

# デュアル・テラヘルツ・コムを用いた連続発振テラヘルツ波の リアルタイム絶対周波数計測

機械創造システム工学コース 林 建太

## 1. 緒言

周波数計測は、光波や電波領域における最も基本的な計測技術であるが、光波と電波の境界に位置し、長らく未開拓電磁波領域とされたテラヘルツ帯（周波数 0.1~10 THz, 波長 30~3000 μm）では、室温環境で高精度計測することが困難であった。そこで我々は、光伝導アンテナ (PCA) 内部にフォトキャリアのテラヘルツ周波数コム (PC-THz コム) を生成し、これと CW-THz 波を光伝導ミキシングして RF 帯までビートダウンすることにより、室温環境で高精度周波数計測が可能な THz コム参照型スペクトラム・アナライザ (THz スペアナ) に関する研究を行っている<sup>1,2)</sup>。

しかし従来の THz スペアナによる絶対周波数計測では、CW-THz 波に最隣接したコムモード次数を決定するために、コム間隔 (=繰り返し周波数) をシフトさせる前と後のビート周波数を計測する必要があり、この2ステップ計測がリアルタイム計測の障害となっていた。そこで本稿では、コム間隔の異なる2つの PC-THz コムを用いてビート周波数を同時計測することにより、周波数が変動している CW-THz 波の絶対周波数をリアルタイムで決定した。さらに、ヒルベルト変換を用いて瞬時周波数を算出することにより、絶対周波数計測の高速化を実現した。

## 2. 測定原理

THz スペアナでは、光伝導アンテナをヘテロダインレシーバーとして、また PC-THz コムを多周波の局部発振器として利用することにより、室温環境において THz 帯をフルカバー可能なヘテロダイン・ミキシング (光伝導ミキシング) を実現する (図 1)。その結果、生成された RF 帯のビート信号をスペクトラムアナライザや周波数カウンターで高精度計測することにより、高い周波数精度を達成する。

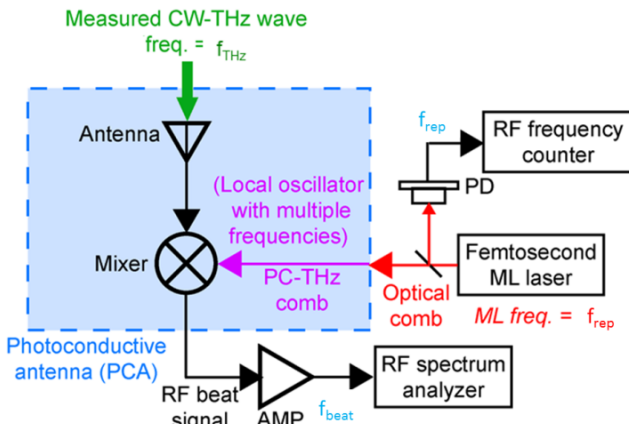


Fig.1. Heterodyne mixing.

図 2 に、デュアル PC-THz コムを用いた絶対周波数の測定原理を示す。ここで、PC-THz コム 1、PC-THz コム 2 のコム間隔を  $f_{rep1}$ ,  $f_{rep2}$ , ビート周波数を  $f_{beat1}$ ,  $f_{beat2}$ , CW-THz 波に最隣接したコムモード次数を  $m$  とする。CW-THz 波の絶対周波数  $f_{THz}$  は、 $f_{THz} = mf_{rep1} \pm f_{beat1} = mf_{rep2} \pm f_{beat2}$  なので、 $m$  は  $|f_{beat1} - f_{beat2}| / |f_{rep1} - f_{rep2}|$  で与えられる。したがって、 $f_{rep1}$  および  $f_{rep2}$  を既知の値に周波数安定化した状態で、 $f_{beat1}$ ,  $f_{beat2}$  を同時計測すると、 $m$  が求まる。また、ビート周波数の符号は、 $m$  の符号と反転の関係にあるので、最終的に次式より絶対周波数が決定できる。

$$\begin{aligned} f_{THz} &= mf_{rep1} - f_{beat1} \quad (m > 0) \\ f_{THz} &= mf_{rep1} + f_{beat1} \quad (m < 0) \end{aligned} \quad (1)$$

