

リモートセンシング偏波レーダの汎用キャリブレーション法の開発

木村 宏

岐阜大学 工学部 電気電子工学科 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1

e-mail: hkimura@cc.gifu-u.ac.jp

概要： 地球環境監視のために近年の注目されている偏波レーダについて、最小数の標準散乱体と地表散乱体の性質を利用する汎用キャリブレーション法の開発を目的に、地上レーダ干渉信号の除去と新しい偏波間クロストークの補正法を提案する。

1. はじめに

リモートセンシングは地球環境の監視技術として注目されている。特にレーダリモートセンシングには天候や昼夜に影響を受けないという特徴がある。従来の光学センサではデータ収集が困難であった多雨地域や観測不能の夜間においても、レーダ観測が可能であるため、特に京都会議の重要なテーマである二酸化炭素に関連する森林モニタリング等への期待が大きい。さらに、リモートセンシング用のレーダの中でも、近年注目されているのが、偏波レーダである。電磁波は電界ベクトルによって偏波という特性が定義される。多くのリモートセンシング偏波レーダは、送受信において水平偏波と垂直偏波を用いて4種の偏波の組合せで観測する。この4種の組合せによって、散乱体の偏波に対する完全な特性を知ることができる。さらに、地表物体の完全な散乱特性からは、森林バイオマスだけでなく、土壌水分や地表面粗度等の物理量計測が期待されている。一方、リモートセンシング偏波レーダは、人工衛星や航空機に搭載されて使われるため、種々の外乱要因の影響を受けやすいだけでなく、内部自体にも歪要素を含んでいる。偏波レーダを真に有効利用するには、観測データからレーダ断面積や偏波間位相を高精度に定量化する必要であり、このための行いはキャリブレーションと呼ばれる。

本研究では、最小数の標準散乱体と地表散乱体の性質を利用した偏波レーダの汎用キャリブレーション法の開発を目的とした。本報告では、地上レーダ干渉信号の除去法（2章）と、新しい偏波間クロストークの補正法（3章）を提案する。

2. 地上レーダ干渉信号の除去

2.1 地上レーダの干渉

リモートセンシング用合成開口レーダ(SAR)データには、都市域でしばしば地上レーダからの信号が干渉するという問題が起こる[1][2]。特に JERS-1 衛星(1992~1998)に搭載されたLバンド(波長約0.2m) SARで深刻である。SARデータのキャリブレーションにはこの地上レーダ干渉信号の除去が必須となる。被干渉状態の SAR 信号を解析すると、干渉信号はチャープ信号帯域内に複数の固定周波数をもってある長さの持続信号として存在する。このような干渉信号を除去するためには、画像形成段階において、SAR信号スペクトルから干渉信号の周波数成分のみを除去するノッチフィルタが最も確実で簡便な方法である[2]。干渉信号の周波数成分およびスペクトルパワーは、場所および時間によって変動するため、ノッチフィルタのスレッシュホールド設定には任意性があるが、干渉信号の除去とレーダ散乱信号の保存を両立する最適なスレッシュホールドの存在が予想される。本研究ではその最適スレッシュホールドを提案する。

2.2 干渉信号

一様分布ターゲットからのレーダ信号パワーは指数分布となることが知られており[3]、SARのチャープ信号エコーのスペクトルパワーも指数分布となる。一方、地上レーダの干渉信号のスペクトルパワー分布は未知である。

神戸と横浜の JERS-1 SAR 受信信号データについて、地表散乱信号スペクトルパワーが指数分布すると仮定して求めた干渉信号スペクトルパワーpdfを図1に示す。同図は、横軸縦軸ともに対数スケールである。神戸のケースから次式の干渉信号スペクトルパワーpdf

