

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：37112

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14005

研究課題名(和文)1cm分解能合成開口レーザレーダのための広帯域高精度遅延制御デジタル発振器の開発

研究課題名(英文)Development of ultra-wideband digitally-controlled source for laser radar

研究代表者

近木 祐一郎(Kogi, Yuichiro)

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：10398109

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文):レーザレーダはレーザ光を広帯域マイクロ波で強度変調することにより、高い空間分解をもつ距離測定が可能となり、これまでには観測できなかったような微細な構造物を遠方から観測できることが期待されている。本研究ではレーザレーダをさらにはレーザSARへと発展可能なような超広帯域のマイクロ波掃引発振器の開発を目指した。開発した発振器の出力信号は非常に高時間精度で制御できること、4GHzの広帯域マイクロ波の生成を確認し、レーザレーダに利用する準備が整った。

研究成果の概要(英文):A laser radar is an range measurement instrument by means of a laser which amplitude is modulated by an ultra wide-band microwave. It is promising tool to visualize a small structure (centimeters) by remote sensing technique. In this development, we aim to develop a wide-band microwave source, whose output waveform can be controlled digitally. As a result, we successfully develop the digitally controlled microwave source and confirmed that the output waveform can be well controlled in terms of output phase - time accuracy. We also confirmed that output microwave with bandwidth over 4GHz, which can be properly utilized for the laser radar.

研究分野：電磁波計測

キーワード：レーザレーダ SAR 超広帯域マイクロ波 高空間分解

## 1. 研究開始当初の背景

リモートセンシングで表面形状を高精細に計測する技術を開発することは防災など様々な分野で期待されている。例えば福島原子力発電所の事故直後は、現場のモニタリングは望遠レンズを搭載した光学カメラのみで行っていた。光学カメラでは、遠距離撮影により低解像度画像(解像度 100 cm程度)しか得られないため原子炉建屋壁面に空いた穴から内部を撮影できないこと、低感度なため夜間は撮影できないことなどの点で十分ではなかった。このような問題を補完する手段として、合成開口レーダ(Synthetic Aperture Radar; SAR)が期待されている。SARは通常マイクロ波帯の電波を利用して表面形状を撮影するレーダである。SAR本体を搭載したプラットフォームを移動させながら繰り返しマイクロ波パルスを送受信し、取得したデータを再構成することで地表面形状を画像化できる。信号処理によりアンテナ開口を合成できることから高解像(解像度 10 cm 級)の画像が得られ、アクティブに電波を照射することから、撮影環境に影響を受けにくいという特長がある。SAR画像の解像度は照射する電波の帯域幅を広げると上がる。申請者が所属するグループにより開発された高解像度合成開口レーダ「LiveSAR; 国土交通省河川技術研究開発公募(平成 21-24 年度採択、代表者: 犬竹正明(東北大学))により開発」では、1.5 GHz の帯域で世界最高レベルの 10 cm の高解像度 SAR 画像を得ることに成功し、その有効性が検証された。今後、さらに 1 cm 級の超高解像度をもつ SAR 画像を得るには 15 GHz 以上の連続した帯域幅が必要であるが、電波法で制限されるため実現できない。また、パルスレーザを用いる既存のライダでは、安全基準によりパルス幅の短パルス化および、レーザを集光させることができず、30 cm の解像度に制限されている。

## 2. 研究の目的

申請者が所属するグループが提案した(特開 2012-154863)レーザを利用したレーザレーダおよび合成開口レーダ(以後レーザ SAR 等と省略)を用いれば、外部に照射するのはレーザ光であるため、電波法の制限を受けない。レーザ SAR 等は、レーザを広帯域マイクロ波帯信号のキャリアとして外部に照射することにより、超高解像度画像を得ることが原理的に可能である。パルス幅の広い低出力変調レーザの使用は、比較的安全であり、S/N 比も良く、解像度に影響を与えない。本研究ではレーザ SAR 等に適用可能な、15 GHz 超の帯域を持つ超広帯域高精度遅延制御デジタル掃引発振器を開発することを目標としているが、予算上の都合で 4GHz の帯域を持つデジタル掃引発振器の開発を行う。帯域は狭くなったが、今後予算的な都合が付けば外部回路の追加で 15GHz の帯域に拡大できること、4GHz の帯域でも広帯域化時の課題が

