

超短パルスレーザーによる光コムを用いた 高度距離センシング技術の研究

Development of high-performance distance sensing technique using
an optical comb of ultrashort pulsed laser

1091022



研究代表者 産業技術総合研究所 計測標準研究部門 室長 美濃島 薫

〔研究の目的〕

本研究の目的は、超短パルスレーザーという高機能な光源を用いて、高精度、高効率な高度センシング技術を開発することである。多次元性と精密性を兼ね備えた光源を用いることで、高精度なセンシングに伴う膨大なデータ処理なしに、計測自体から直接的に精密な結果を得ることができれば、人間と機械の双方にとって省力化につながる。

上記の目的を達するため、本研究では、距離センシング技術に特化し、超短パルスレーザーに内在する多数の等間隔な光周波数モード（光コム）を基準とした、高精度かつ高効率な計測技術の開発を目標としている。

その中で、本助成研究期間内には、光源の特性の向上によって、光コムのモード間隔を拡大することにより、従来に比べて信号検出効率を向上させ、実用的な計測に不可欠な高速化と高感度化に資する基礎技術を確立することを目的として研究を行った。

〔研究の内容・成果〕

超短パルスレーザーは時間軸では短いパルスが繰り返し発生するパルス列であるが、フーリエ変換した周波数軸で見ると、広い範囲にわたり、多数の鋭い光周波数モードが櫛の歯のよう

に並んでいる。これはその形状から光コム（櫛）と呼ばれている。

光コムにおいては、各モードが精密な周波数基準となっており、さらにそれらが MHz～GHz 程度の周波数間隔で、厳密に等間隔で整列していることが特徴である。そのため、光コムを光検出器によって検出すると、それらの多数の光周波数モード同士がビート（うなり）を生じ、電波（RF）の領域に多数の等間隔な周波数成分が発生する（RF コム）。RF コムの周波数成分も、多数の精密な基準となる。

本研究の距離センシング原理は、RF コムの精密な周波数基準を用い、その RF 波長をものさしの目盛りとして、距離を測定するものである。具体的には、光コムを伝播させて測定対象との間の距離を往復させ、到達した RF 波長の位相を測定する。多数のコム成分から波長の短い高周波成分を容易に利用できるため、高精度測定が実現できる。また、RF コムの複数のレンジの目盛りを用いることで、絶対距離（変位ではなく 2 点間の距離）を決定できる。実際に、これまで、RF 成分として、基本周波数の 50 MHz と 200 次高調波 10 GHz を用いて、200 m の距離に対して $2\mu\text{m}$ の世界最高分解能を実現している。さらに、800 次高調波 40 GHz を用いて、短距離では、200 nm の分解能を実現している。

しかし、これまで広く使われている光コムの

周波数モード間隔は、50 MHz 程度であり、上記原理に従って距離測定する際には、50 MHz ごとに整列する RF コムの多数の成分の中から、測定に使用する成分のみを切り出す必要がある。そのため、周波数軸上の光の利用効率が低く、さらに実際の信号検出においては多数の周波数成分が同時検出されるため、検出器の飽和のために、検出信号強度が低下するという課題があった。これは、同じ信号感度を得るためには、信号の積算時間を長く取る必要があることを意味し、計測速度の制限要因ともなっていた。

近年、モード同期レーザーの高繰り返し化（コム間隔の拡大）に関する研究は盛んに行われており、基本次モード同期においても繰り返し 1 GHz の高精度な光コムが報告されている。しかしながら、高繰り返し化は同じ平均パワーであればパルスエネルギーの低下を意味し、モード同期レーザーとしての安定性を損なうと同時に、非線形光学効果を利用した広帯域光発生など、超短パルスや光コムとしての応用性を制限しかねないため、レーザー共振器を直接高繰り返し化するのには限度がある。

