

令和元年6月25日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18884

研究課題名(和文)位置シフトされた超高繰り返し電磁パルス列生成の探索的研究

研究課題名(英文) Research on high-repetition electromagnetic pulse train with phase shift

研究代表者

加藤 和利 (Kato, Kazutoshi)

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号：10563827

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：100GHzの間隔で波長の異なる複数の光波を生成し合波することで100GHz繰り返しの光パルス列を抽出した。具体的には半導体レーザーからの連続光を共振型光位相変調器を用いて光コムを発生しそこから波長選択スイッチを用いて5光波を選択する手法を確立した。次に100GHzの倍数の繰り返しパルス列を生成するため、100GHzのパルス列を複数光路に分岐し、それぞれに遅延を施して再び合波して時間多重を行う方法を確立した。本方法で200GHz繰り返しパルス列を実現し、さらに光電変換後のパルス波形のなまりの原因である光電変換器の周波数特性を、もとの光波間の強度のバランスを調整することで補償できることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

キャリア周波数の1/10～1/3程度のビットレートしか伝送できなかった従来の無線方式の理論的境界を、パルスに同期させたビット信号を用いることで克服し無線技術方式における社会が直面した課題に対するブレイクスルーの可能性を示した成果である。また光エレクトロニクス技術でのアプローチによりデバイス技術(フォトミキサ技術)が先導して無線伝送のパラダイムシフトを狙うというボトムアップ型挑戦的研究である。

研究成果の概要(英文)：100-GHz repetition optical pulse was generated from 100-GHz spaced lightwaves. The technology is based on selecting five lightwaves by the wavelength selective switch from an optical frequency comb which is generated from resonant-type optoelectronic modulator. Next, to generating several hundreds of gigahertz repetition pulse, original 100-GHz pulse was split to several paths delayed and combined again so as to make a time division multiplexing pulse train. Furthermore, it is found that the pulse width is broaden by the frequency response of the opt-electrical converter and that the pulse can be narrowed by tuning of the intensity of original lightwaves.

研究分野：無線通信

キーワード：テラヘルツ波 光パルス フォトダイオード フォトミキサ 無線通信

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究の基盤技術は超高繰り返し電磁パルスの生成である。超高繰り返しパルスはたとえ電氣的共振を用いたとしてもエレクトロニクス技術のみで生成することは不可能である。従来(高繰り返しではないが)短パルスの生成手法として、非線形光学結晶を用い、これに高エネルギーの光パルスを照射し結晶振動の非線形性から高調波としての電磁波を生成する研究が行われてきた。光で短電磁パルスを生成する技術は汎用になりつつあるが、短光パルス生成の現状技術は数 MHz の繰り返し周期が一般的である。図 1 は現在までの高繰り返しを目指した代表的な短光パルス発生報告例である。高繰り返しを目指した技術はすべてモードロック方式によるもので最高値で 154GHz に達しているが、モードロック方式はレーザに変調をかけて種光を生成しこれをパルス圧縮するという手法を取るため、生成される光パルスの繰り返し周期はもとのレーザの変調周波数と同じであり、数百 GHz を越えることは原理的に不可能であった。本応募者は 300GHz の正弦波をフォトミキシングで生成する研究の過程で、光波間の位相差を安定化して合波すれば短光パルスになることに気が付き、光波合成方式という新たなアプローチで、従来方式では到達不可能であった極めて高い繰り返し光パルスを生成し、これをフォトミキシングによって電磁パルスに変換することを思いついた。

なお、本研究の方法と競合すると想定される技術として、従来方式と光マルチプレクサを組み合わせることで繰り返し周波数を通信倍する手法が考えられるが、パルス間隔の調整が難しいうえ、本研究の特徴であるパルス位置変調は不可能である。

キャリア周波数にデータを重畳する従来の無線方式では、一般にキャリア周波数の 1/10、多値変調を使って最大でも 1/3 のビットレートの信号しか伝送できない。本研究はこの理論限界を打破し、これまでの無線伝送の概念よりも一桁以上高い理論限界値を可能とする方式の基盤研究として、THz 級繰り返しパルスの一つ一つに多値のビットを乗せパルス周期の数倍のビットレートのデータ伝送を目指したものである。光エレクトロニクス技術でのアプローチという手法を取り、デバイス技術(フォトミキサ技術)が先導して無線伝送のパラダイムシフトを狙うという、ボトムアップ型挑戦的研究である。

