

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19560428
 研究課題名（和文） ネガティブブリルアン利得の発生技術とそれを応用したBOTDAの高性能化
 研究課題名（英文） A Technique to Produce Negative Brillouin Gain and Its Application to Improve BOTDA Performance
 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）：

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ことを利用して、ひずみの分布を測定する BOTDA の高性能化技術を検討した。はじめにポンプ光の構成を工夫することにより、正のみならず負のブリルアン利得も発生させることに成功した。次にそれを応用して、Golay 符号でポンプ光を位相変調する方式を検討した。符号位相変調するための2種類の方法を提案し、どちらも受信信号の SN 比の向上に有効であることを実証した。

研究成果の概要（英文）：

A technique is investigated to improve the performance of BOTDA which measures distributed strain along an optical fiber based on strain dependence of Brillouin frequency shift. First pump light is generated to produce negative Brillouin gain for the first time. Second pump light is phase-modulated with Golay code to utilize the negative gain as well as conventional positive one. Two methods are proposed for the modulation. It is clarified that both methods can improve signal to noise ratio for BOTDA.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	400,000	120,000	520,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

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

ブリルアン散乱を応用したひずみ分布測定方法は、1988年ごろに発明され、BOTDA、または、BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) と呼ばれている。

BOTDA はブリルアン光増幅を利用するのに対し、BOTDR は後方自然ブリルアン散乱を利用している。しかし、BOTDR も BOTDA と同様に、ブリルアンスペクトルの中心周波数であるブリルアン周波数シフトのひずみ依存性を

利用していることに変わりはない。その後の研究進展により、BOTDR は光ファイバケーブルのひずみの評価や、通信用トンネルの監視に実用化されている。また、BOTDR は数社の測定器メーカーから市販されるようになり、それを応用した様々なセンシングシステムも検討されている。

BOTDR の距離分解能を高めるためには、入射するパルス光の幅を狭める必要がある。しかしながら、パルス幅が、ブリルアン散乱に関与する超音波の減衰時間よりも短くなると、ブリルアン散乱のスペクトル幅は、超音波の減衰時間にかわって、パルス光のフーリエ変換で決まる帯域で決定されるようになる。その結果、ブリルアンスペクトル幅はパルス幅の減少とともに増加し、一定の帯域で受信される BOTDR 信号パワーは減少する。さらにブリルアンスペクトルの中心周波数であるブリルアン周波数シフトの測定精度も劣化する。そのため、BOTDR の距離分解能は、1m 程度に留まっていた。

この限界を超えるために、2つの方法が提案、実現されていた。それらは、どちらも BOTDA と同様にブリルアン増幅を利用し、BOCDA (Brillouin Optical Correlation Domain Analysis)、および、PPP-BOTDA (Pulse Pre-Pump BOTDA) と呼ばれている。

BOCDA は、光周波数変調によりコヒーレンスを制御した連続光とそれを周波数シフトした連続光を光ファイバ中で対向して伝搬させ、両光の相関特性を利用して、光ファイバの長さ方向の任意の位置に、ブリルアン増幅効果を局在させる。ポンプ、プローブともに連続光を使用しているため、ブリルアン増幅のための相互作用は超音波の減衰時間以上にわたって継続する。そのため、ブリルアンスペクトルが BOTDR の場合のように広がることはない。その結果、BOCDA の距離分解能として、2mm の達成が実験室内記録ではあるが報告されている。しかし、BOCDA は周波数変調光の周期的な、あるいは、単峰的なコヒーレンス特性を利用するため、分布測定の実現に必要な被測定光ファイバ長に関する制約は非常に厳しい。また、センサ用ファイバ以外に、ブリルアン増幅効果を所望の箇所に局在させるために、別に新たな長さ調節用光ファイバを必要とするなど、BOCDA は実環境での操作性に問題を残していた。

一方、PPP-BOTDA は、BOTDA のパルス-ポンプ光に改良を加えたものであり、測定用パルスの直前に、パルス-プリポンプ光を入射する。このプリポンプ光と対向する連続-プローブ光により超音波を発生させる。着目する箇所をプリポンプ光が通過した後も、超音波は約 30ns の時間 (石英ガラスファイバ中の超音波の減衰時間)、継続する。そのため、残存する超音波と、続けて到来した測定用パ

