

편파화 정도와 동일 편파 위상 차를 이용한 SAR 영상 분류

Polarimetric SAR Image Classification Based on the Degree of Polarization and Co-Polarized Phase-Difference Statistics

장 지 성 · 오 이 석

Geba Chang · Yisok Oh

요 약

본 논문에서는 편파화 정도(Degree of Polarization: DoP)와 동일 편파 위상차(Co-polarized Phase-Difference: CPD)를 이용한 SAR 영상 분류법을 제안한다. 우선, 측정된 stokes 산란 operator로부터 DoP와 CPD를 얻는 계산식을 유도하고, SAR 영상 분류 과정을 설명한다. 다음에는 측정에서 얻은 완전 편파 L밴드 SAR 영상 데이터에 분류법을 적용하여 그 정확성을 검증하고, 예외 경우를 검토한다. 마지막으로 제안된 분류법으로 SAR 영상을 크게 4가지 그룹인 맨땅, 낮은 식물, 높은 식물, 주거 지역(마을)으로 분류한 결과를 보인다.

Abstract

This paper proposes a polarimetric SAR image classification technique based on the degree of polarization(DoP) and co-polarized phase-difference(CPD) statistics. At first, the formulation for the DoP and CPD is derived. Then, the classification technique is verified with the SAR full polarimetric L-band data with consideration of exceptional cases. The technique has capability of classifying SAR data into four major classes, such as bare surface, short-vegetation canopy, tall-vegetation canopy, and village.

Key words : Degree of Polarization, Co-Polarized Phase-Difference, SAR Image Classification

I. 서 론

SAR 영상을 분류하는 방법에는 감독법(supervised)과 무감독법(unsupervised) 알고리즘들이 있으며^[1], 완전 편파(polarimetric) SAR 영상의 무감독 분류법에는 entropy/alpha를 이용한 방법^[2]과 물리적인 산란 특성을 고려한 3-성분 분해(three-component decomposition) 방법^{[3],[4]} 등이 있다. Entropy/alpha 분류법은 상관 행렬에서 고유값/고유 벡터 분석을 통해 계산된 entropy와 alpha를 H/α 다이어그램에 적용하여 산란 특성별로 분류하는 방법이다. 이는 산란 크기와 동일 편파 위상차와 산란 메커니즘간의 혼합

정도를 이용한 방법으로 보편적으로 사용되고 있는 분류법이다. 3-성분 분해법은 이론적 모델을 기본으로 하여 전체 산란 상관 행렬을 단일 산란, 이중 산란, 체적 산란의 상관 행렬 합으로 가정하고, 이를 통해 나오는 방정식들을 계산하여 각각의 기여율을 구하는 방법이다. Entropy와 alpha를 이용한 분류법은 특성 분류에서 많은 장점이 있지만, 고유값과 고유 벡터를 구하는 과정에서 시간이 오래 소요되며, 정보가 거의 없는 교차 편파의 위상차까지 고려되지는 단점이 있다. 그리고 3-성분 분해법은 방정식을 계산할 때 사용되는 가정에 의해 오차가 있다. 이로 인해 상황에 따라서는 단일 산란과 이중 산란 성분

「본 연구는 국방과학연구소의 지원을 받은 KAIST의 전파탐지연구센터의 지원으로 수행되었다.」

홍익대학교 전자정보통신공학과(Department of Electronic Information and Communication Engineering, Hongik University)

· 논문 번호 : 20071001-107

· 수정완료일자 : 2007년 11월 21일

들이 음수 값을 가질 때가 있으며, 체적 성분의 크기가 대체적으로 크게 나타나는 단점이 있다. 이러한 단점들을 보완하기 위해 SAR 영상 분류법에 대해 많은 연구가 필요하며, 일반적으로 필터를 사용하거나 Wishart 분포를 사용한 무감독 분류법들이 연구되고 있다^{[5],[6]}.

본 논문에서는 편파화 정도(Degree of Polarization: DoP)와 동일 편파 위상차(Co-polarized Phase-Difference: CPD)^{[11],[7]}를 사용한 무감독 분류법을 제안한다. DoP는 다중 반사와 산란 메커니즘들의 혼합 정도와 관련이 많고, CPD는 주된 산란 메커니즘의 물리적 상태와 관련이 많다. DoP와 CPD를 다이어그램에 함께 나타내어 각각의 표본 영역들을 분류하고, 히스토그램을 살펴봄으로써 물리적 해석이 용이해졌다. II 장에서는 DoP와 CPD의 수식을 유도하고, III 장에서는 AIRSAR 영상 데이터를 이용하여 제안된 분류법을 검증/분석하고 영상 분류의 예외 경우들도 검토한다.

