

SC-2-1 Polarimetry から Polarimetric Interferometry へ

Toward Polarimetric Interferometry from Polarimetry

山口 芳雄 山田 寛喜
Yoshio Yamaguchi Hiroyoshi Yamada
新潟大学 工学部
Faculty of Engineering, Niigata University

まえがき 地球環境計測において、航空機やスペースシャトル、人工衛星からのレーダリモートセンシングの果たす役割は大きい。マイクロ波は、雲や雨中を透過するため、マイクロ波を使ったレーダ計測は、いつでも（昼夜を問わず）、広い領域を同時に観測する方法として最適である。ここでは、SAR (Synthetic Aperture Radar) 技術の中で、偏波情報を積極的に使う Radar Polarimetry 技術と位相情報を使う Interferometry, そしてさらにそれらを融合した Polarimetric Interferometry の現状について紹介する。

Polarimetry

レーダポーラリメトリーとはその電波のベクトル性質である”偏波”をレーダセンシングに利用する理論と技術である。ポーラリメトリーによって、ターゲットの向き、散乱機構、テクスチャー情報が取得できる。

電波が散乱体に当たると、散乱体の表面に電流が流れ、それが2次波源となって再放射がおこる。その電流分布は、散乱体の形状、向き、大きさに依存するため、散乱の偏波はその散乱体に固有のものである。したがって、図1のように反射波の偏波状態は入射波のものとは一般に異なる。偏波は直観的にも理解されるように、傾きに敏感である。

Polarimetryでは、散乱波（反射波）からの偏波情報として、散乱行列を計測する。その偏波状態は、直交成分の振幅と位相を測定することによって得られる。具体的には、直交する2偏波（たとえばH; Vを交互に）送信し、受信で2偏波（HとV）の振幅と位相を同時に観測する事によって、偏波状態が完全に取得できる。NASA JPLのAIRSAR（1980年代）は世界で最初にポーラリメトリーの有効性を実証した。その後、シャトルレーダSAR-C/X-SAR（1994年）に続いている。この数年間、ハードウェア的な進歩は見られるが、基本計測原理は変わっていない。近年、進歩した点はPOL-SARデータの解析と応用である。

散乱行列 $\begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}$ が与えられた場合、以下の解析が可能である。

- 1) **Span, each component** 各要素毎に振幅、電力、位相画像の生成

$$\begin{bmatrix} |S_{HH}| & |S_{HV}| & |S_{VV}| & |S_{HH}|^2 & |S_{HV}|^2 & |S_{VV}|^2 & \phi_{HH} & \phi_{VV} \end{bmatrix}$$

また、偏波基底の変換による偏波基底要素毎の情報生成 $|S_{LR}|$

さらに、偏波に依存しない量としての $Span[S], Det[S]$ など

- 2) **Polarimetric Radar Channels**

Co-Pol channel, Cross-Pol channel, Matched-Pol channelなど偏波チャンネルの生成。特に、Cross-Pol channel powerは、ターゲットで新たに発生する電力成分なので、ターゲットの詳細な情報を含んでいる。

- 3) **Polarimetric Signature**

偏波状態を変えたときの受信電力分布図であり、そのSignature形状により、ターゲットの特徴を見いだせる。

- 4) **Characteristic Polarization States**

偏波チャンネルの受信電力が極値を示す偏波状態が存在する。その偏波状態は、Co-Pol max, Co-Pol extremum, Co-Pol nulls, X-Pol maxs, X-Pol nulls, X-Pol saddlesである。これらの偏波状態はターゲットに固有のものである。

- 5) **Polarimetric Enhancement and Elimination**

偏波状態を選ぶことによって $C = \frac{\text{desired power}}{\text{undesired power}}$ にて定義するCの最適化（最大・最小）が可能である。

$$\text{ある散乱行列に対して, maxの偏波状態 } \rho_{c_{m1,2}} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad A = S_{HH}^* S_{HV} + S_{HV}^* S_{VV} = -C^*,$$

$B = |S_{HH}|^2 - |S_{VV}|^2$ を使って再度受信電力を計算してやれば、その散乱行列から得られる電力の

Enhancementを行うこととなり、逆に、nulls $\rho_{x_{n1}}, \rho_{x_{n2}} = \frac{-S_{HV} \pm \sqrt{S_{HV}^2 - S_{HH} S_{VV}}}{S_{VV}}$ を使えば、消すことがで

きる。この手法は、不要なクラッタを消去できることを意味しており、地中レーダでの地表面クラッタの除去などには非常に役立つ。

- 6) **Decomposition into 3 Fundamental Components**

散乱行列を3つの基本散乱行列に分解し、基本散乱機構（1回反射，2回反射，円偏波発生）を推定する

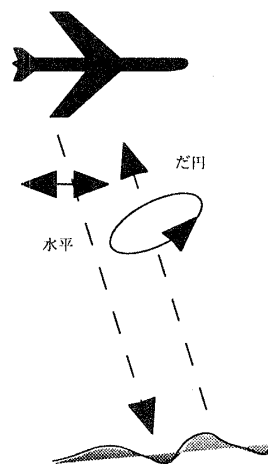


図1 反射波の偏波

2000年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会

ことができる。この分解によって、ターゲットの散乱機構が推定でき、ターゲットの分類に役立たせることができる。

$$[S] = e^{j\varphi} \left\{ e^{j\varphi_s} K_s [S]_{sphere} + K_d [S]_{diplane} + K_h [S]_{helix} \right\}$$

