SAR スペックルノイズ低減化に関する一手法

A Method of Speckle Noise Reduction for SAR Data

若林 裕之*, 新井 康平**

Hiroyuki Wakabayashi and Kohei Arai

Abstract: Synthetic Aperture Radar (SAR) is a high resolution microwave sensor, but its processed data has potential noise called “speckle noise” which degrades image quality. This noise is conspicuous when the data is processed in small number of looks.

In this paper, a new method for speckle reduction, CST filter, is proposed. Using a characteristics that a distribution of observed SAR data can be estimated by theoretical probability density function (pdf), this method determines whether the target pixel is a member of homogeneous target or not, then apply noise reduction only to the pixel which is a member of homogeneous target. This technique can be applied to the data processed in any number of looks.

The proposed method as well as five major existing methods are applied to the simulated SAR data and the JERS-1/SAR data. By comparing all filtered images, it was confirmed that the proposed method has better ability for reproduction of homogeneous targets. Although the proposed method does not use any templates to preserve structured targets, it showed almost same performance to preserve edge and point targets as the other structure preservation filters.

1. はじめに

1978年に短期間運用された SEASAT は、地球観測衛星に搭載された合成開口レーダ(SAR)が有効に全天候観測を行うことが可能であることを証明した。1990年代に入ってから、ヨーロッパ宇宙機関(ESA)が ESA リモートセンシング衛星1号(ERS-1)を、また、宇宙開発事業団(NASDA)が地球資源衛星1号(JERS-1)を相次いで打上げ、さらにカナダも RADARSAT を打上げ予定であり、SAR データによる地球観測が本格的に行われる時代が到来した。現在までに、SAR データを物理量である後方散乱係数に結び付けるデータ校正に関する研究も各機関で活発に行われていて、雲の有無に関係なく高分解能観測できる SAR データの、海洋現象の観測、海氷の観測、森林観測及び資源探査

等への応用が期待されている。

しかし、SAR は干渉型アクティブマイクロ波センサであり、高分解能ではあるが、分布ターゲットを観測する際に、分解能セル内に多数の散乱体がランダムに存在することによって生じるフェーディング現象によって、スペックルノイズが発生する¹⁾。実際に、SAR データを使用して分類を行うと、このノイズが対象物の構造及びテクスチャーを破壊し、分類精度を低下させてしまう。

スペックルノイズを低減化する試みは、1970年代から活発に行われ、数多くの手法が提案されている。スペックルノイズの除去は、大きく分類して2種類の方法がある。1種類は SAR の画像を再生する際に行う方法で、マルチルック処理と呼ばれ、通常はアジマス圧縮を行う際に独立に再生した N 個のルックをインコヒーレントに加算する方法であり、一般的に $N=3$ 又は 4 が使用されている。もう1種類は画像再生後にフィルタリングを行う方法である。

本小文では、画像再生後のフィルタリング処理でスペックルノイズを低減化する手法として、SAR 画像再

* 宇宙開発事業団

** 佐賀大学理工学部

「写真測量とリモートセンシング」Vol. 34, No. 2, 1995

生時の処理パラメータ(マルチルック数等)が明確な場合には、SAR データのスペckルノイズ分布関数が理論的に求まることに着目し、新しい手法を提案する。理論的分布との比較に χ^2 検定を使用するため、本フィルタを χ^2 検定(CST:Chi-Square Test)フィルタと呼ぶ。このフィルタを SAR 疑似画像及び JERS-1/SAR 実画像に適用し、均質面、エッジ、点ターゲット及び一般的なターゲットの再生結果について、他の代表的なスペckルノイズ低減フィルタと比較評価を行う。

2. 代表的なスペckルノイズ低減化フィルタの特徴

既存のスペckルノイズ低減化手法についてそれぞれの特徴を記述する。ここでは、代表的な手法として、エッジ保存型 Lee フィルタ(Refined Lee filter, 以下「Lee フィルタ」)²⁾、シグマフィルタ^{3),4)}、ウェイティングフィルタ⁵⁾、Li の分散比を使用して計算窓サイズを可変にする方法⁶⁾(以下「Li フィルタ」)及び MAP(最大事後推定)フィルタを構造検出保存型に発展したフィルタ⁷⁾(以下「MAP フィルタ」)について説明する。