II. 수식 유도

2-1 편파화 정도

산란된 전기장 \vec{E}^s 는 일반적으로 다음과 같이 표시한다.

$$\vec{E}^s = E_v^s \hat{v} + E_h^s \hat{h} \quad (1)$$

여기서 v 와 h 는 수직 편파(vertical polarization)와 수평 편파(horizontal polarization)를 의미하고, 이 산란 전기장은 복소 산란행렬 \vec{S} 를 이용하여 아래처럼 표현된다^[8].

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_v^s \\ E_h^s \end{bmatrix} &= \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \begin{bmatrix} S_{vv} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_v^i \\ E_h^i \end{bmatrix} \\ &= \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \begin{bmatrix} S_{vv}E_v^i + S_{vh}E_h^i \\ S_{hv}E_v^i + S_{hh}E_h^i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 r 은 산란체와 수신 안테나간의 거리이며, k_0 는 전파상수이다. 후방 산란계수는 Stokes vectors \vec{F} 와 Stokes scattering operator \vec{M} 으로 다음과 같이 표현된다^[1].

$$\sigma_n^o = 4\pi \vec{F}^r \cdot \langle \vec{M} \rangle \vec{F}^t \quad (3)$$

위 식의 Stokes scattering operator \vec{M} 은 4×4 행렬이며, 산란 행렬과는 다음의 관계를 갖는다^{[1],[9]}. Stokes vector는 다음처럼 정의된다.

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle |E_v|^2 \rangle + \langle |E_h|^2 \rangle \\ \langle |E_v|^2 \rangle - \langle |E_h|^2 \rangle \\ \langle 2\text{Re}(E_v E_h^*) \rangle \\ \langle 2\text{Im}(E_v E_h^*) \rangle \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 $\langle \dots \rangle$ 는 앙상블 평균을 의미한다^[1]. 일반적으로, 부분적으로만 편파화된 (partially polarized) 전파는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$I^2 \geq Q^2 + U^2 + V^2 \quad (5)$$

이 때 부분적으로 편파화된 전파의 편파화 정도 (DoP)는 다음과 같이 정의된다.

$$DoP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (6)$$

수신 전파의 Stokes vector \vec{F}^r 는 식 (2)를 식 (4)에 대입하여 정리한 후에 r^{-2} 로 normalized된 형태로 다음처럼 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} I^r &= (|S_{vv}|^2 + |S_{hv}|^2) |E_v^i|^2 + (|S_{vh}|^2 + |S_{hh}|^2) |E_h^i|^2 \\ &\quad + 2\text{Re}\left\{ (S_{vv}S_{vh}^* + S_{hv}S_{hh}^*) E_v^i E_h^{i*} \right\} \\ Q^r &= (|S_{vv}|^2 - |S_{hv}|^2) |E_v^i|^2 + (|S_{vh}|^2 - |S_{hh}|^2) |E_h^i|^2 \\ &\quad + 2\text{Re}\left\{ (S_{vv}S_{vh}^* - S_{hv}S_{hh}^*) E_v^i E_h^{i*} \right\} \\ U^r &= 2\text{Re}\left\{ S_{vv}S_{hv}^* |E_v^i|^2 + S_{vh}S_{hh}^* |E_h^i|^2 \right. \\ &\quad \left. + S_{vv}S_{hh}^* E_v^i E_h^{i*} + S_{vh}S_{hv}^* E_h^i E_v^{i*} \right\} \\ V^r &= 2\text{Im}\left\{ S_{vv}S_{hv}^* |E_v^i|^2 + S_{vh}S_{hh}^* |E_h^i|^2 \right. \\ &\quad \left. + S_{vv}S_{hh}^* E_v^i E_h^{i*} + S_{vh}S_{hv}^* E_h^i E_v^{i*} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

