

# 光キャリアテラヘルツ周波数コムを用いた連続波テラヘルツ発振器からのマイクロ波合成

Shigeo Nagano, Hiroyuki Ito, Motohiro Kumagai, Masatoshi Kajita, and Yuko Hanado, OPTICS LETTERS 32,2137(2013)

## 1. イントロダクション

0.1~10 テラヘルツ (THz) の THz 領域における最近の技術進歩は、天文学、生物学、材料分析、情報通信技術など多くの科学や産業の分野で斬新なアイデアが得られている。THz 領域での周波数コムは、強力なツールであり、絶対的な THz 周波数[1-3]をカウントし、量子カスケードレーザ[4]を安定化させるための周波数基準のグリッドを提供するためのマイクロ波から THz ブロードバンドシンセサイザとして使用されている。これまでは THz 波をダウンコンバートすることでマイクロ波領域としていた。しかし、直接的にマイクロ波領域に THz 放射からの情報を転送する方法は開発されていない。我々は、光伝導アンテナ (PCA) で生成された THz 周波数コムを用いて THz 放射から周波数合成された低位相ノイズマイクロ波信号の生成を実証する。この THz - マイクロ波周波数合成装置は、マイクロ波領域に現存する周波数標準[5,6]と THz 発振器との正確な比較を可能にする。それは、 $10^{-16}$  の不確かさを持つと予想される新しい THz 周波数標準を確立するために不可欠である、その基本定数の時間発展を検出することで、いわゆる標準理論をテストすることができる。また、ボルン - オッペンハイマー近似の分解の程度を特徴づけるために役立つ[7]。さらに THz - マイクロ波シンセサイザは、THz 周波数分割器として機能し、将来のコグニティブ無線技術を用いた高速無線ネットワークとして潜在的に有用であり、これは限られた利用可能なスペクトル帯域を効率的に使用する伝送パラメータを変化させる。

## 2. 原理

THz - マイクロ波合成の原理は、図 1 に示されている。フェムト秒 (fs) レーザ周波数コム (FLFCs) のスペクトル成分は、周期的に、パルス繰り返しレート  $f_{rep}$  分の間隔を保ち、キャリアエンベロープオフセット周波数  $f_{ceo}$  だけずれている。FLFCs の  $n$  番目の周波数成分  $f_n$  は完全に二つの周波数によって決定され、 $f_n = n f_{rep} + f_{ceo}$  で決定される、また  $n$  は整数である。光伝導プロセスと FLFCs を組み合わせることにより、THz 領域に周波数コムの概念を拡張することができる。光キャリア発生のシーケンスは、PCA に fs の光パルス列が導入されることにより誘導される。これは、THz 領域における光キャリア  $f_k^{PC}$  の周波数コム構造を構築する、 $k$  は整数で右上の文字(PC)はフォトキャリアを示す。FLFCs とは異なり、この光キャリア THz コムは、周波数オフセットしていない。FLFCs のスペクトル成分が PCA 中でミキシングされているので、非線形波長変換素子とみなし、THz コムのスペクトル成分は、差周

波発生プロセスによって生成される： $f_k^{PC} = f_n - f_m = (n - m) \times f_{rep}$   $k=n-m$  のとき. PCA  
 において CW-THz 放射によって生成された光キャリア  $f_{cw}^{PC}$  は THz コムによってダウンコ  
 ンバートされ, 光キャリアビート信号  $f_{beat}^{PC}$  はアクセス可能な RF 帯となる, その結果,  
 $f_{beat}^{PC} = f_{cw}^{PC} - f_k^{PC}$ . THz - マイクロ波シンセサイザで  $f_k^{PC}$  は  $f_{beat}^{PC}$  の位相ロックループ  
 (PLL) を介して  $f_{cw}^{PC}$  に安定化される.

$$f_{rep}^{PC} = (f_{cw}^{PC} - f_{beat}^{PC}) / k \quad (1)$$

$f_{rep}^{PC}$  は光キャリア THz コムのモード間隔である. 光領域で  $f_{rep}$  は, 原則的には  $f_{rep}^{PC}$  に相  
 当するので, コヒーレントな THz 放射に連結されたマイクロ波信号は fs レーザからの光パ  
 ルス列を直接検出することにより得ることができる. 図 1 に示すように検出用フォトダイ  
 オードからの出力信号は, 高周波領域における周波数コム構造を形成する. 従って  $f_{beat}$  の  
 $s$  番目の高調波をマイクロ波信号の位相コヒーレントから THz 放射として得ることができ  
 る.  $s$  は整数である.

