

# 보정된 Scatterometer의 측정데이터를 사용한 SAR의 교정

정구준, 오이석

홍익대학교 전파통신공학과

[jgjun71@empal.com](mailto:jgjun71@empal.com), [yisokoh@hongik.ac.kr](mailto:yisokoh@hongik.ac.kr)

## SAR Data Correction Using Calibrated Scatterometer Measurements

Goo-Jun Jung, Yisok Oh

Department of Radio Science and Communication Engineering, Hongik University

### Abstract

In this paper, radar scattering coefficients of earth surfaces such as grass fields, rice fields and bare soil surfaces are measured by using an auto-mounted network analyzer-based scatterometer system. The scatterometer system is calibrated both the magnitude and phase in order to obtain the accurate Mueller matrices of the earth surfaces. Then the accurate scattering matrices can be obtain from the Mueller matrices. The degree of correlation  $\alpha$  is also obtained by this procedure and is used to correct AirSAR data which are not calibrated with phase variations.

Key words : SAR system calibration, scatterometer system calibration

### I. 서론

전 편파(Full-polarimetric, vv-, vh-, hh-, hv-) 레이더 시스템의 보정에 관한 주제는 많은 사람들에게 의해 연구되어져 왔다[1]. 특히 마이크로파 원격 탐사의 분야에서 정확히 보정된 시스템에 의한 측정의 문제가 정확한 모델링 및 측정된 값으로부터의 정성적 혹은 정량적인 지표면 변수를 추출해 내는데 중요한 역할을 하는 것은 너무나 당연하다. 그러므로 시스템을 구성하는 능동소자와 안테나의 편파별 채널간 간섭에 의해 발생하는 왜곡을 제거하는 것이 필요하고 또 그에 관한 기술 보정이 필요하게 되었다[2].

많은 사람들에게 의해 보정의 기술이 연구되어 왔으나 이는 많은 산란체들로 구성되어 있는 분포목표물 (distributed targets)에 대한 것이 아니라 하나의 산란자로 구성되어 있는 점목표물 (point targets)에 관한 것이었다[3]. 즉, 레이더 응답 값을 알고 있는 점목표물의 값을 분포목표물과 등가로

놓고 보정하는 방식이었다. 이 방식은 근사 정도가 심하여 분포 목표물에 대한 보정에 있어서 그 정확성에 의심을 받아왔다. 그러므로 본 논문에서는 이러한 근사를 최소화할 수 있는 정확한 보정기술을 소개하려 한다. 또한 기존의 방식들은 측정된 값의 크기에 대해서만 보정이 이루어지지만 본 논문에서는 그 위상의 변화에 대한 부분도 함께 보정의 과정에 포함하여 보정한다.

JPL/AirSAR의 측정데이터는 산란된 전계의 크기만을 측정하고 위상은 무시된다. 이에 따라 에러성분이 발생할 수 있고 그 데이터의 정확성에 문제가 발생한다[3, 4]. 그러므로 보정된 Scatterometer의 데이터의 위상정보를 SAR의 그것과 비교하여 SAR 영상의 교정이 필요하게 된다. 본 논문에서는 정확히 보정된 Scatterometer에 의해 측정된 데이터를 활용하여 SAR 데이터를 보정하는 방법을 소개한다.

### II. 본론

#### II-1. 이론

식물이나 눈 덮인 층, 혹은 맨땅을 포함하는 지표면은 확률적으로 균일한 성질을 갖는 불규칙한 매질로 간주할 수 있다. 레이더 산란 측정에 있어서 관심 있는 양은 단위 면적당의 산란 전계에 대한 통계적인 성질인 산란계수  $\sigma^0$  이고 이것은 다음과 같이 정의할 수 있다[5].

$$\sigma^0 = \lim_{r \rightarrow \infty} \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{4\pi r^2 \langle E^s E^i \rangle}{A |E^i|^2} \quad (1)$$

여기서  $E^i$ ,  $E^s$ 는 각각 입사된 전계와 산란된 전계를 나타내고 A는 안테나 빔이 조사된 영역을 나타내며 r은 관찰지점과 목표 지면과의 거리를 나타낸다. 위의 정의는 지면이 평면파에 의해 조사되었다는 가정 하에 정의된 것이다.

전 편파 레이더 시스템의 안테나 빔에 의해 조사된 평면의 분포목표물 지역을 가정하면 그림 1과 같다.

