

高分解能合成開口レーダ画像における スペックルの統計的特性

森川裕一¹・古津年章²・下舞豊志²

Characteristics of speckle statistics in high-resolution Synthetic Aperture Radar Images

Yuichi Morikawa¹・Toshiaki Kozu²・Toyoshi Shimomai²

Abstract: This letter deals with statistical analysis of speckle characteristics of a high-resolution synthetic aperture radar (Pi-SAR) images over Lake Nakaumi, Shimane and Tottori Prefectures. This method is based on the contrast between the observed normalized moment that is estimated by Pi-SAR data and the expected normalized moment that is assumed to follow the gamma distribution. A contrast index images obtained from these normalized moments show some significant features; the effective number of looks in Pi-SAR data is slightly less than the apparent number of looks, and the area including a man-made object is more emphasized in the index image than the original Pi-SAR image. In summary, it is suggested that this method enables us to distinguish various targets such as ground, water surface, and man-made objects.

Key words: Synthetic Aperture Radar, SAR, Speckle, Statistical Analysis

はじめに

SAR (Synthetic Aperture Radar) 画像では、多数の散乱体からの散乱波によって斑点模様が生じる。これは、コヒーレンス光学系の撮像画像に特有のものであり、この斑点模様はスペックルと呼ばれる。受信複素振幅の実部と虚部が互いに独立で、それぞれが平均ゼロのガウス分布に従い、かつ、位相が $[0, 2\pi]$ で一様分布するとき、スペックルは特定の

確率密度関数 (PDF) に従って分布する。一般に、スペックルを抑えるためにマルチルック処理などが行われる。しかし、スペックルは多数の散乱体からの散乱波の干渉によるため、必然的に散乱体の情報を含むことが推測される。このため、SAR 画像の解析方法として、スペックルの統計的定式化と SAR 画像からの統計的性質の推定が行われ、データ解析をはじめ検出・分類に活用されている (例えば、Doulgeris *et al.*, 2008 ; Tison *et al.*, 2004)。

¹ 島根大学総合理工学部 学際大学院 School of Science and Engineering, Shimane University, Matsue, 690-8504

² 島根大学総合理工学部 学際学術院 Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Matsue, 690-8504

受付日：2010年6月28日，受理日：2010年10月14日

SAR の特徴として高い分解能を有する点が挙げられ、さらなる高分解能化が見込まれる。高分解能化により植生、地面、人工物などの検出はより精細化されるが、発達したスペックルが成立つ範囲は極端に減少する。つまり、スペックルが従うと推測される統計的特性が複雑化する(諏訪ほか, 1995)。これらの統計的特性を用いることで、高分解能 SAR 画像からの散乱体の情報の抽出などが期待される。

本研究では新たに、高分解能 SAR における複雑化したスペックルと発達したスペックルの統計的特性の相違に着目した指標を用いる。この指標を用いて、汽水域を対象とした高分解能 SAR 画像におけるスペックルの統計的特性の解析を行う。

解析対象である観測画像は、(独)情報通信研究機構及び(独)宇宙航空研究開発機構によって開発された航空機搭載 SAR の Pi-SAR システム(Kobayashi *et al.*, 2000)により取得された画像を用いる。Pi-SAR の主要諸元を表 1 に示す。宍道湖・中海近辺において、Pi-SAR での観測が 2001 年から 2004 年までの各年 1 回ずつ計 4 回実施された。Pi-SAR を搭載した航空機のフライト方向と観測地域を図 1 に示す。本研究では、図 2 に示す 2001 年に観測された中海東部の SAR 画像について解析を行う。

表 1 Pi-SAR システムの主要諸元。

Table 1 Major parameters and performance of Pi-SAR system.

