

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04969

研究課題名（和文） Brillouin グレーティングをベースにした干渉型リフレクトメトリーの開発

研究課題名（英文） Development of a Brillouin grating-based coherent FMCW reflectometry

研究代表者

高田 和正（Takada, Kazumasa）

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：20359590

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000 円

研究成果の概要（和文）：ダイナミックブリルアングレーティング（DBG）型のコヒーレントFMCWリフレクトメトリーにおいては、強いポンプ光がストークス信号をマスクしてしまうという問題が発生する。そこで、一方のポンプ光をパルス変調して過渡的なDBGを発生させた後に、バランス回路に入射する直前に光スイッチで除去する方式を開発し、長さ40mの光ファイバのDBGの分布を30のSN比で測定できることを示した。また、これまで未解決であったスペckル雑音の発生原因が、励起用レーザー光の周波数変動に起因することを明らかにした。更にSN比の理論式の導出に成功し、高いSN比を実現するために必要なレーザー光の仕様を決定できるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光ファイバの歪分布を測定する方法はこれまで多数報告されたが、今回の研究によって、空間分解能がマイクロメートルからメートルの領域まで変化でき、かつ距離測定レンジもマイクロメートルから数キロメートルまで実に9桁以上に及び、しかも一回の周波数掃引で数キロメートルにわたる歪の情報が数秒で取得できる革新的な技術が開発された。本技術は、自動車や航空機などの輸送機械や建築構造物、さらには海溝部のプレートにおける地盤の診断といった安全安心な社会を実現する上での不可欠な情報を提供するだけでなく、光通信システムにおける光部品の診断や眼科・歯科などの医療分野における非侵襲的診断への応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：In accordance with the measurement principle of the Brillouin grating-based coherent FMCW reflectometry, an intense noise was generated, which was caused by the beat between the LO light and one of the pump lights entering the balanced mixer. We periodically generated a transient Brillouin dynamic grating by modulating it with a 200 MHz pulse waveform and blocking it before entering the balanced mixer with an optical switch. We succeeded in deriving the distribution of the Stokes light signal along a 40 m long optical fiber whose S/N was 30. The speckle-like noise was another serious factor. We showed that the noise was generated by the frequency fluctuations of the pump light. We derived the theoretical formula for S/N by assuming that the pump light frequency was modulated by technical noise. We calculated S/N along a 1.35 m long optical fiber using the measured power spectral density of the frequency fluctuations, and the resulting distributions agreed with the measured values.

研究分野：光計測

キーワード：ファイバ光学 ファイバセンシング 光干渉 非線型光学 四波混合 リフレクトメトリー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光ファイバ中のブリルアン増幅を利用して各地点の歪を測定する歪センシング技術は、自動車や航空機などの輸送機械やビルディングなどの建築構造物における歪分布解析、さらには海溝部のプレートにおける地盤の歪分布測定などへの応用が期待されている。代表例として、ファイバの終端からコヒーレントなポンプ光を逆方向に伝搬させた状態で入射端から光パルスを入射させ、誘導ブリルアン増幅を利用してファイバ長手方向の歪分布を測定する B - O T D A がある。本方法は測定系が簡便であることから実用化され広く使用されているが、音響フォノンの寿命が比較的長いこと約 1メートルの空間分解能しか実現されていない。一方、ポンプ光波の位相を変調して光ファイバの任意の地点だけをコヒーレントに励起してブリルアン増幅度をコントロールすることを特徴とする B - O C D A も開発されている。本方法は比較的簡便ながらミリメートル空間分解能を実現でき、また数百メートルの歪分布も短時間で測定できるという優れた特徴を有する。しかしながら、変調系の帯域制限等により、空間分解能は数ミリメートルにとどまり、マイクロメートル領域の分解能は報告されていない。

一方、本研究代表者は、低コヒーレンスリフレクトメータ (O L C R) とよばれる時間領域におけるリフレクトメータを提案・開発してきた。また、O L C R と測定原理は等価であるが周波数領域の測定法に属するコヒーレント O F D R に関しても、その空間分解能を向上させる技術に深く携わってきた。これらの方法は、空間分解能を容易にマイクロメートルの領域まで拡大できることから、世界中の研究機関で数十年にわたって研究され続けており、これまでに膨大なノウハウや測定技術が蓄積されている。このような研究背景から、本研究代表者は、ブリルアン増幅の源である音響フォノン発生に関わる非線形光学効果と O L C R およびコヒーレント O F D R の光干渉技術を融合させて、ブリルアン増幅をベースとした O L C R やコヒーレント O F D R を開発することに専念してきた。しかしながら音響フォノンの寿命が長いこと、O L C R やコヒーレント O F D R で使用する広帯域光源で音響フォノンを発生させ、かつブリルアン増幅を光干渉技術で測定することは技術的に困難であった。

