

X-밴드 완전 편파 Scatterometer 시스템 보정에 관한 연구

Study on the Calibration of a Full-Polarimetric Scatterometer System at X-band

황지환 · 박성민 · 권순구 · 오이석

Ji-Hwan Hwang · Seong-Min Park · Soon-Gu Kwon · Yisok Oh

요 약

본 논문에서는 X-밴드 대역의 지상운용용 HPS(Hongik Polarimetric Scatterometer) 시스템 보정에 관한 연구 결과를 선보인다. Scatterometer 시스템 보정을 위해 이론적으로 RCS(Radar Cross Section)가 잘 알려진 금속구, 삼각 수동 반사기(trihedral corner reflector), 금속봉 등과 같은 보정용 목표물을 이용하여 이론값과 측정값을 비교함으로써 scatterometer 시스템의 왜곡 정도를 분석한다. 실외 환경에서 scatterometer 시스템을 이용하는 실제 측정상황의 보정 정확도는 보정용 목표물의 정확하고 안정된 측정에 의해 좌우되므로 이를 보완하기 위해 HPS 시스템의 입사각(ζ , ψ -방향) 제어 기능을 응용한 자동화된 2차원 목표물 스캐닝 측정법(2-D target scanning technique)을 함께 선보인다. 이때, scatterometer 시스템의 왜곡 정도를 보정하기 위한 기법으로는 GCT(General Calibration Technique) 기법과 STCT(Single Target Calibration Technique) 기법을 비교 연구하였으며, 보정 정확도를 분석하기 위해서 시험용 목표물로 삼각 수동 반사기의 편파별 RCS와 위상차를 측정/비교하였다. 시스템 보정 정도를 검증하기 위해 세 종류(10/20/30 cm)의 삼각수동 반사기를 이용하였으며, 동일 편파 RCS는 GCT 기법과 STCT 기법을 이용하여 각각 ± 1.0 dB과 ± 0.5 dB의 오차 범위에서 보정되었다. 또한, 동일 편파간 위상차($\phi_{hh} - \phi_{vv}$)는 이론값과 비교하여 $-20^\circ \sim 0^\circ$ 와 약 $\pm 5^\circ$ 의 오차를 각각 보였다.

Abstract

A study on the calibration of an X-band HPS(Hongik Polarimetric Scatterometer) system for ground-based operation is presented in this paper. In order to calibrate the scatterometer system, the degree of its distortions are analyzed by comparison between theoretical- and measured-values using the theoretically well-known calibration targets such as a metal sphere, a trihedral corner reflector(CR) and a metal cylinder. The calibration works in the field conditions depend on the precise and stable measurements of those calibration target. we present a measurement technique, so-called, an automatic 2-D target-scanning technique, using the incidence-angle(ζ - and ψ -directions) control of HPS system. Then, we used STCT(Single-Target Calibration Technique) and GCT(General Calibration Technique) to calibrate a distortion of the scatterometer system, and measured the polarimetric RCS(Radar Cross Section) and phase-difference of a trihedral-CR as a test-target to verify the accuracy of the calibration technique. Then, three different types(i.e., 10, 20, 30 cm) of trihedral-CR were used. we obtained the error ranges about ± 1.0 dB, ± 0.5 dB in a polarimetric RCS and about $-20^\circ \sim 0^\circ$ and $\pm 5^\circ$ in the co-polarized phase-difference by using the GCT and STCT, respectively.

Key words : Calibration, Distortion, HPS, RCS, Full-Polarimetric Data

I. 서 론

최근 국내외적으로 개발 및 운용 중인 위성 SAR

「본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음(no. 2009-0078929).」

홍익대학교 전자정보통신공학과(Electronic Information and Communication Engineering)

· 논문 번호 : 20091221-151

· 교신저자 : 황지환(e-mail : ji-hwan_hwang@mail.hongik.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 2월 8일

(Synthetic Aperture Radar) 시스템(KOMPSAT-5, TerraSAR-X, COSMO-SkyMED SAR 등)은 지구 표면 원격 탐사를 위해 X-밴드 대역의 운용 주파수를 이용하고 있으며^[1], 이를 이용한 비교 연구를 위해 지상운용 목적으로 동일 주파수 대역의 scatterometer 시스템이 요구된다^[2]. 하지만, 지상운용용 scatterometer 시스템은 측정 환경에 많은 영향을 받게 되며, 운용환경에 따른 시스템의 여러 불확실성(uncertainty)을 제거하고 산란체로부터 정확한 후방 산란 계수(back-scattering coefficients)를 얻기 위한 보정 과정이 필요하게 된다^{[4]-[7]}.

Scatterometer 시스템과 완전 편파의 측정 데이터를 위한 보정 작업은 이론적으로 잘 알려진 보정목표물을 이용하여 이론값과 측정값을 비교함으로써 시스템 송수신 왜곡 정도를 왜곡 행렬([R],[T] 또는 [D]) 형태로 분석할 수 있다^{[4],[5]}. 분석된 시스템 왜곡 행렬을 이용하여 시험용 목표물을 측정하여 시스템 보정 정확도를 검증할 수 있다. 이때, 시스템 왜곡을 보정하기 위해 적용될 수 있는 여러 보정 기법에 따라 한 개 또는 다수의 보정용 목표물이 필요하게 되고, 이러한 차이점은 실의 측정 환경에서의 시스템 운용 및 보정 작업에 오차 성분으로 작용하게 된다.