	X-band SAR	L-band SAR
Frequency	9.55 GHz	1.27 GHz
Transmit peak power	6.3 kW	3.0 kW
Transmit bandwidth	100 MHz	50 MHz
Incidence angle	10~75 deg. (Variable)	20~60 deg. (Fixed)
Polarization	HH/HV/VV	HH/HV/VV
Spatial resolution (4-look Processing)	1.5 m x 1.5 m	3.0 m x 3.0 m

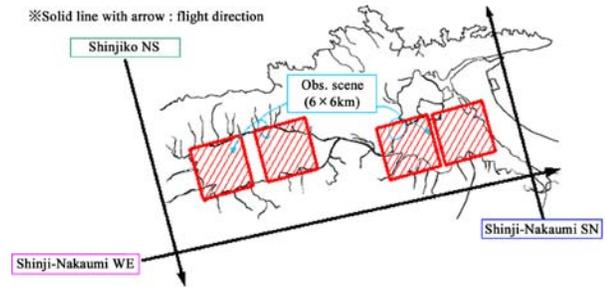


図 1 Pi-SAR による観測地域と航空機のフライト方向。

Fig. 1 Observation areas by Pi-SAR and aircraft flight direction.

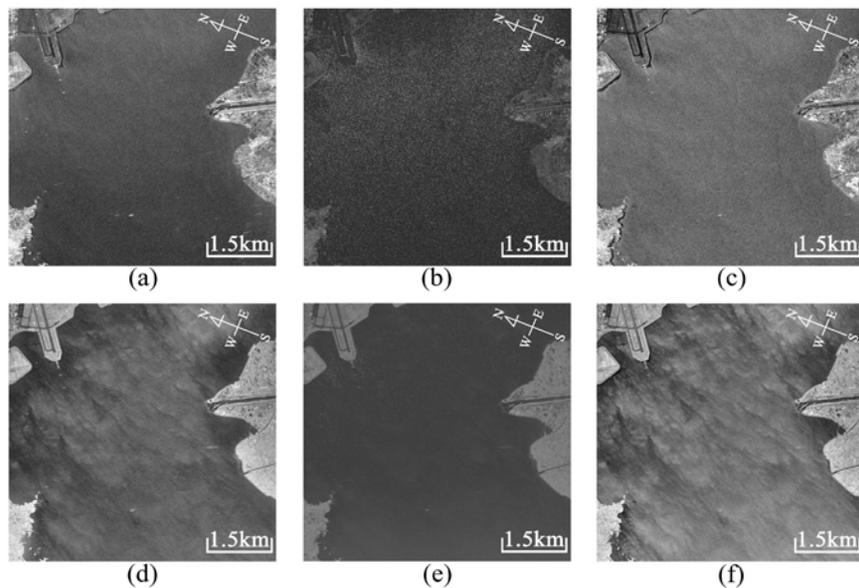


図 2 2001 年 11 月 10 日に観測された中海東部の SAR 画像。

(a)~(c) : L バンド, 偏波 : HH, HV, VV. (d)~(f) : X バンド, 偏波 : HH, HV, VV. 画素の輝度値は受信強度 I_4 に比例する。

Fig. 2 SAR Images of eastern Nakaumi observed on Nov. 10, 2001.

(a)~(c) : L-band, polarization : HH, HV, VV. (d)~(f) : X-band, polarization : HH, HV, VV. Brightness is proportional to received intensity I_4 .

規格化モーメントを用いた統計的特性の評価

Nルック処理のSARでの受信強度 I_N が発達したスペックルであるとき、スペックルは式(1)で表されるガンマ分布 $G_A(I_N; N, 2\sigma^2/N)$ に従う(大内, 2004). 式(1)では $2\sigma^2 = \langle I_N \rangle$ である. $\langle I_N \rangle$ は I_N の期待値を示す.

$$G_A\left(I_N; N, \frac{2\sigma^2}{N}\right) = \frac{NI_N^{N-1}}{(2\sigma^2)^N \Gamma(N)} \exp\left(-\frac{NI_N}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

