

光ファイバ中の多段前方ブリルアン散乱に基づく 光相関領域法を用いた温度分布測定 Fiber-optic correlation-domain distributed temperature sensing based on cascaded forward Brillouin scattering

東京大学 先端科学技術研究センター 林 寧生¹ セット ジイヨン¹ 山下 真司¹

東京工業大学 未来産業技術研究所 水野 洋輔² 中村 健太郎²

1) Tokyo Univ. ○Neisei Hayashi, Sze Yun Set, and Shinji Yamashita E-mails: {hayashi, set, syama}@cntp.t.u-tokyo.ac.jp
2) Tokyo Tech Yosuke Mizuno and Kentaro Nakamura E-mails: {ymizuno, knakamura}@sonic.pi.titech.ac.jp

1. 背景

光ファイバ中の非線形現象の一つである前方ブリルアン散乱(FBS)は、光ファイバの径方向に発生する音響波による光の散乱である[1]。プローブ光とポンプ光を同方向から入射することで前方誘導ブリルアン散乱(FSBS)が発生する。ポンプ光のパワーがある程度強い場合は他の音響共振ピークも増強され、多段前方ブリルアン散乱(CFBS)が生じる。FBSは、通信[2]やセンシング[3]への応用可能性が示されている。特に、FBSを用いることで光ファイバ外部の音響インピーダンスの測定が可能である[4,5]。音響インピーダンスの分布測定が可能となれば、癌検査や地中石油探査、巨大タンク中のパイオエタノールの品質検査が可能となると期待される。

2004年に田中氏により、FBSの分布測定のコンセプトが提示された[6]。これは、FBSを後方散乱にカップリングさせて観測するという提案である。2018年に音響インピーダンスの分布測定が実証された[7]。これは、FSBSでレイリー散乱光を変調することで、FSBSの線幅を分布的に測定する光時間領域反射計(OTDR)である。しかし、パルス光をポンプ光として使用するため、ランダムアクセスと高サンプリングレートの実現が困難である。これを解決するには、光相関領域法が適している[8]。しかしこの手法を適用するには、連続光の対向伝搬ポンプ・プローブ法を適用する必要がある。

近年、我々は、CFBSを後方誘導ブリルアン散乱光(BSBS)をシードとして観測する手法を提案し、その実証を行った[9]。これは、連続光の対向伝搬ポンプ・プローブによるCFBSの発生を可能とする。

そこで、本発表では、光ファイバ上の温度分布をCFBSに基づく光相関領域法で分布測定を実証する。

2. 原理

FBSの m 番目の共振周波数を(1)式に示す。

$$\nu_{GB,m} = \frac{\nu y_m}{\pi d}, \quad (1)$$

d はファイバの外径、 ν はファイバ中の縦波音速である。 y_m は次の方程式によって決定される[3]。

$$(1 - \alpha^2)J_0(y_m) - \alpha^2 J_2(y_m) = 0, \quad (2)$$

α は横波音速/縦波音速、 J_0 と J_2 はそれぞれ0次ベッセル関数と2次ベッセル関数である。温度測定では、 $\nu_{GB,m}$ が ν 中のヤング率の温度変化に大きく依存することを利用する[3,10]。

中心周波数 ν_0 のポンプ光と中心周波数 $\nu_0 - \nu_B + \nu_{GB,1}$ のプローブ光を高非線形ファイバ中で対向伝搬させると、BSBSがシードとなり、Rモードの共振周波数帯にCFBSが生じる[9]。 ν_B はBSBSのブリルアン周波数シフト(BFS)である。このCFBSの温度依存性は、99 kHz/Kである。

3. 実験系

被測定ファイバ(FUT)は、長さ397 mの高非線形ファイバ(HNLF)である。コア径/クラッド径は3.5 μm /125 μm であった。屈折率は約1.46、伝搬損失は約0.76 dB/km (@1.55 μm)であった。FUT構成を図1に示す。全長394 mのファイバの104 mの部分にヒーターで60°Cの温度変化を与えた。実験系を図1に示す。光源は、狭線幅レーザー(線幅1.2 kHz、波長1.55 μm)である。光源の出力を50対50光カプラーを用いて2つに分けた。一方をファイバ増幅器(EDFA)を通した後、ポンプ光として使用した。もう一方を単側波帯周波数変調器(SSBM)で中心周波数をブリルアン周波数シフト量(9.185 GHz)にFBSの共振周波数シフト量(30 MHz)分を足した周波数シフトさせた。この光をプローブ光として使用した。プローブ光と後方ブリルアン散乱のビート信号光を光検出器(PD)で電気信号に変換した後、電気スペクトルアナライザ(ESA)でブリルアン信号として観測した。FUT内の偏波は偏波スクランブラ(PSCR)で平均化した。遅延線として、5 kmのシリカ単モード光ファイバを用いた。室温は25°Cであった。光源に正弦波変調を施し、FUT中に相関ピークを発生させた。周波数をスイープすることで相関ピークをFUTに沿って掃引した。この時、変調周波数は、230.00 kHz-270.00 kHzとした。これは、測定レンジ447 mに相当する。

