

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560420

研究課題名(和文) 複数のビート光を利用したテラヘルツ帯連続波の電力合成技術の開発

研究課題名(英文) Study on Power Synthesis of THz Continuous-Wave Signal by Multiple Optical Beats

研究代表者

中條 渉 (CHUJO, WATARU)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：40292289

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：互いにコヒーレントな2組のビート光を用いて生成した6GHz連続波をダイポールアンテナを用いて空間合成した。2組の6GHz連続波の位相を光ファイバ長または半導体レーザの波長を調整して同相合成することで受信電力が6dB増加することを確認した。さらにコヒーレントな2組のビート光を用いて生成した20GHz連続波の位相を半導体レーザの波長で調整し、ショットキーバリアダイオードで合成電力を評価した。同相合成で受信電力が約4dB増加することを確認した。

一方、互いにインコヒーレントな2組のビート光を用いて生成した6GHz連続波をダイポールアンテナを用いて空間合成し、受信電力が3dB増加することを確認した。

研究成果の概要(英文)：6-GHz continuous signal was coherently synthesized with in-phase and reversed-phase by two optical beats. 6-GHz continuous signal was synthesized spatially by adjustment of SMF length or DB-FB-LD wavelength. Measured power of 6-GHz signal synthesized with in-phase was increased by almost 6dB compared with that generated by one optical beat. Furthermore, 20-GHz continuous signal was coherently synthesized by two optical beats and detected by SBD detector. Measured power of 20-GHz signal synthesized with in-phase was increased by around 4 dB compared with that generated by one optical beat.

In addition to the coherent synthesis, 6-GHz continuous signals were incoherently synthesized by two optical beats. The power of incoherently synthesized 6-GHz signal was increased by 3dB compared with that generated by one optical beat. 6-GHz continuous signals were also synthesized spatially using dipole antennas and the microwave power was increased by almost 3dB.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：マイクロ波・ミリ波 テラヘルツ

1. 研究開始当初の背景

0.3~3 THz のテラヘルツ周波数領域の電磁波発生は、従来、自由電子レーザーに代表される大型装置が必要であったが、近年、数百フェムト秒以下の超短パルス光を生成できるフェムト秒レーザーが普及している。このパルス光を電気光学素子や半導体、超伝導材料に照射して得られる超短 THz パルスの発生と検出を用いて、生体分子の振動準位や分子間相互作用を時間領域分光法によりセンシングすることで、医療や薬学などのバイオメディカル研究分野への応用が図られている。

しかし超短 THz パルスは、スペクトルとして数 THz の広がりを持ち時間的なコヒーレンスは劣るため、線幅の狭い周波数可変 THz 光源が必要となるフーリエ分光法やコヒーレンストモグラフィ計測技術への適用が難しい。この THz 帯の連続波は 2 波の波長可変レーザーの周波数差を THz 帯としたビート光を電気光学素子や半導体、超伝導材料等でミクシングすることで比較的容易に得られる。しかし THz 帯でフーリエ分光法やコヒーレンストモグラフィ計測技術にテラヘルツ帯連続波を適用するためには、連続波の出力をさらに 1~2 桁程度向上させる必要があると思われる。

2. 研究の目的

本研究では、ビート光を用いて 300 GHz 以上のテラヘルツ帯で高出力の連続波を発生するテラヘルツ帯連続波電力合成技術の開発を目指し、以下の 3 つの技術を実証する。

(1) 複数の光ファイバを用いた構成で確実にマイクロ波・ミリ波の位相合成を実現できる技術を開発する。光ファイバ毎に光変調器を用いて確実に性能を評価できる構成でマイクロ波・ミリ波の位相合成実験を行う。個々のフォトダイオードでミクシング出力として得られたマイクロ波・ミリ波信号の位相を正確に測定し、複数の光ファイバを用いた構成で位相合成が確実に実現できることを明らかにする。

(2) 複数の半導体レーザーと複数の光ファイバを用いて異なるビート光として得られたマイクロ波・ミリ波の電力合成技術の実証を行う。半導体レーザーのビート光のミクシング出力として得られるマイクロ波・ミリ波連続信号を 2 組生成する。それぞれフォトダイオードから出力されるマイクロ波・ミリ波の位相をファイバの波長分散と半導体レーザーの波長制御により調整して同相で合成する技術を開発する。合成されたマイクロ波・ミリ波電力を検出器で測定しコヒーレントな空間電力合成の性能を正確に評価する。

(3) 300 GHz 以上のテラヘルツ波帯での空間電力合成技術の開発を試みる。300 GHz 以上の個々のテラヘルツ波信号の位相を測定することは技術的に困難であるが、空間合成されたテラヘルツ波信号をショットキーバリアダイオードで検出し、得られた電力を合成しない場合と比較する。

