

簡素化 OCDR における動作速度と空間分解能のトレードオフの解消

Mitigation of trade-off between operating speed and spatial resolution in simplified OCDR

○宮前 知弥¹、朱 光韜¹、清住 空樹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

OT. Miyamae¹, G. Zhu¹, T. Kiyozumi¹, K. Noda^{1,2}, H. Lee³, K. Nakamura², and Y. Mizuno¹

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

Emails: miyamae-tomoya-my@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

光ファイバ通信が急激に広まると同時に、光ファイバ通信ネットワークの健全性を診断する技術が求められている。ファイバ間の接続不良箇所や断点を検出する技術として、光相関領域リフレクトメトリ (OCDR) [1]が注目を集めている。OCDRは、被測定光ファイバ (FUT) に沿った反射率の分布を計測する技術であり、ランダムアクセス性 (FUTの任意の位置で高速測定が可能) やリアルタイム動作性などのユニークな特長を有している。

標準的な OCDR では、FUT からの反射光あるいは参照光に対して音響光学変調器 (AOM) を用いて周波数を数 10 MHz シフトさせ、光ヘテロダイン検波を行う。これにより、低周波ノイズの影響を低減していた[1]。一方、システムの簡素化を図るため、これまでに AOM を撤廃した OCDR が開発されている[2]。しかし、AOM を撤廃した OCDR を含めた従来の全ての OCDR では、電気信号を処理する際に、電気スペクトラムアナライザ (ESA) が使用されていた。ESA は大型かつ高コストのデバイスであるため、システムの更なる簡素化を阻む要因となっていた。また、ESA のフィルタ性能に限界があるため、高速測定における空間分解能の向上が困難であった。

この問題を解決すべく、我々は最近、AOM に加えて ESA も撤廃した極めて簡素な OCDR を実現し[3]、空間分解能が向上することを明らかにした。また、ESA を用いた場合の最高動作速度 (= 繰り返し周波数) である 100 Hz においても高い空間分解能を維持したまま安定に動作したため、更なる高速測定の可能性が示唆された。

そこで本研究では、ESA を撤廃した簡素化 OCDR において、従来の最高値の 10 倍となる動作速度 (1 kHz) で反射率分布測定を行った。また、1 kHz までの高速動作においては、従来は動作速度と空間分解能がトレードオフの関係にあったが、ESA の撤廃によって本トレードオフが解消されることを実証した。

2. 原理と実験系

OCDR では、レーザ光に正弦波変調を施し、FUT 中に測定点となる相関ピークを形成する。変調周波数を制御して相関ピークを FUT に沿って掃引することで、反射率の分布測定が可能となる[1]。ESA を撤廃した簡素化 OCDR の動作原理は文献[4]に記した。

ESA を使用した OCDR と ESA を撤廃した簡素化 OCDR の実験系を Fig. 1 に示す。光学系は、従来の AOM を含まない OCDR と同等である。ESA を使用した OCDR では、ESA のゼロスパン機能を用い、1 MHz の成分の時間変化をオシロスコープ (OSC) で検出した。分解能帯域幅は 300 kHz、ビデオ帯域幅も 300 kHz に設定した。ESA を撤廃した OCDR では、光信号をバンドパスフィルタ機能付きのフォトディテクタ (PD) で電気信号に変換した後、ESA を介さずに、直接 OSC に入力し時間波形を観測した。

変調周波数は 2.017 MHz から 2.119 MHz まで掃引し、変調振幅は 1.9 GHz とした。このときの理論空間分解能は、25.5 mm であった。実験に用いた FUT の構成を Fig. 2 に示す。本実験では、コネクタ A から開放端に向かって距離が 0-32 m の区間の反射率分布測定を行った。

