超高速ブリルアン光相関領域リフレクトメトリ

Ultrahigh-speed Brillouin optical correlation-domain reflectometry

東京工業大学　精密工学研究所　○水野 洋輔　林 寧生　福田 英幸　中村 健太郎
P. & I. Lab., Tokyo Tech　○Yosuke Mizuno, Neisei Hayashi, Hideyuki Fukuda, and Kentaro Nakamura
E-mail: ymizuno@sonic.pi.titech.ac.jp

1. はじめに

近年、光ファイバ中のブリルアン散乱を用いた歪・温度分布センサの研究開発が精力的に推進されている。これまでに種々の方式（時間領域法 [1, 2]・周波数領域法 [3]・相関領域法 [4, 5]）が提案されてきたが、リアルタイム分布計測が可能な方式は 測定ファイバの両端から光を入射する構成に限られていた [2, 4]。両端からの光入射は、構造物等へセンサを敷設する際の自由度が減るほか、測定ファイバが1点でも破断するとシステム全体の動作が停止するという問題があった。

そこで本発表では、**ブリルアン光相関領域リフレクトメトリ（BOCDR）[5] を高速化**し、片端入射とリアルタイム動作を両立させた。同時に、信号対雑音比（SNR）の向上や歪ダイナミックレンジの拡大にも成功した。加えて、破断箇所を検出する機能や伝搬する機械波のリアルタイム検出も実証した。

2. 超高速 BOCDR の実験系と動作原理

超高速 BOCDR の実験系を **Fig. 1** に示す。光学系は基本的には従来の BOCDR [5] と同等であり、1550 nm 帯のレーザ出力を周波数変調することで測定ファイバ中に「相関ピーク」を形成し、これを掃引することで歪や温度の分布測定を実現する。

従来の BOCDR では、電気スペクトルアナライザ（ESA）の周波数掃引機能を用いてブリルアン散乱スペクトル（BGS）を周波数領域で検出していたために、サンプリングレートが 20 Hz 未満に制限されていた。これに対し、高速 BOCDR では、電圧制御発振器（VCO）を用いて BGS を時間領域で検出することで、数 100 Hz のサンプリングレートが実現できる。更に、位相検波技術を用いて BGS から周波数シフト（BFS）を算出することにより、システム全体の更なる高速化が可能である。

3. 基本性能の評価

まず、高速 BOCDR を用いて理論空間分解能を 48 mm に設定し、0.4 m の区間に印加された歪に対する BFS の依存性を調査した。その結果、2.0 % までの歪に対して依存性はほぼ線形で、その係数は 509.5 MHz/%であった。従来検出可能であった最大歪 0.7 % と比較し、約 3 倍の歪ダイナミックレンジが得られたといえる。また、48 mm の理論分解能で、7.0 m の測定ファイバ中の 80 mm の区間に印加した 0.6 % の歪を分布測定により検出できることも示した。その際、サンプリングレートは 50 Hz、測定点数は 200 とした。さらに、分布測定中にファイバの 1 点を破断させて BGS 分布の変化を観測したところ、破断点から先の領域ではブリルアン信号が大幅に減衰した。この結果から、スペクトルの最大パワーの分布に適切な閾値を設定することで、破断点が検出可能であるといえる。

次に、超高速 BOCDR の基本性能を実験的に評価した。その結果、BFS 算出処理の制約により検出可能な歪が 0.2 % 以下に制限されるものの、100 kHz のサンプリングレートを実現できることを明らかにした。これを用いて、30, 100, 300, 1000 Hz の局所的な振動を検出することに成功した。