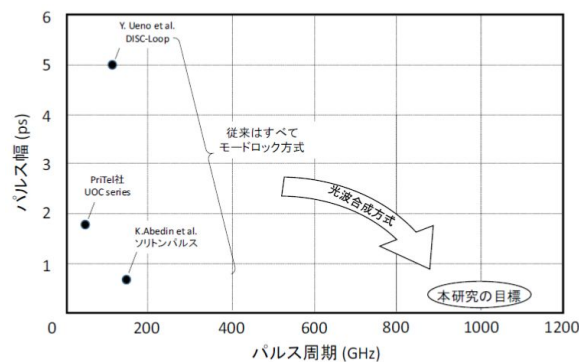


図 1 高繰り返しパルス波の現状と本研究の目標

2. 研究の目的

テラヘルツ級超高周波フォトダイオードや光波制御回路を代表とする通信用光デバイスの研究では日本が世界をリードし、これら光デバイスの他応用への水平展開、具体的にはテラヘルツ波応用などへの期待が高まっている。一方、無線通信の分野ではテラヘルツ波を用いた 100Gbit/s 伝送技術が視野に入り、今後さらなる大容量化が可能となれば例えば物理的に切り離されたモノどうしをあたかも一つのモノの構成要素として有機的に動作させるなどの無線通

信技術の変革による情報化社会の新たな展開が予想される。本研究はこれらシーズとニーズを踏まえ、本応募者らが開発したテラヘルツ級フォトミキサ技術と光位相安定化技術をベースに、従来のキャリア（搬送波）という概念から解放された、「位置シフトされた超高繰り返し電磁パルス列生成の探索的研究」を行うものである。

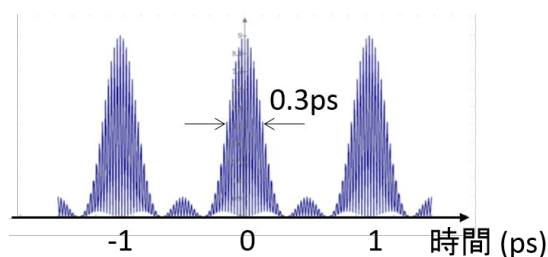
本研究では、3つ以上の光波において精密な光波長と光位相差の安定化を用い、単一走行キャリアフォトダイオード（UTC-PD）の二乗検波特性を利用したフォトミキシングにより THz 級の高繰り返しパルス列を生成するという新たな方法を提案、原理確認を行う。さらに各光波の位相関係をコントロールすることで一つ一つのパルス位置のシフトを可能とし、これにより情報を乗せるという新しい概念の無線通信の可能性を探索する。

3. 研究の方法

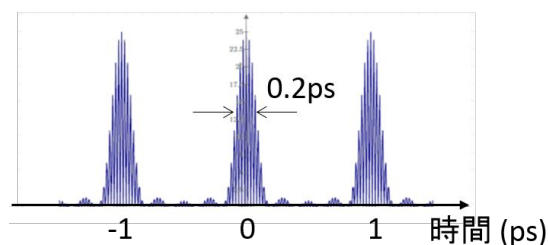
本研究で取り組む各要素技術について、以下に具体的な計画・方法を述べる。

(1) 光波合成による超高繰り返し電磁パルス生成

本研究では、3つ以上の光波において精密な光波長と光位相差の安定化が可能となれば、フォトミキサとして用いる UTC-PD の二乗検波特性を利用して超高繰り返し電磁パルス波の生成が可能であることに着目した。図 2 (a), (b) はそれぞれ二乗検波特性により光周波数 1THz 間隔の 3 光波および 5 光波から得られるパルス波のシミュレーション結果である。3 光波では波形周期 1.0ps (1THz の逆数) に対してパルス幅はその 1/3 の 0.3ps となりデータを乗せるためには十分に狭い幅が実現できている。さらに 5 光波では 1/5 の 0.2ps というように用いる光波の数に反比例してパルス幅が確実に細くなる。ここでパルス波が



(a)



(b)

図 2 パルス波形（シミュレーション）

一定間隔で生成されているのは各光波間の光周波数と位相差が精密に安定化されていると仮定しているためである。ただしこれらパルス波には 1THz の高調波である 2THz 以上の成分が含まれており UTC-PD が高調波の周波数に対しても応答することが必要である。本研究では 2THz を越える帯域の UTC-PD を使用し、3つ以上の光波から 1THz 繰り返しパルス波を生成する。

