

「デュアル THz コムを用いた CW-THz 波のリアルタイム絶対周波数計測」

1. イントロダクション

周波数は電磁波の最も基本的な測定量の一つであり、電波領域や光波領域では周波数を計測するために様々な手法が用いられている。周波数計測の従来手法として、光波領域では干渉計測、電波領域では電氣的ヘテロダイン法が用いられてきた[1]。干渉計測では、干渉計によって干渉縞を生成し、被測定光源と既知周波数光源（周波数安定化レーザーなど）の干渉縞の比較から周波数を測定する。一方、電氣的ヘテロダイン法では、被測定波と局部発振器（既知周波数）の信号をミキシングし、発生したビート信号から周波数を求める。

近年、光波と電波の境界に位置するテラヘルツ（THz）波がセンシングや通信の新しい手段として注目されており、THz 領域における周波数測定の必要性が高まっている。しかし、上記の従来手法を THz 領域まで拡張する場合、検出器やミキサの熱ノイズを抑制するため極低温まで冷却しなければならなかった。

そこで本研究では、室温環境で高精度な周波数測定が可能な光伝導ミキシング法を用いて THz コム参照型スペクトラム・アナライザ（THz スペアナ）を構築し、実験を行っている[2]。THz スペアナでは、ヘテロダイン法的一种である光伝導ミキシングを用いて、THz 帯の信号を RF 帯までビートダウンし、周波数計測を行う。光伝導ミキシングは、連続発振（CW）-THz 波を受信するアンテナ機能と局部発振器からの信号とミキシングする機能を併せ持つ光伝導アンテナ（PCA）を用いていて、室温動作が可能である。また局部発振器にフォトキャリア（PC）-THz コムを用いることで、THz 帯を高い周波数確度でフルカバーすることも出来る。

この手法を用いて我々のグループでは CW-THz 波の絶対周波数を決定[2]、UTC-PD のビート信号のモニタリング[3]を行ってきた。しかし、THz スペアナを用いた実用的な周波数計測装置を構築するために問題点があった。それは、絶対周波数を決定する際に繰り返し周波数を変化させる前と後のビート周波数計測が必要で、時々刻々と変化している CW-THz 波は測定が困難であるということ。また、従来のように周波数カウンターを用いて測定を行った場合、(1)ゲート時間の制限があり速い現象が計測できない(2)高い信号 SN 比が必要、といった問題点が挙げられる。

そこで本報告では、デュアル PC-THz コムを用いて絶対周波数測定をリアルタイムで行えるよう改良した。また、時間波形をデジタイザーで高速サンプリングし、ヒルベルト変換を用いて瞬時周波数を算出することで、CW-THz 波の速い現象を測定できるようにした。

2. 実験原理

THz スペアナでは、ヘテロダイン法的一种である光伝導ミキシングを用いて、THz 帯の信号を RF 帯までビートダウンし、周波数計測を行う。

光伝導ミキシングは図 1 に示すように、連続発振テラヘルツ (CW-THz) 波を受信するアンテナ機能と局部発振器からの信号とミキシングする機能を併せ持つ PCA を用いており、室温動作が可能である。また局部発振器に PC-THz コムを用いることで THz 帯を高い周波数精度でフルカバーすることも出来る。レーザー光により PCA 上に生成された PC-THz コムと CW-THz 波がミキシングされ、電極間に電流が流れる。これにより発生した RF 帯電流ビート信号は電流電圧変換アンプを介してスペアナで検出される。

