

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289126

研究課題名(和文) チャープマイクロ波変調近赤外レーザを用いた合成開口イメージングの研究

研究課題名(英文) Study of synthetic aperture imaging using chirp microwave modulated infrared laser

研究代表者

間瀬 淳 (Mase, Atsushi)

福岡工業大学・付置研究所・研究員

研究者番号：00023325

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、空間分解向上を目的としたチャープマイクロ波変調レーザレーダの開発、及びイメージング実験を進めた。レーダの空間分解を決める周波数及び変調幅は総務省による割当て制限があるが、波長1550nmの近赤外線では該当しないことを利用し、18GHzの超広帯域変調を用いた。本方式は、SN比低下の原因となるスペckル雑音はレーザを搬送波に使用するため、コヒーレンス長の低下は信号処理をマイクロ波領域で行、問題とならない等の利点がある。送信ビームを二次元掃引し、反射波の位相解析により、距離10mにわたり5-10 mmの分解で、物体の三次元イメージングの形成に成功した。

研究成果の概要(英文)：We have studied an ultra-wideband microwave-modulated laser radar for improvement of the spatial resolution, and performed an experiment of imaging formation of an object. The frequency and the bandwidth are assigned by the Administration of Radio under the Ministry of Internal Affairs and Communications. There is no such limitation in the infrared region. The amplitude modulation in a range of 18GHz is applied to an infrared laser with 1550nm wavelength.

There are several benefits using microwave-modulated laser. The speckle is one of the serious problems for obtaining good signal to noise ratio in the microwave region. This problem can be eliminated because an IR laser is used as a carrier wave. The drop of coherence length can also be neglected since the data processing is performed in microwave region.

We have succeeded to obtain 3D image of objects by scanning a laser beam in two dimensions and the phase analysis of the reflected waves.

研究分野：マイクロ波工学、計測工学、プラズマ科学

キーワード：マイクロ波 レーザ 光無線融合技術 イメージング リモートセンシング 防災

1. 研究開始当初の背景

平成 18 年、池地博士 (研究協力者) より、我が国における航空機搭載用合成開口レーダ (SAR) 技術の高度化のため、大学を中心とした研究グループの形成およびプロジェクト立ち上げの提案があった。これに基づき、研究代表者は、池地博士、犬竹博士 (研究協力者) と共同で合成開口レーダに関する研究を開始した。平成 19-21 年度、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト「民生用合成開口レーダシステム開発の課題と展望」、平成 22-24 年度「民生用合成開口レーダシステムの開発と応用」(代表者: 間瀬) を進め、国内における SAR グループの情報交換と交流の促進に努めた。また、平成 21-24 年度国土交通省プロジェクト「リアルタイム画像生成合成開口レーダの実用化に関する技術開発」(代表者: 犬竹正明) が採択され、スポットライト方式というアイデアのもと研究を進めた。

マイクロ波 SAR は、国家プロジェクトとして、航空機搭載 L バンド (周波数 4 GHz) システム "Pi-SAR"、さらに、L バンド SAR を搭載した探査衛星「だいち:ALOS」が運用され、地表観測に適用されている。民生用 SAR では、三菱電機グループにより、空間分解の向上を目的として、Ku バンド (15 GHz) への高周波化と反射波と参照波間の干渉測定への位相アンラッピング法の適用により 30 cm の空間分解が実現している。また、千葉大学環境リモートセンシングセンターが円偏波 SAR の開発を開始している。しかし、システムの製作・運用には多額の予算が必要となるため、大学では、得られたデータの信号処理、画像処理技術などの研究を中心に進められてきた。

一方、パルスレーザを用いたレーザレーダは、レーザ応用の一つとして当初から注目され、国内外ほぼ同時期に研究が開始された。大学では東北大学、東京大学、大阪大学、京都大学、九州大学、国立研究機関では気象研究所、公害研究所、企業では三菱電機、東芝、日本電気を中心として発展してきた。適用分野としては、大気、海洋、地形、衛星距離等の計測手段として、また、航空機搭載型ライダーと GPS を組み合わせ、断層や隆起・沈降に伴う地殻の変位を測定するのに役立っている。