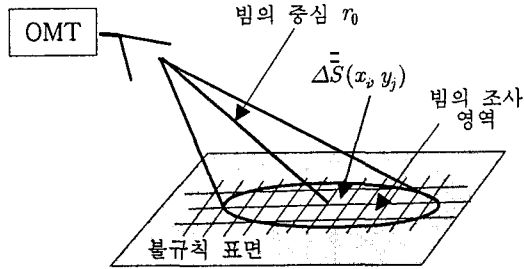


그림 1. 불규칙한 균질매질 평면으로 조사되는 안테나 빔과 부분으로 나누어진 각 픽셀

여기서 OMT(Orthogonal Mode Transducer)는 자체 제작한 것으로 안테나와 일체형으로 되어있고 Scatterometer의 측정 시에 사용되었다[6]. 안테나 빔이 조사된 영역을 유한개의 픽셀을 가지는 영역으로 나누고 ij위치에 있는 픽셀의 산란 행렬을  $\Delta \bar{S}(x_i, y_j)$ 로 놓는다.

이상적이지 않은 레이더 시스템과 안테나에 의해 측정된 산란행렬( $\bar{U}$ )과 점목표물의 산란행렬( $\bar{S}$ )의 관계식은 같이 된다.

$$\bar{U} = \frac{e^{2jk_0 r}}{r^2} \bar{R} \bar{S} \bar{T} \quad (2)$$

여기서  $\bar{R}$ ,  $\bar{T}$ 는 각각 수신과 송신의 2x2 왜곡 행렬이다. 또한, ij번째 픽셀에 대해 측정된 미분형 산란 행렬인  $\Delta \bar{U}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta \bar{U} = \frac{e^{2jk_0 r(x_i, y_j)}}{r^2(x_i, y_j)} \bar{R}(x_i, y_j) \begin{bmatrix} \Delta S_{vv}(x_i, y_j) & \Delta S_{vh}(x_i, y_j) \\ \Delta S_{hv}(x_i, y_j) & \Delta S_{hh}(x_i, y_j) \end{bmatrix} \bar{T}(x_i, y_j) \quad (3)$$

안테나 빔이 조사된 영역내의 모든 픽셀로부터의 후방산란 전계의 합은 다음과 같다.

$$\bar{U} = \sum_i \sum_j \frac{e^{2jk_0 r(x_i, y_j)}}{r^2(x_i, y_j)} \bar{R}(x_i, y_j) \Delta \bar{S}(x_i, y_j) \bar{T}(x_i, y_j) \quad (4)$$

미분형 Mueller 행렬을 구하기 위한 상관행렬은 다음과 같다[5].

$$\bar{W}^0 = \begin{bmatrix} \langle S_{vv}^{0*} S_{vv}^0 \rangle & \langle S_{vh}^{0*} S_{vh}^0 \rangle & \langle S_{vh}^{0*} S_{vv}^0 \rangle & \langle S_{vh}^{0*} S_{hh}^0 \rangle \\ \langle S_{vh}^{0*} S_{vh}^0 \rangle & \langle S_{hh}^{0*} S_{hh}^0 \rangle & \langle S_{hh}^{0*} S_{vv}^0 \rangle & \langle S_{hh}^{0*} S_{hh}^0 \rangle \\ \langle S_{vh}^{0*} S_{vv}^0 \rangle & \langle S_{hh}^{0*} S_{vh}^0 \rangle & \langle S_{hh}^{0*} S_{vv}^0 \rangle & \langle S_{hh}^{0*} S_{hh}^0 \rangle \\ \langle S_{vv}^{0*} S_{vv}^0 \rangle & \langle S_{vh}^{0*} S_{vh}^0 \rangle & \langle S_{vh}^{0*} S_{vv}^0 \rangle & \langle S_{vv}^{0*} S_{hh}^0 \rangle \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서  $\langle S_{pq}^{0*} S_{st}^0 \rangle = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\langle \Delta S_{pq}^* \Delta S_{st} \rangle}{\Delta A}$  이다.

레이더 시스템의 보정과 미분형 Mueller 행렬을 측정하기 위하여 식 (4)에의 2x2 행렬을 이에 대응하는 4개 성분의 벡터로 변환하여 사용 하게 된다 [2].

