

傾斜利用 BOCDR の歪ダイナミックレンジ拡大と低コスト化に向けた基礎検討

Toward strain dynamic range enhancement and cost reduction in slope-assisted BOCDR

○ 棒 治紀¹、坂本 真菜¹、野田 康平^{2,3}、中村 健太郎²、水野 洋輔³、李 ひよん¹¹ 芝浦工業大学 工学部 ² 東京工業大学 未来産業技術研究所 ³ 横浜国立大学 工学研究院OH. Sasage¹, M. Sakamoto¹, K. Noda^{2,3}, K. Nakamura², Y. Mizuno³, and H. Lee¹¹ Shibaura Institute of Technology ² Tokyo Institute of Technology ³ Yokohama National University

E-mails: af18055@shibaura-it.ac.jp, hylee@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

多様化する構造物の健全性を診断する手法として、分布型光ファイバセンサが注目を集めている。特に、光ファイバ中のブリルアン散乱を用いたセンサは、周波数情報に基づいて比較的高精度に歪・温度の分布を測定できる[1]。これまでに多くのブリルアン分布センサが提案されてきたが、我々は「ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR)」[2,3]の性能向上を推進している。BOCDRは、片端からの光入射で動作し、mm オーダの高い空間分解能とランダムアクセス性を有する唯一の技術である。

BOCDRでは、光波コヒーレンス関数の合成法[4]に基づき、周波数変調された信号光と参照光を干渉させ、測定ファイバ (FUT) からの局所的なブリルアン利得スペクトル (BGS) を取得する[2,3]。基本系では、各測定点での BGS を取得する際、電気スペクトラムアナライザ (ESA) の周波数掃引機能を用いる。しかし、周波数掃引は比較的低速であるため、BOCDRによるリアルタイム分布測定は困難であった。この問題を解決すべく、BGS の傾斜上の固定周波数におけるパワーがブリルアン周波数シフト (BFS) と 1 対 1 対応することを動作原理とする「傾斜利用 BOCDR」が提案された[5]。ESA の周波数掃引を撤廃し、代わりに ESA のゼロスパン機能を活用することで、リアルタイム分布測定が実現された。

しかし、BGS の傾斜領域は比較的狭帯域であるため、傾斜利用 BOCDR によって測定可能な歪の範囲 (歪ダイナミックレンジ (DR)) は約 0.25% に制限されていた[6]。また、ESA の使用はシステムの低コスト化を阻む要因であった。傾斜利用 BOCDR の歪 DR を拡大するとともに低コスト化を図るには、ESA を撤廃したシステムの実現が望まれる。

そこで本研究では、最初のステップとして、ESA を使わずに FUT 全長の BFS (または印加歪) を取得する手法を提案し、傾斜利用法よりも歪 DR が向上することを実証した。

2. 原理と実験系

一般に、BFS は、ESA で観測された BGS のピーク周波数として実測される[2]。しかし、ESA を用いた BGS の直接観測には動作速度と低コストの観点から問題があるため、ここでは ESA を撤廃した BFS の取得法を提案する。まず、安価で急峻な低域通過フィルタ (LPF) が利用できる帯域まで BGS をビートダウンさせる。次に、BGS が占める帯域のうち最も高い周波数をカットオフ周波数とする低域通過フィルタ (LPF) に通した後、そのトータルパワーを観測する。このとき歪が印加されると、BGS は高周波側にシフトし、LPF の通過帯域から徐々に逸脱していく。結果的に、LPF 通過後の信号のトータルパワーと印加歪は 1 対 1 対応となる。この手法では、BGS 全体が占める帯域により歪 DR が決まるため、一方の傾斜帯域により歪 DR が決まる傾斜利用法と比べて、歪 DR が約 2 倍に拡大すると考えられる。

今回用いた実験系を Fig. 1 に示す。光学系は、ブリルアン散乱を観測する際に一般的に使用される自己ヘテロダイン系である。光源には、波長 1550.2 nm、線幅約 1 MHz の半導体レーザを用いた。また、FUT には、長さ 0.95 m のシリカ単モード光ファイバ (SMF; 無歪での BFS は約 10.85 GHz) を用い、全長に歪を印加した。FUT への入射パワーは 22.0 dBm とした。FUT 全長からの BGS, BFS の情報を含む電気信号が光検出器 (PD) から出力される。これを電圧制御発振器 (VCO) の出力 (約 10.72 GHz) とミキシングし、BFS を約 130 MHz までビートダウンさせる。続いて、これをオシロスコープ (OSC) 内蔵のカットオフ周波数 200 MHz の LPF に通し、OSC で観測される波形の平均的な振幅の 2 乗をパワーと考え、BFS (印加歪) と対応させた。