検討できる。

## 3. 研究の方法

### 3-1. 超広帯域高精度遅延制御デジタル発振の原理と発振器ハードウェアの開発

開発する超広帯域高精度遅延制御デジタル発振器はインターフェース部・タイミング制御部から成るデジタル制御部と、デジタル発振器から成る RF 部から構成される。デジタル制御部は、Windows PC 上のソフトウェアにより入力される MCP およびレーザ SAR の座標をもとにマイクロ波パルスの初期位相・周波数変化レート・参照波パルスの生成遅延量を演算する機能と、演算結果を狭帯域デジタル発振器(DDS)と通信する機能がある。タイミング制御部は、高精度水晶発振器出力をリファレンスクロックとして用い遅延量制御のためのカウンタや、マイクロ波パルス掃引開始トリガ発生機能がある。インターフェース部とタイミング制御部は、同期動作できるよう 1 つの FPGA 開発ボード上の組込みソフトウェアにより構成される。発振器 RF 部は源信号として 1.4-1.9 GHz(帯域 0.5 GHz)の掃引信号を生成できる狭帯域デジタル発振器(DDS)を使用する。DDS 出力を図に示す多段の周波数逡倍器と周波数変換器により 11.2-15.2GHz(帯域 4 GHz)のマイクロ波パルスを生成する。非線形回路である逡倍器やミキサでスプリアスが発生すると、レーザ SAR 画像にゴーストが発生し問題となるため、フィルタで除去できる回路構成とする必要がある。発生するスプリアスの周波数領域が異なるように周波数設計することで、後段に接続するフィルタによりスプリアスを除去することが可能である。本回路構成は、スプリアスをフィルタで除去できるように RF 部の各コンポーネントは市販のコネクタ付き部品を用いてできるだけコンパクトに製作する。

### 3-2. 超広帯域高精度遅延制御デジタル発振器の評価

発振器性能は、RF 出力強度、帯域、遅延量制御について以下の試験により検証する。

#### 3-2-1 発振器の設定について

本試験において、発振器から送信波・参照波パルスを生成させ、4 kHz 程度で繰り返し動作させる。繰り返し動作においては、生成するパルスの初期位相・周波数変化レート・遅延量を全て固定して動作させるモードと、実際のレーザ SAR の動作環境を模擬してパルス毎に異なる設定を与える 2 モードを試験する。設定のための簡易制御プログラムを Windows 上に開発する。

#### 3-2-2 RF 出力強度および帯域の試験

発振器出力を既存のスペクトルアナライザ(ADVANTEST 社 DC-30GHz)により観測し、スペクトルから周波数帯域と出力の評価を行う。帯域外のスプリアスの発生や、出力強度の周波数平坦度の確認を行う。スプリアス発生時はフィルタ特性の調整(交換)、強度の平

度は DDS の振幅変調パラメータの調整により行う。

### 3-2-3 遅延量制御の試験

遅延量制御の評価は図5のように模擬的な1次元レーザレーダを構築し、実験室内で評価を行う。送信波パルス、既存の光変調・復調器により光ファイバー遅延線路(長さ 10 km、既存)を伝搬させる。透過してくる受信波パルスと、発振器により再生成される参照波パルスをミキサにより干渉させ、オシロスコープで観測する。発振器の設定を固定動作させた場合は、位相が固定された単一周波数成分を持つ干渉信号を確認することで発振器の動作を評価できる。発振器の設定を模擬的に変化させた場合は、遅延量の変化に伴い、観測される周波数と初期位相が時々刻々と変化する。観測される初期位相と、発振器に与えた座標情報から計算できる干渉信号の初期位相の推定値を比較し、遅延量制御の評価を行う。

## 4. 研究成果

開発した RF 部を図 1 に示す。タイミング制御基板及び源信号発振器を 2 幅 NIM モジュールに実装されている。共通のクロックを外部から入力し、制御基板と源信号発振器を同期動作させている。本モジュールは PC と USB ケーブルを用いて通信可能で、図 2 に示す波形制御ソフトウェアを用いて掃引周波数帯域や発振開始タイミングなど制御可能である。



図 1 デジタル発振器 RF 部



図 2 発振器制御ソフトウェア

本発振器を用いて 3-2-1 で述べたパルス波形を固定して繰り返し送受信するモードを利用し、3-2-3 に示す伝播経路を用いて遅延量制御の評価実験を行った結果を図 3 に示す。本結果はファイバースプールで 10.5km 程度 RF 信号を伝搬させ、さらにホーンアンテナ間