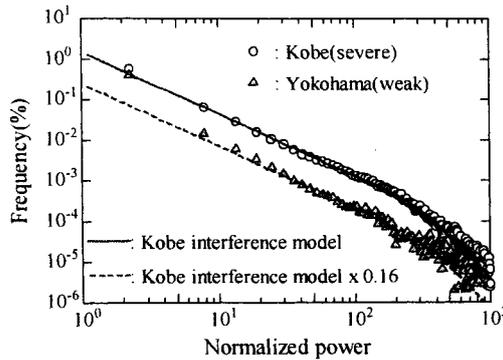


図1 干渉信号スペクトルパワーpdf

を得た[9].

$$q_{ik}(x) = \begin{cases} 10^{-1.53\text{Log}(x)-1.80} & 1 \leq x \leq 164 \\ 10^{-1.65[\text{Log}(x)]^2+5.77\text{Log}(x)-9.89} & 164 < x \end{cases} \quad (1)$$

ここで正規化パワー x の定義域は $1 \leq x$ であるが、区間 $0 \leq x < 1$ を除いた影響は小さい。

図1では、干渉の程度の異なる神戸と横浜の間で、干渉信号スペクトルパワーpdfに類似性が見出される。これより、任意の干渉信号のスペクトルパワーpdfは $aq_{ik}(x)$ (a は係数)と考えることができる。

2.3. 干渉除去ノッチフィルタリング[9]

本研究で使用するノッチフィルタ $F_i(k)$ は次式で表せる。

$$F_i(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } |S_i(k)|^2 \leq \tau \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $|S_i(k)|^2$ は周波数成分 i のスペクトルパワー、 τ は干渉成分判定のスレッシュホールドである。スペクトルは受信信号ライン毎に異なるため、フィルタ $F_i(k)$ の周波数特性はライン毎に変動することになる。

神戸(K), 横浜(Y), マレーシア(M)の3地域の中に選んだ幾つかの地表ターゲットについて、ノッチフィルタスレッシュホールドとフィルタリング後の後方散乱係数の関係を計測して図2を得た。いずれの地表ターゲットも、スレッシュホールドの増加に伴って後方散乱係数も増加し飽和レベルに達する。計測値とモデル計算値は、Urban-3とSeaを除く地表ターゲットで、特に $1 < \tau$ で非常によく一致する。Urban-3

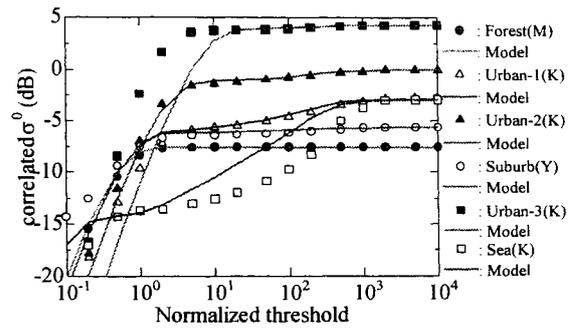


図2 スレッシュホールド対後方散乱係数

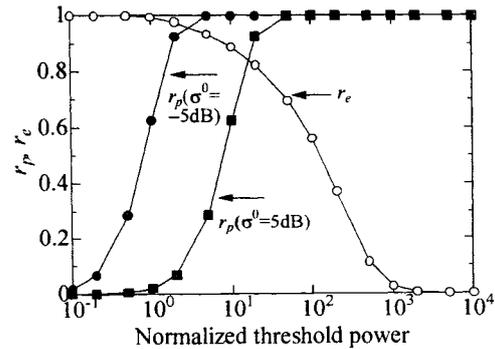


図3 スレッシュホールド対保存率・除去率

は著しく強散乱の散乱体を含む小面積(1 km²以下)の市街地であり、一様分布ターゲットの指数分布が適用できないターゲットと考えられるが、 $2 < \tau$ ではモデル計算値と計測値がよく一致する。Seaは強い干渉を受けた領域で、本来の後方散乱係数は小さい。計測値とモデル計算値の差異は $1 < x < 100$ で大きいですが、その違いは3dB以内である。Seaにおける差異の原因には雑音の影響が予想される。Urban-1, Urban-2, Suburbは一様ターゲットではないが、数km²の広い領域を選択しているために一様ターゲットと同様の特性を示している。森林以外の $1 > \tau$ で、モデル計算と計測値の一致が悪くなる理由は、干渉信号モデルが $\tau > 1$ で作成されているためである。