そこで、本研究では、上記の課題解決のため、繰り返し周波数 50 MHz のモード同期ファイバレーザにおいて、ファブリー・ペロー（FP）共振器による光コムのモードフィルタリングを行い、1.5 GHz 間隔の光コムの生成を行った。光コムのモードフィルタリングは、チタンサファイアレーザを中心に、近年、研究が盛んになってきており、200 MHz の高繰り返しファイバレーザにおいても報告があるが、本研究では、より汎用性のある低繰り返し周波数のファイバレーザに注目した。モード同期ファイバレーザを用いた光コム（ファイバ・コム）は、長期安定性が高く、操作が容易であるなど実用性に優れた特長を持つ。

光コムの出力を FP 共振器に入射させると、FP 共振器のモードと一致した周波数を持つ光コムのモードのみがフィルタリングされる。このとき、FP 共振器の Free Spectral Range

（FSR）と光コムの繰り返し周波数（ f_{rep} ）の通倍が等しいと、多数の光コムのモードが同時に出力され、実効的に周波数間隔の広がった光コム出力が得られる。ここで、FP 共振器により抜き出される光コムモード本数の割合 N は、 $N = \frac{\text{FSR}}{f_{\text{rep}}}$ の様に与えられる。

このとき、光コムの FP 共振器透過後の平均光パワーは透過前と比較し $1/N$ となるが、検出器の飽和抑制により、結果として RF 信号の増強効果が期待できるため、応用上のメリットが大きい。

実際には、FP 共振器の分散のため、FSR は周波数依存性を持つ。一方で、光コムの周波数間隔はモード同期の特性により一定であるため、FSR とコム間隔の一致する帯域は制限され、FP 共振器を透過する光コムのスペクトル帯域も制限される。そのため、低分散光学系を用いて共振器を構成している。

Fig. 1 に実験系を示す。ファイバ・コムとして、中心波長 1,560 nm のモード同期エルビウム（Er）ファイバレーザを用いた。繰り返し周波数 f_{rep} は 50 MHz である。ファイバ・コムの出力は Er ファイバ増幅器（EDFA）で増幅され、平均出力 50 mW となる。増幅されたファイバ・コムの出力は、モードマッチレンズを透過後、FP 共振器に入射される。FP 共振器は、曲率半径 50 cm の 2 つの低分散誘電体ミラー（ $R = 99\%$ ）で構成した。共振器の FSR は 1.5 GHz、フィネスは 300 である。FP 共振

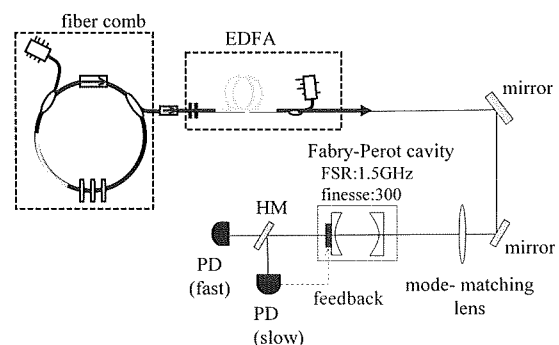


Fig. 1 Experimental setup
HM: half mirror; PD: photodetector

器からの光コムの透過パワーを応答の遅い検出器によって受光し、共振器長にフィードバック制御をかけている。

FP 共振器を透過する光コムの出力を高速光検出器（応答周波数 10 GHz）と高周波アンプによって検出した際の RF スペクトルを Fig. 2 (a) に示す。これから、1.5 GHz 間隔のモード間ビート信号が主として生成されている事が確認できる。残存する光周波数モードにより生成される 50 MHz 離れた隣接ビート信号は、選別された 1.5 GHz のビート信号に対し 30 dB 抑圧されていた (Fig. 2 (b))。

次に光検出器の飽和の抑制効果を調べた。光検出器に入力される光コムの平均光パワーを変化させながら、1.5 GHz のモード間ビート信号の RF 出力を測定した。FP 共振器によるフィルタリングを行った場合と行わない場合について、それぞれ測定した結果を示す (Fig. 3)。どちらの場合も光コムの強度に比例して信号レ