2. 研究の目的

本研究では、ファイバのブリルアン増幅ではなく、光周波数が異なるポンプ光がファイバ内を互いに逆方向に伝搬させた時に発生するダイナミックブリルアングレーティング (D B G) に注目し、当該 D B G 発生技術と O L C R 及びコヒーレント O F D R 技術を融合することにより、マイクロメートル空間分解能を有する歪分布測定技術を確立することである。本技術の特徴は、広帯域な光スペクトルを有するプローブ光でも D B G によって反射光すなわちストークス光が発生することである。このストークス光と O L C R またはコヒーレント O F D R で使用する局発 (L O) 光を干渉させて発生するビート信号を検波することにより、ストークス光を発生させた D B G の位置と大きさを高空間分解能で測定することが可能となる。

D B G と光干渉技術を融合しようとする、強いポンプ光と微弱なストークス光が合波されて干渉計に設置したバランス検波回路に入射するため、ポンプ光による強い光電流によってストークス光の信号がマスクされてしまうという根本的な問題があった。そこで本研究では、ポンプ光とプローブ光の偏波が同一であっても、バランス検波回路に入射するポンプ光は減衰する一方でストークス光は通過できるような革新的機能を当該測定系に導入することを目的とした。

一方、偏波を微調整するとバランス検波回路に入射するポンプ光のパワーのみを一時的に低減できることが知られており、この状態でストークス光の信号を測定することができる。ところがこの状態でストークス信号を取得すると、信号にはいわゆるスペckル雑音が重畳してしまい信号対雑音比 (S N 比) の大幅な劣化が生じることが報告されている。スペckル雑音の発生を許したままで S N 比を改善する唯一の方法は、多数の繰り返し測定で得られた信号を加算平均することであるが、この繰り返し測定に伴い測定完了までに長時間を要してしまうという重大問題が発生する。そこで今回は、スペckル雑音の発生メカニズムを解明することによりスペckル雑音を低減し、繰り返し測定をせずに S N 比の高いストークス信号を取得する手段を確立することも目的とした。

3. 研究の方法

(1) 光ファイバ内で発生する音響フォノンの寿命は 5.3ns と比較的長いこと、ポンプ光を O N / O F F のパルス変調した場合、音響フォノンの過渡特性によって、ポンプ光が O F F 状態でも音響フォノンが存在し続ける。そこで L N 強度変調器を光スイッチとしてバランス検波回路の直前に設置し、ポンプパルス光が入射した時にはスイッチを O F F にする一方、ポンプ光パルスが入射しない時にはスイッチを O N に設定することにより、減衰する音響フォノンによって生成されたストークス光のみを通過させる。

(2) ポンプ光を発生させるために使用する D F B レーザを駆動する電源を変えて S N 比がどのように変化するのかを測定する。スペckル雑音がレーザ出射光の周波数変動に起因すると仮定して S N 比の理論式を導出し、2種類の駆動電源を用いて得られた実験結果と比較することにより、発生メカニズムを特定する。コヒーレント F M C W リフレクトメトリーでは、プローブ

光の周波数を掃引して得られるビート信号をフーリエ変換した後にその絶対値の 2 乗を計算する手順によりストークス光のファイバ長手方向の分布を求める。ポンプ光の周波数が変動すると、フーリエ変換の被積分項が時間変動することになり、フーリエ変換項の絶対値の 2 乗に変動する項が現れる。そこで、被積分項をポンプ光の周波数偏移に関して 2 次の項まで展開した後にフーリエ変換・絶対値の 2 乗の演算を行い、その主要項からストークス信号の真の値、1 次の項から変動する信号の分散を導出する。

4. 研究成果

(1) 図 1 に構築した測定系を示す。図において、波長可変レーザからの出射光はファイバカプラで二分され、一方は局発 (LO) 光として使用される。二分された他方はファイバカプラ、シングルバンド変調器 (SSBM) そして光アイソレータを順次伝搬した後に測定用光ファイバにプローブ光として入射する。波長固定の DFB レーザからの出射光は、ファイバカプラで二分され、一方はプローブ光と合波されて測定用のファイバに入射する。二分された他方は、LN 強度変調器 (LN1) で ON/OFF のパルス変調された後に光ファイバに逆方向から入射する。対抗伝搬する励起光によって光ファイバ内に DBG が生成され、ストークス光が発生する。このストークス光は、パルスのポンプ光と共に光アイソレータを伝搬してバランス検波回路に向かう。バランス検波回路の直前に LN 強度変調器 (LN2) を設置し、ポンプ光が入射する際には OFF 状態にすることにより、ストークス光のみを通過させてバランス回路に入射させる。また、ストークス光と LO 光の干渉で生じるビート信号のキャリア周波数を 6.7kHz に設定する。

