

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601  
研究種目：若手研究（A）  
研究期間：2010～2012  
課題番号：22686083  
研究課題名（和文）  
海面で反射した測位衛星電波によるバイスタティック合成開口レーダーの開発  
研究課題名（英文）  
Bistatic Synthetic Aperture Radar using GNSS Signals for Ocean Remote Sensing  
研究代表者  
海老沼 拓史（EBINUMA TAKUJI）  
東京大学・大学院工学系研究科・特任研究員  
研究者番号：40456314

研究成果の概要（和文）：本研究では、海面など地球表面で反射した測位衛星電波を利用する合成開口レーダーを開発した。従来の合成開口レーダーとは異なり、GPS に代表される測位衛星を信号源とするパッシブなシステムであるため、システムの小型化・省電力化が可能である。さらに、本手法では、測位衛星と反射点の位置関係を線形関数で近似することにより、反射点から離れた低軌道衛星からでも合成開口レーダーによるイメージングを可能にした。

研究成果の概要（英文）：A bistatic synthetic aperture radar (SAR) system using reflected and scattered GPS signals off the Earth's surface has been developed. Unlike most active SAR systems, this newly developed sensor utilizes passive signals transmitted from the GPS satellites. This reduces the size and power consumption of the system. In the image formulation, the range migration curve between the GPS satellites and scattered point is modeled as a linear function. This effectively eliminates the contribution of the GNSS satellite motions in the SAR imaging process and enables spaceborne applications.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2011 年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2012 年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
年度			
年度			
総計	16,300,000	4,890,000	21,190,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：リモートセンシング

## 1. 研究開始当初の背景

地表で反射した GPS 信号がリモートセンシングに利用できるのではないかというアイデアは、1993 年に欧州宇宙機関の研究者である Martin-Neira によって提案された。このような反射波は一般にマルチパスと呼ばれ、測位の分野では精度を低下させる要因

となってしまう。しかし、リモートセンシングの面から見ると、海面など地球表面からの反射波には、リモートセンシングに重要な情報が多く含まれている。

GPS 反射波を理よしたリモートセンシングは、観測信号の送信部と受信部の両方を必要とする従来のモノスタティックなシステムとは異なり、GPS 衛星からの測位信号をリ

モートセンシングの信号源とするパッシブなバイスタティックレーダーを構成することができる(図1)。そのため、観測装置は受信機のみで実現でき、大幅な小型化・省電力化が可能となる。

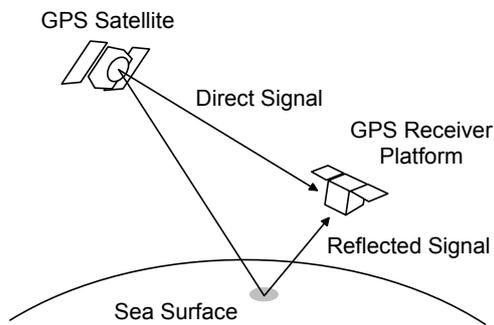


図1: GPS 反射波によるリモートセンシング

GPS 信号は携帯電話などにも利用されている CDMA と呼ばれる多重放送の技術を利用しており、受信波と受信機内部で生成したレプリカ信号との相関値を取ることで、信号の探索および追尾を行う。GPS 信号から直接受信する信号からは、三角形の相関波形が得られる。これに対して、海面などで反射した GPS 信号は、複数の反射信号が合成された拡散波となるため、時間軸方向に広がった相関波形となる。

GPS 反射波の相関波形は、同様に周波数軸方向にも広がりを持ち、Delay-Doppler Map (DDM) と呼ばれる 2 次元の相関強度マップが得られる。GPS 反射波によるリモートセンシングでは、この DDM の形状から、反射点における波浪や植生などの物理的な現象を間接的に推定している。