ルス光によって、連続-プローブ光はブリルアン増幅される。プリポンプ光のパルス幅を超音波の減衰時間以上にすることにより、たとえ測定用パルス光の幅を非常に狭くした場合でも、測定されるブリルアンスペクトル幅は、超音波の減衰時間で決定される自然ブリルアン線幅程度に収まる。しかし、プリポンプ光自身によっても増幅信号が発生してしまうので、それと、測定用パルス光による増幅信号を区別する必要がある。そのため、プリポンプ光のパワーは、測定用パルス光のパワーの 1/1000 以下に抑える必要が生じるが、下げすぎるとその効果が薄れてしまう。以上のトレードオフの関係から、プリポンプ光の効果により得られるブリルアン増幅信号パワーは、測定用パルス光だけで得られる場合の値と同程度となり、信号パワーの面では、大幅な改善は得られない。以上説明したように、PPP-BOTDA の測定に使用するパルス光のパワーに関する条件は厳しく、その距離分解能は、10cm 程度にとどまっていた。

2. 研究の目的

本研究はこれらの課題を、新しい原理に基づく測定方法により解決することを目指した。そして、光ファイバ型ひずみ分布測定における距離分解能を 1mm 程度まで高め、かつ、操作性に優れた測定装置の構成技術を確認することを研究の目的とした。本研究で取り上げた新しい技術は、以下の通りであった。

- (1) ネガティブブリルアン増幅技術
- (2) ブリルアン応用測定において、Golay 符号を高効率に活用する技術
- (3) 光回路を使用した、ブリルアン応用測定信号の符号化・復号化技術

ネガティブブリルアン増幅とは、ポンプ光によりプローブ光を減衰させる技術であり、本研究において初めてその実現を提案するものである。通常のポジティブブリルアン増幅と、提案するネガティブ増幅を組み合わせることにより、PPP-BOTDA のようにプリポンプ光のパワーを抑えることなく、そのパワーを最大限利用することにより、高距離分解能測定を可能とする。

Golay 符号は、二組の相関信号から構成され、それぞれの自己相関の和は、サイドローブが完全にゼロとなるため、分布計測に非常に適した符号である。しかし、従来の研究では、二値 {0, 1} で符号化した信号を光強度変調で発生させているため、両極性符号 {1, -1} としての Golay 符号の特長を十分に生かすことができていなかった。本研究では、上記 (1) で実現するネガティブブリルアン増幅技術を従来の増幅技術と合わせて活用し、両極性の Golay 符号化を実現することを目的とする。その結果、従来の二値 {0, 1} で符号化した場合と比較して、測定時間が 1/4 に短縮される

ことが期待できる。

以上の新技術を使用することにより、高距離分解能を達成しつつ、従来技術に比較して、操作性に優れ、高速な、ひずみ分布測定が可能となる。しかしながら、10Gb/sの光変調を使った符号化によって実現できる距離分解能は、約1cmである。そこで、本研究では、1mm距離分解能を目指し、光回路を使用した符号化・復号化技術を研究することを考えた。そして、上述のネガティブブリルアン増幅と従来のポジティブブリルアン増幅を複合したGolay符号化が可能な光回路と、その光・電気信号処理技術の実現を目指した。

本研究によって実現される測定法を使って、原子力発電施設、ダム、橋梁、高層ビルなどの大型構造物のひずみ分布を測定することにより、その亀裂の発生と位置を検出するヘルスマonitoringが可能となる。その結果、安心・安全な社会の構築に貢献できる。

3. 研究の方法

ネガティブブリルアン増幅を実現するために、パルス-プリポンプ光と測定用パルス-ポンプ光の位相を π だけシフトさせる方法を検討した。パルス-プリポンプ光と連続-プローブ光により励起された超音波によって、測定用パルス-ポンプ光は後方に散乱されるが、位相が π シフトした散乱光は、連続-プローブ光と極性が反転して重なる。その結果、ネガティブブリルアン増幅（すなわち連続光パワーの減衰）が実現されると考えた。一方、パルス-プリポンプ光のみによる増幅、および、測定用パルス光のみによる増幅は、測定用パルス-ポンプ光の位相に関係なく、従来通り、ポジティブブリルアン増幅のままである。したがって、測定用パルス-ポンプ光の位相を0および π シフトして測定し、それぞれの結果の差をとることにより、パルス-プリポンプ光と測定用パルス-ポンプ光の相乗効果によるブリルアン増幅信号のみを抽出して測定することが可能となると予想した。この予想を、理論解析、計算機シミュレーションと実験で検証することとした。

Golay符号化光信号の発生には、上記ネガティブブリルアン増幅技術を応用することを試みることにした。すなわち、ポジティブブリルアン増幅を+1に、ネガティブブリルアン増幅を-1に対応させて、Golay符号化光信号を発生させる。これにより、Golay符号の特長を十分に引き出し、非常に効率の良い測定を実現する。パルス-ポンプ光の位相シフト変調方法も検討した。