4. 機械波伝搬のリアルタイム検出

超高速 BOCDR の有用性を実証するため、光ファイバを伝搬する機械波のリアルタイム検出を試みた。用いた測定ファイバの構成を **Fig. 2 (a)** に示す。17.6 m のシリカ光ファイバの 3.2 m の区間に、厚さ 1 mm、幅 0.1 m のゴムシートを粘着テープで貼り付けた。**Fig. 2 (b)** に示すように、この区間内に手動で機械的な波を生成し伝搬させた。また、分布測定のために、レーザの変調振幅は 0.5 GHz、変調周波数は 5.048–5.153 MHz の範囲で掃引した。これは、測定レンジ 20.4 m、理論空間分解能 0.39 m に相当する。1 点のサンプリングレートは 100 kHz、測定点数は 100、平均回数を 10 としたため、分布測定の繰り返しレートは 100 Hz（1 回の歪分布測定時間は 10 ms）であった。

測定した歪分布の時間変動を **Fig. 2 (c)** に示す。位置は、サーキュレータからの距離を表している。0.03 % 程度の歪が印加されている位置が時間とともにシフトしている。**Fig. 2 (c)** から機械波の移動速度を概算したところ約 8 m/s となり、**Fig. 2 (b)** からの計算値と同等であった。以上より、機械波の伝搬をリアルタイムに検出することに成功した。

5. まとめ

BOCDR を高速化し、光ファイバの**片端からの光入射で歪分布をリアルタイムに測定することに世界で初めて成功**した。最高サンプリングレートは 100 kHz であり従来の 5000 倍、歪ダイナミックレンジは 2.0 % であり従来の約 3 倍であった。加えて、本システムは、mm オーダの高空間分解能・高 SNR・低コストなどの利点を併せ持つ。これらの特徴を活かし、本発表では**歪分布測定のほか、振動測定、破断点検出、機械波伝搬の検出も実証**した。

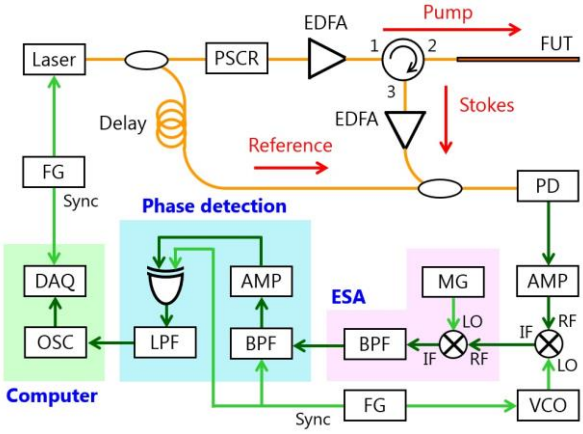

Fig. 1. Experimental setup for ultrahigh-speed BOCDR.

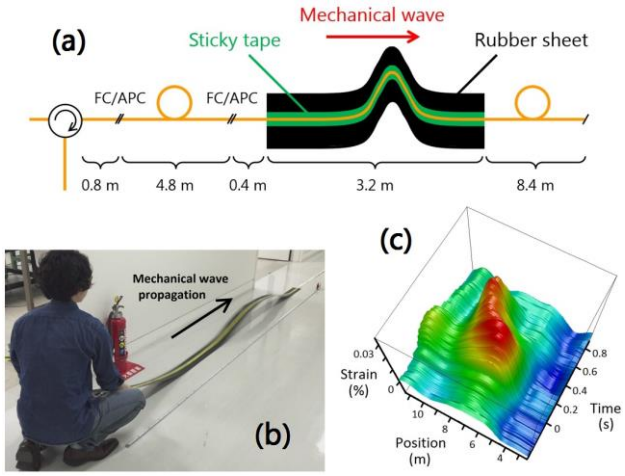

Fig. 2. (a) Schematic structure of the fiber under test. **(b)** Photograph of mechanical wave propagation. **(c)** Measured temporal variation of the strain distribution.

参考文献

[1] T. Horiguchi et al, *J. Lightwave Technol.* **7**, 1170 (1989).
[2] Y. Peled et al, *Opt. Express* **19**, 19845 (2011).
[3] D. Garus et al, *Opt. Lett.* **21**, 1402 (1996).
[4] K. Hotate et al, *IEICE Trans. Electron.* **E83-C**, 405 (2000).
[5] Y. Mizuno et al, *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).

© 2015年 応用物理学会