

X-밴드용 완전 편파 Scatterometer 설계

Design of a Full Polarimetric Scatterometer for X-Band

황지환 · 이경엽 · 박성민 · 오이석

Ji-Hwan Hwang · Kyung-Yup Lee · Seong-Min Park · Yisok Oh

요 약

본 논문에서는 X-밴드용 완전 편파 scatterometer 시스템(HPS: Hongik Polarimetric Scatterometer) 설계와 제작된 측정 시스템 성능 검증을 위해 이론적으로 잘 알려진 점 목표물(point-target)의 주파수 응답 특성을 측정하는 연구 결과를 선보인다. X-밴드용 완전 편파 scatterometer 시스템은 크게 OMT(Orthogonal Mode Transducer)+horn 안테나, 이들의 입사각을 조절하는 입사각 제어 부분, 네트워크 분석기와 X-밴드용 주파수 변환 회로로 구성되는 송수신기, 이 장비들을 위한 지지용 이동식 받대로 구성된다. 측정용 안테나의 수직과 수평 입사각 조절을 위해 각도 센서를 이용하며, 모든 입사각에서 완전 편파의 데이터를 획득할 수 있도록 편파 선택용 스위치 회로를 사용한다. 또한, 설계된 측정 시스템의 성능 검증을 위하여 OMT+horn 안테나를 이용한 수동 반사기(corner reflector)의 주파수 응답 특성 즉, 완전 편파 RCS(Radar Cross Section)를 측정한다.

Abstract

A full-polarimetric scatterometer(HPS: Hongik Polarimetric Scatterometer) for X-band is designed, fabricated, and verified using the theoretically well-known point-targets in this paper. The X-band full-polarimetric scatterometer consists of an OMT(Orthogonal-Mode Transducer)+horn antenna, the angle control part for the OMT+horn antenna, a transmitter/receiver with a network analyzer and a frequency-conversion circuitry, and a movable support of these parts. We use an inclinometer sensor to control the vertical and horizontal incidence angles. The full polarimetric data can be obtained because of the polarization switches and the OMT. The accuracy of the scatterometer system is verified by measuring the polarimetric RCS(Radar Cross Section) of one of the theoretically well-known point-targets, *i.e.*, a corner reflector.

Key words : Full-Polarimetric Scatterometer, X-Band, Orthogonal-Mode Transducer(OMT), Angle Control

I. 서 론

Scatterometer를 이용한 완전 편파(full polarimetric) 측정 데이터는 전파 산란 및 마이크로파 원격 탐사 연구 분야에서 광범위하게 사용되어지고 있으며^{[1]~[3]}, 특히 위성 레이더 시스템을 이용한 측정 데이터를 비교 검증하기 위한 지상 운용 시험대(test bed) 역할을 수행한다^[4]. 이에 따라 전파 산란 및 원격 탐

사 분야의 연구가들에게 보다 효과적이며, 정확한 측정이 이루어질 수 있는 자동화된 scatterometer 시스템이 필요하게 되었으며, 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 X-밴드($f_0=9.65$ GHz, BW=500 MHz) 대역에 대한 관심 또한 크게 높아져 이에 맞는 측정 시스템의 개발과 운영이 필요하게 되었다^{[5],[6]}. 많은 분야에서 다양한 형태의 scatterometer를 이용하고 있으나^{[3],[7]}, 본 논문에서는 지상 운용을 목적으로 원격

「본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었다(No. 2009-0078929).」
홍익대학교 전자정보통신공학과(Department of Electronic Information and Communication Engineering, Hongik University)
· 논문 번호 : 20090826-094
· 수정완료일자 : 2009년 10월 20일

제어가 가능한 안테나 지지대, 네트워크 분석기(Agilent 8753D), 그리고 OMT+horn 안테나^[8] 등으로 구성된 X-밴드 대역의 측정 시스템을 설계 제작하고, 이에 필요한 시스템 검증 작업과 시험용 표적을 이용한 측정 성능 확인 작업을 소개한다. 이때, 완전 편파 특성을 보다 빠르고 효과적으로 측정하기 위해서 X-밴드용 주파수 변환 회로에 스위칭 회로를 추가하여 측정 속도를 개선했으며, 시스템 성능 검증을 위하여 이론적으로 잘 알려진 점 목표물 다시 말해, 15 cm 크기의 수동 반사기에 대해 OMT+horn 안테나로 완전 편파 응답 특성을 측정하였다.