3. 実験結果

まず、ビートダウンさせた BGS の歪依存性を調査した (Fig. 2)。この実験では ESA を用いた (分解能帯域幅: 3 kHz、ビデオ帯域幅: 3 MHz)。BFS は歪に対してプロットしたところ (Fig. 3)、ほぼ線形に依存し、その依存係数は 494 MHz/% であった。

次に、ESA のゼロスパン機能を用いて、傾斜利用法による歪 DR を調査した。130.2 MHz (BGS の中心、BFS に相当) におけるパワーの歪依存性を Fig. 4 (青) に示す。印加歪の増加に伴い、パワーは減少した。0.15% 程度以上の歪に対してはパワーがほぼ変化しなかったことから、傾斜利用法の

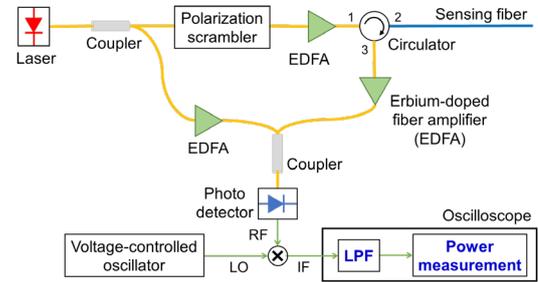


Fig. 1. Experimental setup. DC: direct current, IF: intermediate frequency, LO: local oscillator, LPF: low pass filter, RF: radio frequency.

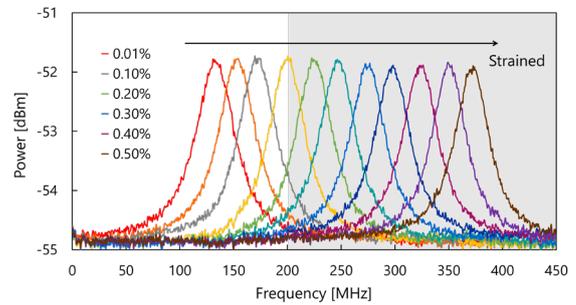


Fig. 2. Measured BGS dependence on strain. The cut-off region of the LPF is indicated in gray.

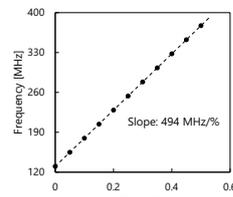


Fig. 3. BFS dependence on strain. The dotted line is a linear fit.

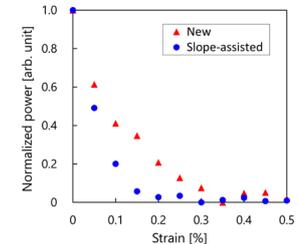


Fig. 4. Strain dependencies of the powers measured by the slope-assisted method (blue) and the new method (red).

歪 DR は約 0.15% であるといえる。この値は、傾斜利用 BOCDR の歪 DR である約 0.25% よりも小さいが、分布測定に比べて全長測定では BGS の線幅が狭くなるため[3]、妥当である。

最後に、ESA を使わない提案手法による歪 DR を評価した。OSC で測定したパワーの歪依存性を Fig. 4 (赤) に示す。歪の増加に伴い、パワーは減少した。0.3% 程度以上の歪に対してはパワーがほぼ変化しなかったため、提案手法の歪 DR は約 0.3% であるといえる。この値は、傾斜利用法の約 2 倍であり、理論通りの歪 DR の改善が達成できた。

以上より、ESA を使わずに FUT 全長の BFS を取得する手法を提案し、従来の傾斜利用法の 2 倍程度の歪 DR を有することを実証した。今後は、BOCDR に基づく分布測定における提案手法の効果を検証する計画である (分布測定では富士山型ノイズ[7]の影響を受けると考えられる)。

参考文献

- [1] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (Academic, 2002).
- [2] Y. Mizuno, et al., *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).
- [3] Y. Mizuno, et al., *Light: Sci. Appl.* **5**, e16184 (2016).
- [4] K. Hotate, et al., *J. Lightw. Technol.* **24**, 2541 (2006).
- [5] H. Lee, et al., *IEEE Photon. J.* **8**, 6802807 (2016).
- [6] H. Lee, et al., *Meas. Sci. Technol.* **30**, 075204 (2019).
- [7] K. Y. Song, et al., *Opt. Express* **14**, 4256 (2006).