

【助成 40-09】

電気光学変調コムを用いた広帯域周波数可変かつ極低ノイズなマイクロ波発生

日本大学生産工学部学部 教授 石澤 淳

〔研究の概要〕

本研究では、電気光学変調 (EO) コムに着目し、マイクロ波の位相ノイズを光で読み取り、フィードバック制御によりマイクロ波信号の位相ノイズを大幅に低減することを目指している。EO コムは、周波数間隔が可変かつ数十 GHz 帯にあるため、光通信などへの応用に適しているものの、周波数の安定性に問題があった。信号対雑音比の高い EO コムを生成する光学系の工夫と独自の $2f3f$ 自己参照干渉法により、EO コムの周波数安定化に成功した。この手法では EO 素子に印加を駆動するマイクロ波信号へ帰還制御するため、周波数安定化した EO コムに加えて、極低位相ノイズなマイクロ波信号が生成可能である。これにより、金融・証券分野の高頻度取引に必須である高精度な時刻同期への応用が期待される。

〔研究経過および成果〕

EO コムは、従来のファイバーコムやチタンサファイアレーザーと比較して次の 2 つの利点がある。(i) 周波数間隔が数十 GHz 程度と広いため、各光コムを分離することができ、複数のモードを独立して扱う光通信などの応用に適している。(ii) EO 変調器に印加するマイクロ波発生器の設定周波数によって周波数モード間隔が容易に変えられ、応用範囲を広げられる。一方で、周波数軸上で EO コムは、種光源からコムモード数が増加するに従ってマイクロ波の位相ノイズが重なり、周波数揺らぎが大きくなるという問題がある。したがって、これらの応用を実現するためには、EO コムの周波数を安定化させる工夫が必要である。本研

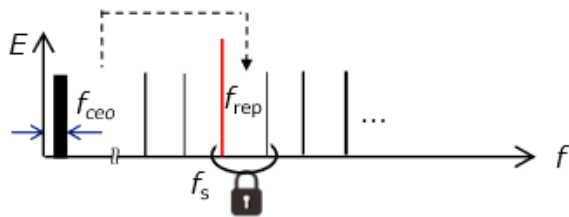


図 1 EO コムの光周波数安定化

究では、1 台の連続波レーザー光源を種光源に使用し、EO コムで難しかったキャリアエンベロップオフセット (CEO) 周波数の検出に成功した。これにより、EO 変調器に印加されるマイクロ波信号をフィードバック制御することで、EO コムの光周波数をさらに安定化させることができた。図 2 に CEO 信号の周波数安定化の結果を示す。CEO 信号の周波数揺らぎは、測定時間に反比例し、ノイズの種類が(ホワイトあるいはフ

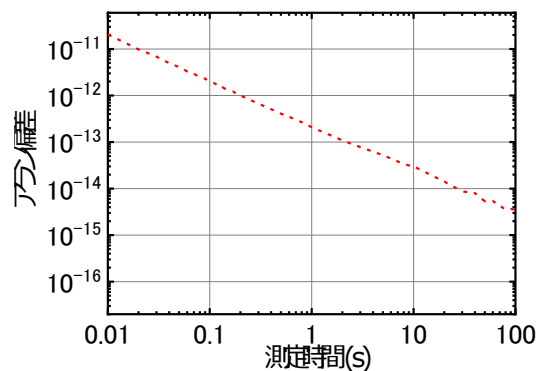


図 2 CEO 信号のアラン偏差

リック) 位相ノイズと分かり、EO コムにおいて CEO 周波数が安定化されていることを示している。また、フィードバック制御されたマイクロ波の位相ノイズ測定を

行った(図 3). この結果, マイクロ波の位相ノイズが測定器の測定限界以下まで低減し, マイクロ波の安定度が市販の高精度水素メーザーと匹敵する水準に達していることが確認された.

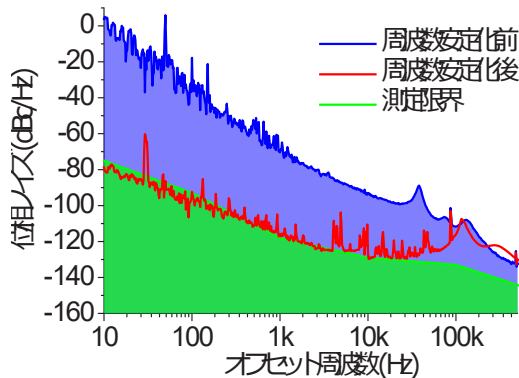


図3 マイクロ波の位相ノイズ

本研究では, 参照光源を使わずにも 12 桁の精度で光周波数計測が可能であることが実証した. 安定化された EO コムを活用して, 種光源の光周波数 f_s を決定した. 通常, 光周波数の高精度な測定には市販の波長計を用い, 約 8 桁, すなわち, 10 MHz オーダーの精度で光周波数を計測できる. また, 光コムと高精度な波長計を併用する場合には, 約 12 桁, すなわち, 1 kHz オーダーの精度で光周波数を計測できる. ただし, 波長計には既知の参照光源が必要である. 種光源の光周波数 f_s はコムモード次数 s (s : 自然数) を用いると, $f_s = f_{\text{ceo}} + s \times f_{\text{rep}}$ と 1 次式で表される. モード次数 s が決定できれば, 異なる 2 条件での f_{ceo} と f_{rep} の関係性を調べることで光周波数 f_s が決定できる. 周波数モード間隔が広い EO コムを使用すれば, 周波数が既知の参照光源が不要となり, 光周波数 f_s を 12 桁の周波数精度で計測可能であることを実証した.

今回の成果により, 周波数間隔が広い EO コムでも CEO 周波数の安定化が可能であることを実証できた. こ

れにより, EO コムを利用した光通信などへの活用が期待される. また, マイクロ波の位相ノイズを, 非常に正確な位相ノイズ測定器の限界以下にまで減少させた. これにより, マイクロ波発生器の周波数がより正確になり, マイクロ波評価装置 (たとえば, 周波数カウンタや位相雑音測定器) の測定もより精密に行えるようになる. 同時に GPS 信号の受信が難しい場所でも正確な時刻管理が可能になる. 将来的には, 光ファイバーネットワークで超高精度な光源を配信し, 配信先の通信局舎で光コムを使用して光をマイクロ波に変換する技術を研究開発し, 高精度な周波数基準信号が手軽に利用できるテクノロジーを目指している.

[発表論文]

1. Atsushi Ishizawa, Tadashi Nishikawa, Kenichi Hitachi, Tomoya Akatsuka, and Katsuya Oguri, “Optical referenceless optical frequency counter with twelve digit absolute accuracy,” Scientific Reports, vol. 13, pp. 8750-1-8750-9, May.30 (2023).
2. Yugo Kikkawa, Atsushi Ishizawa, Rai Kou, Xuejun Xu, Koki Yoshida, Tai Tsuchizawa, Noritsugu Yamamoto, Kota Kawashima, Tai Tsuchizawa, Takuma Aihara, Tadashi Nishikawa, Guangwei Cong, Kenichi Hitachi, Tadashi Nishikawa, Noritsugu Yamamoto, Koji Yamada, and Katsuya Oguri, “Sub-30-fs fibre-coupled electro-optic modulation comb at 1.5 μm with a 25-GHz repetition rate,” Electronics Letters, vol. 59 (11), pp. 1-3 (2023).