## 2. 研究の目的

従来の GPS 反射波によるリモートセンシングでは、時間と周波数における相関値の 2 次元分布によって、反射点の物理的な現象を観測している。そのため、観測領域における地表の形状や変化など、空間的な情報は失われていた。

また、反射波の観測は実開口のアンテナで実施されるため、衛星軌道からの観測において十分な信号強度を得るために長時間の積分が必要となるなど、信号処理における課題もあった。

そこで、本研究では、従来の GPS 反射波によるバイスタティックレーダーのアイデアを一步進め、GPS 信号を利用したパッシブな合成開口レーダーによるイメージングセンサーの実現を目的としている。

合成開口レーダーは、飛行中の航空機または人工衛星などに搭載したアンテナにより、地表からの反射波を進行方向に沿って時間的に合成することで、観測領域の空間画像を得る技術である。従来の合成開口レーダーでは、自ら地表に向けて照射した電波の反射を観測しているが、本手法では地表で反射した GPS 信号を利用することになる(図2)。

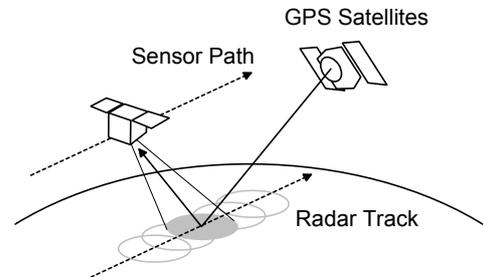


図2: GPS 反射波による合成開口レーダー

本システムは、パッシブなセンサーであることから、従来のアクティブな合成開口レーダーと比較して、小型化・省電力化が達成できる。そのため、大学の研究室レベルでの開発・運用が盛んな超小型衛星への搭載も期待できる。

本研究では、衛星搭載のシステム開発に向けて、まずは航空機搭載の合成開口レーダーの開発と、GPS 反射波によるイメージングを実現する信号処理アルゴリズムの開発を実施する。

## 3. 研究の方法

これまでの研究成果として、GPS 反射波を観測するための受信機と DDM によるリモートセンシング手法は実現されている。そのため、本研究では、合成開口を実現するためのアンテナとフロントエンド、画像生成アルゴリズムの開発が中心となる。

GPS 信号は円偏波であるため、従来の合成開口レーダーで広く利用されている直線偏波の信号とは、アンテナの設計が大きく異なる。そこで、アンテナ開発については、円偏波によるアクティブな合成開口レーダーを開発されている千葉大学環境リモートセンシング研究センターに協力していただく。アンテナで受信された GPS 反射波は、フロントエンドによってデジタル化された後、メモリに保存される。合成開口レーダーによる空間画像の生成は、このデータを後処理することで実施する。

また、従来の研究では、GPS 信号の内、民生向けに公開されている L1 帯の C/A 信号が利用されていた。近年、新たな民生信号とし

て、より広帯域の L5 信号が加わり、数機の GPS 衛星からの放送が開始されている。本研究では、この広帯域の信号による高解像度のリモートセンシングを実現するために、新しい L5 信号が受信可能なフロントエンドの開発も実施する。

合成開口レーダーによる観測を実現するためには、図 2 に示すように、アンテナを搭載した観測プラットフォームがある速度で移動している必要がある。そこで、本研究では、開発した観測装置と信号処理アルゴリズムの検証に、無人航空機による観測実験を実施する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 準モノスタティックアルゴリズム

GPS 反射波を利用した合成開口レーダーによるイメージング観測では、これまでにも地表付近を飛行する航空機による観測を目的とした SS-BSAR (Space-Surface Bistatic Synthetic Aperture Radar) と呼ばれる手法が提案されている。

しかし、この手法は、信号源である GPS 衛星と散乱点、そして観測点である受信機の間には存在する幾何学的な非対称性を解消するために、反射波だけではなく、直接波も同時観測し、これら二者間の幾何学配置が充分に対称であると仮定して画像生成を実施している。そのため、散乱点と観測点の距離が大きくなると、この対称性が維持できなくなり、観測点の高度は散乱点付近に限定されるという制約があった。

