

ノッチフィルタを用いた高速 BOCDR の信号対雑音比の向上

Improvement of signal-to-noise ratio in high-speed BOCDR using notch filter

○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 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

E-mails: 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、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 (SR) 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]。

この問題を解決するため、我々は歪ダイナミックレンジの制限を撤廃した高速 BOCDR を提案し、最大 0.7% となる動的歪を 10 kHz 程度の高い SR で検出できることを実証した[4]。しかし同時に、SR が比較的高く (変調周波数の数 10 分の 1 以上に) なると、レーザの直接変調に伴う意図しない強度変調の影響が顕著になり、振動測定の信号対雑音比 (SNR) が劣化してしまうことが判明した。

そこで本研究では、ノッチフィルタ (帯域除去フィルタ) を利用して強度変調に起因するノイズの影響を抑制し、高速 BOCDR による振動測定の SNR を向上させた。

2. 実験条件

今回用いた高速 BOCDR の実験系を Fig. 1 に示す。この系では、ブリルアン利得スペクトル (BGS) を周波数領域から時間領域に変換することで、高い SR を実現することができる (詳しい動作原理は[4]を参照)。従来の実験系に対して、電気信号処理にノッチフィルタ (BEF) を追加した。その際、BEF の中心周波数は、強度変調に起因するノイズの周波数、つまり、光源の変調周波数と一致させた (137.5 kHz)。

次に、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。230 cm の区間に 0.70% の静的歪を印加した状態で、さらに $\pm 0.16\%$ の動的歪 (40 Hz で正弦波振動) を印加した。変調振幅は 5.15 GHz とした。また、ノイズ抑制の効果を明瞭に観測するため、変調周波数は従来よりも低い 137.5 kHz とした (このとき歪印加区間の中央に相関ピークが生成されるよう、参照光路中の遅延ファイバの長さを調整した)。その結果、理論空間分解能は約 140 cm となった。

3. 実験結果

まず、FUT に歪を印加しない状態で、BEF によるノイズ抑制の効果を検証した。SR が 10 kHz および 20 kHz のときの時間領域 BGS を Fig. 3(a),(b) および Fig. 3(c),(d) にそれぞれ示す ((a),(c) は BEF なし、(b),(d) は BEF あり)。縦軸は、描画範囲内の最大・最小値で正規化した。BEF が無い(a),(c)では強度変調に起因する周期的なノイズが重畳した。ノイズの周波数は 137.5 kHz であり、変調周波数と等しいことが確認された。一方が、BEF を適用した (b),(d) では、ノイズが抑制され、BGS の形状が明瞭となった。

次に、40 Hz の振動検出における BEF の有用性を検証した。SR が 10 kHz および 20 kHz のときの BGS の時間変動を Fig. 4(a),(b) および Fig. 4(c),(d) にそれぞれ示す ((a),(c) は BEF なし、(b),(d) は BEF あり)。どの条件においても振動が検出されたが、BEF を適用しない(a),(c)では、強度変調に起因するノイズが細かい斜線となって現れた (変調周波数が SR の整数倍となっていないために、ノイズの位相が時間的に移動することに起因)。一方で、BEF を適用した (b),(d) では、斜線が消えており、ノイズの抑制が確認された。

このように BEF は高速測定における SNR を向上させるのに有用であることを示した。しかし、SR がさらに高くなり変調周波数に近くなった場合、本手法は BGS 自体を抑制してしまうため、有効ではないと考えられる。今後、ノイズ抑制手法としての外部変調法[5]の有効性を検証していく。

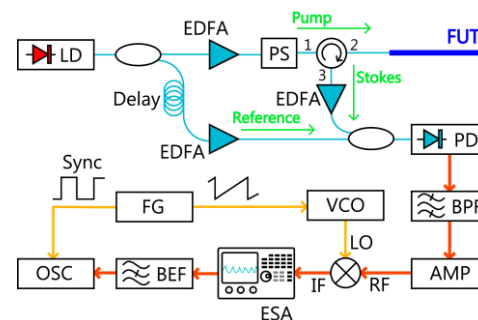


Fig. 1. Experimental setup for high-speed BOCDR. AMP: amplifier, BEF: band-elimination filter, BPF: band-pass filter, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, ESA: electrical spectrum analyzer, FG: function generator, FUT: fiber under test, IF: intermediate frequency, LO: local oscillator, OSC: oscilloscope, PD: photodetector, PS: polarization scrambler, RF: radio frequency, VCO: voltage-controlled oscillator.

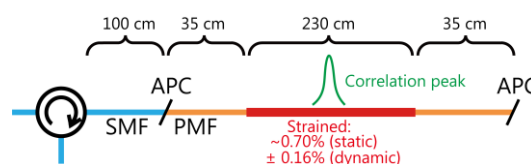


Fig. 2. Schematic structure of the fiber under test.

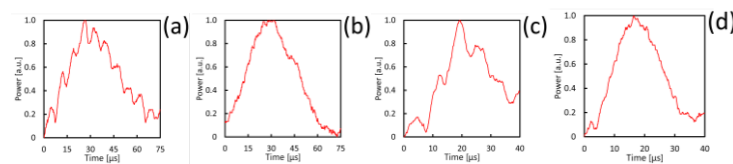


Fig. 3. Normalized time-domain BGS measured at sampling rates of (a,b) 10 kHz and (c,d) 20 kHz. The BEF was switched (a,c) off and (b,d) on.

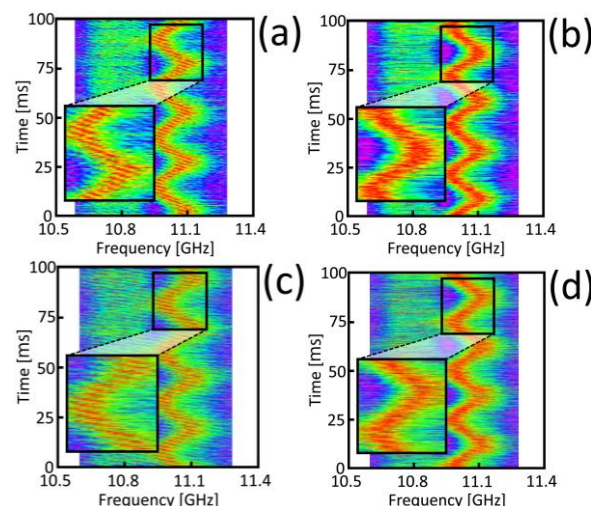


Fig. 4. Temporal variations of the BGS measured at (a,b) 10 kHz and (c,d) 20 kHz when 40 Hz vibration was applied. The BEF was switched (a,c) off and (b,d) on.

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] 岸澤 他, 2021 春応物, 19p-Z05-8.
- [5] K. Noda, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 068004 (2019).