

令和元年6月19日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06406

研究課題名(和文) 光・電波周波数コムを用いる高速測距技術に関する研究

研究課題名(英文) Research on high-speed ranging technique using optical and radio frequency comb signals

研究代表者

菅野 敦史 (Kanno, Atsushi)

国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワークシステム研究所ネットワーク基盤研究室・研究マネージャー

研究者番号：20400707

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：自動車用レーダ等で用いられるFM-CW(周波数変調連続波)信号を用いて光変調器駆動形光周波数コムを駆動し、発生された複数の高調波成分を用いてコヒーレント検波することで高精度に測距を実現する技術の研究を実施した。同一光源から発生された信号であるためコヒーレント性が高く、発生される複数測距信号も相関をもつことから、MUSIC(多重信号分類)法を用いた信号処理により、高精度な測距が実現できることを示した。また、光周波数コムを用いた高精度ミリ波信号発生技術の実現、ならびに、さらなる広帯域化を目指した複数周波数コム同期技術を開発し、将来光周波数コム援用型測距基盤技術の端緒を拓いたといえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複数の光信号を効率的に同時発生させる光周波数コム技術を利用して、高精度に距離を測る技術の研究開発を実施した。同時発生された信号は相関を持つため、従来では利用できなかった簡易な信号処理手法が採用可能となり、結果として、高精度な距離測定が可能になった。電子機器の製造に使われている搬送機械の位置合わせ精度の向上や、電波と光を融合させた新しい距離測定技術の基礎を拓いた研究である。

研究成果の概要(英文)：In this study, optical-frequency-comb-based ranging technique is studied and developed using an FM-CW radar signals for high-precision ranging system. Optical modulation technique helps generating optical components with a high coherency each other by a single lightwave source. In the scheme, the FM-CW optical signals, which is provided by the comb components, has strong correlation in the waveforms. Therefore, multiple signal classification (MUSIC) technique can be applied to identify the beat notes in the FM-CW reception system. Finally, the high-precision ranging results are provided by the optical frequency comb system. Also, we developed high-precision millimeter-wave signal generation by the optical frequency comb source and broadening technique of the optical frequency comb bandwidths by synchronization of multiple frequency comb signals. We hope these fundamental technique will help realizing high-precision ranging solutions based on the frequency combs.

研究分野：光通信、ミリ波・テラヘルツ通信、レーダ技術

キーワード：光周波数コム FM-CWライダー FM-CWレーダー

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

1. 研究開始当初の背景

物体までの距離を正確かつ高速に測る技術は旧来よりレーダ技術や光測距で研究開発が進み社会実装も進んでいるが、分解能・解像度が将来アプリケーションを考えると未だ十分とはいえない。例えば自動車衝突防止レーダでは距離分解能が1m程度であり車間1m以下を目指す超高密度自動運転に適用は困難である。また、半導体製造装置に組み込まれている搬送装置においては単波長レーザによる光測距技術が用いられており位相検出により波長の1/10以下の精度が得られているが、将来の超微細プロセスでは更なる高精度化が求められている。

これまで光測距においては多波長光源、特に光周波数コム光源を用いた測距技術の研究開発が盛んに行われてきた。利用する参照光の数を増やすことで精度を高めることが可能であるが、一般的に用いられるモード同期レーザは繰り返し周波数(コム間隔)が数10MHz オーダー程度でありナノ秒以下の高速性の実現は困難であった。

2. 研究の目的

光変調技術により生成した光周波数コム、および、それを光電変換により生成したミリ波帯周波数コムを用いた高速・高精度な測距技術の研究を行った。具体的には、周波数変調した周波数コム信号を生成することにより、目的物より反射してきた到来波と原信号をミキシングさせ、その周波数ビート成分から測距を行う周波数変調方式の確立を行う。周波数帯として、近赤外光(通信波長帯)のみならずマイクロ波～ミリ波帯などの電波を用いることで統一的な電磁波イメージング原理の検証を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

高精度・周波数可用性の高い周波数コム信号の発生とその測距情報検出アルゴリズムを2本柱として下記項目の研究開発を実施した。

- (1)光変調器駆動形光周波数コム発生による信号発生と検出および測距技術の原理検証の実施
- (2)隣接するコム成分による複数測距信号をMUSIC法などの適用による相関分析、および、高精度測距へ向けた検出手法の検証
- (3)光周波数コムの安定化とそれを用いたミリ波帯への変換による位相雑音特性の検証
- (4)複数光周波数コムのアクティブ同期による周波数コム信号の高精度化