여기서 다시 목표가 통계적으로 균일한 물질로 구성되어 있으므로,  $\langle \Delta S_i \Delta S_i^* \rangle$ 는 조사된 영역에서 위치의 함수가 아니다. 그러므로 분포목표물에서 측정된 산란 행렬의 covariance 행렬의 각 요소들은 [2]에서와 같이 다음처럼 구할 수 있다.

$$\langle U_m U_n^* \rangle = \sum_{l=1}^4 \sum_{p=1}^4 \left[ \iint_A \frac{1}{r^4(x, y)} D_{ml}(x, y) \cdot D_{np}^*(x, y) dx dy \right] \langle S_l^0 S_p^{0*} \rangle \quad (7)$$

여기서,  $X_i = \langle S_i^0 S_p^{0*} \rangle$ ,  $i = 4(l-1) + p$  로 나타내고 식 (7)  $Y_j = \langle U_m U_n^* \rangle$ ,  $j = 4(m-1) + n$  을 다시 행렬식으로 쓰면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{Y} = \bar{B} \bar{X} \quad (8)$$

여기서  $\bar{B}$ 의 ij 번째 요소는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$b_{ij} = \iint_A \frac{1}{r^4(x, y)} D_{ml}(x, y) D_{np}^*(x, y) dx dy \quad (9)$$

여기서  $i = 4(l-1) + p$ ,  $j = 4(m-1) + n$ 이다.

미분형 Mueller 행렬은 구성요소가 상관벡터의 구성요소인 다음의 상관행렬  $\bar{W}^0$ 로부터 구해질 수 있다.

$$\overline{\overline{W}}^0 = \begin{pmatrix} X_1 & X_6 & X_2 & X_5 \\ X_{11} & X_{16} & X_{12} & X_{15} \\ X_3 & X_8 & X_4 & X_7 \\ X_9 & X_{14} & X_{10} & X_{13} \end{pmatrix} \quad (10)$$

II-2 보정 과정

$\overline{\overline{B}}$  행렬을 구하기 위해서는 안테나 시스템의 주위의 영역에 걸친 외곽 행렬을 알아야 한다. 그 뒤 보정  $\overline{\overline{D}}(x, y)$  행렬을 알아내고 난후 상관벡터 X를 구해낼 수 있다.

참고문헌 [2]에서 송신과 수신 왜곡 요소들은 다음에 수식과 같이 주어질 수 있다.

$$R_{vv} T_{vv} = r_0^2 e^{-2d_0 r_0} \frac{U_{vv}^s}{(1+C^2)\sqrt{\sigma^s/4\pi}}$$

$$\beta = \frac{R_{hh}}{R_{vv}} = \frac{2C}{(1+C^2)} \frac{U_{hh}^s}{U_{vh}^s}$$

$$\alpha = \frac{T_{hh}}{T_{vv}} = \frac{1+C^2}{2C} \frac{U_{vh}^s}{U_{vv}^s}$$

$$C = \pm \frac{1}{\sqrt{a}} (1 - \sqrt{1-a})$$

$$a = \frac{U_{vh}^s U_{hh}^s}{U_{vv}^s U_{hh}^s} \quad (11)$$

여기서  $\overline{\overline{U}}^s$ 는 특정한 방향인  $(\psi, \xi)$ 에서 보정되지 않은 구의 측정값을 나타낸다.

식 (11)에서 주어진 값들로 보정 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$\overline{\overline{D}}(x, y) = R_{vv} T_{vv} \begin{pmatrix} 1 & C\alpha & C & C^2\alpha \\ C & \alpha & C^2 & C\alpha \\ C\beta & C^2\alpha\beta & \beta & C\alpha\beta \\ C^2\beta & C\alpha\beta & C\beta & \alpha\beta \end{pmatrix} \quad (12)$$

측정 현장에서 우리는 능동 디바이스에 의한 변화를 얻기 위해서 오직 빔 중심에서의 구의 응답값만을 측정하면 된다. 빔 중심의 현장측정 값에 의해 보정된 값들에 프라임을 붙여서 식 (12)로 계산하면 필드에서의 측정값은 다음과 같다.

$$\tilde{r}_v \tilde{t}_v = \left(\frac{r_0'}{r_0}\right)^2 e^{2ik_0(r_0' - r_0)} \frac{R'_{vv}(0,0) T'_{vv}(0,0)}{R_{vv}(0,0) T_{vv}(0,0)}$$

$$\frac{\tilde{t}_h}{\tilde{t}_v} = \frac{T'_{hh}(0,0) T_{vv}(0,0)}{T'_{vv}(0,0) T_{hh}(0,0)}$$

$$\frac{\tilde{t}_h}{\tilde{r}_v} = \frac{R'_{hh}(0,0) R'_{vv}(0,0)}{R_{vv}(0,0) R_{hh}(0,0)} \quad (13)$$