図 2 は、音響フォノンの過渡特性を計算した結果を示す。(a) は測定用光ファイバの先端部分から入射するポンプ光を 50MHz で方形波変調した時の波形、(b) は発生する音響フォノンの振幅を計算した結果を示す。ここで、音響フォノンの寿命を 5.3ns と仮定した。フォノンの寿命が長いと、過渡特性によってポンプ光が存在しなくても音響フォノンが発生し続けていることが分かる。LN1 に対して ON と OFF のタイミングを 180° ずらすことにより (図中の (c))、ポンプ光が通過するときは光スイッチが OFF、過渡領域で発生した DBG によって発生するストークス光が通過するときは光スイッチが ON となり、ストークス光のみがバランス検波回路に入射できることが分かる。

本方法の原理確認を行った結果を図 3 に示す。まず光スイッチを常時 ON にしてポンプ光を通過させた。このときの雑音スペクトルをダイナミックシグナルアナライザで測定した結果を (i) に示す。ポンプ光によって発生した雑音にマスクされてしまい、測定すべきストークス光の信号が観測できないことが分かる。そこでポンプ光をスイッチで減衰させると、(ii) に示すように雑音レベルは 22dB 減少してキャリア周波数 6.7 kHz の地点に信号が観測された。信号レベルのピーク値と雑音レベルの平均値から SN 比は対数表示で 8 dB であった。(iii) に示すように、ポンプ光を完全に遮断したときの雑音レベルはさらに 19dB 低下した地点であったので、今回導入したスイッチングでも依然としてポンプ光の漏れ光に起因した雑音がストークス信号を測定する際に支配的であることが分かった。

音響フォノンの寿命は 5.3ns であるため、スイッチング時間が短いほどフォノンが減衰せずに存続できると考えられる。そこで、ポンプ光の ON/OFF の繰り返し周波数を 200MHz に設定した。2 台の強度変調器 LN1 と LN2 へ印加するバイアスとピーク電圧を微調することにより、ON/OFF 時の消光比を 300 まで増加させた。この状態で長さ 40m の光ファイバからのストークス光を 30 回繰り返し測定した結果、図 4 に示すように測定ごとの変動は減少し S/N = 30 (対数表示で 15dB) の値を得た。図には、30 回の繰り返し測定で得ら