4. 研究成果

(1)光変調器駆動型光周波数コムによる測距技術の検証

光変調器駆動による光周波数コム発生手法とそれを用いた光領域測距の手法について図1に示す。電氣的に発生させたFM-CW信号を光変調器へ導入し、変調器のオーバードライブ動作により高調波成分を発生させ、光周波数コムを構成する(図2)。FM-CW方式は自動車レーダ等に用いられる測距技術であり、原信号とターゲットから反射等された被計測信号を合波させたときに発生される差周波成分を距離に換算するものである。本研究では+1

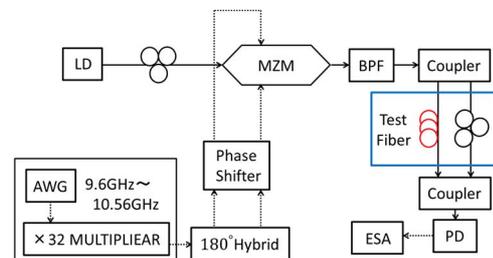


図1 光周波数コムを用いた測距システムの概略図

次、+2次、+3次の変調成分を用いて計測を実施した。高調波成分であるため、1次成分に比して周波数遷移速度は2次成分の場合2倍、3次成分の場合3倍となる。それぞれが違う遷移速度であるため合波時の誘引雑音量は極小となるため、それぞれを分離し計測することが可能である。それを用いて光ファイバの長さを測定したところ、図2のような3種類のビート周波数成分

が観測された。用いた光ファイバ長は 650m のシングルモードファイバとしたところ、その周波数成分はそれぞれ 204 MHz (207.36 MHz)、410 MHz (414.72 MHz)、616 MHz (622.08 MHz) と計測され (カッコ内は理論値) その誤差は 2% 以下であることが確かめられた。よって提案していた周波数コム信号による測距技術の原理が確認できたといえる。

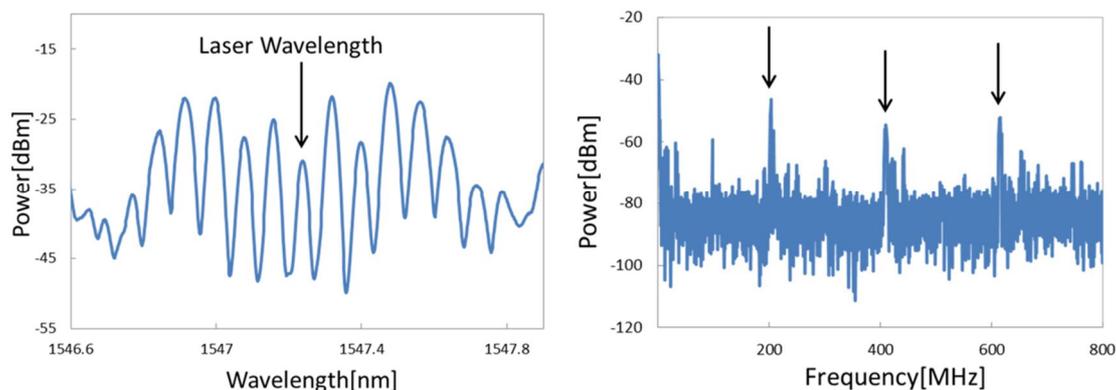


図 2 (左)生成した光周波数コム信号の光スペクトルと(右)650m ファイバ計測時のビート周波数スペクトル。左図矢印は 1 次、2 次、3 次成分によるビート周波数成分。

(2)隣接コム成分による測距精度の高精度化

上節で得られたビート周波数成分は信号対雑音電力比が 20dB 程度と高くなく、また、他不要成分 (信号発生部によるハーモニック寄生成分など) も得られるため高精度な測距には適さない。そのため受信信号を信号処理することで計測の高精度化を図った。通常レーダ信号処理では CFAR (Constant False Alarm Rate) 法などが用いられるが、光周波数コム信号の通倍性から波形そのものは掃引速度のみが異なる点に注目し、MUSIC 法 (Multiple Signal Classification) を用いた信号処理を開発しレーダ計測に適用することを試みた。

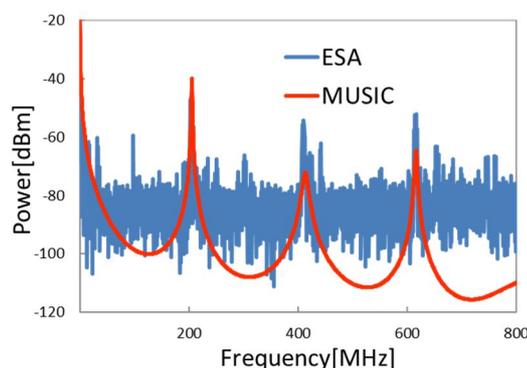


図 3 図 2 に示した実験データを元に MUSIC 法適用した信号のスペクトル。

得られた時系列データを $\hat{P}(f) = \frac{1}{\sum_{i=p+1}^M |e^{H_i} v_i|^2}$ にて固有ベクトル展開することで信号分離を実施し

