

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

Real-Time Absolute Frequency Measurement of Continuous-Wave Terahertz Radiation Based on Dual THz Comb

○林建太¹⁾, 横山修子²⁾, 稲場肇³⁾, 美濃島薫⁴⁾, 安井武史¹⁾

○Kenta Hayashi¹⁾, Syuko Yokoyama²⁾, Hajime Inaba³⁾, Kaoru Minoshima⁴⁾ and Takeshi Yasui¹⁾

徳島大学¹⁾, 日本マイクロ光器²⁾, 産業技術総合研究所³⁾, 電気通信大学⁴⁾
 The University of Tokushima¹⁾, Micro-Optics Co. Ltd.²⁾, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology³⁾, The University of Electro-Communications⁴⁾
 E-mail: hayashi@femto.me.tokushima-u.ac.jp <http://femto.me.tokushima-u.ac.jp/>

We demonstrated a real-time absolute frequency measurement of continuous-wave terahertz radiation based on dual THz comb. Effectiveness of the proposed method is demonstrated by measurement of CW-THz test source. The absolute frequency of swept CW-THz test source was determined in real time.

1. はじめに

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 0.1~10THz, 波長 30~3000 μ m）では、室温環境で高精度計測することが困難であった。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^{1,2)}。

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。

2. 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(a)]. その結果、生成された RF 帯のビート信号を高精度計測することにより、高い周波数精度を達成する。

図 1(b)にデュアル PC-THz コムを用いた周波数測定原理を示す。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 b_{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。

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

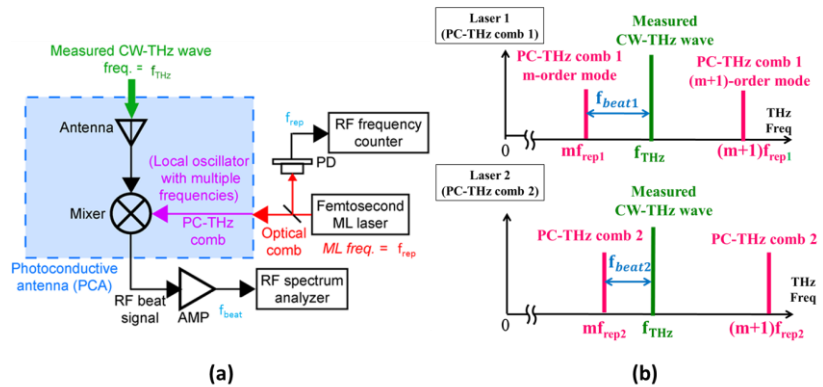


Fig. 1. Principle of measurement.

3. 実験装置

実験装置を図2に示す。2台のフェムト秒ファイバーレーザー（中心波長 1550nm, パルス幅 50fs）の $f_{\text{rep}1}$ および $f_{\text{rep}2}$ は、ルビジウム周波数標準を基準として、それぞれ 100,000,000Hz および 100,000,050Hz で安定化されている。SHG 結晶で波長変換されたレーザー光を、THz スペアナ内の光伝導アンテナに集光することにより、PC-THz コムを生成する。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、ビート信号が生成されるので、これを増幅後、周波数カウンターで計測した。カウンターにより測定されたビート周波数は、PC に取り込まれ、絶対周波数がリアルタイムで算出される。

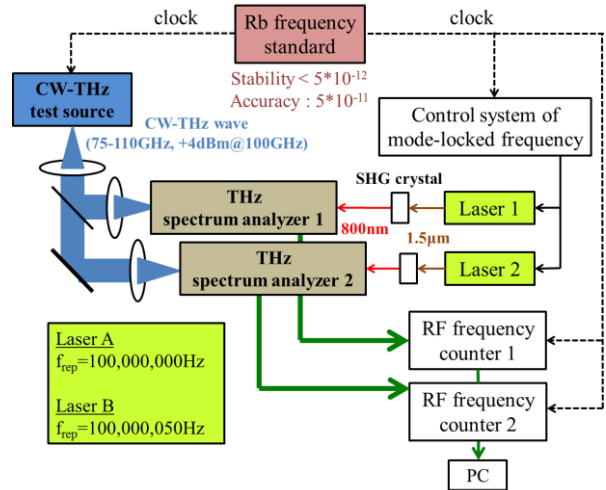


Fig. 2. Experimental setup.