本研究では、受信強度 I_4 がどのようなPDFに従うか、また、受信強度 I_4 の $G_A(I_4; 4, 2\sigma^2/N)$ からのずれを評価するために規格化モーメントを用いる. 確率変数 x が従うPDFを $p(x)$ と定義するとき、 n 次モーメント $\langle x^n \rangle$ の規格化モーメントは式(2)で定義される. ガンマ分布 $G_A(I_N; N, 2\sigma^2/N)$ の場合に各次数の規格化モーメントがとる値は式(3)より求まる(大内, 2004). 式(3)より求まる規格化モーメント E_N^n を期待モーメント、観測データから求められた規格化モーメントを観測モーメント O_N^n と本研究では呼ぶ.

$$\frac{\langle x^n \rangle}{\langle x \rangle^n} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x^n p(x) dx}{\left(\int_{-\infty}^{\infty} xp(x) dx\right)^n} \quad (2)$$

$$\frac{\langle I_N^n \rangle}{\langle I_N \rangle^n} = \frac{\Gamma(n+N)}{N^n \Gamma(N)} \quad (3)$$

観測モーメント O_N^n と期待モーメント E_N^n のずれ、つまり受信強度 I_4 の $G_A(I_4; 4, 2\sigma^2/4)$ からのずれを表す指標 M_N^n を式(4)に定義する.

$$M_N^n = 10 \log_{10} \left(\frac{O_N^n}{E_N^n} \right) \text{ [dB]} \quad (4)$$

指標 M_N^n を評価するにあたり、 $G_A(I_4; 4, 2\sigma^2/4)$ に従うとき指標 M_N^n が取り得る範囲を考える. $N=4$ の期待モーメント E_4^n と異なる N の期待モーメント E_N^n の比率 R_N^n を式(5)に定義する.

$$R_N^n = 10 \log_{10} \left(\frac{E_N^n}{E_4^n} \right) \text{ [dB]} \quad (5)$$

以下、 M_N^n と R_N^n を用いてSAR画像におけるスペックルの統計的特性の解析を行う.

結果と考察

指標 M_N^n を算出するプログラムを作成し、これにより指標 M_N^n を画素値とした画像を作成する. プログラムでは 2400×2400 , 4800×4800 ピクセルのL-bandとX-band SAR画像より 20×20 , 40×40 ピクセルをサンプルの1単位として指標 M_N^n を算出し、それぞれのサンプルを1ピクセルとした画像を作成することにより、結果として共に 120×120 ピクセルの画像が得られる. この画像を本研究では指標 M_N^n 画像と呼ぶ.

次数 n による指標 M_N^n 画像の違いを見るため、例として図2(a)に示すSAR画像を用いた次数 $n=2-6$ の指標 M_4^n 画像を図3に示す. 図3より、指標 M_4^n は高次ほど変動幅が大きい傾向にあるが、画像の様相、つまり、テクスチャ自体には大差がないと判断できる. 本研究ではテクスチャの解析を目的とするため、テクスチャの変化に対する画素値の変化が最大である次数 $n=6$ の指標 M_4^6 を用いる. この指標 M_4^6 画像を図4に示す.

図4に示された指標 M_4^6 の分布について検討を行った. 例として、図4(a)において指標 M_4^6 が $R_5^6 < M_4^6 < R_3^6$, $R_3^6 \leq M_4^6 < R_2^6$, $R_2^6 \leq M_4^6 < R_1^6$ の範囲に含まれる箇所を黒色、含まれない箇所を白色で表し図5にまとめる. このうち、図5(b)より湖面上では指標 M_4^6 は主に $R_3^6 \leq M_4^6 < R_2^6$ の範囲に含まれることが分かる. つまり、湖面では $2 \leq N \leq 3$ の $G_A(I_N; N, 2\sigma^2/N)$ に従うことが推測される.

