C-밴드 완전 편파 측정용 스캐터미터 시스템 보정 기술 검증

Verification of a Calibration Technique for a Full-Polarimetric Scatterometer System at C-band

박신명 · 고주석 · 주정명 · 김희영 · 김주희 ·
황지환 · 권순구 · 신종철 · 오이석Sin-Myeong Park · Joo-Seoc Go · Jeong-Myeong Joo · Hee-Young Kim ·
Ju-Hui Kim · Ji-Hwan Hwang · Soon-Gu Kwon · Jong-Chul Shin · Yisok Oh

요 약

본 논문에서는 미소 물리 행렬 보정법(differential Mueller matrix calibration technique: DMMCT)을 이용하여 C-밴드의 지상운용용 HPS(Hongik Polarimetric Scatterometer) 시스템을 보정한 연구 결과를 선보인다. 스캐터미터 시스템 보정을 위해 금속구를 이용하여 안테나 주빔에서의 편파 측정된 안테나 패턴을 챔버에서 측정하고, DMMCT를 이용하여 지상운용용 HPS의 왜곡 정도를 분석하여 정확하게 보정한다. 단일 편파 시스템과는 다르게 완전 편파 시스템에서는 후방 산란 계수뿐만 아니라 위상 변수들도 중요하다. 보정된 지상운용용 HPS를 이용하면 논, 맨땅, 작물밭 등의 지표면에 대한 정확한 Mueller 행렬을 얻을 수 있으므로, 후방 산란 계수뿐만 아니라 동일 편파와 교차 편파의 위상 변수들도 정확하게 측정하게 된다. 보정의 정확도는 산란 모델을 이용해 계산한 후방 산란 계수와 측정된 후방 산란 계수의 비교로 확인할 수 있다. 따라서 측정으로 잦기질 한 밭의 편파 응답 특성을 얻었으며, 이 결과를 이론 모델로 얻은 편파 응답 특성과 비교하여 보정 기술을 검증하였다.

Abstract

This paper presents a study on the calibration of a C-band HPS(Hongik Polarimetric Scatterometer) system using the DMMCT(Differential Mueller Matrix Calibration Technique). For calibration of the polarimetric scatterometer system, a fully-polarimetric antenna pattern(magnitudes and phase-differences) of the antenna main-beam is measured using a conducting sphere at anechoic chamber. The polarimetric scatterometer system could be accurately calibrated after retrieving its distortions using the DMMCT. Unlike a single-polarimetric system, in a fully-polarimetric system, not only backscattering coefficients but also phase differences are important parameters. This calibrated HPS system can be used to measure accurate Mueller matrices of bare soil surfaces, rice paddies, and vegetation fields. The phase-difference parameters as well as the backscattering coefficients for co- and cross-polarizations can then be obtained. The accuracy of calibration was verified by comparing the measured backscattering coefficients with a scattering model. The measured polarization response of a plowed bare field was also compared with the polarization response which was synthesized using a polarimetric scattering model for verifying the calibration technique.

Key words : Polarimetric Scatterometer, Differential Mueller Matrix, Calibration Technique, Backscattering Coefficient, Phase-Difference, Polarization Response

「본 논문은 국방광역감시 특화연구센터 프로그램의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 게재되었음(No.2012-09-007).」

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

· Manuscript received June 27, 2012 ; Revised July 30, 2012 ; Accepted September 4, 2012. (ID No. 20120627-075)

· Corresponding Author : Yisok Oh (e-mail : yisokoh@hongik.ac.kr)

