

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20439

研究課題名（和文）正確な周波数300 GHz帯ミリ波発生のための光コムモード次数決定法

研究課題名（英文）Optical comb mode number determination method for accurate frequency 300 GHz millimeter-wave generation

研究代表者

中島 悠来（Nakajima, Yuki）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：60965424

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：2つのCWレーザーをUTCに同期した光コムを位相同期することで、差周波の形で正確なミリ波帯周波数が合成できる。ミリ波帯周波数を決定するためには、2つのCWレーザーと干渉する光コムのモード次数差を決める必要がある。本研究では、光コムの繰り返し周波数を変調し、光コムとレーザーのビート周波数の変調深さを測定することで、従来よりも簡便にモード次数差を決定することを目指す。今回、変調深さの測定精度を検証したところモード次数差決定に必要な精度に近い値が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミリ波・テラヘルツ波は、次世代移動通信に代表されるさまざまな分野への応用が期待されており、実用化にはUTCに基づいた正確な周波数合成が重要である。光コムを用いて周波数を合成する場合、従来は波長計等の高価な装置を用いた測定を元にミリ波帯・テラヘルツ帯周波数を決定する必要があり、その手順は複雑であった。本手法は周波数の決定にそうした補助測定を必要としないため、幅広い分野への寄与が期待される。

研究成果の概要（英文）：By phase-locking two CW lasers with an optical comb synchronized to UTC, an accurate millimeter-wave band frequency can be synthesized in the form of a difference frequency. To determine the millimeter-wave band frequency, it is necessary to determine the mode number difference between the two comb modes which interfere CW lasers. This research aims to determine the mode number difference more easily than before by modulating the repetition frequency of the optical comb and measuring the modulation depth of the beat frequency of the optical comb and laser. In this study, the measurement accuracy of the modulation depth was verified, and a value close to the accuracy required for mode number difference determination was obtained.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：SIトレサブル 光周波数コム ミリ波

# 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

第6世代移動通信システム(6G)では、300 GHz 帯のミリ波の使用が検討されている。実用化には、UTC などの正確な周波数基準に基づいたミリ波帯周波数合成技術が必要である。その有力な手法の一つとして、2つのCWレーザーをUTCに同期した光コムに位相同期し、その差周波としてミリ波帯周波数を合成する、という方法がある。その際、合成したミリ波帯周波数の決定には、レーザーと干渉している光コムのモード次数差を決める必要がある。従来は高価な波長計、あるいは追加の光コムを用いた補助測定[1]が必要であった。

## 2. 研究の目的

無線通信への応用を見据えると、モード次数差を波長計や追加の光コムによる補助測定なしに決定できることが重要である。そこで本研究では、ミリ波帯周波数(~300 GHz)だけ離れた2つのCWレーザーと干渉している光コムのモード次数差を、変調深さの測定により簡便に決定する手法を実証することを目的とする。

## 3. 研究の方法

光コムは周波数軸上で見ると等しい間隔でレーザーモードが並んでおり、 $n$  番目のコムモード周波数  $\nu_n$  は  $\nu_n = n \cdot f_{rep} + f_{ceo}$  と書ける。ここで、 $f_{rep}$  は光コムの繰り返し周波数、 $f_{ceo}$  はキャリアアエンベロープ周波数である。図1に実験の概念図を示す。光コムの繰り返し周波数を変調深さ  $\Delta f_{rep}$  で周波数変調すると、各コムモード周波数  $\nu_n$  はモード次数  $n$  に比例した変調深さで周波数変調される。1つ目のレーザーは  $N_1$  番目のコムモードと、2つ目のレーザーは  $N_2$  番目のコムモードとビートを取るとし、それぞれのビート周波数を  $f_{beat1}$ ,  $f_{beat2}$  とする。このとき元の変調深さ  $\Delta f_{rep}$  は、 $f_{beat1}$  では  $N_1$  倍、 $f_{beat2}$  では  $N_2$  倍に広がる。よって、元の変調深さ  $\Delta f_{rep}$  と、ビート周波数の差の変調深さ  $(N_2 - N_1) \cdot \Delta f_{rep}$  を測定して、その2つの比をとることでモード次数差が決定可能ではないかと考えられる。なお、変調深さの測定には Balling 法[2]を用いる。

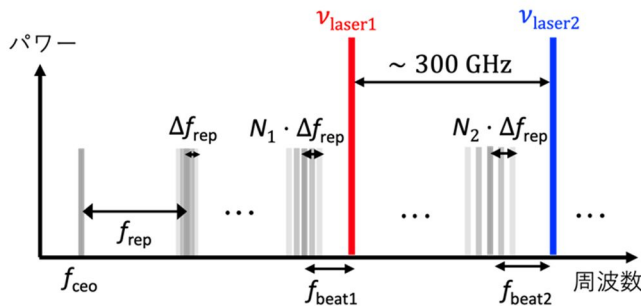


図1 実験の概念図

表1 各周波数の変調深さ

| 周波数                     | 変調深さ                               |
|-------------------------|------------------------------------|
| $f_{rep}$               | $\Delta f_{rep}$                   |
| $f_{beat1}$             | $N_1 \cdot \Delta f_{rep}$         |
| $f_{beat2}$             | $N_2 \cdot \Delta f_{rep}$         |
| $f_{beat2} - f_{beat1}$ | $(N_2 - N_1) \cdot \Delta f_{rep}$ |

## 4. 研究成果

本研究では対象とするミリ波帯周波数は300 GHzであり、使用する光コムの繰り返し周波数200 MHz程度なので、モード次数差は1500程度となる。よって、モード次数差の決定には変調深さを  $1.0 \times 10^{-4} < 1/1500$  より高い精度で決定する必要がある。そこで、予備実験として図2に示す系で  $f_{beat1}$  の変調深さの測定を行い、その決定精度を検証した。