II. X-밴드 Scatterometer 시스템 구성 및 설계

X-밴드 scatterometer 시스템은 크게 세 부분으로 구성된다. 첫 번째 부분은 전체 시스템을 구성하는 지지대 몸체와 측정용 OMT+horn 안테나 및 전파 입사각 제어 부분이고, 두 번째 부분은 X-밴드 대역의 측정 신호를 위한 RF 회로 및 신호/데이터 처리 회로를 포함한 송수신기 부분이며, 마지막으로 전체 측정 시스템을 제어하기 위한 전용 소프트웨어로 구성된다. 이때, X-밴드 전용 보조 회로는 주파수 변환 및 스위칭 회로를 추가하여 완전 편파 측정 및 장비 운용 효율을 높일 수 있었으며, 모든 입사각 제어 (incidence angle control) 및 데이터 획득/저장(data acquisition/ saving)은 전용 소프트웨어(GUI: Graphic User Interface)가 탑재된 laptop-PC에 의해 원격 제어 된다.

그림 1은 제작된 X-밴드 scatterometer 시스템의 전체 구조를 보여주며, 이동의 편의성을 고려해 제작되었다. 전체 scatterometer를 구성하는 지지대는 방

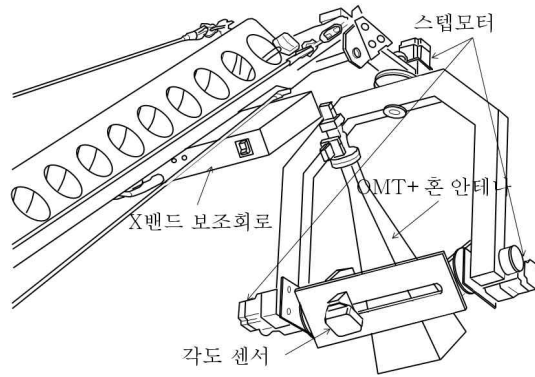


그림 2. X-밴드 scatterometer 입사각 제어 부분
Fig. 2. The incidence angle control parts of scatterometer system for X-band.

송 장비를 차용한 것으로 입사각 제어 부분과 하단의 측정 장비 수납 공간을 추가하는 개조를 거쳤다. 전체 길이는 약 8.4 m, 지지대 중심의 높이는 1.7 m이다.

이번 장에서는 입사각 제어 부분의 구성 요소와 신호 변환/스위칭 회로 그리고 전용 시스템 제어 프로그램 등에 대해 설명한다.

2-1 입사각 제어 부분

그림 2는 X-밴드용 scatterometer 시스템의 안테나 입사각 제어 부분을 보여준다. 각도 제어 부분은 3개의 스텝 모터로 구성된 구동부와 입사 각도를 측정하기 위한 전자식 각도 센서(inclinometer) 그리고 X-밴드 대역의 측정용 OMT+horn 안테나로 구성되며, 안테나 빔 중심각을 자동 및 수동으로 변환시켜 전파의 입사각을 조절할 수 있다.

이때, 안테나의 빔 중심은 스텝 모터로 구성된 구동부에 의해서 azimuth(ϕ) 방향과 elevation(θ) 방향 모두 조절이 가능하며, 각도 센서에 의하여 구동부의 각도가 실시간으로 측정되어 설정된 입사각과 현재 상태의 각도를 비교하여 매 측정 위치에서 입사각 오차 범위를 $\pm 0.2^\circ$ 내로 자동 보정되도록 프로그램 되었다. 또한, 전파의 송/수신을 위한 측정용 안테나는 표 1과 같은 특성을 갖는 X-밴드 대역용 OMT+horn 안테나가 사용되어 수평과 수직 편파의 송/수신이 가능하다.