식 (13)의  $R_{vv} T_{vv}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ 를  $R'_{vv} T'_{vv}$ ,  $\alpha'$ ,  $\beta'$ 로 다음의 관계식과 같이 바꾸어 주면 어느 방향으로의 보정행렬( $\overline{\overline{D}}(\psi, \xi)$ )도 구해낼 수 있다.

$$R'_{vv} T'_{vv} = \tilde{r}_v \tilde{t}_v R_{vv} T_{vv}, \quad \alpha' = \frac{\tilde{t}_h}{\tilde{t}_v} \alpha, \quad \beta' = \frac{\tilde{r}_h}{r_v} \beta. \quad (14)$$

모든 부분 픽셀에 대한 보정행렬을 구해 낸 뒤 식 (9)에 주어진 상관 보정 행렬( $\overline{\overline{B}}$ )를 구해 낼 수 있다. 방위각과 양각 좌표에서의 상관 보정 행렬은 다음의 형태를 갖는다.

$$b_{ij} = \iint_{\Omega} D_{mi}(\psi, \xi) D_{nj}^*(\psi, \xi) \frac{\cos^2 \psi \cos(\theta_0 + \xi)}{h^2} d\psi d\xi \quad (15)$$

그러므로 보정에 의해 구해진 후방산란계수는 다음의 블록도에 따르는 순서로 이루어진다.

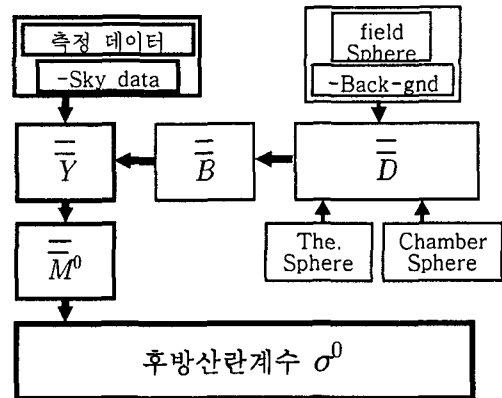


그림 2. 보정된 후방산란계수를 구하기 위한 전체 흐름도

보정 과정에 의해 구해진 정확한 Mueller 행렬에 의해 분포 목표물의 위상 차이의 통계치를 구해서 비교해 보려한다. 여기서 위상차의 pdf(probability density function)는 참고문헌 [7]에서 정의된 다음의 두 값으로 나타낼 수 있다. 여기서  $\alpha$ 는 degree of correlation이고,  $\zeta$ 는 co-polarized phase difference이다. 이 변수들은 hh-편파와 vv-편파의 위상 차이에 대한 위상변수들이다.

$$\alpha = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(M_{33} + M'_{44})^2 + (M_{34} - M_{43})^2}{M_{11} M_{22}}} \quad (16)$$

$$\zeta = \tan^{-1} \left( \frac{M_{34} - M_{43}}{M_{33} + M_{44}} \right) \quad (17)$$

### III. 보정 실행 및 비교

그림 3은 Chamber 내에서 구의 응답 특성을 측정하기 위한 장비의 배치를 나타낸다.

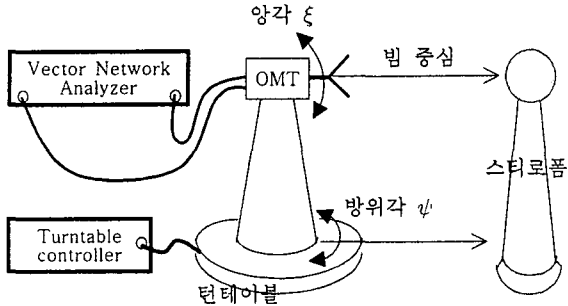


그림 3. 도체 구의 응답 측정을 통한 안테나 polarimetric 패턴 측정 방법

새로운 보정기술을 시행해 보기 위해서 차량 탑재형 C-밴드 (5.3 GHz) OMT장착 scatterometer를 사용하여 눈, 잔디밭, 맨땅 지표면의 각 편파 응답을 측정하였다. 이것을 측정하기 이전에 OMT scatterometer는 Chamber에서 보정되었다. 구의 측정은 C-밴드에서 빔의 중심에서의 수평각과 수직각을 각각  $\pm 10.5^\circ$  범위에서  $1.5^\circ$ 의 간격으로 측정되었다. 또한 구의 후방의 영향을 제거함으로써 SNR을 높이기 위해서 구를 제거한 상태에서도 측정되었다. 측정 현장에서 목표물의 측정 시에도 스카이다이터를 사용 이를 측정 데이터에서 뺀 후 사용하였다.

