

X-밴드 대역 능동 전파반사기 RCS 분석 연구

Analysis of the Radar Cross Section of an X-band Active Transponder

황지환 · 권순구 · 원중선* · 오이석

Ji-Hwan Hwang · Soon-Gu Kwon · Joong-Sun Won* · Yisok Oh

요 약

본 논문에서는 X-밴드 대역의 SAR(Synthetic Aperture Radar) 영상 분석을 위해 RCS 조절이 가능한 자체 설계/제작된 능동 전파반사기의 RCS 분석 연구 결과를 선보인다. 다양한 SAR 영상 보정 및 분석 연구를 위해 사용되는 능동 전파반사기의 RCS 크기를 실험실 내 측정(lab-test)과 실제 위성 SAR(COSMO-SkyMed) 영상을 통해 비교 분석하여, 정확히 조절 및 예측 가능한 능동 전파반사기의 RCS 특성을 비교 분석하였다. 설계/제작된 능동 전파반사기의 최대 RCS는 약 60 dBsm이며, 실제 실험 환경을 고려해 최대 RCS와 이보다 20 dB 낮은 RCS의 변화된 특성을 STCT(Single Target Calibration Technique) 보정 기법과 2차원 목표물 스캐닝 측정법(2D Target Scanning Technique)을 이용해 능동반사기의 RCS를 측정하였다. 또한, 실제 위성 SAR 영상으로부터 전력적분 기법(power-spill integration technique)을 통해 전파반사기의 RCS를 추출하여 측정값과 비교 분석하였다. 능동 전파반사기의 측정 RCS는 59.7 dBsm과 40.2 dBsm이었으며, SAR 영상 내 추출 RCS는 57.3 dBsm과 39.2 dBsm이었다.

Abstract

A study on the RCS of a self-manufactured active transponder, which has a manually adjustable RCS, for SAR(Synthetic Aperture Radar) external calibration and image analysis at X-band is presented in this paper. The RCS of the active transponder was comparably analyzed using the lab-test and the COSMO-SkyMed SAR system, and also precisely analyzed the difference between the adjusted and estimated RCSs. A maximum RCS of the designed and manufactured active transponder is 60 dBsm. The active transponders with 60 dBsm and the adjusted RCS of 40 dBsm were measured using the single target calibration technique(STCT) and 2D target scanning technique(2DTST). And the extracted RCS using power-spill integration technique in a SAR image was compared with the measured RCS of active transponder. The comparison results show that the measured and extracted RCSs are 59.7 dBsm, 40.2 dBsm and 57.3 dBsm, 39.2 dBsm, respectively.

Key words : Active Transponder, SAR, Full-Polarimetric, RCS, 2DTST

I. 서 론

능동 전파반사기(active transponder)는 위성 SAR

시스템 보정과 영상 분석을 위해 삼각 수동 전파반사기(trihedral corner reflector)와 함께 널리 사용되는 레이더 목표물 중 하나이다^{[1]-[4]}. 충분히 큰 RCS(Ra-

「본 연구는 항공우주연구원 다목적실용위성5호 시스템 종합개발사업과 한국과학재단 우주기술개발사업(No. 2009-8-1995)의 지원을 받아 수행되었음.」

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

*연세대학교 지구시스템과학과(Department of Earth System Sciences, Yonsei University)

· 논문 번호 : 20101022-151

· 교신저자 : 오이석(e-mail : yisokoh@hongik.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 12월 7일

dar Cross Section)을 획득하기 위해서는 그 크기가 상대적으로 커져야 하는 수동 전파반사기와 달리 능동 전파반사기는 증폭 회로의 이득을 적절히 설계/조절함으로써 원하는 RCS를 쉽게 얻을 수 있다^[1]. 능동 전파반사기는 일반적으로 위성으로부터의 수신 신호를 증폭하여 재송신하는 역할을 하며, 경우에 따라 수신된 신호를 외부 장치에 기록/저장하거나 위상을 변화시켜 SAR 영상 내에서의 위치를 이동시키는 추가 기능을 수행할 수도 있어 SAR 시스템 보정 및 영상 분석을 위한 실제 환경에서 다양한 방법으로 운용되는 장점도 있다^{[2],[3]}. 하지만, 능동 전파반사기는 외부 환경 변화에 따른 증폭 회로를 구성하는 능동 소자들의 성능 변화와 전파반사기를 구성하는 구성품의 조립 상태 등이 전체 전파반사기의 RCS를 변화시키는 요인으로 작용하는 단점 또한 갖게 된다.

이와 같은 장단점을 갖는 능동 전파반사기를 다양한 위성 SAR 시스템을 이용한 실험에 적용하기 위해서 무엇보다 실험 환경과 목적에 맞는 목표물 RCS 선정이 우선시 된다. 또한, 실험 목적에 맞게 조정된 RCS는 정확한 측정을 통하여 성능을 예측/분석할 수 있어야 하며, 이를 토대로 위성 SAR 영상을 이용한 보정 및 다양한 분석 작업의 정확도를 높일 수 있게 된다^[4].

