

# SAR 영상 보정용 삼각 전파 반사기의 정확한 RCS 추출

## RCS Extraction of Trihedral Corner Reflector for SAR Image Calibration

권순구 · 윤지형 · 오이석

Soon-Gu Kwon · Ji-Hyeong Yoon · Yisok Oh

### 요약

본 논문에서는 합성 개구 레이더(SAR: Synthetic Aperture Radar) 영상에서 SAR 보정용으로 설치된 삼각 전파 반사기(TCR: Trihedral Corner Reflector)의 레이더 단면적(RCS: Radar Cross Section)을 정확하게 추출하는 방법을 연구하고, SAR 보정 정확도를 분석한다. TCR의 이론적 RCS를 geometrical optics(GO)와 physical optics(PO) 방법을 이용하여 이론적으로 계산하고, 측정값과 비교하여 정확성을 검증한다. 이때에 단일 반사는 PO로, 이중 반사는 GO-PO로, 삼중 반사는 GO-GO-PO로 계산하고, 모서리 영향은 PTD(Physical Theory of Diffraction) 방법을 이용하여 이론적 RCS를 정확하게 계산한다. 크기가 다른 5개의 TCR를 설치하고, TerraSAR-X로 그 지역에 대한 위성 영상을 취득하여 그 TCR들에 대한 RCS를 추출한다. 레이더 IRF(Impulse Response Function) 특성에 의해 분산된 전력(power spill)을 모두 구하기 위해 정사각형 모양의 면적(window)을 설정하여 정확하게 RCS를 추출하고, 이 RCS를 이론적 RCS와 비교한다. 면적의 크기와 배경의 레이더 후방 산란 계수 크기에 따른 TCR의 RCS 오차를 계산하며, 최소 적분 면적과 최대 배경 산란계수 크기를 제안한다.

### Abstract

This paper presents an algorithm for retrieving precise radar cross sections(RCS) of various trihedral corner reflectors (TCR) which are external calibrators of synthetic aperture radar(SAR) systems. The theoretical RCSs of the TCRs are computed based on the physical optics(PO), geometrical optics(GO), and physical theory of diffraction(PTD) techniques; that is, the RCS computation includes the single reflections(PO), double reflections(GO-PO), triple reflections(GO-GO-PO), and edge diffractions(PTD) from the TCR. At first, we acquire an SAR image of the area that five TCRs installed in, and then extract the RCS of the TCRs. The RCSs of the TCRs are extracted accurately from the SAR image by adding up the power spill, which is generated due to the radar IRF(Impulse Response Function), using a square window. We compare the extracted RCSs with the theoretical RCSs and analyze the difference between the theoretical and experimental RCSs of the TCR for various window sizes and various backscattering coefficient levels of the adjacent area. Finally, we propose the minimum size of the integration area and the maximum level of the backscattering coefficients for the adjacent area.

Key words : SAR Calibration, RCS of Trihedral Corner Reflector, Power Spill

### I. 서론

SAR 위성은 광학 위성과는 달리 기후, 시간에 관

계없이 전천후로 사용이 가능하다는 장점으로 인해 지표면 정보 식별, 생태계 감시, 해양 감시, 재해 감시뿐만 아니라 군사 목적 등 다양한 분야에서 활용

「본 연구는 항공우주연구원 다목적 실용위성5호 시스템 종합개발사업의 지원을 받아 수행되었음.」

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

· 논문 번호 : 20100503-054

· 교신저자 : 권순구(e-mail : soongu-kwon@mail.hongik.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 7월 5일

되고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 SAR 영상의 활용은 곧 영상의 품질에 의존하며, 영상의 품질은 위성의 성능뿐 아니라 발사 후 위성의 검보정 정확도에 직결된다.