Lee フィルタは、基本的には計算窓内の中心ピクセルの最小2乗推定値を求める手法であり、計算窓内の分散値を使用してエッジ部分を検出するための閾値を設定し、エッジ部分と判断された場合には、エッジ方向を検出し、方向に応じて計算窓を分割するテンプレート処理を行うことによってエッジを保存している²⁾。しかし、この閾値は SAR データを処理する際には、画素値の大小に応じて設定値を変えなければならない、さらに、最適な設定値についても明確になっていない。

シグマフィルタは、計算窓内の中心ピクセルが分布の平均値となると仮定し、その値を中心にして設定された範囲(通常は $\pm 2\sigma$ を使用)に入る画素値のみを使用して平均値を算出するという手法であり、Lee フィルタ同様に市販の SAR 用データ解析ソフトウェアにも採用され、ノイズ除去に有効な方法として広く使用されている。しかし、ノイズの分布が正規分布に従うと仮定しているので、出力カウント値が反射電力に比例する場合はマルチルック数が10ルック以上、出力カウント値が反射電力の平方根に比例する場合は4ルック以上で処理されたデータでないと適用できないと考えられる⁸⁾。その条件に合致しない場合はノイズ分布が正規分布では近似できないほど偏ってしまうので、

処理後のデータの分布も偏ってしまうという問題が発生する⁹⁾。さらに、計算窓中の中心ピクセル値が正規分布の平均値をとると仮定して処理を行うために、中心ピクセル値が極端な値をとる場合には、隣接する4ピクセルの平均値をとるという処理を行っている。この処理を行うと、点ターゲットのデータは破壊されてしまう。

ウェイティングフィルタは、シグマフィルタを改良したものと考えられ、計算窓内の中心ピクセルの統計的分布を考慮して平均値を算出する画素値の範囲を決定し、平均値を計算する際に確率分布を考慮した重み付け平均を行う。しかし、均質面を処理した場合の処理後の分散は他の方法よりも大きくなってしまいう問題があり⁵⁾、さらに、シグマフィルタ同様に点ターゲットは保存できない。

上記3手法は計算窓サイズが固定であるが、Li フィルタは、計算窓内で分散比(ターゲット反射強度の分散と出力カウント値の分散の比)を計算し、その値の大小で平均値や中間値を計算する計算窓サイズを決定する手法である⁶⁾。しかし、分散比と計算窓サイズの関係設定が明確でなく、この設定の良否がノイズ低減に大きく影響する。さらに、分散比を計算する際に、ターゲット反射強度の平均値と出力カウント平均値が一致することが前提であり、それが成立しない場合は分散比の計算方法を修正しなければならない。

MAP フィルタは、基本的には計算窓内の中心ピクセルの MAP 値を局所統計量を使用して求める方法であるが、事前に計算窓内について均質面なのか構造物(エッジ、ライン、点ターゲット等)を含むのかを判定し、均質面の場合は計算窓の平均値を出力し、構造物又はテキスチャーを含む場合にはその度合いに応じて計算窓全体またはテンプレートで設定したサブウィンドウ内の MAP 値を出力する⁷⁾。事前に均質面か否かを判断することによって、エッジ等の構造物を保存することが可能であるが、構造物の種類及び方向に応じて数多くのテンプレートを用意しなければならない。

以上、種々のフィルタの特徴を記述した。初期のスペckルノイズ低減フィルタは全ピクセルに対し、固定計算窓サイズで同一の処理を行っていたが、エッジ等の構造物を保存する必要性から、フィルタ適用前に計算窓内が均質面か否かの判断を行い、計算窓サイズを変化させるかテンプレートで設定したサブウィンドウを使用するという方向に移行してきている。従って、