従来の THz スペクトラムアナライザでは fs レーザと CW-THz 発振器のリファレンスは同  
 じではあったものの, CW-THz 発振器での揺らぎが考慮されていなかった. しかし本論文で  
 の手法では fs レーザと CW-THz 発振器の信号とをミキシングし, ミキシング後のビート信  
 号をレーザに返すことで, CW-THz 発振器での揺らぎを反映させた fs レーザとなり, より高  
 確度で周波数計測を行える.

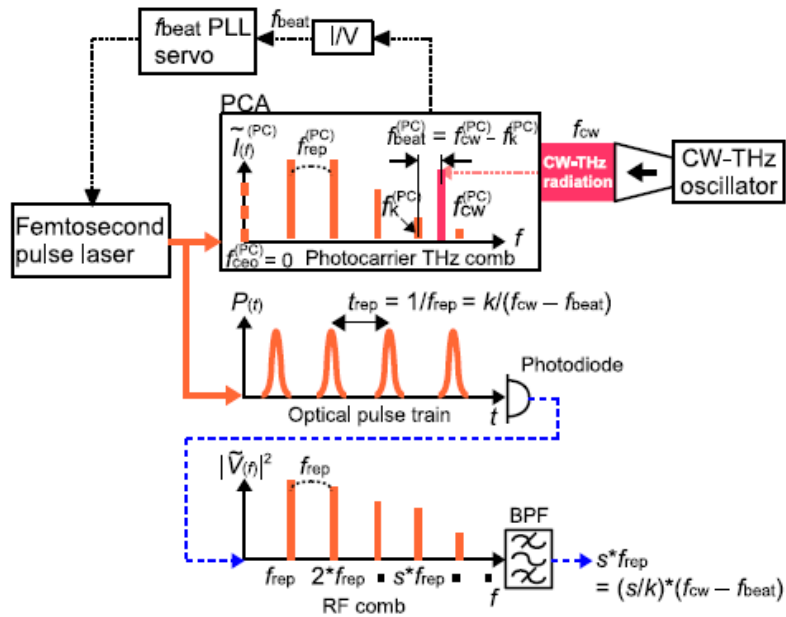


図 1. THz - マイクロ波合成の原理. PCA: 光伝導アンテナ, I/V: 電流 - 電圧変換器, PLL: 位相ロックループ, BPF: バンドパスフィルタ, F: 周波数, T: 時間, I: 電流,

P : 光パワー, V : 電圧, 上付き文字 (PC) は, 光キャリアを示している.

### 3. 実験装置

THz - マイクロ波シンセサイザのための実験セットアップは図 2 に示されている.

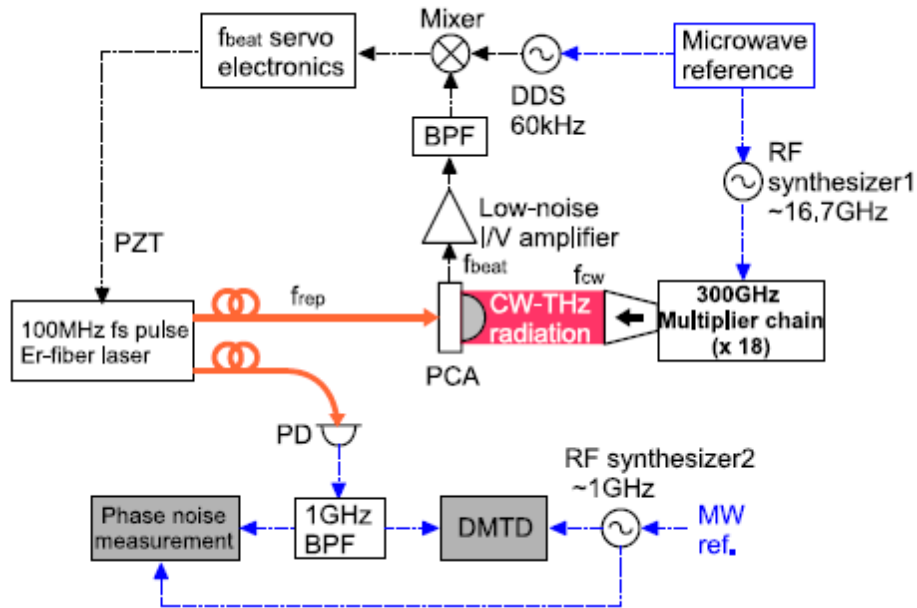


図 2. THz からマイクロ波を合成するための実験装置. PCA : 光伝導アンテナ, LNA : 低雑音増幅器, PD : フォトダイオード, BPF : バンドパスフィルタ, PZT : 圧電トランスデューサー, DDS : ダイレクト・デジタル・シンセサイザ.