3. 研究の方法

(1) 複数の光ファイバで確実にマイクロ波・ミリ波の位相合成ができるように、図 1 に示す光ファイバ毎に光変調器を用いた構成でマイクロ波の電力合成実験を行う。

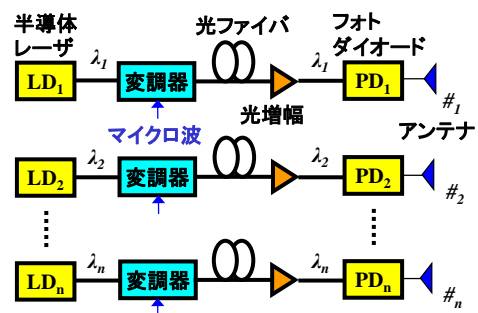


図1 複数のファイバを用いた位相合成技術

同一信号源からのマイクロ波信号で変調された波長 λ_n の各半導体レーザー光はファイバ長 L 、ファイバの波長分散値 D の特性を有する単一モード光ファイバを通すことで、波長分散値 D による遅延 $\tau = DL\Delta\lambda$ が生じる。ここで分散値 D 、ファイバ長 L 、基準波長からの波長差 $\Delta\lambda$ を一定とすれば、遅延時間 τ は同一時間となる。この変調光をフォトダイオード (PD) にて検出することで遅延時間 τ のマイクロ波・ミリ波連続信号を得ることができる。実際に得られた複数のマイクロ波・ミリ波連続信号の振幅と相対位相を個々に評価することで、提案する電力合成技術の性能を詳細に評価できる。

(2) 図 2 に示す温度制御された 2 つの異なる波長 λ_a と λ_b の半導体レーザー (LD) から連続光を発生させる。

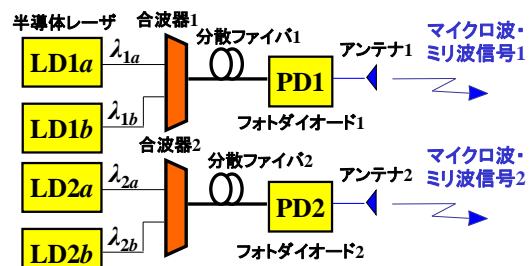


図2 ビート光を用いたマイクロ波・ミリ波帯電力合成技術

このとき、2 波のビート光の周波数が数 GHz ~ 100 GHz 程度のマイクロ波・ミリ波帯周波数の連続波信号となるように 2 つの LD の波長 λ_a と λ_b をそれぞれ調整する。ここで LD の波長差 $\Delta\lambda = \lambda_a - \lambda_b$ を温度制御で微調整することでビート光として得られるマイクロ波・ミリ波帯周波数の位相を制御できる。このビート光を複数組用意すれば、どの組も PD 出力として得られるマイクロ波・ミリ波連続信号の遅延時間 τ は原理的には一定となり、ビート光として得られたマイクロ波・ミリ波を電力合成することができる。PD 出力として得られた個々のマイクロ波・ミリ波連続信号の振幅と空間的に電力合成された信号を評価す

ることで、提案する電力合成技術の性能を評価する。

(3) 光/電気変換 (O/E) 出力として得られた個々のテラヘルツ波のコヒーレントな振幅・位相測定や電力合成されたテラヘルツ波をコヒーレントに検出し測定することは現状の技術では困難である。

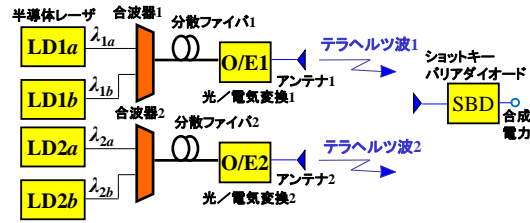


図3 ビートを用いたテラヘルツ波帯電力合成技術

そのため、図3に示すテラヘルツ帯で直接応答可能なショットキーバリアダイオード (SBD) を用いて、電力合成されたテラヘルツ波の強度を調べることで性能を評価する。またこれらの素子は同時にマイクロ波・ミリ波帯の検出も可能であるため、O/Eとして高出力PDを用いて電力合成されたマイクロ波・ミリ波信号をSBD等の検出器で受けることで、個々のPDで得られた連続波信号のコヒーレントな振幅・相対位相とSBD受信強度との関係を正確に評価することができる。この評価結果をテラヘルツ帯電力合成技術にフィードバックし、SBD検出器を用いた電力合成技術の測定精度を高める。

