

## 擬似バーニア方式による光周波数測定

日大生産工(院) ○佐藤優成 吉田靖典  
NTT 物性研 日達研一  
日大生産工 野邑寿仁 石澤淳

### 1. まえがき

近年、正確に光周波数を決定する技術は多岐にわたる科学技術分野において、重要な役割を担っている。正確な光周波数は、主にヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの絶対周波数測定やデュアルコム分光法での分子吸収スペクトルの解析などで用いられる。光周波数を高精度に測定する一般的な方法としては、周波数軸に輝線スペクトルが等間隔に並んでいる光周波数コムと高精度な波長計を組み合わせた手法が用いられる。どちらも光周波数を測定し制御する際に、比類のない精度を有するが、高精度な波長計は高コストかつ定期的な波長校正の必要がある。そこで、我々は、単一の光周波数コムを用いた擬似バーニア方式による光周波数計測法を実証する。

### 2. 提案手法

先行研究では、周波数変動が極めて小さい安定した被測定レーザーを用いており、キャリアエンベロープオフセット周波数 $f_{ceo}$ とビート周波数 $f_{beat}$ の安定化を行った後、周波数カウンタでモード間隔 $f_{rep}$ の測定を複数回行うことでモードナンバーを収束させていた<sup>2)</sup>。我々は、複数の周波数で $f_{rep}$ を安定化させて、各 $f_{beat}$ を計測することによってモードナンバーを収束する方法を提案する。

### 3. 実験方法

擬似バーニア方式の実験配置図を Fig. 1 に示す。光周波数コムとしては、レーザーの共振器長を変えることで、一定範囲内で連続的に $f_{rep}$ を可変でき、 $f_{ceo}$ を周波数安定化することが可能なファイバーレーザーコムを用いる。被測定レーザーの光周波数 $f_{cw}$ は以下の式で表される。

$$f_{cw} = f_{ceo} + Nf_{rep} + f_{beat} \quad (3.1)$$

ここで、 $-f_{rep}/2 < f_{ceo} \leq f_{rep}/2$ ,  $-f_{rep}/2 < f_{beat} \leq$

$f_{rep}/2$  である。 $f_{ceo}$ 、 $f_{rep}$ 、及び $f_{beat}$ の値と光周波数コムモードナンバー $N$ を特定することで、 $f_{cw}$ を計測できる。

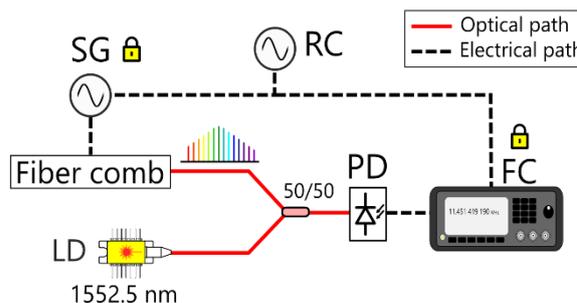


Fig. 1 実験配置図。

LD: レーザーダイオード. SG: シグナルジェネレーター. RC: 基準クロック. PD: フォトダイオード. FC: 周波数カウンタ。

ファイバーレーザーコム $f_{rep}$ を 99 MHz 程度で周波数安定化し、その際の $f_{beat}$ を周波数カウンタで計測する。 $f_{rep}$ の周波数安定化を解除し、モードナンバーの差を 1 だけ変化するように共振器長を変えることで $f_{rep}$ を増加させる。再度、周波数安定化させ、その時の $f_{beat}$ を再び周波数カウンタで計測する。その後、モードナンバーの差 $k_i$ を幾何学的に増加させ複数回繰り返す。この際、計測する $f_{beat}$ が毎回おおよそ同じ値になるように $f_{rep}$ を設定する (Fig. 2)。

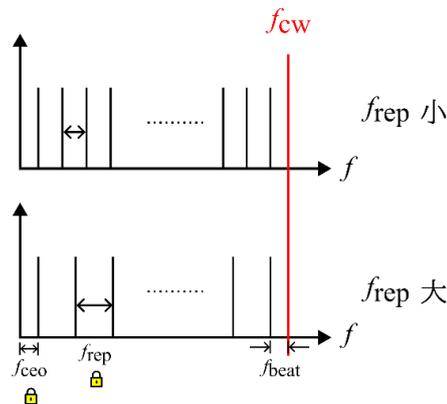


Fig. 2 実験イメージ図

Optical frequency measurement using pseudo-vernier method

Yusei SATO, Yasunori YOSHIDA, Kenichi HITACHI,  
Junia NOMURA, and Atsushi ISHIZAWA