CW-THz 放射は低雑音の RF シンセサイザ 1 (バージニアダイオード, Inc) を有する周波数通倍器チェーンから出射された. その周波数は 2 mW の出力パワーで 0.3 THz だった. 自由空間における THz 放射は伝搬後, THz 検出用 PCA に入射した. この PCA は高効率のサブ THz 検出に適したボウタイアンテナパターンを有していた. 1.5  $\mu\text{m}$  のエルビウムドープファイバレーザは, 50 mW の平均電力でファイバ結合された 2 つの出力を有していた. どちらも, 100 MHz の繰り返し率と 55 fs のパルス幅を有していた. 1 つの出力は光キャリアの THz コムを生成するために使用され, 他方がマイクロ波信号を合成する. CW-THz 放射と THz コムは, PCA 内の光導電電流としてヘテロダインビート信号を生成する. ビート信号は  $10^9$  V/A のトランスインピーダンスゲイン = (FEMTO MESSTECHNIK DLPCA-200) を用いて低雑音増幅器で増幅された. アンプでのビート信号の高い SN 比 (SNR) を得るために, 信号周波数がわずかに RF シンセサイザ 1 の周波数を変化させることによって 60 kHz に設定した. ビート信号の SNR は, 100 Hz の分解能帯域幅 (RBW) で 45 dB である. (図 3 (a)). ビート信号は,  $f_{beat}$  の制御信号を抽出するためのデジタルミキサによるダイレクト

・デジタル・シンセサイザの出力と比較された。制御信号は、共振器長を変調するために fs レーザの PZT アクチュエータにフィードバックされた。PLL の制御帯域は、約 1.5 kHz であった。PLL の相対周波数不安定性は図 4 の Plot(c)にあるように  $\tau^{-1}$  の依存性を持ち  $10^{-16}$  レベルまで 1 秒の平均化時間  $\tau$  で  $3 \times 10^{-14}$  だった。この測定は、10 Hz の帯域幅を持つデュアルミキサ時間差技術によって実施された[8]。fs レーザからの光パルス列をファイバー結合高速 InGaAs フォトダイオードによって直接検出した。RF コムの第 10 のモードは、1 GHz の中心周波数 (図 3(b)) で狭帯域バンドパスフィルタによって選択された。これは 3000 の係数  $k$  を  $f_{rep}$  まで 0.3 THz CW 放射を分割することに対応していて、そして 10 倍の  $S$  をかけて 1 GHz にする。合成された 1 GHz の信号は、THz - マイクロ波変換を特徴付けるために、周波数不安定性および単側波帯 (SSB) 位相ノイズを測定した。

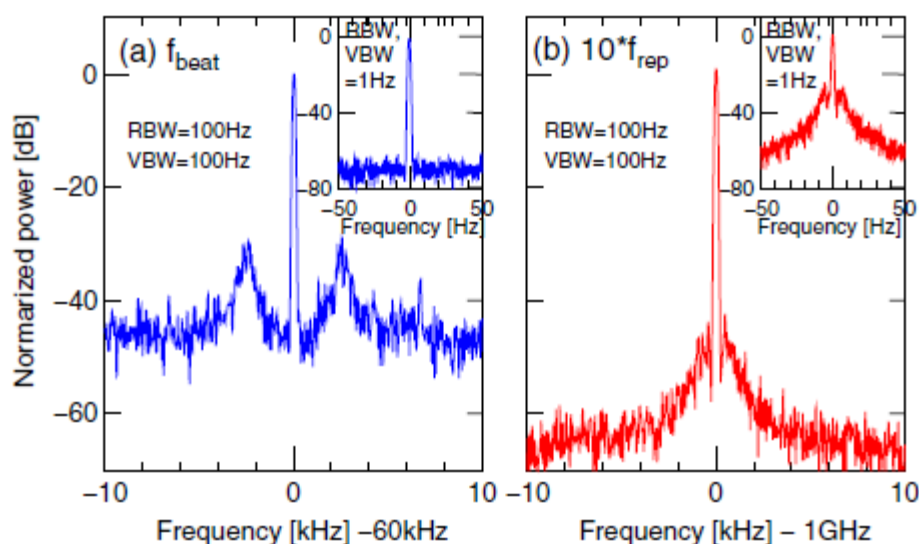


図 3. (a) 0.3THz 発振器と THz コム間ヘテロダインビート信号のスペクトル, および (b) 1 GHz のマイクロ波信号は, 0.3 THz CW 放射から合成された。

