

Double-slope-assisted BOCDR の動作シミュレーション

Simulation on double-slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry

○鈴木 之大¹、捧 治紀¹、野田 康平^{2,3}、中村 健太郎²、水野 洋輔³、李 ひよん¹

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

○Yukihiro Suzuki¹, Haruki Sasage¹, Kohei Noda^{2,3}, Kentaro Nakamura², Yosuke Mizuno³, and Heeyoung Lee¹

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

E-mails: af19010@shibaura-it.ac.jp, hylee@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

インフラの老朽化が社会問題となっており、建物などの構造欠陥を監視するためのセンシング技術として分布型光ファイバセンサに注目が集まっている。特に、光ファイバ中のブリルアン散乱を用いた、歪や温度を定量的に測れる分布測定技術が盛んに研究されている。我々はその中でも、光波の相関制御に基づき位置分解を行う「ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR)」を研究対象にしている[1]。BOCDRでは、レーザに施した正弦波変調の変調周波数に対応した測定ファイバ内の特定位置からの散乱光のみが選択的に抽出でき、この変調周波数を制御することで分布測定を実現する。すなわち、測定ファイバの各位置におけるブリルアン利得スペクトル (BGS) の分布を取得することで、歪や温度の情報に読み替え可能なブリルアン周波数シフト (BFS) の分布が得られる。基本系では、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 BGS を取得するが、ESA の周波数掃引は比較的低速であるため、高速動作が困難であった。

この問題を解決すべく、位相検波 BOCDR[2]と傾斜利用 (Slope-assisted; SA-) BOCDR[3]が提案された。中でも、傾斜利用 BOCDR は、ESA のゼロスパン機能を用いて、BGS の左側傾斜部における特定周波数のパワー変動を BFS に対応付けることで動作する。これにより、測定ファイバの各測定箇所における BGS 全体の取得が不要となり (ESA の周波数掃引が撤廃され)、リアルタイム動作が可能となる。他にも、超理論空間分解能効果[4]や測定ファイバ内の損失点が検出可能[5]であることなどのメリットを有する。しかし、傾斜利用 BOCDR は特定周波数のパワーのみに基づき測定を行うため、測定ファイバ中に光損失が生じた場合、歪や温度の測定に大きな影響を受ける。これまでに、低曲げ損失ファイバを用いて光損失の影響を緩和することに成功したが[6]、曲げ損失以外の光損失に対しては未だこの問題は解決できていなかった。そこで我々は最近、曲げ損失以外のあらゆる光損失にも影響を受けない新方式「両側傾斜利用 (Double-slope-assisted; DSA-) BOCDR」を提案した[7]。しかし、基本動作は実験的に確認できているものの、動作シミュレーションは未実施であった。

そこで本稿では、DSA-BOCDR の動作シミュレーションを行い、実験結果との対比を行ったので報告する。

2. 方法

提案する両側傾斜利用 BOCDR に歪および損失が印加されたときのシミュレーションを行った。まず、FUT から戻ってくる BGS の形状は、ローレンツ関数を用いて近似した (高さが 0 ~ 1 になるよう標準化した)。このとき、半値全幅とピーク周波数をそれぞれ 30 MHz, 10.81 GHz とした (半値全幅は典型値、中心周波数は後述の実験値を参考にした)。

BGS 上の 2 周波数選択パターンは、次の 3 通りとした : (A) 10.77, 10.85 GHz, (B) 10.78, 10.84 GHz, (C) 10.80, 10.88 GHz (Fig. 1)。 (A), (B) は同じパワーを有する組み合わせである。一方、(C) は異なるパワーの組み合わせである。先述のローレンツ曲線と 2 周波数の組み合わせを用いて歪印加時、損失印加時の BGS 上の 2 周波数におけるパワー比の変化をシミュレーションした。印加する歪は 0 ~ 0.2%, 損失は 0 ~ 10 dB とした。