従来レーザレーダは高出力が必要という問題があり、マイクロ波レーダでは電波法により周波数帯域が制限されるため、十分な空間分解を実現することが困難であった。本研究は、これら欠点および規制をクリアするもので、バンド幅の広いチャープマイクロ波で変調された低出力レーザを使用することにより被測定物の高分解画像 (10 cm 以下) の表示が可能なシステムを開発することを目標とした。

2. 研究の目的

周波数幅 1-18 GHz をもつチャープマイクロ波信号で変調するレーザレーダ応用イメージング装置の開発を進めること、その発展形と

してシステムをスポットライト方式合成開口レーダ (SAR) として動作させることにより、リアルタイム画像表示の確認を行う。国内の電波規制により周波数幅に制限があるマイクロ波 SAR と比較してより高空間分解特性が得られることを、実験室さらには地上試験 (車輛搭載試験) で検証することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、「超広帯域マイクロ波変調レーザレーダの開発」および「光学および合成開口イメージング処理」の課題を組み合わせ、被測定対象の高分解二・三次元画像を取得するものである。前者では、i) 赤外線領域の定常出力レーザを対象として、周波数領域 1-18 GHz の振幅変調を実現し、ii) 対象物体による反射波から変調周波数を復調し解析することにより、振幅変化、位相遅れを評価するシステムを製作する。後者では、iii) リアルタイムレーザレーダ、あるいはスポットライト方式合成開口レーダとして動作させるため、二次元回転ステージ、あるいは慣性センサ付ジンバルマウントを用いたビーム掃引を実現し、iv) イメージング解析のための画像処理ソフトの製作を進める、という手順となる。その後、v) 全システムを組み合わせた画像生成実験を実験室で行った後、フィールド試験を実施する。

4. 研究成果

(1) マイクロ波変調レーザレーダの開発:

チャープマイクロ波変調近赤外レーザレーダシステムの開発・製作を行った。システムの概略を図 1 に示す。変調用マイクロ波には、ベクトルネットワークアナライザ (VNWA) のポート 1 出力を使用した。振幅変調された光送信機出力は、高出力アンプで増幅されたのちファイバーコリメータ (φ 20 mm) を用いて被測定対象に照射される。反射波は同形式のファイバーコリメータにより受信され、光ファイバーに集光される。受信光は、低出力および中出力の 2 台のアンプで増幅されるが、SN 比の向上のためアンプ間に狭帯域フィルタ (バンド幅 1nm) を挿入した後光受信機に入力される。光受信機出力は VNWA のポート 2 に入力され、S₂₁ 信号として振幅および位相成分が取り出される。なお光ファイバーはシングルモード (コア直径 9 μm) を使用する。

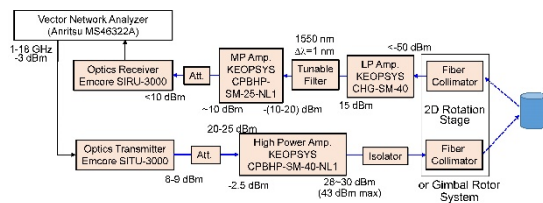


図 1. マイクロ波変調レーザレーダの概略。

S₂₁ 信号の位相成分は

$$\varphi = \frac{(\Delta\omega/\Delta t)\tau}{c}(L - L_r) + \varphi_0 \quad (1)$$

で表される。ただし、 $\Delta\omega/\Delta t$ は周波数変調率、 τ は位相解析を行う際の時間幅、 c は光速、 L は被測定対象までの距離、 L_r は VNA で設定可能な参照面の位置である。従って、反射波信号 (S_{21}) の位相成分の解析を行うことにより被測定対象の位置を決定することができる。