또한, 위 식을 Stokes scattering operator \vec{M} 행렬과 송신 Stokes vector $\vec{F}^t = [I^t \ Q^t \ U^t \ V^t]^T$ 행렬을 사용하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I' &= \left((M_{11} + M_{22} + 2M_{12}) + (M_{33} + M_{44}) \right) \frac{(I' + Q')}{2} \\
 &\quad + \left((M_{11} + M_{22} - 2M_{12}) \right. \\
 &\quad \left. + (M_{33} + M_{44}) \right) \frac{(I' - Q')}{2} + (M_{31}U' + M_{41}V') \\
 Q' &= \left((M_{11} + M_{22} + 2M_{12}) - (M_{33} + M_{44}) \right) \frac{(I' + Q')}{2} \\
 &\quad + \left(-(M_{11} + M_{22} - 2M_{12}) \right. \\
 &\quad \left. + (M_{33} + M_{44}) \right) \frac{(I' - Q')}{2} + (M_{32}U' - M_{42}V') \\
 U' &= (M_{31} + M_{32})(I' + Q') + (M_{31} - M_{32})(I' - Q') \\
 &\quad + (M_{33} - M_{44})U' + M_{34}V' + (M_{33} + M_{44})U' \\
 V' &= -(M_{41} + M_{42})(I' + Q') - (M_{41} - M_{42})(I' - Q') \\
 &\quad - (M_{33} + M_{44})V' - M_{34}U' + (M_{33} - M_{44})V'
 \end{aligned} \tag{8}$$

DoP는 Stokes scattering operator 행렬 요소들의 값과 송신 Stokes vector 요소들의 값을 통해 나온 위식의 값을 식 (6)에 대입하여 계산할 수 있다. 송신 전파의 Stokes vector \bar{F} 는 다음의 형태로도 정의할 수 있다.

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = I \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\psi \cos 2\chi \\ \sin 2\psi \cos 2\chi \\ \sin 2\chi \end{bmatrix} \tag{9}$$

여기서 ψ 는 rotation angle이고, χ 는 ellipticity angle이다. 이때 송신하는 전파의 편파 특성에 따라서 다양한 DoP의 값을 구할 수 있다. 예를 들어 수평 편파를 송신했을 때에는 $\psi=0^\circ$, $\chi=0^\circ$ 이므로 I 로 normalized된 Stokes vector \bar{F} 는 $[1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ 이고, 수직 편파를 송신했을 때에는 $\psi=0^\circ$, $\chi=90^\circ$ 이므로 \bar{F} 는 $[1 \ -1 \ 0 \ 0]^T$ 이다. 따라서 수평 편파를 송신하게 되면, 식 (8)에 $[I' \ Q' \ U' \ V']^T = [1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ 를 대입하여 수신 전파의 Stokes vector를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I'_h &= (M_{11} + M_{22} + 2M_{12}) + (M_{33} + M_{44}) \\
 Q'_h &= (M_{11} + M_{22} + 2M_{12}) - (M_{33} + M_{44}) \\
 U'_h &= 2(M_{31} + M_{32}) \\
 V'_h &= -2(M_{41} + M_{42})
 \end{aligned} \tag{10a}$$

수직 편파를 송신하게 되면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 I'_v &= (M_{11} + M_{22} - 2M_{12}) + (M_{33} + M_{44}) \\
 Q'_v &= -(M_{11} + M_{22} - 2M_{12}) + (M_{33} + M_{44}) \\
 U'_v &= 2(M_{31} - M_{32}) \\
 V'_v &= -2(M_{41} - M_{42})
 \end{aligned} \tag{10b}$$

주로 다중 반사 영향이 DoP의 값을 좌우한다^[10]. 예를 들어 맨땅에서나 건물 등에서는 다중 반사가 적어 산란 메커니즘의 혼합도가 낮게 되어 DoP가 높게 나온다. 하지만 수풀 지형이나 구조가 복잡한 곳에서는 다중 반사가 커서 산란 메커니즘의 혼합도가 높게 나와 DoP가 낮게 나온다. 이러한 특성은 SAR 영상 분류에 좋은 요소가 된다.

2-2 동일 편파 위상차

후방 산란의 경우, 완전 편파 레이더 시스템으로 측정된 산란행렬 \bar{S} 는 다음처럼 $|S_{vv}|$, $|S_{hh}|$, $|S_{vh}|$, $\phi_c = \phi_{hh} - \phi_{vv}$ 과 $\phi_x = \phi_{vh} - \phi_{vv}$ 의 5개의 변수로 표현된다^[7].