本研究では、最終的に衛星軌道からのリモートセンシングを目標としているため、このような幾何学的な制約のない新しいアルゴリズムが必要となる。そこで、本研究では、従来の幾何学的非対称性に対する解法である直接波は利用せず、信号源である GPS 衛星の運動を解析的に除去することで、本来はバイスタティックな幾何学配置である問題に対して、従来のモノスタティックな画像化手法を適応可能にする準モノスタティックアルゴリズム (Quasi-Monostatic Algorithm: QMA) を提案した。

バイスタティック合成開口レーダーにおける大きな課題が送受信機と散乱点間の幾何学的非対称性である。つまり、散乱点からみた送受信機の運動が全く異なることになる。GPS 反射波においては、受信機と搭載したプラットフォームが観測域上空を飛行する間、散乱点から GPS 衛星への視線方向はほぼ変化しない。この特性を利用して、QMA では合成開口時間における送信機-散乱点のレンジ変化を線形に近似し、受信機の運動のみが合成開口に寄与するものとして定式

化を行っている。これにより、バイスタティックな観測ジオメトリでありながら、従来のモノスタティックな合成開口アルゴリズムによる画像化が可能となる。

本手法において、もう一点考慮すべき影響は、線形に近似された GPS 衛星の運動の残存効果である。通常モノスタティックな合成開口であれば、受信機から等レンジにある散乱点は、生成画像においても同様に等レンジに結像される。これは、各散乱点に最も近接する時刻における送信機-散乱点-受信機を結ぶレンジ距離が等しいからである。

一方、バイスタティックな観測では、GPS 衛星の運動が残存するため、受信機の飛行軌跡から見た場合に、等レンジに並ぶ各散乱点に対して、最も接近する時刻における散乱点-受信機間のレンジ距離は等しいが、散乱点-送信機間のレンジ距離は異なることになる。つまり、生成された画像において、観測域に含まれる各散乱点の相対的な位置が正しく復元されない。そこで、QMA では、前述の GPS 衛星運動の線形近似に加えて、GPS 衛星の運動によるレンジ距離の変化も解析的に除去する等レンジ化処理も組み込まれている。

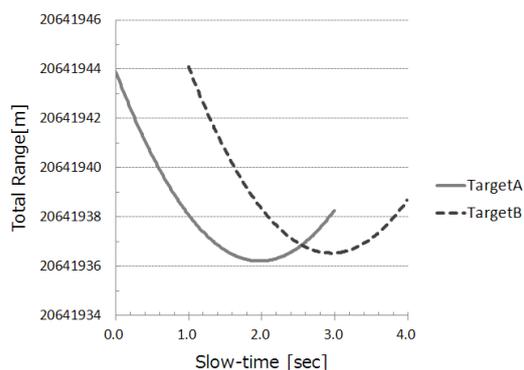


図 3: 等レンジ化後のレンジ距離

図 3 は受信機の飛行軌跡に対して等レンジ距離にある 2 つの散乱点に対して QMA を適応した場合のレンジマイグレーション曲線を示している。近似誤差はあるものの、1m 以下のレンジ距離精度で観測時間に対して相似なレンジマイグレーション曲線に変換されていることが確認できる。

##### (2) 画像化処理の数値シミュレーション

QMA による等レンジ化処理により、バイスタティックな観測信号が、モノスタティックな観測と同等の形に変換することが可能となった。そこで、本手法における画像化では、従来のモノスタティックな合成開口レーダーによる画像化処理のひとつであるレン