I. 서 론

최근 국내외로 완전 편파 SAR(synthetic aperture radar) 시스템의 개발 및 운용이 늘어나면서 시스템의 정확한 보정에 관한 관심도 높아지고 있으며, 지상운용용 스캐터미터를 이용한 비교 연구도 활발해지고 있다. 스캐터미터 시스템은 산란계수를 정확하게 측정하는 장비이며, 측정시 온도, 습도 등의 주위 환경의 영향을 받기 때문에 정확히 측정된 값의 위상 성분과 후방 산란 계수를 얻기 위해서는 보정을 수행해야 한다^[1]. 일반적으로 사용하는 보정법은 크게 두 가지로 구분된다. 점 목표물(point target)을 이용하는 보정법과 분포 목표물(distributed target)을 이용하는 보정법이다. 점 목표물을 이용하는 보정법으로는 STCT(Single Target Calibration Technique)나 GCT(General polarimetric radar Calibration Technique) 등이 있다^{[2],[3]}. 점 목표물에 관한 보정 알고리즘은 후방 산란 계수의 크기는 정확하게 보정할 수 있지만 위상 변수는 보정할 수 없으며, 에러를 포함하고 있다. 많은 분포된 산란체로 구성되어 있는 분포 목표물에 대한 보정 알고리즘은 하나의 산란체로 구성되어 있는 점 목표물에 관한 보정 알고리즘보다 과정이 복잡하지만 후방 산란 계수의 크기와 위상 보정에 있어 정확성을 보유하고 있다^[4]. 단일 편파 시스템과는 다르게 완전 편파 시스템에서 위상 변수는 중요한 변수로서 작용한다. 완전 편파 시스템에서는 편파 간의 위상차를 통해 많은 지표면 정보를 얻을 수 있기 때문에 위상 보정이 중요하다^[5].

본 논문에서는 DMMCT(differential Mueller matrix calibration technique)^[6]와 지상운용용 HPS(Hongik polarimetric scatterometer) 시스템을 이용한 실제 보정 결과를 소개한다. 금속구를 이용한 챔버 측정 데이터와 실외 측정 데이터를 이용하여 HPS 시스템을 보정하고, 지표면의 정확한 완전 편파 측정 데이터를 얻는다. 보정 목표물로는 점 목표물인 반지름 15.2 cm 금속구와 분포 목표물인 벼 벼논, 쟁기질한 논을 이용하였다. 보정 후 분포 목표물의 후방 산란 계수와 산란 모델을 통해 구한 후방 산란 계수를 비교 분석한다. 비교 분석할 산란 모델은 Oh's model^[7]을 이용하였다. 또한, 보정 후 분포 목표물의 후방 산란 계수의 편파 응답 특성(polarimetric response)^[1]과 산

란 모델을 통해 구한 후방 산란 계수의 편파 응답 특성을 비교 분석해 본다.

II. 이론적 배경

점 목표물(point target)을 이용하는 보정법^[8]에서는 우선 안테나의 패턴 크기(magnitude)를 이용하여 입사 빔 적분(illumination integral) A_{ill} 을 구하고, 이 값을 이용하여 분포 목표물에 대한 레이더 방정식을 이용하여 완전 편파 시스템을 보정한다^[1].

$$P_r = P_t \frac{G_0^2 \lambda^2 \sigma^0}{(4\pi)^3} A_{ill} \quad (1a)$$

여기서,

$$A_{ill} = \int_{\text{illum. area}} \frac{g^2(\theta, \phi)}{R^4(\theta, \phi)} ds \quad (1b)$$

P_r, P_t : 수신, 송신 전력

G_0 : 안테나 최대 이득

λ : 파장

σ^0 : 산란계수

R : 목표물까지 거리

이 방법으로 후방 산란 계수를 얻는 데에는 문제가 없으나, 위상 차이 변수들을 정확하게 얻기는 어렵다. 왜냐하면, 보통은 안테나 패턴 크기만 측정하므로, 정면(bore-sight)이 아닌 경우에도 위상이 정면의 것과 같다고 가정하기 때문이다. 따라서 정확하게 보정하기 위해서는 ij -픽셀(앙각 방향으로 i 번째, 방위각방향 j 번째 픽셀)으로에 해당하는 미소 면적(differential surface)을 고려하여 그 미소 면적에 대한 완전 편파 특성을 구해야 하고, 이에 해당하는 미소(differential) Mueller 행렬을 소개해야 한다^[6].