均質面を判断する手法及び構造物を保存する計算窓の設定方法が、今後のスペックルノイズ低減化手法の改良点となる。

3. 提案スペックルノイズ低減手法

本章では、均質面の判断基準及び計算窓の設定方法について、新しい手法を提案する。本手法は、SAR データが均質面を観測した際の理論的な分布を均質面の判断基準として採用し、均質面と判断されない場合には計算窓を小さくすることによって、よりサイズの小さい均質面に対応する。従って、サブウィンドウを設定する際に構造物及びその方向に応じたテンプレートを必要としないのが特徴である。

3.1で実際の SAR データとして、NASDA/地球観測センター(EOC)で処理した JERS-1/SAR データの特性を調べた上で、3.2において提案方式を説明する。

3.1 SAR スペックルノイズの分布

スペックルノイズの統計的性質についての文献^{(8),(9),(10)}を参考にして実際のスペックルノイズの分布を調査する。NASDA/EOC で処理を行っている SAR の標準成果品は、3ルック処理で、出力カウント値は SAR で観測された反射電力の平方根に比例する。

スペックルノイズは乗法的にかかるノイズと考えられ、分布ターゲットを観測した時の SAR データの出力カウント値 g は以下のように表現される。

$$g = f \cdot n \quad (1)$$

ここに、 f は対象物の後方散乱係数に依存する値(以下「ターゲット反射強度」)、 n はスペックルノイズを示す。均質面の場合は f は一定値と考えられるので、出力カウント値の確率密度関数(pdf)はスペックルノイズの分布と同様となる。 f と n はお互いに独立と考えられるので出力カウント値の平均は次式となる。

$$\overline{g} = \overline{f} \cdot \overline{n} \quad (2)$$

出力カウント値が反射電力の平方根に比例する場合、マルチルック数 N で処理された時の n の pdf は次式で与えられる⁽¹⁰⁾。

$$p(n) = \frac{2n^{2N-1}N^N e^{-Nn^2}}{\Gamma(N)} \quad (3)$$

ここに $\Gamma(N)$ はガンマ関数を表す。(3)から n の平均値 σ_n 及び標準偏差 σ_n は以下のようになる。

図1 均質面ターゲット(アマゾン熱帯雨林)に対する SAR データ分布と理論的分布の比較

$$\frac{1}{n} = \frac{\Gamma(N + \frac{1}{2})}{N^{\frac{1}{2}} \Gamma(N)} \quad (4)$$

$$\sigma_n = \sqrt{1 - \frac{1}{N}} \quad (5)$$

式(4)から、スペックルノイズ平均値はマルチルック数 N の関数であり、 N が大きくなるほど1に近づく。また、式(2)から、出力カウント平均値はターゲット反射強度平均値と異なる値となり、マルチルック数が小さいほどその差は顕著である。なお、出力カウント値が反射電力に比例する場合は、スペックルノイズの平均値が1となるために、出力カウント平均値はターゲット反射強度平均値と一致する。

図1に EOC で処理した JERS-1/SAR 画像中の分布ターゲットのヒストグラムとマルチルック数3から計算された理論的な pdf の比較結果を示す。調査したターゲットは、一般的に L バンド及び C バンドにおいて均質面ターゲットとみなすことができ、SAR システムのアンテナエレベーションパターンの推定にも使用されている^{(11),(12)}ブラジルの熱帯雨林(1993年2月24日取得, Path415/Row301)である。ヒストグラムをとった領域サイズは512×512ピクセルで、領域内の出力カウント平均値(1091)を使用して正規化したものである。図1から、均質面を観測した時の出力カウント値の分布は理論的な pdf とほぼ一致することがわかる。細かな分布の違いは、実際の処理ルック数(有効ルック数)が2.15⁽¹³⁾と3より小さいためと考えられる。

3.2 提案するスペックルノイズ低減化手法(CST フィルタ)

3.1より、低減化をする SAR データの処理ルック数 N が既知であれば、SAR が均質面を観測した際の出力カウント値の pdf が推定できることがわかった。この推定された理論的な pdf を均質面か否かを判断する基準として使用するスペックルノイズを低減化する手法を提案する。