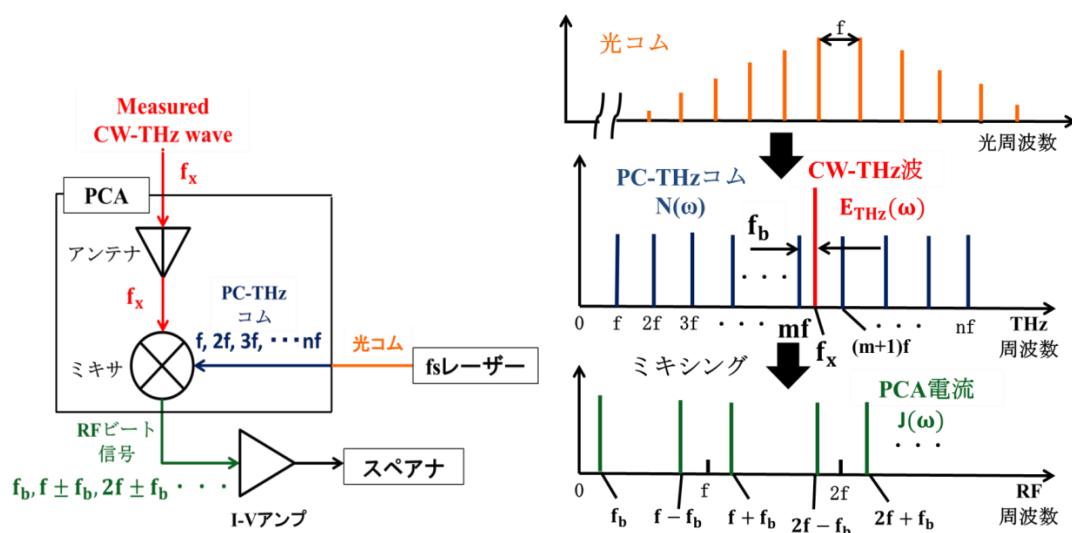


図 1 光伝導ミキシング法

また、従来のビート信号から被測定 CW-THz 波の絶対周波数を決定する方法について説明していく。図 2 に周波数領域上での PC-THz コムと CW-THz 波の関係を示している。ここで、CW-THz 波周波数 f_x とビート周波数 f_b の関係は

$$f_x = mf \pm f_b \quad (2.1)$$

となる。モード同期周波数 f と、ビート周波数 f_b は周波数カウンター、あるいは RF スペアナで直接測定することが出来るため、絶対周波数 f_x を求めるためには次数 m と f_b の符号の決定が必要となる。

そこで、次数 m を求めるためには、まず、共振器長制御により、モード同期周波数

を f から $f + \delta f$ に変化させる. この時, f_x が一定であるならば, ビート周波数は f_b から $f_b + \delta f_b$ に変化する. ここで, $|\delta f_b| = |m\delta f|$ であるので,

$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f|} \quad (2.2)$$

となり, 次数 m が決まる. これにより, 絶対周波数 f_x は $\delta f_b / \delta f < 0$ のとき,

$$f_x = mf + f_b \quad (2.3)$$

$\delta f_b / \delta f > 0$ のとき,

$$f_x = mf - f_b \quad (2.4)$$

となり, 絶対周波数が決定できる[2].

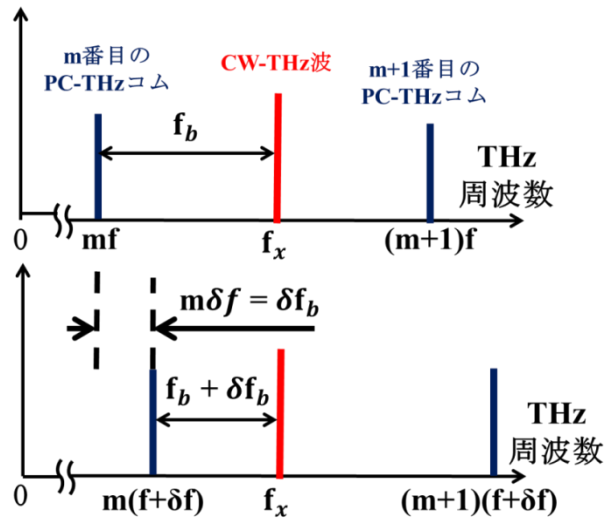


図2 従来の絶対周波数の決定方法

しかし上記の手法では繰り返し周波数を変化させる前と後の2段階の測定が必要となる. そこで本研究では, 繰り返し周波数の異なるPC-THzコム1, 2 ($f_{\text{rep1}}, f_{\text{rep2}}$) と, 測定CW-THz波の絶対周波数 f_x から生成されるビート周波数はそれぞれ $f_{\text{beat1}}, f_{\text{beat2}}$ となり, $f_x = mf_{\text{rep1}} \pm f_{\text{beat1}} = mf_{\text{rep2}} \pm f_{\text{beat2}}$ と表すことが出来る. よって $f_{\text{rep1}}, f_{\text{rep2}}, f_{\text{beat1}}, f_{\text{beat2}}$

をそれぞれ測定することで、次数 m は $|f_{beat1} - f_{beat2}| / |f_{rep1} - f_{rep2}|$ から求めることができ、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、最終的に絶対周波数を決定することが出来る (図 3)。