각 미소 면적에 대한 레이더 안테나 편파 특성을 얻기 위해 금속구를 위치하고, 안테나를 수직과 수평으로 방향을 틀며 2-D 완전 편파 특성을 측정한다. 이 챔버 측정 완전 편파 특성은 실외 현장에서 측정된 금속구 특성에 의해 표준화되어 스캐터미터 시스템의 송수신 왜곡 정도를 나타내는 왜곡 행렬(distortion matrix) $\overline{\overline{D}}$ 을 얻는 데에 사용된다.

지상운용용 스캐터미터를 이용하여 측정된 산란

행렬($\bar{U}$)는 각 픽셀(미소면적)에 대한 이상적인 2×2 산란 행렬($\Delta \bar{S}$)의 합으로 표현할 수 있으며, 이때 수신과 송신 과정에서 발생하는 2×2 신호 왜곡 행렬들($\bar{R}$ 과 $\bar{T}$)이 곱해진 형태로 아래처럼 표현된다^[6].

$$\begin{aligned}\bar{U} &= \sum_j \sum_i \bar{R}(x_i, y_j) \Delta \bar{S}(x_i, y_j) \bar{T}(x_i, y_j) \\ &= \sum_j \sum_i \bar{R}(x_i, y_j) \cdot \begin{bmatrix} \Delta S_{vv}(x_i, y_j) & \Delta S_{vh}(x_i, y_j) \\ \Delta S_{hv}(x_i, y_j) & \Delta S_{hh}(x_i, y_j) \end{bmatrix} \bar{T}(x_i, y_j) \quad (2)\end{aligned}$$

여기서 아래 첨자 v 와 h 는 편파를 나타내며, $\hat{v}$ 와 $\hat{h}$ 는 전파전파 방향에 의해 결정되는 단위 벡터이다.

미소 Mueller 행렬(4×4)을 이용하기 위해 위 식의 측정된 산란 행렬($\bar{U}$)을 1×4 벡터로 바꿀 수 있고, 2×2 미소 산란 행렬도 1×4 벡터로 변환할 수 있다. 이 변환 과정에서 시스템의 왜곡 정도를 나타내는 4×4 왜곡 행렬 $\bar{D}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 행렬의 각 원소들은 수신과 송신 시스템의 왜곡 행렬 $\bar{R}$, $\bar{T}$ 의 원소들의 곱으로 나타낼 수 있다^[6].

$$\bar{D}(x_i, y_j) = \begin{bmatrix} R_{vv}T_{vv} & R_{vv}T_{vh} & R_{vh}T_{vv} & R_{vh}T_{vh} \\ R_{vv}T_{hv} & R_{vv}T_{hh} & R_{vh}T_{hv} & R_{vh}T_{hh} \\ R_{hv}T_{vv} & R_{hv}T_{vh} & R_{hh}T_{vv} & R_{hh}T_{vh} \\ R_{hv}T_{hv} & R_{hv}T_{hh} & R_{hh}T_{hv} & R_{hh}T_{hh} \end{bmatrix} \quad (3)$$

레이더 산란계수는 산란 행렬 요소들의 곱의 평균으로 얻을 수 있으므로, 미소 Mueller 행렬도 이들 미소 산란 행렬 벡터 요소들의 곱(cross-product)의 통계적 평균(ensemble average)으로 얻을 수 있다. 결국 측정된 산란 행렬(보정되기 전)의 교차 곱(cross-product)은 4×4 행렬 $\bar{Y}$ 이 되고, 미소 Mueller 행렬(보정된 후)은 4×4 행렬 $\bar{X}$ 로 표현할 수 있는데, 교차 곱을 나타내기 위해 1×16 벡터로 표현하게 되고, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{Y} = \bar{B} \bar{X} \quad (4a)$$

여기서,

$$\bar{Y} = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_{16}]^T \quad (4b)$$

$$\bar{X} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_{16}]^T \quad (4c)$$

이고, 보정 행렬 $\bar{B}$ (16×16)의 요소들은 왜곡 행렬의

교차 곱과 적분에 의해 다음처럼 표현할 수 있다.