を電波として伝搬させている。ホーンアンテナ間の距離を細かく変化させ、伝搬する信号の位相を測定したものである。このとき、デジタル制御発振器は同一の波形条件を用いて 1kHz 程度で繰り返し発信させている。

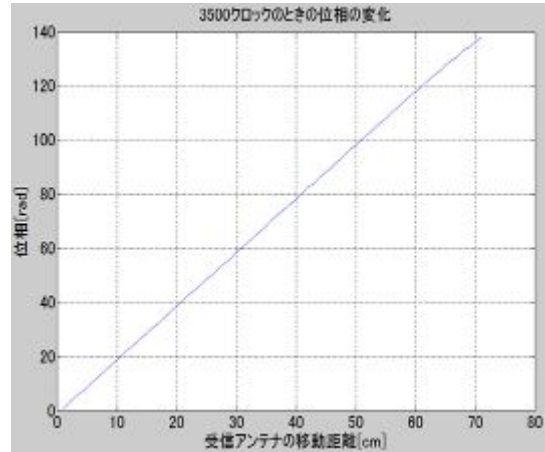


図 3 伝播経路変化と受信された位相変化量

図 3 に示すように測定される位相は伝播距離の変化に比例しているため、繰り返し同一条件で波形を発生させることができること、発振制御が高精度に行えていることを示している。

次に、3-2-2 に述べた試験を行った。設計開発した周波数変換回路部のブロック図を図 4 に示す。

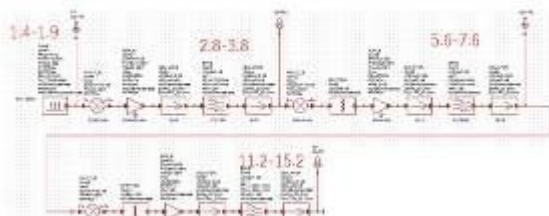


図 4 周波数変換回路部

1.4-1.9GHz の源信号を順に 2 通倍していき、最終的に 11.2-15.2GHz の出力を得る。デジタル発振器に周波数変換回路部を接続し、スペクトルアナライザで測定した結果を図 5 に示す。11.2-15.2GHz の帯域で出力が観測されている。若干一部の周波数でディップが観測されており、出力のフラット化に関しては近日中の課題であるが、一部の部品の取り替えによりフラット化できることは確認している。

最後に 3-2-1 にのべた、パルス毎にパルス波形を変更できるモードの試験は未実施である。本件の実装のため、研究期間を 1 年間当初の計画より延長した。図 1 に示すは新規は制御機とデジタル発振器の通信をシリアル通信で行っていて、高速に波形情報を更新できない。そこで通信をパラレル化したデジ

タル発振器および制御用ソフトウェアの製作は研究期間の終盤で完了した。図3に対応する平行化した発振器を用いた伝播経路を変化させたときの受信信号の位相の評価は近日中に行い、結果は学会等で発表した。

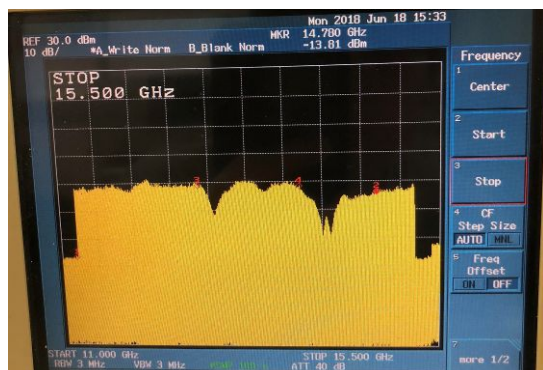


図5 周波数変換回路部出力(11.2-15.2GHz)

## 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)

A. Mase, Y. Kogi, D. Kuwahara, Y. Nagayama, N. Ito, T. Maruyama, H. Ikezi, X. Wang, M. Inutake, T. Tokuzawa, J. Kohagura, M. Yoshikawa, S. Shinohara, A. Suzuki, F. Sakai, M. Yamashika, B. J. Tobias, C. Muscatello, X. Ren, M. Chen, C. W. Domier, and N. C. Luhmann, Jr., Development and Application of Radar Reflectometer Using Micro- to Infrared Waves, *Advances in Physics: X*, 査読有 (掲載予定)