본 논문에서는 HPS(Hongik Polarimetric Scatterometer) 시스템^{[2],[3]}을 이용한 실의 측정 환경에 적합한 보정용 목표물 측정법과 보정 작업 중에 발생하는 여러 오차 성분을 줄이고 시스템을 보다 효율적으로 운용하기 위해 보정 기법에 관한 비교연구를 선보인다.

II. 이론적 배경

완전 편파의 측정 데이터 보정 작업을 위해 사용된 보정/시험용 목표물은 이론적인 RCS가 잘 알려진 금속구(지름: $d=30$ cm), 금속봉(지름: $d=5$ cm, 길이: $L=60$ cm), 삼각 수동 반사기(길이: $L=10, 20, 30$ cm) 등을 이용하였으며, 각각의 목표물의 이론적 모델을 이용하여 계산한 결과를 보정 작업에 이용하였다. 또한, HPS 시스템의 송수신 왜곡 행렬을 얻기 위해 데이터 보정 기법으로 GCT(General polarimetric radar Calibration Technique)^[4]와 STCT(Single Target Calibration Technique)^[5]를 적용하여 실제 측정 환경

에서 적합한 보정 과정을 비교 분석하였다. 이번 장에서는 목표물의 이론적 RCS와 완전 편파 측정 데이터 보정 기법의 이론적 배경에 대해 설명한다.

2-1 목표물의 이론적 RCS

그림 1은 'Mie-series' 해법을 이용한 지름 30 cm 인 금속구의 이론적 RCS를 계산한 결과이며, 이론식은 아래 식 (1), (2)과 같다^[8]. 이때, $j_n(ka)$ 과 $h_n(ka)$ 는 spherical Bessel's, Hankel's function을 나타낸다.

$$\sigma(0) = \frac{4\pi}{k_0^2} |F(0)|^2$$

$$F(0) = -\hat{x} \sum_{n=1}^{\infty} (-i)^{n-1} \frac{n(n+1)}{2} (A_n + iB_n) \quad (1)$$

여기서,

$$A_n = -(-i)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \frac{j_n(k_0 a)}{h_n^{(1)}(k_0 a)}$$

$$B_n = (-i)^{n+1} \frac{2n+1}{n(n+1)} \frac{[k_0 a j_n(k_0 a)]'}{[k_0 a h_n^{(1)}(k_0 a)]'} \quad (2)$$

금속구의 주파수 응답 특성은 금속구 크기와 입사파 파장에 비례하여 그림 1과 같은 RCS 특성을 갖고, 입사파의 파장이 아주 짧아지면(0으로 접근하면) 그 금속구의 RCS가 단면적 크기로 수렴하는 특성이 있다. 특히 금속구의 크기와 파장의 관계가 $ka > 30$ ($a=d/2$, 반지름) 이상의 조건을 만족할 경우, far-field 조건 근사화가 적용된 식 (1), (2)을 적용할 수 있게 된다. 또한, 금속구는 모든 입사 방향에서 대칭적인 구조 특성을 갖기 때문에 측정용 안테나와의 중심선

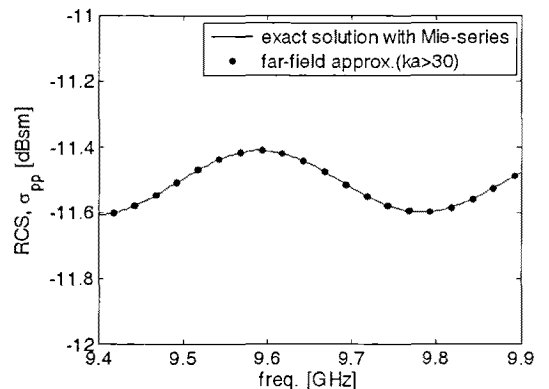


그림 1. 지름($d=30$ cm) 금속구의 이론적 RCS
Fig. 1. The theoretical RCS of a metal-sphere with $d=30$ cm.

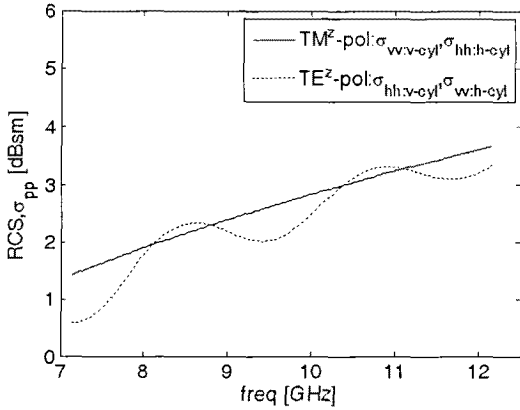


그림 2. $r=5$ cm, $L=60$ cm 금속봉의 이론적 RCS
Fig. 2. The theoretical RCS of a metal-cylinder with $r=5$ cm, $L=60$ cm.

정렬이 용이한 장점을 갖게 된다.