4. 研究成果

(1) 半導体レーザー (LD) の波長制御と光ファイバの波長分散を用いた空間電力合成技術を実証するため、1 GHz~40 GHz のマイクロ波・ミリ波帯電力合成技術の開発と性能評価を実施した。先ず図4に示すように、LDの温度と電流を制御することで、周波数3 GHzの位相を0.3度、振幅を0.1dBの精度で制御できることを明らかにした。

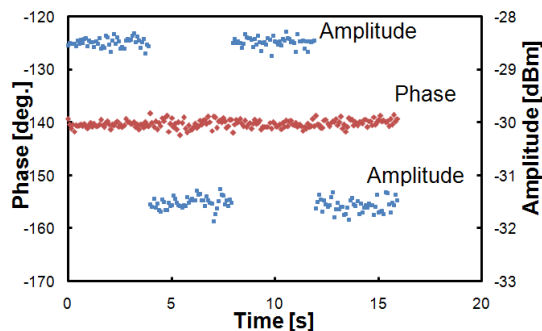


図4 LD温度・電流によるマイクロ波の位相・振幅制御

次に図1に示す光ファイバ毎に光変調器を有する2素子および3素子の光制御アレーを用いて、個々のフォトダイオードで得られた1 GHz~40 GHzのマイクロ波・ミリ波信号の位相を正確に測定し、0~360度の広範囲にわたり高精度にマイクロ波・ミリ波信号の位相合成が実現できることを明らかにした。半

導体レーザーの波長を微調整することで光制御アレーのオフセット位相差を取り除くキャリブレーション手法を用いた結果の1例を図5に示す。周波数3 GHzで位相誤差を最大で4.3度に抑えることができた。

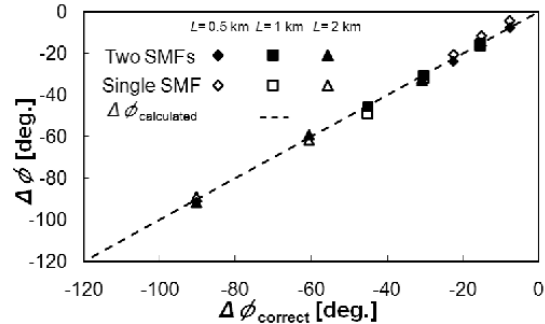


図5 2素子光制御アレーの位相制御特性

さらに応用として2素子光制御アレーを用いて、地上デジタル放送波の受信信号の位相合成を同相と逆相で実現し、高精度に位相制御できることを実証した。

(2) 複数の半導体レーザーと複数の光ファイバを用いて、ビート光として得られたマイクロ波・ミリ波の電力合成技術の開発を行った。異なる波長の半導体レーザー2個と単一モード光ファイバとフォトダイオードを1組として、生成するビート光を電力合成できるように、2組の実験装置を整備した。必要となる遅延時間の精度は30 GHzで1ピコ秒程度であり、半導体レーザーの波長を個別に微調整することで遅延誤差の補正を行った。フォトダイオード出力として得られた個々のマイクロ波・ミリ波連続信号と、個々のマイクロ波・ミリ波出力を電力合成して受信した信号を比較することで、電力合成技術の性能を評価した。図6にビート光によってコヒーレントに合成された6 GHzマイクロ波のスペクトラムを示す。

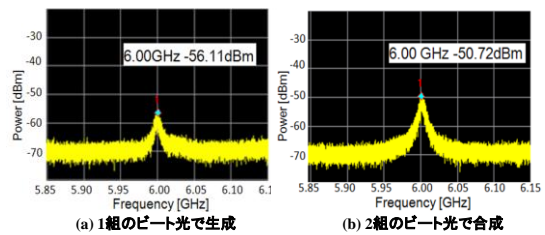
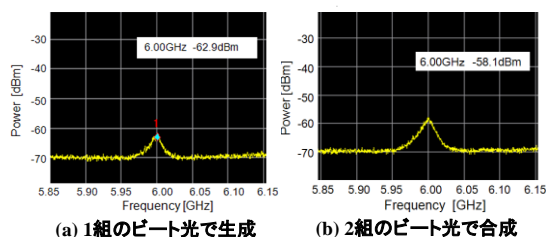


図6 ビート光によってコヒーレントに合成されたマイクロ波電力の比較

また応用として2素子の光制御アレーを用いた地上デジタル放送波の一括合成実験を行った。受信強度と受信C/Nを測定し、473~533MHzの7チャンネルを1dB以内で一括合成することができた。

(3) 2組のビート光を用いて生成した2組のマイクロ波帯連続波を空間合成したときの電力合成量と周波数精度を実験により定量的に評価した。まず互いにコヒーレントな2組のビート光を用いて生成した6 GHz連続波をダイポールアンテナを用いて同相または逆相で空間合成した。得られた2組の6 GHz連続波の相対位相を光ファイバ長の調整また