干渉除去ノッチフィルタの効果とスレッシュホールドの関係を図2の計算モデルを用い、レーダ散乱信号保存率 r_p と干渉信号除去率 r_e を評価値として数値計算し図3を得た。70%以上の干渉信号除去率を得るには、正規化スレッシュホールドが50以下である。また、都市域のような強後方散乱の領域で信号保存率をほぼ

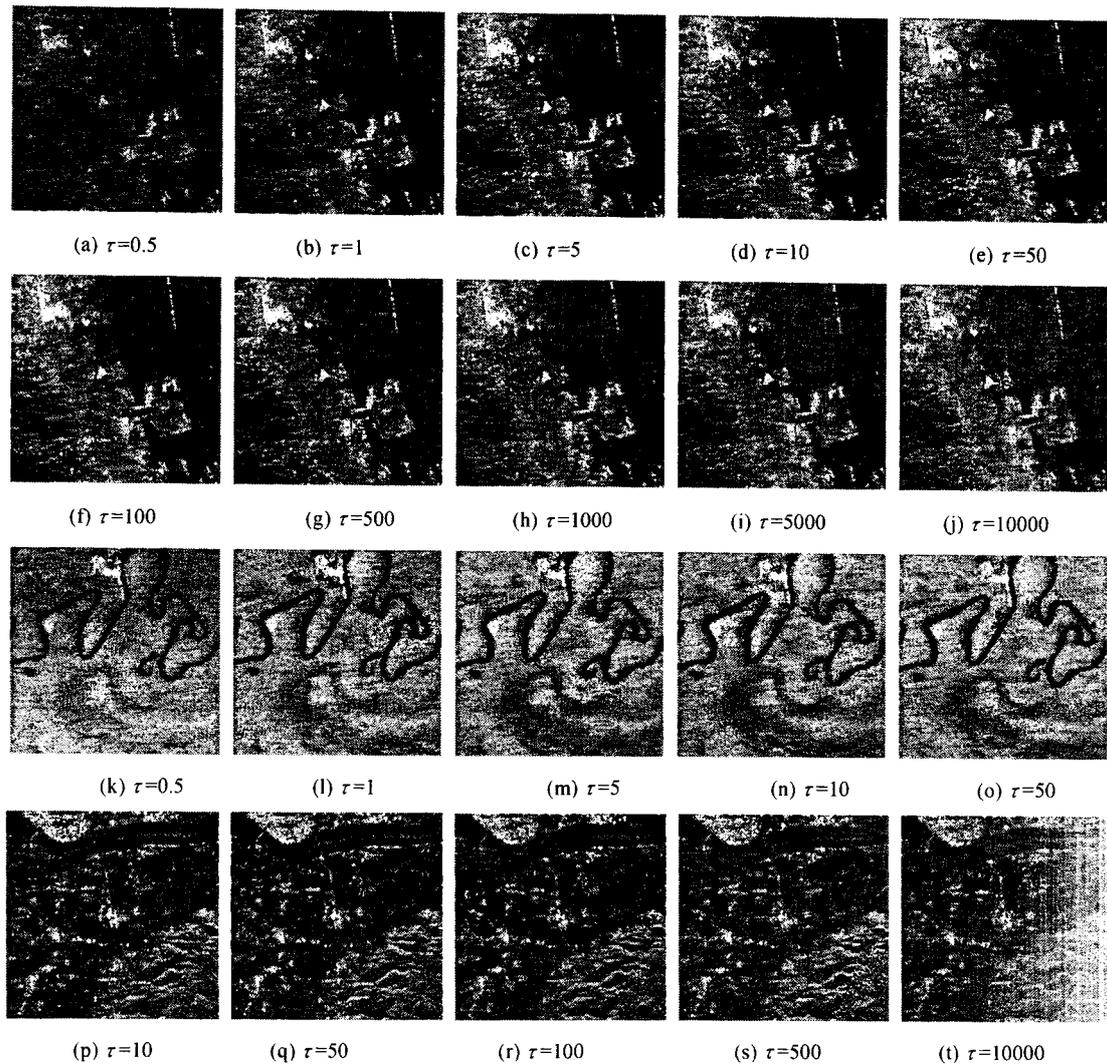


図4 スレッシュヨルドと実画像の比較, (a)~(j): 神戸, (k)~(o): マレーシア, (p)~(t): 名古屋

100%にするには、正規化スレッシュヨルドが10以上である。通常、干渉信号は都市域を含む領域で発生するので、最適な正規化スレッシュヨルドは10~50となる。また、この範囲では、干渉波の存在しない低散乱強度領域に対しても信号保存率がほぼ100%であり、ノッチフィルタの弊害は発生しない。

上で得た最適正規化スレッシュヨルド10~50を検証するため、神戸、マレーシアおよび名古屋の実データでスレッシュヨルドの効果を比較し図4に示す。スレッシュヨルド0.5や1で、いずれもコントラストの劣化がみられる。この理由は、地表信号成分が除去されたためである。また、神戸や名古屋画像のスレッシュヨルド500以上では、干渉信号が顕著になる。

実画像の比較においても、図3での評価と同様に10~50が最適正規化スレッシュヨルドといえる。なお、このスレッシュヨルドは後方散乱係数8.3 dB~15.3 dBのターゲットからの散乱信号パワーに相当する。

3. 偏波間クロストーク補正法

3.1 偏波レーダの偏波間クロストーク

2005年度に打上げが予定されているALOS衛星には、Lバンド偏波SAR(PALSAR)が搭載される予定である[4]。ALOS/PALSARは、米国の実験的なSIR-Cミッションに次ぐ、本格的なLバンド偏波SARであり、地球科学や地球環境計測への利用が期待されている。特に、土壌水分、表面粗度、バイオマス等の物理量

の高精度な計測には、レーダ装置としてキャリブレーションが必須となる。偏波レーダのキャリブレーションでは、偏波間クロストーク補正が最重要で、van Zylの方法[5]やQueganの方法[6]が一般的によく用いられている。ALOS/PALSARでは、さらに交差偏波のノイズバランスと電離層中の伝搬に伴うFaraday回転[8]の補正が必要となるが、前記従来法では十分な対応できない。本研究ではFaraday回転補正にも対応した新しい方法を提案する。

