

研究終了報告書

「マイクロ光周波数コムの新規制御技術の開発」

研究期間：2019年10月～2023年3月

研究者：久世直也

1. 研究のねらい

光周波数コムは周波数領域で離散的・等間隔に並んだ光キャリア(コムモードと呼ぶ)の集合であり、コムモードの超精密制御を活用することで、光原子時計、超精密分光、超精密距離測定、超低位相雑音マイクロ波発生などに応用されている。現在、最も普及している光周波数コムは光ファイバーからなるファイバーコムであるが、近年、単一周波数発振CWレーザーを低損失な微小共振器に結合し、微小共振器中の非線形光学効果を利用して発生するマイクロコムが注目されている。マイクロコムは半導体製造装置で作製可能であり、将来的には量産可能な小型で安価な光周波数コムとして期待され、実社会に広く普及していく可能性を持つ。

光周波数コムの研究は「発生」「制御」「応用」に関する研究に分類できる。本研究ではマイクロコム独自の特徴を活かした応用開拓を見据え、「制御」に関する新しい技術を創出することを目的とする。マイクロコム独自の特徴はコムモード間隔の大きさである。マイクロコムのコムモード間隔は100 GHz以上となり、ファイバーコムの1000倍から10000倍である。この大きなコムモード間隔は(i) 光周波数とTHzのコヒーレントな連結、(ii) コムモード1本1本の空間的な分離、につながる。(i)の概念ではマイクロコムを使ったTHz波発生、(ii)の概念では分光や距離計測といった光計測への応用へと展開できる。これらは次世代の無線通信である6G通信や、光周波数コム为代表的な光計測手法である2台のファイバーコムを用いるデュアルコム分光のシングルコム分光化を可能とする。しかし、現状のマイクロコムを用いてTHz波発生を行ったとしても、マイクロコムの位相雑音が大きいため、マイクロ波を周波数通倍して発生するTHz波に対して優位性が小さい。また、マイクロコムを使ったシングルコム分光では周波数分解能がコムモード間隔(> 100 GHz)で制限されてしまうため、デュアルコム分光の周波数分解能(~ 100 MHz)と比べると圧倒的に悪く、現状では有用な光計測手法とは言えない。

そこで本研究では「制御」の観点からマイクロコムの高度化を行う。具体的にはマイクロコムの低位相雑音化とコムモード掃引技術の開発を目的とする。それにより、マイクロコムコムを使って発生する低位相雑音なTHzキャリアが6G通信時代の標準手法となること、そして、シングルコム分光の周波数分解能の向上を可能とし、デュアルコム分光のシングルコム分光化を推進することを見据える。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では低位相雑音化ではTHz波発生を視野に入れているので、コムモード間の相対位相雑音(すなわちマイクロコムの繰り返し周波数の位相雑音)の低減化を行った。コムモード間の位相雑音は熱による共振器長揺らぎによって制限されるため、低位相雑音化には以下の4つの方向性が考えられる。(i) 位相雑音を測定し、フィードバックループを組む、(ii) 微小共振

器の温度を下げることで熱雑音を抑制する、(iii) 熱光学係数の小さな材料からなる微小共振器を使う。本研究では(i) (ii)の観点からマイクロコム低位相雑音化を進めた。(i)では、さきがけ研究以前に開発した2波長自己遅延干渉計を使うことで、光 - THz 変換をすることなく高い位相雑音検出感度でマイクロコム位相雑音を測定し、その測定信号を元にフィードバックループを組むことで、40 dB 以上の位相雑音の低減化に成功した。得られた位相雑音は THz キャリアとしては最高品質のものである。(ii)ではよりシステムとして簡便になる方法として、ポンプ光に加え、電気光学変調器(Electro-optic modulator: EOM)を元に発生するサイドバンドを冷却レーザーとして使うことで、実効的に微小共振器の温度を下げ、20 dB 程度の低位相雑音化を実現した。

コムモード掃引では(i)全コムモードの周波数掃引技術の開発を行った。(i)ではポンプ光をDFBレーザーに変えたことと、フィードバックとフィードフォワードを組み合わせた制御技術を開発することで1 kHzの変調レートで70 GHz、4 kHzの変調レートで50 GHz、10 kHzの変調レートで25 GHzのコムモードの周波数掃引に成功した。実証した掃引速度はこれまでの世界記録の1000倍速である。