그림 2는 금속봉의 이론적 RCS를 계산한 결과이며, 금속봉에 전파가 수직으로 입사하는 경우의 편파별 특성을 나타낸 것이다. 이때 금속봉의 편파 응답 특성은 금속구와는 다른 입사편파별 RCS 특성이 나타나게 되고, 이를 계산하기 위한 편파별 이론식은 다음의 식 (3)과 같다^[9].

$$\begin{aligned} \sigma_{TM^z} &\approx \frac{4L^2}{\pi} \left| \sum_{n=0}^{\infty} \frac{J_n(\beta a)}{H_n^{(2)}(\beta a)} e^{jn\phi} \right|^2 \\ \sigma_{TE^z} &\approx \frac{4L^2}{\pi} \left| \sum_{n=0}^{\infty} \frac{J_n'(\beta a)}{H_n^{(2)'}(\beta a)} e^{jn\phi} \right|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

금속봉과 입사파의 위치에 따라 주파수 및 편파별 응답 특성이 변하게 되며, 특별히 수직과 수평 그리고 45° 기울어진 경우의 RCS를 고려해볼 수 있다. 45° 기울어진 금속봉의 경우 일반적인 수직, 수평의 경우와는 다른 교차편파 성분이 생성되고, 이는 다음에 설명하게 될 GCT 교정 기법을 이용하기 위해 필수적인 요소가 된다. 45° 기울어진 금속봉의 이론적 산란 행렬은 다음 식 (4)와 같이 표현되어질 수 있다

$$\begin{aligned} \sigma_{45^\circ \text{ cyl } vv, hh} &= \frac{1}{4} [\sigma_{TM} + \sigma_{TE} + 2\sqrt{\sigma_{TM}\sigma_{TE}}], \\ \sigma_{45^\circ \text{ cyl } vh, hv} &= \frac{1}{4} [\sigma_{TM} + \sigma_{TE} - 2\sqrt{\sigma_{TM}\sigma_{TE}}] \end{aligned} \quad (4)$$

삼각 수동 반사기의 경우에는 일반적으로 널리 사용되어지는 GO(Geometric Optics) 모델을 이용한 이론적 RCS 계산식을 이용하였다^[8]. 중심선 정렬이

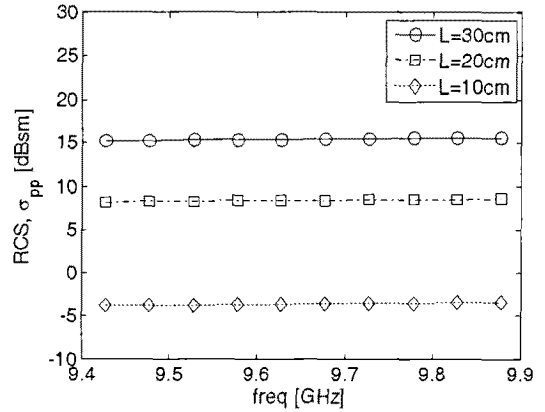


그림 3. 길이 10, 20, 30 cm 삼각 수동 반사기의 이론적 RCS

Fig. 3. The theoretical RCSs of trihedral corner reflectors with 10, 20, 30 cm.

이루어진 위치에서 입사파와 삼각 수동 반사기의 중심선이 이루는 각도는 $\theta=54.73^\circ$, $\phi=45^\circ$ 이며, 다음 식 (5)과 (6)에 이를 적용하여 주파수 응답 특성을 계산할 수 있다. l 은 수동 반사기의 직각변 길이이다.

$$\sigma(\theta, \phi) = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} l^4 \{A - 2A^{-1}\}^2 \quad (5)$$

여기서,

$$A = \cos \theta + \sin \theta (\sin \phi + \cos \phi) \quad (6)$$

삼각 수동 반사기는 교차 편파 응답 특성이 없으며, 금속구에 비해 상대적으로 작은 크기에도 불구하고 높은 RCS를 갖기 때문에 측정 작업에 유리하다. 다시 말해, 주변의 배경 잡음(background noise)에 대한 신호 특성이 우수한 장점이 있다.

2-2 측정 데이터 보정 기법

이번 장에서 지상운용용 완전 편파 scatterometer 시스템 보정을 위해 사용된 GCT와 STCT 보정 기법의 이론적 배경을 설명한다.

먼저, GCT 기법은 다음 식 (7)과 같이 기본적으로 이론적 산란 행렬과 우리가 찾고자 하는 왜곡 행렬의 곱으로써 측정값과의 관계를 나타낼 수 있으며, 세 가지 보정용 목표물($j=1, 2, 3$)을 이용하여 왜곡 행렬식 $[R]$, $[T]$ 를 구할 수 있다. 이때, r_w 와 l_w 는 송수신 왜곡 행렬 $[R]$, $[T]$ 를 vv-편파 기준으로 정규화

하기 위한 송수신 경로의 vv-편파의 왜곡 크기를 나타낸다.

$$N_j = e^{-j\phi} \gamma_{vv} \overline{v} R P_j T, \quad (j=1, 2, 3) \quad (7)$$

송신 경로의 왜곡 행렬 [T]는 아래 식 (8)~(11)을 이용하여 순차적으로 계산을 할 수 있으며, 이때 GCT 기법의 핵심은 식 (9)에서 eigen-vector(X_T, Y_T)와 eigen-value(Λ_T, Λ'_T)를 구하는 것이며, 그 결과를 이용하여 비례행렬(scale-matrix) [C]와 송신 경로의 왜곡 행렬 [T]를 얻을 수 있다^[4].