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

여기서 i 와 j 는 미소 산란 벡터들 교차 곱에서 온 p , l 과 측정 산란 벡터들 교차 곱에서 온 m , n 로 다음처럼 계산할 수 있다. 즉, $i=4(l-1)+p$, $j=4(m-1)+n$ 이고 p, l, m, n 은 각각 1부터 4까지의 숫자이다.

보정 행렬 요소들을 계산하는 과정에서 지면에서는 직각좌표계 x 와 y 를 사용하지만, 안테나 패턴에서는 각도들로 표현되므로, 구좌표계와 직각좌표계 간의 변환이 필요하다. 그림 1은 이 변환을 보여준다. 다음 수식을 이용하여 스캐터미터 시스템에서 안테나가 실제 움직이는 빔의 중심에서의 양각(elevation angle ξ)과 방위각(azimuth angle ψ)을 직각 좌표계로 변환할 수 있다.

$$x = \frac{h \tan \psi}{\cos(\theta_0 + \xi)} \quad (5)$$

$$y = h \tan(\theta_0 + \xi) \quad (6)$$

여기서, θ^0 는 입사각을 나타내며, $\psi = \xi = 0$ 는 정면(bore-sight 방향)을 나타낸다.

다음으로 측정 데이터와 비교하기 위해 사용한 Oh 모델^[7]은 기존의 산란 모델들과 수많은 실험 데이터들을 바탕으로 개발된 모델로서 풀 없는 토양의 VV-, HH-, VH-, HV-편파별 후방 산란 계수뿐만 아니라 위상 차이 분포 관련 변수도 예측하도록 만든 모델이다.

그림 1. 구 좌표계와 직각 좌표계의 변환

Fig. 1. Transformation of spherical to rectangular coordinates.

그림 2. 스캐터미터를 이용한 측정 장면
Fig. 2. Measurement using the scatterometer system.

Ⅲ. 목표물의 산란 행렬 측정

스캐터미터 시스템 보정 작업을 위해 앞서 설명한 금속구와 분포 목표물에 대한 산란 행렬을 측정해야 한다. 2008년 3월 22일에 HPS 완전 편파 스캐터미터를 이용하여 김포에서 벼 벼 논과 쟁기질한 논의 완전 편파 산란계수를 측정하였다(그림 2 참조). 측정 안테나는 C-밴드용 혼 안테나였으며, OMT(Orthogonal Mode Transducer)와 서큘레이터(circulator)를 이용하여 안테나 한 대로 완전 편파 산란 특성을 측정할 수 있었다. 보정 목표물로는 반지름 15.2cm 금속구를 사용하였으며, 네트워크 분석기의 설정은 중심주파수 5.3 GHz, 주파수폭 500 MHz로 설정하여 측정하였다. 쟁기질한 논의 경우, 지표면으로부터 안테나의 높이는 5.5 m이었으며, 금속구까지의 거리는 4.2 m로 설정하였다. 벼 벼 논은 경우, 지표면으로부터 안테나의 높이는 5.0 m이며, 금속구까지의 거리는 4.2 m로 설정하였다. 두 지표면에 대해 입사각은 20, 30, 40도로 설정하여 각 입사각에 대해 30번씩 측정하였다.

산란 모델의 입력 변수로 사용하기 위해 지표면의 지표면 변수 데이터(토양 수분 함유량과 표면 거칠기 정도)도 측정하여 얻었다(표 1 참조). 분포 목표물인 벼 벼 논은 경우, 잘린 벼의 뿌리 부분이 약간 남아 있는 맨 땅이었으며, 쟁기질한 논은 경우 작물이 없으며 땅이 매우 거칠다.