본 논문에서는 자체 설계/제작된 X-밴드 대역 ($f_0=9.65$ GHz, BW=500 MHz) 능동반사기의 RCS를 여러 시험 환경에 적용될 수 있는 최대 60 dBsm과 이보다 20 dB 낮은 40 dBsm로 변화시켜 정확한 RCS를 측정하고, 그 결과를 실제 위성 SAR(COSMO-SkyMed) 영상과 비교 분석하였다. 이때, 특정 크기로 조정된 RCS를 분석/측정하기 위해서 기존의 레이더 이론식을 이용한 방법과 STCT(Single Target Calibration Technique)^[5] 보정 기법과 2차원 목표물 측정법(2D Target Scanning Technique)^[6]을 적용한 능동 전파반사기의 실측 RCS 데이터를 비교 분석하였다.

II. 능동 전파반사기

위성 SAR 영상 분석 및 시스템 보정을 위한 보정기는 일반적으로 목표물과 배경의 후방 산란 계수가

표 1. 능동 전파반사기 설계 규격
Table 1. The specification of active transponder.

구성품	설계 목표	성능(평균)	비고
안테나 빔 폭	10° 이상	10.4°/13.8°	-80 dB 이하 격리도
증폭 회로	60 dB 이상	63.5 dB	
수신 기능	<10 dBm	<최대 20 dBm	
RCS	최대 약 60 dBsm		완전 편파

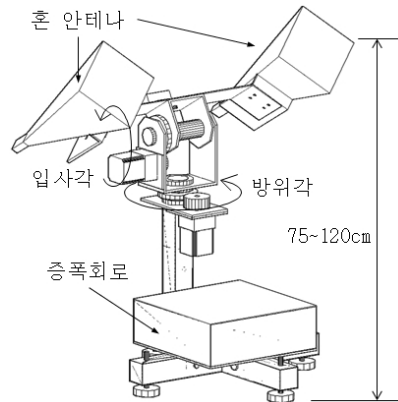


그림 1. 제작된 능동 전파반사기 외형
Fig. 1. Appearance of the manufactured active transponder.

최소 20 dB 이상 나는 낮고 균일한 지역에서 설치와 측정이 이루어진다^[9]. 본 논문에서 이용된 능동 전파반사기의 RCS는 실험 환경에 따라 적절히 조절될 수 있도록 중심각에서 최대 60 dBsm의 RCS를 갖는 전파반사기를 설계 목표로 하였으며, 수신 신호를 기록할 수 있도록 detector 센서를 이용한 수신 기능을 추가하여 위성 SAR 시스템의 검보정과 레이더 빔 패턴 분석 연구에도 활용될 수 있도록 하였다.

2-1 능동 전파반사기 구성

능동 전파반사기의 완전 편파(full-polarimetric) 응답 특성 구현을 위해 그림 1과 같은 선형 편파를 갖는 표준 혼 안테나를 45°씩 기울여 거치시킬 수 있다. 이는 위성으로부터 수신되는 수직/수평 편파에 모두 45° 기울어진 특성 즉, 3 dB 편파 손실을 포함하며, 동일한 편파 응답 특성을 갖게 된다. 또한, 송

수신 안테나를 서로 다른 방향으로 45° 기울임으로써 두 안테나의 상호 간섭(cross-coupling)을 줄일 수 있어 증폭 회로 설계 시 송수신 안테나 간의 상호 간섭으로 인한 증폭 회로의 불안정한 동작 즉, 증폭 회로 내부에 폐 루프(closed-loop)를 형성해 회로가 포화(saturation) 영역으로 진입해 외부 신호에 반응하지 않는 최악의 경우를 피할 수 있게 한다.

따라서 설계 목표의 경로 이득보다 큰 격리도(isolation)를 송수신 안테나가 갖도록 안테나 간격을 설계에 반영하여 설계 목표치에 부합되는 80 dB 이상의 격리도를 최소 이격 거리(20 cm) 내에서 구현할 수 있었다.

2-2 목표물의 이론적 RCS

능동 전파반사기의 RCS는 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다^[4]. 경로 이득(loop gain)은 능동 전파반사기의 증폭 회로 이득을 나타내며, 이는 회로 설계 시 전파반사기의 RCS가 60 dBsm 이상이 되도록 설계되었다. 이때, 동일한 크기의 RCS를 얻기 위해 삼각 수동 전파반사기를 이용할 경우 한 번의 길이는 약 4 m가 된다^[7]. 설계 목표치에 부합되도록 송/수신 안테나 이득을 중심 주파수($f_0=9.65$ GHz)에서 약 22.8 dBi가 되도록 제작하였다.

$$\sigma = \frac{P_t}{S_r} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{loop} G_t G_r \quad (1)$$

여기서,

$$P_r = S_r A_e = S_r G_r \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

$$P_t = P_r G_{loop} G_t$$

P_r : 수신 전력

P_t : 송신 전력

S_r : 수신영역 전력밀도

A_e : 안테나 유효면적

$G_{r,t,loop}$: 송/수신 안테나, 경로 이득

위 식(1)을 이용하여 계산된 능동 전파반사기의 RCS는 송수신 안테나 이득 22.8 dBi, 편파 손실 -6 dB, 케이블 손실 -2 dB, 경로 이득 63.5 dB 등의 측정값을 대입하여 약 60 dBsm을 얻을 수 있다. 표 1의 설계 목표치는 위 식을 근거로 하여 각 구성품들의 성능을 고려한 것이다.

