

ブリルアン光相関領域反射計における最適な遅延ファイバ長の検討

Toward optimization of delay fiber length in Brillouin optical correlation-domain reflectometry

○坂本 真菜¹、捧 治紀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 未来研 ³横浜国立大学 工学研究院OM. Sakamoto¹, H. Sasage¹, K. Noda^{2,3}, K. Nakamura², Y. Mizuno³, and H. Lee¹¹Shibaura Institute of Technology ²Tokyo Institute of Technology ³Yokohama National University

E-mails: af18051@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歪・温度センサは、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ため、構造物のヘルスマニタリングへの応用が期待されている。中でも、「ブリルアン光相関領域反射計 (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、ランダムアクセス性、低廉性を兼ね揃える唯一の技術である[1]。最近では、歪・温度分布のリアルタイムの取得も達成されている[2,3]。

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[1]。その際、測定位置となる相関ピークの次数を制御するため、参照光路に比較的に長距離の遅延ファイバを挿入する。しかし、遅延ファイバの最適な長さについてはこれまで検討されていなかった。

そこで本研究では、BOCDRにおける最適な遅延ファイバ長を解明するための基礎検討を行った。ここでは、分布測定ではなく全長測定の場合について、遅延ファイバ長を変化させたときのBGSを評価した。

2. 原理

基本的なBOCDRが正しく動作するためには、FUT中に複数の相関ピーク (測定位置に相当) が生成されてはならない。特に、光源の変調による位置制御が困難である0次の相関ピーク (等光路点) は、FUT内に生成されないよう留意する必要がある。そのために、参照光路に遅延ファイバを挿入するのが一般的である。

遅延ファイバを最短とする場合、1次の相関ピークを測定に用いることになる。このとき、参照光と信号光の最短の光路差がFUT長の4倍以上なければ、FUT全長にわたる測定ができない[5]。ここで、1次の相関ピークを用いてFUT全長にわたる分布測定を行うためには、光源の変調周波数がある周波数からその2倍まで掃引しなくてはならない。このとき、単純に考えると、FUTの両端では空間分解能が2倍異なるため利便性が低下する。さらに、直接変調では、変調周波数と変調振幅が相互に依存するため[6]、FUT内において空間分解能が更に激しく変動する可能性もある。よって、安定した性能を実現するためには、ある程度長い遅延ファイバを用いて、高次の相関ピークを用いる方が好ましい。

一方で、遅延ファイバが非常に長い場合は、そのブリルアン閾値パワーが低下するため[7]、別の問題が生じる。すなわち、遅延ファイバ中で生じたブリルアン後方散乱光がレイリー散乱を介して前方に伝搬し、参照光が本来あるべきでないブリルアン成分を含んでしまう。これは、FUTからのレイリー散乱光と干渉することで、本来のBGSに重畳し、ノイズとなってしまふ (遅延ファイバとFUTのブリルアン周波数シフト (BFS) が同等の場合は見かけ上のブリルアン信号は増大するが、遅延ファイバで生じたブリルアン成分は分布測定に寄与しない)。よって、BOCDRにおける遅延ファイバは短すぎても長すぎても問題があり、その最適化は性能向上のための重要な課題である。

3. 実験

今回用いた実験系をFig. 1に示す。光学系はBOCDRと同等であるが、レーザには周波数変調を印加せず、FUT全長からのBGSを観測した。参照光路には遅延ファイバを挿入し、その長さを変化させた。FUTの長さは0.9mとした。レーザの出力パワーは6.0 dBm、FUTへの入射パワーはエルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) を用いて24.0 dBmに増幅した。参照光と散乱光は、ともに1.0 dBmまで増幅してから干渉させた。また、両者の相対偏波状態は、偏波コントローラおよび偏波スクランブラにより制御した。

まず、観測されたBGSの遅延ファイバ長に対する依存性を調査した (Fig. 2)。遅延ファイバ長は0 km (遅延ファイバなし) から35 kmまで、5 km毎に変化させた。偏波状態は、各ピークが最大となるよう調整した。FUTのBFSである約10.84 GHz、および、遅延ファイバのBFSである約10.88 GHzに明瞭なピークが現れた。なお、約10.92 GHzのピークは、FUTの高次モードのBFSである。遅延ファイバ長の増加に伴い、FUTに起因するピークのパワーは減少、遅延ファイバに起因するピークのパワーは増加した。