$$\begin{aligned} N_T &= N_1^{-1} N_2, \quad \overline{N}_T = \overline{N_1^{-1} N_2} \\ P_T &= P_1^{-1} P_2, \quad \overline{P}_T = \overline{P_1^{-1} P_2} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} P_T X_T &= X_T \Lambda'_T, \quad N_T Y_T = Y_T \Lambda_T \\ \Lambda'_T &= \Lambda_T e^{-j(\phi_2 - \phi_1)}, \quad Y_T = T^{-1} X_T \end{aligned} \quad (9)$$

$$T = X_T C Y_T^{-1} = \overline{X_T C Y_T^{-1}} \quad (10)$$

여기서,

$$\begin{aligned} c_1 &= \Delta(Y_T) \left(x_{11} y_{22} - \frac{c_2}{c_1} x_{12} y_{21} \right)^{-1}, \\ c_2 &= \Delta(Y_T) \left(\frac{c_1}{c_2} x_{11} y_{22} - x_{12} y_{21} \right)^{-1}, \\ \frac{c_2}{c_1} &= \frac{(x_{11} \overline{x_{21}} - x_{21} \overline{x_{11}})(y_{22} \overline{y_{11}} - y_{12} \overline{y_{21}})}{(x_{22} \overline{x_{11}} - x_{12} \overline{x_{21}})(y_{11} \overline{y_{21}} - y_{21} \overline{y_{11}})} \\ &= \frac{(x_{11} \overline{x_{22}} - x_{21} \overline{x_{12}})(y_{22} \overline{y_{12}} - y_{12} \overline{y_{22}})}{(x_{22} \overline{x_{12}} - x_{12} \overline{x_{22}})(y_{11} \overline{y_{22}} - y_{21} \overline{y_{12}})} \end{aligned} \quad (11)$$

두 개의 송수신 안테나를 이용하는 scatterometer 시스템의 경우, 위의 수식을 수신 경로에도 동일하게 적용시킬 수 있으며, 수신 경로 왜곡 행렬[R]을 다시 구할 수 있다. 그러나 HPS 시스템과 같이 송수신 안테나가 하나로 이루어진 경우에는 송수신 왜곡 행렬은 $[R]=[T]^T$ 의 관계를 갖게 된다. GCT 기법을 적용하기 위해서는 보정용 목표물 중 적어도 한 개 이상은 역행렬과 교차편파가 존재하는 목표물이 포함되어야 하며, 이는 계산과정 중 특이해(singularity) 발생을 막고, eigen-vector와 eigen-value를 얻기 위한 것이다. 이를 위해 일반적으로 45° 기울어진 금속봉이 이용된다.

다음은 STCT 기법으로 계산식과 보정용 목표물

측정이 간단한 장점이 있으며, 보정용 목표물로 금속구를 이용하면 어떤 방향에서도 쉽게 중심선 정렬을 이룰 수 있는 이점까지도 이용할 수 있게 된다. 하지만, 금속구의 측정은 입사파가 전 방향으로 산란되는 특성과 입사파가 구의 표면을 따라 흐르는 creeping wave 성분도 작용하기 때문에 상대적으로 실외 측정 환경에 영향을 많이 받는 단점 또한 갖게 된다.

STCT 기법의 보정 과정은 먼저 금속구의 이론적 산란 행렬(s^0)과 실외에서 측정된 보정용 목표물(예, 금속구)의 측정값(m_{pq}^0)을 각각 구하고, 다시 시험용 목표물의 측정값(m_{pq}^u)을 식 (12), (13)에 대입해 보정된 시험용 목표물의 RCS를 계산한다^[5].

$$\begin{aligned} s_{vv} &= \frac{1}{(1-C^2)^2} \left[-2C^2 \left(\frac{m_{12}^u}{m_{12}^0} + \frac{m_{21}^u}{m_{21}^0} \right) + (1+C^2) \left(\frac{m_{11}^u}{m_{11}^0} + C^2 \frac{m_{22}^u}{m_{22}^0} \right) \right] s^0 \\ s_{vv} &= \frac{1}{(1-C^2)^2} \left[-2C^2 \left(\frac{m_{12}^u}{m_{12}^0} + \frac{m_{21}^u}{m_{21}^0} \right) + (1+C^2) \left(\frac{m_{22}^u}{m_{22}^0} + C^2 \frac{m_{11}^u}{m_{11}^0} \right) \right] s^0 \\ s_{vh} &= \frac{C}{(1-C^2)^2} \left[2 \frac{m_{12}^u}{m_{12}^0} + 2C^2 \frac{m_{21}^u}{m_{21}^0} - (1+C^2) \left(\frac{m_{11}^u}{m_{11}^0} + C^2 \frac{m_{22}^u}{m_{22}^0} \right) \right] s^0 \\ s_{hv} &= \frac{C}{(1-C^2)^2} \left[2 \frac{m_{21}^u}{m_{21}^0} + 2C^2 \frac{m_{12}^u}{m_{12}^0} - (1+C^2) \left(\frac{m_{11}^u}{m_{11}^0} + C^2 \frac{m_{22}^u}{m_{22}^0} \right) \right] s^0 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \frac{4C^2}{(1+C^2)^2} &= \frac{m_{12}^0 m_{21}^0}{m_{11}^0 m_{22}^0} = a \\ \rightarrow \therefore C &= \pm \frac{1}{\sqrt{a}} (1 - \sqrt{1-a}) \end{aligned} \quad (13)$$

III. 목표물의 산란 행렬 측정

Scatterometer 시스템 보정 작업을 위해 앞서 설명한 금속구, 금속봉, 삼각 수동 반사기 등의 산란 행렬을 측정해야 하며, 이때 보정용 목표물과 시스템 보정 정도를 시험하기 위한 시험 목표물 측정에는 동일한 측정 조건이 유지되는 것이 가장 중요한 부