(2) 詳細

研究テーマ A-1「長尺ファイバーに安定化したソリトンコムからの超低位相雑音 THz 発生」

本テーマでは2波長自己遅延ヘテロダイン干渉計(Two-wavelength delayed self-heterodyne interferometer: TWDI)によりマイクロコムコムモード間の相対位相雑音を測定し、マイクロコムポンプ光にフィードバックすることで位相雑音の低減化を行った。また、低雑音化したマイクロコムを元に実際に THz 発生を行い、THz キャリアとしての位相雑音特性を評価した。

TWDI は長尺ファイバー(~ 100 m)を持ったマッハツェンダー干渉計(Mach-Zehnder interferometer: MZI)の2つの出力において、光バンドパスフィルタ(Optical bandpass filter: OBPF)において、それぞれ異なるコムモードを取り出す。取り出したコムモードをフォトディテクタ(Photo detector: PD)で検出すると、自己遅延の結果、異なる次数のコムモードの位相雑音が検出できる。それらをアナログミキサーで積をとることで、ポンプ光の位相雑音が相殺され、コムモード間の位相雑音を検出できる。その検出信号をエラー信号としたフィードバックループを組むことでコムモード間の位相雑音を低減する。

次に、低位相雑音化したマイクロコムを元に発生する THz の位相雑音評価を行った。通常、位相雑音評価はマイクロコムから発生する THz とマイクロ波を周波数逡倍したものを混合することで周波数下方変換し、位相雑音を評価するが、この手法だとマイクロ波の位相雑音で測定が制限されてしまう。そこで、本研究では低雑音化した2台のマイクロコムを用意し、それぞれから THz を発生する(周波数はそれぞれ $f_{\text{THz1}} = f_{\text{rep}}$, $f_{\text{THz2}} = f_{\text{rep}} + \delta$)。ここでは実験の簡便さのため1つの UTC-PD から2つの THz を発生させ、

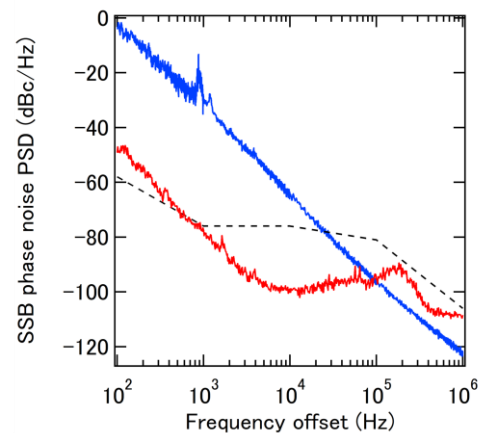


図1. 560 GHzキャリアの非制御(青線)と制御時(赤線)のマイクロコム位相雑音. 理想的な周波数逡倍を仮定したKeysightのE8257D(黒点線)

それらをショットキーバリアダイオード (Schottky barrier diode: SBD) で二乗検波することでマイクロ波 (周波数 = δ) に下方変換する。下方変換されたマイクロ波の位相雑音は2つの THz の位相雑音の足し合わせであるので、この下方変換されたマイクロ波の位相雑音から THz の位相雑音が評価できる。

図 1 に得られた位相雑音を示す。得られた位相雑音は非制御の状態 (青線) から 40 dB 程度の位相雑音抑制 (赤線) できた。得られた位相雑音はハイエンドなマイクロ波シンセサイザー (黒点線) (E8257D, Keysight) の位相雑音を理想的な周波数通倍を仮定してもものより良いことが分かる。

本研究成果は *Communication Physics* から出版された。

研究テーマ A-2「光サイドバンドを使ったマイクロコムの低位相雑音化」

本テーマでは実効的に微小共振器の温度を下げることで、熱雑音を抑制し、マイクロコムの低位相雑音化を試みた。以下に本手法の原理について示す。マイクロコム (特にモード同期状態であるソリトンコム) が発生時、ポンプ光は共鳴周波数に対し低周波数側にある。本手法ではポンプ光に加え、電気光学変調器から発生する、共鳴周波数に対し高周波数側に配置した光サイドバンドも微小共振器に結合する。すると、例えば、共鳴周波数が温度上昇により低周波数側に動こうとすると、光サイドバンド由来の共振器内パワーが減少し、それにより温度が減少し、共鳴周波数が元の位置に戻ろうとする。また、逆も同様である。この反跳効果を利用して熱雑音由来の共鳴周波数揺らぎを抑え、位相雑音の低減化を行った。光サイドバンドの強度、周波数位置を適切に調整すると、図 2 のようにコムモード間の相対位相雑音は 20 dB 程度抑制された。