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{vv} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{hh} \end{bmatrix} = e^{i\phi_{vv}} \begin{bmatrix} |S_{vv}| & |S_{hv}|e^{i\phi_x} \\ |S_{hv}|e^{i\phi_x} & |S_{hh}|e^{i\phi_c} \end{bmatrix} \tag{11}$$

여기서 가역정리에 의해서 S_{vh} 와 S_{hv} 는 같고, $\phi_c = \phi_{hh} - \phi_{vv}$ 는 hh-와 vv-편파간 위상 차이로서 동일 편파 위상차(CPD)로 부른다. 산란 행렬을 실수와 허수로 나누면 $S_{vv} = x_1 + ix_2$ 와 $S_{hh} = x_3 + ix_4$ 로 나타낼 수 있고, Stokes scattering operator 요소가 다음의 관계를 가지므로

$$\begin{aligned}
 \text{Re}\{S_{vv} \cdot S_{hh}^*\} &= x_1x_3 + x_2x_4 = (M_{33} - M_{44}) \\
 \text{Im}\{S_{vv} \cdot S_{hh}^*\} &= -x_1x_4 + x_2x_3 = -(M_{34} + M_{43})
 \end{aligned} \tag{12}$$

CPD는 다음과 같다.

$$\phi_c = \angle \frac{S_{hh}}{S_{vv}} = \tan^{-1} \left(\frac{x_1x_4 - x_2x_3}{x_1x_3 + x_2x_4} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{M_{34} + M_{43}}{M_{33} - M_{44}} \right) \tag{13}$$

표면 산란에서는 CPD가 0° 에 가깝고, dihedral 산란 형태의 이중 산란에서의 CPD는 180° 에 가깝다^[3]. 체적 산란의 CPD는 매우 다양한 형태를 갖는다. 이와 같은 특성으로 CPD는 SAR 영상 분류에 유용하게 사용될 수 있다. 하지만 DoP가 낮을 경우 CPD의

특징은 매우 다양한 형태를 나타내게 되고, CPD 분포의 분산이 크게 나타난다. 이러한 경우는 CPD 분석이 쉽지 않으며, 대부분 체적 산란 메커니즘에 해당된다.

III. AIRSAR 데이터

위에서 계산된 DoP와 CPD를 논산 일대와 가덕도 일대에서 JPL(Jet Propulsion Laboratory), AirSAR(Air-

borne SAR) 시스템을 사용하여 L-밴드 vv-, vh-, hv-, hh-편파(완전 편파 또는 quad-편파)에서 측정된 SAR 영상 데이터 분류에 적용하였다. 그림 1은 맨땅, 낮은 식물 층(논, 밭, 잔디 등), 높은 식물 층(나무 숲 등), 주거 지역(마을)의 표본 영역을 선정 후 400 픽셀 정도씩을 표본 추출하여 세로축으로는 DoP를, 가로축으로는 CPD를 각각 나타낸 것이다. 본 논문에서는 이 그림을 'DoP-CPD 다이어그램'이라고 칭