분이 된다. 따라서 X-밴드 대역의 HPS 시스템 운용 주파수($f_0=9.65$ GHz, BW=500 MHz)를 고려한 최적의 시스템 설정과 실외 측정 환경을 고려한 네트워크 분석기(Agilent 8753D)의 최적설정을 측정을 통해 확인하였다. 또한, 불안정한 실외 측정 환경 하에서도 보다 정확한 측정을 위해 목표물의 정확한 거리 위치와 중심선 정렬을 위한 노력이 필요하고, 이는 산란 행렬의 크기와 위상성분의 오차를 줄이는 요소로 작용하게 된다. HPS 시스템의 입사각(ζ -, ψ -방향) 제어 기능을 이용한 2차원 목표물 스캐닝 측정법을 이용하여 설정범위 내의 공간에서 목표물을 스캔한 측정 데이터로부터 최대값과 각도를 추출해 보정을 위한 중심선 정렬이 이루어진 측정 데이터로 이용한다. 모든 측정 절차는 사용자 설정에 의해 자동으로 측정 및 데이터 저장이 이루어질 수 있도록 프로그램되어 실외 측정 작업 시 운용 효율을 높였다.

3-1 시스템 설정 및 목표물 측정

실외 측정을 위한 최적 설정을 금속구와 삼각 수동 반사기를 이용해 확인하였다. 그림 4는 지름 30 cm의 금속구를 이용해 측정한 결과이며, 측정을 위해 네트워크 분석기의 중심 주파수는 9.65 GHz로 설정하고, 주파수폭은 500 MHz와 700 MHz로 각각 설정하여 측정하였으며, time-gating과 평균값 측정기능을 각각 2~7 ns와 15~20회로 변화시켜 측정하였다.

Range-filtering을 위해 사용된 time-gating 기능은 그 설정값에 따라 일정거리 내의 전파를 수신하게 되므로 금속구의 전방향 산란 특성과 creeping wave 성분까지 포함될 수 있는 적절한 설정이 필요하고, 너무 넓거나 좁은 time-gating 설정은 금속구로부터의 수신신호 특성에 영향을 미칠 수 있다. 또한, 평균값 설정은 바람 등의 불안정한 외부요소에 의한 측정데이터 변화를 낮추기 위해 15~20회 이상 충분히 설정하였다. 또한, 목표물의 주파수 응답 특성의 왜곡을 보정하기 위해 측정시스템의 주파수폭보다 넓은 주파수폭 700 MHz 범위에서의 측정 데이터를 재정렬하는 방법도 고려해 보았지만, 이 방법은 실험결과에서 알 수 있듯이 더 많은 신호 왜곡을 발생시켜 이후 보정 작업에서 제외하였다.

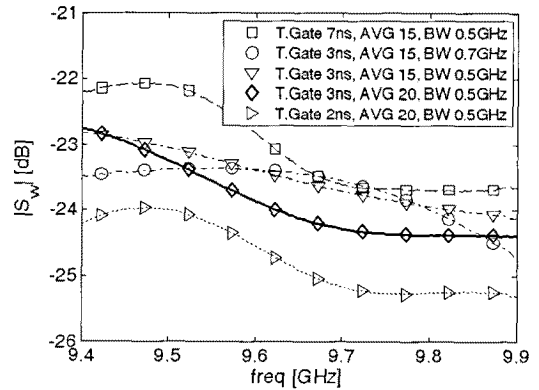


그림 4. 지름 30 cm 금속구의 측정 결과
Fig. 4. The measurement results of a metal sphere with $D=30$ cm.

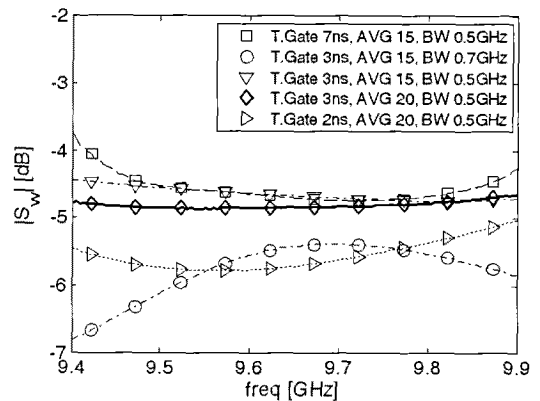


그림 5. 길이 20 cm 삼각 수동 반사기의 측정 결과
Fig. 5. The measurement results of a trihedral corner reflector with $L=20$ cm.

그림 4의 결과는 목표물과의 거리 4.5 m, 높이 1.8 m로 설치된 금속구를 실외에서 측정해 얻은 결과이다. 예를 들어, 지나치게 넓거나(7 ns), 좁은(2 ns) time-gating 설정은 금속구로부터의 산란파 이외의 더 많은 잡음을 수신하거나 응답 신호 자체를 필터링하여 수신 레벨을 낮추는 효과를 줄 수 있다. 이때, 적합한 time-gating의 폭은 3 ns이며, 이는 금속구를 한 바퀴 돌아 나오는 creeping wave까지를 포함할 수 있는 시간이 된다. 즉, 3 ns 시간은 대략 입사파가 지름 30 cm 금속구의 원주(30π cm)만큼 전파가 이동하는 시간과 일치하게 됨을 알 수 있다.

그림 5는 같은 방법으로 삼각 수동 반사기를 측정 한 경우이며, 금속구와 비교해 삼각 수동 반사기의

측정 주파수 범위 내의 응답 특성이 더 평탄함을 알 수 있다. 이는 삼각 수동 반사기의 RCS가 비슷한 크기의 금속구보다 상대적으로 크기 때문에 실외 측정 시 주변 잡음에 대한 신호 특성이 우수하여 나타나는 이점이 된다. 하지만, 삼각 수동 반사기는 방향성이 있는 고유한 RCS 패턴을 갖기 때문에 금속구에 비해 중심선 정렬이 어려운 단점이 있다. 하지만 편파별 주파수 응답 특성은 금속구와 같은 경향을 보인다.