(2) バイスタティック方式光学系の確立：

送受信光学系として、光サーキュレータにより送信・受信を一体化したモノスタティック方式、および両者を分離したバイスタティック方式の両方式に対して、周波数掃引形 (FM-CW) レーダとしての特性を調べた。本実験では、次の理由から送受信光学系にバイスタティック方式を用いた。

モノスタティック方式では、反射波への入射波成分の混入を防ぐため、光学サーキュレータを用いる必要がある。入射波成分の混入は、アイソレーションの優れたサーキュレータ (60 dB) を用いた場合でも微弱な反射と比較して大きい位相成分の解析に困難をもたらす。

バイスタティック方式を用いた場合に課題となる点は、入射波および反射波の光軸がずれた場合、反射波成分をファイバーコリメータに接続されているシングルモードファイバ (コア径 9 mm) に戻すことが困難になることである。被測定物体の位置がレンジ方向にずれた場合、反射波の光軸もずれる。例えば、被測定物体の位置が z から Δz だけずれた場合、光ファイバーの位置における反射波の光軸のずれ Δx は次式で与えられる。測定点の位置変化に起因するファイバー位置での光軸のずれを表 1 に示した。

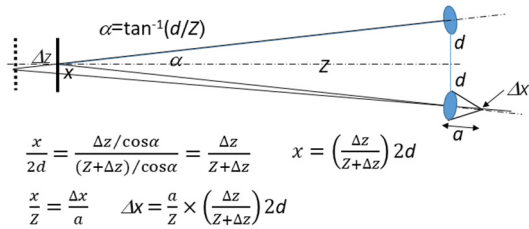


図 2. 光軸のずれ.

表 1. 測定点の位置と光軸のずれ.

$a=10 \text{ cm}, \Delta z/Z=0.1$			
Z [m]	Δx	$d=50 \text{ mm}$	$d=1 \text{ mm}$
10	$1.8 \times 10^{-3} d$	90 μm	1.8 μm
100	$1.8 \times 10^{-4} d$	9 μm	0.18 μm
500	$3.6 \times 10^{-3} d$	1.8 μm	0.036 μm
$a=30 \text{ cm}, \Delta z/Z=0.1$			
Z [m]	Δx	$d=200 \text{ mm}$	$d=4 \text{ mm}$
10	$5.5 \times 10^{-3} d$	1100 μm	22 μm
100	$5.5 \times 10^{-4} d$	110 μm	2.2 μm
500	$1.1 \times 10^{-4} d$	22 μm	0.44 μm

本実験では、送信光学系と受信光学系を分離し、ビームスプリッターを用いて同軸に近い光軸上でアラインメントする (d の値を実効的に小さくすることにより、測定対象位置の変化による光軸のずれを極めて小さくすることを可能とした。

(2) レンジ方向の空間分解測定：

レンジ方向 (距離方向) の空間分解評価を行うため、VNA のタイムドメイン機能を利用した。その測定結果を図 3 に示す。図からも評価できるが、距離 5-10 m にわたって直線からのずれは 10 mm 以下であった。一方、タイムドメイン測定の場合空間分解は、 $c/2f_m$ (c は光速、 f_m は変調周波数) で与えられる。本実験では変調周波数として 18 GHz を用いているので、空間分解は 8 mm となる。

