

外 99-30

早稲田大学審査学位論文(博士)の要旨
2982
早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

合成開口レーダの画像再生処理
に関する研究
(Studies on image reconstruction processing
for synthetic aperture radar)

申 請 者

岩 本 雅 史

Masafumi Iwamoto

1999 年 12 月

レーダは、電磁波を空間に放射して目標からの反射を受信し、その遅延時間を計測することによって、目標までの距離を測定するセンサである。指向性を持つアンテナを回転させながら観測を繰返すことにより、アンテナを原点とした極座標上に、目標の分布図を得ることができて、航空管制や気象観測などの用途に広く用いられている。

特に、距離と角度の分解能を向上して、遠方の地形や目標の形状を観測するものは画像レーダと呼ばれる。距離分解能は送信パルス幅を短く、あるいは広帯域化してパルス圧縮することで向上できるが、角度分解能はアンテナの主ビーム幅で制限されるため、これを向上するためには開口径の大きなアンテナを使用する必要がある。しかし、設置スペースおよび搭載重量に制限のある航空機や衛星において、大開口アンテナを実現するのは困難である。

そこで、アンテナと目標の相対位置の時間変化を利用して、空間に等価的に大口径のアンテナを展開することにより角度分解能を向上する合成開口レーダが開発された。合成開口レーダは小さなアンテナで高い角度分解能を実現できるので、地球を周回する衛星から地表面を数メートルの分解能で観測する画像レーダなどに採用されている。このような画像レーダは、光学センサとは異なり地球全域を天候や日照条件に関わりなく観測できるため、環境や災害の監視、資源探査、あるいは安全保障の目的で社会的なニーズがある。

合成開口レーダでは、受信機の出力にはいわゆるホログラムが得られ、そのままでは画像として利用できない。そこで、ホログラムから画像を再生する処理が必要である。画像再生処理は、アンテナと点反射源の相対位置により決まる受信信号の位相変化を、マッチトフィルタを用いて補償することで目標の像を再生するので、アンテナと点反射源の相対位置は既知でなければならない。このレーダで、例えば飛行中の航空機のような移動目標を観測すると、目標の動きに伴う受信信号の位相変化が画像の分解能を劣化させる。そこで、不要な位相変動を受信信号から除去する必要があるため、これを自動的に実現する技術の開発が必要である。

また、合成開口レーダを洋上の監視に用いる場合、衛星軌道から海面の広い範囲を一度に観測することが求められる。これを実現する方法として、アンテナを高速に走査するスキャン型合成開口レーダが考案されているが、このレーダでは、通常の合成開口レーダに比べ、アンテナのサイドローブで拾った受信信号が再生画像に偽像が生じるので、これを抑圧する方法が求められている。

画像再生処理で得られるレーダ画像は複素画像であり、その位相はレーダと観測目標との距離情報を含むことから、近接した二つの位置から同一の目標を観測した二枚のレーダ画像の位相差を求めることにより、目標の高度情報を抽出できることが知られている。そこで合成開口レーダは地形の三次元像を得る装置として、測量の省力化・迅速化の面からも期待されている。しかし、ここで得られた高度は位相の折り返しに起因するあいまいさを含んでおり、これを抑圧する処理の自動化が難

しく、同レーダの実用化を阻んでいる。

同様に、近接した二つの時刻において等しい位置から同一の目標を観測した二枚のレーダ画像の位相差を求めることにより、走行中の車両のような低速移動目標を、背景である地表面から分離して検出する方法がある。このレーダは交通監視や安全保障の用途で期待されているが、特に前方を観測した場合に目標の検出性能が低下する問題があって、改善が求められている。

本研究は、合成開口レーダの高性能化を目的として、同レーダが抱えるこれらの諸問題に実用的な解決法を提供するために行ったものである。第2章では、移動目標の画像を自動的に得るための信号処理技術について述べる。第3章では、地表面の画像を広域にわたって再生する技術について述べる。第4章では、レーダ画像から地表面の三次元像を自動的に生成する技術について述べる。第5章では、レーダ画像における低速移動目標の検出技術について述べる。以下、各章の概要を示す。