3.2 システムモデルと従来のキャリブレーション法

ALOS/PALSARモデルは次式で表せる。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{O} &= \mathbf{RFSFT} + \mathbf{N} \\
 \mathbf{S} &= \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{F} &= \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \\
 \mathbf{R} &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{T} &= \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{N} &= \begin{bmatrix} n_{hh} & n_{hv} \\ n_{vh} & n_{vv} \end{bmatrix} \quad (3)
 \end{aligned}$$

ここで、 \mathbf{O} は観測散乱行列、 \mathbf{S} はターゲットの散乱行列、 \mathbf{F} はFaraday回転行列(回転角 Ω)、 \mathbf{R} と \mathbf{T} はそれぞれ受信および送信システムの歪行列、 \mathbf{N} はノイズ行列である。キャリブレーションは、 \mathbf{F} 、 \mathbf{R} 、 \mathbf{T} 、 \mathbf{N} を同定することであり、この結果 \mathbf{O} から \mathbf{S} を得ることが可能となる。

van Zylの方法は、相反システムモデルと対称な観測散乱行列を前提にする[5]。Queganはこの方法を相反性が成立しないシステムに拡張したが[6]、次の仮定を導入している。

【仮定 1】散乱行列の相反性($S_{hv}=S_{vh}$)。

【仮定 2】送受信システム歪行列の対角成分が非対角成分に比べて小さい。

【仮定 3】自然の散乱体では共偏波と交差偏波間の後方散乱が無相関($\langle S_{hh} S_{mv}^* \rangle = \langle S_{vv} S_{vh}^* \rangle = 0$)。