2-2 신호 처리 부분

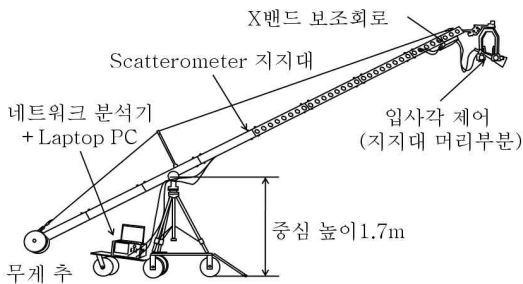


그림 1. X-밴드 scatterometer 시스템
Fig. 1. Scatterometer system for X-band.

표 1. X-밴드 대역 OMT+horn 안테나 특성

Table 1. Performance of OMT+horn antenna for X-band.

	주파수 [GHz]	이득 [dBi]	HPBW E-plane	HPBW H-plane	편파격리도 [dB]
Port 1 (Ver.)	9.4	23.6	11.9°	15.7°	-45.4
	9.65	23.7	11.6°	15.6°	-41.3
	9.9	23.8	11.5°	15.4°	-36.3
Port 2 (Hor.)	9.4	22.7	11.7°	15.7°	-45.2
	9.65	22.9	11.6°	15.1°	-41
	9.9	23.0	11.3°	14.9°	-36.2

본 논문에서 제안된 X-밴드 scatterometer 시스템은 네트워크 분석기를 기본으로 하는 측정 시스템으로, Agilent社 8753D 네트워크 분석기가 이용되었다. 이 네트워크 분석기의 최대 주파수는 6 GHz이므로 X-밴드 scatterometer 시스템을 위해 주파수 변환 회로가 필요하다. 안테나와 송수신기 사이의 긴(약 8 m 가량) RF 케이블에서 발생하는 전력 손실을 최소화하기 위해 낮은 주파수 대역인 L-밴드(1.0~1.5 GHz) 대역을 이용하였다. 긴 8-m 지지대를 이용하여 먼 거리의 목표물을 측정할 수 있기 때문에 미세한 산란 전파까지 측정하도록 증폭 회로를 추가하였다. 증폭기를 사용하는 이유로 네트워크 분석기 포트(port)는 송신과 수신 전용이 되어야 하고, 그로 인해 별도의 스위칭 회로를 구성하였다. 이러한 스위치 이용 편파 전환은 네트워크 분석기의 모드 전환보다 측정 속도가 빨라져서 측정 효율을 높여준다.

그림 3은 주파수 변환, 증폭, 스위칭 회로들을 포함한 X-밴드 전용 보조 회로를 위한 블록 다이어그램이며, 외관은 상자 모양으로 그림 1과 2에서와 같이 지지대 상단의 측정용 안테나와 최대한 가까운 곳에 장착되어 운용된다. 주파수 변환 회로는 네트워크 분석기의 IF(1~1.5 GHz) 신호를 8.4 GHz의 LO(Local Oscillator)를 이용하여 X-밴드(9.4~9.9 GHz) 대역의 신호로 변환하여 측정 신호를 송신하며, 수신 신호의 경우에는 반대의 과정을 거쳐 L-밴드 대역의 IF의 신호가 네트워크 분석기로 전달되도록 설계되었다. 순환 장치(circulator)와 RF 스위치로 구성된 스위칭 회로를 추가하여 네트워크 분석기의 동작을 송/수신이 고정된 특정 모드, 즉 'P1-송신/ P2-수신'이

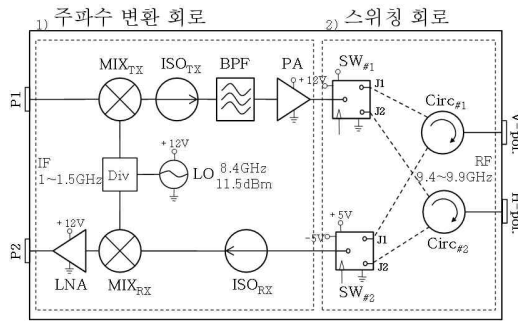


그림 3. X-밴드 전용 주파수 변환 및 스위칭 회로
Fig. 3. Frequency converting and switching circuit for X-band.