다음 그림 4는 Chamber내에서 측정한 구의 표준화된 이득 패턴과 동일 편파의 위상차와 교차 편파의 위상차를 안테나의 주 빔 내에서 나타낸 그래프이다.

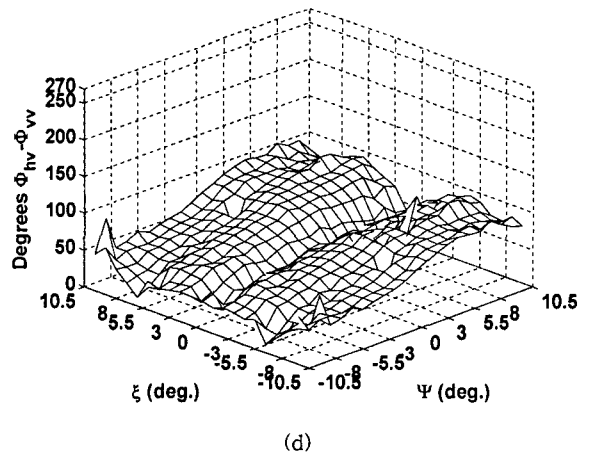
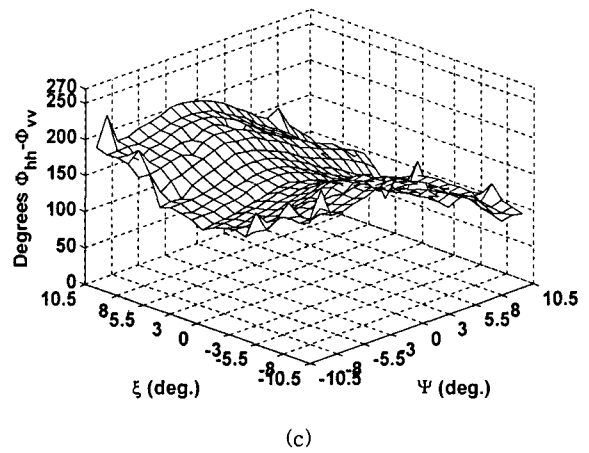
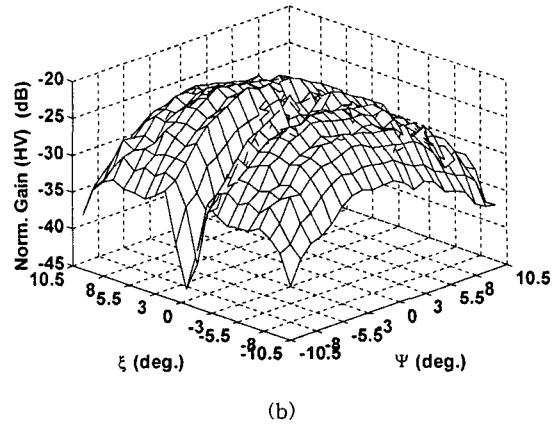
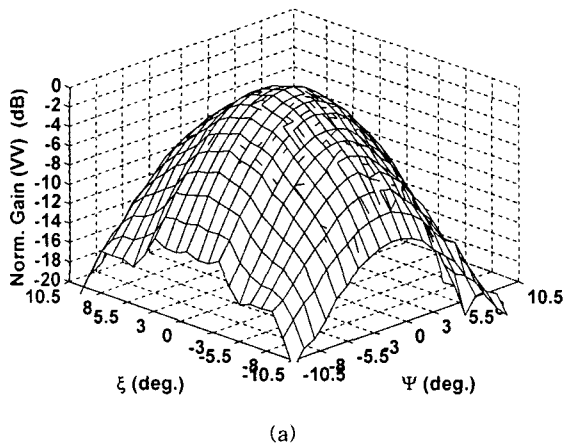


그림 4. C-band scatterometer의 주 빔 내에서 측정한 구의 편파 응답 (a) normalized  $\sigma_{vv}$  (b) normalized  $\sigma_{hv}$  (c) 동일 편파의 위상차 (d) 교차 편파의 위상차

또한 측정 현장에서 구는 빔의 중심에서 한 번 측정하였다. 또한 측정 현장에서의 구의 측정값도

스카이 데이터를 빼줌으로써 SNR을 높여주었다.