【仮定 4】ノイズと散乱信号とは無相関であり、ノイズは0平均で分散 N_{ij} である。

【仮定 5】共偏波のチャンネルはSN比が大きく、

ノイズの影響を無視できる($N_{hh} \approx 0, N_{vv} \approx 0$)。

【仮定 6】交差偏波チャンネルのノイズパワーは等しい($N_{hv}=N_{vh}$)。

3.3 キャリブレーション法の改良

3.3.1 Quegan法の改良

ALOS/PALSARは、H系とV系で異なる受信機を用いるため、先の【仮定 6】が必ずしも保証されない。そこで、交差偏波チャンネルノイズをインバランス状態($N_{vh}/N_{hv}=m$)に拡張した場合の解を導出した。さらに、日本のように、平野が狭く、かつそこに自然物と人工物が複雑に混在するような状況では、【仮定 3】が保障されない。そこで、【仮定 2】が満足されることを前提に、キャリブレーションに用いる地表を、共偏波と交差偏波チャンネル間の相関係数($r(O_{hh}O_{vh}^*$)あるいは $r(O_{vv}O_{hv}^*)$)がある値よりも小さな部分に限定する方法を導入する[10]。

3.3.2 偏波オリエンテーション角応用法

Faraday回転は偏波間クロストークの増加と同じ効果をもつ。ALOS/PALSAにおけるFaraday回転角の上限は40度程度と見積もられている[8]。Faraday回転が小さい場合は、前述のQuegan法の改良を適用することが可能であるが、Faraday回転が大きい場合への対応法が必要である。

近年斜面による偏波オリエンテーション角変化が報告され、さらに斜面補正への応用が研究されている[7]。本研究で、JAXA Pi-SARデータを用いて都市域の偏波オリエンテーション角を解析したところ、建物による偏波オリエンテーション角変化を見出した。モデルを提案し解析の結果、ALOS/PALSARと同じLバンドでの岐阜市街地の計測値は、モデル計算値に良く一致した。ただし、モデルとの一致度はレーダ波長や都市の構造によって異なることも判明した[11]。