SAR 영상의 외부 보정은 일정한 RCS를 갖는 보정 목표물(calibration target) 측정을 통해서 가능하다<sup>[2]</sup>. 보정 목표물에는 크게 능동보정기와 수동보정기로 나뉘며, 능동보정기는 작은 크기에 RCS의 조절이 가능하다는 장점이 있는 반면 높은 비용을 감수해야 한다. 수동보정기는 반대로 부피는 크지만 상대적으로 저렴하다는 장점이 있다. 대표적인 수동보정기로는 삼각 전파 반사기(TCR)가 있으며, 각도 오차에 따른 RCS 변화가 적어 정확한 보정에 유리하다<sup>[3]</sup>.

영상에서 보정기의 RCS를 추출하기 위해 대표적인 RCS 추출 기법인 배경 제거 적분 기법을 사용한다. 이 때 RCS 추출 정확도가 곧 보정의 정확도를 결정한다. 배경 제거 적분 기법의 경우, 균일한 RCS를 가지는 배경을 가정한 기법으로 실제 배경의 균일한 정도에 의해서 정확도가 결정된다<sup>[4]</sup>.

본 논문에서는 단일 반사, 이중 반사, 삼중 반사 그리고 전파 회절을 이용하여 TCR의 이론적 RCS를 정확하게 계산하고 측정값과 비교하여 정확성을 검증한다. 측정값은 시화호 지역에 5개의 TCR을 설치하고 TerraSAR-X로 위성 영상을 취득하여 배경 제거 적분 기법을 이용하여 RCS를 추출하였다. 적분 면적의 크기와 TCR 주변의 후방 산란 계수 크기에 따른 TCR의 RCS 오차를 계산하며, 최소 적분 면적의 크기와 최대 배경 산란계수 크기를 제안한다.

## II. TCR의 이론적 RCS 계산

SAR 영상에서 추출한 TCR의 RCS를 분석하여 정확한 보정 상수를 얻기 위해서는 이론적 RCS를 정확하게 계산해야 한다<sup>[5]</sup>. 이 절에서는 TCR의 이론적 RCS를 정확하게 계산하는 방법을 설명한다. TCR에서 발생하는 전체 RCS의 이론적 분석은 각 표면에서 발생하는 3가지 경우의 단일 반사파, 6가지 경우의 이중 반사파, 6가지 경우의 삼중 반사파와 3개 모서리의 회절파를 고려하여 수행한다.

그림 1은 이론적으로 분석할 TCR의 구조이다. 그림 1에서  $S$ 은 조사 영역을 의미하며,  $S_1$ 은 단일 반

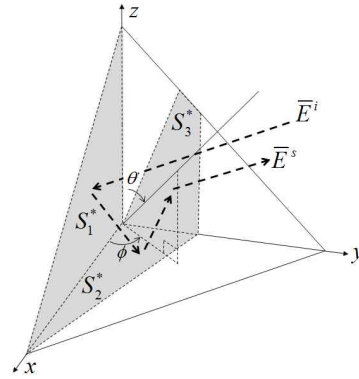


그림 1. TCR의 구조  
Fig. 1. Geometry of the trihedral corner reflector.

사에 대한 조사 영역이며,  $S_2$ 은 이중 반사에 대한 조사 영역,  $S_3$ 은 삼중 반사에 대한 조사 영역이다. 먼저 단일 반사에 의한 RCS는 TCR의 한 표면으로 입사한 전계가 다른 표면으로 향하여 반사하지 않고 후방 산란하여 발생하는 RCS를 의미한다. 다음 식은 편파별 RCS를 계산하는 일반적인 식이다.

$$\sigma_{pq} = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_{pq}^s|^2}{|E_{pq}^i|^2} = 4\pi |S_{pq}|^2 \quad (1)$$

이 때 편파별 산란 행렬의 크기는 입사하는 전계와 산란되는 전계의 관계를 고려하면 다음과 같이 구할 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$S_{pq} = \frac{-jk_0}{2\pi} \int_{S_n} \widehat{p}_s \cdot (\widehat{n} \times \widehat{q}_i) e^{jk_0(\widehat{r}_s - \widehat{r}_i) \cdot \widehat{r}'} ds_n' \quad (2)$$