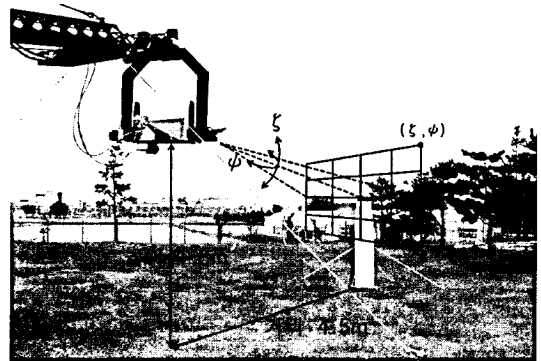
3-2 2차원 목표물 스캐닝 측정법

HPS 시스템 보정 작업을 위한 보정용 목표물 측정에 있어 측정용 안테나와 목표물 사이의 중심선 정렬을 육안으로 정확하게 설정하기란 그리 쉬운 일이 아니며, 목표물 교체 및 반복 측정에 따른 오차 발생은 불가피한 요소가 된다. 측정 장비 및 목표물 설정에 따른 오차 성분을 최소화하기 위해 HPS 시스템의 입사각(ξ , ψ -방향) 제어 기능을 이용하여 중심선 정렬 오차를 줄이고 목표물 측정 정확도를 향상하는 자동화된 2차원 목표물 스캐닝 측정방법을 소개한다.

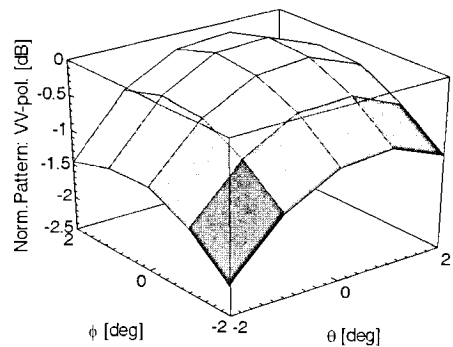
그림 6(a)는 목표물을 측정하기 위해 HPS 시스템의 설정을 보여준다. 목표물은 유전율이 공기와 비슷한 스티로폼 받침대를 이용해서 높이를 조정하며, 바람에 의해 흔들리는 것을 막기 위해 안테나와 목표물 모두를 끈으로 고정시켰다. 육안으로 목표물을 중심선에 가깝게 위치시킨 후 측정용 안테나 ξ -와 ψ -방향의 입사각 제어를 통해 목표물을 공간적으로 측정한다. 이때 설정 범위는 측정 영역이 넓을수록 측정시간이 길어지므로 시간대비 정확도 등을 고려한 적절한 설정이 필요하다. 입사각 제어 기능의 최소 단위는 1° 이며, 오차 범위는 $\pm 0.2^\circ$ 이내에서 제어된다.

그림 6(b)는 목표물 스캐닝 측정법을 이용해 얻은 금속구의 측정 결과이며, ξ -와 ψ -방향 $\pm 2^\circ$ 범위에서 측정되어 중심점($1^\circ, 1^\circ$)의 위치를 확인할 수 있다. 따라서 측정 결과 내의 최대값 위치를 중심선 정렬이 가장 잘 된 데이터로써 추출하여 보정 작업을 위한 기준 데이터로 이용할 수 있다.

IV. 보정 실행 결과 및 비교 분석



(a) 목표물 스캐닝 측정법 개념도
(a) The concepts of 'target scanning measure technique'

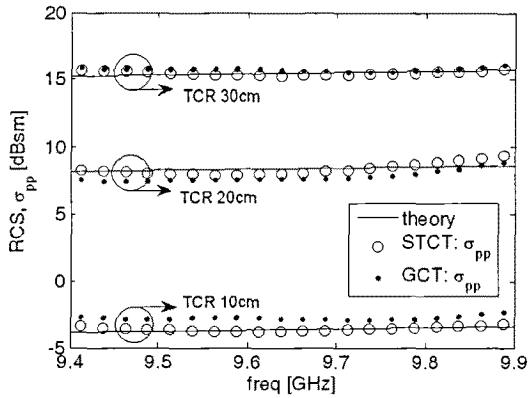


(b) 목표물 스캐닝 측정 예
(b) A example for 'target scanning measure technique'

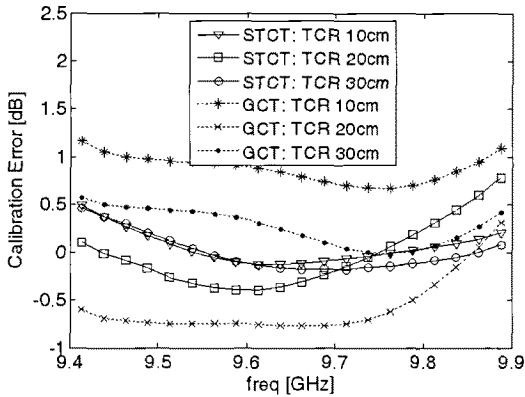
그림 6. 자동화된 2차원 목표물 스캐닝 측정법
Fig. 6. An automatic 2D target scanning measure technique.