되도록 하는 S₂₁ 측정 모드로 설정하고도 완전 편파의 구현이 가능하도록 설계하였다. 이로써, 측정 시 발생하는 불필요한 모드 변환과 시스템 안정을 위해 필요한 시간 지연을 최소화 할 수 있었다.

표 2는 X-밴드 전용 보조 회로의 각 부품별 이득 또는 손실을 나타내며, 완전 편파 측정을 위한 편파별 스위치 동작 특성을 나타낸다. 주파수 변환 회로를 구성하기 위해서 Marki microwave社의 diode mixer M1-0212를 사용하였으며, 주파수 변환을 위한 conversion loss는 약 -11 dB이다. 스위칭 회로에는 MCLI社의 RF-switch D2-15/ABS와 CERNEX社의 circulator가 각각 사용되었다.

그림 4는 X밴드 전용 보조 회로의 송/수신 경로 이득의 측정 결과를 나타내며, 신호 발생기(R&S SG_

표 2. X-밴드 전용 보조 회로 동작 특성

Table 2. Performance of sub circuit for X-band.

주파수 변환 회로	송신 경로	Mix	Isolator	BPF	PA
	이득 [dB]	-11	-1	-0.35	32
스위칭 회로	수신 경로	Isolator	Mix	LNA	-
	이득 [dB]	-0.5	-11	22.7	-
스위칭 회로	구성품	RF-S/W	Circulator	* 부품 특성은 대역 내 평균값	
	이득 [dB]	-0.1	-0.1		

Measure Pol.	SW#1 \ SW#2	J1 (0 V)	J2 (5 V)	* 편파 기호 V: Vertical H: Horizontal
	J1(0 V)	VV	HV	
	J2(5 V)	VH	HH	

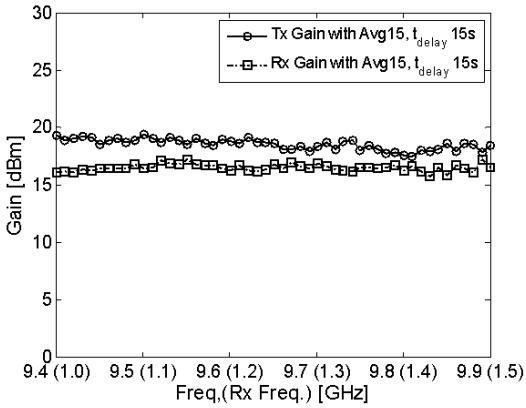
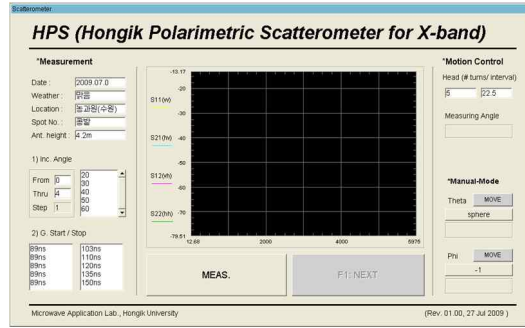


그림 4. X-밴드 전용 보조 회로의 송/수신 경로 이득
Fig. 4. Tx/Rx loop gain of sub-circuit for X-band.