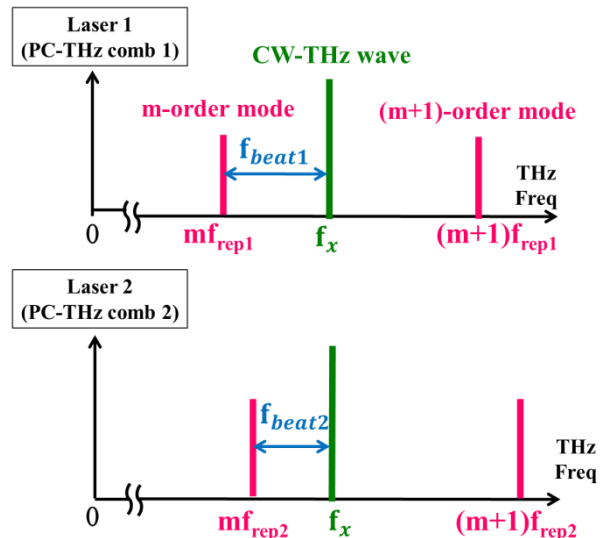


Fig.2. Principle of measurement.

## 3. ヒルベルト変換を用いた瞬時周波数解析

ヒルベルト変換とは、振幅特性は周波数によらず一定で、位相特性は位相が  $\pi/2$  だけ遅れるような操作である。主に信号解析に用いられ、振幅や周波数などの時系列の瞬間的な特性を計算する物理量測定や推定、伝送波のモデリングにも用いられている。ここで、ビート信号  $f(t)$  をヒルベルト変換した信号を  $g(t)$  とおく。そして  $f(t)$  を実部、 $g(t)$  を虚部とすると複素時間領域信号 (解析信号) は以下のように表せる。

$$z(t) = f(t) + ig(t) \quad (2)$$

そして位相  $\theta(t)$  は、

$$\theta(t) = \arg[z(t)] = \tan^{-1}[g(t)/f(t)] \quad (3)$$

となる。これより瞬時周波数  $f_{i,beat}$  は、

$$f_{beat,1} = (1/2\pi) \times d\theta(t)/dt \quad (4)$$

で求めることができる<sup>3)</sup>。

4. 実験装置

実験装置を図 3 に示す. 2 台のフェムト秒ファイバーレーザー (中心波長 1550 nm, パルス幅 50 fs) の  $f_{rep1}$  および  $f_{rep2}$  は, ルビジウム周波数標準を基準として, それぞれ 100,000,000 Hz および 100,000,050 Hz で安定化されている. そのレーザー光を SHG 結晶で波長変換し, THz スペアナ内の光伝導アンテナに集光する. これにより PCA の内部では, PC-THz コムが生成される. このような状態で, CW-THz 波を THz スペアナに入射すると, 光伝導ミキシング過程を経て, RF 帯の電流ビート信号が生成されるので, これをカレント・プリアンプで増幅後, デジタイザーで取得した. デジタイザーにより取得されたビート信号は, PC 内においてヒルベルト変換され, それぞれの瞬時周波数が求まる. これらの値から CW-THz 波の絶対周波数がリアルタイムで算出される.

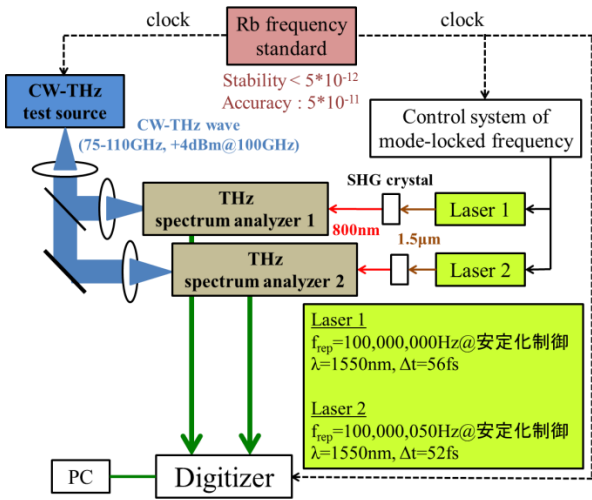


Fig.3. Experimental setup.

5. 実験結果

図 4 に, ヒルベルト変換によって算出された 2 つのビート信号の瞬時周波数を示す. デジタイザーのサンプリングレートを 10 MHz とし, 10 ms ごとの測定を 100 回積算して得られた. この結果より,  $f_{beat1}$  および  $f_{beat2}$  の約 1 MHz±100 Hz の変化が, 高速に測定出来ている様子が確認できる.