지표면 거칠기(surface roughness)는 지표면 높이 측정기를 이용하여 표면 높이 프로파일을 측정하였으며, 측정 결과를 이용하여 RMS(Root-Mean-Square) 높이와 상관 길이(correlation length)를 계산하였다.

표 1. 측정된 모델 입력 변수

Table 1. Measured parameters for scattering model.

지표면 정보		쟁기질한 논	벼 벼 논
RMS 높이, s (cm)	가로	3.0464	1.7907
	세로	3.9988	0.6082
상관 길이, l (cm)	가로	5.8282	8.2392
	세로	8.471	3.7647
수분함유량	평균	0.304	0.274

여기에서 가로와 세로의 값을 평균하여 사용하였다. 지표면의 수분함유량은 부피가 100 ml로 일정한 토양 수집기를 이용하여 흙 1 cm³당 수분함유량을 측정하였다.

지표면의 거칠기를 나타내는 변수인 s (RMS 높이)와 l (상관 길이)를 구하기 위해서는 일정 거리만큼의 지표면 높이를 정확하게 측정해야 하고, 이를 위해 지표면 높이 측정기를 사용하였다. 지표면 높이 측정기는 실제 지표면의 높이를 측정하는 장비로써 0.5 cm 간격에 20 cm의 길이를 갖는 첩사 201개로 구성되어 있다. 첩사의 높이를 숫자로 얻게 되고, 일렬로 반복 측정하여 일정 거리만큼의 지표면 높이를 얻게 된다. 이 측정된 데이터로부터 높이 분포함수(PDF)를 얻고, 이 분포 함수의 표준편차를 구하면 s 를 얻게 된다.

측정 지역의 토양 수분 함유량을 측정하기 위해서, 지표면 깊이 0~5 cm에서 토양 샘플 2~3개를 채취하여 무게를 재고, 완전 건조시킨 후 무게를 재어, 물의 부피와 토양의 부피 비인 부피 수분 함유량 m_v (cm³/cm³)을 계산한다^[9].

Ⅳ. 산란 모델과의 비교 및 분석

그림 3은 보정 전과 보정 후의 후방 산란 계수 변화를 보여준다. 이 그림에서 점선(-----)으로 표현된 데이터가 보정 전의 후방 산란 계수이며, 동일 편파와 교차편파 모두 보정 후의 결과(---)에 비해 매우 낮은 값을 보였으며, 이것은 스캐터미터 시스템과 케이블에서의 손실, 전송 거리에 따른 손실 등이 포함되어 있기 때문이다. 또한, 보정 전에는 일반적

그림 3. 보정 전과 보정 후의 측정 데이터 비교

Fig. 3. Comparison results before and after the calibration of the measurement data.

인 맨땅에서의 편파 특성과는 다르게 입사각이 증가함에 따른 후방 산란 계수의 변화가 증가하거나 감소하였다가 증가하는 등 변화가 일정하지 않으며, VV-편파와 HH-편파가 약 10 dB 이상의 차이를 보이지만 보정 후에는 입사각이 증가함에 따라 후방 산란 계수가 감소하고, 동일 편파에서 VV-편파가 HH-편파보다 약간 높은 값을 보여 일반적인 맨땅의 산란 특성과 일치하는 것을 확인하였다.

이번에는 보정된 측정 결과를 산란 모델과 비교하였다. 그림 4(a)는 쟁기질한 논에서의 측정 결과와 산란 모델을 비교한 그림이고, 그림 4(b)는 벼 베논에서의 측정 결과와 산란 모델을 이용해 계산한 후방 산란 계수의 비교를 보여준다. 비교한 결과, 쟁기질한 논에서는 측정 결과와 산란 모델과의 오차가 VV-편파에서 평균 0.78 dB였고, HH-편파에서 0.74 dB, VH-편파에서 1.11 dB이었고, 벼 베논에서는 VV-편파가 1.74, HH-편파가 1.44, VH-편파가 1.03 dB이었다.

