

4B-1 Pol-InSARにおけるESPRIT法の森林高推定精度向上に関して

山崎 真裕 山田 寛喜 山口 芳雄  
新潟大学工学部 情報工学科

1 まえがき

近年、地球環境の変動を広域に亘り観測する手段としてマイクロ波リモートセンシングが非常に注目されている。その中の技術の一つである Polarimetric and Interferometric SAR (Pol-InSAR) という手法により森林の高度を推定することで、森林のバイオマス情報の取得が可能となる。現在、森林高を推定する手法として地表面と樹冠の散乱中心を推定する ESPRIT 法が提案されている。しかしこの手法には強い体積散乱成分が存在する場合、推定される散乱中心の位相角には、位相差が小さくなるというバイアスが存在する問題がある [1]。そこで本研究では四成分散乱モデル分解法を用いた体積散乱成分、円偏波発生成分を除去した後 ESPRIT 法を適用することで、より正確な地表面と樹冠の散乱中心位相が求められ森林の高さ推定精度が向上されることを示す。

2 ESPRIT 法

農地、海域などのように比較的単純な散乱領域と異なり、森林領域ではいくつかの主要な散乱中心が存在する。そこで、高分解推定手法である ESPRIT 法ではそれぞれの局所散乱中心を推定するために、2つの軌道における受信信号を  $E_1, E_2$  とした場合、次式のようなベクトル形式で表すことにより式 (3) の相関行列を形成する。

$$E_m = [E_m^{HH}, E_m^{HV}, E_m^{VV}]^T, \quad m = 1 \text{ or } 2 \quad (1)$$

$$x = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S \\ SD \end{bmatrix} \sigma + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_{xx} = \langle xx^T \rangle \quad (3)$$

但し、 $S$ :偏波状態を表す行列、 $\sigma$ :複素振幅ベクトル、 $D$ :位相差を表す行列、 $n$ :雑音ベクトルである。ESPRIT 法では、相関行列  $R_{xx}$  を固有値解析し、その固有値、固有ベクトルから回転不変行列  $D$  を求める。そこから局所散乱波の散乱中心が推定できる。今回の解析は TLS-ESPRIT 法を用いて行った。

3 四成分散乱モデル分解を用いた森林のモデル化

四成分散乱モデル分解は、レーダから観測される散乱波を物理的な散乱過程に基づいた四つの成分 (表面散乱, 二回反射, 体積散乱, 円偏波発生) に分解してターゲットの特徴を捉える分解法である。まず、パス1, パス2で得られた受信信号  $c_1, c_2$  からベクトル  $c$  を形成し、 $6 \times 6$  の Covariance 行列を形成する。

$$c_1 = [S_{HH}^{(1)}, \sqrt{2}S_{HV}^{(1)}, S_{VV}^{(1)}]^T \quad (4)$$

$$c_2 = [S_{HH}^{(2)}, \sqrt{2}S_{HV}^{(2)}, S_{VV}^{(2)}]^T \quad (5)$$

$$c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C = \langle cc^H \rangle$$

$$= \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

但し、 $S_{kl}^{(i)}$  は軌道  $i$  における  $kl$  偏波の受信データ、 $T$  は転置である。四成分散乱モデル分解により  $C_{11}, C_{12}$  は、

$$C_{11} = f_s C_s + f_d C_d + \frac{1}{15} f_v C_v + \frac{1}{4} f_c C_c \quad (8)$$

$$C_{12} = f_s C_s e^{j\phi_s} + f_d C_d e^{j\phi_d} + \frac{1}{15} f_v C_v e^{j\phi_v} + \frac{1}{4} f_c C_c e^{j\phi_c} \quad (9)$$

と表すことができ、地表面と樹冠それぞれに四つの成分が存在していると考えられる。但し、 $f_i, C_i, \phi_i$  は各成分の寄与、対応する散乱行列、干渉位相をそれぞれ表す。したがって、次式のように体積散乱、円偏波発生成分のみの行列を構成することで観測された Covariance 行列から体積散乱成分と円偏波発生成分を取り除くことができる。

$$C_a = \frac{1}{15} f_v C_v + \frac{1}{4} f_c C_c \quad (10)$$

$$C'_a = \frac{1}{15} f_v C_v e^{j\phi_v} + \frac{1}{4} f_c C_c e^{j\phi_c} \quad (11)$$

$$R = C - \begin{bmatrix} C_a & C'_a \\ C_a^{*T} & C_a \end{bmatrix} \quad (12)$$

この体積散乱成分、円偏波発生成分を除去した Covariance 行列  $R$  に ESPRIT 法を適用することで体積散乱成分によるバイアスを除去することができる。

4 確率密度関数の変更

Covariance 行列の各要素の角度についての平均は、確率密度関数を  $p(\theta)$  とすると、

$$\langle S_{kl} S_{kl}^* \rangle = \int_0^{2\pi} S_{kl} S_{kl}^* p(\theta) d\theta \quad (13)$$

である。但し、 $kl$  は送受信偏波 (HH, HV, VV) を表す。四成分散乱モデル分解では主に垂直に幹や枝が分布していると考え、

$$p(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sin \theta & \text{for } 0 < \theta < \pi \\ 0 & \text{for } \pi < \theta < 2\pi \end{cases} \int_0^{2\pi} p(\theta) d\theta = 1 \quad (14)$$

