

## 合成開口レーダの効率的像再生法に関する研究

### 学位論文内容の要旨

本論文では、リモートセンシング手法の一つである合成開口レーダ（以下、SAR と略する）のための像再生法について検討を行い、効率的に像再生を行うための方法について考察している。

SAR は高分解能のレーダとして航空機や人工衛星に搭載されており、地表観測、海洋観測、資源探査、惑星探査など、様々な分野に利用されている。SAR の受信信号は地上像の一種のホログラムと考えることができ、従って、像再生は初期においては光学処理により行われていた。ところが、光学系のもつ処理の再現性や融通性などの問題点からデジタル処理による像再生が盛んに行われるようになり、現在ではほとんどすべてのシステムでデジタル処理が採用されている。

デジタル処理による SAR 像再生アルゴリズムとしては、米国の C.Wu らによって提案された相関法が広く用いられている。これは、二次元信号である SAR 受信信号に対して、二回の一次元処理（その方向によって、レンジ圧縮、アジマス圧縮と呼ばれている）を行うことにより像再生を行うものである。この方法は処理が非常に簡単であるという利点を持つ反面、二つの欠点がある。その一つは、受信信号のデータ量が膨大であるため、像再生に非常に時間がかかるということであり、もう一つは、地上像の統計的性質を考慮していないため、像の再生精度が必ずしも良くはないということである。この二つの欠点は互いに相反するため、同時にこれらを克服するのは困難である。すなわち、像の再生精度を高めるためにはより多くの計算を必要とするし、逆に高速に像再生を行えば像の再生精度は低下する。

SAR の再生像を利用する分野は多岐に渡っており、その使用目的により像再生アルゴリズムに対する要求も様々である。例えば、津波などの災害の観測といった緊急性を要する分野に利用する場合には、できるだけ高速な像再生法が必要とされる。また、惑星探査のような用途では、像再生に多少時間がかかっても正確な像再生を行った方が良い。このように、いろいろな要求のもとで SAR の像再生を効率的に行うためには、複数の像再生法を用意しておき、再生像の使用目的に応じてそれらのうちから要求に適合する方法を選択したり、いくつかの方法を組み合わせる使用するのが適当であると考えられる。

本論文ではこのような考えに基づき、三つの新しい SAR 像再生法を提案している。二つは相関法に比べて再生像の精度が高いが、処理時間が長いもので、残りの一つは相関法よりも短い時間で像再生が可能であるが、再生像の精度は低いものである。こ

これらの方法のアルゴリズムを説明した後、計算機による像再生シミュレーションによってそれぞれの方法の再生像の精度、像再生に必要な計算量を示した。また、新しい三つの像再生法の使用分野について説明し、それらを組み合わせる方法についても考察した。

さらに、SAR 受信信号の量子化法について検討し、従来用いられている線形量子化に比べて、発生する量子化雑音を大幅に減少させる新しい量子化法を提案している。この方法を用いれば、像再生に用いる方法によらずに像再生の精度を大きく向上させることができるので、これを提案する高速な像再生法と組み合わせることにより、さらに効率的な像再生が可能となる。

本論文は8章で構成されている。以下に、各章の内容の概略を述べる。

第1章では、緒論として本研究の背景及び目的、本論文の概要を述べた。

第2章では、SAR の原理を示した後、受信信号の定式化を行い、これを用いて従来の像再生法である相関法を説明した。また、本論文で行う像再生の計算機シミュレーションについて説明し、実際に相関法を用いて像再生を行った結果を示した。

第3章では、以降の章で用いられるカルマンフィルタ、ウェーブレット変換の基本を述べた。

第4章では、カルマンフィルタを用いた新しい像再生法を提案した。SAR 受信信号を地上像があるシステムによって劣化したものであるとみなすことにより、受信信号から地上像を復元するカルマンフィルタを設計した。さらに、フィルタ設計時に必要となる地上像の統計的パラメータの設定法を提案した。また、この方法で得られる再生像は、相関法による再生像よりも精度が高い反面、多くの演算を必要とするので、広い領域に対する像再生には適さないことを示した。

第5章では、相関法による像再生法にカルマンフィルタによる後処理を加えることにより、相関法のレンジ圧縮を改善する手法を提案した。この方法は、相関法に比べて第4章の方法ほどは再生像の精度は向上しないが、必要な演算量はそれほど増加しないので、広い領域に対する像再生にも適用可能であることを示した。