$\widehat{p}_s$ 와  $\widehat{q}_i$ 는 각각 산란과 입사되는 전계의 편파 특성을 나타내며, 수직 편파  $\widehat{v}_{s,i}$  또는 수평 편파  $\widehat{h}_{s,i}$ 이다. 따라서 단일 반사에 의한 산란 행렬은 다음 식과 같이 3개면에서의 반사파 합으로 표현된다.

$$S_{pq} = \frac{-jk_0}{2\pi} \sum_{n=1}^3 \int_{S_n} \widehat{p}_s \cdot (\widehat{n} \times \widehat{q}_i) e^{jk_0(\widehat{r}_s - \widehat{r}_i) \cdot \widehat{r}'} ds_n' \quad (3)$$

후방 산란인 경우에 식 (3)을 계산하여 정리하면 단일 반사에 의한 동일 편파의 산란 행렬을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_{1,pp} = \frac{a}{4\pi} \left[ I_1 + \frac{t_3}{t_2} I_2 + \frac{t_1}{t_3} I_3 \right] \quad (4)$$

$$\begin{aligned} I_1 &= e^{jx_1(t_1+t_2)} [\sin c(x_1(t_1-t_2)) - \sin c(x_1 t_1)] \\ I_2 &= e^{jx_1 t_3} [\sin c(x_1(t_3-t_1)) - \sin c(x_1 t_3)] \\ I_3 &= e^{jx_1(t_1+t_3)} [\sin c(x_1(t_1-t_3)) - \sin c(x_1 t_1)] \end{aligned}$$

여기서,  $x_1 = k_0 a$ ,  $t_1 = \cos \Theta_s$ ,  $t_2 = \sin \Theta_s \cos \Phi_s$ ,  $t_3 = \sin \Theta_s \sin \Phi_s$ 이고,  $a$ 는 전면 모서리 길이이다.

이중 반사에 의한 RCS는 입사한 전계가 TCR의 한 표면에서 다른 표면으로 반사된 후 후방 산란하는 경우에 발생하는 RCS를 의미한다. 그림 1에서  $S_1^*$ 으로 전계가 입사할 때 반사되어  $S_2^*$ 로 향하는 반사파는 GO를 적용하여 계산하고  $S_2^*$ 에서의 레이더로의 반사는 PO를 적용하여 계산하였다. 식 (2)로부터 동일 편파의 산란 행렬을 구하면 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$S_{2,pp} = \frac{-jk_0}{2\pi} \sum_{n=1}^3 \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^3 A_{mn}^{pp} I_{mn} \quad (5)$$

여기서,  $A_{12}^{pp} = -A_{32}^{pp} = -\cos \Theta_s \cos 2\Phi_s$

$$A_{23}^{pp} = -A_{13}^{pp} = \sin \Theta_s \cos \Phi_s$$

$$A_{31}^{pp} = -A_{21}^{pp} = -\sin \Theta_s \sin \Phi_s$$

$$I_{mm} = \frac{1}{x_2} \left[ \frac{e^{x_2 a}}{x_2 \frac{a}{a_m}} \left( 1 - x_2 \frac{a^2}{a_m} \right) - a \right],$$

$$a_m = \frac{at_m}{t_{m+1} + t_{m+2}}, \quad x_2 = j2k_0 B_{mm},$$

$$B_{12} = B_{21} = \sin \Theta_s \cos \Phi_s,$$

$$B_{23} = B_{32} = \sin \Theta_s \sin \Phi_s$$

$$B_{31} = B_{13} = \cos \Theta_s$$

$$t_1 = \sin \Theta_s \sin \Phi_s, \quad t_2 = \cos \Theta_s$$

$$t_3 = \sin \Theta_s \cos \Phi_s, \quad t_4 = t_1, \quad t_5 = t_2 \text{이다.}$$

삼중 반사에 의한 RCS는 전계가 입사하여 TCR의 표면에서 반사하여 한 표면에서 다른 표면으로 반사를 두 번 한 후 세 번째 표면에서 후방 산란으로 반사하는 경우에 발생하는 RCS이다. 이중 반사와 마찬가지로 식 (2)로부터 동일 편파의 산란 행렬을 구하면 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$S_{3,pp} = \frac{-jk_0}{2\pi} \sum_{n=1}^3 \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^3 \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq n, m}}^3 A_{lmn} I_{lmn} \quad (6)$$

