。

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 2 件)

①M. S. D. B. Zan and T. Horiguchi, "A dual Golay complementary pair of sequences for improving the performance of Phase-Shift Pulse BOTDA fiber sensor", J. Lightwave Technol., Vol. 30, pp. 3338-3356, Nov. 2012, 査読有

②佐々木崇, 堀口常雄, モハマド サイフルズルケフリ ザン, 内山大輔, 「離散符号化 PSP-BOTDA の特性の符号パルス間隔依存性」, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J.94-B, pp. 1481-1489, 2011 年 11 月, 査読有

[学会発表] (計 19 件)

①M. S. D. B. Zan and T. Horiguchi, "Comparing the Analysis of Employing Walsh Codes and Golay Codes in the Coded Continuous-PSP-BOTDA", 信学会総合大会, B13-20, 2013 年 3 月 21 日, 岐阜市, 岐阜大学

②堀口常雄, 「ブリルアン散乱を応用した分布型光ファイバーセンシング」, 第 50 回 光波センシング技術研究会(招待講演), Vol. 50, pp. 123-130, 2012 年 12 月 5 日, 東京, 東京理科大学森戸記念館

③ S. Takigawa and T. Horiguchi, "Reflection properties of Brillouin dynamic gratings in coiled single-mode fibers", 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, in Proc. of SPIE Vol. 8421, 84219J_1-J_4, Oct. 18, 2012, Beijing, China, China hall of science & technology

④M. S. D. B. Zan, T. Tsumuraya and T. Horiguchi, "The use of Walsh functions in modulating pump light of high-spatial-resolution BOTDA with NRZ pulses", 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, in Proc. of SPIE Vol. 8421, 84219U_1-U_4, Oct. 18, 2012, Beijing, China, China hall of science & technology

⑤M. S. D. B. Zan and T. Horiguchi, "A new electrical signal configuration for modulating pump light of coded discrete-phase shift pulse-BOTDA", 3rd International Conference on Photonics, L-D2-PM1, Oct. 1-3, 2012, Penang, Malaysia

⑥M. S. D. B. Zan and T. Horiguchi, "The effects of AC-coupled electrical amplifier in amplifying Golay formatted electrical signal for producing pump light

of coded discrete PSP-BOTDA fiber sensor” , 信学会ソサイエティ大会, B13-13, 2012年9月12日, 富山市, 富山大学

⑦小菅 航, 堀口常雄, 「BOTDAの多周波数光化によるポンプディプレッションの低減」, 信学会ソサイエティ大会, B13-12, 2012年9月12日, 富山市, 富山大学

⑧滝川真矢, 堀口常雄, 「曲げ光ファイバにおけるブリルアン回折格子の反射特性の測定」, 信学会総合大会, B13-16, 2012年3月20日, 岡山市, 岡山大学

⑨M. S. D. B. Zan, T. Tsumuraya and T. Horiguchi, ” The Employment of Walsh Functions in the Coded PSP-BOTDA” , 信学会総合大会, B13-11, 2012年3月23日, 岡山, 岡山大学

⑩滝川真矢, 堀口常雄, 「コイル状にした単一モードファイバのBDG特性」, Optics & Photonics Japan 2011, 30pB2, 2011年11月30日, 大阪, 大阪大学

⑪M. S. D. B. Zan, T. Kurashima and T. Horiguchi, ” Code time dependence of the signal to noise ratio in the continuously coded PSP-BOTDA system” , Optics & Photonics Japan 2011, 30pB6, 2011年11月30日, 大阪, 大阪大学

⑫佐々木崇, 堀口常雄, 内山大輔, 「連続符号化 PSP-BOTDA の符号化方法の検討」, 信学会総合大会, B13-28, 2011年3月16日, 東日本大震災のためDVD発表に変更

⑬滝川真矢, 堀口常雄, 「PSK-BOTDAの検討」, 信学会総合大会, B10-21, 2011年2月28日, 東日本大震災のためDVD発表に変更

⑭小菅 航, 堀口常雄, 「多周波数光を用いたブリルアンファイバセンサ」, 信学会総合大会, B10-20, 2011年3月15日, 東日本大震災のためDVD発表に変更

⑮吉田雄一, 滝川真矢, 堀口常雄, 「光ファイバの曲がり位置の測定方法に関する検討」, 信学会総合大会, B13-19, 2011年3月15日, 東日本大震災のためDVD発表に変更

⑯M. S. D. B. Zan, T. Horiguchi, and T. Sasaki, “Simulation and experimental analysis of the dual Golay PSP-BOTDA system” , Optics & Photonics Japan 2010, 9PD2, 2010年11月9日, 東京, 中央大学駿河台記念館

⑰M. S. D. B. Zan and T. Horiguchi, ” New Correlation Technique of Golay Code for the Employment in PhaseShift Pulse Brillouin Optical Time Domain Analysis (PSP-BOTDA) Sensing Systems” , 信学会ソサイエティ大会, B13-38, 2010年9月16日, 大阪, 大阪府立大学

⑱佐々木崇, 堀口常雄, 「離散符号化 PSP-BOTDA によるブリルアン周波数シフトの評価の検討」, 信学会ソサイエティ大会,

B13-37, 2010年9月16日, 大阪, 大阪府立大学

⑲M. S. D. B. Zan and T. Horiguchi, ” Phase shift pulse Brillouin optical time domain analysis (PSP-BOTDA) employing dual Golay codes” , IEEE International Conference on Computer & Communication Engineering 2010, 3B, 217, pp. 1-6, May 13, 2010, Kuala Lumpur, International Islamic University

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称: 光符号変調パルスの相関処理方式

発明者: 倉嶋利雄, 堀口常雄, 内山大輔, 佐々木崇, モハマド サイフル ズルケフリ ビン ザン

権利者: 日本電信電話株式会社, 学校法人芝浦工業大学

種類: 特許

番号: 特願 2011-12003

出願年月日: 2011年1月24日

国内外の別: 国内

〔その他〕

研究業績

<http://resea.shibaura-it.ac.jp/>

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: 70348902