た。図 3 に信号処理した結果を示す。実験データをフォローする位置にピーク検出され不要成分の検出がなされていないことがわかる。これは時系列データ解析により不要成分のランダム性から不検出となったためであると考えられる。したがって MUSIC 法を適用することで周波数コム型測距システムの測距結果高精度化が実現できたと言える。

(3)光周波数コム安定化とミリ波発生時の位相雑音特性の検証

通常、レーザなどの光信号源はその信号搬送波周波数の高さ(波長 1550nm の光はおよそ 192THz に相当)のため、周波数安定度、ひいては位相雑音特性が通常のマイクロ波・ミリ波信号源に比べ絶対値として良くないことは自明である。そのため、マイクロ波・ミリ波レーダ等へ光技術を適用する際は、その信号品質の劣化を抑えるため、光周波数コム発生システムを光電気発振回路へ組み込んだ自励発振システムを構築した。図 4 にシステムのブロック図を示す。オーバードライブした光変調器により周波数コム信号を発生させるのは従前の通りであるが、出力光信号を光検出器で受信し、その信号を光変調器へ導入することで長共振器長発振回路とした。図 5 に得られた 100GHz ミリ波の位相雑音特性を示す。94.96 GHz 発振時においても周波数オフセット 100kHz で単側波帯位相雑音が -100 dBc/Hz を達成し、ミリ波帯においても光技術を用いて高精度な信号源が構成できることを示したといえる。

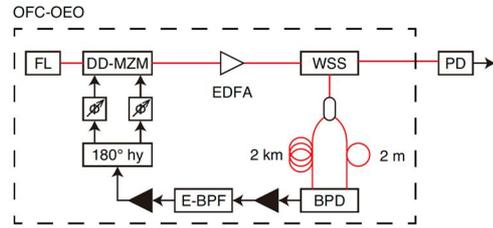


図 4 光周波数コム装荷型光電気発振回路のブロック図。

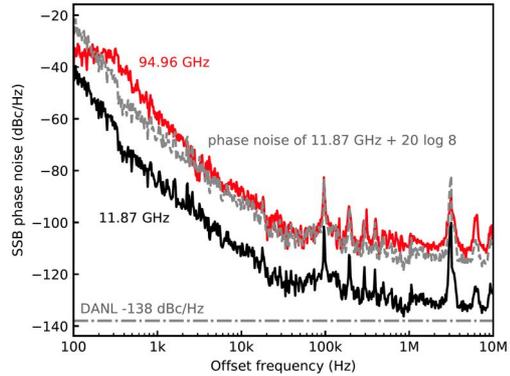


図 5 光周波数コム装荷型光電気発振回路の変調器駆動信号とミリ波信号の位相雑音特性

(4)複数光周波数コムのアクティブ同期による周波数コム信号の高精度化

光変調器をオーバードライブさせ光周波数コムを発生させる手法は、光変調器の RF 入力耐圧等の原因により帯域幅が制限される。そのため、超広帯域なコム信号発生が困難である。そこで、複数の光周波数コム信号を同期させることで広帯域化を図る、光周波数同期システムを構築し、その実現可能性について検討した。図 6 にフィードフォワード型光周波数同期システムの概略図を示す。入力された光コム信号の 1 成分に対してスレーブレザの光周波数を変調器にて動的制御することで、入力信号に追従したスレーブ光周波数コム信号を生成する、つまり、2つの光周波数コムを動悸させる技術である。2つの光信号が 15GHz 離調時に取得したビート成分は 1 分間でおおよそ 2 Hz の揺動に抑えられることが示された。光信号の線幅はおおよそ 20 Hz であり、光経路長の最適化により、高精度な複数光信号同期が実現できたとと言える。

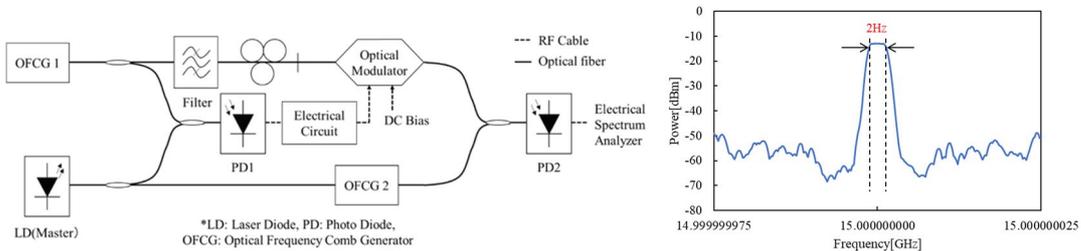


図 6 (左) 光周波数同期システムのブロック図と(右)得られた 15GHz 離調時ビート周波数の時間揺動(スペアナのピークホールド機能にて 1 分間積算)