ジ・ドップラ法を応用している。さらに、信号処理の計算コストを低減するために、周波数領域において、レンジ圧縮とアジマス圧縮を同時に実施するアルゴリズムを開発した。

QMA による画像化アルゴリズムの妥当性を検証するために、図 3 と同様に、飛行軌跡に対して等レンジ距離にある 2 点の散乱点を仮定し、数値シミュレーションを実施した。これによって得られた複素強度画像を図 4 に示す。図 4 において、2 つの点散乱源に対応する点拡張関数が等レンジ距離に復元されていることから、等レンジ処理を含む QMA が正しく機能していることが確認できる。

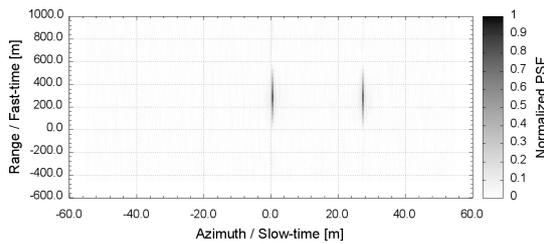


図 4: QMA による複素強度画像

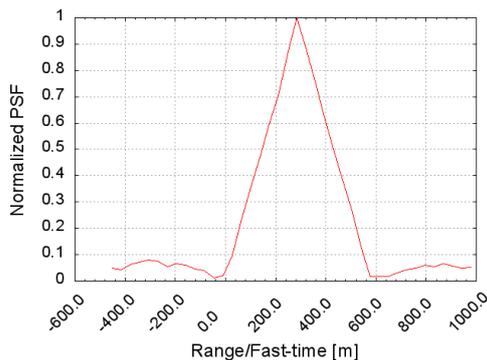


図 5: レンジ方向の点拡張関数

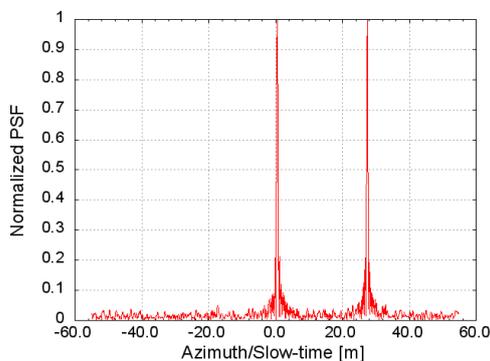


図 6: アジマス方向の点拡張関数

さらに、図 4 におけるレンジ方向およびアジマス方向の点拡張関数を、それぞれ図 5 と

図 6 に示す。これらから、レンジおよびアジマス方向の空間分解能を評価することができる。

QMA では、合成開口における GPS 衛星運動の寄与を除去していることから、通常のモノスタティック観測の半分の合成開口効果となる。これより、本シミュレーションにおける理論的なアジマス空間分解能は、約 0.54m となる。レイリー基準に準拠した空間分解能の評価を適応することで、図 6 から読み取れるアジマス分解能が、この理論値と一致することが確認された。

一方、レンジ方向の点拡張関数は、GPS 信号として仮定している L1 C/A 信号の相関波形に一致する。そのため、レンジ方向の空間分解能は、C/A コードのチップ幅に相当する約 300m となる。このように、GPS 反射波を利用した合成開口レーダーによるイメージングでは、レンジ方向とアジマス方向の空間分解能に大きな異方性を持つことになる。

### (3) 無人航空機による観測実験

QMA による実観測データからの画像化を確認するために、無人航空機による観測実験を実施した。合成開口レーダーによる観測を実現するためには、アンテナを搭載した観測プラットフォームがある程度の速度で移動している必要がある。当初は空撮などで利用されているセスナ機による観測を予定していたが、航空機の手配や飛行場の制約などにより、小型の無人航空機による観測となった。

図 7 に観測実験に利用した小型無人航空機の外観を示す。航空機の側面には、45 度の角度で地表面に向けたアレーアンテナが搭載されており、地上で反射した GPS 信号を受信する。受信された信号は、フロントエンドによってデジタル化され、小型ノート PC のハードディスクドライブに記録される。記録されたデータは、飛行後に地上にて後処理によって画像化される。



