

光ファイバモード間干渉型高速温度センサにおける 感度とダイナミックレンジのトレードオフの観測

Trade-off between sensitivity and dynamic range in

high-speed temperature sensors based on fiber-optic modal interference

○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

○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: sano-motoki-vn@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

ビルの内壁やダム、橋梁、飛行機の翼など、多様化する構造物の経年劣化や地震による損傷などを監視するために、光ファイバを用いた歪・温度センシング技術の研究開発が推進されている。中でも、構成が単純で低廉な手法として、光ファイバ中のモード間干渉を用いた歪・温度センサが注目されている。

光ファイバ中のモード間干渉を観測するための簡素な構成の一つは、1本の多モード光ファイバ (MMF) を2本の単一モードファイバ (SMF) で挟み込んだ「SMS 構造」である[1-5]。この構造では、一方の SMF からの入射光のエネルギーが MMF 中で複数の伝搬モードに分配され、もう一方の SMF に出力される際に各伝搬モードが干渉する。結果として、SMS 構造に広帯域光を入射すると、透過光のスペクトルに特異な干渉パターンが生じる。ここで、MMF に歪や温度変化が加わると屈折率やファイバ長が変化し、干渉パターンがシフトする。このシフト量を測定することで、歪や温度を推定することができる。

SMS 構造を初めて提案した Liu ら[1]は、長さ 1.8 m の屈折率傾斜型 (GI) のシリカ MMF を用いて、1550 nm 帯で -18.6 pm/μe の歪感度および +58.5 pm/°C の温度感度を得た。また、Tripathi ら[2]は、歪・温度感度の絶対値および符号が MMF の構造や材料に大きく依存することを示した。更に、Huang ら[3]は、より大きい歪の測定にも適用できるように、MMF として標準的なアクリル (PMMA) をベースとした長さ 0.16 m プラスチック光ファイバ (POF) を導入し、1570 nm 帯で歪感度 -2.82 pm/μe および温度感度 +93.1 pm/°C を得た。一方、我々はこれまでに、長さ 1.0 m、コア径 62.5 μm の全フッ素化 GI-POF を用いて、1300 nm 帯で -112 pm/μe の歪感度および +49.8 nm/°C の温度感度を得た (従来よりも桁違いに高感度) [4]。

これらのモード間干渉に基づくセンサは、広帯域光の透過スペクトルを光スペクトラムアナライザ (OSA) により観測し、そのディップやピークの波長から歪や温度を推定していた。しかし、OSA の波長掃引は比較的低速であるため、歪や温度の情報をリアルタイムに取得することは困難であった。

この動作速度の問題を解決するために、我々はスペクトルの傾斜パワーを利用する手法を提案した[5]。本手法では、OSA のゼロスパン機能を利用し、固定波長におけるスペクトルパワーの時間変化を観測する。波長掃引が不要となるため、高速測定が可能となる。これまでに基本動作はすでに実証したものの[5]、計測に用いる波長の最適化の指針は未解明であった。

そこで本研究では、温度に対する傾斜パワーの変化を広帯域で調査し、用いる波長と温度ダイナミックレンジや感度との関係について解明したので報告する。

2. 実験

用いた実験系を Fig. 1 に示す。白色光源から出力された広帯域光を 0.5 m の屈折率傾斜型シリカ MMF を含む SMS 構造に入射し、透過光を OSA で観測した。MMF の全長をホットプレートで加熱し、ホットプレートの温度に対するスペクトル形状の温度依存性を測定した。

1100-1600 nm の範囲で測定した透過スペクトルの温度依存性を Fig. 2(a) に示す。また、事前に取得した 31.5 °C のスペクトルからの差分スペクトルの温度依存性を Fig. 2(b) に示す (各スペクトルの色と温度の対応は Fig. 2(a) と同様)。温度の上昇に伴いスペクトルは短波長側にシフトし、その依存係数は短波長帯ほど高い傾向にあった。また、干渉パターンの間隔は短波長帯ほど広い傾向にあった。これらの特徴は、モード間干渉における臨界波長[2]が 1100 nm 以下に存在することを示している (より広帯域での測定により、臨界波長は約 980 nm であることを確認済み)。なお、温度を下げるとスペクトル形状が元に戻ることも、および、SMF を加熱してもスペクトル形状に影響はないことを確認した。

