

多偏波干渉SAR画像の相関解析

Coherency Analysis for Polarimetric and Interferometric SAR Image

有井 基文*

Motofumi Arii

近年、高機能化が進むSAR(Synthetic Aperture Radar)アプリケーションの一つとして、電磁波の偏波特性と干渉特性を利用した多偏波干渉SARと呼ばれる、植生地域のリモートセンシング技術が注目を集めている。

本稿では、多偏波干渉SAR観測技術について紹介すると共に、植生地域の相関情報を取得することを目的として新たに考案したフィルタについて述べる。さらに、偏波干渉SAR画像解析手法を導入するに当たって注意すべき点についても示す。

Synthetic Aperture Radar (SAR) has provided us high resolution image. Recently, Polarimetric SAR Interferometry (PolInSAR) is expected for next-generation SAR technology. The technology allows us to extract useful information like vegetation height, which has been considered difficult to observe by conventional SAR system.

In this paper, the PolInSAR observation technique is briefly introduced. Then a brand-new filter that enables us to achieve high coherency of vegetation area is discussed and verified. In addition to that, points to reminder with current analysis methods are also shown.

Keywords: SAR, Polarimetry, Interferometry, Coherency, Decorrelation

1. まえがき

光学画像に比べ、昼夜を問わず観測可能で雲の影響を受けないSAR画像は、資源探査や災害監視等様々な分野で利用されてきた。撮像地点の異なる2枚のSAR画像から電波干渉特性を利用してデジタル高度モデル(DEM)を得るインターフェロメトリ処理技術は、原理的には波長レベルといわれるその測定精度から、近年広く用いられている。一方、従来単偏波マイクロ波観測に不向きとされた植生地域は、多偏波観測に感度が高く、多偏波SARの植生類識別への応用も盛んに研究されている。

多偏波干渉SARは、これらの特徴を利用して植生の情報を高精度に取得しようという技術であり、例えば人工衛星搭載SARにより植物の高さを測定することで、グローバルにバイオマス量を測定するといったアプリケーションを期待されている。

本稿では、まず、多偏波干渉SAR観測について説明する。次に、近年、欧州を中心に多偏波干渉SAR解析の主流となりつつある相関最大化手法^①について、その効果を植生散乱モデルと実データに適用することで検証した結果を示す。さらに、上記手法を用いて新たに考案

したフィルタについて述べる。本フィルタは、相関を支配する4成分(時間、植生、SNR、及び基線長)のうち、時間に依存する相関劣化量を抽出するものである。本フィルタの評価にあたっては、相関マップ及び複素単位円上への相関プロットを導入して解析を実施した。なお、考察においては、今後多偏波干渉SAR技術を培う上で留意すべき点についても言及する。

2. 多偏波干渉SAR観測

はじめに、2種類のSAR観測技術について説明する。一つは、インターフェロメトリック(電波干渉)観測、もう一つは、ポラリメトリック(多偏波)観測である。図2.1に、インターフェロメトリック観測のジオメトリを示す。

インターフェロメトリック観測を実施するためには、同時、もしくは時間をおいて、二回同一地域を撮像する必要がある。同時に撮像できることが、後述する相関を考える上で望ましいが、衛星をプラットフォームとする場合は、コストや軌道制御における技術的難易度等の問題により、後者の同一プラットフォームで二回撮像する方法が主流である。いずれの方法にしても、図中の基線長と呼ばれる B と衛星間傾き角 α が作り出す視差により、

波長レベルでの干渉を生じさせることができ、高精度に高度情報を取得できる。

次に、ポラリメトリック観測について説明する。偏波は一般に楕円偏波として表されるが、その特殊な状態として、図2.2に示すように、H(水平)偏波とV(垂直)偏波が存在する。ここで重要なのは、偏波を記述する上で、直交成分となるHとVの組み合わせで観測された結果があれば、それらを基底として、どんな偏波でも表現することができるという点である。