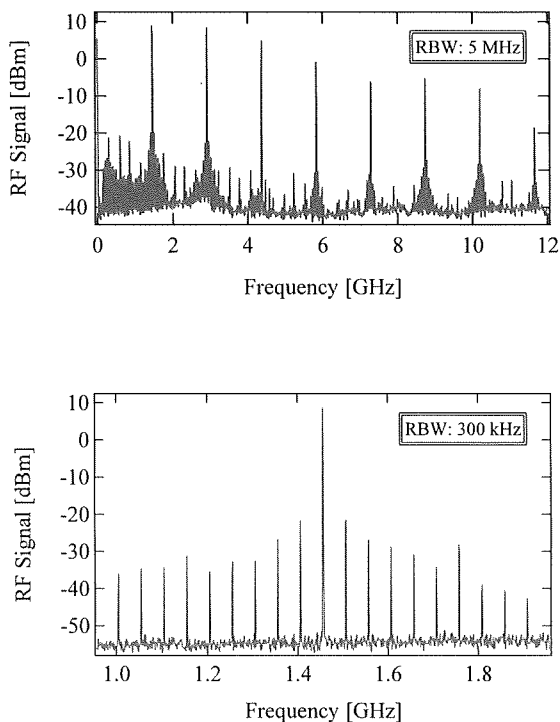


Fig. 2 RF spectra of intermode beats of frequency comb after filtering with a 1.5 GHz Fabry-Perot cavity detected with 10 GHz photodetector (a) Full span and (b) near 1.5 GHz.

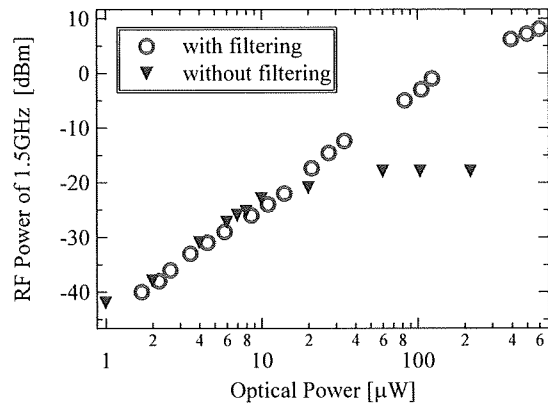


Fig. 3 Power in 1.5 GHz RF comb as a function of detected average optical power for 50 MHz comb without filtering and after filtering with Fabry-Perot cavity

ベルが上昇するが、フィルタリングを行わない場合には、光パワー 10 μ W 以上で RF 出力の飽和が観測される。それに対し、フィルタリングを行った場合には、測定範囲において明らかな飽和が見られず、検出器の飽和の抑制が確認された。その結果、光検出器への入射光パワー 0.6 mW において、1.5 GHz のモード間ビート信号に、フィルタリングによる 26 dB の増強が見られた。

[今後の研究の方向、課題]

以上のように、本助成研究によって、距離計測に用いられる光コムのモード間ビートの RF 信号において、26 dB の大幅な増強を実現した。これにより、計測信号の S/N 比向上、及び、クロストークの抑制が期待される。

今後は、本成果を具体的に距離計測に適用し、その高感度化、高速化を実現していく予定である。そのためには、本研究で実現した技術の可搬性を高め、実用的環境において安定に実現する技術を確立していく必要がある。

本研究の距離計測手法は、研究代表者が原理開発し、既に静止した反射鏡ターゲットでは世界最高精度を実現しているが、計測の高効率化により、目的とする計測の高速化のみならず、

対象となるターゲットの拡大によって、より汎用性のある技術に近づくものと期待できる。

[成果の発表、論文等]

1. 岩本裕, 中嶋善晶, 稲場肇, 美濃島薫: “低線り返しモード同期ファイバレーザにおける光コムモード選別による検出器の飽和抑制”, Optics Photonics Japan 2009, 26 pPD 15, 新潟 (2009)
2. 岩本裕, 桜川寛大, 早崎芳夫, 谷田貝豊彦, 稲場肇, 美濃島薫: “モードフィルタリングによる低線り返し光ファイバ・コムを検出器の飽和の抑制”, 応用物理学会, 19 aF 6, 東海大学 (2010)
3. 岩本裕, 稲場肇, 美濃島薫: “ファイバ・インライン型外部共振器による低線り返し光ファイバ・コムモードフィルタリング”, 応用物理学会 (2010) (予定)