挿入図はより高い解像度で各スペクトルを示す。THz 発振器と THz コムが共通のマイクロ波基準を持っていることに注意する。

$f_{rep}^{PC}$  は、1 秒で 1 mHz 以下の変動の低周波数リファレンスに位相ロックされているので  $f_{cw}$  の位相ノイズは合成マイクロ波信号の支配的なノイズ源となることが期待されている。図 4 のプロット(a)は 0.3 THz CW 発振器から合成された 1 GHz の信号の不安定性を示しています。デュアルミキサ時間差技術は、他の低雑音 RF シンセサイザ 2 の助力と共にこの測定に用いられた。達成不安定性は、1 秒で  $2 \times 10^{-13}$  だった。そして 300 秒以内に  $10^{-16}$  レベルまで平均化された。図 4 (b) にプロットされたように、この測定は、一般に RF シンセサイザ 1,2 の不安定性によって制限される。図 4 の意図として THz 波の情報をマイクロ波領

域に転送できているかの検証のためである。図4の(a), (b)のグラフは類似している。(a), (b)はともにシンセサイザ2に対する評価である。つまり(a), (b)のグラフが類似しているということは1 GHzのマイクロ波信号とRFシンセサイザ1の安定度が類似しているということである。これはCW-THz波の元であるシンセサイザ1の情報(THz波の情報)を1 GHzのマイクロ波信号に転送できていると言える。この結果、目的であったTHz波の情報をマイクロ波領域に転送することができた。

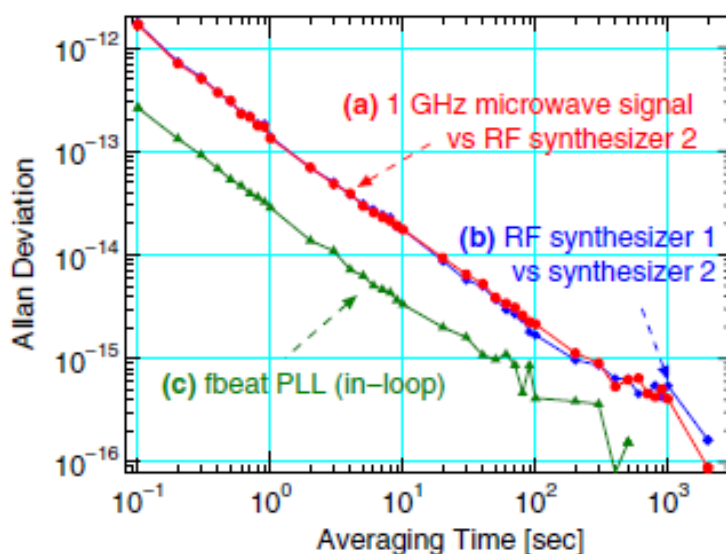


図4. (a)は CW-THz放射から合成された1 GHzのマイクロ波信号の不安定性のアラン分散。そして(c)は、 $f_{beat}$ の位相ロックループ(c)。(b)2つのRFシンセサイザの相対的な不安定性は、比較のためにプロットされている。

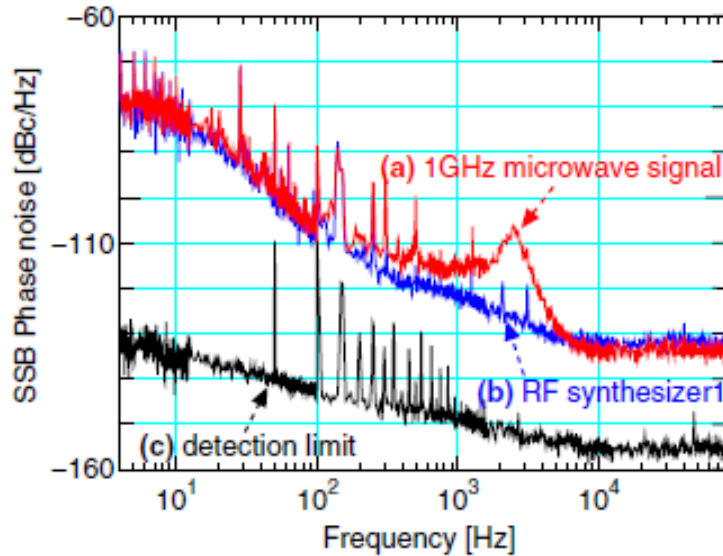


図 5. RF シンセサイザ 2 に対して様々なマイクロ波信号の SSB 位相ノイズスペクトルを示す. (a)0.3 THz CW 放射から合成された 1 GHz の信号, (b)周波数逡倍器チェーンで使用される RF シンセサイザ 1, (c)シンセサイザ 2 から共通の 1 GHz の信号を用いて測定された検出限界.