여기서,  $A_{123} = A_{213} = -\sin \Theta_s \cos \Phi_s$

$$A_{231} = A_{321} = -\sin \Theta_s \sin \Phi_s$$

$$A_{132} = A_{312} = -\cos \Theta_s$$

$$\begin{aligned} I_{lmm} &= \frac{1}{2} \left( (a \tan a_l + b_1' + b_3') b_1^m \right. \\ &\quad \left. + (b_1' - b_3')(b_2^m - b_1^m) \right), \end{aligned}$$

$$a_l = \frac{-k_{ilb_l'}}{-k_{ilb_l'+1} + k_{ilb_l'+2}}, \quad b_1' = a \frac{b_0'(b_0^m - a) \tan a_l}{b_0^m + b_0' - a \tan a_l},$$

$$b_1^m = a \frac{b_0^m(1 - \tan a_l)}{b_0^m + b_0' - a \tan a_l}, \quad b_2^m = a \frac{b_0^m}{b_0^m + b_0'},$$

$$b_3' = a \frac{b_0'(1 - \tan a_l)}{b_0^m + b_0' - a \tan a_l}, \quad b_0' = -a \frac{k_{ilmb_l'}}{k_{ilmb_l''}}$$

$$b_0^m = -a \frac{k_{ilmb_l^m}}{k_{ilmb_l''}},$$

$$b^1 = b^4 = y, \quad b^2 = b^5 = z, \quad b^3 = x \text{이다.}$$

모서리에서 발생하는 전파 회절에 의한 편파별 산란 행렬을 구하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. TCR의 한 표면의 모서리의 위치 벡터를  $\mathcal{T}_n$ 이라 하고,  $\mathcal{T}_n$ 에 수직하는 벡터를  $\hat{\beta}'_n$  평행하는 벡터를  $\hat{\beta}'_n$ 으로 정의하였다.  $D_{sn}$ 과  $D_{ln}$ 은 회절 계수로, 입사 회절 계수와 반사 회절 계수의 합과 차로 구한다<sup>[6]</sup>.

$$S_{4,pp} = -\sqrt{\frac{j\beta}{2\pi}} \sum_{n=1}^3 I_n (C_1 + C_2) \quad (7)$$

여기서,  $C_1 = (\hat{q}_i \cdot \hat{\beta}'_n) D_{sn} \cdot (\hat{\mathcal{K}}_s \times \hat{\mathcal{K}}_s \times \hat{\mathcal{T}}_n) \cdot \hat{p}_s$

$$C_2 = (\hat{q}_i \cdot \hat{\beta}'_n) D_{ln} \cdot (\hat{\mathcal{K}}_s \times \hat{\mathcal{T}}_n) \cdot \hat{p}_s$$

$$I_n = -e^{j2k_0 \hat{\mathcal{K}}_i \cdot \hat{p}_n a} e^{jk_0 \hat{\mathcal{K}}_i \cdot \hat{p}_n \sqrt{2} a} \sqrt{2} a \frac{\sin X}{X},$$

$X = k_0 l \hat{\mathcal{K}}_i \cdot \hat{\mathcal{T}}_n$ ,  $n=1, 2, 3$ 에서  $\hat{p}_n = \hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ 이다.

최종적으로 RCS는 단일, 이중, 삼중 반사파와 회절파 영향을 모두 합하여 계산하였다. 그림 2는 지름이 15 cm인 도체구를 이용하여 정확하게 보정된 측정 장비(scatterometer)로 실제 측정된 TCR의 RCS와 위의 식으로 계산한 RCS를 비교한 그림이다. 이 실험에서 사용한 TCR 한 변의 길이는 32 cm이며, 주파수는 X-밴드 9.65 GHz이다. 정면에서 phi 방향으로 좌우 40°까지 1° 간격으로 측정하였다. 이론값의

