

論文の内容の要旨

論文題目

合成開口レーダ手法を GPS 測位信号の地表散乱波へ適用した 画像化アルゴリズムに関する研究

氏名 三川 祥典

本論文は GPS 測位信号が地表面において散乱された GPS 散乱波と合成開口レーダ技術を組み合わせたリモートセンシングに関して、理論構築、画像化アルゴリズムの提案及び検証実験の考察をまとめたものである。

全地球型測位システム (Global Positioning System, GPS) は現在の我々の暮らしに必要な宇宙技術の一つであり、航空機の航法システムから我々が利用する乗用車に備え付けられたカーナビゲーションまで、非常に多様な形で我々の生活を支えている。さらに近年、こうした一般的な測位航法を目的とした利用法とは異なる、全く新しい形で GPS 測位信号を利用しようとする研究分野が開拓されつつある。これこそが、GPS 測位信号を利用したリモートセンシングである。

ユーザに対して常に測位が可能な仕組みを提供するために、地球近傍において常時 4 基以上の GPS 衛星が観測できるように GPS の軌道設計が為された事はよく知られる通りである。このように天頂に位置する GPS 衛星からユーザへ直接的に届く測位信号を直接波と呼ぶ一方で、地面や建物の壁などを介して間接的に受信される信号は GPS 信号処理においてマルチパスと呼ばれ、GPS 技術者からは測位精度の劣化要因の一つとして広く知られている。ところが、上空の GPS 衛星を電波送信機と見立てると、GPS 衛星、散乱対象物、GPS 受信機を含むジオメトリが、リモートセンシングのそれに非常に類似している事に気づくだろう。これより、GPS 測位電波をリモートセンシングにおける媒介電波に見立てる事で、地表面により散乱された GPS 測位信号から散乱域の物性情報を抽出する事が可能となるのではないかと考えられた。

1993 年にこうした研究が初めて提唱されて以来、現在においても各地で盛んに研究が継続されているが、本研究分野は大きく 2 つの観測手法に分類する事ができる。1 つがリフレクトメトリに端を発する観測手法であり、黎明期から現在に至るまで本研究分野の中心と位置づけられている手法である。もう 1 つは、後発の研究対象であり、本論文において主に取り組む課題である合成開口レーダを組み合わせた画像化手法である。前者は GPS を含む全地球型測位衛星システム (Global Navigation Satellite System, GNSS) の信号を用いたリフレクトメトリと位置づけられる事から GNSS-R と呼ばれ、海面高度や海面粗さ、海水厚さなど様々な観測対象に対して適用が試みられている。この GNSS-R では、取得された散乱波に含まれる擬似雑音符号の相関形状の変化から上記の観測量を読み取る事を基本的なアプローチとしており、比較的実験が容易である事から 2012 年現在も多く関連研究が報告されて

いる。さらに、2000年代前半において既に軌道上でのGNSS-Rが実現しており、先日世界で初めてGNSS-Rを実利用目的で活用する超小型衛星コンステレーションミッションであるCYGNSSが米国のNASAに承認された事からも、GNSS-Rは既に実利用段階に移行しつつあると言える。しかしながら、GNSS-Rはその性質から、効果的な観測を行うためには観測対象や観測手法の間でのトレードオフが存在し、ユーザによる自由な観測構成の設定が困難である。さらに、光学観測で得られる画像情報のような、位置情報と観測値が結び付けられた観測量の取得が難しく、大域的な観測に制限されてしまう。こうした理由から考え出された新たな観測アプローチが、本研究の主題でもある合成開口レーダによる電波観測手法の導入である。

合成開口レーダを導入する事で得られる最大の利点は、画像化を可能にするアジマス方向の空間分解能である。さらにアジマス方向の整合フィルタ処理による信号電力圧縮により、微弱な散乱波に対する信号対雑音電力比の向上も見込む事ができる。こうした特徴により、より自由に観測ジオメトリを設定する事が可能になるのである。一方で、本概念は電波の送受信機が異なるプラットフォームに搭載されるバイスタティック構成であり、かつ両者が恣意的な運動をする事から、従来のSAR画像化アルゴリズムをそのまま適用する事ができないという問題も抱えている。こうした背景により、現在において本研究分野の中心的な研究課題は、この複雑な観測ジオメトリをいかに簡便化し、従来のSAR画像化アルゴリズムの適用を可能にするかという点に集中しており、多くの先行研究では直接波を整合フィルタの参照関数として利用する事で、散乱波からGPS衛星の運動効果を相殺する手法が採用されている。しかしながら、このような手法は散乱点と観測点が幾何的に近い場合のみ成立し、かつ直接波の取得に指向性の高いアンテナを利用しなければならず、観測ジオメトリや観測機器に対する制約を与えてしまう。従って、GNSS-R同様に、GNSS散乱波による合成開口レーダ観測を実用レベルに高めるためには、より実用的で拡張性のある画像化アルゴリズムを構築しなければならない。