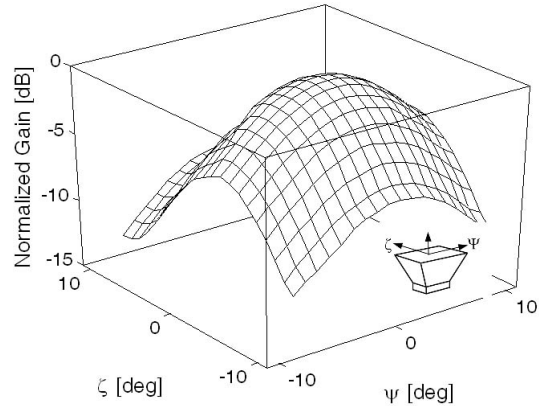


그림 2. 송/수신용 안테나 방사 패턴
Fig. 2. Tx/Rx antenna radiation pattern.

2-3 송수신 안테나 방사 패턴

능동 전파반사기를 구성하는 주요 부분은 경로 이득을 제공하는 증폭 회로와 송/수신용 안테나로 크게 구분할 수 있다. 증폭 회로의 정상 동작 범위에서 능동 전파반사기가 설치/운용된다면, RCS의 크기 변화는 송/수신 안테나의 방향에 의해 결정되게 된다. 다시 말해, 식 (1)에서 G_t, G_r 만이 방향(θ, ϕ)에 관한 함수 특성을 갖게 되어 RCS 특성을 변화시키게 된다. 그림 2는 송/수신용 안테나의 방사 패턴을 나타낸 것으로 elevation(ζ), azimuth(ψ)-방향으로 각각 $\pm 10^\circ$ 범위, 해상도 1° 로 측정된 결과이다. 측정된 안테나의 반전력 빔 폭(HPBW)은 E-plane과 H-plane에서 각각 $10.4^\circ, 13.8^\circ$ 이다.

III. 능동 전파반사기 RCS

전파반사기의 RCS를 측정/분석하기 위해서 앞선 식 (1)에 각 구성품별 측정값을 대입/계산하는 간접 측정 방법과 STCT 보정 기법과 2차원 목표물 스캐닝 측정법을 이용하여 전파반사기의 RCS를 직접 측정한 결과를 분석하였다. 그림 3은 전파반사기의 RCS를 직접 측정하기 위한 측정 구성도를 나타내며, 실제 위성 SAR 시스템 결과와 직접 비교를 위한 성능 측정 시 고려되어야 할 오차 성분을 도식화한 것이다.

3-1 측정 입사각 오차

능동 전파반사기의 성능 분석을 위한 측정은 실

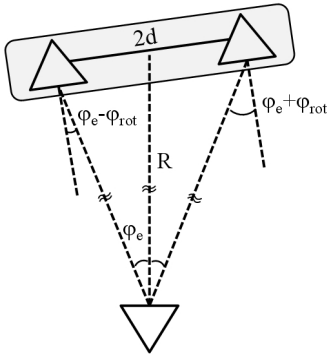


그림 3. RCS 측정 구성도
Fig. 3. Geometry for RCS measurement.

제 위성시스템을 이용한 실험과 달리 측정 거리에 따른 측정 결과에 오차가 포함되게 된다. 이는 전파 반사기의 송/수신용 안테나에 입사되는 전파의 각도에 의한 것으로, 측정 거리가 두 안테나 간의 이격 거리 보다 매우 크면 입사각 오차는 무시할 정도로 줄어들게 된다. 하지만, 전파반사기의 성능 측정을 위해 상대적으로 가까운 거리에서 측정할 경우에는 그림 3과 같은 측정 구성에 의한 입사각 오차(ϕ_e) 성분을 고려해야 한다. 이때, 송/수신용 안테나 방사 패턴을 이용하여 오차 성분을 예측할 수 있으며, 식 (2)는 입사각 오차(ϕ_e)와 안테나 이득 및 RCS 변화량을 나타낸다.

식 (2)를 이용한 입사각별 RCS 변화량을 계산하기 위해서 송/수신용 안테나의 방사 패턴을 45° 기울인 좌표로 적용하여야 한다. 이를 위해 식 (3)은 측정된 안테나 방사 패턴 좌표(ζ, ψ)를 능동 전파반사기의 45° 회전 좌표(θ, ϕ)로 변화하기 위해 적용된다.