これを踏まえた上で、ポラリメトリック観測を図2.3

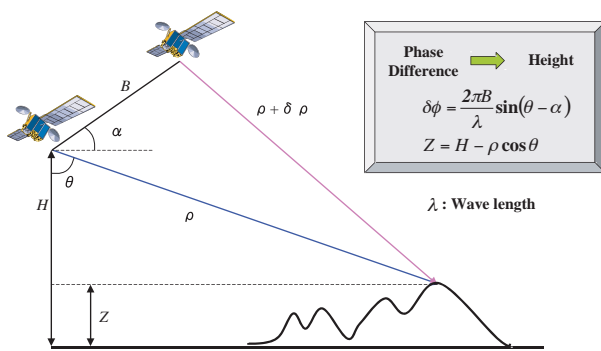


図2.1 インターフェロメトリック観測のジオメトリ

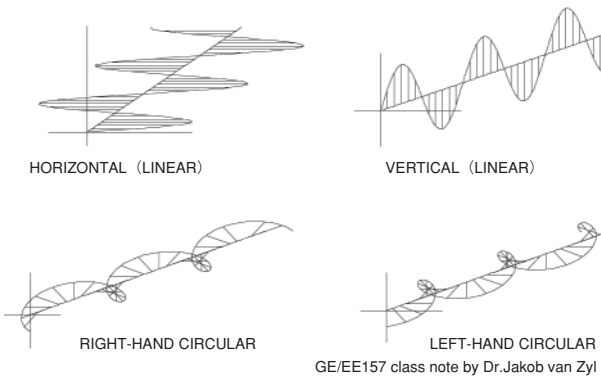


図2.2 各種偏波状態

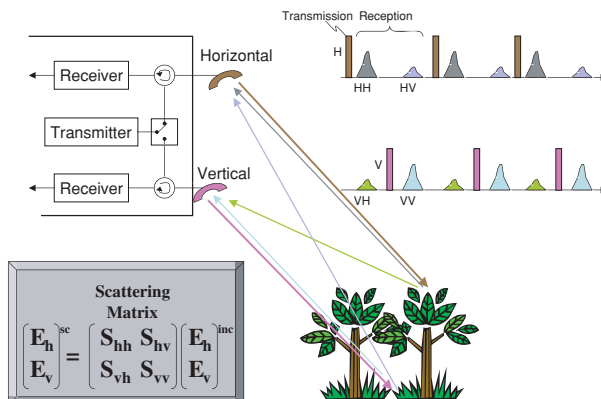


図2.3 ポラリメトリック観測

に示す。図中、左に衛星のアンテナの概略図と、右に観測時の送受信シーケンスを示す。この観測を行う目的は、左下の方程式が示す散乱行列(Scattering Matrix)を構成することである。なお、ここでは、“HV”とは、H(水平)偏波で送信し、V(垂直)偏波で受信することを意味する。ポラリメトリックSARのアプリケーションとしては、散乱体の偏波特性を推定して、受信電力を最適化し、コントラストを改善する処理⁽²⁾や、散乱行列からエントロピーを計算し、ターゲットの類識別を行う処理⁽³⁾等がある。

多偏波干渉観測を行う最大の利点は、単偏波では成しえなかった植生の類識別情報や植生高度の情報を取得できることである。図2.4に多偏波干渉SAR観測の様子を示す。図のように、インターフェロメトリック観測に必要な複数回の観測を実施する上で、毎回ポラリメトリック観測を行うものである。

3. 相関最大化アルゴリズム

同一地域を観測した二つの画像について、高い干渉性を保持するためには、画像間の類似度が高くなければならない。この類似度を、相関と呼ぶ。相関が高い地域としては、富士山頂付近や、グランドキャニオン等の裸地が挙げられる。また、一般に、河川や植生に覆われたエリアは、時系列な変化が大きいため相関が低い。

ここでは、まず、相関最大化アルゴリズムと呼ばれる2回の観測の相関を最大化する位相状態を推定する手法について述べる。その後、偏波特性と干渉特性を考慮した植生散乱の数学モデルを作成し、それに対して、本アルゴリズムがどう作用するかをシミュレーションした結果について述べる。さらに、実データへの適用結果についても示す。

3.1 アルゴリズム概要

1998年に、Shane R. Cloude博士らにより、Polar-

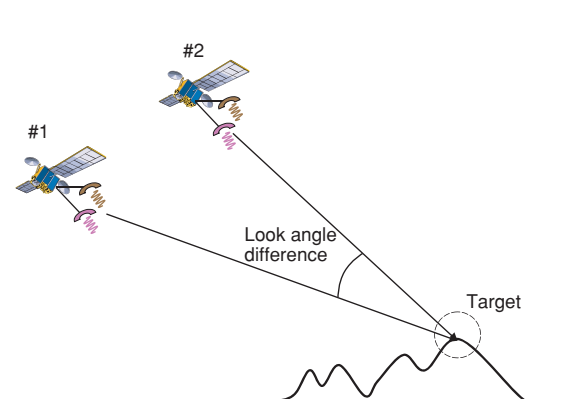


図2.4 多偏波干渉SAR観測

metric SAR Interferometryとして、多偏波干渉SARデータ解析に関する体系的理論⁽¹⁾が発表された。以下、図2.4の観測ジオメトリを用いて、本理論の骨子となる相関最大化アルゴリズムについて説明する。

アンテナ#1と#2は、共に、フルポラリメトリック観測が可能であり、これにより、次の散乱行列を得る。添え字1と2は、それぞれアンテナ#1と#2を示す。

$$S^1 = \begin{pmatrix} S_{hh}^1 & S_{vh}^1 \\ S_{hv}^1 & S_{vv}^1 \end{pmatrix} \quad S^2 = \begin{pmatrix} S_{hh}^2 & S_{vh}^2 \\ S_{hv}^2 & S_{vv}^2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

次に、これらを用いて、相関散乱行列を構成する。

$$[k_1] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} S_{hh}^1 + S_{vv}^1 & S_{vv}^1 - S_{hh}^1 & 2S_{hv}^1 \end{pmatrix}^T$$

$$[k_2] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} S_{hh}^2 + S_{vv}^2 & S_{vv}^2 - S_{hh}^2 & 2S_{hv}^2 \end{pmatrix}^T \quad (2)$$

さらに、次の3種類の共分散行列を算出する。

$$[T_{11}] = \langle k_1 \cdot k_1^{*T} \rangle$$

$$[T_{22}] = \langle k_2 \cdot k_2^{*T} \rangle$$

$$[\Omega_{12}] = \langle k_1 \cdot k_2^{*T} \rangle \quad (3)$$

ここで、 $[\Omega_{12}]$ は、特に重要である。なぜならば、 $[T_{11}]$ と $[T_{22}]$ は、共に同一アンテナの観測結果から求められているのに対して、 $[\Omega_{12}]$ は、異なるアンテナによる結果から得られ、インターフェロメトリック位相は、この共分散行列で決定されるためである。なお、文献(4)において、ポラリメトリック位相とインターフェロメトリック位相の関係について詳細が述べられている。

これにより、多偏波干渉相関を以下のように求めることができる。

$$\gamma = \frac{|w_1^{*T} [\Omega_{12}] w_2|}{\sqrt{\langle w_1^{*T} [T_{11}] w_1 \rangle \cdot \langle w_2^{*T} [T_{22}] w_2 \rangle}} \quad (4)$$

式中、 w_1 と w_2 ベクトルは、偏波変換行列であり、ラグランジュの未定乗数法を用いて相関が最大となるよう最適化を行う。

$$[T_{22}]^{-1} [\Omega_{12}]^T [T_{11}]^{-1} [\Omega_{12}] w_2 = \nu w_2$$

$$[T_{11}]^{-1} [\Omega_{12}] [T_{22}]^{-1} [\Omega_{12}]^T w_1 = \nu w_1 \quad (5)$$