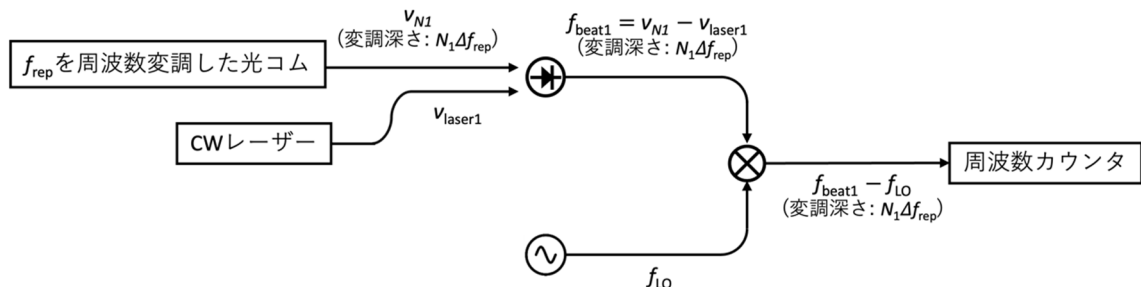


図2  $f_{beat1}$  の変調深さの測定系

図3(i)に  $f_{beat1}$  の変調深さの測定結果を示す。Aが測定結果、Bがフィッティング結果であり、変調深さの4桁目が時間的に変化している様子が観察された。そこで測定自体の精度を見積もるために、図3(ii)に示すようにフィッティング分を差し引き、図3(iii)に示すように標準

偏差を計算した。1点ごとの標準偏差は  $2.9 \times 10^{-4}$  であり、平均データ数を増やすことで標準偏差が減少する様子が見られた。測定自体の安定度は 10 個平均の時に相対値で  $1 \times 10^{-4}$  程度と推定でき、モード次数差決定の要求精度  $1 \times 10^{-4}$  と同程度の値が得られた。

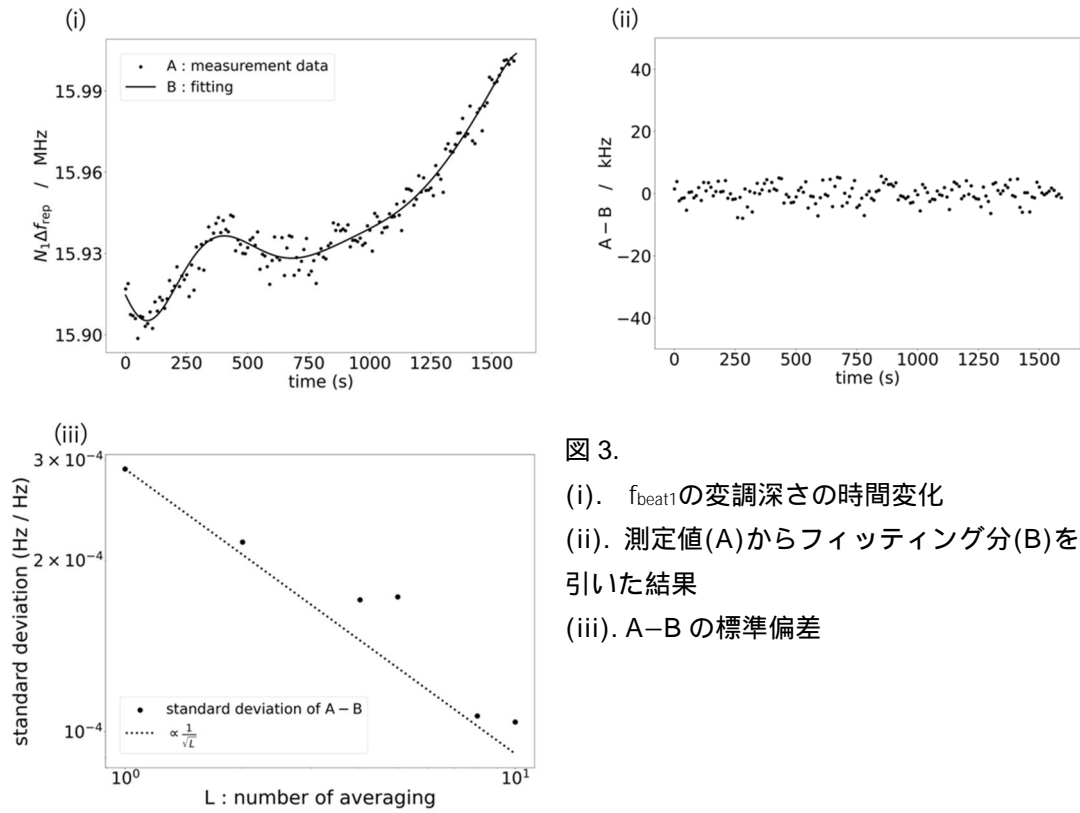


図 3.  
 (i).  $f_{\text{beat}1}$  の変調深さの時間変化  
 (ii). 測定値(A)からフィッティング分(B)を差し引いた結果  
 (iii). A-B の標準偏差

参考文献：

- [1] H. Inaba, *et al.*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, **58**, 1234 (2009)
- [2] P. Balling, Metrologia, **38**, 297 (2001)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>中島悠来、稲場肇                |
| 2. 発表標題<br>変調深さ測定による光コムのモード次数決定    |
| 3. 学会等名<br>2023年度第84回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年<br>2023年                    |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>中島悠来                             |
| 2. 発表標題<br>次世代移動通信(6G)のためのミリ波帯周波数合成-光コムの適用- |
| 3. 学会等名<br>NMIJ成果発表                         |
| 4. 発表年<br>2024年                             |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|