

環境センシングに向けた光コム光源の検討

中嶋 善晶¹

¹東邦大学理学部物理学科 (〒274-8501 千葉県船橋市三山 2-2-1)

Consideration of optical frequency comb laser source for environmental sensing

Yoshiaki NAKAJIMA¹

¹Toho Univ., 2-2-1 Miyama, Funabashi, Chiba 274-8510

Abstract: Optical frequency comb has been versatile tools for optical metrology and several applications, such as, spectroscopy, length measurement, and optical microwave generation. Dual-comb spectroscopy is a novel and attractive spectroscopic technique for broadband, high-resolution, and high-speed spectroscopy. In this study, we discuss optical frequency comb laser source for environmental sensing.

Key Words: Optical frequency comb, Fiber laser, Mid-infrared laser source, Spectroscopy

1. はじめに

光コムは、光領域において極めて精密な間隔で多数の周波数成分を持つため、基礎科学や応用など様々な分野において展開されている^{1,2)}。この周波数間隔を繰り返し周波数 (f_{rep}) といい、余りの周波数であるキャリア・エンベロープ・オフセット周波数 (f_{ceo}) とモード次数 N (整数) を用いることで、光コムのモード周波数は $f_N = f_{\text{ceo}} + Nf_{\text{rep}}$ で表せられる。 f_{rep} と f_{ceo} はマイクロ波周波数であり、周波数カウンタを用いた測定が可能であるため、次数 N を求めれば光周波数の高精度な計測が可能である。これにより、光周波数標準³⁾、高精度分光⁴⁾、高精度マイクロ波発生⁵⁾、光通信⁶⁾、任意光波形整形⁷⁾、天文⁸⁾など様々な分野に応用されている。

光コムモードの振幅と位相には、光領域における多くの情報が記録されている。この情報を取り出すために、Fabry-Perot 共振器の Vernier 効果を用いた手法⁹⁾、Virtually imaged phased array (VIPA) を組み合わせた手法⁴⁾、フーリエ変換分光法 (FTS) を用いた手法¹⁰⁾が提案されてきた。

これらの手法に対し、デュアルコム分光法は広帯域・高速・高分解能な分光測定が可能である^{11,12)}。この手法はわずかに f_{rep} が異なる 2 台の光コムを分光光源として用いており、移動ステージが無いフーリエ変換分光法である。最初の光コム (Signal comb) をサンプルに入射し、光コムモードにサンプルの情報を記録する。次にもう一つの光コム (Local comb) と空間的に重ねる。この時、2 つの光コムには f_{rep} の差 Δf_{rep} があるため、2 つの光コムは自動的に干渉し、インターフェログラム (IGM) を取得することが可能である。そのためデュアルコム分光法では移動ステージの掃引時間によらない広帯域・高速・高分解能な測定が可能である。IGM を高速フー

リエ変換することで、マルチヘテロダインビート信号を得る。これは光周波数をマイクロ波周波数にスケール変換したことに相当し、Signal コムのモードに記録されているサンプルの光領域における情報を復元することができる。この特徴により、デュアルコム分光法は広帯域・高分解能ガス分光など多くの応用に展開されている^{13,14)}。特に近年では、米国の標準研究所 (NIST) が 3~4.5 μm での中赤外デュアルコム分光システムを開発し、大気中の有機化合物の高感度検出に展開している¹⁵⁾。

しかし、従来のデュアルコム分光システムの光源には 2 台のモード同期レーザーが用いられており、複雑な制御系や信号処理系が必要になる^{13,14)}。そのため、分光システム全体としては大掛かりかつ複雑であるため、一部の研究グループでの使用に限定されている。

この課題に対し、筆者は 1 台のモード同期ファイバレーザーから 2 台の光コムの同時発生が可能なデュアルコムファイバレーザーを開発した^{16,17,18)}。2 台の光コムは 1 台のレーザー共振器を共有するため、レーザー光源の小型化と制御系の簡便化が期待できる。

本講演では、筆者が開発した双方向動作型デュアルコムファイバレーザーの詳細と中赤外分光への展開について報告し、中赤外光コムによる環境センシングへの展開に向けた議論を行う。

2. 双方向動作型デュアルコムファイバレーザー

図 1(a)に示すのは、開発した双方向動作型デュアルコムファイバレーザーの構成図である。レーザーは光ファイバを用いたリング型共振器で構成され、利得には Er 添加光ファイバ (EDF) が用いられている。レーザー共振器内にはアイソレータが無いいため、時計回りと (CW) と反時計回り (CCW) の双方向で