以上のことから、光周波数コムを用いた測距技術の確立と信号処理による高精度化、ならびに、ミリ波等電波変換を行う際の要素技術の検討がなされ、周波数コム技術を利用した測距基盤技

術研究の端緒を拓いたと結論付けられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

- [1] 菅野敦史, G. K. M. Hassanuzaaman, Stavros Iezekiel, 山本直克, “Optical frequency comb applied optoelectric oscillator for millimeter-wave signal generation and its application,” Proc. SPIE, 2018, 査読有, pp. 106340E-1-8, doi:10.1117/12.2304821

〔学会発表〕(計 21件)

- [1] 菅野敦史, “Millimeter-wave communication system implemented on radio over fiber networks in 5G/IoT era,” IEEE Conference on Antenna Measurement and Applications, 2018 (国際学会)
- [2] 菅野敦史, 他 “Field trial of 95-GHz frequency-modulated continuous-wave radar system driven by radio over fiber techniques,” IEEE Research and Application of Photonics in Defense (RAPID), 2018 (国際学会)
- [3] 菅野敦史, “Seamless waveform transport technology in 5G and IoT era,” IEEE Photonics Conference, 2018 (招待講演)(国際学会)
- [4] 菅野敦史, “Application of single board computers to MWP-related systems,” MWP Symposium in Matsue, 2018
- [5] 菅野敦史, 山本直克, “Radio over multimode fiber system for short-reach radio relay links,” IEEE Photonics in Switching and Computing (PSC), 2018 (国際会議)
- [6] 菅野敦史, 他 “マルチモードファイバによる短距離 RoF システムの検討,” 電子情報通信学会マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会, 2017
- [7] 菅野敦史, “Converged fiber-wireless technologies for future access and radar systems,” The 2017 International Symposium on Electrical and Electronics Engineering, 2017 (招待講演)(国際学会)
- [8] 菅野敦史, 山本直克, “Radio over fiber network technology for millimeter-wave distributed radar system,” SPIE Photonics West OPTO2018 (国際学会)
- [9] 菅野敦史, 他 “Photonics-Based Millimeter-Wave Radar System for Handheld Application,” 2017 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications, 2017 (国際学会)
- [10] 菅野敦史, 他 “Terahertz radar and imaging technologies enabled by photonics,” EMN Terahertz 2017 (国際学会)
- [11] 菅野敦史, 他 “Optical-fiber-connected 300-GHz FM-CW radar system,” SPIE Defense + Security, 2017 (国際学会)
- [12] 菅野敦史, “通信・イメージング向け RoF 技術の研究開発とそのミリ波帯向け応用,” 電子情報通信学会短距離無線通信研究会, 2017 (招待講演)
- [13] 菅野敦史, 他 “94-GHz IQ radar system using an optical FM-CW signal generator,” 2nd International Workshop on Photonics Applied to Electromagnetic Measurements, 2017 (国際学会)
- [14] 菅野敦史, 他 “Wavelength-switchable IF over fiber network under ultra-dense WDM configuration for high-speed railway systems,” IEEE Photonics Conference 2017 (招待講演)(国際学会)
- [15] 菅野敦史, “Millimeter- and Terahertz-wave over fiber technologies for high-speed communications and non-telecom applications,” SPIE Photonics West OPTO 2017 (招待講演)(国際学会)
- [16] 菅野敦史, “High Bitrate Mm-Wave Links Using RoF Technologies and Its Non-telecom Application,” Optical Fiber and Communication Conference, 2017 (招待講演)(国際学会)
- [17] 菅野敦史, 他 “Key Technologies for Millimeter-Wave Distributed RADAR System over a Radio Over Fiber Network,” The 2016 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics and Telecommunications, 2016 (国際学会)
- [18] 菅野敦史, 他 “Phase noise characteristics of optical frequency comb-based 1-THz transmitter,” 2016 International Topical Meeting on Microwave Photonics, 2016 (国際学会)
- [19] 菅野敦史, 他 “Photonics-based 1-THz signal generation and its evaluation on phase noise characteristics,” 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2016 (国際学会)
- [20] 菅野敦史, “光技術によるミリ波・テラヘルツ波レーダおよび非破壊イメージング技術,” 2016年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2016
- [21] 菅野敦史, 他 “1THz 帯多値信号伝送へ向けた光信号発生手法の検討,” 電子情報通信学会マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会, 2016

〔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

研究分担者氏名：川西 哲也

ローマ字氏名：Tetsuya Kawanishi

所属研究機関名：早稲田大学

部局名：理工学術院

職名：教授

研究者番号(8桁): 40359063

(2)研究協力者：なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。