자동화된 목표물 스캐닝 측정법을 이용해서 실외 측정 환경에서도 최적의 중심선 정렬을 이룬 측정 데이터를 얻을 수 있었으며, 측정 절차를 자동화함으로써 시스템 운용자간의 측정 편차를 줄이는 효과 또한 기대할 수 있게 된다. 시스템의 송수신 왜곡 행렬을 얻기 위한 보정 작업은 앞서 소개한 GCT 기법과 STCT 기법을 적용할 수 있으며, 보정용 목표물로 금속구와 금속봉을 이용하였다. 보정 결과를 확인하기 위해 10, 20, 30 cm 삼각 수동 반사기를 시험용 목표물로 이용하였으며, 네트워크 분석기의 설정은 중심 주파수 9.65 GHz, 주파수폭 500 MHz, time-gating 3 ns, 평균값 설정 회수 20으로 설정하여 측정하였다.

그림 7(a)는 GCT와 STCT 기법을 이용하여 얻어진 길이 10/20/30 cm 삼각 수동 반사기의 동일 편파



(a) 보정된 RCS
(a) The calibrated RCS



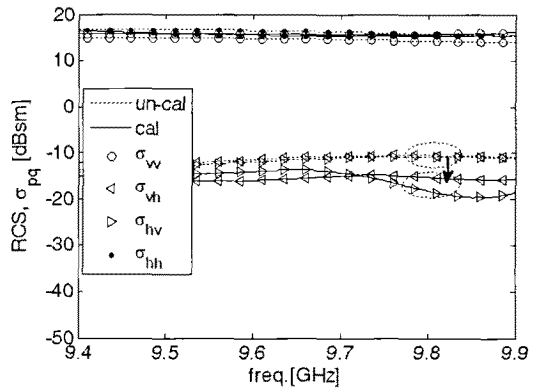
(b) 보정 결과의 오차
(b) The error of calibration results

그림 7. 보정된 삼각 수동 반사기 크기별 RCS
Fig. 7. The calibrated RCS of a trihedral corner reflector by each size.

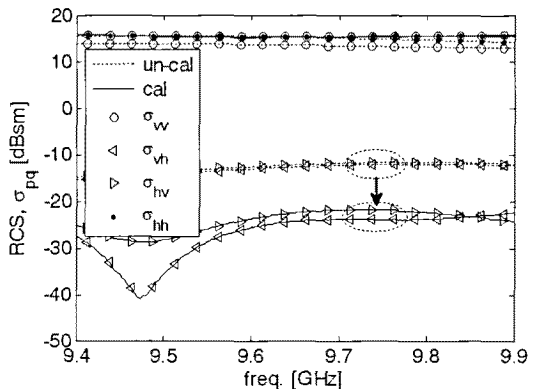
(vv-, hh-pol.) 보정 결과이며, 그림 7(b)는 두 가지 기법을 이용하여 얻은 보정 결과를 이론값과 비교한 오차 성분만을 나타낸 것이다. STCT 기법을 이용한 경우 보정 오차는 세 종류의 수동 반사기에서 모두 ± 0.5 dB 이내의 정확도를 보였으며, GCT 기법을 이용한 경우 최대 +1 dB의 오차를 보였다.

금속구와 삼각 수동 반사기의 경우에는 이론적으로 교차 편파가 없으나, 실제 측정에서는 목표물의 제작 특성과 측정 시스템 성능에 기인한 교차 편파 특성이 나타나며, 이를 이용하여 scatterometer 시스템의 실질적인 편파 격리도(effective polarization isolation) 성능을 평가할 수 있게 된다. 이때, 앞서 이용한 두 가지 보정 기법을 이용한 보정 후 데이터의 동일/

교차편파간 격리도를 그림 8에서 보여준다. STCT 기법을 이용한 경우에 편파 격리도가 10 dB 이상 개선되는 효과를 보이며, 보정 후 대역 내 평균 편파 격리도는 약 40 dB 이상을 보였다. 또한, GCT 기법 경우 5 dB 이내의 개선 효과를 보였다. 금속봉과 금속구는 목표물의 구조적 특성상 산란파가 특정 방향이 아닌 전 방향으로 산란되어 실험 환경 주변 배경과의 간섭 및 다중 산란이 발생될 여지가 많아 상대적으로 실외 측정 시 목표물의 응답 특성이 주변 환경에 민감하게 반응하게 된다. 또한, GCT 보정 기법의 제약 조건 중 하나인 교차 편파 특성을 갖는 보정용 목표물을 위해 45° 기울어진 금속봉의 측정이 필수적이거나, 이를 측정하는 과정에서 목표물 설정의 정



(a) GCT 기법을 이용한 보정 결과
(a) The calibration results with GCT



(b) STCT 기법을 이용한 보정 결과
(b) The calibration results with STCT

그림 8. 30 cm 수동 반사기의 완전 편파 데이터 보정 결과

Fig. 8. The calibration results of full-polarimetric data with 30 cm corner reflector.

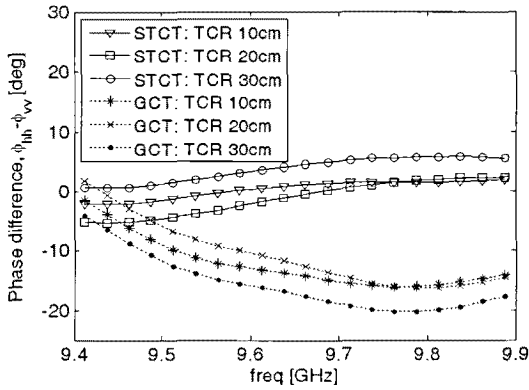


그림 9. 보정된 삼각 수동 반사기 크기별 위상차
 Fig. 9. The calibrated phase difference of a trihedral corner reflector by each size.