これらは、ダブルバランスドマイクロ波ミキサを使用して位相比較により決定した。ミキサの出力は、ローパスフィルター、濾過された後、高速フーリエ変換分析器に送られた。図 5 のプロット (a) は、1 GHz の信号のプロットで CW-THz 発振器とコヒーレント位相である。THz からマイクロ波変換は、200 Hz 以下の有意な過剰ノイズをもたらさなかった、なぜなら合成された 1 GHz の信号の相対的な SSB 位相ノイズは、この実験で使用される RF シンセサイザとよく一致しているためである。(図 5, プロット(b)). 2 kHz 周りのバンプは PLL  $f_{beat}$  の位相余裕の不足によって引き起こされた。SSB 位相ノイズレベルは、それぞれ 1 GHz の搬送波周波数 100 Hz で -105 dBc/Hz , 10 kHz で -134 dBc/Hz であった。これは、7 kHz 以上ノイズレベルでは高フーリエ周波数での光パルスのタイミングジッターが本質的に低ノイズのため RF シンセサイザ 1 のタイミングジッターよりも低いことに留意すべきである。図 4 では安定度での THz 波の情報をマイクロ波領域に転送できているかを評価しているのに対して、図 5 では SBS 位相ノイズでの評価を行っている。(a), (b)が類似していることから RF シンセサイザ 1 をもとにした CW-THz 波の情報が 1 GHz のマイクロ波領域に転送できたとみなせる。

#### 4. まとめ

結論として、CW-THz 発振器からの低雑音マイクロ波合成は PCA における光キャリアの THz コムを用いて実証された。1 GHz の周波数を有する合成されたマイクロ波信号はコヒー

レントに 0.3 THz CW 放射にリンクされて 300 秒以内に $10^{-16}$ と測定されたわずかな不安定さとキャリア周波数からの 100 Hz オフセットで-105 dBc/ Hz の SSB 位相ノイズレベルを持っていた。THz - マイクロ波分割が使用される低ノイズの RF シンセサイザの安定性の中に有意な過剰雑音を含まない。我々の理論推定は、このマイクロ波合成技術は、1 THz 以上で機能することができることを示している。THz - マイクロ波シンセサイザは、将来の THz 計測のために重要であり、次世代高速無線通信としての可能性のある THz 周波数分周器でも重要とされるであろう。

## 5. 結言

これまで CW-THz 発振器と fs レーザをミキシングし、発生したビート信号を QCL 等に返すことにより制御していた。しかし本論文では CW-THz 発振器と fs レーザをミキシングすることにより発生したビート信号を fs レーザ自体に返すことにより、fs レーザに CW-THz 発振器の微小な揺らぎを反映させることができている。しかし、fs レーザに返すビート信号を発生させるためにミキシングする 2 つの成分は、リファレンスは同じであるが、CW-THz 発振器で 300 GHz を出力する為に逡倍器で 18 倍まで増幅しており、その違いに問題はないのかと考えた。

## 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" *Opt. Express* **16**, 13052 (2008).
2. D. S. Yee, Y. Jang, Y. Kim, and D.-C. Seo, "Terahertz spectrum analyzer based on frequency and power measurement" *Opt. Lett.* **35**, 2532 (2010).
3. H. Füsler, R. Judaschke, and M. Bieler, "High-precision frequency measurements in the THz spectral region using an unstabilized femtosecond laser" *Appl. Phys. Lett.* **99**, 121111 (2011).
4. M. Ravaro, C. Manquest, C. Sirtori, S. Barbieri, G. Santarelli, K. Blary, J.-F. Lampin, S. P. Khanna, and E. H. Linfield, "Phase-locking of a 2.5 THz quantum cascade laser to a frequency comb using a GaAs photomixer" *Opt. Lett.* **36**, 3969 (2011).
5. M. Kajita, G. Gopakumar, M. Abe, and M. Hada, "Elimination of the Stark shift from the vibrational transition frequency of optically trapped  $174\text{Yb}6\text{Li}$  molecules" *Phys. Rev. A* **84**, 022507 (2011).
6. S. G. Karshenboim and E. Peik, "Limit on the Present Temporal Variation of the Fine Structure Constant" *Astrophysics, Clocks and Fundamental Constants* (Springer, 2004).
7. P. R. Bunker, "On the breakdown of the Born-Oppenheimer approximation for a diatomic molecule" *J. Mol. Spectrosc.* **42**, 478 (1972).
8. K. Mochizuki, M. Uchino, and T. Morikawa, "Frequency-Stability Measurement System Using High-Speed ADCs and Digital Signal Processing" *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **56**, 1887 (2007).