以下に提案手法の手順を示す。

- SAR 画像中の対象ピクセルを中心にした計算窓を設定する。
- 計算窓中のデータのヒストグラム及び平均値を計算する。この時に求められた i 番目の区間の度数 f_i とする。
- SAR データの処理ルック数から理論的な pdf を式 (3) を使用して計算し、(b) で求めた平均値を使用して理論的なヒストグラムを算出する。この時に求められた i 番目の区間の度数を F_i とする。
- f_i 及び F_i を使用して、 χ^2 検定に基づく類似性のテストを行う。まず、次式に従い χ^2 の値を計算する。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(f_i - F_i)^2}{f_i + F_i} \quad (6)$$

ここに K はヒストグラムの全区間数を示す。次に、 χ^2 の値をもとに2つの分布の類似性を示す確率を次式から計算する¹⁴⁾。

$$Q(\chi^2 \leq T_\alpha | n) = \int_0^{T_\alpha} \frac{1}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right) 2^{\frac{n}{2}}} x^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}} dx \quad (7)$$

ここに、 n は自由度、 T_α は計算される確率が信頼率 $\alpha\%$ に等しくなる時の積分上限を示す。 χ^2 が T_α 以下の場合、「2つの分布関数は信頼率 $\alpha\%$ で異なる」ということができる¹⁴⁾。なお、プログラム上では、あらかじめ閾値を設定しておき、(7) で計算される値が閾値に達している場合は、対象ピクセルが均質面の一部として見なすことができると判断する。

(e) (d) の結果で対象ピクセルが均質面の一部として判断された場合は

$$\bar{f} = \frac{\bar{g}}{n} \quad (8)$$

からターゲット反射強度を計算し、対象ピクセルの値を置き換える。均質面の一部として判断されなかった場合は計算窓の大きさを小さくして (b) から (e) を繰

図2 提案するスペックルノイズ低減化手法(CST フィルタ)の手順

り返す。なお、計算窓の大きさが 1×1 になった場合は、対象ピクセルは点ターゲット(孤立点)と見なし、元の値を保存する。

以上の手順を図2にまとめる。本手法は SAR データの特性を十分に考慮したものであり、対象ピクセルが均質面の一部の場合は、出力カウント平均値及びスペックルノイズ平均値を使用して、対象ピクセル値を(8)式で計算される値で置き換え、均質面以外の場合は、極力元の値を保存するような操作を行うと期待される。

4. スペックルノイズ低減化手法の評価

本章では、3章で提案した手法を各種データに適用し、適用結果について他の手法と比較を行う。以下の解析において提案手法を使用する場合は、初期計算窓の大きさを 7×7 ピクセルとし、均質面として判断する

閾値は97%として議論する。また、比較するフィルタの条件をそろえるために、他フィルタの計算窓サイズは7×7に設定した。Lee フィルタのエッジ検出閾値は分散理論値を使用し、Li フィルタの分散比と計算窓サイズの関係は、分散比0.1以下が7×7、0.3以下が5×5、0.5以下が3×3、0.5より大きい場合に1×1を使用した。MAP フィルタについては、テンプレートを用意し、均質面の判断基準 C_{Fmax} として累積確率95%の値、エッジ、ライン及び孤立点の判断基準として $rE_{max}=0.9$ 、 $rL_{max}=0.9$ 、 $rI_{min}=0.8^7$ を使用した。

4.1 均質面ターゲット

ここでは均質面の SAR 疑似データを作成し、そのデータに対して各手法を適用することによって比較を行った。まず、画像サイズ256×256ピクセルでターゲット反射強度1000一定の画像を作成し、EOCの処理と同等なマルチルック数3の、式(3)に示す pdf に基づく乱数を発生させて SAR 疑似画像を作成した。この SAR 疑

図3 SAR 疑似画像(均質面)に対する代表的フィルタ適用画像のヒストグラムの比較

似画像に各種フィルタを適用し、フィルタ処理後の評価を行った。

表1に各画像のカウント値の平均及び標準偏差を示し、図3に代表的なフィルタ処理画像のヒストグラムを示す。SAR 疑似画像の平均値及び標準偏差は式(4)及び(5)から計算される値とほぼ一致しているので各フィルタへの入力画像として問題ないと考えられる。

