

歪ダイナミックレンジの制限のない高速 BOCDR の提案

High-speed configuration of BOCDR with no limitation of strain dynamic range

〇岸澤 知也¹, 佐野 元基¹, 野田 康平^{1,2}, 李 ひよん³, 中村 健太郎², 水野 洋輔¹

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

OKazuya Kishizawa¹, Motoki Sano¹, Kohei Noda^{1,2}, Heeyoung Lee³, Kentaro Nakamura², and Yosuke Mizuno¹

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

Emails: kishizawa-kazuya-py@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

インフラの健全性を診断する手法の一つとして、光ファイバ中のブリルアン散乱を用いた歪分布センサの開発が精力的に推進されている。これまでに多様な方式が提案されているが、我々は、測定ファイバ (FUT) の片端への光入射で動作し、高空間分解能やランダムアクセス性 (任意の点における高速測定が可能) などの利点を有する技術「ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR)」^[1]の性能向上に注力している。

2008 年の提案以降、BOCDR の動作は電気スペクトラムアナライザ (ESA) における周波数掃引に律速され、実現可能なサンプリングレート (1 点における歪測定速度) は 20 Hz に満たなかった^[1]。そこで、2016 年に、ESA による周波数掃引を撤廃した位相検波方式^[2]および傾斜利用方式^[3]という超高速 BOCDR を提案した。最高で 100 kHz という高いサンプリングレートを達成^[2]したものの、両方式ともに歪ダイナミックレンジ (測定可能な最大歪) が 0.2% 程度に制限されてしまうという問題があった^[2,3]。

そこで本研究では、歪ダイナミックレンジの制限を撤廃した高速 BOCDR を提案する。最大 0.7% となる動的歪を 10 kHz 程度の高いサンプリングレートで検出することができた。

2. 実験系と動作原理

提案する高速 BOCDR の実験系を Fig. 1 に示す。光学系は一般的な BOCDR と共通であり、1550 nm 帯のレーザの駆動電流に直接変調を印加し、光出力に対して周波数変調を施すことで、FUT 中に相関ピーク (=測定位置) を生成する。これを FUT 内で掃引し、ブリルアン利得スペクトル (BGS) およびブリルアン周波数シフト (BFS) の分布を取得する^[1]。本実験系の新規性は、BGS を取得するための信号処理系にある。まず、電圧制御発振器 (VCO) を用いて、周波数が高速に繰り返し掃引された電気信号を生成する。次に、これを BGS とミキシングし、ESA で観測、そのゼロスパン出力をオシロスコープで観測する。詳細は紙面の都合で省略するが、この一連の処理により、本来周波数領域であった BGS を時間領域に変換することができ、その結果、BGS のサンプリングレートの制限要因が、ESA の周波数掃引速度から VCO に印加する信号発生器の電圧掃引速度に移行され、高速測定が可能となる。

振動検出の実験で用いた FUT の構成を Fig. 2 に示す。振動による偏波変動の影響を抑制するために、偏波維持光ファイバ (PMF; BFS = 10.79 GHz) を用いた。64 cm の区間に 0.45% の静的歪を印加した状態で、さらに ±0.25% の動的歪 (40 Hz で正弦波振動) を印加した。変調周波数を 429.3 kHz とすることで、歪印加区間の中央に相関ピークを生成した。また、変調振幅は 4.9 GHz とした (理論空間分解能は約 50 cm)。

3. 実験結果

まず、FUT に歪を印加しない状態で、サンプリングレート (VCO に印加する電圧掃引信号の繰り返し周波数) を振って、時間領域で観測される BGS の形状の変化を調査した。サンプリングレートが 400 Hz、2 kHz、10 kHz、50 kHz のときの BGS を Fig. 3(a)–(d) にそれぞれ示す。縦軸は正規化した。400 Hz および 2 kHz のときは BGS の形状が明瞭であったが、10 kHz ではノイズが重量し始め、50 kHz ではピーク検出が困難となった。このノイズはサンプリングレートに関わらず一定の周期を有していた。この周期は約 430 kHz であり、変調周波数と一致したことから、レーザの周波数変調に伴う意図しない強度変調の影響であると推測される。このノイズは、直接変調方式かつ BGS 全体を取得する高速 BOCDR では本質的といえる。