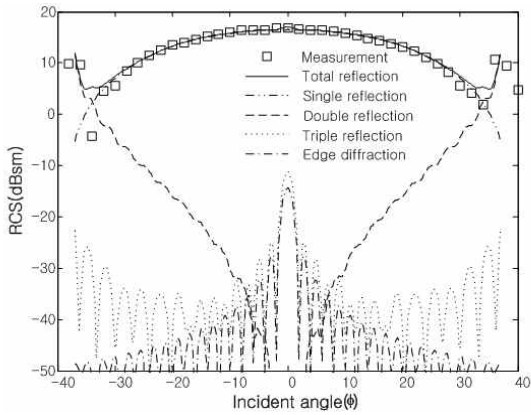


그림 2. TCR의 이론값과 측정값 비교  
Fig. 2. A comparison of TCS's RCS in theory and measurement.

경우,  $\pm 35^\circ$  내에서 삼중 반사에 의한 RCS가 가장 높은 값을 보였으며, 중심에서 단일 반사와 이중 반사의 영향으로 전체 RCS값이 올라갔다. 측정 결과와 이론값이  $\pm 5^\circ$  사이에서 rms error가 0.09 dBsm으로 매우 정확한 것을 확인하였다.

### III. SAR 영상에서 후방 산란 계수 추출 방법

본 장에서는 TerraSAR-X 영상 데이터에서 후방 산란 계수를 추출하는 방법에 대해서 설명한다. 실험에 사용한 영상 데이터는 2009년 10월 10일 09:29 (UTC)에 시화호 일대를 촬영한 spot-mode beam 53에 해당하는 이중 편파(HH&VV) 영상의 level 1b 제품 형태이다.

TerraSAR-X의 1b-level 영상에서 후방 산란 계수를 계산하는 식은 다음과 같다<sup>7)</sup>.

$$\sigma^0 = (k_s |DN|^2 - R) \sin \theta_{loc} \quad (8)$$

여기서, DN(Digital Number)은 TerraSAR-X 영상의 데이터 값이고,  $k_s$ 는 보정상수,  $R$ 은 NEBN(Noise Equivalent Beta Naught),  $\theta_{loc}$ 는 지역별 입사각(LOC: Local Incidence Angle)이다. 위의 식에서 보정상수는 시스템 파라미터에서 얻을 수 있다.

촬영된 TerraSAR-X 영상의 잡음 수준은 NEBN으로 각 pixel에 해당하는 잡음(noise)을 제거하는 상수이다. NEBN은 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$R = \sum_{i=0}^{deg} coeff_i (\tau - \tau_{ref})^i, \tau \in [\tau_{min}; \tau_{max}] \quad (9)$$

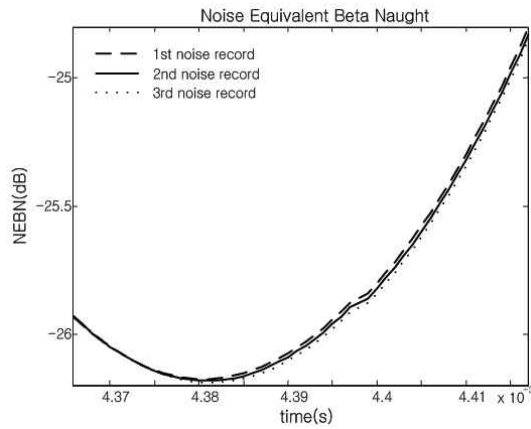


그림 3. HH-편파 SAR 영상의 NEBN  
Fig. 3. NEBN of HH-polarization SAR image.

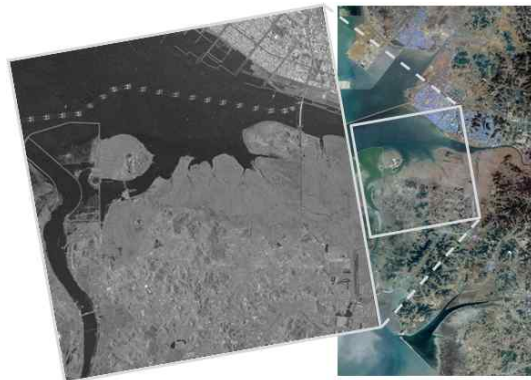


그림 4. 시화호 지역의 TerraSAR-X 영상  
Fig. 4. TerraSAR-X image of Sihwa lake area.