#### 4. 実験結果

モードナンバーの収束結果をTable. 1に示し、モードナンバーの差 $k_i$ を増加させたことによるモードナンバーの差の誤差 $\delta k_i$ とモードナンバーの誤差 $\delta N_i$ をFig. 3に示す。Table. 1及びFig. 3より、 $k_i$ の増加に伴い、推定される $N=1,950,453$ との誤差が減少し漸的に収束されていく様子が確認できる。しかし、モードナンバーの不確定性が大きい状態であるため、フィッティングよりモードナンバーの誤差の範囲を補正した。その結果、モードナンバーは $N=1,950,453 \pm 5$ と見積もられる。この値を使用して光周波数を求めた場合、5桁の精度で $f_{cw} = 193.09$  THzと求められた。

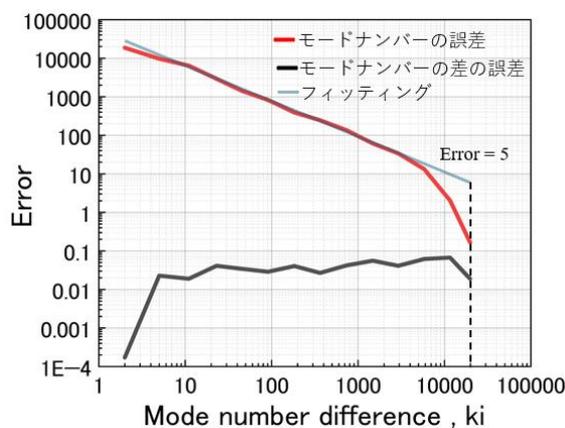


Fig. 3  $k_i$ の増加による $\delta k_i$ と $\delta N_i$

#### 5. まとめ及び今後の展望

本研究では、周波数変動が大きいレーザーにも応用できる単一の光周波数コムを用いた光周波数計測法の実証を行い、モードナンバーをおおよそ収束させることに成功し、被測定レーザーの光周波数を5桁の精度で求められた。

今回、光周波数コムとしてファイバーレーザーコムを用いたが、100 MHz周波数間隔と狭く周波数変動の大きい被測定レーザーでは $f_{beat}$ が特定のコムモードの左右を行き来していた。そのため、 $f_{beat}$ の符号が一定ではなく、測定の誤りが起こる状態にあった。今後は、数MHz変動するレーザーの光周波数を計測できるように周波数モード間隔がGHz間隔の光周波数コムによる擬似バーニア方式の実証を行う。モードナンバーの自然数 $N$ を完全に特定することで、高精度の波長計に近い7桁の精度で光周波数の特定が可能である。さらに、擬似バーニア方式による光周波数の自動計測を実現する。

#### 参考文献

- 1) 石澤淳, 光周波数コムの最新状況と応用展開特集 2-3 電気光学変調コム, 電子情報通信学会誌 Vol. 103, 2020, pp.1-2
- 2) 日達研一, 石澤淳, 眞田治樹, 小栗克弥, 単一の光周波数コムを用いた擬似バーニア方式による光周波数計測法, 応用物理学会, 2024, 25a-12B-4

Table. 1 モードナンバーの収束結果

index	$f_{repi}$	$f_{beati}$	$k_{expi}$	$k_i$	$N_i$	$f_{cwi}$	$\delta k_i$	$\delta N_i$
0	98999860.98	10068424.15		0				
1	98999912.14	10245286.12		1	1931646.798	193094576878573		
2	98999963.39	10231350.62	1.9998	2	1931813.303	193094577825340	0.00017	18639.697
3	99000116.11	9943057.57	4.9771	5	1940681.014	193094578409575	0.02285	9771.986
4	99000421.04	10296567.14	10.9810	11	1944035.440	193094579510667	0.01898	6417.560
5	99001030.04	10316707.94	22.9588	23	1947526.566	193094579337625	0.04123	2926.434
6	99002146.80	10073954.94	44.9657	45	1949012.204	193094579209849	0.03430	1440.796
7	99004482.04	10124487.77	90.9712	91	1949628.830	193094579724986	0.02878	824.170
8	99009152.36	9984832.74	182.9594	183	1950061.075	193094579557970	0.04056	391.925
9	99018291.63	10145887.61	362.9730	363	1950205.901	193094580470634	0.02696	247.099
10	99037235.17	9933671.16	735.9579	736	1950317.581	193094580977618	0.04215	135.419
11	99075092.16	10036768.02	1480.9440	1481	1950391.356	193094580554027	0.05602	61.644
12	99148093.66	10079208.15	2915.9587	2916	1950418.965	193094580961524	0.04128	34.035
13	99296461.45	9915922.91	5825.9380	5826	1950439.717	193094579856052	0.06199	13.283
14	99592529.35	9961706.24	11606.9331	11607	1950450.966	193094577121836	0.06694	2.034
15	100015371.03	10021728.29	19803.9810	19804	1950452.834	193094576085427	0.01896	0.166