また、変調振幅は、0.101 GHzとした。これは、空間分解能42.47 mに相当する。

4. 実験結果

CFBSに基づく分布測定の実証を行った。ポンプパワーは17 dBm、プローブパワーは3.0 dBmである。ESAの中心周波数は942.28 MHzとした。これは、R0,19モードの共振周波数シフト量に相当する。ヒーターの温度は60°Cとした。図3にCFBSのブリルアン利得スペクトル(BGS)の分布図を示す。BGSパワーは規格化した。図3(a)より光相関領域法の分布が光相関領域法により測定可能であることが示された。図3(b)にCFBS-BFSの温度変化部のピークの中心周波数は946.16 MHzであった。CFBS-FBS量は3.88 MHzであり、これは、文献[9]においての35°Cの温度変化に一致する[9]。以上より、CFBSに基づく光相関領域法を用いた温度の分布測定に成功した。これは、「分布制御」という新たな分野を開拓すると共に、マルチコア光ファイバを用いた光ファイバ網オペレーションシステムの基盤技術の一つとして貢献する[2,11,12]。

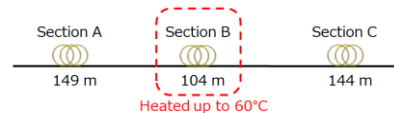


Fig. 1. FUT configuration.

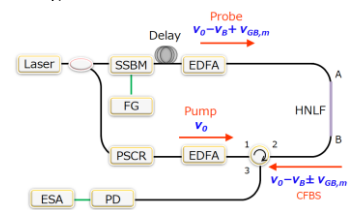


Fig. 2. Schematic setup for correlation-domain analysis based on CFBS seeded by BSBS. EDFA, erbium-doped fiber amplifier; ESA, electrical spectrum analyzer; FG, function generator; PD, photo detector; PSCR, polarization scrambler; SSBM, single side-band modulator.

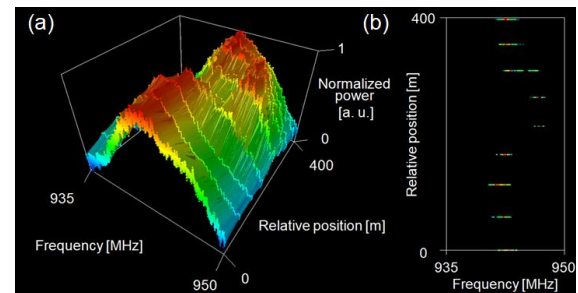


Fig. 3. (a) Measured CFBS-BGS distribution and (b) Measured CFBS-BFS distribution.

参考文献

- [1] R. M. Shelby et al., *Phys. Rev. B*, **31**, 5244 (1985).
- [2] M. Nakazawa et al., *Opt. Exp.*, **26**, 9165 (2018).
- [3] Y. Tanaka et al., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10**, 1769 (1998).
- [4] Y. Antman et al., *Optica*, **3**, 510 (2016).
- [5] N. Hayashi et al., *Opt. Exp.*, **25**, 2239 (2017).
- [6] Y. Tanaka et al., *Meas. Sci. Technol.*, **15**, 1458 (2004).
- [7] B. Gil et al., *Optical Components and Materials XV*, **10528**, ISOP (2018).
- [8] K. Hotate et al., *IEICE Trans. Electron.*, **E83-C**, 405 (2000).
- [9] N. Hayashi et al., *arXiv preprint arXiv:1804.00452* (2018).
- [10] N. Hayashi et al., *Appl. Phys. Exp.*, **10**, 092501 (2017).
- [11] H. H. Diamandi, Y. London, and A. Zadok, *Optica*, **4**, 289 (2017).
- [12] N. Hayashi et al., *Appl. Phys. Exp.*, **11**, 062502 (2018).