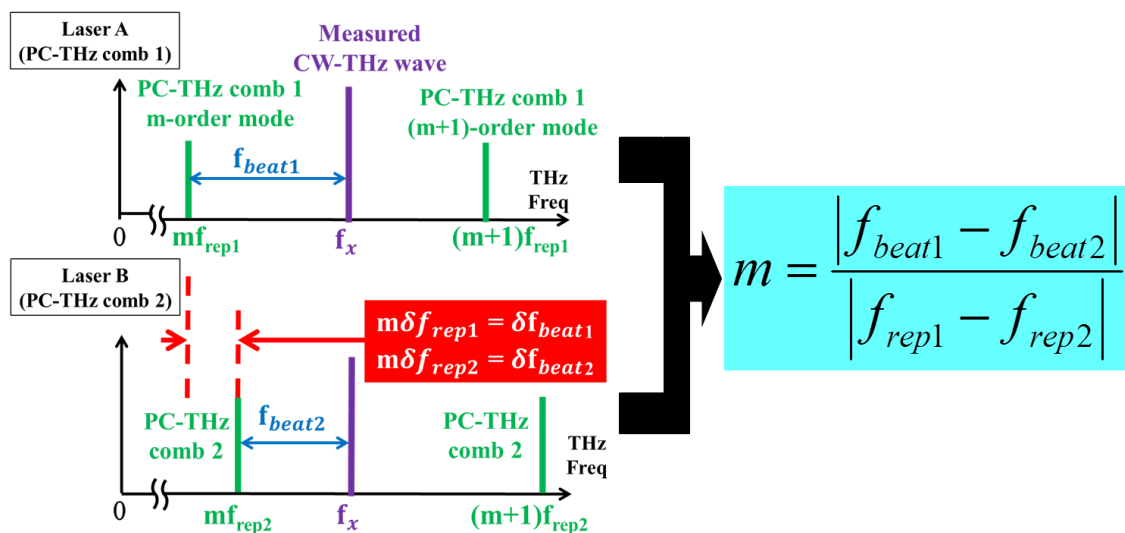


図 3 リアルタイムでの絶対周波数の測定方法

3. ヒルベルト変換

また従来のように、周波数カウンターを用いて測定を行った場合、(1)ゲート時間の制限があり速い現象が計測できない(2)高い信号 SN 比が必要、といった問題点が挙げられる。そこで今回は、時間波形をデジタイザーで高速サンプリングし、ヒルベルト変換を用いて瞬時周波数を算出した。ヒルベルト変換とは、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。

$$z(t) = f(t) + ig(t) \quad (3.1)$$

そして、図 4 より位相 $\theta(t)$ は

$$\theta(t) = \tan^{-1}\left(\frac{\text{ヒルベルト変換後の信号}}{\text{ビート信号}}\right) = \tan^{-1}\left[\frac{g(t)}{f(t)}\right] \quad (3.2)$$

となる。これより瞬時周波数 $f_{i,beat}$ は、

$$f_{i,beat} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (3.3)$$

で求めることができる[4]。

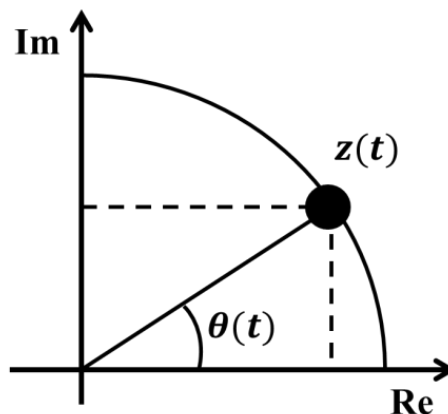


図 4 複素時間領域信号

4. デュアル THz コムを用いた CW-THz 波のリアルタイム絶対周波数計測

4.1 実験装置

実験装置を図 5 に示す。用いた 2 台のレーザーは、それぞれ 100,000,000Hz, 100,000,050Hz の繰り返し周波数に安定化制御されている。このレーザー光（波長:1550nm）は非線形光学結晶である PPLN によって波長変換（775nm）され、PCA に入射される。また、シンセサイザーの出力を 6 通倍したものを CW-THz 波（周波数:75~110GHz）として PCA に入射する。これによって発生する電流ビート信号は、カレント・プリアンプ（帯域:40MHz, トランスインピーダンスゲイン:100kV/A）によって増幅される。その後、デジタイザーによって取り込まれ、PC 上で解析・計算が行われ、CW-THz 波の絶対周波数が算出される。