各処理結果を比較すると、処理後の平均値が元のターゲット反射強度1000に一番近いのは、CST フィルタであり、ついで Lee フィルタ、MAP フィルタと続く。他のフィルタは平均値の補正効果がなく、特にシグマフィルタ処理後の分布は偏ってしまい平均値が最も変化する。これは、ノイズの分布を正規分布と仮定していることに起因すると考えられ、マルチルック数が小さいほどこの傾向が顕著になると予想される。また、ウェイトイングフィルタは処理後の分散が他フィルタと比較すると大きいことが確認できる。

以上、フィルタ処理後の平均値、標準偏差及びヒストグラムから、CST フィルタの均質面ターゲットの再現性に関する優位性が確認できた。また、Lee フィルタ及び MAP フィルタも、スペckルノイズによる反射強度の平均値変化を補正する効果があることが確認された。

4.2 エッジを含むターゲット

各手法のエッジ付近におけるふるまいを確認するために、エッジを含むターゲットの疑似データを作成した。ターゲット反射強度画像として左半分が高レベル(1100,1200,1300の3種類)で右半分が低レベル(1000)の256×256ピクセルの画像を作成し、4.1同様に疑似ノイズを付加した。

CST フィルタでは、計算窓のサイズが小さくなる

表1 SAR 疑似画像(均質面)と各フィルタ適用画像の平均値及び標準偏差の比較

	Simulated SAR	Lee	Sigma	Weighting	Li	MAP	CST
Mean	957.2	993.9	904.1	963.8	956.8	985.7	996.1
Standard deviation	282.5	83.6	118.9	168.4	39.1	54.6	68.3

図4 エッジ領域(画素番号128と129の間)近傍において、最終計算窓サイズが 3×3 以下の場合のライン方向の累積個数

と、統計的な分布の違いが見えなくなることが懸念されたので、計算窓中に異なるターゲットが含まれてくるエッジ付近において、CST フィルタの最終的な計算窓サイズを計測した。図4は、エッジ付近において最終的な計算窓サイズを数え、 3×3 以下になった場合について、ライン方向の各計算窓の個数を累積した結果である。CST フィルタが正常に動作していれば、エッジ付近は均質面として判断されずに、計算窓サイズが小さくなる傾向になり、特にエッジ(ピクセル番号128と129)では 3×3 以下の計算窓が増加することが予想される。図4から、高低レベルのコントラストが大きくなるほど、エッジにおける 3×3 以下の計算窓サイズが増加していることから、CST フィルタはエッジ付近で予想通り動作していると確認できる。

定量的にエッジ保存特性を評価するための直接的な方法として、各フィルタ適用後画像とターゲット反射強度画像の差の絶対値画像を作成し、差画像の256ライン分の横方向プロファイルを平均した。この差画像平均プロファイルはエッジ付近においてピークとなり、エッジが保存されない場合には、ピークの広がりが大きくなると予想される。図5にコントラストが1200/1000の場合のエッジ付近におけるフィルタの比較を示す。図5からエッジ部分におけるレベル差はCST, MAP, Lee, Li, シグマ, ウェイティングの順で大きくなることがわかり、CST フィルタがエッジ部分のカウント値再現に優れていることがわかる。また、エッジのなまり具合を表す、図5におけるピークの広がりについても、CST フィルタはエッジ保存型のフィルタである Lee 及び MAP フィルタと同等であった。以上より、CST フィルタはエッジ部分の再現性に優れ、エッ

