傾斜利用ブリルアン光相関領域反射計による 10 km 遠方での温度分布測定 Distributed temperature sensing based on slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry with over 10 km measurement range

東京工業大学 未来産業技術研究所 〇李 熙永、水野 洋輔、中村 健太郎

FIRST, Tokyo Tech OHeeyoung Lee, Yosuke Mizuno, and Kentaro Nakamura E-mail: hylee@sonic.pi.titech.ac.jp

1. はじめに

ブリルアン光相関領域反射計(BOCDR)[1]は、光ファイバに沿った温度や歪の分布を測定する手法の一つであり、測定光ファイバ(FUT)の片端からの光入射での動作、高空間分解能、ランダムアクセス機能、低廉性などの利点を有する。通常のBOCDRは各測定点でブリルアン散乱スペクトル(BGS)を取得するために周波数を掃引するため、測定時間が比較的長いという問題点があった。そこで、これまでに我々は、BGSの傾斜を利用することで周波数掃引を不要とする新手法「傾斜利用BOCDR」を提案し、高速測定を実現した[2]。

傾斜利用 BOCDR には、高速測定が可能であることに加え、理論空間分解能よりも短い歪区間・高温区間に対しても感度を有する(超理論分解能効果)という特徴がある[3]。これを利用し、ブリルアン分布センサとして世界最短となる 2 mm の歪区間の検出を実証した[4]。また、FUT としてプラスチック光ファイバや偏波維持光ファイバを用いて各種性能を向上させるなど、種々の成果を収めてきた。しかし、それら全ての実験は、FUT の長さが 15 m 以下の比較的短距離での測定であり、km オーダの長距離での測定例は一つも報告がなかった。

そこで本発表では、10 km 遠方における傾斜利用BOCDR の動作を実験的に調査した。まず、参照光に挿入する遅延線の長さは、最低でもFUTの4倍の長さが必要であることを明らかにした。続いて、超理論分解能効果を活用し、3 m の高温区間の検出に成功した。

2.実験系

長距離測定のための傾斜利用 BOCDR の実験系を Fig. 1 に示す。通常の傾斜利用 BOCDR との大きな違いは、参照光路の構成である。一般に、BOCDR では、測定ファイバ中に 0 次の相関ピーク (等光路点)が生じるのを回避するため、参照光路に遅延ファイバを挿入する[1,2]。短距離測定の場合は、特に意識をせずに十分に長い遅延ファイバを挿入しておけば、高次の相関ピークを FUT 中に生成することができた。しかし、長距離の FUT を用いる場合は、この遅延ファイバの長さを綿密に計算する必要がある(長距離ファイバの伝搬損失やコストを踏まえると、遅延ファイバの長さは最低限に抑えたい)。遅延ファイバを最短とするには 1 次の相関ピークを FUT 中に生成することになるが、計算の結果、最低でも FUT の 4 倍の長さが必要であることが明らかになった(紙面の都合で詳細は省略)。

FUT として、今回は 13 km のシリカ単一モードファイバ (SMF) を用いた (先端から 11 km だけ離れた 3 m の区間に 温度変化を印加) が、この場合、遅延光ファイバは 52 km 以上の長さとなる (今回は 60 km のシリカ SMF を用いた)。これほどに長い光ファイバをレーザ光が透過すると、後方ブリルアン散乱光の反射などの機構により、透過光にブリルアン散乱成分が重畳してしまう。参照光に含まれるブリルアン散乱成分は分布測定とは無関係でありノイズとなるため、遅延ファイバの後に狭線幅光フィルタを挿入し、ブリルアン散乱成分を除去した(エルビウム添加光ファイバ増幅器の雑音も同時に抑制)。これにより、分布測定の信号対雑音比 (SNR)を改善させた。

また、FUT が比較的短い場合は、誘導ブリルアン散乱 (SBS) の閾値が高いため、入射光パワーは高ければ高いほど分布測定の SNR も改善した。しかし、FUT が極めて長距離の場合は、SBS の閾値が低いため、高い光パワーを入射しても手前でその大部分が反射されて遠方まで届かない[5]。そこで、本実験では入射光パワーは 10 dBm に抑えた。なお、用いた FUT のブリルアン周波数シフト (BFS) は 10.88 GHz であり、BGS の傾

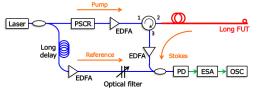


Fig. 1. Experimental setup of SA-BOCDR with a long FUT.

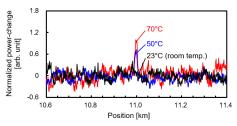


Fig. 2. Measured power-change distributions around the 3-m-long heated section (23°C, 50°C, and 70°C).

斜部に当たる 10.87 GHz におけるスペクトルパワーを BFS に関連付けた。変調振幅は 5 GHz、変調周波数は 4.51 kHz から 7.07 kHz まで掃引した。測定レンジは 14.5 km、理論 空間分解能は 41.9 m から 26.7 m であった (測定位置によって変化)。

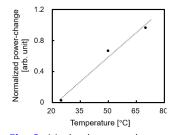


Fig. 3. Maximal power-change plotted as a function of temperature. The dotted line is a linear fit.

3. 実験結果

FUT の手前から約 11 km 離れた高温区間付近の BGS の傾斜パワー変化の分布(拡大図)を Fig. 2 に示す。温度は 23℃(室温)、50℃、70℃ と変化させた。高温区間において明瞭なピークが観測された。超理論空間分解能効果の性質を考慮すると、得られた波形が矩形でないのは妥当である。また、この付近での理論空間分解能は 28.2 m であったので、その程度の広がりを伴って観測されたことも妥当である。また、高温区間における最大パワー変化量を温度に対してプロットしたのが Fig. 3 である。測定点数が少なく再測定が必要であるが、依存性はほぼ線形であることから、10 km 遠方にて 3 mのホットスポットを検出できたといえる。

なお、通常の BOCDR に測定レンジ延伸法の一つである時間 ゲート法を用いて 21 km 遠方で 3 m のホットスポットを検出したという報告もあるが[6]、本発表では測定レンジ延伸法は 導入していない。それらの手法を追加で導入することで、空間分解能を保持したまま測定レンジを更に向上させることも可能であると考えらえる。

本研究を行うにあたり、東京工業大学の植之原裕行教授に 実験装置をお貸し頂いた。ここに深く感謝申し上げる。

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., Jpn. J. Appl. Phys. 57, 058002 (2018).
- [5] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics (Academic Press, 1995).
- [6] O. Furukawa et al., IEEJ Trans. Fund. Mater. **137**, 52 (2017).