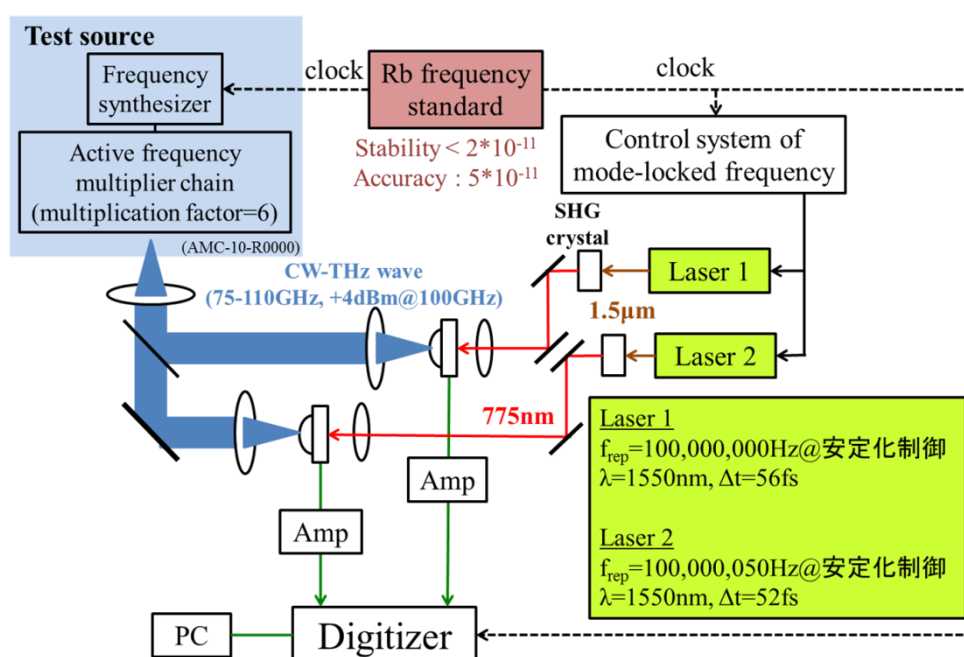


図 5 実験装置

4.2 実験結果

まず、ビート信号と CW-THz 波の測定結果を図 6 に示す。ビート信号は 1MHz 程度となるように調節されており、デジタルのバンドパスフィルターを用いてノイズ成分をカットしている。図 6 の結果から、高速な変動を測定することが出来ており、この 100ms ごとの瞬時周波数の平均値を 100 回積算した値から絶対周波数を算出すると高精度に絶対周波数を決定出来た。

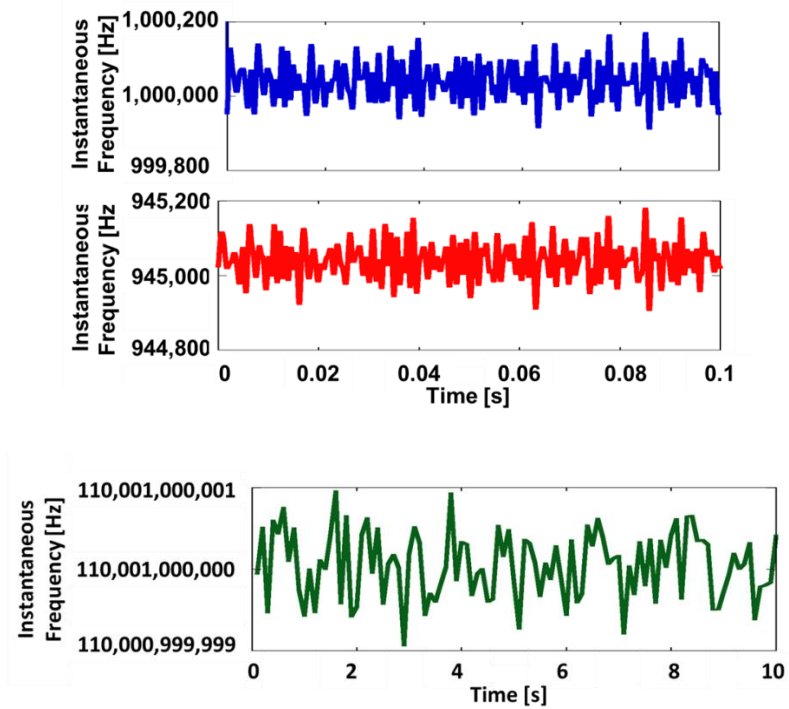


図 6 ビート信号と CW-THz 波の瞬時周波数

また、CW-THz 波をリアルタイムモニタリングした結果を図 8 に示す。微小な変化だけではなく、コムモード次数が変わるような大きな変化を与えた場合でも絶対周波数が決定出来ていることが分かる。このことから、モードホップのようなコムモード次数が変化するような周波数変化もリアルタイムで決定できることが分かった。