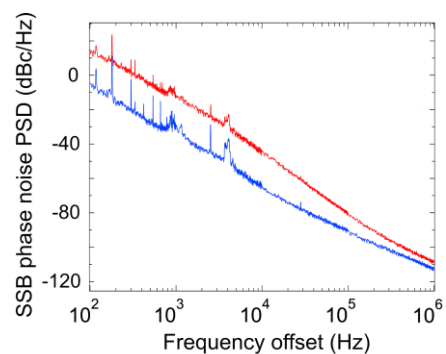


図2. 1 THzのマイクロコムの繰り返し周波数の光サイドバンドなしの時 (赤線) とありの時 (青線) の位相雑音。

また、本手法の本質はポンプ光と共鳴周波数差の外部要因による揺らぎを小さくしていることである。したがって、本手法は低位相雑音化だけでなく、ソリトンコムの維持範囲の拡張やコムモード掃引にも使えると考えられる。実際に実験的にソリトンコム維持範囲は 18 倍に拡張され、コムモード掃引も 10 kHz の変調レートで約 10 GHz 掃引することに成功した。

本研究成果はソリトンコムの光サイドバンドによる熱制御というテーマにまとめ、*Optics Letters* から出版され、Editor's pick にも選出された。

研究テーマ B-1「周波数トラッキング機構付きのコムモードの広範囲・高速掃引」

本テーマではフィードバックとフィードフォワードの制御を組み合わせることで、微小共振器の上部に取り付けたマイクロヒーターの掃引範囲・掃引速度限界に到達するコムモードを掃引を実現した。また、2 波長 MZI を用いることで任意のコムモードの周波数掃引量を 10 MHz 以下の誤差で同定できることを示した。

コムモード掃引時にソリトンコムを喪失しないためには、ポンプ光と共鳴周波数の差(離調)を一定に保つ必要がある。フィードバック制御では Pound-Drever-Hall ロッキング法(PDH)により離調をエラー信号としたループを構成し、ポンプ光の周波数が共鳴周波数に追従する。本研究ではフィードバックに加えフィードフォワード制御も導入することでフィードバックゲインのリミットを克服する。概念としてはフィードバックでランダムな微小なエラーを制御し、フィードフォワードで既知の大きなエラーを制御するイメージである。フィードフォワード信号は任意信号発生器から生成し、フィードバック信号と足し合わせ、ポンプ光の周波数を制御する。実験では、このハイブリッド制御の結果、マイクロヒーター限界に到達することができるようになり、1 kHz の変調レートで 70 GHz, 4 kHz の変調レートで 50 GHz, 10 kHz の変調レートで 25 GHz のコムモードの周波数掃引に成功した。さらに、任意のコムモードの周波数掃引量を算出するためにアンバランス MZI の 2 つの出力に 2 つの OBPF を挿入した 2 波長 MZI を開発した。基本原理は 2 つ OBPF により、異なる次数のコムモードを抽出し、それらを PD で検出する。検出された信号の位相変化量から各コムモードの周波数変化量が分かる。また、任意のコムモードの周波数は 2 つの自由度である繰り返し周波数とオフセット周波数で記述されるので、異なる次数の 2 つのコムモードの周波数変化量測定から任意のコムモードの周波数変化量を算出できる。原理実証実験では 50 GHz のコムモード掃引時に 10 MHz の誤差で任意のコムモードの周波数トラッキングができることを示した。