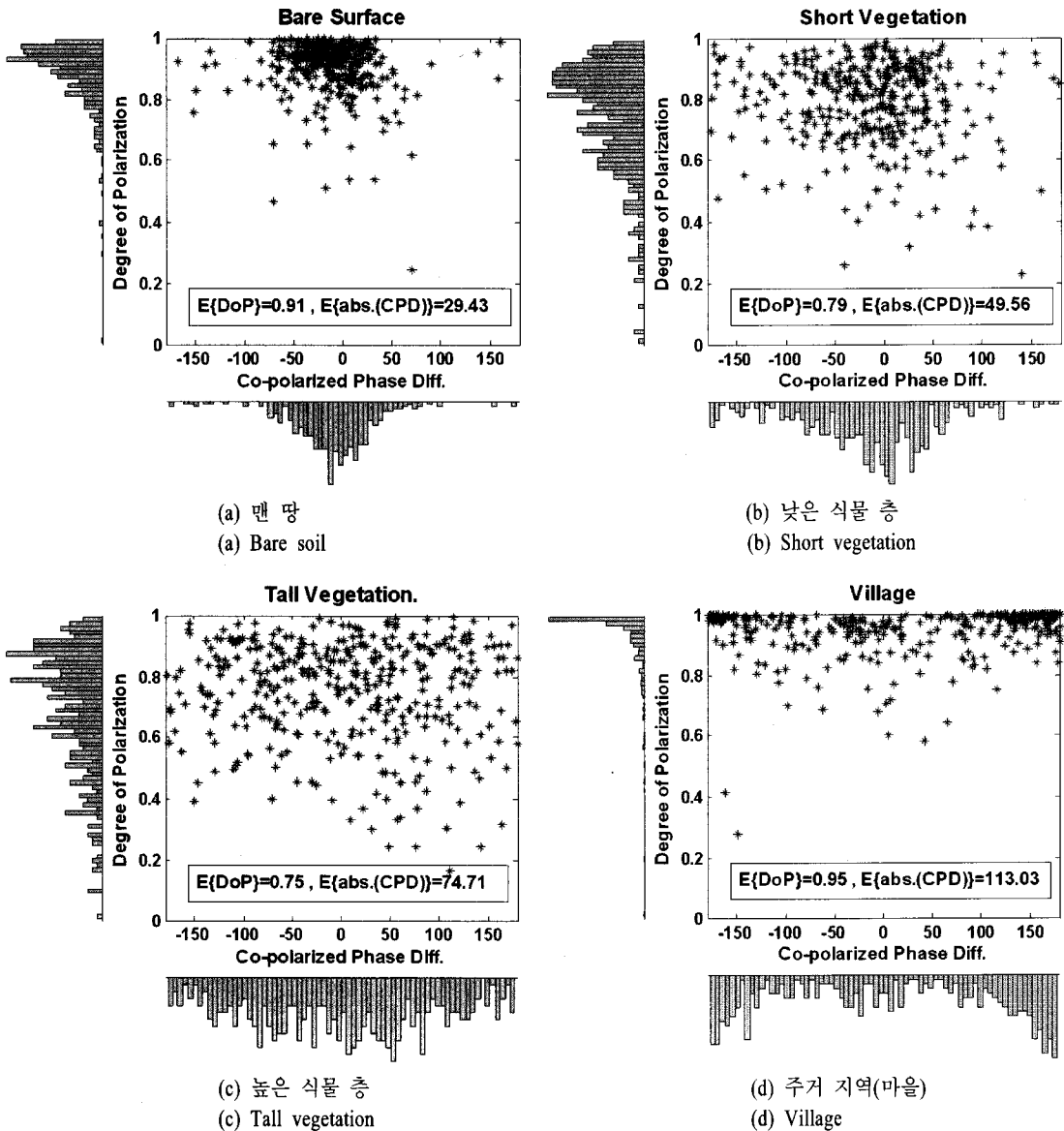


그림 1. AIRSAR 데이터의 표본 지역별 DoP-CPD 다이어그램
Fig. 1. DoP-CPD diagram for AIRSAR data of the each sample areas.

하기로 한다. 그림 1의 왼쪽에는 DoP의 히스토그램을, 아래 쪽에는 CPD의 히스토그램을 각각 보여주며, 그림 안의 박스에는 DoP 평균값과 CPD 절대치 평균값을 보여주고 있다.

그림 1(a)는 맨땅 지역의 DoP-CPD 다이어그램으로서 DoP가 상당히 높다. 이를 통해 이 영역에서는 다중 반사가 적게 일어남을 알 수 있고, 또한 CPD가 대부분 0°를 중심으로 분포되어 있으므로 표면 산란 특성이 크다고 할 수 있다. 그림 1(b)는 낮은 식물이 많은 밭 지역의 DoP-CPD 다이어그램으로서 그림 1(a)의 DoP와 비교하였을 때, 상당히 낮은 것을 확인할 수 있다. 즉, 이 영역에서는 다중 반사가 크고 산란 메커니즘들의 혼합도가 높은 것을 알 수 있다. 이때 CPD의 평균값은 0° 근처이지만 분산이 크므로 여러 산란 형태들이 섞여 있다고 볼 수 있다. 그림 1(c)는 키가 높은 식물이 많은 나무 숲의 DoP-CPD 다이어그램으로 DoP의 특성은 그림 1(b)와 비슷하지만, 숲의 나무들이 dihedral 같은 산란 특성을 갖기 때문에 CPD가 180° 주변에도 많이 분포되므로 CPD의 특성은 다른 것을 볼 수 있다. 일반적으로 숲의 CPD는 숲에 따라 매우 다양하게 나타나지만 잎의 밀도가 적고 나무의 밀도가 큰 경우에는 CPD가 전체적으로 균일하게 분포되는 경향이 있다. 그림 1(d)는 주거 지역(마을)의 DoP-CPD 다이어그램으로서 DoP의 평균이 큰 것으로 보아 다중 반사가 적음을 알 수 있고, CPD가 180° 근처에 많이 분포하는 것을 통해 건물의 dihedral 효과에 의한 이중 산란 현상이 많이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