3. 実験結果

まず、動作速度 1 kHz における反射率分布測定の基本動作を確認した。ESA を撤廃した OCDR で測定された反射光パワーの分布を Fig. 3 に示す (64 点データ取得し、その max 値を表示)。比較のため、同じ条件下で ESA を使用した場合の結果 (平均 64 回) も示した。それぞれのノイズフロアの平均値を 0、最大ピーク値を 1 と規格化した。ESA の有無に関わらず、PC コネクタ B、D、F、および開放端 G での反射による明瞭なピークが観測され、動作速度 1 kHz においても正しく動作することが確認された。また、ESA を撤廃することによって、各ピークの裾野の広がりや抑制されていることが明らかになった。

次に、コネクタ B 付近における規格化した反射光パワー分布の拡大図を Fig. 4 に示す。ESA を撤廃した場合の方がピークの幅が狭くなっている。続いて、線幅を定量評価するため、両者に対してローレンツ曲線でフィッティングしたグラフを Fig. 5 に示す。半値全幅 (空間分解能に相当) は ESA を使用した場合が 185 mm、ESA を撤廃した場合が 62.7

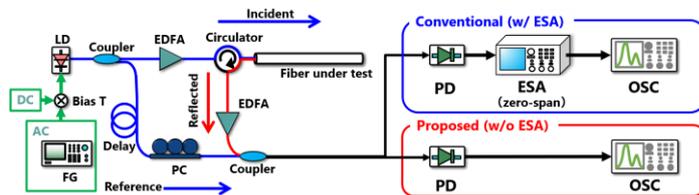


Fig. 1. Experimental setup of simplified OCDR without ESA. EDFA: erbium-doped fiber amplifier, ESA: electrical spectrum analyzer FG: function generator, LD: laser diode, OSC: oscilloscope, PC: polarization controller, PD: photo detector.

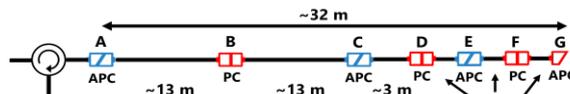


Fig. 2. Structure of fiber under test (FUT).

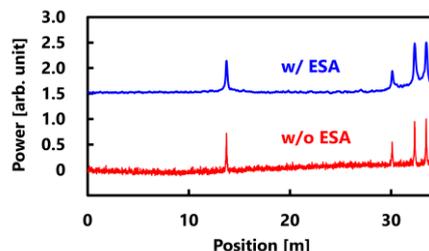


Fig. 3. Normalized reflected power distributions with and without ESA. The data with ESA are vertically shifted by 1.5.

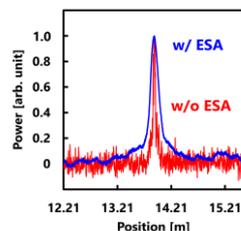


Fig. 4. Normalized reflected power distributions magnified around Connector B.

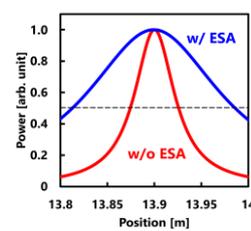


Fig. 5. Lorentzian-fitted curves of reflected power distributions around Connector B.

mm であった。最後に、10 Hz から 1 kHz までの動作速度で変化させたときの半値全幅の変化を Fig. 6 に示す。ESA を使用した OCDR では、動作速度の高速化に伴い、半値全幅が広がった。それに対して、ESA を撤廃した OCDR では、動作速度に依らず半値全幅はほぼ一定であった。以上より、ESA を撤廃することにより、OCDR の動作速度と空間分解能のトレードオフを解消できることを明らかにした。

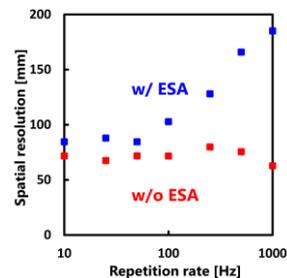


Fig. 6. Measured spatial resolution when the repetition rate was changed.

参考文献

- [1] K. Hotate, et al., Meas. Sci. Technol. **15**, 148 (2004).
- [2] M. Shizuka, et al., Appl Phys. Express **9**, 032702 (2016).
- [3] 宮前 他, 2021 春応物, 19p-Z05-7.
- [4] 朱 他, 2021 秋応物, 発表予定.