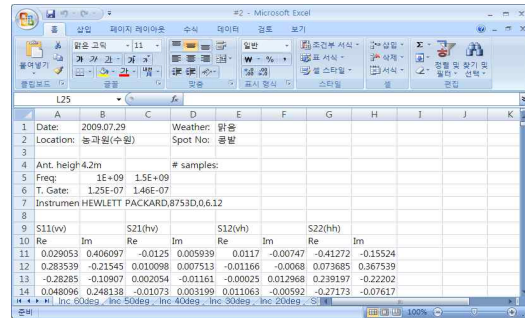
SMT02)와 스펙트럼 분석기(Agilent 8593A)를 이용하여 보조 회로의 입/출력을 측정하였다. 이때, 보조 회로와 측정 시스템 간의 응답 지연 및 이로 인한 측정 장비간의 부정확성을 낮추기 위해서 측정 장비 내의 평균값 기능과 신호 발생기의 출력 신호 안정화 시간을 고려해 측정하였다. 또한, 획득되는 데이터의 정확도를 높이기 위해서 경로 이득의 측정은 laptop PC에 의해 제어되는 자동 측정 프로그램을 이용하여 동일한 조건의 측정을 10 MHz 단위로 반복 측정함으로써 정확도와 신뢰도를 높였다. 송/수신 경로 이득의 측정 결과는 장비 내 평균값을 15번 이상, 그리고 신호 발생기의 출력을 안정시키기 위한 지연시간을 15초 이상을 주어 그림 4와 같은 안정된 결과를 얻을 수 있었다. 송/수신 경로 이득은 주파수 (Tx 9.4~9.9 GHz/ Rx 1.0~1.5 GHz) 대역 내 평균값 18.5 dB와 16.4 dB의 송/수신 경로 이득이 각각 측정되었다.

2-3 시스템 제어 프로그램

그림 5는 전체 scatterometer 시스템의 동작을 원격으로 제어하는 전용 소프트웨어의 GUI를 나타낸다. 앞서 설명한 입사각 제어 부분과 신호/데이터 처리 부분을 포함한 전체 측정 시스템을 안정적으로 운영하기 위해서 그림 5(a)와 같은 통합형 제어용 GUI가 요구되며, 실제 측정 상황에서 운영 효율을 높이기 위하여 모든 입사각 별 측정 결과는 그림 5(b)와 같은 excel sheet에 자동 기록되도록 설계하였다.



(a) 시스템 제어 전용 GUI
(a) The exclusive GUI for system control



(b) Excel을 이용한 데이터 관리
(b) Data management using excel

그림 5. 측정 시스템 전용 GUI
Fig. 5. The exclusive GUI of the measurement system.

시스템 제어용 GUI의 화면 구성은 세 부분으로 구성된다. 왼쪽 부분의 설정 창은 측정 장소와 날짜 등을 기록할 수 있는 입력창과 측정을 위한 각도 설정과 각 입사각별 네트워크 분석기의 gate-time의 설정값을 입력하는 창으로 구성된다. 이때, 네트워크 분석기의 time-gating 기능은 일반적인 레이더 시스템의 range filter와 같은 역할을 하게 되고, scatterometer 시스템의 운용 시에는 안테나 높이와 입사각에 따른 측정용 OMT+horn 안테나의 foot print의 적절한 측정 영역을 조절하는 역할을 수행하게 된다. 따라서 측정하고자 하는 입사각별 gate-time은 안테나 높이와 입사각을 고려한 목표물과의 거리에 의해 결정되므로 측정 작업 전에 상황에 맞는 적절한 설정값을 확인하는 절차가 필요하다. 두 번째로, 우측에는 수동 자세 제어(manual mode)용 기능과 안테나 지지대 머리 부분의 azimuth(ϕ) 방향 회전 각도 설정을 위한 입력창이 있다. 마지막으로, 중앙 부분의 그

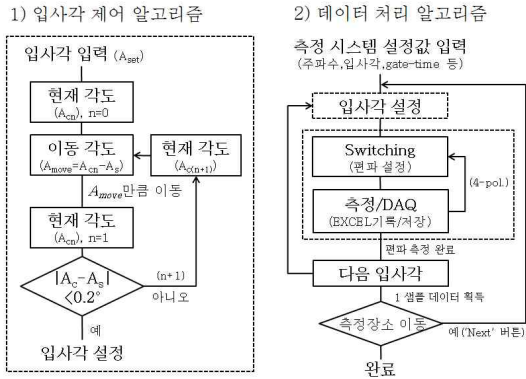


그림 6. 측정 시스템 제어를 위한 부분별 제어 알고리즘

Fig. 6. The control algorithm of each parts for controlling measurement system.