ν は、固有値であり、最適化後の相関の二乗に相当する値である。偏波変換行列は、固有ベクトルに相当する。こうして得られたベクトル w_1 と w_2 から、インターフェロメトリック位相を計算できる。高度を計算したい場合は、図2.1中の関係式から求めることができる。

$$\phi = \arg(w_1^{*T} [\Omega_{12}] w_2) \quad (6)$$

3.2 シミュレーション

次に、植生の数学モデルについて述べる。

式(4)で述べた相関は、一般に次のように解釈できる⁽⁵⁾。

$$\gamma = \gamma_{Baseline} \gamma_{Volume} \gamma_{Temporal} \gamma_{SNR} \quad (7)$$

すなわち、基線長、植生、時間、及びSN比による4つの相関の積により表現される。そして、前述の相関最大化理論によると、基線長と植生による相関劣化を取り除くことができるものとされる⁽¹⁾。

よって、ここで述べる植生の数学モデルは、この2つの効果を表現できるものでなければならない。図2.4のTargetを拡大した図を、図3.2.1に示す。

ここでは、3層のレイヤー構造を想定する。最下部 z_G に地面が、その上に z_1 まで自由空間があり、最上部に厚さ z_1 の林冠が存在する。林冠部は、無数に存在する葉のモデルとしてランダムに傾いた双極子によって満たされていることを想定する。アンテナから送信された電波は、林冠部の最上位層から侵入し、減衰しながら、林冠内を伝播する。このとき、センサから一定距離内にある双極子から反射した電波と地面から反射した電波は、その総和としてアンテナにて受信される。

この様子を式で表すと次のようになる。

$$k_1 = \exp(i \cdot 2 \cdot R_1) k_G + \int_0^{z_1} \exp(i \cdot 2 \cdot R_1) k_{v1}(z) dz + \Delta k_1$$

$$k_2 = \exp(i \cdot 2 \cdot R_2) k_G + \int_0^{z_1} \exp(i \cdot 2 \cdot R_2) k_{v2}(z) dz + \Delta k_2 \quad (8)$$

本式は、地面、植生と観測誤差の3つの部分からなる。注目すべきは、積分記号で囲まれた植生部で、特に、 k_v は、先程述べた双極子の散乱を特徴付ける重要なパラメータであり、次のように表される。

$$k_v = a_P \cdot F(\theta_P, \alpha_P) \quad (9)$$

a_P は植生内部での電波強度の減衰率、 θ_P は双極子の傾き、及び α_P は双極子であることを特徴付けるパラメ

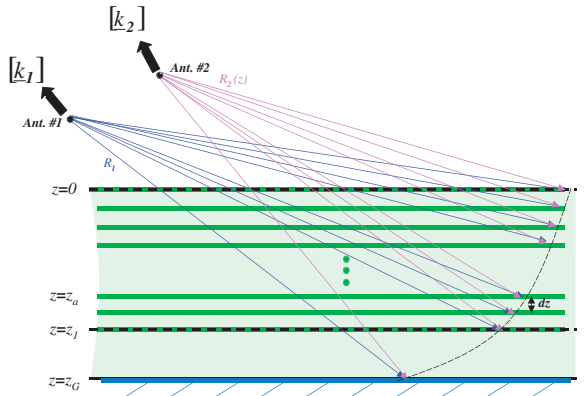


図3.2.1 Target拡大図

ータである。なお、双極子の傾きは、一様分布の確率変数である。式(9)で表現されるモデルを用いて、相関最大化アルゴリズムを適用した結果を図3.2.2に示す。

図では、横軸が図2.4中の視差(look angle difference)を表しており、縦軸が相関である。点線は、最適化を適用しなかった場合の相関を表しており、実線は、最大化された相関を表している。最大化を適用しない場合、視差の広がりによって、相関が劣化しているのがわかる。これは、モデルが基線長の相関劣化を表現できていることを意味する。また、相関に揺らぎが含まれており、植生の相関劣化を表現できていることを意味する。さらに、相関最大化後の相関は、視差が大きくなると、多少のブレがあるものの、ほとんど最高値(およそ1)を保持できている、良好に最適化されていることが確認できる。

ただ、この結果だけでは、得られた偏波変換ベクトルの妥当性を確認できないため、さらに散乱中心を任意に設定し、その高度を抽出するというシミュレーションを実施した。図3.2.3に、設定した高度パラメータを示す。

地面(図では山頂に対応)の高度を2m~約60mまで変化させ、それを抽出するシミュレーションを行う。また、減衰率も徐々に小さくなるよう

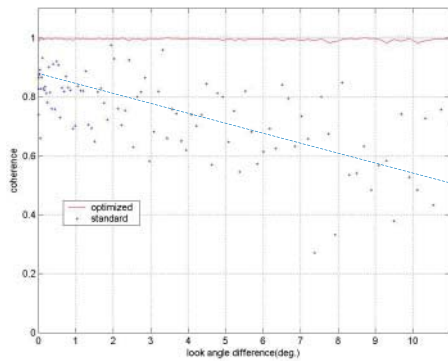


図3.2.2 相関最大化シミュレーション結果

に設定した。これにより、 a_p が大きい値を持つ場合、林冠部はノイズのように作用し散乱中心を推定することが困難になり、小さいと植生がない状態に近づき、容易に高度推定が行えることが予測できる。図3.2.4にその結果を示す。

図中、中央にある3本の右肩上がりの直線は、上から林冠上部、林冠下部、及び地面の高度に対応し、赤い円がモデルから検出された植生の高度に対応する。想定したとおり、減衰率が大きい時には値がばらついており、推定が困難であることがわかる。それに対し、減衰率が小さくなると地面の反射が支配的になるため、正確な高度推定がなされていることが確認できる。より実際に近い植生を模擬するため図3.2.5に示すように、さらにもう一つの散乱中心を林冠中に設定し、その高さを抽出できるかというシミュレーションを実施した。この新たな散乱中心は、林冠内に存在する太い枝等価である。