그림 2는 표본 영역들을 식별하기 위한 분류 경계 값 설정을 보여준다. 그림 2(a)는 DoP의 경계 값을 보여 주고 있다. 흰 색 막대그래프는 맨 땅 표본 영역의 히스토그램이고, 검은 색 막대그래프는 낮은 식물 층의 히스토그램을 보여준다. 점선은 맨 땅의 polynomial-fitting 데이터이고, 이점쇄선은 낮은 식물 층의 polynomial-fitting 데이터이다. DoP 값이 0.85 지점에서 두 fitting 데이터가 겹치는 것을 볼 수 있다. 각각의 표본 영역에서, 전체 픽셀 DoP의 평균을 구하게 되면 0.85를 기준으로 맨 땅 영역과 낮은 식물 층 영역의 차이가 크다. 주거 지역(마을)과 높은 식물 층도 이와 같은 차이를 확인할 수 있다. 그림 2(b)는 CPD의 경계 값을 보여 주고 있다. 흰색 막대그

래프는 맨 땅 표본 영역의 히스토그램이고, 검은 색 막대그래프는 주거 지역(마을)의 히스토그램을 보여 준다. 점선은 맨 땅의 polynomial-fitting 데이터이고, 일점쇄선은 주거 지역(마을)의 polynomial-fitting 데이터이다. CPD 값이 ±60° 지점에서 fitting 데이터가 겹치는 것을 볼 수 있다. 각각의 표본 영역에서, 전체 픽셀의 절대 CPD의 평균을 구하게 되면 60°를 기준으로 맨 땅 영역과 주거 지역(마을) 영역의 차이가 크다. 높은 식물 층과 낮은 식물 층에서는 차이가 있으나 다소 적게 난다.

위 내용을 정리하면 (I) 맨 땅은 DoP 평균>0.85, CPD 절대 평균값<60°으로, (II) 낮은 식물은 DoP

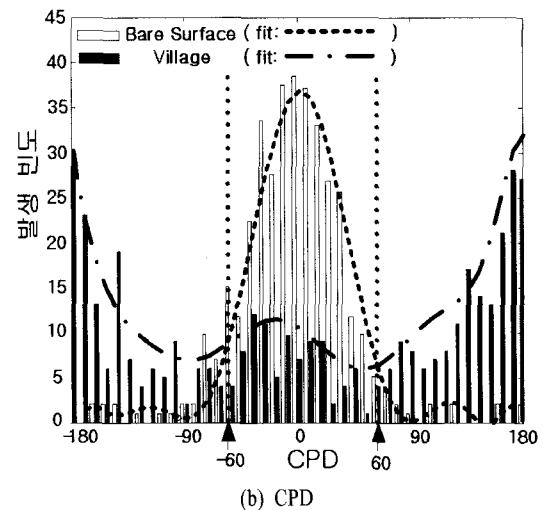
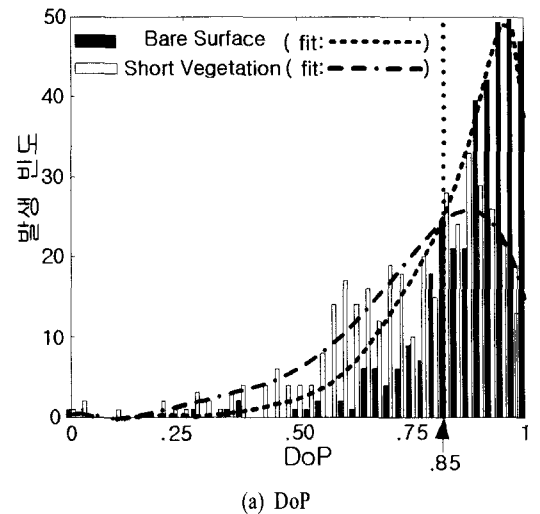


그림 2. 식별을 위한 분류 경계 값
Fig. 2. Boundary line values for classification.