표 1. 보정 기법 비교
 Table 1. The comparison of calibration techniques.

	GCT 기법	STCT 기법
보정용 목표물 수	3개	1개
목표물 종류	금속구, 금속봉*	금속구
목표물 선정 조건	* 최소 1개 이상의 목표물이 역행렬 및 교차 편파를 포함 단, 이론적으로 해석 가능한 목표물	없음
시험용 목표물	삼각 수동 반사기(10, 20, 30 cm)	
비고	목표물 선정 조건과 측정이 복잡함	보정 절차 단순함

확도를 유지하기가 어려운 단점이 있으며, 이러한 오차 성분들이 보정 결과에 반영된 것으로 보인다.

그림 9는 동일 편파의 위상차($\phi_{hh} - \phi_{vv}$)를 나타낸 것으로 수직/수평(vv-, hh-pol)의 동일 편파는 이론적으로 동일한 값을 갖게 되고 보정된 측정 결과를 이와 비교한 결과로써, 동일 편파간 위상차는 0°을 기준으로 한 오차 성분을 나타낸다. STCT 기법은 산란 행렬의 크기 성분에서도 알 수 있듯이 동일 편파의 오차가 2차원의 목표물 스캐닝 측정법에 의해 상당히 줄어들었으며, 위상차의 보정에서도 ±5°의 오차 범위에서 보정된 결과를 보여 중심선 정렬에 효과적이었음을 알 수 있다. 하지만, GCT 기법을 이용한 경우는 산란 행렬의 보정 작업이 다수의 보정용 목표물 측정에 의존적이게 되어 동일 편파의 위상차가

0° ~ -20° 범위의 상대적으로 큰 오차를 보였다.

V. 결론

본 논문에서는 X-밴드 HPS 시스템의 효과적인 보정 작업과 실의 측정에서의 보정 정확도를 개선하기 위한 연구 결과를 선보였다. Scatterometer 시스템을 운용하기 위해 실의에서 수행되어야 할 보정 작업과 목표물 측정의 정확도를 개선하기 위해 2차원 목표물 스캐닝 측정법을 소개하였으며, 이를 이용한 측정데이터 보정을 위해 GCT와 STCT 보정 기법을 비교하였다. 실의 측정 환경에서의 측정 편의성과 시스템 운용 효율이 상대적으로 높은 STCT 보정 기법과 2차원 목표물 스캐닝 측정법을 이용하여 얻은 결과는 산란 행렬의 동일 편파의 크기 성분 오차 ±0.5 dB, 위상차 ±5°, 그리고 40 dB 이상의 동일/교차 편파간 편파 격리도를 보였다. 보정 작업을 위한 대부분의 측정 절차를 자동화함으로써 측정 정확도와 반복 측정의 효율성을 높일 수 있었다. 또한, 정확하게 보정된 X-밴드 HPS 시스템을 이용한 각종 지표면에 대한 후방산란 완전 편파 산란계수의 측정은 지구 표면 원격 탐사 연구와 위성 SAR(Synthetic Aperture Radar) 데이터의 비교 연구를 위한 활용 범위가 매우 넓을 것으로 기대된다.

사 의

저자들은 측정을 도와준 홍익대학교 전파응용연구실의 이경엽, 윤지형에게 감사한다.

참 고 문 헌

- [1] F. Caltagirone et al., "SkyMed/COSMO mission overview", *Geoscience and Remote Sensing Proceedings, IGARSS'98*, vol. 2, pp. 683-685, Jul. 1998.
- [2] 황지환, 이경엽, 박성민, 오이석, "X-밴드용 완전 편파 Scatterometer 설계", *한국전자과학회논문지*, 20(12), 2009년 12월.
- [3] P. O'Neill, T. Jackson, D. Entekhabi, and E. Njoku, "Survey of L-band tower and airborne sensor system relevant to upcoming soil moisture missions", *IEEE Newsletter Geosci. Remote Sensing*, Cumulative Iss-

ue #151, ISSN 0274-6338, pp. 13-16, Jun. 2009.

[4] M. W. Whitt, F. T. Ulaby, P. Polatin, and V. V. Liepa, "A general polarimetric radar calibration technique", *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, vol. 39, no. 1, pp. 62-67, Jan. 1991.

[5] K. Sarabandi, F. T. Ulaby, "A convenient technique for polarimetric calibration of single-antenna radar systems", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 28, no. 6, pp. 1022-1033, Nov. 1990.

[6] K. Sarabandi, F. T. Ulaby, and M. A. Tassoudji, "Calibration of polarimetric radar system with good

polarization isolation", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 28, no. 1, pp. 70-75, Nov. 1990.

[7] F. T. Ulaby, C. Elachi, *Radar Polarimetric for Geoscience Applications*, Artech House, Norwood, MA, USA, 1990.

[8] G. T. Ruck, D. E. Barrick, W. D. Stuart, and C. K. Krichbaum, *Radar Cross Section Handbook*, Plenum Press, New York, USA, 1970.

[9] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetic*, John Wiley & Son, pp. 595-633, USA, 1989.

황 지 환



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

[주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 안테나

권 순 구



2007년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2009년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
 2009년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 박사과정
 [주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, SAR 영상 분석

박 성 민



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

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: 한국전자파학회 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 원격탐사, 레이더, 안테나