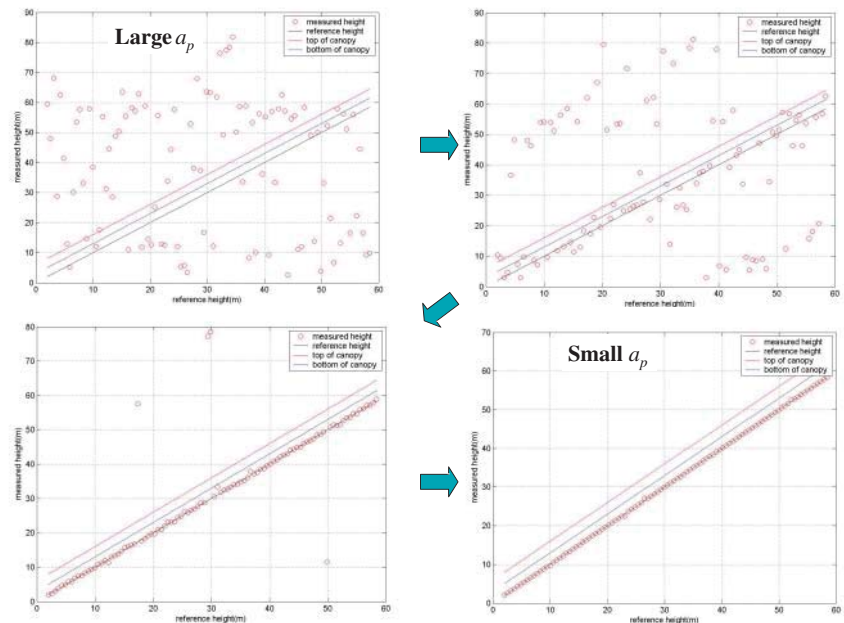


図3.2.4 散乱中心を地面に設定した場合のシミュレーション結果

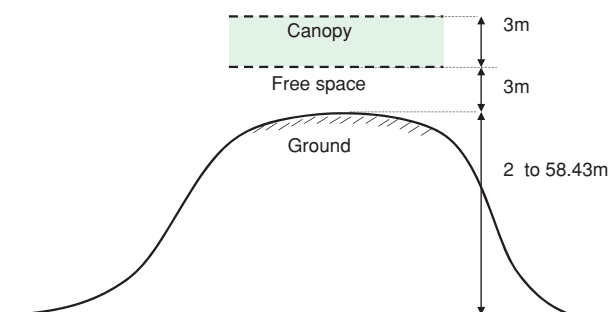


図3.2.3 設定した高度パラメータと林冠内部の電波減衰率

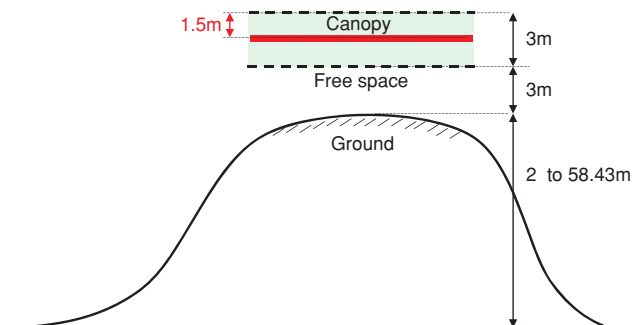


図3.2.5 散乱中心が地面と林冠内に存在するモデル

図3.2.6にシミュレーション結果を示す。
 ここでも、減衰率が高いとばらつきがあるが、小さ

くなるにつれて、設定した林冠内の散乱中心を推定することができているのがわかる。

本シミュレーションを通じ、相関最大化手法が、基線長と植生に起因する相関劣化について有効であることを確認できた。

3.3 実データによる評価

シミュレーションで確認した相関最大化アルゴリズムの効果について、本項では実データに適用することで検証する。なお、用いるデータは1994年10月の連続する2日間に渡ってスペースシャトル(SIR-C)にて取得された米国ノースカロライナ州のDuke Forestである。