本論文において提案する準モノスタティックアルゴリズムは、このような実用性と拡張性を併せ持つ画像化プロセスを実現するSAR画像化アルゴリズムである。従来の手法のように直接波を画像化に利用せずに、GPS衛星の精密暦によりフィードフォワード的にレンジマイグレーション曲線を導出する事で、散乱点と観測点の間の幾何的類似性を考慮する事なく、GPS衛星の運動効果を補正し、バイスタティックジオメトリをモノスタティック化する事ができる。こうした精密暦は一般には精密な測位計算の基点として利用するためにオンラインで公開されているものであり、GNSSだからこそ利用できる特性の一つであると言える。加えて、従来の画像化アルゴリズムが特殊なジオメトリを持つ合成開口レーダという位置づけから、通常合成開口レーダのアナロジーを基点に構築されたものであったのに対し、本研究では適用対象システムであるGPS測位信号の信号特性や信号処理を加味した厳密な理論構築を行った。このため、多くの先行研究が言及する事のないSAR信号空間の再定義を行い、この新たな信号空間の下で準モノスタティックアルゴリズムの定式化を行った。

開口合成に対するGPS衛星の寄与を除去する事が準モノスタティックアルゴリズムの効果であるが、GPS衛星の運動効果は依然として残存しており、受信プラットフォームに対して等レンジにある散乱点群が正しいレンジにマッピングされない問題が生じる。そこで、本手法においてこのような効果を補正するために、等レンジ化パラメータというレンジマイグレーション曲線係数の補正項を導入した。この等レンジ化パラメータが、従来のアルゴリズムにおいて直接波が担っていたGPS衛星によるレンジ距離の変化を補正する役割を果たすが、従来と比較して観測ジオメトリに応じて調整する事が可能になったため、より柔軟に観測ジオメトリの変化に対応する事ができるようになった。即ち、受信プラットフォームの高度変化に伴う、散乱点と観測点の類似性の減少に影響される事なく、同一の枠組みを用いて

画像化が達成されるようになった事を意味し、準モノスタティックアルゴリズムに拡張性を与える要素が等レンジ化パラメータであると言える。

準モノスタティックアルゴリズムの画像化処理部は従来のモノスタティック SAR に対するレンジ・ドップラ法を採用している。従って、準モノスタティックアルゴリズムとは、前述のような GPS 衛星の運動を含む複雑なバイスタティックジオメトリからモノスタティックジオメトリへ変換する前処理群と画像化を担うレンジ・ドップラ法によって構成される。従来の画像化アルゴリズムでは直接波を用いた相関処理を前提としていたため、時間領域での整合フィルタ処理が必要であった。一方で、提案手法は整合フィルタを用いずにモノスタティック化を達成するため、計算コストが抑えられた周波数領域処理を最大限に利用する事ができる。さらに、GPS 測位信号表記から解析的に導出した二次元スペクトラムの形式から、本手法ではレンジ及びアジマスの整合フィルタ処理を二次元周波数領域において同時に行う手法を考案した。こうした圧縮処理に加え、ハードウェアの特性に起因する種々の推定処理を組み込んだ包括的な画像化アルゴリズムとして、準モノスタティックアルゴリズムをまとめている。

本研究では数値シミュレーションに加え、GPS 測位信号を擬似的に生成する事ができる GPS シミュレータを用いて、提案手法の妥当性を検証した。結果的に、構築した理論から導き出される空間分解能や信号対雑音電力比が実現される事を示す事ができた。また、本研究で取り組んだ課題の一つである航法メッセージの除去についても、上記の検証においてその妥当性を確認する事ができた。GPS 衛星が持つ低レートデータ変調信号である航法メッセージは受信信号のドップラ帯域に影響を及ぼす事から、GPS 散乱波を用いた合成開口レーダにおいては除去すべき効果と言えるのである。

こうした検証結果を受け、小型無人飛行機を用いた屋外実験を実施し、実際の散乱信号を用いて提案手法の実用性について評価した。この実験の解析では、運動擾乱や飛行高度変化の補正といったより実際的な信号処理を加味している。こうして得られた複素強度画像を評価する事で、提案手法が実用性を兼ね備えていると主張するに足る成果を得る事に成功した。このように理論と現実を本論文内で明確に結び付けられた点は先行研究に対する大きな飛躍であると言える。