過去に発表された研究より、海面における実効的なサンプル数 N の低下が知られている(Lee *et al.*, 1994). 表面波の時間的変動による独立サンプル数 N の増加も考えられるが、図5は湖面上においてルック数が低下していることを示し、これは以前より知られた結果に合致する. つまり、指標 M_4^6 を用いることでスペックルが従うPDFの推定が可能となる.

また、図2では見られた偏波による特徴的な差異は図4では現れない. さらに、図2では見られなかった周辺と比べ極めて大きな値を得る特徴的なピクセルが図4の湖面上に所々存在する. 例として、図6(b)に□で囲み示した特徴的なピクセルを挙げ

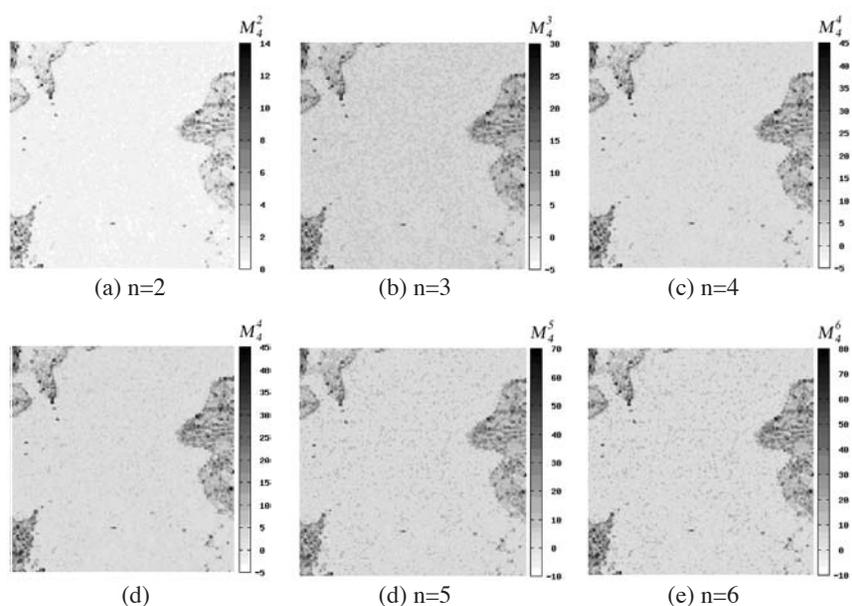


図3 図2(a)(Lバンド, HH)を基にした次数 n を2から6まで変化させた場合における指標 M_4^n 画像. 画素の輝度値は指標 M_4^n に反比例する.

Fig. 3 Index M_4^n images for orders $n=2$ to 6 that are based on Fig. 2(a)(L-band, HH). Brightness is inversely proportional to index M_4^n .