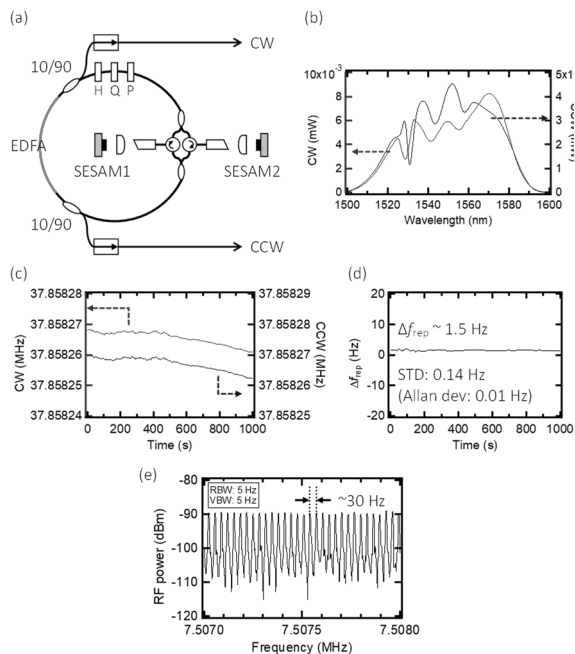


Fig.1 (a) Scheme of bidirectional dual-comb fiber laser, (b) Optical spectrum, Temporal variation of (c) the f_{rep} s of the two outputs and (d) Δf_{rep} , (e) multi-heterodyne beat notes between the two frequency combs with $\Delta f_{\text{rep}} \sim 30$ Hz.

動作する。モード同期機構には可飽和吸収体ミラー (SESAM) と非線形偏波回転 (NPR) を併用している。これにより、図 1(b)に示すような半値全幅 (FWHM) が 56 nm 程度、フーリエ変換限界パルス幅 46 fs の時間的コヒーレンスが高い光コムを 2 台同時に生成することに成功した。図 1(c)に示すのは 2 つの光コムの f_{rep} の時間変化であり、環境変動の影響によりドリフトしている。一方図 1(d)に示すように、2 つの f_{rep} の差 Δf_{rep} はフリーランでありながらも、測定時間 1,000 秒において平均値 1.5 Hz、標準偏差 0.14 Hz と高い安定性を得ている。これは 2 台の光コムが受動的に安定化されていることを示している。さらに 2 台の光コムを空間的に重ねたところ、図 1(e)に示すようなモード分解されたマルチヘテロダイナミック信号を検出した。このとき Δf_{rep} は 30 Hz 程度、モード分解されたスペクトルの FWHM は 3 Hz 程度を得た。これはデュアルコム分光による IGM を得たことに相当する。

謝辞

本研究は筆者が電気通信大学および JST, ERATO 美濃島知的光シンセサイザプロジェクトに在籍していた際に得た成果である。

参考文献

- 1) J. L. Hall: Rev. Mod. Phys. **78** (2006) 1279.
- 2) T. W. Hänsch: Rev. Mod. Phys. **78** (2006) 1297.
- 3) R. J. Jones, W. Y. Cheng, K. W. Holman, L.-S. Chen, J. L. Hall, and J. Ye: Appl. Phys. B **74** (2002) 597.
- 4) S. A. Diddams, L. Hollberg, and V. Mbele: Nature **445** (2007) 05524.
- 5) T. M. Fortier, M. S. Kirchner, F. Quinlan, J. Taylor, J. C. Bergquist, T. Rosenband, N. Lemke, A. Ludlow, Y. Jiang, C. W. Oates, and S. A. Diddams: Nat. Photon. **5** (2011) 425.
- 6) D. Hillerkuss, R. Schmogrow, T. Schellinger, M. Jordan, M. Winter, G. Huber, T. Vallaitis, R. Bonk, P. Kleinow, F. Frey, M. Roeger, S. Koenig, A. Ludwig, A. Marculescu, J. Li, M. Hoh, M. Dreschmann, J. Meyer, S. Ben Ezra, N. Narkiss, B. Nebendahl, F. Parmigiani, P. Petropoulos, B. Resan, A. Oehler, K. Weingarten, T. Ellermeyer, J. Lutz, M. Moeller, M. Huebner, J. Becker, C. Koos, W. Freude, and J. Leuthold: Nat. Photonics **5** (2011) 364.
- 7) S. T. Cundiff, A. M. Weiner: Nat. Photonics **4** (2010) 760.
- 8) T. Wilken, G. L. Curto, R. A. Probst, T. Steinmetz, A. Manescau, L. Pasquini, J. I. G. Hernández, R. Rebolo, T. W. Hänsch, T. Udem, and R. Holzwarth: Nature **485** (2012) 611.
- 9) C. Gohle, B. Stein, A. Schliesser, Th. Udem, and T. W. Hänsch: Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 263902.
- 10) J. Mandon, G. Guelachvili, and N. Picqué: Nat. Photon. **3** (2009) 99.
- 11) F. Keilmann, C. Gohle, and R. Holzwarth: Opt. Lett. **29** (2004) 1542.
- 12) I. Coddington, N. R. Newbury, and W. C. Swann: Optica **3** (2015) 082402.
- 13) S. Okubo, K. Iwakuni, H. Inaba, K. Hosaka, A. Onae, H. Sasada, and F.-L. Hong: Appl. Phys. Express **8** (2015) 082402.
- 14) A. Nishiyama, S. Yoshida, Y. Nakajima, H. Sasada, K. Nakagawa, and K. Minoshima: Opt. Express **24** (2016) 25894.
- 15) G. Ycas, F. R. Giorgetta, K. C. Cossel, E. M. Waxman, E. Baumann, N. R. Newbury, and I. Coddington: Optica **6** (2019) 165.
- 16) Y. Nakajima, Y. Hata, and K. Minoshima: Opt. Express **27** (2019) 5931.
- 17) Y. Nakajima, Y. Hata, and K. Minoshima, Opt. Express **27** (2019) 14648.
- 18) Y. Nakajima, Y. Kusumi, and K. Minoshima, in preparation.