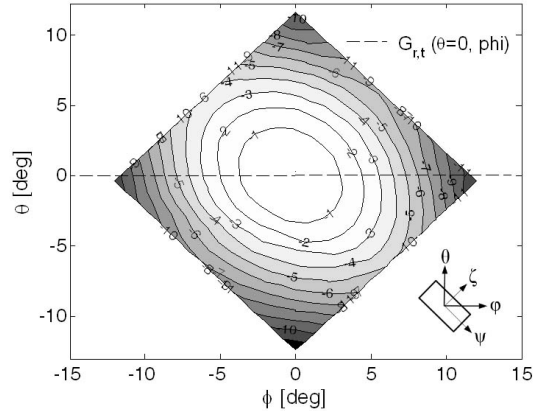
$$\sigma = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{loop} G_t(\theta, \phi_e - \phi_{rot}) G_r(\theta, \phi_e + \phi_{rot}) \quad (2)$$

여기서,

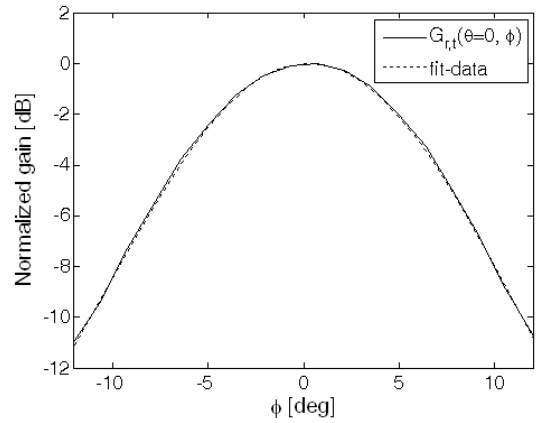
$$\phi_e = \tan^{-1}\left(\frac{d}{R}\right), \quad \phi_{rot} = \text{rotating } \angle$$

$$\begin{bmatrix} \theta \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi_e & -\sin\phi_e \\ \sin\phi_e & \cos\phi_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (3)$$

그림 4(a)는 앞서 측정된 안테나 방사 패턴을 식 (3)을 이용하여 안테나 개구면 좌표(ζ, ψ)를 전파반사기를 위한 기준 좌표(θ, ϕ)로 변환한 것이다. 방



(a) 등고선 형태의 45°회전 좌표 방사 패턴
(a) A contour of the 45° rotated radiation pattern



(b) $\theta=0$ 인 정규화된 방사 패턴
(b) The normalized radiation pattern at $\theta=0$

그림 4. 45°회전 좌표 방사 패턴
Fig. 4. The 45° rotated radiation pattern.

사 패턴의 중심점과 회전각 45°가 반영된 것으로 해당도는 각각 1°, 1 dB 등고선으로 나타난 것이다. 그림 4(b)는 좌표 변환된 측정 데이터에서 θ -방향 입사각이 0°인 기준면에서의 ϕ -방향의 안테나 방사 패턴 데이터를 추출해낸 것이다. 측정 데이터로부터 얻어진 $G_{r,t}(\theta=0, \phi)$ 의 특성 함수는 식 (4)와 같은 4차항의 함수식으로 근사화할 수 있으며, 이를 식 (1)과 (2)에 각각 대입하여 입사각 오차가 있는 경우와 없는 경우의 RCS 오차를 얻을 수 있다. 이때, 식 (4)의 입력변수 ϕ 의 단위는 [deg]이며, 안테나 이득 $G_{lr}(\phi)$ 의 단위는 [dB]가 되도록 근사화 시켰다.

$$G_{l,r}(\phi) = 0.000137\phi^4 - 0.000277\phi^3 - 0.0957\phi^2 + 0.0495\phi \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

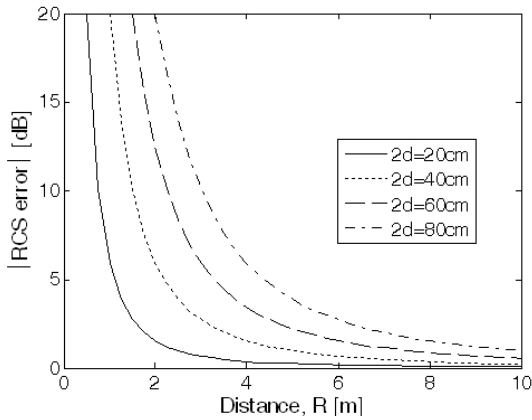


그림 5. 측정 거리(R)에 따른 RCS 오차 변화
 Fig. 5. The variation of RCS error by the measurement distance(R).

그림 5는 좌표 변환된 송/수신 안테나 방사 패턴의 특성 함수를 이용하여 측정 거리(R)에 따른 RCS 오차 변화를 안테나 이격 거리(2d) 별로 비교/분석한 것이다. 중심각의 최대 RCS를 기준으로 오차 1 dB의 정확도를 얻기 위해 20 cm 이격 거리의 경우 최소 4 m 이상의 측정 거리를 확보해야 한다. 다시 말해 본 연구에 사용된 능동 전파반사기의 경우, 2° 이하 입사각 오차(ϕ_e)의 상대 측정 거리(R/d)를 유지해야 한다.