図 7: 小型無人航空機の外観



図 8: 観測領域の画像

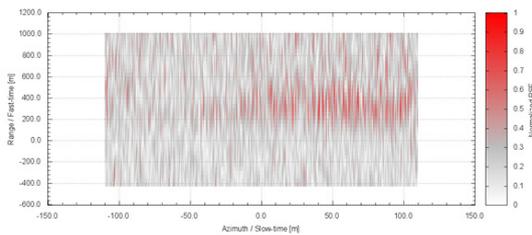


図 9: 複素強度画像の例

図 8 に無人航空機のカメラから撮影された観測領域を示す。無人機の飛行経路は、散乱係数の異なる水面と植生のある陸地を横切るように選んでいる。このとき観測された GPS 反射波から QMA によって得られた複素強度画像を図 9 に示す。図中、右反面が水面、左が植生面の強度画像に相当する。本実験では、鏡面反射性が高い水面と比較して、散乱係数が高くなる植生面の方が、画像において強度が高く表れると予想されていた。実観測においても、図 9 に示すように、複素強度画像において水面と植生面による違いが明確に表れている。さらに、同時に複数の GPS 衛星からの反射波が観測されているが、どの複素強度画像においても、同様に水面と植生面による強度の違いが表れている。これより、複素強度画像は実際の散乱強度の変化を捉えたものであり、QMA による画像が実観測データによっても確認された。

#### (4) 広帯域アレーアンテナの開発

無人航空機による観測実験は、搭載機器の重要やサイズの制限から、GPS の L1 C/A 信号に対応した観測システムを搭載している。QMA によって得られる画像のレンジ方向の空間分解能は、拡散コードのチップ幅によって制限されるため、L1 C/A 信号では約 300m となってしまふ。この空間分解能を改善するためには、より広帯域な信号を利用しなければならない。

そこで、本研究では、新たに民生向けの

GPS 信号として追加された L5 信号を受信可能なアレーアンテナの開発を実施した。L5 信号の拡散コードは、L1 C/A 信号の 10 倍の周波数で生成されるため、レンジ方向の空間分解能も 1/10 の約 30m となる。

図 10 に開発したアレーアンテナの外観を示す。帯域が約 20MHz の L5 信号に対して、軸比帯域幅 (3dB) で 26MHz、リターンロス帯域幅 (-10dB) で 86MHz が実測値で得られている。

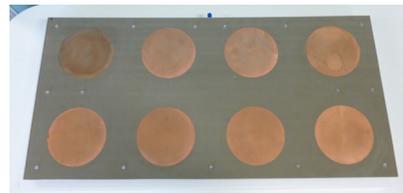


図 10: 広帯域アレーアンテナの外観

軸比帯域を確保するために小型化は難しく、観測実験に利用した無人飛行機への搭載は実現しなかったが、千葉大学環境リモートセンシング研究センターで開発中の大型無人飛行機での観測を計画している (図 11)。



図 11: 大型無人飛行機の外観

#### (5) 複数周波数対応フロントエンドの開発

広帯域の GPS 信号による観測のためには、アンテナだけではなく、専用のフロントエンドも必要となる。観測実験で使用した L1 C/A 信号であれば、市販のフロントエンド IC が購入可能であるが、新しい民生信号である L2C や L5 に対応したフロントエンドは市販されていない。

そこで、本研究では、130nm CMOS プロセスを用いた複数周波数対応の GPS フロントエンドを開発した。このフロントエンドでは、従来の L1 C/A 信号に加え、新たな民生信号である L2C および L5 信号のトリプルバンドが同時受信可能である。