図3.3.1に地域Aに対応する再生画像を示す。右上に、幾つかの強い散乱体があり、その配置より、人工構造物の密集地であることを確認できるが、こ

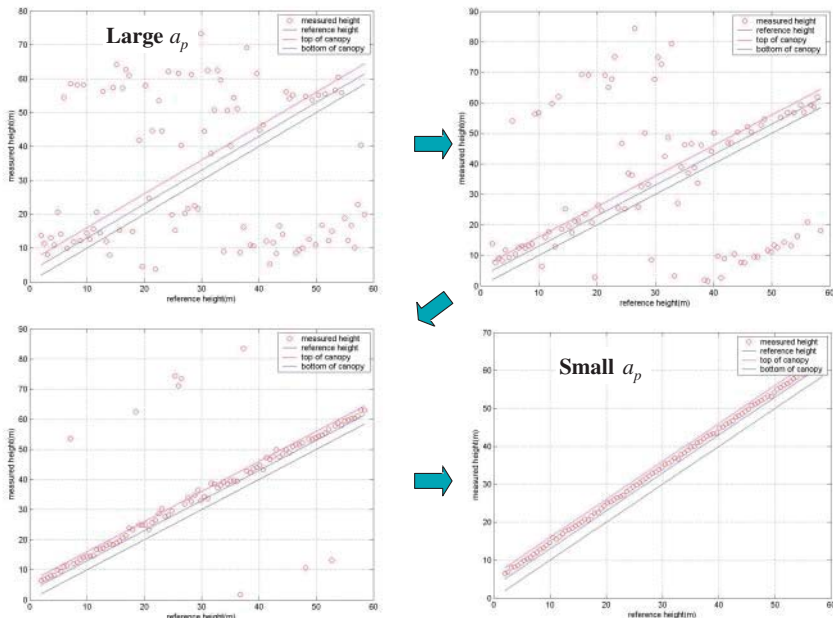


図3.2.6 散乱中心が地面と林冠内に存在する場合のシミュレーション結果

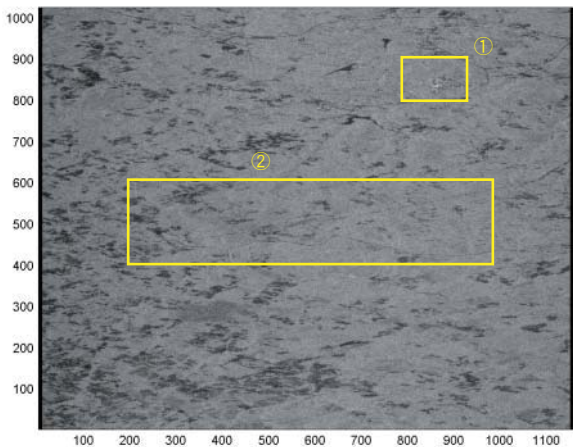


図3.3.1 地域Aに対応する再生画像

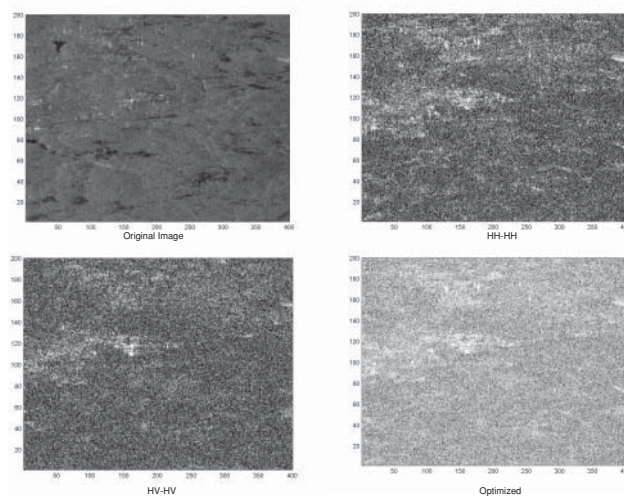


図3.3.2 原画像(左上)、相関マップHH-HH(右上)、相関マップHV-HV(左下)、相関最適化後(右下)

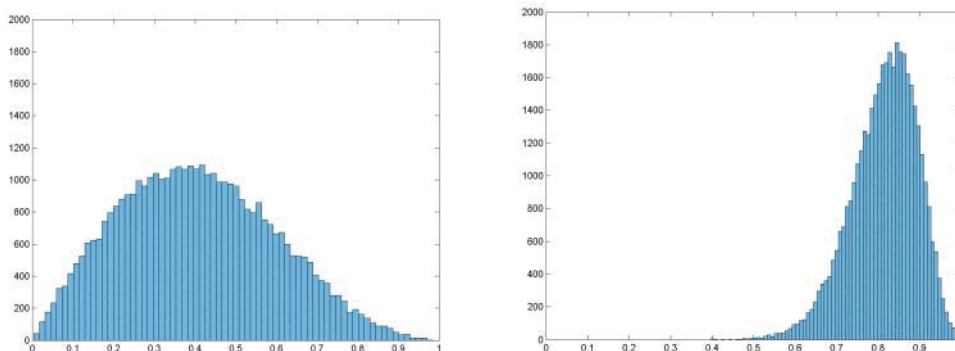


図3.3.3 相関最適化前(左)、後(右)の相関マップとヒストグラムの推移

れ以外のほとんどの地域は、広く植生に覆われているのがわかる。

図3.3.1の①に対応する地域について相関最大化を実施した結果を図3.3.2に示す。

原画像で人工構造物と思われる強い散乱体に対応して、いずれの相関マップ上でも、ほぼ同一地域に強い相関が見られる。また、最適化後の相関マップ内では、全体的に白っぽくなっており、相関最大化により、植生地域全体の相関が引き上げられたことが見て取れる。図3.3.3で、最大化前後のヒストグラムを比較し、どの程度相関の改善が図られたかを定量的に示す。図中、横軸が相関(0~1)を表し、縦軸がその頻度を表す。低い相関になだらかに分布していたところが、相関最大化後、高い相関にシャープに分布しているのがわかる。

本評価において、多偏波干渉SAR観測で得られた実データに対して、シミュレーションで確認した相関最大化アルゴリズムが有効に機能することを検証できた。なお、ここで補償された相関は、基線長と植生による相関劣化分と考えられるが、本アルゴリズムでは、それらを分離して解析することができない点に注意する。また、数学的なオペレーションのみで結果が得られる反面、物理に沿った直感的な理解が容易ではない。

4. 時間による相関劣化量抽出フィルタ

4.1 フィルタアルゴリズム

式(7)の4つの相関要因のうち、基線長と植生に起因する相関劣化に対し、相関最大化アルゴリズムが劣化分を補償することは確認できた。ここでは、さらにSNR (Signal Noise Ratio)による相関劣化を低減することで、時間による相関劣化分を抽出できるかについて考える。なお、時間による相関劣化は同時に観測した場合は発生しないが、例えば、衛星センサで観測すると2回目の撮像まで回帰日数分待たなければならない。それにより、1回目の撮像と条件が異なる(地形変化、植生の成長、落葉、及び風雨の影響等)ことで画像の類似度が下がり、相関劣化が発生する。時間による相関劣化量の推定手法については、文献(6)(7)でも議論されているが、観測波長に対する減衰係数や植生の高さに対応した相関劣化量等観測地域の植生状況に依存した事前情報を必要とする。一般に、撮像した広範囲な地域の植生情報を頻繁に更新するのは容易ではないため、これら手法の適用範囲は限定的なものとなる。そこで本稿では、相関最大化手法を導入することで観測地域の事前情報を必要としない新たなフィルタを提案する。

ここでは、時間による相関劣化を抽出するために、式(10)に示すように、これ以外の原因による相関劣化(基線

長、植生、及びSNR)を打ち消す。

$$\gamma_{Temporal} = \frac{\gamma}{\gamma_{Baseline} \gamma_{Volume} \gamma_{SNR}} \quad (10)$$

時間の相関劣化を孤立させるための信号処理フローを図4.1.1に示す。

基線長の相関劣化に対して、レンジスペクトルフィルタ⁸⁾を導入する。前項のシミュレーションで示したように、相関最大化アルゴリズムは、基線長の相関劣化にも有効であるが、植生の相関劣化と切り分けた定量的な検証がなされていない。そのため、一般にインターフェロメトリの前処理として用いられてきた本フィルタを導入した。