3-2 보정 기법을 이용한 RCS 측정

능동 전파반사기의 정확한 RCS를 비교 분석하기 위해서 각 구성품들이 모두 실제 운용을 위해 조립된 상태로 직접 RCS를 측정하였다. 증폭 회로의 경로 이득 측정값과 식 (1)을 이용한 RCS 계산은 측정 환경에 의한 특성 변화와 경로 손실 등의 실제 변화량을 예측하기 어려운 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서 운용 상태의 능동 전파반사기 RCS를 기준 목표물로 수동 전파반사기(corner reflector, 31.5 cm)를 이용한 STCT 보정 기법과 정확한 중심각 정렬을 위해 1° 해상도를 갖는 2차원 목표물 스캐닝 기법(2DTST)을 이용하여 측정하였다. 이때, 측정 정확도를 높이기 위해서 앞서 얻어진 입사각 오차(ϕ_e)를 2° 이내가 되도록 측정 거리를 유지하였다.

그림 6은 능동 전파반사기 RCS 측정을 위해 전파의 진행거리를 시간으로 변환하여 나타낸 것이다.

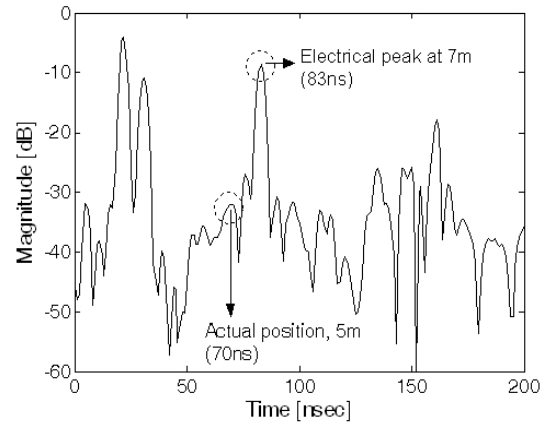


그림 6. 시간 영역에서의 목표물 거리 측정
 Fig. 6. The target distance measurement in the time-domain.

이때, 능동 전파반사기의 물리적 거리와 전기적 거리는 서로 다르게 나타나게 된다. 전파반사기의 증폭 회로와 송/수신용 안테나를 연결하는 케이블의 길이(1 m×2개)에 따라 그 길이만큼의 위상 지연 효과가 발생하게 되고, 이는 시간 영역에서 목표물이 지연된 위상만큼 멀어져 보이는 효과로 작용하게 된다. 그림 6은 능동 전파반사기의 실제 거리(5 m)와 전기적 거리(7 m)를 나타낸 것이며, 두 거리 사이에 시간 지연은 약 13 nsec 정도가 발생되었다. 이는 전파반사기의 RCS 측정을 위해 지지대, 회로부 상자 및 주변 배경과의 간섭 효과를 제거하는 time-gating 적용을 용이하게 한다.

STCT 보정 기법을 이용하기 위해서는 기준 목표물과 측정용 목표물은 동일한 거리에 위치하여야 하며, 이를 위해 그림 6에서와 같이 약 7 m에 해당하는 전기적 거리에 두 목표물이 위치하도록 설정하였다^[8]. 식 (5), (6)의 STCT 보정 기법을 적용하기 위해서 기준 목표물로는 31.5 cm 크기의 삼각 수동 전파반사기를 이용하였으며, 이는 금속구에 비해 상대적으로 부피가 작고 큰 RCS를 갖게 되어 높은 RCS를 갖는 능동 전파반사기 측정을 위해 적합하다.

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

$$\begin{aligned}
 s_{hh} &= \frac{1}{(1-C^2)^2} \left[-2C^2 \left(\frac{m_{12}^u}{m_{12}^0} + \frac{m_{21}^u}{m_{21}^0} \right) + (1+C^2) \left(\frac{m_{22}^u}{m_{22}^0} + C^2 \frac{m_{11}^u}{m_{11}^0} \right) \right] s^0 \\
 s_{vh} &= \frac{C}{(1-C^2)^2} \left[2 \frac{m_{12}^u}{m_{12}^0} + 2C^2 \frac{m_{21}^u}{m_{21}^0} - (1+C^2) \left(\frac{m_{11}^u}{m_{11}^0} + C^2 \frac{m_{22}^u}{m_{22}^0} \right) \right] s^0 \\
 s_{hv} &= \frac{C}{(1-C^2)^2} \left[2 \frac{m_{21}^u}{m_{21}^0} + 2C^2 \frac{m_{12}^u}{m_{12}^0} - (1+C^2) \left(\frac{m_{11}^u}{m_{11}^0} + C^2 \frac{m_{22}^u}{m_{22}^0} \right) \right] s^0
 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 \frac{4C^2}{(1+C^2)^2} &= \frac{m_{12}^0 m_{21}^0}{m_{11}^0 m_{22}^0} = a \\
 \rightarrow \therefore C &= \pm \frac{1}{\sqrt{a}} (1 - \sqrt{1-a})
 \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5), (6)에서 삼각 수동 전파반사기의 이론적 산란행렬(s^0)은 GO 모델^[7]을 이용한 식 (7)을 이용하였으며, 삼각 수동 전파반사기의 측정값(m_{pq}^0)과 능동 전파반사기의 측정값(m_{pq}^u)을 대입해 보정된 RCS를 얻을 수 있다.

