

傾斜利用 BOCDR における動作速度と歪測定精度のトレードオフ

Trade-off relationship between operating speed and strain measurement accuracy
in slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry

○白井 悠生¹、鈴木 之大¹、捧 治紀¹、中村 健太郎²、水野 洋輔³、李 ひよん¹

¹ 芝浦工業大学 理工学研究科 ² 東京工業大学 未来産業技術研 ³ 横浜国立大学 工学研究院

OYusei Shirai¹, Yukihiro Suzuki¹, Haruki Sasage¹, Kentaro Nakamura², Yosuke Mizuno³, and Heeyoung Lee¹

¹ Shibaura Institute of Technology ² Tokyo Institute of Technology ³ Yokohama National University

E-mails: af19045@shibaura-it.ac.jp, hylee@shibaura-it.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ことから、構造物の健全性を診断する方法として期待されている。中でも、「ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR)」[1]は片端入射で動作し、mm オーダの高い空間分解能、ランダムアクセス性を有している。

BOCDR では光波コヒーレンス関数の合成法に基づき、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 (BFS) を取得する[1]。基本的な BOCDR では各測定点での BGS を取得するために電気スペクトラムアナライザ (ESA) での周波数掃引機能を用いる。しかし、ESA の周波数掃引速度は比較的遅いためリアルタイムでの測定は難しかった。BOCDR での高速測定を可能にするため、「傾斜利用 BOCDR」が提案された[2]。これは BGS の傾斜上に位置する固定周波数における光パワーがブリルアン周波数シフト (BFS) と 1 対 1 で対応する原理を用いている。ESA で周波数掃引を行わず、ゼロスパン機能を活用することで、リアルタイムでの分布測定が可能になった。

これまでに基本的な動作実証[2]や超理論空間分解能効果の発見[3]、空間分解能と歪ダイナミックレンジのトレードオフの解明[4]などは報告されているものの、動作速度と歪測定精度の関係は未解明であった。

そこで本研究では、傾斜利用 BOCDR における動作速度 (繰り返しレート=歪分布を取得する速度) と歪測定精度のトレードオフを実験的に解明した。

2. 原理と実験系

傾斜利用 BOCDR では変調周波数を掃引することで FUT の始点から終点までの BGS を取得しており、掃引速度を速くすることでシステムの動作速度 (繰り返しレート) を向上させることができる。しかし、繰り返しレートが非常に高くなると、本システムで取得される BFS 分布にはローパス効果を受け、ピークが小さく太くなり、歪を正しく検出できなくなってしまう。これは、歪によるパワー変化を検出する際に用いている ESA のゼロスパンモードは、内蔵の低域通過フィルタの影響[5]で、急峻なパワー変化に追従できないためである。よって、ある閾値以上の繰り返しレート以上においては、繰り返しレートと歪測定精度の間にトレードオフの関係が生じる。

今回用いた傾斜利用 BOCDR の実験系を図 1 に示す。光学系はブリルアン散乱を観測する自己ヘテロダイン系であり、光源には波長 1550 nm の半導体レーザを用いた。また、FUT には長さ 10 m のシリカ単一モード光ファイバ (SMF; 無歪での BFS は約 10.835 GHz) を用いた。FUT の始点から約 7.2 m の区間に 40 cm にわたって 0.125% の歪を印加した。FUT への入射パワーは 24 dBm とした。また、BOCDR としての理論空間分解能は約 35 cm に設定した。最終的な BFS が出力されるオシロスコープの平均回数は 500 回に固定し、ESA のビデオ帯域幅は 3 kHz、分解能帯域幅は 3 MHz とした。繰り返し時間 (繰り返しレートの逆数) は 1 ms から 50 ms まで変化させた。

3. 実験結果

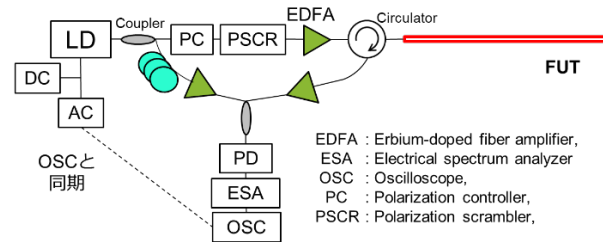


Fig. 1. Experimental setup of slope-assisted BOCDR.

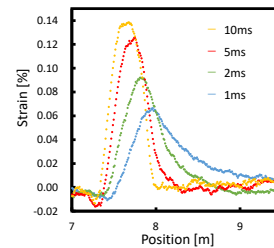


Fig. 2. Repetition time dependence of the measured strain distribution.

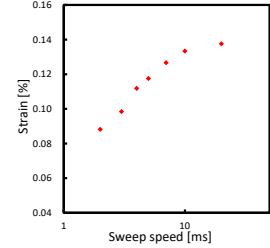


Fig. 3. Repetition time dependence of the measured strain magnitude.

図 2 に測定した歪分布の繰り返し時間依存性を示す。繰り返し時間が短くなると、歪分布にローパス効果が加わることがわかる。このグラフから、歪の大きさとピーク幅の繰り返し時間依存性を計算したのが図 3 および図 4 である。10 ms 程度よりも繰り返し時間が短くなると、歪の大きさは小さく、ピーク幅は大きく見積もられることがわかる。すなわち、今回用いた実験条件下では、10 ms 程度の繰り返し時間が歪を正しく検出できる限界であるといえる。

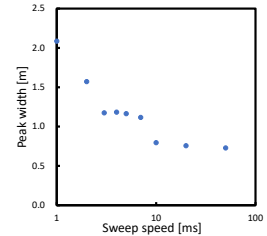


Fig. 4. Repetition time dependence of the peak width.

4. 結論

傾斜利用 BOCDR における動作速度と歪測定精度のトレードオフの関係を初めて実験的に示すことができた。今後は ESA の分解能帯域幅やビデオ帯域幅の最適化を行い、より高速かつ正しく歪検出が行えるシステムの構築を目指す。

参考文献

- [1] Y. Mizuno, et al., Opt. Express **16**, 12148 (2008).
- [2] H. Lee, et al., IEEE Photon. J. **8**, 6802807 (2016).
- [3] H. Lee, et al., Opt. Express **24**, 29190 (2016).
- [4] H. Lee, et al., Meas. Sci. Technol. **30**, 075204 (2019).
- [5] G. Zhu, et al, to appear in Opt. Laser Technol.