次に、40 Hz の振動検出を実証した。サンプリングレートは、上記のノイズが十分に小さいと考えられる 8 kHz、および、比較のために 20 kHz に設定した。BGS および BFS の時間変動を Fig. 4(a)–(d) に示す。BGS の最大値を与える周波数を取得し 5 回平均した点を BFS としてプロットした。青線は理論曲線である。振動 1 周期のプロット点数は、8 kHz のときは 40 点、20 kHz では 100 点であることから、確かに設定通りのサンプリングレートが達成できていることが確認できた。8 kHz のときに比べて 20 kHz のときの歪の測定誤差が大きいの、先述のノイズの影響であると考えられる。今後、帯域除去フィルタや外部変調法^[4]による誤差低減の可能性を模索していく。

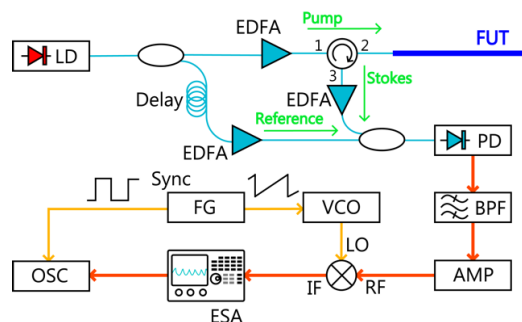


Fig. 1. Experimental setup for high-speed BOCDR without limitation of strain dynamic range. AMP: amplifier, BPF: band-pass filter, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, ESA: electrical spectrum analyzer, FG: function generator, FUT: fiber under test, IF: intermediate frequency, LO: local oscillator, OSC: oscilloscope, PD: photo diode, RF: radio frequency, VCO: voltage-controlled oscillator.

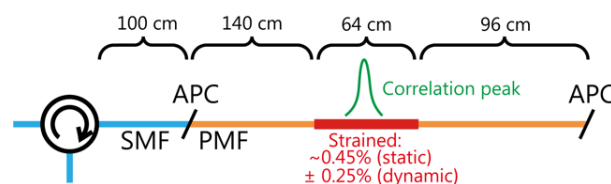


Fig. 2. Schematic structure of the fiber under test.

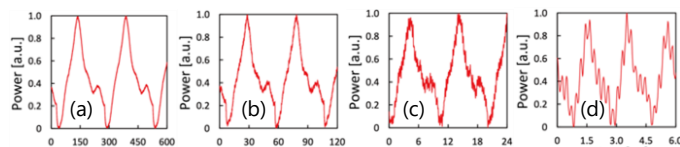


Fig. 3. Normalized time-domain BGS at sampling rates of (a) 400 Hz, (b) 2 kHz, (c) 10 kHz, and (d) 50 kHz.

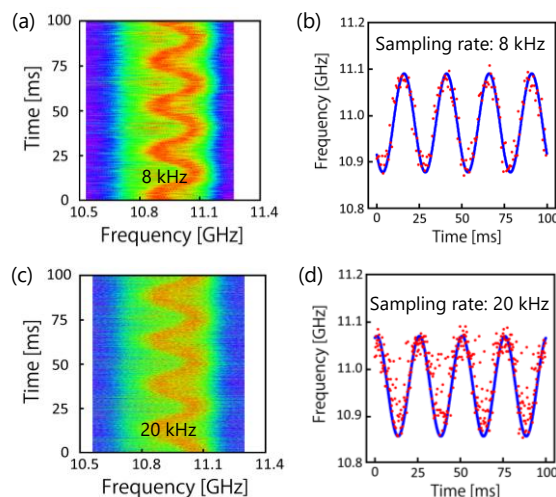


Fig. 4. Temporal variations of BGS and BFS at (a,b) 8 kHz and (c,d) 20 kHz when 40 Hz vibration was applied. The blue curves in (b) and (d) are theoretical trends.

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. Noda, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 068004 (2019).