$$\sigma(\theta, \phi) = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} l^4 (A - 2A^{-1})^2 \quad (7)$$

여기서, $A = \cos\theta + \sin\theta(\sin\phi + \cos\phi)$

그림 7은 능동 전파반사기의 증폭 회로 이득을 최

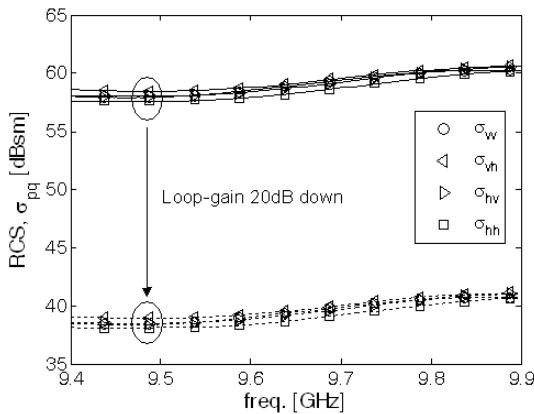
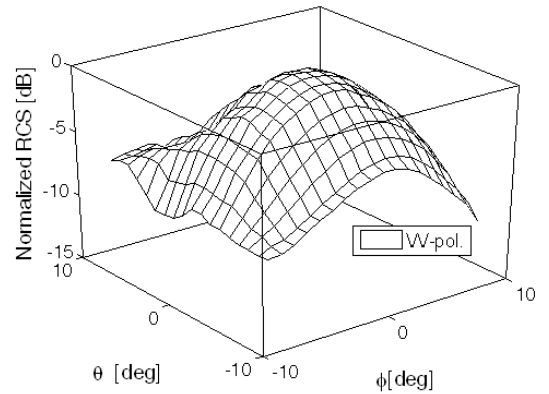


그림 7. STCT 보정 기법을 이용한 RCS 측정
Fig. 7. RCS measurement using single target calibration technique.

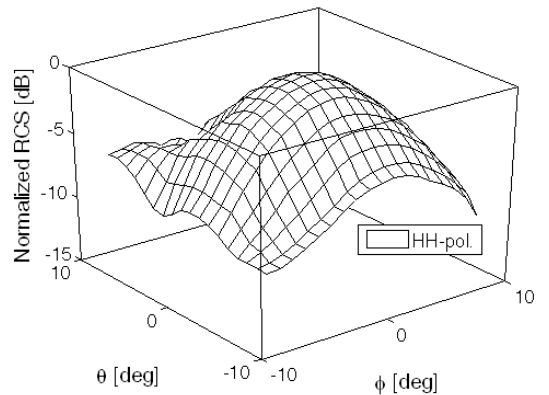
대와 20 dB 낮은 상태로 측정된 결과이다. 운용 대역 내 편파 특성은 편파별 최대 약 0.7 dB의 편차를 나타내며, 이는 능동 전파반사기의 설치 오차 및 조립 특성에 기인하는 것으로 보인다. 또한, 측정 데이터 중 위성 SAR 영상과의 비교 연구를 위해 HH-편파를 이용하였으며, 측정 결과는 각각 대역 내 평균 RCS 60.08/40.58 dBsm과 중심 주파수(9.65 GHz)에서 59.73/40.23 dBsm을 나타낸다.

3-3 RCS 측정 패턴 분석

보정 기법을 이용한 RCS 측정법과 동일한 조건하에서 2차원 목표물 스캐닝 기법을 이용하여 θ, ϕ 방향 $\pm 10^\circ$ 범위에서 능동 전파반사기의 RCS 패턴을 측정하였다. 45° 기울인 송/수신용 안테나는 입사파의



(a) 수직 편파 패턴
(a) The vertical polarization pattern



(b) 수평 편파 패턴
(b) The horizontal polarization pattern

그림 8. 측정된 편파별 RCS 패턴
Fig. 8. The measured polarimetric RCS patterns.

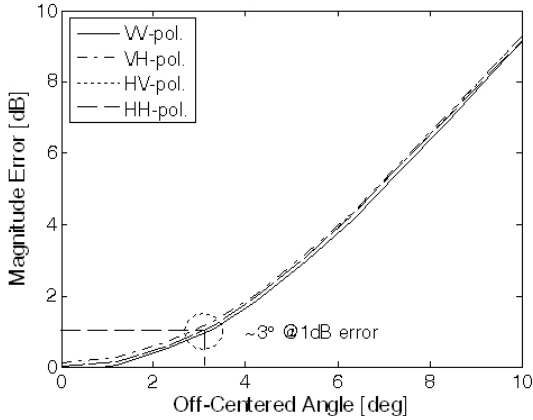


그림 9. 중심각 오차에 의한 RCS 오차 특성 변화
Fig. 9. The variation of the RCS by off-centered angle.