を用いており、これにより体積散乱成分行列が導出されている。しかし、この体積散乱成分行列は森林領域において幹や枝の分布が同一ではないため一意に定めることができない。したがって確率密度関数  $p(\theta)$  を図2に示すように、水平に多く幹や枝が分布している  $p(\theta) = 1/2 \cos \theta$  から一様に幹や枝が分布している  $p(\theta) = 1/2\pi$ , さらに、垂直に多く幹や枝が分布している  $1/2 \sin \theta$  まで変化させ体積散乱成分行列  $C_v$  を計算する。その後、四成分散乱モデル分解を適用することで得られた各散乱成分の電力を見ることで各シーンに合った体積散乱行列を求める。

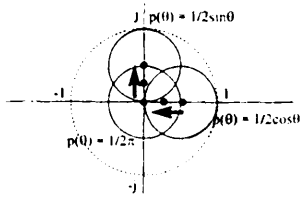


図1 angle distribution

5 解析結果

まずシミュレーションによる結果を示す(図2)。シミュレーションでは実際の森林を想定したパラメータから生成した Covariance 行列に今回挙げた手法を適用し、体積散乱成分、円偏波発生成分除去前と除去後での推定結果の比較を行った。今回示す結果は位相差  $\phi_{dif}$  を変化させたものである。この結果から除去後の推定では誤差がほとんど無くなり、推定精度が大幅に向上しているのが確認できる。

次に実データを用いた解析結果を示す。解析に用いたデータはドイツの Oberfaffenhofen で得られた E-SAR の L-Band データである(図3)。マルチルックサイズは  $5 \times 15$  ルック (range  $\times$  azimuth) とした。図4, 5に確率密度関数  $p(\theta)$  を変化させたときの各成分の散乱電力、除去前と除去後での ESPRIT 法による位相差の推定値をそれぞれ示す。[2]において、位相差が最小のとき各散乱成分の電力が正の値をとり、そのときの  $p(\theta)$  が最適となると報告されている。しかし、除去後の位相差の推定値において図5にあるような特異値が存在することがあり、そのときの電力値が図4のように負の値をとってしまう成分が出る場合も考えられる。今回の解析では図5に見られるような特異値を回避したうえで、位相差が最小のときの  $p(\theta)$  を最適解として解析を行った。図6にその推定結果を示す。除去前では、一様であると考えられる領域において高さが低く推定されてしまっているのが目立つが、除去後ではそれが大きく改善され高さが出ていることが確認できる。さらに図7, 8に使用した確率密度関数の分布と  $|S_{VV}|^2/|S_{HH}|^2$  を示す。 $|S_{HH}|^2 > |S_{VV}|^2$  の領域では  $0.5\sin\theta$  が、 $|S_{HH}|^2 < |S_{VV}|^2$  の領域では  $0.5\cos\theta$  が使用されている傾向が見られる。これらの結果から ESPRIT 法による位相差推定は、体積散乱成分と円偏波発生成分を除去することでそれらによるバイアスが軽減し、推定精度が改善されると言える。なお、特異値の回避については設定が困難であるため、現時点では完全とは言えない。しかし、これを改善することで推定精度の更なる向上が期待できる。

6 まとめ

本研究では ESPRIT 法による森林高推定手法の精度を向上させるために体積散乱成分、円偏波発生成分のバイアスを取り除く方法を検討した。その結果、シミュレーション、実データを用いた解析の両方において体積散乱成分、円偏波発生成分を除去することでバイアスが取り除かれ、ESPRIT 法による位相差推定精度が向上されることを示した。

謝辞

本研究の一部は財団法人実吉奨学会研究助成、新潟大学プロジェクト推進経費により行われたものである。

参考文献

- [1] H. Yamada, Y. Yamaguchi, W.M. Boerner, "Forest Height feature extraction in polarimetric SAR interferometry by using rotational invariance property," *Proc. of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2003*, on CD-ROM, July 2003.
- [2] H. Yamada, H. Okada, Y. Yamaguchi, "Accuracy Improvement of ESPRIT-based Polarimetric SAR Interferometry for Forest Height Estimation," *Proc. of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2005*, July 2005.

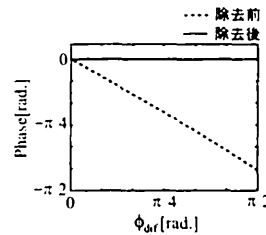


図2 シミュレーションにおける推定誤差



図3 解析領域

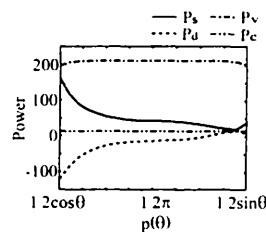


図4 各散乱成分の電力

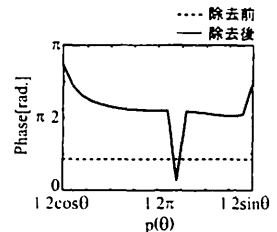


図5 位相差の推定値

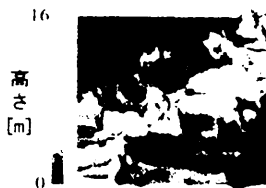


図6 除去前(左)と除去後(右)での高さの推定値

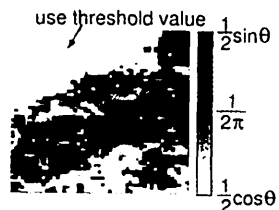


図7 確率密度関数の分布

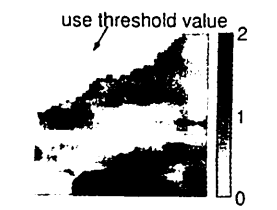


図8  $|S_{VV}|^2/|S_{HH}|^2$