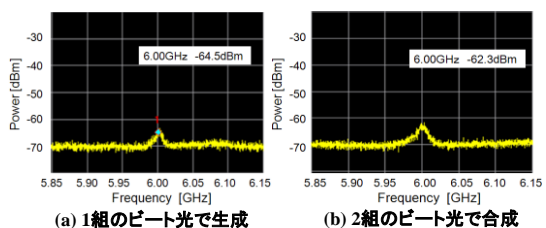
は半導体レーザの波長を調整して同相または逆相で空間合成し、マイクロ波帯連続波を独立に位相制御する技術を実現した。また同相合成することで受信電力が6dB増加し、逆相合成することで受信電力がキャンセルされることを確認し、コヒーレントな空間合成により高出力化が可能であることを実証した。図7にビート光によってコヒーレントに空間合成された6 GHzマイクロ波のスペクトラムを示す。



(a) 1組のビート光で生成 (b) 2組のビート光で合成
図7 ビート光によってコヒーレントに空間合成されたマイクロ波電力の比較

さらにコヒーレントな2組のビート光を用いて生成した20 GHz帯連続波の位相を半導体レーザの波長を調整して同相または逆相合成し、ショットキーバリアダイオードで受信して合成電力を評価した。同相合成することでショットキーバリアダイオードの受信電力が約4dB増加することを確認した。また半導体レーザの波長を連続的に変化させたときに得られるショットキーバリアダイオードの受信電力の干渉パターンを計算値と比較することで、周波数測定が困難なショットキーバリアダイオード受信でも、20 GHz帯連続波の周波数を高精度で推定することができた。

一方、互いにインコヒーレントな2組のビート光を用いて生成した6 GHz帯連続波を同様にダイポールアンテナを用いて空間合成し、受信電力が3dB増加することを確認した。図8にビート光によってインコヒーレントに空間合成された6 GHzマイクロ波のスペクトラムを示す。インコヒーレントな空間合成でも高出力化が可能であることを実証した。



(a) 1組のビート光で生成 (b) 2組のビート光で合成
図8 ビート光によってインコヒーレントに空間合成されたマイクロ波電力の比較

さらに互いにインコヒーレントな2組の6GHz帯連続波の周波数を光技術だけを用いて一致させるため、半導体レーザの波長を光スペクトラムアナライザを用いて調整し、互いにインコヒーレントなマイクロ波の周波数を100 MHz以内の精度で一致させることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① D. Takeuchi, W. Chujo, S. Yamamoto, and Y. Koyamada, “Coherent synthesis of two continuous microwave signals generated by two optical beats,” IEICE Electron. Express, Vol. 11, No. 10 pp. 20140209, May 2014, 査読有, DOI:10.1587/elex.11.20140209.
- ② D. Takeuchi, W. Chujo, S. Yamamoto, and Y. Koyamada, “Phase Control and Calibration Characteristics of Optically Controlled Phased Array Antenna Feed Using Multiple SMFs,” IEICE Trans. Electron., Vol. E94-C, No. 10, pp. 1634-1640, Oct. 2011, 査読有, DOI:10.1587/transle.E94.C.1634.

[学会発表] (計5件)

- ① T. Usami, N. Tripathi, and W. Chujo, “Frequency Accuracy of Incoherently Synthesized Microwave Signals by Optical Beats,” 2014 Asian Workshop on Antennas and Propagation, P2-32, May. 2014.
- ② 山本周平, 奥谷紘史, 中條渉, “2素子光制御アレーを用いた地上デジタル放送波の一括合成実験,” 2012年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-180, Sept. 2012.
- ③ 竹内大樹, 中條渉, 山本伸一, 小山田弥平, “ビート光を用いて生成した20GHz信号の位相合成実験,” 2012年電子情報通信学会総合大会, C-14-21, Mar. 2012.
- ④ 竹内大樹, 真田幸和, 中條渉, 山本伸一, 小山田弥平, “ビート光を用いて生成したマイクロ波の空間電力合成実験,” 平成23年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, E4-7, CD-ROM, Sept. 2011.
- ⑤ 竹内大樹, 中條渉, 山本伸一, 小山田弥平, “ビート光を用いたマイクロ波の位相合成と電力合成の比較,” 2011年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-14-10, Sept. 2011.

[その他]

<http://wwwre.meijo-u.ac.jp/labo/chujo/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中條 渉 (CHUJO WATARU)
名城大学・理工学部・教授
研究者番号：40292289

(3) 連携研究者

山本 伸一 (YAMAMOTO SHINICHI)
情報通信研究機構・主任研究員
研究者番号：50358993