図5 フィルタ適用後画像とターゲット反射強度画像の差(絶対値)のエッジ付近における平均プロファイル

ジのなまり具合についてもテンプレートを使用する他のエッジ保存型フィルタ(Lee, MAP)と同等であると結論づけられる。

4.3 点ターゲット

エッジ以外の構造を持つターゲットとして、点ターゲットについて評価を行う。SAR データの校正に使用しているコーナリフレクタ(CR)からの後方散乱は点ターゲットとして扱うことができるので、JERS-1/SAR 実画像中の CR データを使用して本評価を行う。評価に使用したデータは1993年5月24日に取得した新潟周辺のデータである。新潟は SAR 校正テストサイトとして使用され、7箇所の CR 設置場所が設定されている。Path66/Row237の画像上では5つの CR が確認できた。

スペックルノイズ低減化処理前後で CR の点像応答がどのように変化するかを、CEOS の SAR CAL/VAL グループが使用している距離分解能評価手法に基づいて評価した¹³⁾。原画像と各種フィルタを適用した画像の両方から5つの CR 周辺のデータを切出し、平均距離分解能及び平均ピークレベルを算出した結果を表2に示す。表2において、平均距離分解能は5つの CR から算出したアジマス及びレンジ方向の距離分解能を平均したものであり、平均ピークレベルは5つの CR のピークレベルの平均値を原画像を1として相対的に表現したものである。表から、CST フィルタは点ターゲットに対して、均質面とは判断せずに、より小さい計算窓を使用することによってピーク値の低下を押さえていることが確認できた。また、Li フィルタ及び MAP フィルタは点ターゲットをほぼ保存でき、シグ

表2 オリジナル SAR 画像と各フィルタ適用画像中の CR から導出した距離分解能及びピークレベル値の比較

	Original	Lee	Sigma	Weighting	Li	MAP	CST
Average Resolution (m)	22.1	21.8	22.8	28.2	22.1	22.1	21.3
Average Peak Level (Relative)	1	0.83	0.42	0.41	1	1	0.98

マ及びウェイトリングフィルタはピーク値の低下が顕著であることが確認できた。

4.4 一般的ターゲット

JERS-1/SAR の一般的なターゲットからのデータについて同様の比較を行う。使用したデータは1992年4月23日取得の Path65/Row242 の沼津の市街地を含むデータであり、海岸線、市街地、田畑、森林等を含む図6に示す領域について、500×500ピクセル程度を切

出した。切り出した画像に各種フィルタを適用した結果を図7に示す。

原画像に比較すると、各種手法ともにスペックルノイズの低減効果が確認でき、以下の項目が確認できる。(1)一般に一様分布ターゲットと考えられる部分(田畑、森林、海等)は、原画像に比較して、ごま塩状のノイズ(スペックルノイズ)が低減されていることが確認できる。特に海岸線から沖にいくにつれて後方散乱係数が徐々に変化する部分で明確であるが、低減の度合いは手法によって微妙に異なり、6つの手法を比較すると、4.1の結論同様にウェイトリングフィルタはノイズの低減化の効果が小さいといえる。

(2)フィルタ後の画像においても、沼津港、鉄道(東海道本線)、道路(国道1号線等)、狩野川等が明確に判別でき、均質面でないエッジやライン等の構造物の保存性は各手法間で大きな差は目視では確認できない。沼津港の周辺(64×64ピクセル)において、カウント値800から200間隔でコンターマップ作成した結果を図8に示す。図から各手法の沼津港岸壁の再現状態が比較できるが、シグマフィルタ及びウェイトリングフィルタ以外については、西側岸壁の形状をある程度再現していることが確認できる。

5. 結論

SAR が均質面を観測した場合のデータの分布が理論的な分布に従うことに着目して、均質面か否かを χ^2 検定を使用して判断する新しい手法(CST フィルタ)を提案した。SAR 疑似画像及び JERS-1/SAR 実画像への適用結果から、従来の代表的なスペックルノイズ低減化手法と比較し、提案手法は均質面ターゲットの再現性及びエッジ部分のカウント値再現性に優れ、

図6 一般的ターゲット評価領域(沼津市)

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

図7 一般的ターゲットの画像比較：(a)オリジナル SAR 画像，(b)Lee フィルタ適用画像，(c)シグマフィルタ適用画像，(d)ウェイティングフィルタ適用画像，(e)Li フィルタ適用画像，(f)MAP フィルタ適用画像，(g)CST フィルタ適用画像