レーダ画像では、システムの観測時の熱雑音に起因して斑点のようなノイズが画像上に現れる。このノイズは、スペckルノイズと呼ばれ、通常、画像の小領域(数10画素)を平均化するマルチルックと呼ばれる処理を適用することで対処する。なお、この小領域の画素数はルック数と呼ばれる。ここでは、SNRの相関劣化を取り除

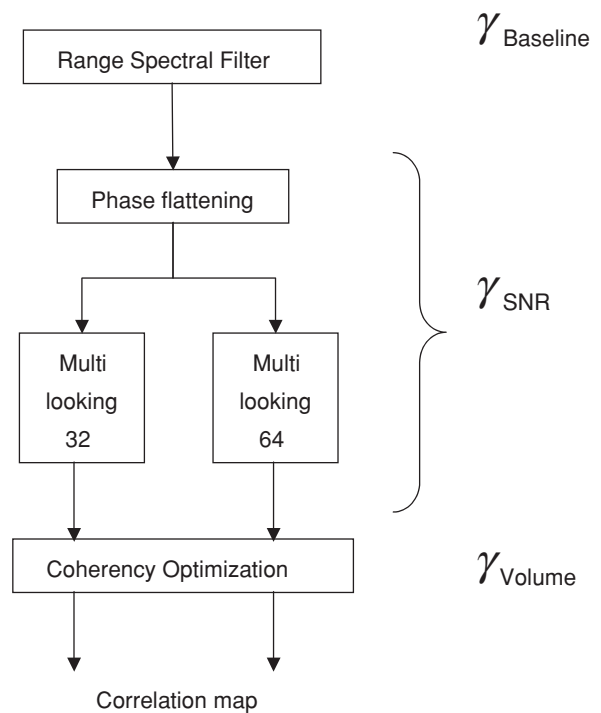


図4.1.1 時間の相関劣化抽出アルゴリズム

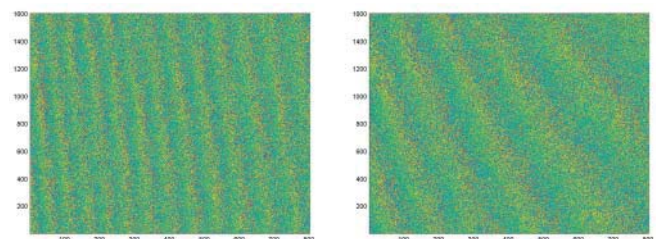


図4.1.2 位相平滑化前(左)と、平滑化後(右)の位相マップ

くべくマルチルック処理を実施した後、植生の相関劣化を補償する相関最大化アルゴリズムを適用する。なお、マルチルック処理後も高い位相精度を保持するために、対象エリアの干渉位相がなるべく一様である必要がある。よって、事前に高周波成分と考えられる平面位相を取り除くための位相平滑化処理を行うこととした。

図3.3.1の②が本項で対象となる地域である。

まず、図4.1.2に位相平滑化前後の位相マップを示す。

処理前に存在した干渉縞は、処理後に半分以下に減少しており、残った干渉縞は、対象エリアの地形によるものと考えられ、ここまでの処理が良好に行われていることが確認できる。本稿では、最大のルック数が64(8×8)であるため、残干渉縞の多偏波干渉画像処理上の影響は無視できるものとする。

本マルチルック処理を対象エリアに適用した振幅画像を図4.1.3に示す。

シーンの面積が大きいので、ルック数の増大に伴う分解能の劣化は確認できないが、コントラストが向上しノイズが抑圧されているのがわかる。

4.2 時間による相関劣化量抽出フィルタの評価

3章において、相関最大化アルゴリズムが植生と基線長に起因する相関劣化を補償することを確認できているため、ここでは、SNRによる相関劣化が低減されているかどうかにより焦点を絞って評価する。

マルチルック処理のルック数を変えて相関最大化を行った結

果を相関マップにより比較する。図4.2.1に結果を示す。

特に第一固有値について、32ルックでは全体的にぼんやりと白かった相関マップが、64ルックでは明確にコントラストが向上しているのがわかる。ルック数を増やすことで、スペックルノイズの低減が良好に行われていることがわかる。

前述のとおり、本稿で用いたデータは、1994年に撮像されたものであり、当時、植生情報に関する現地調査が行われていなかった。そのため、得られた結果の妥当性について、さらに検証する必要がある。そこで、対象エリアが偏波特性上完全にランダムな植生であるという仮定の下、以下に示す解析手法⁹⁾を用いて、更なる検証を行うこととした。

画像上のあるポイントが、偏波特性上完全にランダムな植生で、地上に存在する場合、図4.2.2に示す複素単位

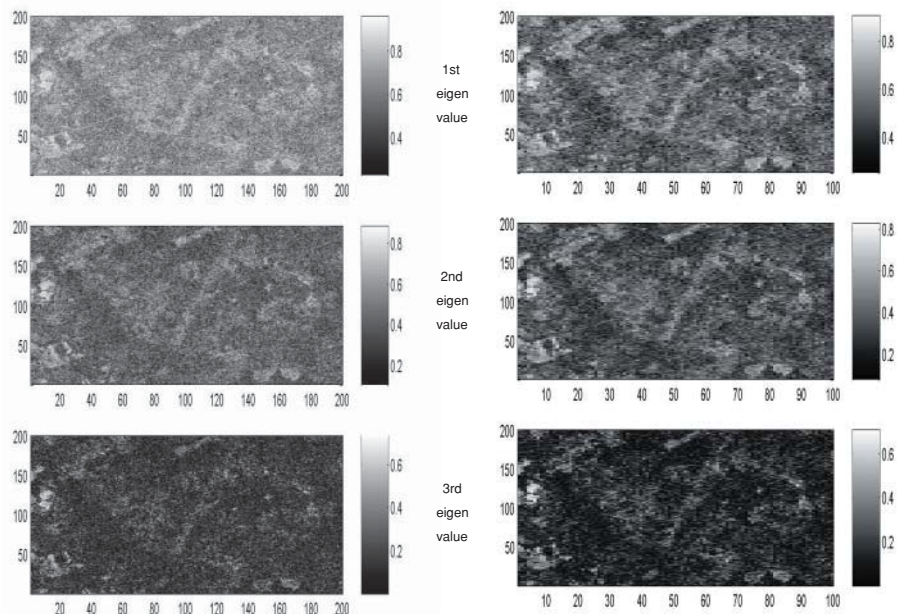


図4.2.1 相関最大化処理結果(左：32ルック、右：64ルック)