4. 実験結果と考察

CW-THz 波の出力周波数をステップ&リニア走査させた時の $f_{\text{rep}1}$, $f_{\text{rep}2}$, $f_{\text{beat}1}$, $f_{\text{beat}2}$ の時間変化を図3に示す。 $f_{\text{rep}1}$ および $f_{\text{rep}2}$ は安定化制御により一定に保たれているのに対し、 $f_{\text{beat}1}$ および $f_{\text{beat}2}$ が変化している様子が確認できる。これらの値に基づいて m と f_{THz} を算出した結果を図4に示す。ステップ走査のタイミングで m の次数が変化し、それに対応して f_{THz} がステップ状に変化している様子が確認できる。また、リニア走査状態では f_{THz} が連続的に変化している。このようにして決定された f_{THz} は、実際の f_{THz} と 10^{-14} の精度で一致していた。

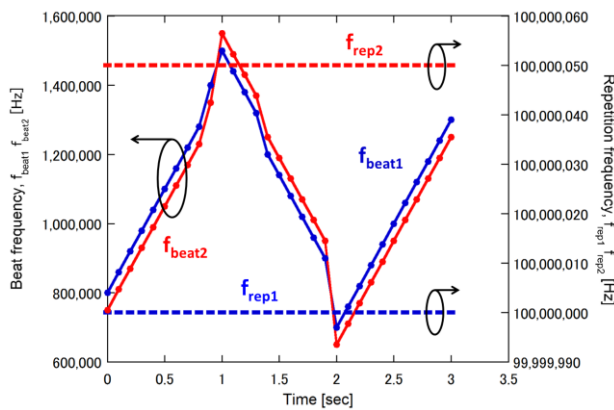


Fig. 3. Temporal change of $f_{\text{rep}1}$, $f_{\text{rep}2}$, $f_{\text{beat}1}$ and $f_{\text{beat}2}$.

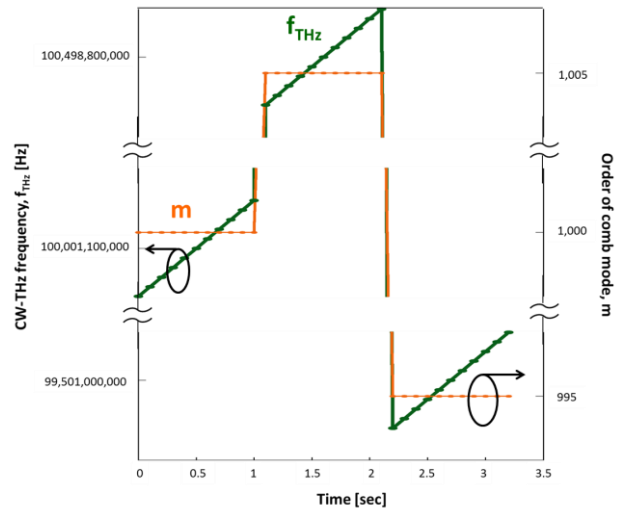


Fig. 4. Temporal change of m and f_{THz} .

5. まとめ

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えることを実際の測定から示すことが出来た。これにより、時々刻々と出力周波数に変化するような CW-THz 光源の周波数特性評価が可能になると考えられる。

文献

- 1) S. Yokoyama, R. Nakamura, M. Nose, T. Araki, and T. Yasui, "Terahertz spectrum analyzer based on a terahertz frequency comb", Opt. Express, Vol. 16, Issue 17, pp. 13052-13061 (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", Opt. Express, Vol. 17, Issue 19, pp. 17034-17043 (2009).