

BOCDR における空間分解能の向上: 変調周波数と変調振幅の寄与の比較

Study on spatial resolution improvement in BOCDR

○越智 星河¹, 尾崎 滉太¹, 野田 康平^{1,2}, 李 ひよん³, 中村 健太郎², 水野 洋輔¹¹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OSeiga Ochi¹, Kouta Ozaki¹, Kohei Noda^{1,2}, Heeyoung Lee³, Kentaro Nakamura², and Yosuke Mizuno¹¹Yokohama National University ²Tokyo Institute of Technology ³Shibaura Institute of Technology

Emails: ochi-seiga-xv@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

社会インフラの経年劣化や災害による損傷が大きな問題として浮上しており、電気センサにはない多くのメリットを有する光ファイバセンサに注目が集まっている。種々の光ファイバセンサが提案されているが、ここでは、測定ファイバ (FUT) 中のブリルアン散乱の周波数シフトに基づき、高い空間分解能で温度や歪の分布を測定できる「ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR)」[1]に焦点を絞る。

標準的な BOCDR では、レーザの駆動電流を直接変調することで、出力光に周波数変調を印加する。その結果、FUT 中に相関ピーク (測定点) が生成され、これを掃引することで分布測定を実現する[1]。BOCDR の空間分解能は、理論的には変調振幅と変調周波数の積に反比例することが知られている[2]。しかし、パワー変調を必然的に伴う直接変調方式の場合、変調振幅と変調周波数の空間分解能への寄与の仕方は異なると考えられる。これまでに基礎検討は行われているものの[3]、実験条件が最適化されておらず、BOCDR の空間分解能向上のための指針を打ち出すまでには至っていない。

そこで本研究では、直接変調方式の BOCDR において、変調振幅と変調周波数のうち一方だけを変化させたときの分布測定を高い信号対雑音比で行い、空間分解能が向上する様子を比較し、両者の空間分解能への寄与の仕方を検証するとともに、空間分解能向上のための指針を打ち出す。

2. 原理

BOCDR の理論空間分解能 Δz は、以下の式で与えられる[2]。

$$\Delta z \approx \frac{c\Delta\nu_B}{2\pi n f_m \Delta f} \quad (1)$$

ここで、 Δf は変調振幅、 f_m は変調周波数、 c は光速、 $\Delta\nu_B$ はブリルアン帯域幅 (約 30 MHz)、 n はコアの実効屈折率 (約 1.46) である。このように、理論空間分解能は変調振幅 Δf と変調周波数 f_m の双方に反比例するため、 Δf と f_m のどちらを増加させても空間分解能は向上する (値は小さくなる)。しかし、直接変調方式の BOCDR ではパワー変調を必然的に伴うので、実際に得られる空間分解能は式(1)とは必ずしも一致しない (アポダイゼーションの効果により劣化する傾向にある)。単純に考えると、パワー変調の大きさは、 Δf を保ったまま f_m を増加させても変化しない。一方、 f_m を保ったまま Δf を増加させると、パワー変調の大きさも増大する。よって、両者では空間分解能への寄与の仕方が異なると考えられる。

3. 実験方法

Fig. 1 に示す実験系を用いた (詳細は省略)。長さ 4.5 m の標準的なシリカ単一モード光ファイバを FUT として用い、その 100 cm の区間 (サーキュレータから 100–200 cm 離れた区間) に約 0.3% の歪を印加した。このとき、 Δf および f_m のどちらかだけを初期値から 4 倍まで増加させた場合のブリルアン周波数シフト (BFS) の分布を測定した。初期値は、変調振幅 Δf を 0.5 GHz、 f_m を 1071.5–1076.5 kHz (5 次の相関ピーク) に設定した。初期値における理論空間分解能は 1.8

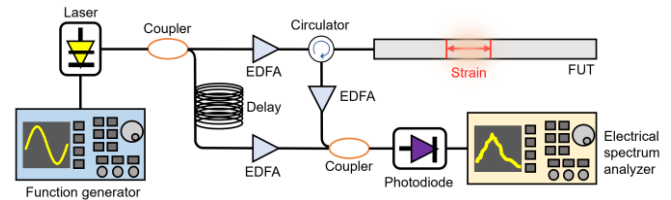
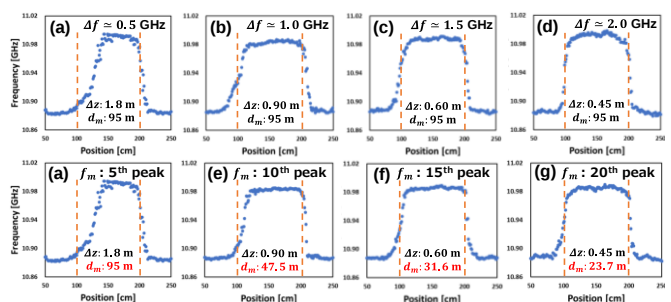


Fig. 1. Schematic setup of direct-modulation BOCDR.

Fig. 2. Measured BFS distributions. (a)-(d) f_m : constant, Δf : changed; (e)-(h) f_m : changed, Δf : constant.

m、測定レンジは約 96 m であった。すなわち、 Δf と f_m のうち一方を 2 倍にしたときに理論空間分解能が実際の歪印加区間の長さを下回ることになる。

4. 実験結果と考察

歪印加区間付近の BFS 分布の測定結果を Fig. 2 に示す。

Figs. 2(a)-(d)は Δf を増加させたとき、Figs. 2(a),(e)-(g)は f_m を増加させたときの結果である。(a)-(g)において、横軸は FUT の手前からの位置であり、橙色の破線は実際の歪印加区間 (100–200 cm 間) を表す。(b)と(e)、(c)と(f)、(d)と(g)はそれぞれ理論空間分解能は同等である。 Δf と f_m のそれぞれを増加させたときの BFS 分布の測定結果には、顕著な違いは観測されなかった。すなわち、この実験条件下においては、レーザの直接変調に伴うパワー変調の影響は極めて小さいことが明らかになった。一方、測定レンジ d_m は変調周波数 f_m のみに反比例するため、(d)と(g)では前者の方が 4 倍長い測定レンジを有する。よって、測定レンジも考慮すると、 f_m より Δf を増加させる方が好ましいといえる。

以上の実験結果から、レーザの直接変調に基づく BOCDR の空間分解能を変調パラメータの制御により向上させる際は、「まずは変調振幅を上限まで増加させ、その後に変調周波数を増加させるべき」という指針を打ち出せる。なお、変調振幅の上限は、レイリー散乱に起因するノイズの影響で BFS の半分に制限されることが理論的に知られている (実際には、レーザへの負荷により上限が決まることもある)[1]。

参考文献

- [1] Y. Mizuno, et al., Opt. Express **16**, 12148 (2008).
- [2] Y. Mizuno, et al., J. Lightw. Technol. **28**, 3300 (2010).
- [3] 越智 他, 2022 秋応物, 23a-PA02-4.