여기서  $\tau$ 는 거리(range) 방향의 시간이고,  $\tau_{ref}$ 는 기준 시간(reference time)을 의미한다. 이 영상에서는 총 7개의 상수를 제공한다. 그림 3은 HH-편파 영상의 거리 방향의 잡음 성분을 계산한 그림이다.

방위(azimuth) 방향에 따라 영상 획득 시작 지점에서 한번, 중간 지점에서 한번, 영상 획득 종료 지점에서 한번, 총 세 번 기록된 잡음을 보여주고 있다.

그림 4는 위의 과정을 통해 구한 TerraSAR-X의 후방 산란 계수 영상이다. 왼쪽 영상이 TerraSAR-X 영상이고, 오른쪽은 시화호 일대를 보여주기 위한 항공 사진이다.

### IV. SAR 영상에서 TCR의 RCS 추출 방법

SAR 영상에서 TCR의 RCS를 추출하기 위하여

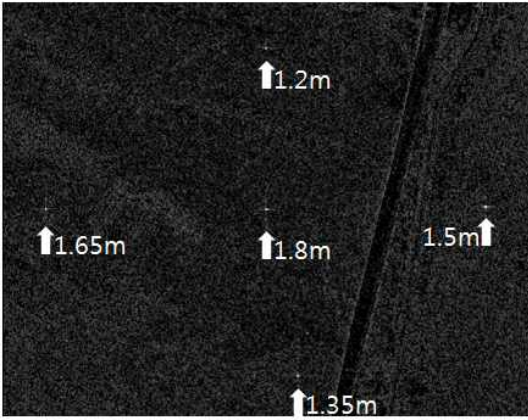


그림 5. 5개 TCR을 포함한 TerraSAR-X 영상  
Fig. 5. Five TCRs in a TerraSAR-X image.

TerraSAR-X 촬영 스케줄에 맞춰 시화호 지역에 크기가 다른 5개의 TCR을 설치하였다. 그림 5는 TerraSAR-X 영상에서 TCR이 설치된 지역의 영상이다.

크기 별로 작은 변의 크기가 1.2 m, 1.35 m, 1.5 m, 1.65 m, 1.8 m인 TCR을 설치하였으며, 그림 5에서 화살표들이 TCR을 가리키고 있다. 시화호 일대는 갯벌을 매운 땅으로 매우 평평하고 넓은 지역에서 편차 없이 일정한 후방 산란 계수를 가지는 지역으로 TCR을 설치하기에 적합하다.

영상으로부터 TCR의 RCS 추출을 위해서 레이더 IRF(Impulse Response Function) 특성에 의해 분산된 전력(power spill)을 모두 적분하였다. 전력 적분 기법에서는 TCR이 설치된 주변 지역이 TCR 설치 지역과 같은 후방 산란 계수를 갖는다고 가정하고, TCR 반사 전력을 적분한 후에 배경(background) 전력을 제거하는 기법으로, RCS를 추출하는 수식은 다음과 같다<sup>[8]</sup>.

$$\sigma^E = \left( \sum_{N_A}^{(areaA)} a_{ij}^2 - \frac{N_A}{N_C} \sum_{N_C}^{(areaC)} a_{ij}^2 \right) P_a P_g \quad (10)$$

여기서, 면적  $A$ 는 적분하는 전체 면적이며, 면적  $C$ 는 그 중에서 주변 지역에 해당하는 면적이며,  $N_A$ 는 전체 면적의 픽셀 수이고,  $N_C$ 는 주변 지역의 픽셀 수이다. 또한  $a_{ij}$ 는  $i, j$ 번째 픽셀의 후방 산란 계수 값이며, 제곱이므로 전력 단위가 된다.  $P_a$ 는 방위 방향의 해상도이며,  $P_g$ 는 거리 방향의 해상도이다.