本研究成果は周波数変化量測定付きマイクロコム的高速・広帯域掃引技術としてまとめ、Optics Letters から出版された。

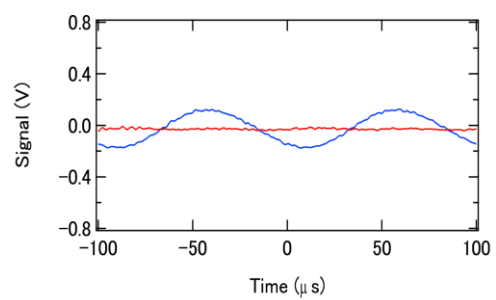


図3. 離調のフィードバック制御のみの時(青線)とフィードバックとフィードフォワードを組み合わせた制御の時(赤線)のエラー信号

3. 今後の展開

TWDIを使い、低位相雑音化したマイクロコムから発生した THz の位相雑音はハイエンドなマイクロ波は周波数逡倍したものより良好である。したがって、6G 通信のような THz キャリアが重要な役割を果たす通信世代における参照発振器としての活躍が期待できる。しかし、長尺ファイバーや AOM が必要であり、システムとしては少し複雑である。今後、参照発振器としてだけでなく、THz 通信や THz レーダーのキャリアとして普及していく上では少し問題がある。そのためにも熱鈍感なマイクロコムの実験的な検証と、光サイドバンドによる位相雑音低減化を組み合わせることで、シンプルな構成でエレクトロニクスの性能を超えることが重要である。それが実現できれば、原理実証にとどまらず、真にマイクロコムによる THz 通信やレーダーが拓かれていく可能性がある。その際には UTC-PD の高出力化や THz 増幅器の開発などの進展も必要となるであろう。

一方、全コムモード掃引技術は、波長分割を利用したマイクロコムによるシングルコム分光システムとしての原理実証実験を進めることが重要である。2台のファイバーコムを用いたデュアルコム分光は屋外の温暖化ガス分光、3D イメージング、距離測定、材料の光学応答計測など現在もその応用範囲を広げているが、今後社会に普及していくためにはシステムの簡略化が重要な課題となる。本さきがけにおいて 1 kHz の変調レートを超える掃引技術を開発したことで、デュアルコム分光に劣らない、高分解能・高速な分光システムを単一マイクロコムで実現が期待できる。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

本研究では研究開始当初の大きな方向性として、題目にもあるようにマイクロコム制御技術開発を掲げ、具体的には(i)マイクロコムの低位相雑音化、(ii)コムモードの高速・広範囲の周波数掃引、そして(iii)2台のマイクロコムの高精度位相同期のための制御技術開発を目的とした。(i)では光サイドバンドを用いて実効的に微小共振器の温度を下げることで位相雑音の低減化を実現する手法、TWDIを用いて高感度にマイクロコムの位相雑音を検出し、フィードバックで位相雑音を低減する手法を示した。(ii)では当初の計画通り、ポンプ光をECDLからDFBに置き換えることと、フィードバック・フィードフォワードを組み合わせた制御技術を開発することで、従来法では困難であったマイクロヒーターのリミットに到達できるコムモードの周波数掃引技術を開発することができ、デュアルコム分光をシングルコム分光に置き換えるに値する変調レートと掃引範囲を実現できた。したがって、当初の目的を達成できたと言える。(iii)は研究期間内に着手することができなかつた。これは当初の研究計画が後ろ倒しになったわけではなく、注入同期を用いたコムモード出力の増幅といった、当初、計画していなかつた制御技術の開発を行ったからである。

研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

2019年6月に現機関に着任し、2019年10月に本さがけが開始したこともあり、実験室の立ち上げ、学生も1人だけという状況からのスタートだったことを考えると、十分なスピード感を持って研究を進めることができたと考えている。また私と学生のマンツーマン体制であったことも大きく影響し、その学生と多くの時間を共有し、研究の楽しさや大変さを伝える機会も多く、博士課程に進学してくれた点は良かったと考えている。研究費については、各年度特に過不足することなく、順調にマイクロコム・光周波数コムの研究室にふさわしい実験装置を揃えていくことができた。また、光周波数コムの制御には多数の電子回路が必要となるが、できる限り自作することで研究費を節約した。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

現段階において研究成果を社会実装することは難しい。しかし、本研究が開発したマイクロコムによる低位相雑音なTHz発生技術は6Gにおける無線通信やレーダーにとって重要な技術となり、社会実装される可能性がある。コムモード掃引技術においても、周波数掃引を伴ったマイクロコムによるシングルコム分光の原理実証実験を行い、デュアルコム分光の簡易版として企業に売り込むことで共同研究を起点として社会実装につながる可能性がある。いずれにせよ、社会実装には微小共振器の自作技術や、マイクロコムのパッケージ化を行い、可搬性のあるマイクロコムを開発することが重要であると考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:6件