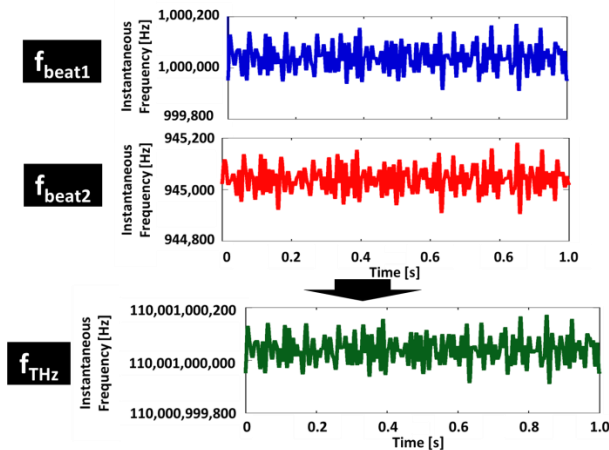


Fig.4. Measurement of instantaneous frequency.

さらに, これらの値を用いて  $f_{THz}$  を算出した結果も示しており, CW-THz 波の絶対周波数 (周波数 = 0.11 THz±100 Hz) が高速かつ正確に決定出来ていることが分かる.

図 5 には, CW-THz 波の絶対周波数を 0.1 THz±200 MHz の範囲内で大きく変化させた場合の結果を示す. 図 4 のような絶対周波数の微小な変化だけでなく, 複数のコムモードを横切るような大きな周波数の変化もリアルタイムで測定することが出来ている. これにより, 揺らぎの大きな CW-THz 光源の絶対周波数もリアルタイムで測定することが可能であると考えられる. さらに今回の実験手法によって決定された  $f_{THz}$  は, 設定された  $f_{THz}$  と  $10^{-13}$  の精度で一致していた.

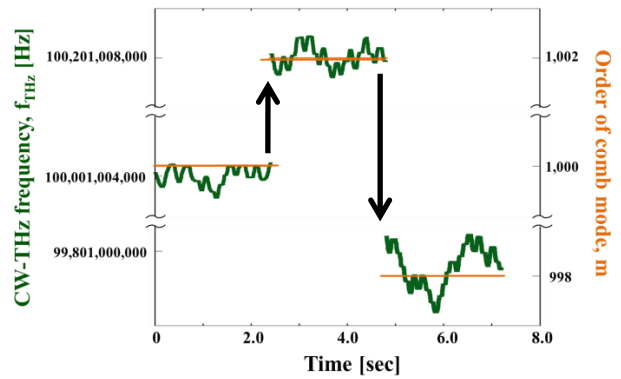


Fig.5. Real time monitoring of CW-THz wave.

6. まとめと今後の予定

本稿では, デュアル PC-THz コムを用いることにより, CW-THz 波の絶対周波数をリアルタイムで測定した. さらに, 次数をまたぐような大きな絶対周波数の変化もリアルタイムで追従出来ることを実際の測定から示した. これにより, 時々刻々と出力周波数が変化するような CW-THz 光源の周波数特性評価が可能になると考えられる.

今後の予定としては, 一つの PC-THz コムを用いて絶対周波数をリアルタイムに決定出来るように改良する. また, PCA に 1.5μm ファイバーレーザーを直接カップリングすることで, コンパクトで持ち運びできる絶対周波数計測装置を目指していきたいと考える.

参考文献

- 1) S. Yokoyama, R. Nakamura, M. Nose, T. Araki, and T. Yasui, "Terahertz spectrum analyzer based on a terahertz frequency comb", Optics Express **16**, 13052 (2008).
- 2) T. Yasui, R. Nakamura, K. Kawamoto, A. Ihara, Y. Fujimoto, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, T. Nagatsuma, and T. Araki, "Real-time monitoring of continuous-wave terahertz radiation using a fiber-based, terahertz-comb-referenced spectrum analyzer", Optics Express **17**, 17034 (2009).
- 3) H. Fuser, R. Judaschke, and M. Bieler, "High-precision frequency measurements in the THz spectral region using an unstabilized femtosecond laser", Applied Physics Letters **99**, 121111 (2011).