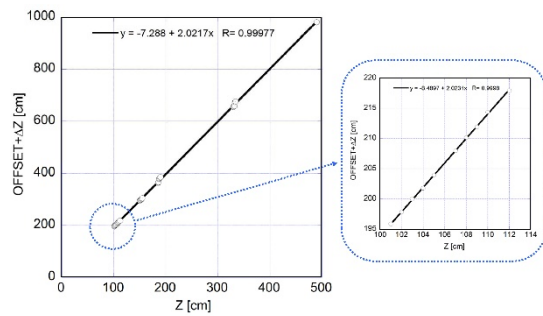
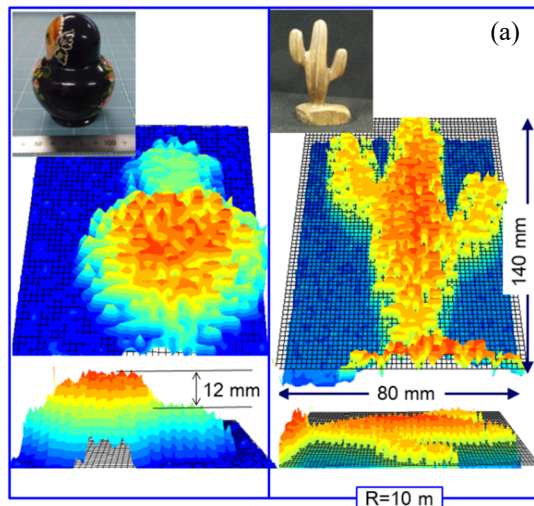


図 3. レンジ方向の空間分解測定.

(4) 三次元イメージングの検証：

送受信光学系を、ステッピングモータ駆動二次元回転ステージに搭載し、ビームを掃引することにより、イメージング導出を試みた。アジマス方向の位置 (x, y) は回転ステージにより設定される。レンジ方向 (z) の値は、反射波 (S_{21}) の周波数に対する位相変化から $\Delta f/\Delta t$ が評価されるため、(1) 式より L の値が導出される。図 4 にこのようにして得られた物体の三次元イメージングの例を示した。

アジマス方向の空間分解は、回転ステージの最小角度分解で与えられ 2-4 mm、レンジ方向の空間分解は、図 4(a) 下図の等高線より ~ 2 mm が得られている。



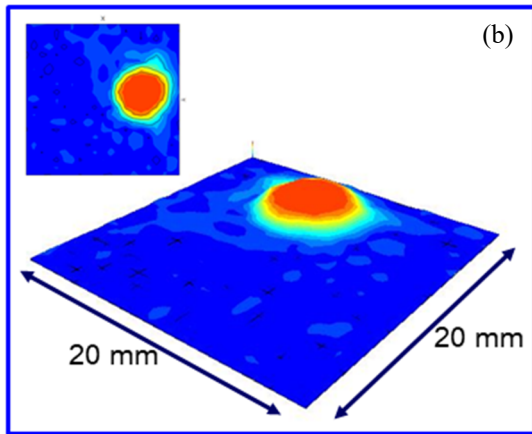


図 4. 物体の三次元イメージングの例：
(a) 写真で示した物体、(b) 球体。

図 4(b) の球体のイメージングでは画像にムラがなく表示されているのに対し、図 4(a) の物体のイメージングでは画像に凹凸が見られる。これは物体表面の波長 (1.55 nm) に比較した面精度に起因していると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 24 件)

- ① 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, N. C. Luhmann, Jr., Development and application of radar, reflectometer using micro to infrared waves, *Advances in Physics: X* (in press), 査読有
DOI: 10.1080/23746149.2018.1472529
- ② Y. Wang, B. Tobias, Y. T. Chang, J. H. Yu, M. Li, F. Hu, M. Chen, T. Phan, A. V. Pham, Y. Zhu, C. W. Domier, L. Shi, E. Valeo, G. J. Kramer, D. Kuwahara, Y. Nagayama, A. Mase, N. C. Luhmann, Jr., Millimeter-wave imaging of magnetic fusion plasmas: technology innovations advancing physics, *Nucl. Fusion*, Vol. 57, 2017, 072007/1-19, 査読有
DOI: 10.1088/1741-4326/aa5e30
- ③ A. Mase, Y. Kogi, H. Ikezi, M. Inutake, X. Wang, Study of imaging radar using ultra-wideband microwave-modulated infrared laser, *Proc. SPIE: Opt. Eng. Appl.*, Vol. 9973, 2016, 99730G-1/1-6, 査読有
DOI: 10.1117/12.2236326
- ④ D. Kuwahara, N. Ito, Y. Nagayama, H. Tsuchiya, M. Yoshikawa, J. Kohagura, T. Yoshinaga, S. Yamaguchi, Y. Kogi, A. Mase, S. Shinohara, Development of local oscillator integrated antenna array for microwave

imaging diagnostics, *J. Instrum.*, Vol.10, 2015, C12031/1-8, 査読有
DOI: 10.1088/1748-0221/10/12/C12031