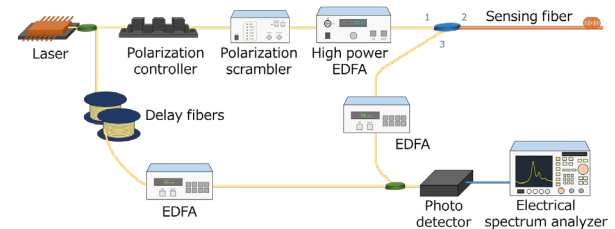


Fig. 1. Experimental setup.

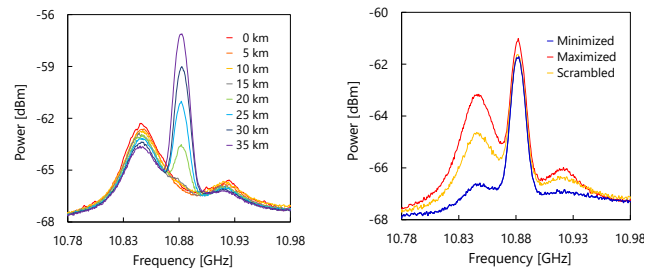


Fig. 2. BGS dependence on delay fiber length.

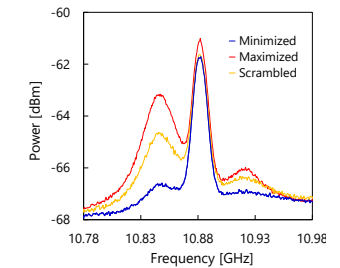


Fig. 4. BGS dependence on relative polarization state.

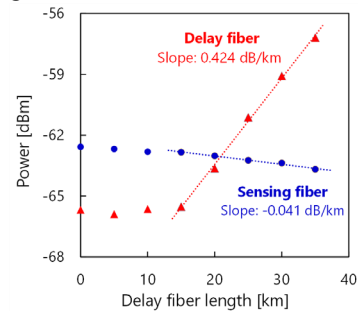


Fig. 3. Brillouin peak powers (caused in the FUT and the delay fiber) plotted as functions of the delay fiber length. The solid lines are linear fits of the plots within 15–35 km.

次に、この様子を定量評価すべく、各ピークのパワーを遅延ファイバ長に対してプロットした (Fig. 3)。遅延ファイバが15 km以上になると、遅延ファイバに起因するピークのパワーが急激に (依存係数+0.42 dB/km) 増加し、約20 km程度で両者の大小関係が逆転した。一方、遅延ファイバ長の増加に伴い、FUTに起因するピークのパワーは徐々に減少した (遅延ファイバ長が15 km以上のとき依存係数は-0.04 dB/km)。参照光をEDFAで一定パワーに増幅しているが、そのうち本来の成分が減少するためと考えられる。

最後に、遅延ファイバ長が25 kmのときのスペクトルの相対偏波状態に対する依存性を調査した (Fig. 4)。FUTに起因するピークは偏波状態により3.4 dB以上変動した。一方、遅延ファイバに起因するピークのパワー変動は<0.8 dBであった。これは後者のピークを構成する光が多様な経路を辿ってきたため、元から偏波状態が平均化されていたものと考えられる。

以上から、15 km程度までの遅延ファイバであれば、FUTに起因する本来のBGS観測に悪影響を及ぼさないといえる。しかし、今回は全長測定の結果であり、分布測定を行った場合に許容される遅延ファイバの長さは今後解明する必要がある。

参考文献

- [1] Y. Mizuno, et al., *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).
- [2] Y. Mizuno, et al., *Light: Sci. Appl.* **5**, e16184 (2016).
- [3] H. Lee et al., *IEEE Photon. J.* **8**, 6802807 (2016).
- [4] K. Hotate, et al., *J. Lightw. Technol.* **24**, 2541 (2006).
- [5] H. Lee, et al., *Electron. Lett.* **55**, 276 (2019).
- [6] K. Noda, et al., *Appl. Phys. Express* **12**, 022005 (2019).
- [7] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (Academic, 2002).