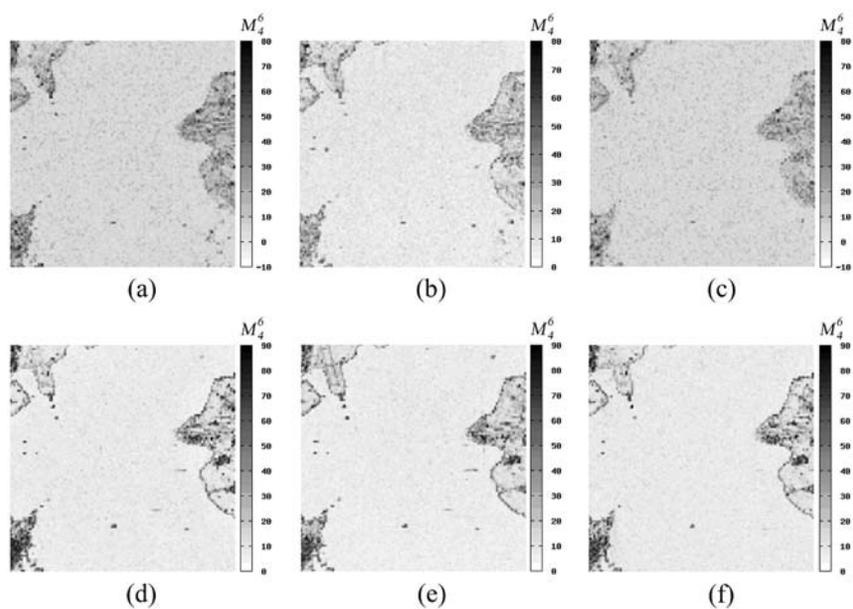


図4 2001年11月10日に観測された中海東部のSAR画像を基にした指標 M_4^6 画像. (a)~(c):Lバンド, 偏波: HH, HV, VV. (d)~(f): Xバンド, 偏波: HH, HV, VV. 画素の輝度値は指標 M_4^6 に反比例する.

Fig. 4 Index M_4^6 images that are based on SAR Images of eastern Nakaumi observed on November 10, 2001. (a)~(c): L-band, Polarization: HH, HV, VV. (d)~(f): X-band, Polarization: HH, HV, VV. Brightness is inversely proportional to index M_4^6 .

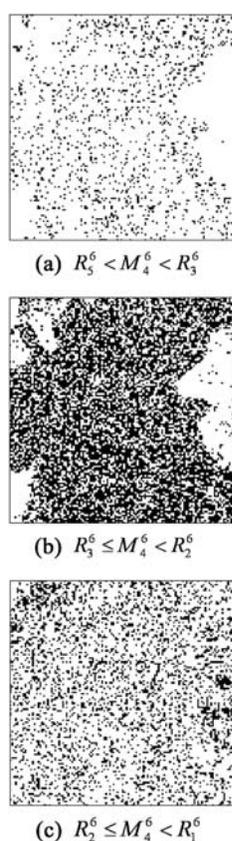


図5 図4(a)での異なる R_N^6 の範囲に M_4^6 が入る領域。

Fig. 5 Areas where M_4^6 is within different ranges of R_N^6 corresponding to Fig.4(a).

る。また、図6(b)で示した特徴的なピクセルと図6(a)に示すSAR画像における該当領域を3次元表示し、図6(c)~(d)に示す。

図6で示した箇所は北緯 $35^{\circ}27'48''$ 、東経 $133^{\circ}11'38''$ の地点を含み、これは中海湖心観測所の緯度経度と一致する(栗田ほか, 2004)。よって、図6に示した特徴点と同様の箇所、つまり、指標 M_N^6 の高い箇所は船舶や鉄塔などの人工物を含む可能性があることが推測される。また、図6(c)~(d)における中海湖心観測所を含むと推測される最大画素値と周辺の画素値の比率を比較すると、図6(d)が図6(c)よりも大きいことが明白である。これは、指標 M_4^6 画像(図4)はSAR画像(図2)よりもコントラストについて改善されていることを示す。

