外部変調方式に基づくブリルアン光相関領域反射計の動作検証
Operation of Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on external modulation scheme

東京工業大学 未来産業技術研究所 ○野田 康平 李 熙永 水野 洋輔 中村 健太郎
FIRST, Tokyo Tech ○Kohei Noda, Heeyoung Lee, Yosuke Mizuno, & Kentaro Nakamura
E-mail: knoda@sonic.pi.titech.ac.jp

1. はじめに

光ファイバ中のブリルアン散乱を用いた温度や歪の分布センシング技術は近年精力的に研究されており、時間領域法・周波数領域法・相関領域法などの方式が提案されている。特に我々は、片端光入射での動作や高空間分解能、ランダムアクセス性、低廉性などの利点を有する「ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR)」の性能向上を推進している。

従来提案されていたすべての BOCDR は、周波数が変調された光を生成するためにレーザの駆動電流を変調していた（直接変調方式）[1-3]。しかし、本方式には、(1) 高速かつ深い変調に適したレーザを選定する必要がある、(2) 光パワーが同時に変調され、性能が劣化する可能性がある、(3) 変調振幅が変調周波数に強く依存し、測定位置によって空間分解能が大きく変化する可能性がある、という 3 つの欠点が存在する。

これらの欠点は、光ファイバ上の欠陥からのフレネル反射を分布測定する技術である「光相関領域反射計 (OCDR)」においても同様である。そこで我々は、レーザ駆動電流に直接変調を施す代わりに電気光学変調器 (EOM) を用いて光周波数を変調する外部変調方式の OCDR を開発し、少なくとも(1)と(3)の欠点が緩和できることを示した[4]。

しかし、OCDR 向けに開発された外部変調方式では、EOM の周波数変調効率の限界や狭帯域光バンドパスフィルタの利用により、変調光のパワーが不足するという問題があった。そのため、フレネル反射よりも弱いブリルアン信号を検出する BOCDR に本方式をそのまま適用することは困難であった。

そこで本発表では、変調光を適切に増幅することによって、外部変調方式に基づく BOCDR の基本動作を実証したので報告する。

2. 実験系

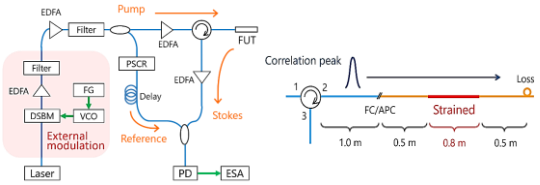
外部変調に基づく BOCDR の構成を **Fig. 1(a)**に示す。周波数変調光を生成する部分以外は従来の構成[1,2]と同等である。レーザ (NX8563LB, NEC) の出力を周波数変調するために、まず、信号発生器 (FG) を用いて周波数を鋸歯状に掃引した電気信号を生成し、電圧制御発振器 (VCO) に入力した。次に、VCO の出力を両側波帯変調器 (DSBM) に入力し、その出力の長波長側の側波帯のみを狭帯域光フィルタ (BVF-300CL, Alnair) を用いて切り出した。生成された周波数変調光はパワーが低いため (–20 dBm 以下)、エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) を用いて増幅し、さらに、増幅自然放出（ASE）によるノイズを抑制するため光フィルタに通した。分布測定のため、変調周波数は 4.15 MHz から 4.21 MHz まで掃引し、変調振幅は 1.4 GHz とした。これは約 0.24 m の空間分解能、および、約 24 m の測定レンジに対応する[1,2]。

測定ファイバの構造を **Fig. 1(b)**に示す。1.8 m のシリカ単一モードファイバ (SMF: ブリルアン周波数シフト(BFS)は 10.84 GHz、BFS の歪依存性は 448 MHz/%) と、サーキュレータの第 2 ポートである 1 m の SMF (BFS は 10.87 GHz) を、FC/APC コネクタを介して接続した。0.8 m の区間に 0.71%までの歪を印加し、分布測定を行った。

3. 実験結果

測定ファイバに 0.46%の歪を印加した時に測定されたブリルアン利得スペクトル（BGS）と BFS の分布を **Fig. 2** に示す。縦軸は各 BGS の最大値と最小値がそれぞれ 1 と 0 になるように正規化した。位置は、サーキュレータからの距離である。歪区間では BFS がおよそ 200 MHz 変化した。二つの SMF の BFS の違いも観測できている。次に、歪を 0%から 0.71%まで変化させたときの BFS 分布を測定した (**Fig. 3(a)**)。ここから、歪印加区間の BFS の平均値を歪に対してプロットしたものが **Fig. 3(b)**である。BFS の変化の歪依存性はほぼ線形で、その傾きは約 419 MHz/%であり、事前に計測した値とほぼ一致した。

以上より、外部変調方式に基づく BOCDR の基本動作（歪の分布測定）が実証できた。今後は、BOCDR を直接変調方式ではなく外部変調方式で実装した際の利点について、空間分解能や測定安定性の観点から定量評価を重ねていく。



(a) (b)

Fig. 1 (a) Setup of BOCDR based on external modulation scheme. DSBM: double-sideband modulator, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, ESA: electrical spectrum analyzer, FG: function generator, FUT: fiber under test. PD: photo diode, PSCR: polarization scrambler, VCO: voltage-controlled oscillator. **(b)** Structure of sensing fiber.

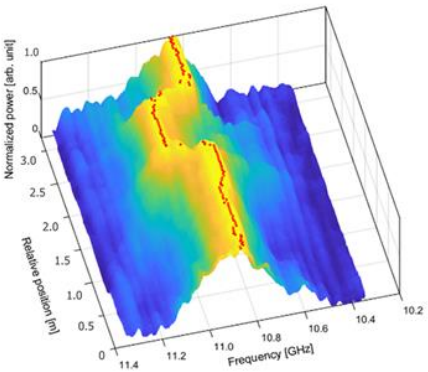


Fig. 2 Normalized BGS distribution measured at 0.46% strain. The BFS distribution is indicated in red.

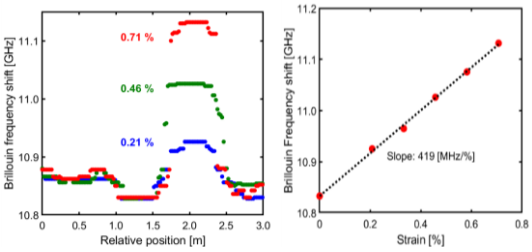


Fig. 3 Experimental results. **(a)** BFS distributions when strain was changed from 0 to 0.71%. **(b)** BFS (in the strained section) plotted as a function of strain.

参考文献

[1] Y. Mizuno, et al., *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).
[2] Y. Mizuno, et al., *J. Lightw. Technol.* **28**, 3300 (2010).
[3] Y. Mizuno, et al., *Light: Sci. Appl.* **5**, e16184 (2016).
[4] K. Noda, et al., *Appl. Phys. Express*, in press.

© 2019年 応用物理学会