7) Anisotropy Coefficients

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \Rightarrow [S(\rho)] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}, \quad \dot{\mu} = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \Rightarrow \mu' = \frac{|\dot{\mu}| - 1}{|\dot{\mu}| + 1}$$

植物や自然地形などに比べて、人工物には偏波依存性の強いものが多い。例えば、線状物体など。そこで、偏波依存性の強い物体と弱い物体を識別するのに、散乱行列から得られる不変量を使って、Anisotropy 係数が提案されている。この量はかなりRobustな値であり、正確な偏波レーダでなくとも、適当な結果が得られる。

8) Polarimetric Entropy H and Angle $\bar{\alpha}$

$$\text{散乱行列から得られる要素 } k_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \\ 2S_{HV} \end{bmatrix} \text{ をもとに, 行列 } [T] = k_p k_p^{*T} = [U] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [U]^* \text{ を}$$

作り、その固有値を使って、以下のようにEntropy Hと角度 $\bar{\alpha}$ を計算する。

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}, \quad H = \sum_{i=1}^3 P_i (-\log_3 P_i), \quad \bar{\alpha} = P_1 \alpha_1 + P_2 \alpha_2 + P_3 \alpha_3$$

エントロピーは散乱過程の複雑さを表しており、枝の絡み合った植生は1に近い値をとる。一方、平面からの散乱は単純であり、0となる。また、角度は偏波依存性を表しており、2つのパラメータを組み合わせることにより、強力な分類方法が可能となる。

Interferometry

Interferometryでは、2つの受信アンテナによってSAR画像の位相差mapを作成する。アンテナ位置の違いによる受信信号の位相差(引算)を利用して位相差のcountermapを作成する。図2参照。それを地上の高さ情報に変換し、3次元空間情報を生成する。したがって、3次元の地図: DEM(Digital Elevation Map)を作製することが可能である。2つのアンテナを搭載した2000年のNASA JPLのシャトルはDEM作成のためのmissionである。1つのアンテナしか搭載できない衛星では、Repeat-Passによる方法がある。

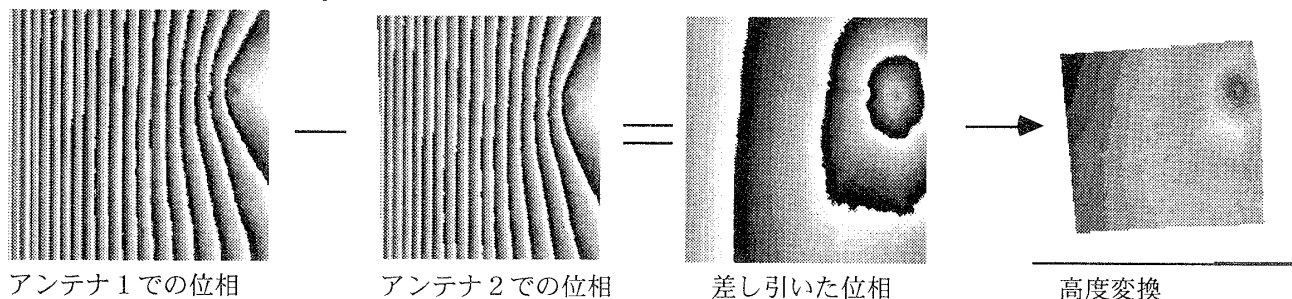


図2 Interferometry と3-D image 生成

あとがき

Interferometryでも、最初は1つの偏波で使われてきたが、今後は全偏波を使うPolarimetric Interferometryが重要である。1つの偏波では、その偏波での情報しか得られない。例えば、樹木の葉の部分と幹の部分、さらに地表の部分の区分け(散乱過程の解明)は難しい。もし、垂直方向の情報も区別しながら、さらにターゲットの散乱機構、向きなどの情報を得るには、Polarimetry + Interferometryが必要になってくる。そのため、今後は両者を別々に扱うのではなく、合体したPolarimetric Interferometry技術が重要になってくるであろう。現在、CRL/NASDAが開発した航空機搭載PI-SARが飛行を行っており、世界最先端の高分解Polarimetric SAR画像(L- & X-band)とInterferometric画像(X-band)が得られている。2002年には日本のALOS-PALSARの打ち上げが予定されており、Polarimetric機能があるため、Repeat-PassによるPolarimetric Interferometryが可能になると期待される。さらに、ターゲットと電波の相互作用を考えた場合、できる限り広い周波数帯での情報取得が望ましい。その意味で、Wideband Polarimetric SAR Interferometryに向かって研究が進むと考えられる。

参考文献

- [1] W. -M. Boerner, Y. Yamaguchi, "Extra wideband polarimetry, interferometry and polarimetric interferometry in synthetic aperture remote sensing," *IEICE Trans. Commun.* vol.EB-83, no.9, Sept. 2000
- [2] S. R. Cloude and K. Papathanassiou, "Polarimetric SAR interferometry," *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, vol.36, pp.1551-1565, 1998
- [3] R.A. Reyerson ed., *Manual of Remote Sensing*, Ch.5, *Polarimetry in Radar Remote Sensing: Basic and Applied Concepts*, 3rd Ed., John Wiley & Sons, New York, 1998
- [4] 山口芳雄, *偏波(ポーラリメトリック)レーダの基礎と応用*, リアライズ社, 1988