3. 結果

Fig. 2(a) に、歪印加時の結果を示す。横軸は印加した歪の大きさを表している。縦軸は印加された歪の大きさに対する 3 パターンの 2 周波数のパワー比を表している。つまり、右側周波数パワーから左側周波数パワーを引いて計算する。波形の色ごとに青が (A)、緑が (B)、赤が (C) に対応している (Fig. 1 中の色に対応)。また、パワー比の傾きが感度、変曲点がダイナミックレンジ (正しい歪が検出可能な範囲) に対応している。このシミュレーション結果から (A), (B), (C) すべての組み合わせでのパワー比が変動していることが分かる。また、ダイナミックレンジが (A), (B), (C) それぞれで 0.08, 0.06, 0.14%

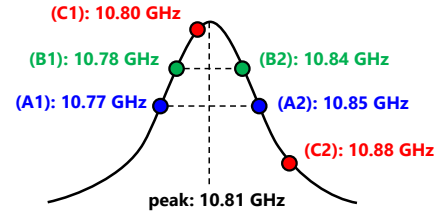


Fig. 1. Schematic of power-measured frequency pairs.

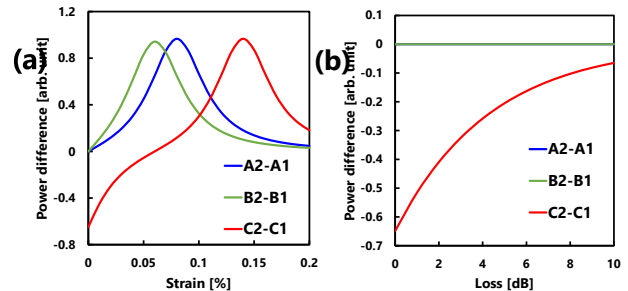


Fig. 2. Simulated power ratios plotted as functions of (a) strain and (b) loss.

となっており、異なるパワーを有する周波数パターンが最も大きいダイナミックレンジを有することが明らかになった。

次に、損失印加時のシミュレーション結果を Fig. 2(b) に示す。横軸は印加した損失の大きさを表している。縦軸は印加された損失の大きさに対する 3 パターンの 2 周波数のパワー比を表している。歪のときと同様で、波形の色ごとに青が (A)、緑が (B)、赤が (C) に対応している。この結果から、同じパワーを有する (A), (B) のパワー比は常に 0 であることが分かる。そのほか、異なるパワーを有する (C) のパワー比は損失が増えるにつれ増加していることが分かる。これにより、(A), (B) のような同じパワーを有する 2 周波数を選択すれば、損失の影響を除去できるといえる。

以上の結果は、前回の報告[7]と定性的に一致しているが、定量性には課題が残る。そこで、本シミュレーションの改善点について考察する。今回は、FUT 全長から戻る BGS に対する 30 MHz を BGS の帯域幅として採用した。これは時間領域法を用いる「ブリルアン光時間領域反射計」では概ね正しいが、光周波数を変調する BOCDR では大幅に広がる事が分かっており、これを考慮して BGS モデルを再現するべきである。また、BOCDR 測定系では、測定位置に空間分解能程度の幅を有する相関ピークを生成させる。しかし、測定位置の外側における相関ピークの裾野の影響により、周波数方向に拡散したノイズフロア (富士山型ノイズフロアとも呼ばれる) が発生する[8]。このノイズフロアは測定位置に印加された歪や温度変化による影響を受けない (つまり、周波数がシフトしない)。そのため、今回のシミュレーションでは BGS 全体がシフトすると仮定して行ったが、実際の挙動とは異なる。以上 2 点の BGS の帯域幅とノイズフロアを考慮した厳密な BOCDR の BGS 分布シミュレーションに基づき、DSA-BOCDR の挙動を評価する必要がある。

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] H. Lee et al., Opt. Express **24**, 29190 (2016).
- [5] H. Lee et al., Appl. Phys. Express **11**, 072501 (2018).
- [6] H. Lee et al., Sci. Rep. **8**, 7844 (2018).
- [7] 鈴木 他, 2022 秋応物, 21p-A406-9.
- [8] K. Y. Song et al., J. Lightwave Technol. **25**, 1238 (2007).