Y. Kogi, T. Higashi, N. Tamura, H. Tsuchiya, D. Kuwahara, Y. Nagayama, A. Mase, K. Takehara, T. Tokuzawa, Observation of electron temperature turbulence with correlation electron cyclotron emission radiometer on LHD, *J. Instrum. (JINST)*, 査読有, 11 巻, C01072/1-9 頁 (Jan. 2016)

〔学会発表〕(計11件)

”マイクロ波・ミリ波反射計(レーダ)の開発と応用事例”, 間瀬 淳・近木祐一郎・桑原大介・長山好夫・池地弘行・伊藤直樹・小波蔵純子・吉川正志・王 小龍・犬竹正明, 電子情報通信学会ソサエティ大会、2017年9月13日 招待講演

“Development and application of radar reflectometer using millimeter to infrared waves”, Atsushi Mase, Yuichiro Kogi, Daisuke Kuwahara, Hiroyuki Ikezi, Yoshio Nagayama, Xiaolong Wang, Naoki Ito, and Masaaki Inutake, BIT7S 6th Annual world

congress of advanced materials 2017, June 14-16, 2017 Xi'an China, 招待講演

金子大祐, 近木祐一郎(福岡工業大学), “波高観測レーダのシミュレーション実験”, 平成27年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, マイクロ波およびレーザ応用合成開口レーダの実用化研究, 平成28年3月7日, 東北大学電気通信研究所

金子大祐, 近木祐一郎(福岡工業大学大学院), “地上設置型海波高観測レーダのシミュレーション実験”, 平成28年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, マイクロ波およびレーザ応用合成開口レーダの実用化研究, 平成29年3月7日, 東北大学電気通信研究所

野田龍成, 近木祐一郎, “地上設置型海波高観測レーダの現状”, 平成28年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, マイクロ波およびレーザ応用合成開口レーダの実用化研究, 平成29年3月7日, 東北大学電気通信研究所

金子大祐, 近木祐一郎, “陸上設置型潮位観測レーダにおける電波伝搬シミュレーションを用いた潮位解析手法の研究”, 平成29年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, マイクロ波およびレーザ応用合成開口レーダの実用化研究, 平成30年3月12日, 東北大学電気通信研究所

中園亮汰, 近木祐一郎, “陸上設置型潮位観測レーダ開発の現状”, 平成29年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, マイクロ波およびレーザ応用合成開口レーダの実用化研究, 平成30年3月12日, 東北大学電気通信研究所

金子大祐, 近木祐一郎, 池地弘行, 犬竹正明, 間瀬 淳, “陸上設置型レーダシミュレーションによる海波の潮位検出法の研究”, 電子情報通信学会ソサエティ大会, 2017年9月12日-15日, 東京都市大学

金子大祐, 近木祐一郎, 野田龍成, 竹内康洋, 池地弘行, 間瀬 淳, 犬竹正明, “陸上設置型レーダシミュレーションによる海波の潮位及び波高分離法の検討”, 2017年度電子情報通信学会九州支部学生会講演会, 平成29年9月26日, 琉球大学

野田龍成, 近木祐一郎, 金子大祐, 竹内康洋, 池地弘行, 間瀬 淳, 犬竹正明, “陸上設置型潮位観測レーダの発振器制御装置の製作”, 平成29年度電子情報通信学会総合大会 2018年3月20日-23日, 東京電機大学

金子大祐, 近木祐一郎, 竹内康洋, 野田龍成, 池地弘行, 間瀬 淳, 犬竹正明, “陸上設置型潮位観測レーダシミュレーションによるアンテナ設置間隔と波高推

定精度に関する研究”, 平成29年度電子  
情報通信学会総合大会 2018年3月20日  
-23日, 東京電機大学  
〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 潮位推定装置および潮位推定方法  
発明者: 近木祐一郎, 金子大祐, 間瀬淳, 池  
地弘行, 犬竹正明  
出願人: 学校法人福岡工業大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2017-219353  
出願年月日: 平成29年11月14日  
国内外の別: 国内

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

近木 祐一郎 (KOGI, Yuichiro)  
福岡工業大学・工学部・教授  
研究者番号: 10398109

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

間瀬 淳 (Mase, Atsushi)  
福岡工業大学・エレクトロニクス研究所・  
研究員  
研究者番号: 00023325

### (4) 研究協力者

( )