

### E3 電波暗室内 POL-InSAR 実験における森林解析

岡田 武幸

山田 寛喜

山口 芳雄

新潟大学工学部

#### 1. まえがき

現在、地球環境の変動を広域にわたって観測する手段として、マイクロ波リモートセンシングの技術が非常に注目されている。その中の一つの手法として、異なる二つのアンテナから放射される偏波によって地表面の高度を算出する Polarimetric SAR Interferometry (POL-InSAR) という手法がある。現在、この手法を用いた森林解析に関する研究が進められており、森林の高さを測定することにより、森林バイオマスの体積などの情報を得ることが可能となる。本研究では、森林の高さを推定する手法としてコヒーレンス解析による手法と ESPRIT 法による手法を用いている。電波暗室内において森林を模擬したモデルを用い、異なる散乱特性を持つ森林における 2 手法の推定精度について検討している。

#### 2. コヒーレンス

コヒーレンスとは二つのアンテナから得られる信号の干渉性を表し、このコヒーレンスの位相からターゲットの高さを測定することができる。送受信一体型のレーダを仮定した場合、コヒーレンスベクトル  $k$  は次のように定義される。

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV}, S_{VV} - S_{HH}, 2S_{HV}] \quad (1)$$

また、コヒーレンス  $\gamma$  は次式のように与えられる [1]。

$$\gamma = \frac{\langle \omega_1^T \Omega_{12} \omega_2 \rangle}{\sqrt{\langle \omega_1^T T_{11} \omega_1 \rangle \langle \omega_2^T T_{22} \omega_2 \rangle}} \quad (2)$$

ただし、 $T$  は転置、 $*$  は複素共役、 $\langle \cdot \rangle$  はアンサンブル平均、 $\omega$  は散乱メカニズムを表す。 $[T_{11}]$ 、 $[T_{22}]$ 、 $[\Omega_{12}]$  はそれぞれアンテナ 1, 2 における式 (1) のコヒーレンスベクトル  $k_1$ ,  $k_2$  を用いて次式のよう定義される。

$$T_{11} = \langle k_1 k_1^T \rangle \quad (3)$$

$$T_{22} = \langle k_2 k_2^T \rangle \quad (4)$$

$$\Omega_{12} = \langle k_1 k_2^T \rangle \quad (5)$$

最適化されたコヒーレンスは、次式の複素固有値問題を解くことによって求められる [1]。

$$T_{22}^{-1} \Omega_{12}^T T_{11}^{-1} \Omega_{12} \omega_2 = \nu \omega_2 \quad (6)$$

$$T_{11}^{-1} \Omega_{12} T_{22}^{-1} \Omega_{12}^T \omega_1 = \nu \omega_1 \quad (7)$$

この固有値の平方根が最適化コヒーレンスの値となる。

$$\gamma_{max} = \sqrt{\nu_{max}} \quad (8)$$

また、森林領域ではコヒーレンス  $\tilde{\gamma}$  の式は次のようにモデル化される [2]。

$$\tilde{\gamma}(\omega) = \exp(i\phi_0) \left[ \frac{\tilde{\gamma}_v + m(\omega)}{1 + m(\omega)} \right] \quad (9)$$

ここで  $\phi_0$  は地表面に関する位相、 $\tilde{\gamma}_v$  は体積成分に関する複素数コヒーレンス、 $m(\omega)$  は散乱メカニズム  $\omega$  における地面と体積成分の振幅比を表す。この式は  $\omega$  の変化により得られるコヒーレンスが複素平面上において  $\tilde{\gamma}_v$  を通る直線上となることを表している。

#### 3. ESPRIT 法

ESPRIT 法は、特性が同じ 2 つのアンテナの受信データをもとに相関行列を形成し、その固有値、固有ベクトルをもとに散乱波の回転不変性を推定する手法である。POL-InSAR データに適用すると干渉位相の推定が可能となる。受信データベクトル  $x$  は次式のように表される。

$$x = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S \\ SD \end{bmatrix} \sigma + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここで  $S$ ,  $D$ ,  $\sigma$  はそれぞれ、散乱波の偏波状態、干渉位相、複素振幅を表す。 $n_i$  は内部雑音を表す。 $d$  個の散乱波が存在するとき、 $x$  より形成される相関行列  $R_{xx}$  の固有ベクトル  $[e_1, e_2, \dots, e_d]$  は次のように表される。

$$F_S = [e_1, e_2, \dots, e_d] = \begin{bmatrix} ST \\ SDT \end{bmatrix} \quad (11)$$