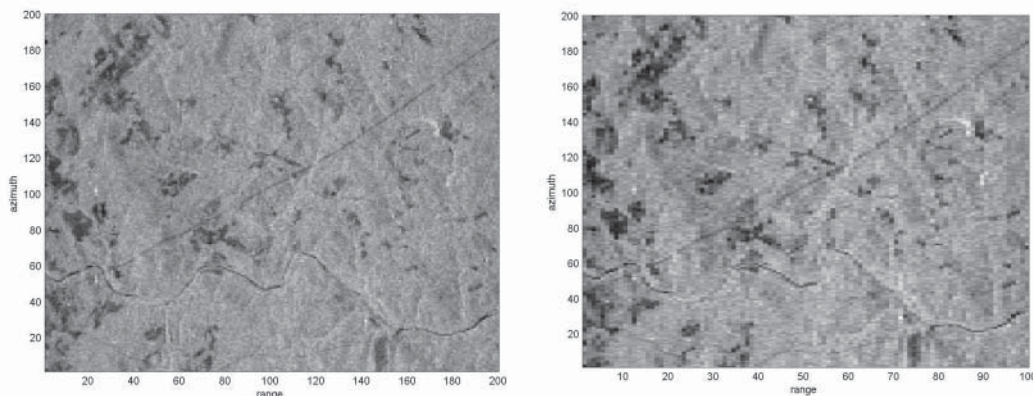


図4.1.3 マルチルック処理後の対象地域振幅画像 (左：32ルック、右：64ルック)

円上にプロットした偏波組み合わせを変数とする相関値は、一直線上に配列される⁹⁾。

ここでは、図4.2.3に示すように植生がランダムと想定される6地点を選出し、各地点に対して上記解析手法を適用し、結果がどの程度直線上に配置されるかを調べる。なお、得られた直線の傾きは、複数の相関より最小二乗法を適用することで得られる。本稿では、触れないが、

