

外部変調方式に基づく光相関領域反射計の検討

External modulation scheme for optical correlation-domain reflectometry

東京工業大学 未来産業技術研究所 ○野田 康平、韓 起運、李 熙永、水野 洋輔、中村 健太郎

FIRST, Tokyo Tech ○Kohei Noda, Giwoon Han, Heeyoung Lee, Yosuke Mizuno, and Kentaro Nakamura

E-mail: knoda@sonic.pi.titech.ac.jp

1. はじめに

光相関領域反射計 (OCDR) [1]は、光ファイバに沿った反射点の分布を検出する、近年開発された高度な診断技術である。OCDR は従来の手法よりも、高空間分解能や高サンプリングレート (短い測定時間) であるという長所を有する。これまでに、我々は OCDR の利便性の向上や実装コストの低減のため、周波数シフタを用いない構成[2]や参照光路を用いない構成[3]を提案してきた。

しかし、これまでに提案されたあらゆる OCDR は、レーザの駆動電流の直接変調に基づき、出力光の周波数を変調することで動作していた。しかし、本構成には 3 つの欠点があった。すなわち、(1) 通常のレーザは駆動電流の高速・大振幅での変調を想定して設計されていない (十分な性能を得るためには、用いるレーザを選択する必要がある)、(2) 光周波数の変調に伴い、光パワーも必ず変調される (意図しないアポダイゼーション効果により、性能が劣化する場合がある)、(3) 変調振幅 Δf と変調周波数 f_m が相互に依存するため、両者を独立に制御するのは困難 (測定位置によって空間分解能が大きく変動する場合がある)、という欠点である。

そこで本発表では、これらの欠点を緩和するために、レーザの駆動電流を直接変調せずに、外部変調器を用いて周波数変調された光を生成する手法を提案する。直接変調法と外部変調法の両者について、スペクトル形状・変調周波数・変調振幅の関係を調査し、外部変調法の利点を実験的に示す。

2. 提案

OCDR では、光に周波数変調を施すことで、測定光ファイバ (FUT) 上に周期的な「相関ピーク」を形成し、特定位置からの反射光のみを選択的に観測する。変調周波数 f_m を制御し、相関ピークを FUT に沿って掃引することで分布測定が実現される。周波数が変調された光を生成するために、従来はレーザの駆動電流の直接変調が用いられていた。これに対し、我々は外部変調を用いた手法を提案する。

外部変調に基づく OCDR の実験系 (概念図) を、Fig. 1 に示す。外部変調法では、レーザの駆動電流を直接変調する代わりに、両側波帯変調器 (DSBM) と光フィルタを用いて光周波数変調を実現する。光周波数のシフト量は、電圧制御発振器 (VCO) から DSBM に印加されるマイクロ波の周波数に対応している。ここで、VCO に印加されている電圧を波形発生器 (FG) で制御することで、この周波数シフト量を高速に掃引することができる (以下の実験では、VCO として Analog Devices 社の HMC733LC4B を用いた。10 GHz から 21 GHz の範囲で高速掃引が可能である)。

3. 実験的検証

直接変調と外部変調それぞれについて、周波数変調された光のパワースペクトルの形状や変調周波数、変調振幅の関係を実験的に調査した。

まず、直接変調の場合について、別の波長可変光源との光ヘテロダイン検波を用いて、光パワースペクトルを観測した。変調周波数 f_m を 10 kHz から 5 MHz まで (OCDR の測定レンジでは約 10 km から 20 m に対応) 増加させたときの光スペクトルの変化を Fig. 2(a) に示す。レーザの駆動電流に施した交流電圧振幅 ΔV_{LD} は 1 V に固定した。観測されたスペクトル形状は、正弦波変調の理想的なパワースペクトルとは大きく異なっていた。これは、レーザ出力の周波数変調の際、必ず強度変調を伴うためと考えられる。