래프는 측정되어진 완전 편파의 측정 결과가 출력되며, 다수의 측정 데이터 샘플을 획득하기 위해서는 측정 시스템의 위치를 이동시키며 분포 목표물을 연속적으로 측정해야 하는데, 이를 위해 1회 측정에 해당하는 측정 데이터를 획득하면 'Next' 버튼은 준비 상태로 전환되어 다음 측정 장소로 이동하기 위한 시간을 제공해 주며, 다음 측정을 연속으로 진행하도록 하는 기능을 수행한다. 이때, 측정 데이터 관리를 위한 excel이 자동으로 실행되어 측정 결과를 기록 저장하게 된다. 측정 결과는 그림 5(b)와 같이 각 입사각 별로 file header 부분과 함께 편파별 측정값이 실수부와 허수부로 구분되어 기록된다.

그림 6은 측정 시스템을 제어하기 위한 각 부분별 제어 알고리즘을 도식화한 것으로, 입사각 설정은 각도 센서로부터 측정되는 현재 각도를 기준으로 설정값과의 편차를 줄이는 방법으로 구동되며, 완전 편파의 전파 특성은 특정 입사각에서 스위칭 동작으로 편파 설정 후 측정값을 excel sheet에 저장하는 방식으로 운용된다. 이때, 네트워크 분석기는 초기 설정 모드에서 변화 없이 동일한 측정 모드(S_{21})에서만 측정을 하게 된다. 특정 장소에서의 측정이 모두 완료되면 다음 장소로 이동한 후 'Next' 버튼을 이용해서 측정을 계속 진행할 수 있게 제어된다.

III. 시스템 검증 과정

X-밴드 scatterometer의 각 부분별 설계를 기반으

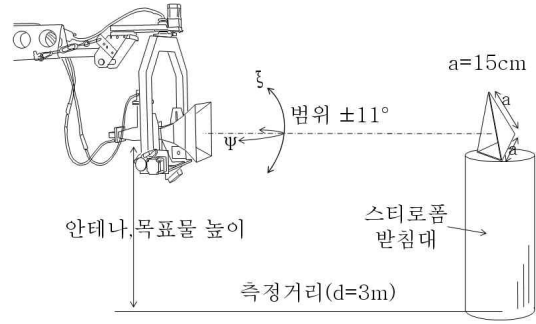


그림 7. 측정 시스템 성능 검증 시험

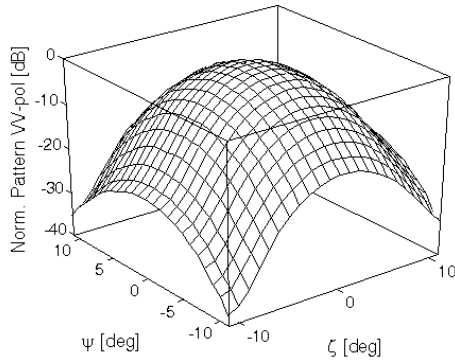
Fig. 7. The performance verification of the measurement system.

로 제작된 측정 시스템을 검증하기 위하여 이론적으로 잘 알려진 점 목표물인 15 cm 크기의 수동 반사기를 이용한 후방 산란 RCS 측정을 시도하였다. 이때, 측정용 OMT+horn 안테나의 빔의 중심과 수동 반사기의 중심이 일치되도록 그림 7과 같이 측정 시스템을 설치한 후 빔의 중심으로부터 상하/좌우 $\pm 11^\circ$ 범위로 후방 산란 RCS를 측정하여 그 측정값의 공간상의 패턴을 분석해 보았다.