光信号のGolay符号化および復号化に最適な、光回路の実現には、まず、短パルス光の発生技術を確立することが重要と考え、その特性を実験により検証することを考えた。

4. 研究成果

(1) ネガティブブリルアン増幅

本研究で基本的かつ最も重要な課題である、ネガティブブリルアン増幅の実現のため、図1に示した新しいパルスポンプ光の構成を提案した。このとき第1のパルス光と、それに対向して伝搬する連続光との非線形効果により、ブリルアン増幅に必要な音響波が効率的に生成される。また、第1のパルス光に続く第2のパルス光の位相を、 π シフトさせておくことにより、第2のパルス光が前記音響波によって後方散乱された光は、連続光と逆位相で重なる。その結果、ネガティブなブリルアン増幅が実現される。そこで、その理論的な解析および実証実験を行った。

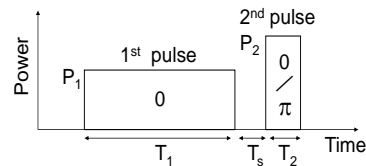


図1 提案したポンプパルス光の構成

①理論解析

ブリルアン増幅過程を表わす、ポンプ光、ストークス光、および音響波に関する連立偏微分方程式を解析し、ネガティブブリルアン増幅の利得係数を導出した。その結果、予想通り、図1に示す位相シフトパルスをポンプ光として使用することにより、ネガティブブリルアン増幅が実現可能なことを明らかにした。また、そのポンプパルス光のパラメータを最適化することにより、従来法にくらべて測定のダイナミックレンジを12dB以上向上可能なことを明らかにした。

②実証実験

第1のパルス光および第2のパルス光の時間幅をそれぞれ約30nsおよび5nsとして実験を行い、ネガティブブリルアン増幅の測定に成功した。また、ポジティブ増幅とネガティブ増幅による二通りの測定結果の差信号から、ひずみの分布測定を行うことも試みた。このとき、時間幅の広い第1のパルス光によるブリルアン増幅信号はキャンセルされ、時間幅の狭い第2のパルス光による増幅信号のみが測定され、高距離分解能測定が可能となる。実験の結果、距離分解能50cmが実現された。

(2) ポンプ光の符号化

①方式I

従来のBOTDAの場合、ポジティブな増幅しか実現できないため、符号の要素は、0, 1となる。一方上記ネガティブブリルアン増幅を応用した位相シフトBOTDA (PSP-BOTDA)の場合、両極性の増幅を実現できるため、符号の要素は、1, -1となる。その結果、PSP-BOTDA

部の直接測定の実験を行った。

実験では、第2パルス光の位相を $+\pi/2$ と $-\pi/2$ としてそれぞれ測定を行い、その差分を解析信号とした。その結果、図6に示す通り、ブリルアン周波数シフト近傍で急峻かつ線形に変化するブリルアン利得係数の虚部の特性を得ることに成功した。この特性曲線がゼロレベルの軸と交差する点からブリルアン周波数シフトを求めることができる。特性曲線の線形性を利用し、数点のデータから、ブリルアン周波数シフトを精度よく測定可能となることが期待できる。

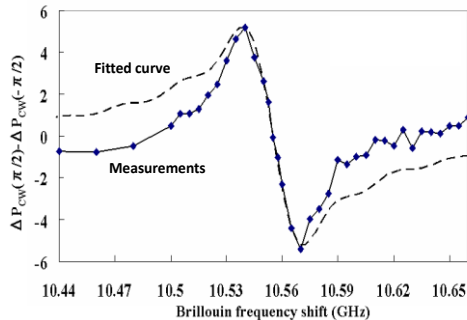


図6 ブリルアン利得係数虚部の測定結果

(4) 全光信号処理

0.1ns以下の短パルス光の発生を安定に発生させることを試みたが成功しなかった。そのため、その短パルス光に基づく符号化パルス光の発生には至らなかった。一方、ポンプ光の符号化方式については、上述の研究成果をさらに発展させることが考えられ、現在、その研究をすでに開始している。そこで、今後の全光信号処理の研究は、現在進めている光符号化方式の研究の進捗も考慮しながら再検討していきたい。

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5件)