표 1에서는 입사각에 따른 Scatterometer의 보정된 측정값과 SAR데이터의 같은 종류의 데이터 지역에서의 위상 차이를 보여주고 있다. SAR 데이터의 위상 변수 (degree of correlation) 값이 더 작으므로 SAR에 이 값들을 더해 줌으로써 SAR 데이터를 보정할 수 있다. 이 위상 변수 (degree of correlation)는 hh-편파와 vv-편파간 위상 차이를 random 변수로 하여  $N$  측정 samples에서 pdf를 구하고 표준편차의 크기를 정량화한 변수이다[7]. 예를 들면, 0도에서는 hh-편파와 vv-편파 측정 위상 값이 같으므로 degree of correlation 값은 1이 된다. 이 측정 값이 scatterometer에서 SAR보다 높은 것은 scatterometer는 위상차까지 보정되었지만, SAR 시스템은 위상차까지는 보정이 덜되었다는 증거가 된다.

표1. Degree of correlation 비교.

구분	inc. ang.	$\alpha$ 측정값		차이
		Scatt.	SAR	
bare	40°	0.48	0.13	0.35
rice	50°	0.41	0.15	0.26
	60°	0.39	0.13	0.26
grass	50°	0.23	0.18	0.05

표 2에서는 같은 지역의 후방산란계수에 대한 비교이다. 후방산란계수는 이 경우 60°를 제외한 경우 약 1dB 내의 오차 밖에는 없다는 것을 보이고 있다. 이는 SAR 시스템과 지상 scatterometer 간의 산란계수 차이는 없지만, 위상의 차이는 크다는 것을 보여준다.

표 2. 산란계수 비교.

구분	inc. ang.	VV		HH		HV		차이
		scatt	SAR	scatt	SAR	scatt	SAR	
bare	40	-8.0	-9.3	-9.3	-9.9	-18.3	-16.7	1
rice	50	-12.9	-11.2	-11.0	-8.7	-18.7	-17.9	1
	60	-14.3	-9.8	-13.5	-9.9	-20.8	-18.2	2
grass	50	-12.5	-13.6	-13.5	-11.8	-20.9	-20.6	1

#### IV. 결론

본 논문에서는 지표면의 편파별 후방산란 측정의 보정을 위한 방법을 제시하였다. 안테나 주 빔에 결

친 레이더 왜곡을 정의함으로써 정확한 미분형 Mueller 행렬을 구할 수 있었다. 또한 이를 통해 정확한 후방산란계수를 구할 수 있었다. 정확히 보정된 Scatterometer의 데이터를 사용하여 SAR 데이터의 보정도 수행할 수 있었다. 특히 기존의 SAR 시스템은 정확하게 위상을 보정해주지 않기 때문에 fully-polarimetric하게 산란계수 크기와 위상변수를 동시에 보정한 지상의 scatterometer를 이용하여 SAR 시스템을 더욱 정확하게 보정할 수 있다는 것을 보여준다.

#### 참고문헌

- [1] K. Sarabandi and F. T. Ulaby, "A Convenient Technique For Polarimetric Calibration of Single-Antenna Radar Systems", *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, Vol. 28, No. 6, Nov. 1990.
- [2] K. Sarabandi, Y. Oh, F. T. Ulaby, "Measurement and Calibration of Differential Mueller Matrix of Distributed Targets", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 40, Dec. 1992.
- [3] K. Sarabandi et al, "Cross-Calibration Experiment of JPL AIRSAR and Truck-Mounted Polarimetric Scatterometer", *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, Vol. 32, No. 5, Sept. 1994.
- [4] K. Sarabandi, "Calibration of a Polarimetric Synthetic Aperture Radar Using a Known Distributed Target", *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, vol. 32, May. 1994.
- [5] F. T. Ulaby, C. Elachi, *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*, Artech House, Inc., 1990.
- [6] 홍진영, *Ka-밴드 마이크로스트립 배열 안테나 설계*, 홍익대학교 대학원 석사논문, Dec. 2001., pp. 41-46, Appendix.
- [7] K. Sarabandi, "Derivation of Phase Statistics from the Mueller Matrix", *Radio Sci.*, vol. 27, Sept.-Oct. 1992.