측정 데이터와 산란 모델과의 차이는 (1) 산란 모델의 부정확성, (2) 지표면 변수(특히 거칠기) 측정의 부정확성, (3) 레이더 측정 독립 샘플(independent sample) 수(30개)의 부족, (4) 측정 현장의 비균질성(예를 들면, 벼 베논에 남아 있던 벼 포기) 등을 들 수 있다.

그리고 쟁기질한 논과 벼 베논을 비교하였을 때 쟁기질한 논은 낮은 입사각(20도 이하)에서는 벼 베

(a) 쟁기질한 땅

(a) Plowed bare soil surface

(b) 벼 베논

(b) Harvested rice field

그림 4. 맨 땅에 대한 보정된 후방 산란 계수와 계산한 후방 산란 계수 비교

Fig. 4. Comparison between measured and calculated backscattering coefficients for bare soil surfaces.

논에 비해 낮은 값을 보였으며, 각도가 증가함에 따라 후방 산란 계수 감소가 벼 베논보다 완만한 것을 알 수 있다. 이것은 맨땅에서의 후방 산란 계수 특성이 잘 나타난 것으로 지표면의 거칠기가 높을 경우가 평평한 경우에 비해 낮은 입사각에서는 비교적 전방 산란이 강하며, 높은 입사각에서 지표면 거칠기에 의해 후방 산란이 강하게 일어나기 때문이다.

다음으로 측정된 후방 산란 계수의 편파 특성을 산란 모델 예측 결과와 비교하였다. 그림 5는 벼 베논의 편파 응답 특성이며 각각 스캐터미터 시스템을 이용하여 측정된 데이터와 산란 모델을 이용하여 계

(a) HPS 시스템을 이용해 측정한 데이터

(a) Measured with a Hongik polarimetric scatterometer

(b) 산란 모델을 이용해 계산한 데이터

(b) Calculated with a scattering model

그림 5. 벼 벼논의 후방 산란 계수의 편파 응답 특성 $k_s=0.68$, $kl=4.18$, $m_v=0.274$, $\theta=20^\circ$.

Fig. 5. Polarization responses for a harvested rice field with $k_s=0.68$, $kl=4.18$, $m_v=0.274$, and $\theta=20^\circ$.

산란 데이터를 비교하여 보여준다.

타원 각도(ellipticity angle χ)와 방향 각도(orientation angle ϕ)에 따라 모든 편파(선형 편파, 원형 편파, 타원 편파)가 결정되며, 그림 5에서는 선형 편파들 중에서 VV-편파와 HH-편파를 보여주고 있다. 그림 5(a)에서 볼 수 있듯이 실제 측정 데이터에서도 VV-편파 특성이 HH-편파 특성보다 높으며, 이것은 맨땅에서의 후방 산란 계수 특성이 잘 나타난 것이다. 그림 5(b)를 보면 산란 모델을 이용하여 계산한 데이터도 맨땅의 후방 산란 계수의 특성이 잘 나타나는 것을 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 완전 편파 스캐터미터 시스템의

정확한 보정을 위해 미소 Mueller 행렬을 이용하는 보정 기법인 DMMCT를 수행했으며, 쟁기질한 논과 벼 벼논의 후방 산란 측정 데이터의 보정 결과와 실험적 산란 모델의 후방 산란 계수를 비교하여 정확도 검증 실험을 수행하였다. 이론 모델과 후방 산란 계수를 비교한 결과, ± 1.7 dB 이내로 비교적 정확한 결과를 얻었으며, 편파 응답 특성 역시 이론 모델과 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

저자들은 챔버 데이터 획득에 도움을 준 영진전문대의 홍진영 교수, 실험에 도움을 준 삼성전자의 김윤섭, LIG 넥스원의 나재호, 모피언스의 윤지형, 항공우주연구원의 이경엽, 해양연구원의 김태호에게 감사한다.