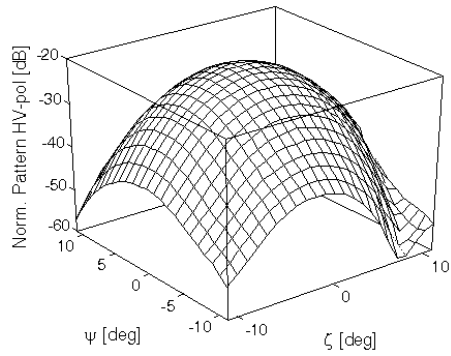
그림 8(a), (b)는 수동 반사기의 정규화된 동일 편파와 교차 편파의 RCS 패턴 특성을 나타내며, 그림 8(c)는 동일 편파의 위상차($\phi_{hh} - \phi_{vv}$) 특성을 각각 나타낸다. 이상적인 수동 반사기는 정면에서 이론적으로는 교차 편파(hv-, vh-편파) 후방 산란이 없지만, 수동 반사기의 불완전 제작과 scatterometer의 isolation 특성상 교차 편파 후방 산란 RCS가 있음을 알 수 있다. 여기서 교차 편파 RCS와 편파간 위상차는 이 scatterometer가 완전 편파용(full-polarimetric)이기 때문에 정확하게 측정하는 것이 가능한 것이다.

그림 8의 측정 결과들은 입사각별 수동 반사기의 완전 편파 특성이기도 하지만, 한편으로 완전 편파 안테나(OMT+horn)의 완전 편파 특성을 보여주는 것이기도 하다.

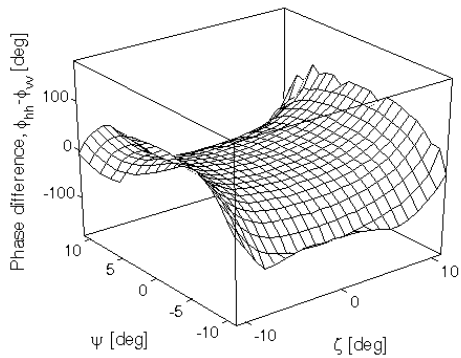
그림 9는 X-밴드 측정용 OMT+horn 안테나 방사 패턴 특성과 수동 반사기의 완전 편파 응답 특성을 비교 분석한 결과이다. 안테나 방사 패턴 측정은 측정 안테나와 피측정 안테나 사이의 one-way 측정이었고, 수동 반사기를 이용한 안테나 특성 측정은 'two-way(round-trip)' 측정이므로, 일반적인 안테나의 방사 패턴을 제공하여 정규화하는 작업이 필요했다.



(a) 정규화된 동일 편파 RCS
(a) The normalized co-polarized RCS



(b) 정규화된 교차 편파 RCS
(b) The normalized cross-polarized RCS



(c) 동일 편파 위상차
(c) The co-polarized phase difference

그림 8. 15 cm 수동 반사기의 X-밴드 완전 편파 응답 특성
Fig. 8. X-band full polarimetric response of 15 cm corner reflector.

그림 9에서 보는 바와 같이 두 개의 측정 결과가 잘 일치한다. 설계/제작된 scatterometer를 이용하여 완전 편파 산란 특성들(vv-, vh-, hv-, hh-RCS들과 위상

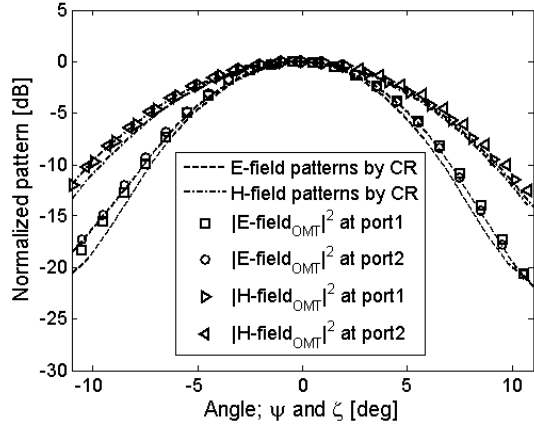


그림 9. OMT+horn 안테나 방사 패턴과 수동 반사기에 의한 편파 응답 특성 비교

Fig. 9. The comparison of the radiation pattern of OMT+horn antenna and corner-reflector's polarimetric response.