2. 移動目標のレーダ画像再成法

航空機や船舶などの移動目標を観測し、その姿勢変化で生じるドップラー効果を利用して高分解能画像を得るレーダは逆合成開口レーダと呼ばれる。このレーダでは目標が加速すると受信信号が周波数変調されて分解能が低下するので、これを防止するために受信信号の位相を補償する必要がある。しかし、一般に目標の運動は予測できないので、受信信号から何らかの評価指標を得て補償量を決定する必要がある。このように受信信号から補償量を求めて画像の分解能を改善する手法は、一般にオートフォーカスと呼ばれる。従来の合成開口レーダでも、プラットフォームの動揺で生じる受信信号の周波数変調を補償するために、画像の最大輝度を評価指標とするものがあるが、ここでは新たに画像のエントロピーを利用することを提案し比較した。計算機シミュレーションにより評価したところ、この手法は、補償に失敗する確率を従来手法と同等、ないし約1/100に減少できることが示され、逆合成開口レーダでは、画像の最大輝度よりもエントロピーをオートフォーカスの評価指標とする方がよいことが分かった。

3. レーダ画像の広域再生法

洋上の船舶の監視などの用途では、数百キロメートルの広い範囲を一度に観測する必要がある。そこで、アンテナの指向方向をエレベーション方向に順次切り換えながら観測を行うことにより、広い領域にわたって画像を再生するための合成開口レーダ方式であるスキャン型合成開口レーダが開発されている。しかしこのレーダでは、アンテナのサイドローブで拾った受信信号がS/A比 (Signal to Ambiguity Ratio) を劣化させて、再生画像に偽像を生じる問題があった。

本章では、スキャン型合成開口レーダのS/A比が画像の位置によって変化する性質に着目し、特にS/A比の劣化の大きな領域の性能を改善することによって、偽像

の発生を抑圧するアルゴリズムを提案した。また、この方法によるスキャン型合成開口レーダの画像を計算機シミュレーションし、その効果を評価した。

4. レーダ画像を用いた高度情報の抽出法

航空機や衛星などに搭載されたレーダにおいて、異なる軌道から同一領域の二枚のレーダ画像を収集して、その位相差から目標領域の三次元像を再生する方式は干渉型合成開口レーダと呼ばれている。画像の位相差と目標の高度の間には一定の関係が成立するので、位相差の分布から高度情報を抽出することができる。しかし、計測される位相差は 2π ラジアンで折り返した値であるので、これを開く(Unwrap)操作が必要であり、この位相アンラップアルゴリズムの性能が測定精度を左右する。代表的なアルゴリズムとしてZebkerが提案するBranch Cut法があり、この方法ではResidueと呼ばれる複素SAR画像上の特異点を検出して、その組み合わせ問題を解く必要がある。

本章では、組み合わせたResidueを結ぶ線分の長さの総和を規範として、逐次的に組み合わせを改善し、準最適解を求める位相アンラップアルゴリズムを開発した。さらに、このアルゴリズムを用いて観測衛星ERS-1(European Remote Sensing Satellite-1)の画像から三次元地形図を求め、DEM(Digital Elevation Model)を用いて評価した。この結果、測高誤差の標準偏差は約30mで、DEMの精度とほぼ一致することを確認した。

5. レーダ画像における移動目標の検出法

レーダでは、ドップラー周波数の差に基づいて、移動目標のエコーを地表や海面のエコー(クラッター)から弁別する方法が利用されている。しかし、航空機や衛星などの移動体に搭載された合成開口レーダで地表や海面の移動目標を観測すると、移動目標のエコーは地表や海面のクラッターのドップラースペクトルと重なるため、特に低速移動目標の検出は困難である。そこで、複数の開口を備えたアンテナやモノパルスアンテナを用いて、空間上の等しい位置から異なる時刻に二枚のレーダ画像を観測して、その位相差に基づいてクラッターを抑圧して移動目標を検出する方法が考案されている。

本章では、従来のこの方法のクラッター抑圧性能が観測方位によって大きく劣化する場合があることを明らかにした。また、受信信号の位相補償処理を導入することでクラッター抑圧性能を確保する方法について述べた。数値計算により本方法の性能を評価し、クラッター抑圧性能を従来に比べて10dB以上改善できることを示した。