次に、外部変調の場合についても、同様の測定を行った。同一光源からの出力を二分し、一方を変調した後、もう一方と自己ヘテロダインすることで、光スペクトルを観測した。 f_m を増加させたときの光スペクトルの変化を Fig. 2(b) に示す。VCO に施した交流電圧振幅 ΔV_{VCO} は 3 V に固定した。観測されたスペクトルは、正弦波変調の理想的なパワースペクトルと形状が類似していた。これは、外部変調では顕著な強度変調を伴わないためと考えられる。

続いて、直接変調と外部変調それぞれについて、変調振幅

Δf (スペクトル幅の半分) を f_m に対して重ねてプロットしたのが Fig. 3 である。直接変調の場合、 f_m の増加に伴い、 Δf は、まず小さくなり、その後大きくなった。この振る舞いは、レーザの時定数との関係に起因している可能性がある (現在調査中)。このように、直接変調では Δf が f_m に大きく依存することが明らかになった。一方、外部変調の場合、 f_m の変化に対する Δf の変動は測定範囲では 3%未満であり、 Δf は f_m に対して顕著な依存性を示さなかった。

以上の実験結果により、直接変調法の欠点 (強度変調の誘起・変調振幅と変調周波数の相互依存性) を外部変調法により、劇的に改善できることを示した。今後は、本手法を用いた OCDR による分布測定を実証する予定である。なお、本手法は、ブリルアン OCDR (BOCDR) [4]や、ブリルアン光相関領域解析法 (BOCDA) [5]にも適用可能であると期待される。

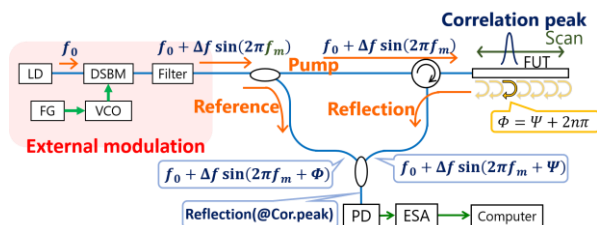


Fig. 1. Conceptual schematic of optical correlation-domain reflectometry (OCDR) based on external modulation. DSBM: double-sideband modulator, ESA: electrical spectrum analyzer, FG: function generator, LD: laser diode, PD: photo diode, VCO: voltage-controlled oscillator.

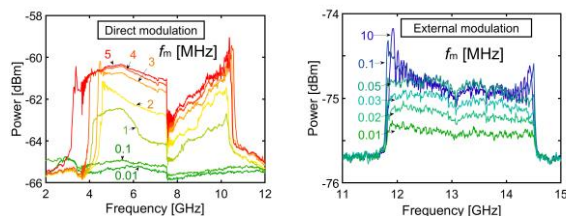


Fig. 2. Power spectra at different modulation frequency f_m . (a) Direct modulation, and (b) external modulation.

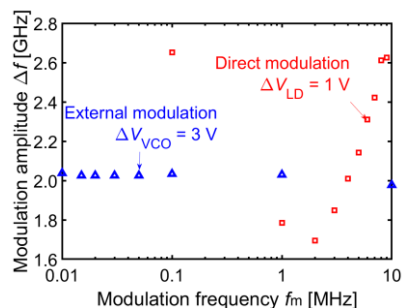


Fig. 3. Measured dependencies of modulation amplitude Δf on modulation frequency f_m . Red: direct modulation; blue: external modulation.

参考文献

- [1] K. Hotate, *Meas. Sci. Technol.* **13**, 1746 (2002).
- [2] M. Shizuka et al., *Appl. Phys. Express* **9**, 032702 (2016).
- [3] M. Shizuka et al., *Appl. Opt.* **55**, 3925 (2016).
- [4] Y. Mizuno et al., *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).
- [5] K. Hotate et al., *IEICE Trans. Electron.* **E83-C**, 405 (2000).