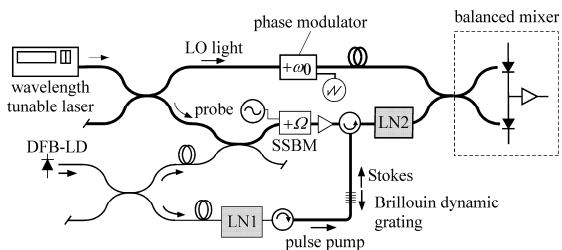


図 1 コヒーレント OFDR の構成

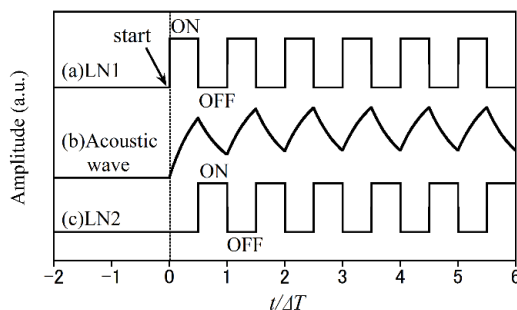


図 2 光スイッチとパルス光の発生タイミング

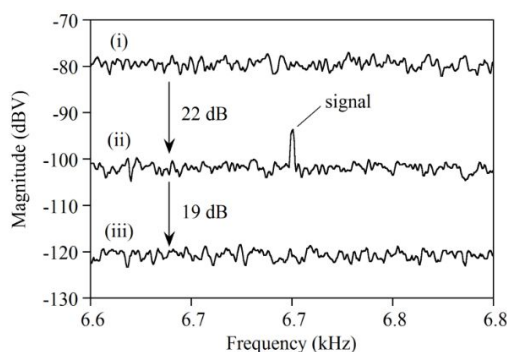


図 3 バランス検波出力の RF スペクトル

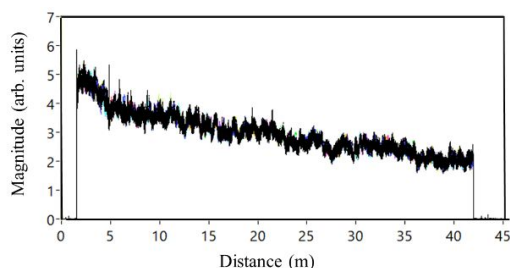


図 4 取得した全ストークス信号波形

れた波形を全て重ねて表示した。繰り返し周波数を 100~500MHz の間で変化させて S/N 比の一層の改善を試みたが、30 以上の値を達成することはできなかった。この理由は、スイッチングに使用した L/N 強度変調器の消光比の上限が 300 に制限されていたため、変調された漏れ励起光が同発光と干渉して多数のスパイクが発生してしたことによる。1,000 以上の消光比を有する強度変調器が市販されており、これらを使用することにより 60 近辺の S/N 比を実現できると考えられる。

(2) 製造メーカーの異なる電源 2 台を準備して DFB レーザの駆動用電源として使用した。ここで、発振周波数や出力光パワーは同一の値に設定した。各電源に対して、30 回繰り返し測定をして得られた Stokes 信号のファイバ長手方向の分布を図 5(a) と (b) に示す。発振周波数や光パワーが同一であったにも拘わらず駆動電源を交換しただけで信号の変動量が大幅に減少したことから、注入電流に重畳した雑音によって発振周波数が変調されたことが信号変動の原因であると考へた。

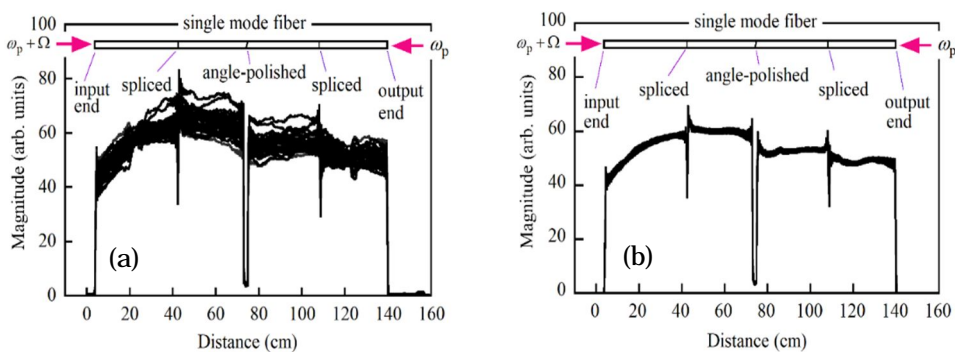


図 5 異なる電源で DFB レーザを駆動したときに得られた Stokes 信号波形

そこで摂動論を用いて S/N 比の理論式を計算して以下の式を得た。

$$\frac{S}{N} = \frac{1}{\sqrt{\sigma}} ; \sigma = 2\tau_c^3 \beta \left[\int_{u-u_i}^{1-u} (u_c - u - \eta)^2 G(\beta\tau_c\eta) d\eta + 4 \int_0^{u-u_i} \eta^2 G(\beta\tau_c\eta) d\eta \right],$$

ここで、 u はファイバ全長を 1 に規格した時の各地点の相対座標、 u_i はファイバ入射端の相対座標、 u_c はファイバ内を対抗伝搬する励起光の光路長が一致する地点の相対座標、 τ_c はファイバ全長の往復時間、 β は波長可変レーザの角周波数掃引速度である。また、 $G(\eta)$ は DFB レーザ出射光の周波数変動のパワースペクトルを示す。各電源でレーザを駆動したときの周波数変動のスペクトル $G(\eta)$ を非対称マツハ・ツェンダ干渉計で測定し、得られたスペクトルを上式に代入して数値計算した結果をそれぞれ図 6(a) と (b) に示す。また、図 5 の (a) と (b) にプロットした 30 波形から S/N 比の長手方向の分布も計算して実験データとして表示した。図より、計算値は測定値とよく一致しており、上式で S/N 比を正しく計算できること、そして観測された Stokes 信号の変動すなわちスペクトル雑音が励起光の周波数変動によって発生したことを確認できた。今回開発したリフレクトメータをビルディングなどの構造建築物の歪分布測定に応用する場合、ファイバ長は数十~数百メートルに及ぶと考えられる。ファイバが長くなると、対抗伝搬してファイバ各地点で衝突する励起光間の遅延時間差が増大することから、高い S/N 比を維持するためには周波数変動を大幅に低減することが必要になる。今回導出した S/N 比に関する理論式を用いれば、特定の S/N 比を実現するために励起用レーザ光に要求される仕様、例えば、周波数変動のバンド幅や RMS 値、更にはスペクトル幅などのパラメータを決定することができる。