평균<0.85, CPD 절대 평균값<60° 기준으로, (Ⅲ) 높은 식물은 DoP 평균<0.85, CPD 절대 평균값>60° 기준으로, (Ⅳ) 주거 지역(마을)은 DoP 평균>0.85, CPD 절대 평균값>60° 기준으로 분류하게 된다.

대부분의 표본 SAR 영상 데이터들은 4가지 군으로 분류가 잘 되었지만, 특성이 예외적인 경우를 확인할 수 있다. 우선, 그림 3(a)는 높은 식물이 많은 숲의 DoP-CPD 다이어그램이지만, 낮은 식물의 DoP-CPD와 비슷한 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이유는 나무의 잎의 밀도가 클 경우에는 앞에서 대부분이 반사되어 다중 반사의 영향이 크게 나타남으로 인해 나무기둥에 의한 dihedral 특성이 거의 나타나지 않기 때문이다. 그림 3(b)는 마을의 DoP-CPD 다이어그램을 나타내며, 그림 1(d)와 달리 DoP도 상당히 낮고, CPD도 분류하기 힘든 특성을 갖는 것을 볼 수 있다. 이유는 마을 건물들의 구조나 방향이 SAR 시스템의 안테나가 바라보는 방향에서 건물 정면이 아닌 모서리 방향일 경우에는 dihedral effect에 의한 반사보다는 다른 건물들과의 다중 반사에 의한 값이 크기 때문인 것으로 본다. 즉, 마을의 경우는 dihedral effect가 크게 나타나는 경우에 식별이 용이하다고 할 수 있다. 그림 3(c)는 벼의 DoP-CPD 다이어그램으로서 CPD 특성이 상당히 특이한 것을 확인할 수 있으며, 이는 L밴드의 파장과 벼의 길이 사이 관계에 의한 원인으로 추정된다. 또한, 벼의 분포가 균일하게 한 방향성을 갖게 될 경우, 특정 CPD값이 크게 나오는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

편파화 정도(DoP)와 동일 편파 위상차(CPD)를 이용한 SAR 영상 분류법을 제시하였다. DoP는 다중 반사와 산란 메커니즘의 혼합 정도와 관련이 있고, CPD는 주된 산란 메커니즘의 물리적 특성과 관련이 있다. 이 분류법은 완전 편파 L 밴드 AIRSAR 데이터를 이용하여 검증하였으며, 이 방법을 이용하여 SAR 영상을 크게 4가지 군으로 분류하였고, 예외의 경우를 검토하였다. 분류를 위해 DoP의 평균값과 CPD의 절대 평균값을 사용하였다. 이 분류법은 다른 분류 법과 비교하여 쉽게 계산할 수 있는 물리적인 요소들(DoP와 CPD)을 사용하여, DoP-CPD 다이