これより、次式が導かれる。

$$\Psi \equiv T^{-1}DT \quad (12)$$

$$\phi_j = \arg(\lambda_j) \quad j = 1, 2, \dots, d \quad (13)$$

行列  $\Psi$  の固有値から各散乱中心からの散乱波の干渉位相  $\phi_i$  が推定される。

#### 4. 実験

実験は電波暗室内で行った。側面から見た実験状況を図 1 に示す。マスターアンテナの高さを 170cm、スレーブアンテナの高さを 173cm として測定を行った。実験パラメータを表 1 に示す。

森林モデルには金属棒をはんだづけし、樹木を模擬したものを発泡スチロール上に多数配置したものをを用いている。地面の層はアンテナ方向から見て垂直方向 (レンジ方向) と水平方向 (アジマス方向) になるように金属棒を配置している。地面に垂直に立てた金属棒を樹木の幹とし、キャノピーの層は金属棒を地面に水平になるように、ランダム方向に配置している。測定に用いるモデルは散乱特性を変化させるため、キャノピーの層が 1 層のモデルと 2 層のモデルを作成した。

表 1. 設定パラメータ

システム	ネットワークアナライザ
アンテナ	X-band ホーンアンテナ
中心周波数	10 [GHz]
周波数帯域幅	2 [GHz]
送受信偏波	HH, HV, VV
アベレーシング	16 [回]
測定ポイント	201
走査点数 (走査間隔)	128 (1 [cm])

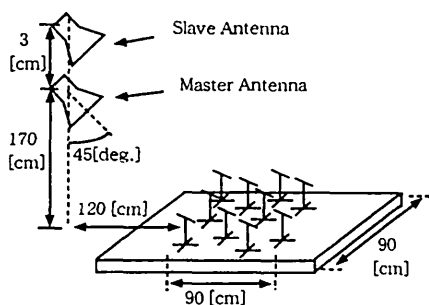


図 1. 実験状況

5. 実験結果, 考察

図 2, 図 3 にそれぞれ 2 層, 3 層ターゲットによる推定結果をコヒーレンスモデルを用いて示す. ESPRIT 法による推定は, 到来波数を 2, 3 波として推定を行っている.

この結果から, コヒーレンス解析による推定, ESPRIT 法による推定は共にほぼ同程度の高さを推定することがわかる. しかし, 2 層ターゲットにおける ESPRIT 法の 3 波推定値はコヒーレンス解析による推定値よりも大きい値を推定している. これはモデルの散乱中心の数が少ないため, 正確に到来波を検出できなかったためと考えられる. 今回の実験では森林の高さの推定には 2 波推定の方が高精度であることがわかる.

6. まとめ

本稿では異なる散乱特性を持つ森林モデルを用いて実験を行い, POL-InSAR におけるコヒーレンス解析と ESPRIT 法による高さ推定値について検証を行った. 2 手法においてはほぼ正確な高さが推定することが可能であるが, さらに推定の誤差の改善方法についての検討が必要である. なお, この研究の一部は文部科学省科研費によるものである.

参考文献

[1] K. P. Papathanassiou, S. R. Cloude, "Polarimetric SAR Interferometry", IEEE Trans.

Geosci. Remote Sensing, vol. 36, No. 5, pp. 1551-1565, Sept, 1998.

[2] K. P. Papathanassiou, S. R. Cloude, "Vegetation and ground parameter estimation using polarimetric interferometry part 1/2", Proc. of ESA CEOS SAR Workshop, Toulouse, France, Oct. 1999.

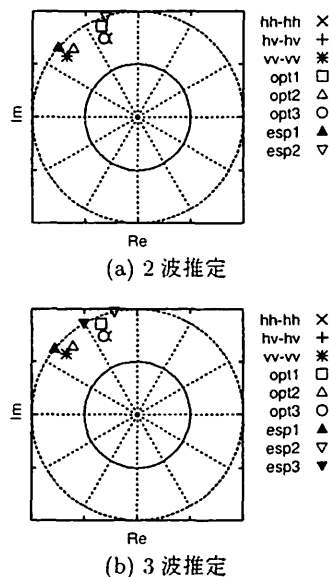


図 2. 2 層ターゲットによる推定結果

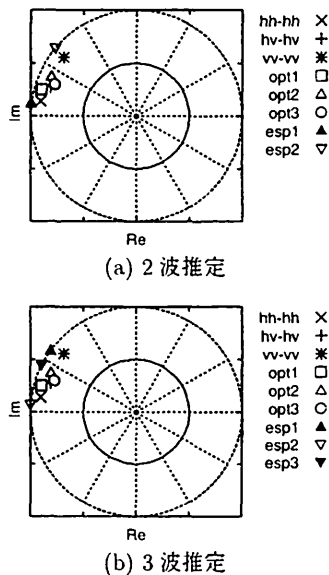


図 3. 3 層ターゲットによる推定結果