표 1. TCR의 이론적 RCS와 영상의 RCS 비교

Table 1. Comparison of theoretical and extracted RCSs.

TCR 크기 (m)	이론적 RCS (dBsm)	추출된 RCS (dBsm)		보정 상수 (dB)	
		VV	HH	VV	HH
1.20	39.58	38.95	39.24	0.63	0.34
1.35	41.52	41.74	42.04	-0.22	-0.52
1.50	43.49	43.24	43.54	0.25	-0.05
1.65	45.00	42.77	42.86	2.23	2.14
1.80	46.63	44.99	45.18	1.64	1.45

전력 적분 기법을 사용하여 TerraSAR-X 영상에서 TCR들의 RCS들을 추출하였다. 레이더 IRF 특성에 따라 발생한 분산 전력을 모두 포함하기 위해서 전체 면적의 크기가  $33 \times 33$  픽셀일 경우에 SAR 영상에서 추출한 TCR들의 RCS를 이론적 RCS와 비교하여 보정상수를 계산한 결과를 표 1에 보이고 있다. 이 보정 상수가 0 dB(=1.0) 근처의 값으로 얻어지는 것은 이미 보정된 영상을 얻었기 때문이다.

표 1에서 보듯이 1.35 m TCR의 경우에는 이론적 RCS와 유사하지만 약간 적은 값의 RCS가 추출되었지만 나머지 경우에는 큰 값이 추출되었다. 1.35 m과 1.5 m TCR들만을 보면  $\pm 0.3$  dB 이내로 보정이 잘 된 영상 같지만, 1.65 m과 1.8 m TCR들을 고려해 보면, 1.5~2.2 dB만큼 보정이 덜 된 것처럼 보인다. 이렇듯이 TCR 크기마다 보정 상수가 다르게 나온 것은 (1) TCR의 RCS를 추출하는 과정에서 생기는 오차, (2) TCR 설치과정에서 생기는 오차, (3) TCR 형태의 변형에서 오는 오류 등이 있을 수 있을 것이다. 이 결과는 TCR의 정확한 설치와 온전한 형태 보전의 중요성을 보여주고 있으며, 다음 절에서는 TCR의 RCS 추출 과정에서 발생할 수 있는 오차에 대한 분석 과정과 결과를 보여 준다.

## V. 면적 크기와 배경 RCS에 따른 오차 분석

먼저 전체 적분 면적 크기의 변화에 따른 RCS의 변화를 분석하였다. 정사각형 적분 면적 한쪽 변 길이가 1~33픽셀까지 변화할 동안 각각의 TCR의 RCS 변화를 계산하였다. 1픽셀 만을 사용했을 경우에는 가장 전력이 큰 픽셀을 선정하여 배경을 제외하지 않았고, 분산된 전력을 적분하지 않은 경우이다. 2~

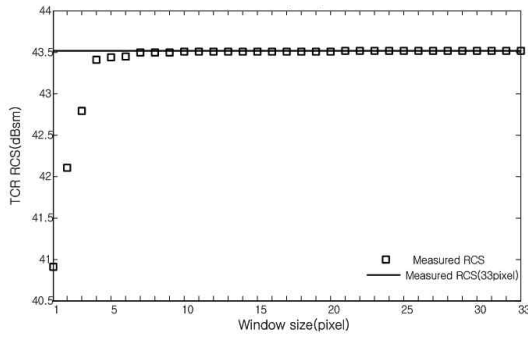


그림 6. 1.5 m TCR의 경우에 적분 면적 크기에 따른 RCS 변화 계산

Fig. 6. RCS of 1.5 m TCR for various integration areas.