図 12 に本研究で開発したトリプルバンドフロントエンドの外観を示す。これをパッケ

ージングした IC にアナログデジタル変換器などの外部回路を追加した評価基板を図 13 に示す。

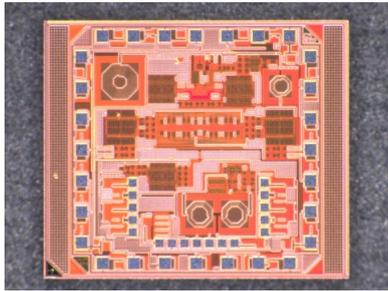


図 12: トリプルバンドフロントエンド

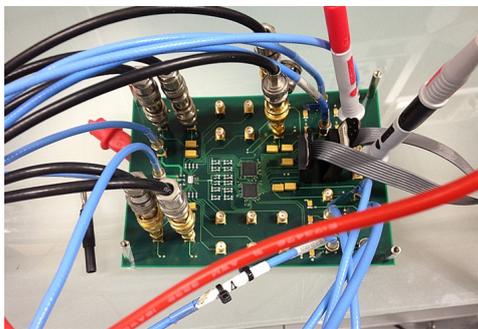


図 13: フロントエンド評価基板

評価基板から出力されるデジタル信号は、観測実験と同様に PC に保存され、後処理によって画像化される。広帯域アレーアンテナと組み合わせることで、L5 信号による高空間分解能の観測が可能となる。

#### 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 1 件)

- ① Ikkyun Jo, Jungnam Bae, Toshimasa Matsuoka, Takuji Ebinuma, “Design of triple-band CMOS GPS receiver RF front-end,” IEICE Electronics Express, Vol. 10, No. 7, 2013, pp. 1-9, DOI: 10.1587/elex.10.20130126

[学会発表] (計 9 件)

- ① 三川祥典, 海老沼拓史, 中須賀真一, “準モノスタティック手法による GPS 散乱波を用いた SAR 観測,” 第 20 回リモートセンシングフォーラム, 2013 年 3 月 1 日, 首都大学東京秋葉原キャンパス
- ② 三川祥典, 海老沼拓史, 中須賀真一, “GPS 信号の地表散乱に合成開口レーダ手法を適用した画像化アルゴリズムの開

発,” 測位航法学会 GPS/GNSS シンポジウム 2012, 2012 年 10 月 26 日, 東京海洋大学越中島キャンパス

- ③ Yoshinori Mikawa, Takuji Ebinuma, Shinichi Nakasuka, “The study of the remote-sensing application using the GNSS reflected signal with the aperture synthesis,” IEEE IGARSS, July 23, 2012, Munich, Germany
- ④ Yoshinori Mikawa and Takuji Ebinuma, “SAR Imaging Technology using Reflected GNSS Signal,” The 17th CERE S International Symposium, March 1, 2012, Chiba University
- ⑤ Ikkyun Jo, Toshimasa Matsuoka, Takuji Ebinuma, “Design of triple-band GPS CMOS Receiver,” IEICE International Conference on Integrated Circuits and Devices, August 8-10, 2011, Hanoi, Vietnam
- ⑥ Yoshinori Mikawa and Takuji Ebinuma, “The study of the remote-sensing application of the GNSS reflected signals with the synthetic aperture radar technique,” The 28th ISTS, June 8, 2011, Okinawa
- ⑦ 趙益均, 松岡俊匡, 谷口研二, 海老沼拓史, “トリプルバンド GPS 受信機の設計,” 電気情報通信学会集積回路研究会, 2010 年 12 月 16 日, 東京大学
- ⑧ 海老沼拓史, “GPS 反射波による海洋観測の現状と将来の展望,” 第 52 回宇宙科学連合講演会, 2010 年 11 月 17 日, グランシップ, 静岡
- ⑨ 海老沼拓史, 三川祥典, “プログラマブルフロントエンドによる多周波 GNSS 受信機の開発,” 測位航法学会 GPS/GNSS シンポジウム 2010, 2010 年 11 月 7 日, 東京海洋大学越中島キャンパス

[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]

なし

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

海老沼 拓史 (EBINUMA TAKUJI)  
東京大学・大学院工学系研究科・特任研究員  
研究者番号：40456314