편파 특성과 관계없이 이론적으로 편파 손실 -3 dB를 갖는 동일한 응답 특성을 나타내야 한다.

그림 8은 수평(H-pol.)과 수직(V-pol.) 편파에 대한 전파반사기의 RCS 응답 특성을 나타낸 것으로 입사 편파와 관계없이 동일한 RCS 특성을 갖고 있음을 쉽게 알 수 있다. 또한, 측정된 능동 전파반사기의 RCS 패턴을 이용해 중심각 정렬(boresight alignment) 특성을 분석할 수 있게 된다. 중심각의 위치로부터 각도 오차 성분과 이때의 RCS 변화량을 441개의 측정 데이터 샘플로부터 그림 9와 같이 도식화 할 수 있다. 중심각으로부터 설치 오차가 θ , ϕ 방향으로 약 3° 이상 오차가 발생할 경우, RCS는 최대값 대비 약 1 dB의 설치 오차를 갖게 된다. 실제 위성 SAR 시스템을 이용한 실험의 정확도를 1 dB 이내로 유지하기 위해서 본 능동 전파반사기를 이용할 경우 약 3° 이내의 설치 오차 범위에서의 설치 및 운용이 요구되어진다.

IV. 위성 SAR 영상을 이용한 RCS 분석

자체 설계/제작된 능동 전파반사기를 이용한 RCS 분석 결과를 토대로 실제 위성 SAR 시스템을 이용한 비교 실험을 진행하였다. 사용된 위성 SAR (COSMO-SkyMed) 영상은 해상도 1 m의 spotlight mode로 획득된 수평 편파(HH-pol.)의 고해상도 영상이며, 촬영 지역은 수원 지역에 위치한 국립식량과학원 시험 작목반 내 시험재배 지역으로 선정하였다. 능동 전파반사기가 설치된 지역의 후방 산란 계수(σ°)는 낮

은 초목층과 맨땅으로 구성되어 약 $-5 \sim -10$ dB 정도의 분포를 나타낸다. 따라서 능동 전파반사기의 RCS와 배경의 후방 산란 계수는 약 50 dB 이상의 차이를 갖도록 지역을 선정하였다.

위성 SAR 영상으로부터 능동 전파반사기의 RCS 추출을 위해서 레이더 IRF(Impulse Response Function) 특성에 의해 분산된 전력(power spill)을 모두 적분하였다. 전력 적분 기법에서는 능동 전파반사기 설치된 주변 지역의 배경(background) 전력을 영상에서 제거함으로써 전파반사기와 배경 간의 상호간섭 효과를 제거하였으며, 능동 전파반사기의 RCS는 식 (8)을 이용하여 계산될 수 있다⁹⁾.

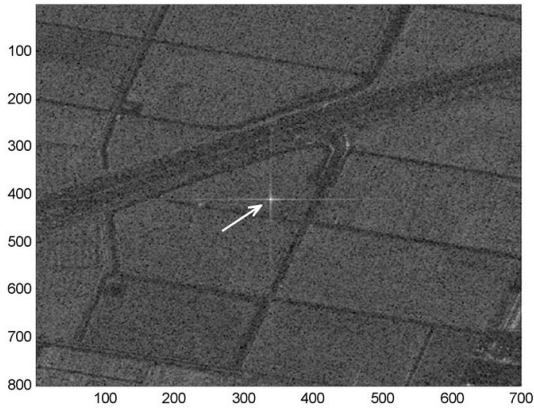
$$\sigma^E = \left(\sum_{N_A}^{(areaA)} a_{ij}^2 - \frac{N_A}{N_C} \sum_{N_C}^{(areaC)} a_{ij}^2 \right) P_a P_g \quad (8)$$

여기서,

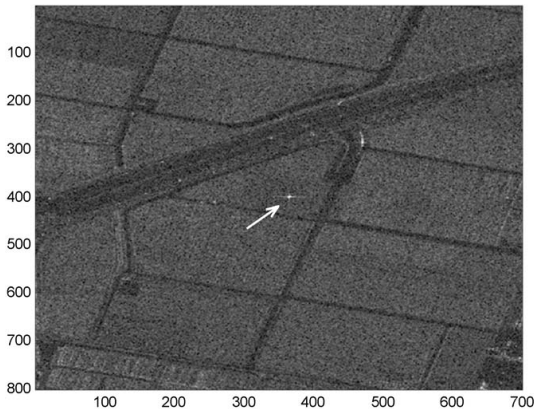
- A : 전체 적분면적
- C : 배경 면적
- N_A : 전체면적 픽셀 수
- N_C : 배경면적 픽셀 수
- a_{ij} : i, j 번째 픽셀의 후방산란계수(σ°)
- P_a : azimuth 방향 해상도
- P_g : ground range 방향 해상도

그림 10은 2010년 8월 12일과 9월 13일에 촬영된 위성 SAR 영상으로 최대 경로 이득(63.5 dB)과 20 dB 낮은 경로 이득(43.5 dB)을 갖도록 각각 능동 전파반사기를 설정하여 획득된 영상이며, 식 (8)을 이용한 전력적분 기법으로 57.32 dBsm과 39.18 dBsm의 RCS를 얻었다.