図8 沼津港付近(64×64ピクセル)のコンターマップ：(a)オリジナル SAR 画像，(b) Lee フィルタ適用画像，(c)シグマ フィルタ適用画像，(d)ウェイトングフィルタ適用画像，(e)Li フィルタ適用画像，(f)MAP フィルタ適用画像，(g) CST フィルタ適用画像

エッジのなまり具合及び点ターゲットの保存性についても、テンプレートを使用する構造物保存型フィルタと同等であることが確認できた。

提案手法は SAR 観測データの処理ルック数及び出力形式(出力カウント値が反射電力に比例するのか、反射電力の平方根に比例するのか)が既知であれば、出力カウント値の均質面に対する理論的分布が推定できるので、どんなルック数の処理データにも対応できる。また、構造物を保存するための特別なテンプレートをを用意する必要がない。さらに、フィルタの設定を客観的に設定でき、均質面を判断する閾値によってスペックルノイズの低減化度合いを変えることも可能である。

提案手法は均質面のスペックルノイズを低く抑さえ、構造物及びテクスチャー面を保存できると予想されるので、テクスチャーを使用した土地被覆分類を行う際の前処理として本手法を適用することによって、分類精度の向上が期待できる。従って、今後はこの手法を適用した画像を使用してテクスチャー分類等の解析を試みる予定である。

謝辞

最後に本研究を進めるにあたって、島田政信氏(宇宙開発事業団/地球観測センター)には SAR データ中の点ターゲットの評価手法についてご意見と貴重なデータをいただきました。記して感謝の意を表します。

(受付日1994.9.19, 受理日1995.3.13)

参考文献

- 1) Ulaby, F. T., R. K. Moore and A. K. Fung : Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume II : Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory, Artech House, Norwood, Massachusetts, 1982.
- 2) Lee, J. : Refined Filtering of Image Noise Using Local Statistics, Computer Graphics Image Processing, Vol. 15, pp. 380-389, 1981.
- 3) Lee, J. : Digital Image Smoothing and the Sigma Filter, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol. 24, pp. 255-269, 1983.
- 4) Lee, J. : Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images, Optical Engineering, Vol. 25, No. 5, pp. 636-643, 1986.
- 5) Martin, F. J. and R. W. Turner: SAR speckle reduction by weighted filtering, Int. J. Remote Sensing, Vol. 14, No. 9, pp. 1759-1774, 1993.
- 6) Li, C.: Two Adaptive Filters for Speckle Reduction in SAR Images by Using the Variance Ratio, Int. J. Remote Sensing, Vol. 9, No. 4, pp. 641-653, 1988.
- 7) Lopes, A., E. Nezry, R. Touzi and H. Laur : Structure detection and statistical adaptive filtering in SAR images, Int. J. Remote Sensing, Vol. 14, No. 9, pp. 1735-1758, 1993.
- 8) Leberl, F. W. : Radargrammetric Image Processing, Artech House, Norwood, Massachusetts, 1990.
- 9) Goodman, J. W.: Some fundamental properties of speckle, J. of the Optical Society of America, 66, pp. 1145-1150, 1976.
- 10) Ulaby, F. T., R. K. Moore and A. K. Fung : Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume III : From Theory to Applications, Artech House, Norwood, Massachusetts, 1986.
- 11) Moore, R. K. and M. Hemmat : Determination of the vertical pattern of the SIR-B antenna, Int. J. Remote Sensing, Vol. 9, No. 5, pp. 839-847, 1988.
- 12) 島田政信 : アマゾンの熱帯雨林を用いた JERS-1 SAR アンテナパターンの推定, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 13, No. 4, pp. 29-40, 1993.
- 13) 島田政信 : JERS-1 SAR 画像の絶対校正及び画質評価, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 14, No. 2, pp. 35-46, 1994.
- 14) Press, H. William, B. H. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling: Numerical Recipes in C, The art of scientific computing, Cambridge University Press, 1988.