都市域の偏波オリエンテーション角変化に着目して、次に示す偏波間クロストーク補正法を考案した[12]。導入した仮定は次のとおりである。

【仮定 1】散乱行列の相反性($S_{hv}=S_{vh}$)。

【仮定 2】表面散乱では共偏波と交差偏波間の後方散乱の相関は小さい。

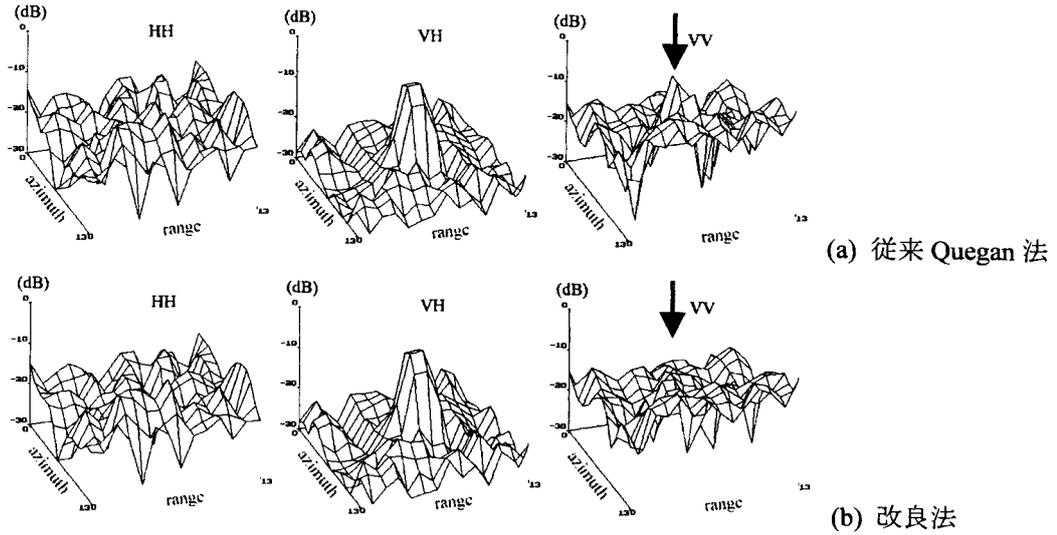


図5 45度回転2面コーナ反射体の偏波応答比較

表1 シミュレーテッドアニーリング法による数値実験結果

	設定パラメータ	推定パラメータ
Case-1	$\Omega = 20^\circ$ $R = \begin{bmatrix} 0.90 + j0.10 & 0.10 - j0.10 \\ 0.08 + j0.02 & 1 \end{bmatrix}$ $T = \begin{bmatrix} 0.95 - j0.10 & 0.05 + j0.03 \\ 0.03 + j0.06 & 1 \end{bmatrix}$	$\Omega = 24.7^\circ$ $R = \begin{bmatrix} 0.92 + j0.09 & 0.00 - j0.12 \\ 0.19 + j0.07 & 1 \end{bmatrix}$ $T = \begin{bmatrix} 0.95 - j0.10 & -0.01 + j0.08 \\ 0.08 + j0.07 & 1 \end{bmatrix}$
Case-2	$\Omega = 20^\circ$ $R = \begin{bmatrix} -0.90 + j0.10 & 0.10 - j0.10 \\ 0.08 + j0.02 & 1 \end{bmatrix}$ $T = \begin{bmatrix} -0.95 - j0.10 & 0.05 + j0.03 \\ 0.03 + j0.06 & 1 \end{bmatrix}$	$\Omega = 20.9^\circ$ $R = \begin{bmatrix} -0.88 + j0.13 & 0.14 - j0.12 \\ 0.12 + j0.08 & 1 \end{bmatrix}$ $T = \begin{bmatrix} -0.96 - j0.12 & 0.05 + j0.10 \\ 0.05 + j0.04 & 1 \end{bmatrix}$

3.4 改良法の実験

3.4.1 Quagan法の改良

Quagan改良法の効果は、JAXA Pi-SAR データに適用して確認できた。図5は45度回転2面コーナ反射体の偏波応答を示したものである。同リフレクタの応答は、理論的には交差偏波のみに生じ、共偏波にはない。従来Quagan法では、VV偏波に小さな応答が現れているが、改良法ではこれが消えている[10]。改良法の効果は、交差偏波のノイズバランスが1から離れるほど大きい。

3.4.2 偏波オリエンテーション角の応用法

3.4.1でキャリブレーションしたJAXA Pi-SARデータに対してFaraday回転とシステ

ム歪を模擬し、これをシミュレーテッドアニーリング法[13]を用いて解くという数値実験を行った。想定したパラメータと同方法で推定されたパラメータの比較を表1に示す。同方法の実行には、次の評価関数 f が最小になるような最適化を行った。 f_1, f_2 は【仮定1】に、 f_3 は【仮定2】に由来する。さらに解の安定性を図るため、コーナリフレクタの応答条件 f_4 を付加した。

$$\begin{aligned}
 f &= f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \\
 f_1 &= \left| \langle S_{rr} S_{ll}^* \rangle_{(HH, VH, VV)} - \langle S_{rr} S_{ll}^* \rangle_{(HH, HV, VV)} \right| \\
 f_2 &= \left| \langle |S_{hv}^2| \rangle - \langle |S_{vh}^2| \rangle \right| \\
 f_3 &= \left| \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle \right| + \left| \langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle \right| + \left| \langle S_{hh} S_{vh}^* \rangle \right| + \left| \langle S_{vv} S_{vh}^* \rangle \right| \\
 f_4 &= \left| (S_{hh})_{CR} - (S_{vv})_{CR} \right| \quad (4)
 \end{aligned}$$