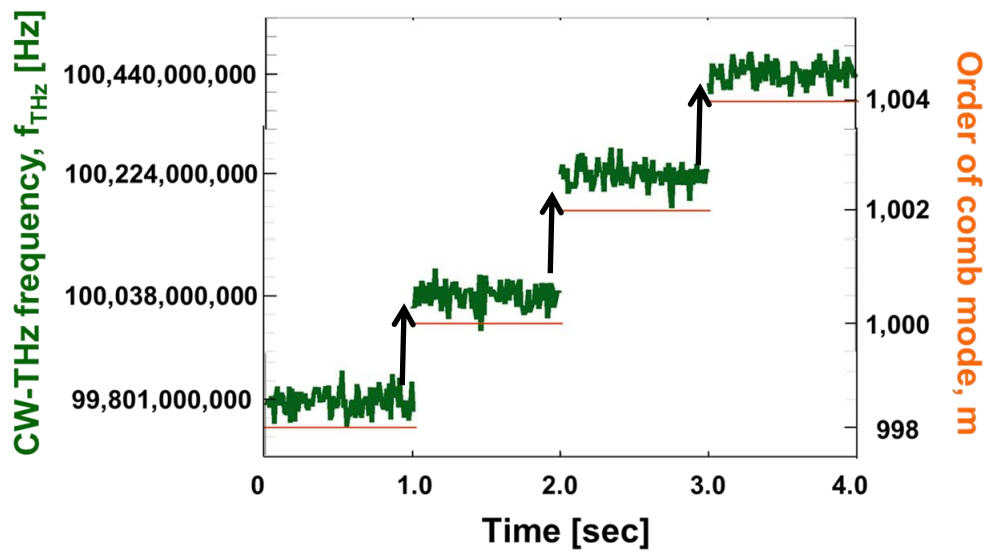


図8 CW-THz波のリアルタイムモニタリング

最後に、本絶対周波数計測の実験精度を図9に示す。CW-THz波の絶対周波数を80-110GHzまで変化させた時の測定誤差（青線）と実験精度（赤線）が示されており、実験精度とは、測定値と設定値の差を設定値で割った値と定義している。すると測定誤差は数十 mHz 程度となった。ここでこの値が妥当かどうかを評価するため、各値の揺らぎ量から測定誤差の値を見積もった。すると許容の範囲内で一致することが分かり、本実験精度は 3.9×10^{-13} という結果となった。

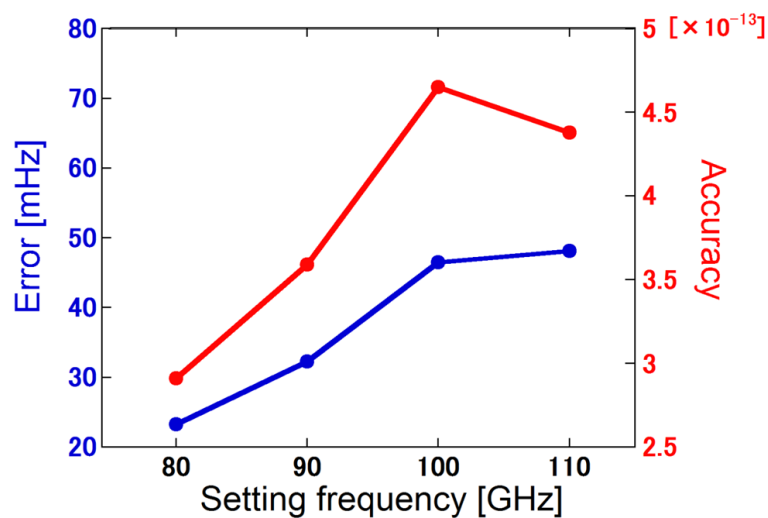


図9 絶対周波数計測の実験精度

5. まとめと今後の予定

本研究では、デュアル PC-THz コムを用いたリアルタイム絶対周波数測定を行った。今回は時間波形をデジタルサイザで高速サンプリングし、ヒルベルト変換を用いて瞬時周波数を算出したことにより、ビート信号が弱くても絶対周波数計測が行えるようになった。そのことから、50MHz すべての信号を取得可能になった。また高速な変動を計測可能になったため実用的な絶対周波数計測装置となったのではないかと考える。

今後の予定としては、THz-QCL とのビートを検出し位相同期をかけるところまでをこなしていきたいと考えている。

参考文献

- [1] 大森豊明「テラヘルツテクノロジー～発生・計測・応用技術・展望～」, NTS, p146-152, (2005).
- [2] S. Yokoyama et al., Opt. Express, **16**, 17, 13052-13061 (2008).
- [3] T.Yasui et al., Opt.Express **17**, 19, 17034-17043 (2009).
- [4] Heiko Füsler et al., Appl. Phys. Lett. 99,121111(2011).