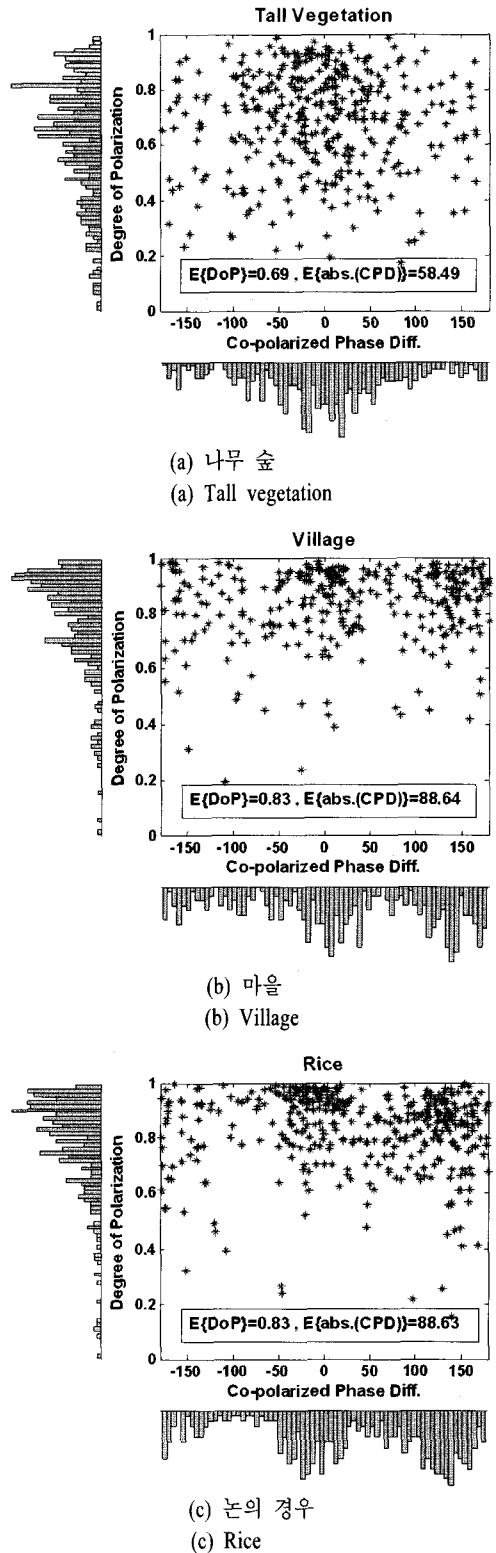


그림 3. AIRSAR 데이터의 DoP-CPD 다이어그램
Fig. 3. DoP-CPD diagram for AIRSAR data.

어그럼만을 통해 쉽게 분석할 수 있는 장점이 있다. 또한, 매우 다양한 형태의 동일 편파 위상차를 무시하지 않고 정확히 해석할 수 있는 장점이 있다. 이 분류법은 다른 주파수 밴드와 다른 SAR 영상에 적용해 볼 필요가 있고, DoP와 CPD의 분류 기준 값 및 특성에 대해 좀더 세밀한 검증이 필요하다.

감사의 글

저자들은 AIRSAR 영상을 제공해 준 연세대 원중선 교수께 감사한다.

참고 문헌

[1] F. T. Ulaby, C. Elachi, *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*, Artech House Remote Sensing Library, 1990.

[2] S. R. Cloude, E. Pottier, "An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 35, no. 1, pp. 68-78, Jan. 1997.

[3] A. Freeman, S. L. Durden, "A three-component scattering model for polarimetric SAR data", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 36, no. 3, pp. 963-973, May 1998.

[4] S. R. Cloude, E. Pottier, "A review of target decomposition theorems in radar polarimetry", *IEEE*

Trans., Geosci. Remote Sensing, vol. 34, no. 2, pp. 498-518, Mar. 1996.

[5] J. S. Lee, et al., "Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex wishart classifier", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 37, no. 5, pp. 2249-2258, Sep. 1999.

[6] J. S. Lee, et al., "Scattering-model-based speckle filtering of polarimetric SAR data", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 44, no. 1, pp. 176-187, Jan. 2006.

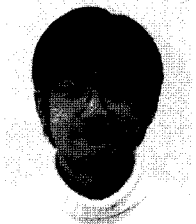
[7] F. T. Ulaby, K. Sarabandi, and A. Nashashibi, "Statistical properties of the Mueller matrix of distributed targets", *IEE Proceedings-F*, vol. 139, no. 2, pp. 136-146, Apr. 1992.

[8] G. Sinclair, "The transmission and reception of elliptically polarized waves", *Proc. IRE*, pp. 148-151, 1950.

[9] J. van Zyl, "On the importance of polarization in radar scattering problems", Ph. D. dissertation, Calif. Inst. Technol., Pasadena, CA, Dec. 1985.

[10] P. Elies, B. Le Jeune, P. Olivard, J. Cariou, and J. Lotrian, "The application of de-polarization analysis to polarimetric characterization and classification of metallic and dielectric samples", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, pp. 2520-2529, 1997.

장 지 성



2006년 2월: 홍익대학교 전자전기 공학과 (공학사)
 2006년 2월~현재: 홍익대학교 전자 정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사

오 이 석



1982년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
 1988년 12월: University of Missouri-Rolla, 전기 및 컴퓨터공학과 (공학석사)
 1993년 12월: University of Michigan, Ann Arbor, 전기공학 및 컴퓨터공학과 (공학박사)
 1994년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수
 [주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 안테나