以上より、湖面からの人工物の検出が指標 M_4^6

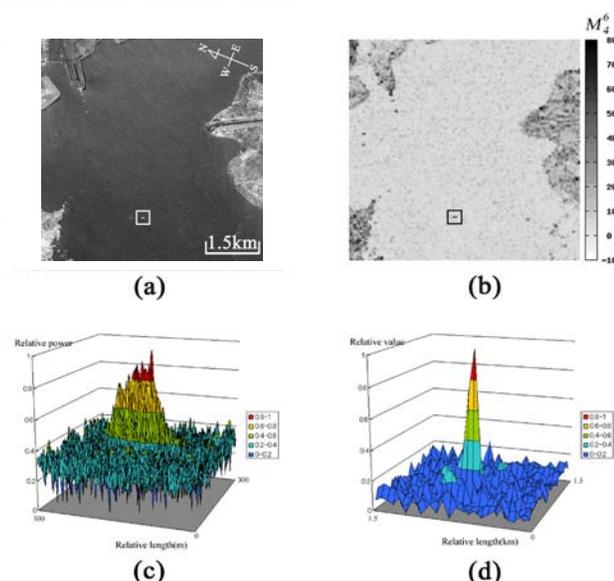


図6 SAR画像(Fig.2(a))及び指標 M_4^6 画像(Fig.3(a))に共通した特徴的な箇所の例：□で示す。

- (a) SAR画像 図2(a).
- (b) 指標 M_4^6 画像 図3(a).
- (c) SAR画像 図2(a)における特徴的な箇所の3次元表示.
- (d) 指標 M_4^6 画像 図3(b)における特徴的な箇所の3次元表示.
- (c)~(d) : 縦軸の目盛は、画像内における画素値と最大値との比率を表す。

Fig. 6 Examples of signature area that have common characteristics in SAR image (Fig. 2(a)) and in M_4^6 image (Fig. 3(a)), shown by □ .

- (a) SAR image (Fig. 2(a)).
- (b) Index M_4^6 image (Fig. 3(a)).
- (c) 3D-plot of signature area of SAR image (Fig. 2(a)).
- (d) 3D-plot of signature area of Index M_4^6 image (Fig. 3(a)).
- (c)~(d) : Vertical scale is the ratio of maximum to minimum value within each image.

画像を用いることにより、より高精度に行えることが示される。また、図4より陸上面は指標 M_4^6 が全体的に高く、陸上と湖面では異なる指標の分布となっている。このため、地上面での指標 M_4^6 の分布が人工物の有無、ひいては地上の被覆状況と関連していることが推測される。

結 論

Pi-SAR により得られた SAR 画像のスペックルの統計的特性を指標 M_4^6 を用いて評価を行った。この結果、湖面におけるサンプル数 N が低下し $2 \leq N \leq 3$ の $G_4(I_4; 4, 2\sigma^2/N)$ に従うことが推測された。これは、指標 M_4^6 と R_N^n を用いることでスペックルが従う PDF の推定が可能であることを示す。また、人工物を含む箇所の指標 M_4^6 は他の箇所と明確に異なるため、指標 M_4^6 画像は SAR 画像と比較してより容易に湖面からの人工物の検出が可能であることがわかった。このことに関連して、指標 M_4^6 が地上の被覆状況と関連していることが推測され、ターゲット検出をはじめ土地被覆分類などへの応用の可能性がある。

謝 辞

本研究にて使用した Pi-SAR による観測データは (独) 情報通信研究機構及び (独) 宇宙航空研究開発機構より提供されたものです。関係機関及び関係者の方々に感謝致します。

参 考 文 献

- Doulgeris, A. P., Anfinsen, S. N. and Eltoft, T. (2008) Classification with a non-gaussian model for PolSAR data. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 46: 2999-3009.
- Tison, C., Nicolas, J. M., Tupin, F. and Maitre, H. (2004) A new statistical model for markovian classification of urban areas in high-resolution SAR images. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 42: 2046-2057.
- Lee, J. S., Hoppel, K. W., Mango, S. A. and Miller, A. R. (1994) Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 32: 1017-1028.
- Kobayashi, T., Umehara, T., Satake, M., Nadai, A., Uratsuka, S., Manabe, T., Masuko, H., Shimada, M., Shinohara, H., Tozuka, H. and Miyawaki, M. (2000) Airborne dual-frequency polarimetric and interferometric SAR. IEICE Trans. Common., 83: 1945-1954.
- 大内和夫 (2004) 合成開口レーダの基礎. 東京電機大学

出版局.

- 栗田賢一・古津年章・下舞豊志・作野裕司・松永恒雄・中山大介・高安克己 (2004) 航空機搭載合成開口レーダによる宍道湖・中海観測；散乱係数の風速依存性とシグナチャ解析. LAGUNA, 11: 155-169.
- 諏訪啓・福田盛介・廣澤春任 (1995) ポラリメトリックな高分解能合成開口レーダ画像の統計的性質. 信学技報, 99: 47-54.