1. Naoya Kuse , Kenji Nishimoto, Yu Tokizane, Shota Okada, Gabriele Navickaite, Michael Geiselmann, Kaoru Minoshima, and Takeshi Yasui, “Low phase noise THz generation from a fiber-referenced Kerr microresonator soliton comb,” <i>Communication Physics</i> , 5: 312 (2022)
マイクロコムの低位相雑音化に関する論文。TWDI を使って高感度に繰り返し周波数の位相雑音を検出し、それをエラー信号としたフィードバックループを組むことで位相雑音の低減化を実現した。また、実際に低雑音化したマイクロコムから発生する 560 GHz の位相雑音を測定するために、同様のシステムをもう1台構築し、SBD を用いた2乗検波で周波数下方変換することで、周波数逡倍したマイクロ波に制限されずに、低位相雑音性を実証することに成功した。
2. Kenji Nishimoto, Kaoru Minoshima, Takeshi Yasui and Naoya Kuse , “Thermal control of a Kerr microresonator soliton comb via an optical sideband,” <i>Optics Letters</i> , 47, 281 (2022). Editor’s pick.
ポンプ光から作った光サイドバンドによるマイクロコムの熱操作に関する論文。光サイドバンドを共鳴周波数に対して高周波数側の適切な位置に配置することで、微小共振器の熱効果を抑制できることを示した。それにより、マイクロコムの繰り返し周波数の位相雑音の 20 dB の低減化、ソリトンコム維持範囲の 18 倍の拡大、10 kHz の変調レートでの 10 GHz のコムモード掃引に成功した。
3. Naoya Kuse , Gabriele Navickaite, Michael Geiselmann, Takeshi Yasui and Kaoru Minoshima, “Frequency-scanned microresonator soliton comb with tracking of the frequency of all comb modes,” <i>Optics Letters</i> , 46, 3400 (2021).
マイクロコムのコムモード掃引と周波数トラッキングに関する論文。ポンプ光と共鳴周波数の周波数差 (= 離調) を固定するフィードバック制御に加え、既知の制御信号を元に作成したフィードフォワード信号を組み合わせた制御技術により 1 kHz の変調レートで 70 GHz, 4 kHz の変調レートで 50 GHz, 10 kHz の変調レートで 25 GHz のコムモードの周波数掃引に成功した。さらに、周波数掃引量をリアルタイムでトラッキングする手法として2波長 MZI を開発し、50 GHz の掃引時に 10 MHz の誤差で任意のコムモードの周波数掃引量を算出できることを示した。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数:5 件(特許公開前のもも含む)

1	発 明 者	久世 直也
	発 明 の 名 称	光周波数コムの周波数制御装置及び方法
	出 願 人	徳島大学
	出 願 日	2021/3/9
	出 願 番 号	PP02346J
	概 要	マイクロコムのコムモード掃引に関する特許。フィードバックとフィードフォワードの制御を組み合わせることで、広範囲・高速な周波数掃引を可能にする。

2	発 明 者	久世 直也
	発 明 の 名 称	光周波数コム周波数掃引量測定装置及び方法
	出 願 人	徳島大学
	出 願 日	2021/3/9
	出 願 番 号	PP02358J
	概 要	周波数掃引されているマイクロコムのコムモードの周波数測定に関する特許。2 波長 MZI を用いることで任意のコムモードの周波数変化量の測定を可能にする。
3	発 明 者	久世 直也
	発 明 の 名 称	マイクロコム位相雑音低減化装置及び方法
	出 願 人	徳島大学
	出 願 日	2021/3/9
	出 願 番 号	PP02359J
	概 要	マイクロコム位相雑音の繰り返し周波数の低減化に関する特許。ポンプ光に加え、光サイドバンドも微小共振器に結合することで低位相雑音化を可能にする。
4	発 明 者	久世 直也
	発 明 の 名 称	距離、速度測定装置及び距離、速度測定方法
	出 願 人	徳島大学
	出 願 日	2021/3/9
	出 願 番 号	PP02362J
	概 要	マイクロコムを用いた高速な距離・速度の測定に関する特許。電気光学変調器を使ってコムモードの両側にサイドバンドを立て、それらを非対称に周波数掃引することで、距離・速度の同時測定を可能にする。
5	発 明 者	久世 直也
	発 明 の 名 称	ライダー装置及びライダー制御方法
	出 願 人	徳島大学
	出 願 日	2021/3/9
	出 願 番 号	PP02363J
	概 要	マイクロコムを用いた高精度距離測定に関する特許。各コムモードから得られる周波数変調ライダー信号をコヒーレントに結合することで実効的に周波数掃引を大きくすることで、高精度化を可能にする。

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

【招待講演】 久世直也, “マイクロコム制御:コムモード掃引と低位相雑音化,” 第 43 回レーザー学会学術講演会, 2023 年 1 月

【招待講演】 久世 直也, “マイクロ光周波数コムの新規制御技術の開発,” 2021 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C-3/4-56, 2021 年 9 月.