**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，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 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 だけずれている．FLFCsのn番目の周波数成分 は完全に二つの周波数によって決定され，= n + 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 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：　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 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 はアクセス可能なRF帯となる，その結果，　 ．THz‐マイクロ波シンセサイザで は の位相ロックループ（PLL）を介して　　に安定化される．

は光キャリアTHzコムのモード間隔である．光領域で は，原則的には 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 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）を有する周波数逓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 μm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ー結合された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 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，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 の依存性を持ちレベルまで1秒の平均化時間τで　だった．この測定は，10 Hzの帯域幅を持つデュアルミキサー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 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．

　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 　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．デュアルミキサー時間差技術は，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×だった ．そして300秒以内に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， 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)周波数逓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ーを使用して位相比較により決定した．ミキサーの出力は，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 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**

　これまでは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を出力する為に逓倍器で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 measuremen” Opt. Lett. **35**, 2532 (2010).

3. H. Füser, 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 174Yb6Li 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).