- ①宮本雄貴, 堀口常雄, 川名恵介, 槻木澤友恵, 篠崎誠, 「ブリュアン利得係数の虚部を利用したPSP-BOTDA」, 電子情報通信学会論文誌 B, VOL. J. 92-B, NO. 11, pp. 1788-1795, 2009年11月, 査読有
- ②室井良祐, 堀口常雄, 宮本雄貴, 佐藤由樹, 橘安澄, 高倉あゆみ, 「Golay符号を適用したPSP-BOTDA」, 電子情報通信学会論文誌 B, VOL. J. 91-B, NO. 11, pp. 1493-1501, 2008年11月, 査読有
- ③堀口常雄, 「位相シフトパルスを使用したBOTDAの提案」, 検査技術, VOL. 13, NO. 8, pp. 26-31, 2008年8月, 査読無
- ④堀口常雄, 室井良祐, 岩坂彩子, 若尾孝司, 宮本雄貴, 「位相シフトパルスを使用した

BOTDA」, 電子情報通信学会論文誌 B VOL. J. 91-B, NO. 2, pp. 207-216, 2008年2月, 査読有

- ⑤室井良祐, 堀口常雄, 高木暢大, 宮川大輔, 「Golay符号を応用したシングルモード光ファイバのブリュアン利得分布測定法」, 電子情報通信学会論文誌 B, VOL. J. 90-B, NO. 5, pp. 547-550, 2007年5月, 査読有

[学会発表] (計11件)

- ①内山大輔, 堀口常雄, 安藤寛史, 奥本陽子, 加藤敦, 佐々木崇, 澤井優, 「符号化PSP-BOTDAにおけるSN比改善率」, 光ファイバ応用技術研究会, VOL. 109, NO. 377, pp. 33-38, OFT2009-68, 2010年1月21日, 石垣島, 大濱信泉記念館
- ②佐々木崇, 堀口常雄, 内山大輔, 加藤敦, モハマド・サイフル・ズルケフリ・ビン・ザン, 「符号化PSP-BOTDAにおける相関特性のビット間隔依存性」, 日本光学会年次学術講演会 (Optics & Photonics Japan 2009), 24aD5, 2009年11月24日, 新潟, 新潟コンベンションセンター
- ③佐々木崇, 堀口常雄, 「符号化PSP-BOTDAにおけるポンプ光のビット間隔」, 信学会ソサイエティ大会, B-13-37, 2009年9月18日, 新潟, 新潟大学五十嵐キャンパス
- ④加藤敦, 内山大輔, 橘安澄, 宮本雄貴, 堀口常雄, 「位相シフトパルスBOTDAへのGolay符号の適用方法(2)」, 信学会総合大会, B-13-9, 2009年3月17日, 松山, 愛媛大学城北地区
- ⑤内山大輔, 加藤敦, 橘安澄, 宮本雄貴, 堀口常雄, 「位相シフトパルスBOTDAへのGolay符号の適用方法」, 日本光学会年次学術講演会 (Optics & Photonics Japan 2008), 5pD9, 2008年11月5日, つくば, つくば国際会議場
- ⑥宮本雄貴, 室井良祐, 堀口常雄, 「 $\pm\pi/2$ 位相シフトパルスを利用したBOTDAの提案と実験」, 信学会ソサイエティ大会, B-13-6, 2008年9月16日, 川崎, 明治大学生田キャンパス
- ⑦室井良祐, 宮本雄貴, 佐藤由樹, 橘安澄, 高倉あゆみ, 堀口常雄, 「Golay符号の適用によるPSP-BOTDAの性能向上」, 信学会総合大会, B-13-22, 2008年3月19日, 北九州学術研究都市産学連携センター
- ⑧宮本雄貴, 室井良祐, 堀口常雄, 「PSP-BOTDAの検討」, 日本光学会年次学術講演会 (Optics & Photonics Japan 2007), 28B5, 2007年11月28日, 吹田, 大阪大学コンベンションセンター
- ⑨T. Horiguchi, R. Muroi, A. Iwasaka, K. Wakao, and Y. Miyamoto "Negative Brillouin gain and its application to distributed fiber sensing", in Proc. ECOC 2007, P018,

Sept. 19 2007, International Congress
Centrum ICC, Berlin

⑩宮本雄貴, 室井良祐, 岩坂彩子, 若尾孝司,
堀口常雄, 「位相シフトパルスを使用した
BOTDA の実験」, 信学会ソサイエティ大会,
B-13-7, 2007年9月10日, 鳥取, 鳥取大学 鳥
取キャンパス

⑪室井良祐, 宮本雄貴, 岩坂彩子, 若尾孝司,
堀口常雄, 「位相シフトパルスを使用した
BOTDA の提案と解析」, 信学会ソサイエティ大
会, B-13-6, 2007年9月10日, 鳥取, 鳥取大
学 鳥取キャンパス

[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

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者