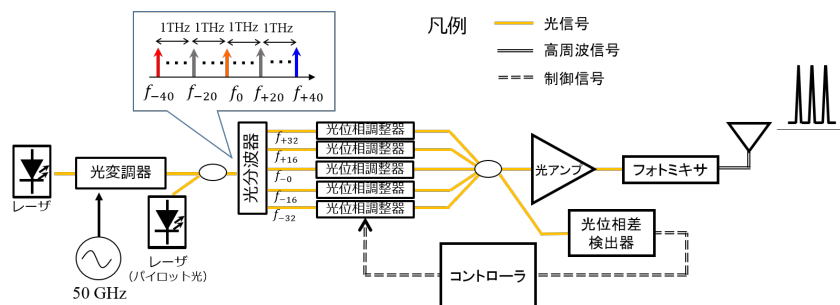


図 3 1THz 高繰り返しパルス波生成系の構成

図3は1THz 繰り返しパルス波を生成するための具体的な構成である。例として5光波を位相調整して合波する構成を示している。図の左から順を追って説明する。光通信用として実績のある半導体レーザからの光波に、光変調器で50GHzの変調をかけ、50GHz間隔の光コムを生成する。光コムから光分波器で、使用する5光波をそれぞれ別々の光路に取り出す。ここで光分波器は光通信用として開発されたものをベースに先行研究（光通信実験）において本応募者が改良したものを使用する。各5光波は最終的に光アンプで増幅されたのちにフォトミキサであるUTC-PDで二乗検波され、1THz周期のパルスとなりアンテナから放射される。

(2) パルス位置変調

繰り返しが数十GHzを越える一定間隔のパルスの各位置を制御するにはエレクトロニクス技術では不可能である。本研究ではパルスをフォトミキシングにより生成する際、前述の図2で示したようにもとの複数光波間の位相関係を変化させることで生成されるパルスの位置がシフトすることに着目した。つまり位相制御が容易な光波の段階で位相調整しパルス位置をシフトすることによるパルス位置変調を提案する。ここで光位相変化には光位相変調器を用いるため、パルス位置の変調速度は光位相変調器の速度で決まる。本研究では位相変調器として実績のある20Gbit/sで変調し本方式の原理確認を行うことで、将来高速な光位相変調器を用いれば1THzの繰り返しパルスにおいてもパルス位置変調が可能であることを示す。

4. 研究成果

本研究は二つの研究段階に分けて推進した。最初の段階としてH29年度は1THzの超高繰り返し光パルス列の生成を目指し、100GHzの間隔で波長の異なる複数の光波を生成しこれらを合波することでまず100GHz繰り返しの光パルス列を抽出した。具体的には半導体レーザからの連続光を共振型光位相変調器を用いて光コムを発生しそこから波長選択スイッチを用いて5光波を選択する手法を確立した。次に100GHzの倍数の繰り返しパルス列を生成するため、図4に示すような100GHzのパルス列を複数光路に分岐し、それぞれに遅延を施して再び合波して時間多重を行う方法確立した。図5は本方法で生成した200GHz繰り返しパルス列であり、200GHz周期に相当する5fsの間隔でパルスが並んでいることが確認される。

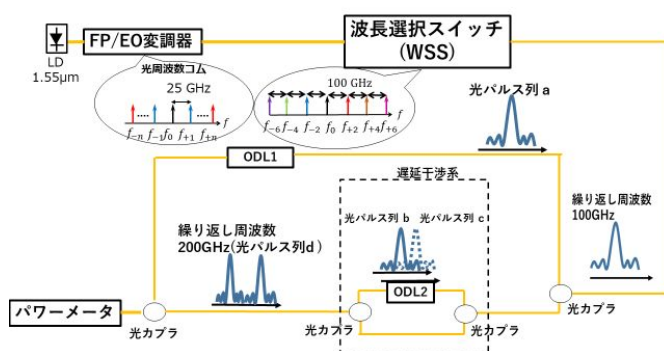


図4 光パルス生成系

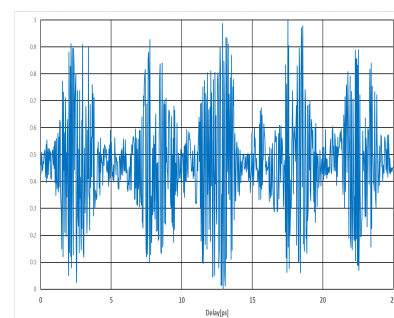


図5 生成した200GHz繰り返しパルス列

第二段階としてH30年度は、1THz繰り返しの光パルス波のそれぞれに位相シフトを与えることを検討した。位相シフトのため光位相変調器を用いることとし、光位相変調器の変調速度が100GHz未満であることを考慮して、前述の時間多重する前の光パルスに変調をかけ、位相シフトされたそれぞれの光パルスを時間多重することで、1THzの繰り返し光パルスに結果的に位置変調がかけられる見込みとなることを、自己相関波形による実験で確かめた。このようにして生成し

た変調された光パルス列をフォトミキサで光電変換し位置変調されたテラヘルツパルスの生成を試みた。光電変換後のテラヘルツパルスにおいてパルス波形のなまりが観測された。このときの光電変換前の光スペクトルおよび計算で得られたテラヘルツパルス波形を図6青線で示す。これはもとの複数光波間の強度のバランスを不均衡にすることで解消できることを提案、図6左下に示すような光波の組み合わせにより、赤線で示す明確な光パルス波形となることを実証した。これらの成果を国際会議に5件、国内学会に6件発表した。