차들을 측정할 수 있게 되었다. 여기서는 15-cm 수동 반사기의 편파별 RCS 패턴과 측정값의 위상 정보를 이용하여 동일 편파 위상차($\phi_{hh} - \phi_{vv}$)와 교차 편파 위상차($\phi_{vh} - \phi_{vw}$) 패턴을 얻을 수 있었다. 그림 8에서는 동일 편파(vv-편파)와 교차 편파(hv-편파) 그리고 동일 편파 위상차만을 보여준다.

IV. 결 론

본 논문에서는 X-밴드 scatterometer 시스템의 설계/제작 및 성능 검증에 관한 연구 결과를 보였다. X-밴드 전용의 보조 회로를 설계/제작하여 측정 시스템의 완전 편파 측정과 운용 효율을 높일 수 있었으며, 전용의 제어 소프트웨어(GUI)를 이용한 운용 편의성도 높일 수 있었다. 제작된 측정 시스템의 성능 검증 시험을 통해서 측정용 OMT+horn 안테나와 수동 반사기의 X-밴드 대역 내의 편파 응답 특성을 보여 주었다. 본 논문에서 제안된 X-밴드 완전 편파 scatterometer 시스템(HPS)은 점 목표물들에 대한 편파별 후방 산란 RCS와 위상 정보를 측정할 수 있을 뿐만 아니라, 각종 지표면들에 대한 후방 산란 완전 편파 산란계수들을 측정할 수 있도록 설계되어 있어서 지구 표면 원격 탐사 연구와 위성 SAR(Synthetic Aperture Radar) 데이터의 비교 연구를 위한 지상 운용 시험대라도 이용할 수 있는 등, 활용 범위가 매우

넓을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] F. T. Ulaby, C. Elachi, *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*, Artech House, Inc., 1990.
- [2] J. Y. Hong, "Microwave radar backscattering models for vegetation canopies", Ph.D. Thesis, Hongik Univ., pp. 100-113, Appendix, Jun. 2008.
- [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, pp. 975-984, Sep. 1994.
- [4] 정구준, 홍진영, 오이석, "보정된 scatterometer의 측정데이터를 사용한 SAR 데이터 교정", 한국전자과학회논문지, pp. 121-126, 15(2), 2004년 2월.
- [5] F. Caltagirone et al., "SkyMed/COSMO mission overview", *Geoscience and Remote Sensing Proceedings, IGARSS'98*, vol. 2, pp. 683-685, Jul. 1998.
- [6] A. Roth, "TerraSAR-X: a new perspective for scientific use of high resolution spaceborne SAR data", *2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop*, pp. 4-7, May 2003.
- [7] W. Wagner et al, "A study of vegetation cover effects on ERS scatterometer data", *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, vol. 37, Issue 2, pp. 938-948, Mar. 1999.
- [8] 오이석, 이진원, 홍진영, "Isolation 특성이 좋은 Orthogonal mode transducer 설계와 제작", 한국전자과학회논문지, 11(6), pp. 914-919, 2000년 9월.
- [9] C. A. Balanis, *Antenna Theory; Analysis and Design*, John Wiley & Sons, Inc., 1997.

황 지 환



2001년 2월: 홍익대학교 전파공학과 (공학사)
 2003년 2월: 홍익대학교 전파통신공학과 (공학석사)
 2003년 4월~2006년 5월: LG전자 단말연구소 연구원
 2009년 3월~현재: 홍익대학교 전자

정보통신공학과 박사과정

[주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격 탐사, 안테나

이 경 업



2008년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2008년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격 탐사, SAR 영상 분석

박 성 민



2009년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2009년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격 탐사

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 컴퓨터과학과 (공학박사)
1997년~2001년: 대한원격탐사학회 상임이사
2001년~2008년: 한국전자과학회 상임이사
2006년~2008년: Chair, IEEE GRS Korea Chapter
2009년~2010년: Stanford University 방문교수
1994년~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수
2009년~현재: IEEE Fellow
[주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격 탐사, 레이더, 안테나