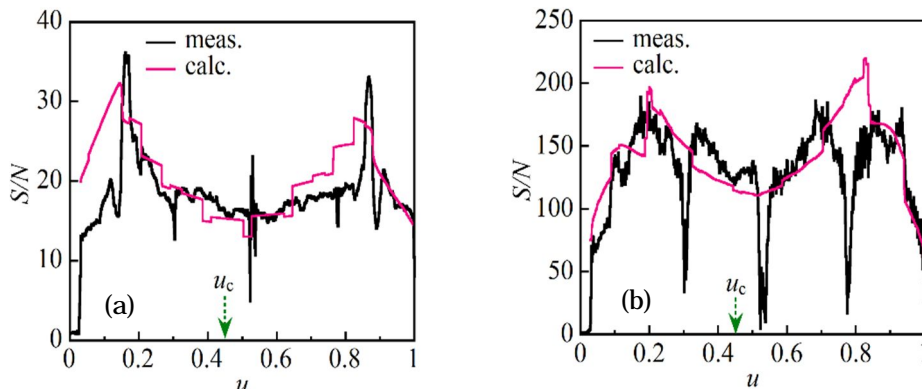


図 6 S/N 比の計算値と測定値の比較。図 5 の全波形から S/N 比を計算 (黒色の波形)

<引用文献>

- T. Horiguchi, T. Kurashima and M. Tateda, A technique to measure distributed strain in optical fibers, *Photon. Technol. Lett.*, 2, 1990, 352-354.
- K. Hotate and T. Hasegawa, Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique-proposal, experiment and simulation, *IEICE Trans. Electron. E83-C*, 2000, 405-412.
- K. Takada, I. Yokohama, K. Chida, and J. Noda, New measurement system for fault location in optical waveguide devices based on an interferometric technique, *Appl. Opt.*, 26, 1987, 1603-1606.
- U. Glombitza and E. Brinkmeyer, Coherent frequency-domain reflectometry for characterization of single-mode integrated-optical waveguides, *J. Lightwave Technol.* 11, 1993, 1377-1381.
- K. Y. Song, W. Zou, Z. He and Kazuo Hotate, All-optical dynamic grating generation based on Brillouin scattering in polarization-maintaining fiber, *Opt. Lett.* 33, 2008, 926-928.
- K. Takada and T. Yasuno, Derivation of a reflectogram using digital lock-in detection in coherent FMCW reflectometry based on a uniformly pumped Brillouin grating, *Opt. Fiber Technol.*, 32, 2016, 82-87.
- Q. Zhou, J. Qin, W. Xie, Z. Liu, Y. Tong, Y. Dong, and W. Hu, Dynamic frequency-noise spectrum measurement for a frequency-swept DFB laser with short-delayed self-heterodyne method, *Opt. Express*, 23, 2015, 29245-29257.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kikuchi Tatsuya, Satoh Ryohei, Kurita Iori, Takada Kazumasa	4. 巻 21
2. 論文標題 Theoretical and Experimental Investigation of the Effect of Pump Laser Frequency Fluctuations on Signal-to-Noise Ratio of Brillouin Dynamic Grating Measurement with Coherent FMCW Reflectometry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2870 ~ 2870
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s21082870	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takada Kazumasa, Satoh Shin-ichi, Kawakami Akiya	4. 巻 20
2. 論文標題 Signal-to-Noise Ratio of Brillouin Grating Measurement with Micrometer-Resolution Optical Low Coherence Reflectometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 936 ~ 936
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s20030936	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takada Kazumasa, Satoh Shin-ichi	4. 巻 57
2. 論文標題 Beat noise reduction utilizing the transient acoustic-wave response of an optical fiber in Brillouin grating-based optical low coherence reflectometry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 5235 ~ 5235
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.57.005235	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takada Kazumasa, Satoh Shin-ichi	4. 巻 57
2. 論文標題 Measurement of a true Brillouin grating distribution generated at mated fiber connectors with optical low coherence reflectometry coupled with dispersive Fourier spectroscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 9669 ~ 9669
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.57.009669	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------