第6章では、高速で近似的な新しい像再生法を提案した。まず、ウェーブレット変換を用いて二つの離散系列の相互相関関数の近似値を高速に計算する方法を提案した後、それを相関法に適用した。この方法によると、相関法の約40分の1の計算時間で大まかな再生像を計算することができることを示した。

第7章では、新しいSAR 受信信号の量子化法を提案した。この方法で受信信号の量子化雑音を大幅に減少させることができることを示し、それが再生像の精度の向上につながることを説明した。また、実際に相関法及び第6章で提案した高速像再生法を用いた像再生の計算機実験を行い、再生像の精度を評価した。

第8章では、本論文の結論として各章の内容に関してあらためて概観するとともに、今後の課題について述べた。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	小川吉彦
副査	教授	伊藤精彦
副査	教授	北島秀夫
副査	教授	宮永喜一
副査	助教授	三木信弘

学位論文題名

## 合成開口レーダの効率的像再生法に関する研究

本論文は、合成開口レーダ（略して SAR）の高精度化あるいは高速化が可能な像再生手法を種々提案し、その有効性を計算機シミュレーションによって確認して、その成果をまとめたものである。

地表や海洋観測、資源探査、惑星探査など多方面にわたるリモートセンシング手法としての近年における SAR の役割は、益々重要性を帯びてきている。しかし現在、デジタル処理による SAR 像再生アルゴリズムとして一般に用いられている相関法は、膨大な受信信号データ量のために像再生に非常な時間が掛かることと、像再生精度が必ずしも良好ではないという二つの欠点を有している。両欠点は相反性があるため、同一システムで同時に解決することは難しい。しかし、近年の SAR の広範な用途を考えれば、より高精度な像再生を要求される場合と、緊急時などでのより高速な像再生を要求される場合も多い。このため、通常用途像再生、高精度像再生および高速像再生の三つを適応的に選択できる SAR システムが望ましい。

本論文ではこのようなシステム開発を目的として、三つの新しい SAR 像再生法を提案している。この中の二つは高精度像再生方に関するもので、残りの一つは高速像再生に関するものである。いずれの提案手法も計算機シミュレーションによって有効性を確認している。

第1章では、本論文の背景、意義と位置付け、本論文全体の構成について述べた。

第2章では、本論文の手法との比較のために、従来の像再生法である相関法について述べ、それによる像再生の計算機シミュレーションの結果を示した。

第3章では、新しい像再生手法に使われるカルマンフィルタとウェーブレット変換

に関する必要事項の概略を述べた。

第4章では、カルマンフィルタを用いた新しい像再生法を提案した。これは SAR 受信信号とは、本来の像が SAR システムを通過する際に劣化するものであるという考えに立脚したもので、フィルタ設計時に必要とされる統計的パラメータに対する感度は低く、常識的な値に固定してよいという好ましい結果を計算機シミュレーションで確認した。ただし、この手法は高精度像再生が実現できるが、演算時間が従来法よりも増加する。しかし、将来にストリックアレイ型大規模並列処理用の計算機ハードウェアが開発されれば、像再生のリアルタイム処理という夢の実現が可能であると結論した。

第5章では、従来の相関法による像再生にカルマンフィルタを使った後処理を加えて、レンジ圧縮を改善できる手法を提案した。従来の相関法に比べ高精度化は可能だが、前章の手法よりは劣る。しかし、必要な演算量は従来法に比べてそれほど増えないので、簡易法として有用であると結論した。

第6章は、ウェーブレット変換法を用いて、二つの離散系列の相互相関関数の近似値を高速に計算することを相関法に適用し、高速像再生を行う新しい手法を提案した。この手法は大まかな像再生でよければ、従来法の40分の1程度の計算時間で済む超高速性をもつことを計算機シミュレーションで実証した。

第7章では新しい SAR 受信信号の量子化法を提案し、これにより受信信号の量子化雑音の大幅な減少を実現し、このため像再生精度が向上することを示した。また、前章の手法を用いての計算機シミュレーションにより、従来法に要するビット数よりも十分少ないビット数で、より以上の高精度化が行えることを実証した。

第8章では、本論文の結論を述べ、論文全体の成果を要約した。

これを要するに、著者は SAR 像再生法の新しい手法を各種提案し、従来の相関法に比べて高精度化あるいは高速化を実現し、さらにこれらが系統的に従来法と組み合わせて適応的に使用できる有用な手法であると結論したものであり、宇宙・航行エレクトロニクスおよび画像処理工学の分野に貢献するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。