次に、Fig. 2(b) の相対パワーの温度依存性が波長によってどのように変化するかを調査した。その際、各ピークやディップ付近で、パワーが単調に変化する温度範囲 (温度ダイナミックレンジに相当) が最大となる波長を 7 つ選択した (Fig. 2(b) に黒点として示す)。各波長における相対パワーの温度依存性を Fig. 3(a) に示す。温度に対してパワーは増加 (ピークするとき) あるいは減少 (ディップするとき) するが、波長によってはある



Fig. 1 Experimental setup.

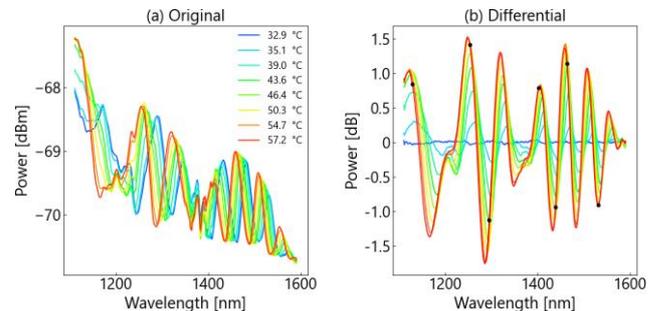


Fig. 2 Temperature dependencies of the transmitted (a) original and (b) differential spectra. The black points in (b) indicate the wavelengths for further analysis.

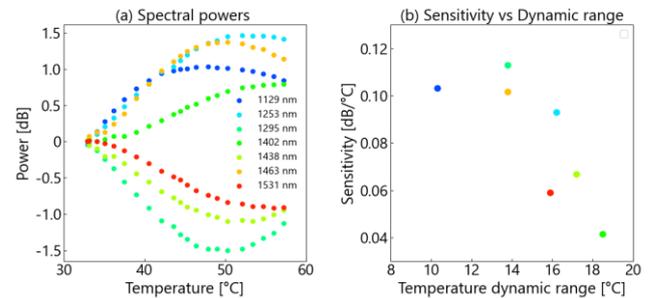


Fig. 3 (a) Temperature dependencies of the spectral powers at wavelengths indicated in Fig. 2(b). (b) Temperature sensitivity plotted as a function of temperature dynamic range. The colors of the plots in (b) correspond to those in (a).

温度で増加が減少に、あるいは、減少が増加に転じた。温度とパワーが一対一対応する範囲でのみセンサ応用が可能であることを踏まえ、ここでは温度ダイナミックレンジを「パワー変化の最大値の 90% に達するまでの温度変化」、温度感度を「温度ダイナミックレンジ内におけるパワーの温度依存係数の絶対値」と定義した。各波長について、温度ダイナミックレンジに対して温度感度をプロットしたのが Fig. 3(b) である。温度ダイナミックレンジと温度感度はトレードオフの関係にあることが明らかになった。また、観測波長が短いほど (臨界波長に近いほど) 感度が高くダイナミックレンジが狭い傾向にあるのは臨界波長に関する理論通りの結果であるが、例外的な波長も存在した。これは、モード間干渉パターンの振幅の特異な波長依存性 (Fig. 2(b)) に起因するものと考えられる。以上の結果は、傾斜利用法による高速測定において使用すべき波長を決定する際の重要な指針となる。

参考文献

- [1] Y. Liu, et al., *Appl. Opt.* **46**, 2516 (2007).
- [2] S. M. Tripathi, et al., *J. Lightw. Technol.* **27**, 2348 (2009).
- [3] J. Huang, et al., *Opt. Lett.* **37**, 4308 (2012).
- [4] G. Numata, et al., *IEEE Photon. J.* **6**, 6802306 (2014).
- [5] 佐野 他, 2021 秋応物, 21p-P11-5.