表1の結果は、偏波オリエンテーション角を利用することによって、キャリブレーションパラメータを高精度に推定できる可能性を示している。Case-1はFaraday回転角の推定精度が不十分にみえるかもしれないが、Faraday回転行列とシステム歪行列を統合した $R_F = F \cdot R$ 、 $T_F = T \cdot F$ は良く一致している。Faraday回転角自体の推定は特に必要ない場合が多いので、統合行列 R_F 、 T_F を正しく推定できればキャリブレーションの目的は達成する。

4. むすび

2005年にALOS/PALSARの実現が期待される中、Lバンドに顕著な地上レーダ信号の干渉とクロストークキャリブレーションについて、汎用的に適用できる低コストな技術を提案した。特に偏波オリエンテーション角を応用する方法は、従来法に比べて仮定が少なく、さらに従来法では不適切な対象とされていた市街地を利用する。市街地は後方散乱が強く、ノイズの影響を受けにくいため、従来法に比べてより頑強な手法と期待できる。さらに、Faraday回転に対する対応範囲も従来法に比べて格段に広いという特徴がある。成果の詳細については、参考文献[9]~[13]を参照頂きたい。

謝辞

本研究に対して多大なご支援を頂きました高柳記念電子科学技術振興財団および本研究助成に関係された皆様に心から感謝申し上げます。

参考文献

- [1] M. Shimada, "JERS-1 CAL/VAL Activities," CEOS Cal.Val Newsletter, no.3, pp. 5-8, March 1994.
- [2] U. Wegmuller and C. Werner, "Gamma SAR Processor and Interferometry Software", The 3rd ERS Symposium, Florence, Italy, March 1997. Available: <http://earth.esa.int/workshops/ers97/papers/wegmuller2/index.html>.
- [3] J.S. Lee, K.W. Hopoel, S.A. Mango and A.R. Miller, "Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery," IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol. 32, no. 5, pp.1017-1028, 1994.
- [4] H.Kimura and N.Ito, "ALOS/PALSAR:The Japanese second-generation spaceborne SAR and its applications," Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment II, Proc. of SPIE, vol.4152, pp.110-119, 2000.
- [5] J. J. van Zyl, "Calibration of polarimetric radar images using only image parameters and trihedral corner reflector responses," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 28, pp.337-348, 1990.
- [6] S. Quegan, "A unified algorithm for phase and cross-talk calibration of polarimetric data - Theory and observations," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 32, pp.89-99, 1994.
- [7] J. S. Lee, D. L. Schuler, and T. L. Ainsworth, "Polarimetric SAR data compensation for terrain azimuth slope variation," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 38, pp. 2153-2163, 2000.
- [8] A. Freeman and S. Saatchi, "On the detection of Faraday rotation in linearly polarized L-band SAR backscatter signatures," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 42, pp.1607-1616, 2004.
- [9] H. Kimura, T. Nakamura and K. P. Papathanassiou, "Suppression of ground radar interference in JERS-1 SAR data," IEICE Trans. Commun., Vol.E87-B, 12, pp.3759-3765, 2004.
- [10] H.Kimura, T.Mizuno, K. Papathanassiou and I. Hajnsek, "Improvements of polarimetric SAR calibration based on the Quegan Algorithm," Proceedings of the 2004 International Geoscience and Remote Sensing, 184-187, 2004.
- [11] H. Kimura, K. P. Papathanassiou and I. Hajnsek, "Polarization Orientation Effects in Urban Areas on SAR Data Rotation," Proc. of the 2004 International Geoscience and Remote Sensing, pp.4863-4867, 2005.
- [12] H. Kimura, "Calibration of ALOS/PALSAR Polarimetric Data Affected by Faraday Rotation," Proc. of the 2004 International Geoscience and Remote Sensing, pp.3369-3372, 2005.
- [13] B.Rosen, 中野良平, シミュレーテッドアンテナリング基礎と最新技術, 人工知能学会誌, vol.9, no.3, pp.33-40, 1994.