참 고 문 헌

- [1] F. T. Ulaby, C. Elachi, *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*. Norwood, MA: Artech House, 1990.
- [2] K. Sarabandi, F. T. Ulaby, "A convenient technique for polarimetric calibration of single-antenna radar systems", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 28, no. 6, pp. 1022-1033, Nov. 1990.
- [3] M. W. Whitt, F. T. Ulaby, P. Polatin, and V. V. Liepa, "A general polarimetric radar calibration technique", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 39, no. 1, pp. 62-67, Jan. 1991.
- [4] K. Sarabandi, L. Pierce, M. C. Dobson, F. T. Ulaby, J. Stiles, T. C. Chiu, R. De Roo, R. Hartikka, A. Zambetti, and A. Freeman, "Polarimetric calibration of SIR-C using point and distributed targets", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 33, no. 4, pp. 858-866, Jul. 1995.
- [5] F. T. Ulaby, K. Sarabandi, and A. Nashashibi, "Statistical properties of the mueller matrix of distributed targets", *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 139, no. 2, pp. 136-146, Apr. 1992.
- [6] K. Sarabandi, Y. Oh, and F. T. Ulaby, "Measurement and calibration of differential mueller matrix

of distributed targets", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 40, no. 12, pp. 1524-1532, Dec. 1992.

- [7] Y. Oh, K. Sarabandi, and F. T. Ulaby, "Semi-empirical model of the ensemble-averaged differential mueller matrix for microwave backscattering from bare soil surfaces", *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.*, vol. 40, no. 6, pp. 1348-1355, Jun. 2002.

- [8] 황지환, 박성민, 권순구, 오이석, "X-밴드 완전 편파 Scatterometer 시스템 보정에 관한 연구", 한국전자과학회논문지, 21(4), pp. 408-416, 2010년 4월.

- [9] 홍진영, 오이석, "식물층에서의 편파별 후방 산란 측정과 산란 모델의 비교", 한국전자과학회논문지, 17(9), pp. 804-810, 2006년 9월.

박 신 명

2011년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2011년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 마이크로파 원격 탐사, SAR 영상 분석

김 희 영

2011년 8월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2011년 9월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 안테나

고 주 석

2012년 2월: 가천대학교 정보통신학과 (공학사)
2012년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 안테나

김 주 희

2012년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2012년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 무선 전력 전송

주 정 명

2011년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2011년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 전파산란, 마이크로파 원격 탐사, 레이더

황 지 환

2001년 2월: 홍익대학교 전파공학과 (공학사)
2003년 2월: 홍익대학교 전자통신공학과 (공학석사)
2003년 4월~2006년 5월: LG전자 단말연구소 연구원
2009년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 박사수료
[주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 안테나

권 순 구

2007년 2월: 홍익대학교 전자전기
공학부 (공학사)
2009년 2월: 홍익대학교 전자정보통신
공학과 (공학석사)
2009년 3월~현재: 홍익대학교 전자
정보통신공학과 박사수로
[주 관심분야] 전파 산란, 마이크로
파 원격탐사, SAR 영상 분석

오 이 석

1982년 2월: 연세대학교 전기공학
과 (공학사)
1988년 12월: University of Missouri-
Rolla 전기 및 컴퓨터공학과 (공
학석사)
1993년 12월: University of Michi-
gan, Ann Arbor, 전기공학 및 컴퓨
터과학과 (공학박사)
2009년~2010년: Stanford University 방문교수
1994년~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수
2009년~현재: IEEE Fellow
[주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 레이더,
안테나

신 중 철

2006년 2월: 홍익대학교 전자전기
공학부 (공학사)
2006년 1월~2010년 8월: GM 대우
Auto & Technology
2012년 8월: 홍익대학교 전자정보통신
공학과 (공학석사)
[주 관심분야] SAR 검보정 및 영상
분석, 마이크로파 원격탐사