- ⑤ Y. Kogi, T. Higashi, S. Matsukawa, A. Mase, J. Kohagura, Y. Nagayama, K. Kawahata, M. Yoshikawa, Validation experiment of a numerically processed millimeter-wave interferometer in a laboratory, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol.85, 2014, 11D411/1-3, 査読有
DOI: 10.1063/1.4893430
- ⑥ D. Kuwahara, N. Ito, Y. Nagayama, T. Yoshinaga, M. Yoshikawa, J. Kohagura, S. Sugito, Y. Kogi, A. Mase, Development of horn antenna mixer array with internal local oscillator module for microwave imaging diagnostics, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol.85, 2014, 11D805/1-4, 査読有
DOI: 10.1063/1.4885471
- ⑦ X. Wang, A. Mase, H. Ikezi, M. Inutake, Y. Kogi, K. Uchino, Synthetic Aperture Radar Using Ultra-Wideband Microwave-Modulated Laser, *J. Electromag. Waves Appl.*, Vol. 28, 2014, 917904/1-7, 査読有
DOI: 10.1080/09205071.2014.917994

[学会発表] (計 25 件)

- ① 間瀬 淳 他: 「マイクロ波・ミリ波反射計 (レーダ) の開発と応用事例」電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2017 年 (依頼講演)
- ② A. Mase et al., Development and application of radar reflectometer using millimeter to infrared waves, The 6th Ann. World Cong. of Advanced Materials, 2017 (invited talk)
- ③ 間瀬 淳 他: 「マイクロ波変調近赤外レーザを用いたイメージングの研究」電子情報通信学会総合大会, 2017 年
- ④ A. Mase et al., Application of radar reflectometer to plasmas and other fields, The 18th Int. Cong. on Plasma Phys., 2016 (invited talk)
- ⑤ N. Ito et al., Development of multi-channel Horn Mixer Array for Microwave Imaging Plasma Diagnostics, The 24th Int. Toki Conf., 2014

[図書] (計 3 件)

- ① 間瀬 淳 (共著): 「ドライバ状態の検出、推定技術と自動運転、運転支援システムへの応用」技術情報協会, 2016, 450 (30-37)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)

○取得状況（計 4 件）

名称：生体情報検出システム
発明者：間瀬 淳、伊藤直樹、坂田栄二、嶋津
博士、駒田 寛
権利者：株式会社産学連携機構九州
種類：特許
番号：6029108
取得年月日：2016 年 10 月 28 日
国内外の別：国内

名称：System for Measuring a Peak Frequency of
a Signal for Analyzing Condition of a Subject
発明者：Atsushi Mase, Daisuke Nagae
権利者：国立大学法人九州大学
種類：特許
番号：US9186079
取得年月日：2015 年 11 月 17 日
国内外の別：国外

名称：レーザレーダ装置およびレーザ合成開
口レーダ装置
発明者：犬竹正明、池地弘行、間瀬 淳、近木
祐一郎、佐藤源之
権利者：国立大学法人東北大学、国立大学法
人九州大学
種類：特許
番号：5686342
取得年月日：2015 年 1 月 30 日
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等：http://www.gic.kyushu-u.ac.jp/mase/mase_lab.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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

伊藤 直樹 (ITO Naoki)
宇部工業高等専門学校・制御情報工学科・
准教授
研究者番号：50604849

(3) 連携協力者

(4) 研究協力者

犬竹 正明 (INUTAKE Masaaki)
東北大学・電気通信研究所・研究員
研究者番号：90023738

池地 弘行 (IKEZI Hiroyuki)
九州大学・産学連携センター・前客員教授
研究者番号：