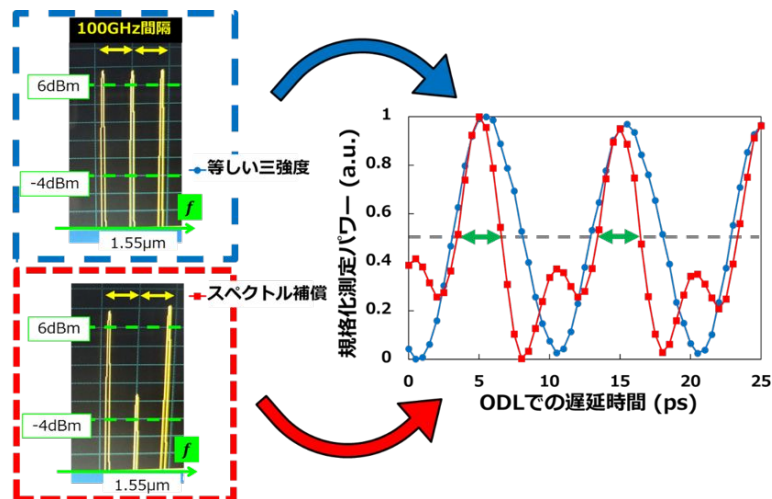


図6 100 GHz間隔の三光波を光電変換したテラヘルツ波パルスの強度相関波形

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 15 件)

Nanami Nishiyama, Zhou Yang, Gouki Sakano, Hiroshi Ito, Tadao Ishibashi, Kazutoshi Kato, 600 GHz Wave Combiner Using Arrayed Photomixer, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 1P14-7, 2018-08

Yuta Naito, Yusuke Yamanaka, Nanami Nishiyama, Kazutoshi Kato, THz-wave Beam Steering by Utilizing Photomixing and Chromatic Dispersion of Two Lightwaves, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 1P14-8, 2018-08

Kazutoshi Kato, Photonics Integrated Circuit for High-power Coherent THz Generation, PIERS2018

加藤和利, 光通信用デバイス技術によるテラヘルツ波発生、電子情報通信学会ソサイエティ大会 2018

光枝 健、ムハマッド イムラン、加藤和利、テラヘルツ波パルス生成システムの検討、電子情報通信学会ソサイエティ大会 2018、C-3-50、2018-09

Shunta Kono, Hiroki Fukuda, Takeshi Kuboki, Kazutoshi Kato, Proposal of Wavelength Control Method at DFB Laser for Fast and Reliable Wavelength Switching, 電気・情報関係学会九州支部第71回連合大会、12-2A-05、2018-09

Ken Mitsueda, Muhammad Imran, Kazutoshi Kato, 300-GHz-Repetition Optical Pulse Generation and Measurement for Terahertz Pulse Wave Communication, 23rd Microoptics

Conference (MOC2018)、 K-3、 2018-10 .

Takeshi Kuboki、 Ryo Takigawa、 Kazutoshi Kato、 Analysis of Adhesive Layer for Lithium Niobate-on-insulator Waveguides on Silicon Wafer with Room-temperature Bonding Method、 Microoptics Conference 2018

光枝 健、 一山昂平、 加藤和利、 光電変換によるテラヘルツ波パルス生成法の検討、 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会、 OPE2018-23、 2018-12

河野隼太、 福田浩規、 久保木 猛、 加藤和利、 高速かつ高信頼な光スイッチを目指したDFB レーザの波長切替手法の検討、 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会、 OPE2018-121、 2018-12

光枝健、 藤村勇起、 山中友輔、 加藤和利、 WSS を用いた高繰り返し光パルスの生成と自己遅延干渉によるパルス幅評価法の検討、 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会、 P1-02、 2017-04-20

光枝健、 山中友輔、 加藤和利、 光干渉を用いた光パルス幅評価法の検討、 レーザー学会九州支部学生講演会、 P1、 2017-09-10

Ken Mitsueda、 Yusuke Yamanaka、 Kazutoshi Kato、 Novel Measurement Method for Optical Pulse Width at High-Repetition Frequency、 22nd Microoptics Conference (MOC2017)、 B-3、 2017-11

光枝 健、 山中友輔、 加藤和利、 High-Repetition-Frequency Terahertz-Wave-Pulse Generation Based on Photonic Technique、 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会、 OPE2017-107、 2017-12

ムハマッドイムラン、 光枝健、 加藤和利、 テラヘルツパルス波通信に向けた 300GHz 光パルス列生成、 2018 年電子情報通信学会総合大会、 C-3-42、 2018-03

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6 . 研究組織

(1)研究分担者 なし

(2)研究協力者 なし