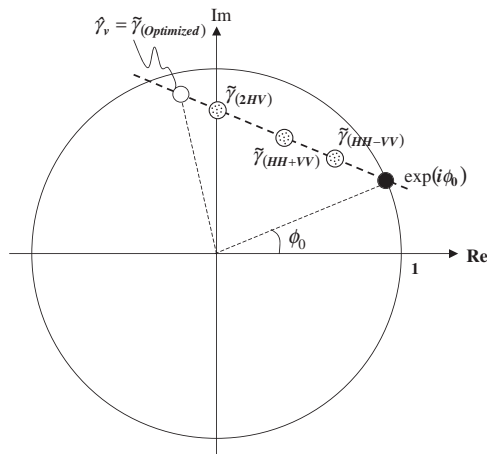


図4.2.2 複素単位円上にプロットしたRVoGの相関配置図

この傾き自体も更なる植生情報の抽出を行う上では、非常に重要なパラメータとなる⁹⁾。

上記6ポイントに対して、32ルック、及び64ルック画像から得られた相関を単位円上にプロットした結果を図4.2.4に示す。

各ポイントについて、ルック数による直線の傾きに注

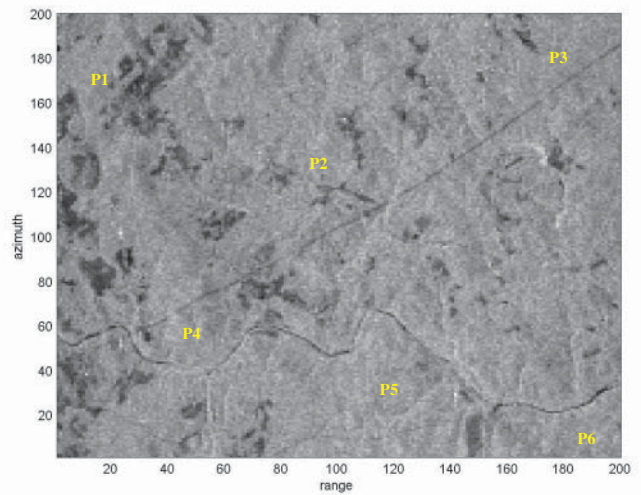


図4.2.3 解析ポイント

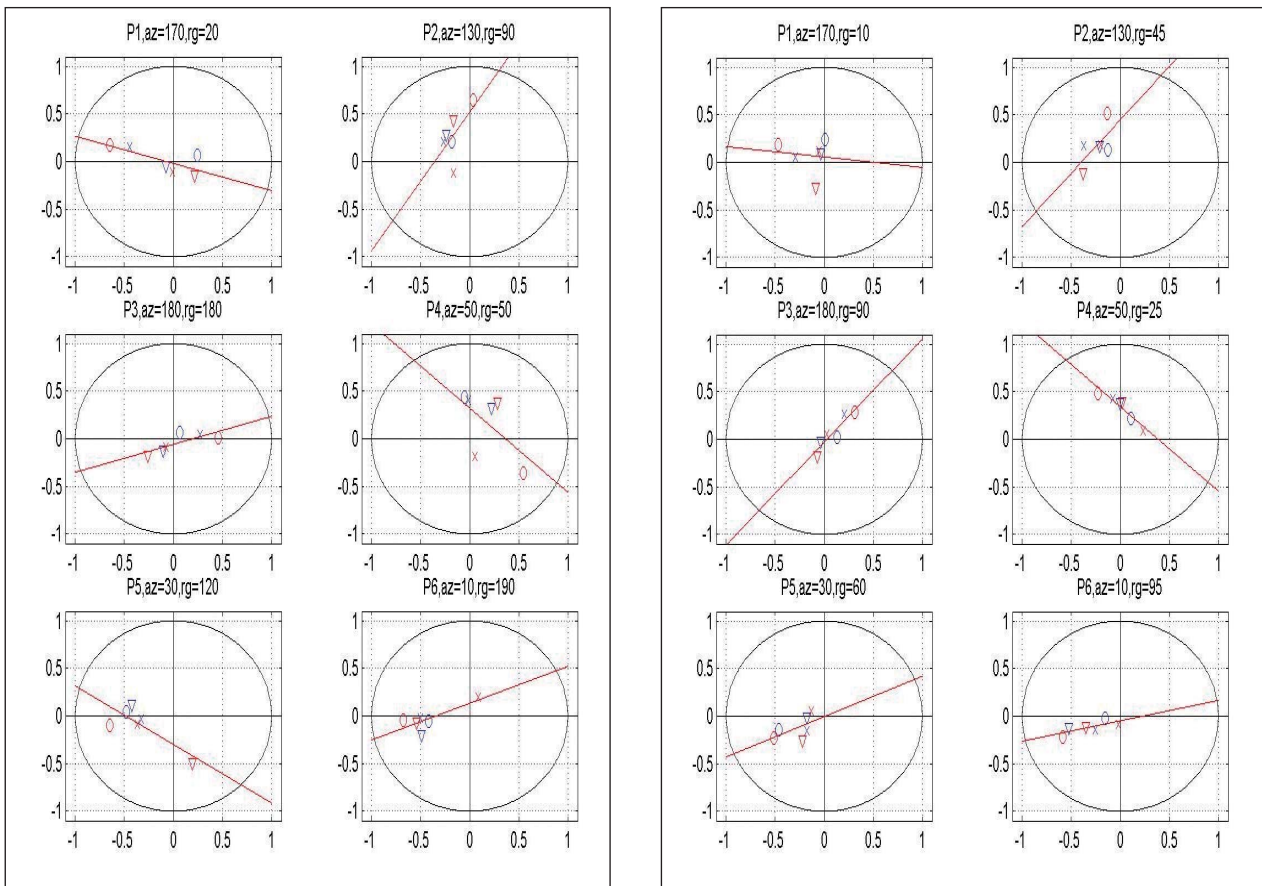


図4.2.4 複素単位円状の相関配置(左：32ルック、右：64ルック)

目した場合、ポイント5を除いてほぼ同じ傾きを示している。また、相関プロットのばらつきに注目した場合、ポイント1を除いてルック数が高い方が直線に集まってきた。これらから、ルック数の増大に伴い分散が減少しており、マルチルック処理がSNRに起因する相関の劣化に対処できていることがわかる。ただし、ポイント5については、傾きに大きな差異が発生し、またポイント1については、ばらつきがルック数の増加に従って大きくなっているのがわかる。これは、本解析手法が完全にランダムな偏波特性を仮定したものであり、これらのポイントは、その仮定に合致していないと考察される。この仮定は、多様な形態を持つ植生解析にとって非常に強い拘束条件となるため、より高精度な情報を抽出する上では、留意しなければならない。ルック数が大きくなることにより、複素単位円上のプロットが安定するが、これはある意味で当然である。なぜなら、仮に観測地域に広範囲で多様な植生(ここでは、偏波状態と考えることができる)が存在したとしても広範囲でマルチルック処理をすることで、一様化されてしまうためである。つまり、本解析手法においては、観測したい植生によってルック数を定めることが重要になってくるともいえる。

5. むすび

本稿において、多偏波干渉画像に関して相関最大化手法の評価、及び時間による相関劣化量抽出フィルタの開発と評価を行った。これら手法やフィルタの有効性を確認する一方、前提条件の制約等導入上の留意点を明確にすることができた。

今後、SARセンサの高分解能化／高機能化が進むことは必至であり、当社としてその解析技術を開発するにあたっては、本稿で確認したような留意点を充分認識して取り組むことが非常に重要と考える。同時に、より物理に沿った強固な技術基盤を形成していく必要がある。

最後に、カリフォルニア工科大学で本研究を進めるにあたり、データ及びアドバイスを提供いただいたJPL (Jet Propulsion Laboratory)のJakob van Zyl博士、Yunjin Kim博士、現マサチューセッツ大学のPaul Siqueira教授、及びカリフォルニア工科大学のDavid Rutledge教授に感謝いたします。

参考文献

- (1) S.R. Cloude and K.P.Papathanassiou, "Polarimetric SAR interferometry", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 36, pp. 1551-1565, Sept. 1998.
- (2) Y. Yamaguchi, Y. Takayanagi, W.-M. Boerner, H. J. Eom, M. Sengoku, "Polarimetric enhancement in

radar channel imagery", IEICE Trans. Communication, vol. E78-B, no. 12, pp.1571-1579, Dec. 1995

- (3) Cloude S.R. and Pottier E., "An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Volume, 35, pp 68-78, Jan. 1997
- (4) Jakob J. van Zyl, Yunjin Kim, "The Relationship Between Radar Polarimetric And Interferometric Phase", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International Volume 3, 2000, pp 1301-1303
- (5) Paul A. Rosen, "Principles and Theory of Radar Interferometry", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, IGARSS 04 Tutorial September 19, 2004
- (6) K.P. Papathanassiou, Shane R. Cloude, "The Effect of Temporal Decorrelation on the Inversion of Forest Parameters from Pol-InSAR Data" IEEE Proceeding on Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vol. 3, 21-25, pp 1429-1431, Jul 2003
- (7) M. Shimada, M. Watanabe, A. Rosenqvist, M. Minamisawa, P. Siqueira, "Temporal Decorrelation of the forest L band InSAR using JERS-1 six years data and the Pi-SAR four years data", presented in IGARSS 05, Jul 2005
- (8) Gatelli F., Monti Guarnieri A., Parizzi F., Pasquali P., Prati C., Rocca F., "The wavenumber shift in SAR interferometry" IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32, No.4, pp 855-865, Jul 1994
- (9) K.P. Papathanassiou and S.R. Cloude "Single baseline Polarimetric SAR Interferometry", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, no. 11, pp. 2352-2363, November 2001.