표 2는 STCT 보정 기법과 위성 SAR 영상으로부터 측정된 RCS를 정리한 것으로 경로 이득을 최대한으로 한 경우에는 약 2.4 dB의 오차를 보이며, 이는 넓은 영역에 걸쳐 발생한 전력 분산 효과로 인한 전력적분 기법의 오차 성분과 방위각 및 고도각 등의 설치 오차가 반영된 것으로 약 5° 의 설치 오차가 있었음을 확인할 수 있었다. 이때의 설치 오차를 제거하기 위해서 두 번째 실험에서는 방위각을 여러 지점에서 반복 측정하고 평균적인 방위각을 지면에 표시하여 능동 전파반사기가 보다 정확히 위치하도록 하였다. 측정 결과는 약 1 dB의 오차를 나타냈으며, 이는 설치 오차가 약 3° 이내로 근접했음을 알 수 있다.



(a) 최대 경로 이득인 경우: 63.5 dB
 (a) The case of the maximum loop-gain: 63.5 dB



(b) 20 dB 낮은 경로 이득인 경우: 43.5 dB
 (b) The case of the 20 dB down loop-gain: 43.5 dB

그림 10. 1 m 해상도를 갖는 위성 SAR 영상
 Fig. 10. The satellite SAR image with 1 m resolution.

표 2. 능동 전파반사기 RCS 측정 결과
 Table 2. The measured RCS of active transponder.

설정	RCS [dBsm]		경로 이득 [dB]
	STCT 측정값	위성 SAR	
#1	59.73	57.32	63.5
#2	40.23	39.18	43.5
비교	오차 2.4 dB, 1.05 dB(HH-pol. 기준)		

V. 결 론

본 논문에서는 자체 설계/제작된 X-밴드 능동 전파반사기를 이용한 RCS 성능 비교/분석 결과를 선보였다. 능동 전파반사기는 최대 약 60 dBsm의 RCS

를 가지며, 보정 기법 적용 후 각 편파별 응답 특성은 약 1 dB의 편차를 갖는 매우 유사한 주파수 특성을 나타냈다. 또한, 보정 기법을 이용한 능동 전파반사기의 실제 RCS 측정값은 계산식보다 실제 장비상태를 반영한 RCS 획득이 가능하며, 위성 영상과의 비교 실험을 통해 약 1 dB 오차 범위의 RCS를 획득할 수 있었다. 2차원 목표물 스캐닝 기법을 통해 획득된 RCS 패턴 정보로는 실제 위성 SAR 시스템을 이용한 실험 환경에서의 설치 오차 등을 분석하는데 기초가 되는 자료를 확보할 수 있다.

본 논문에서 제시한 능동 전파반사기 RCS 분석 연구를 이용하여 보다 정확한 RCS 측정/분석 및 위성 SAR 시스템을 이용한 실제 실험 환경에서의 능동 전파반사기 설치/운용에 폭 넓게 이용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] R. Lenz et al., "TerraSAR-X active radar ground calibrator system", *IEEE A&E Systems Magazine*, pp. 30-33, May 2006.
- [2] S. Falzini et al., "COSMO-SkyMed active calibrator: a sophisticated tool for SAR image calibration", *Geoscience and Remote Sensing Proceedings, IGARSS'07*, pp. 1577-1580, Jul. 2007.
- [3] M. Fujita, "Development of a retrodirective PARC for ALOS/PALSAR calibration", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 41, no. 10, pp. 2177-2186, Oct. 2003.
- [4] D. R. Brunfeldt, F. T. Ulaby, "Active reflector for radar calibration", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 22, no. 2, pp. 165-169, Mar. 1984.
- [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] 황지환, 박성민, 권순구, 오이석, "X-밴드 완전 편파 scatterometer 시스템 보정에 관한 연구", *한국전자과학회논문지*, 21(4), 2010년 4월.
- [7] G. T. Ruck, D. E. Barrick, W. D. Stuart, and C. K. Krichbaum, *Radar Cross Section Handbook*, Plenum

Press, New York, USA, 1970.

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

[9] Anthony Freeman, "SAR calibration: An overview", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 30, no. 6, pp. 1107-1121, Nov. 1992.

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

원 중 선



1983년 2월: 연세대학교 지질학과 (이학사)
1985년 2월: 연세대학교 지질학과 (이학석사)
1993년 5월: 마니토바대학교 지구과학과 (이학박사)
1993년 3월~1996년 2월: 한국해양연구소 선임연구원

1996년 3월~현재: 연세대학교 지구시스템과학과
[주 관심분야] 마이크로파 원격탐사, SAR

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

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 컴퓨터학과 (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 원격탐사, 레이더, 안테나