3픽셀일 경우에는 가장 전력이 큰 픽셀을 중심으로 가로, 세로 1줄씩 선정하여 적분하고, 나머지 픽셀을 배경으로 선정하였다. 4~6픽셀일 경우에는 가장 전력이 큰 픽셀과 그 다음 크기의 픽셀을 포함하는 가로, 세로 각 두 줄을 선정하여 적분하고, 나머지 픽셀을 배경으로 선정하였다. 7픽셀의 경우에는 가장 전력이 큰 픽셀을 중심으로 가로 세로 3줄씩(33픽셀) 선정하여 적분하고, 나머지 픽셀(16픽셀)을 배경의 픽셀로 정하였다. 9픽셀인 경우에는 적분 픽셀은 7픽셀의 경우와 같고(33픽셀), 배경 픽셀은 36픽셀을 사용하였다. 면적 한 변의 길이 픽셀 수가 4씩 증가할 때마다 TCR 전력 적분 픽셀 줄과 배경 적분 픽셀 줄이 각각 2픽셀씩 늘어나게 설정하여 TCR의 RCS를 계산하였다(13, 17, 21, 25, 29, 33픽셀의 경우임).

그림 6은 TCR의 크기가 1.5 m일 때 적분 면적 크기에 따른 RCS의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 실선은 배경이 충분히 큰 33×33픽셀인 경우에 적분법에 의해 얻는 RCS 값을 보여 준다.

전체 적분 면적이 1픽셀인 경우 33픽셀과의 차이는 2.60 dB이고, 이 차이는 점점 줄어들어 7픽셀 이상에서 0.01 dB의 낮은 오차를 보이고 있다.

표 2는 TCR의 크기가 1.2, 1.35, 1.5, 1.65, 1.8 m일 경우에 적분 면적이 1~7픽셀에서의 이론값과 측정값을 비교한 표이다. 적분 면적이 작게 되면 분산된 전력을 전부 적분할 수 없기 때문에 오차가 발생한다. 적분 면적이 7×7픽셀 이상이 되면 오차가 0.05 dB 미만이 되어 적분 면적 크기는 RCS 변화에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다.

표 2. 적분 면적 크기에 따른 RCS 변화 비교

Table 2. RCS variation for various integration areas.

적분 면적 (픽셀)	33×33픽셀 적분과의 차이(dB)				
	1.2 m	1.35 m	1.5 m	1.65 m	1.8 m
1×1	2.45	4.38	2.60	2.46	3.35
2×2	1.34	2.23	1.41	1.64	2.55
3×3	0.20	1.90	0.72	0.65	0.99
4×4	0.15	0.20	0.10	0.44	0.51
5×5	0.13	0.15	0.08	0.31	0.35
6×6	0.04	0.12	0.06	0.26	0.29
7×7	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02

표 3. TerraSAR-X 영상에서 TCR 픽셀과 주변 배경 픽셀들의 후방 산란계수 비교(HH-편파)

Table 3. Backscattering coefficients of TCR pixels and background pixels in the TerraSAR-X image(HH-polarization).

TCR 크기 (m)	이론적 RCS (dBsm)	추출된 RCS (dBsm)	TCR 픽셀 산란계수 (dB)	주변 산란계수 (dB)	주변 산란계수 표준편차 (dB)	산란계수 차이 (dB)
1.20	39.58	39.27	31.1	-15.2	6.24	46.3
1.35	41.52	41.84	31.9	-14.8	6.24	46.7
1.50	43.49	43.54	35.2	-13.3	6.10	48.5
1.65	45.00	42.80	34.7	-13.6	6.33	48.3
1.80	46.63	45.18	35.8	-15.8	6.77	51.6

이번에는 TCR을 설치한 지역(배경)의 후방 산란 계수 크기가 TCR RCS 추출에 어떤 영향을 주는지 알아보기 위해 실험적 수치적 연구를 수행하였다. 표 3은 TerraSAR-X 영상에서 추출한 TCR 위치 픽셀의 후방 산란 계수와 주변 배경의 후방 산란 계수를 비교하여 보여주고 있다. 영상에서 얻은 TCR 주변 산란 계수 범위가 -13~-16 dB이고, 이 산란 계수의 표준 편차 범위는 6.1~6.8 dB임을 알 수 있다.

주변 산란 계수의 크기가 TCR RCS 추출에 어떤 영향을 주는지 상세히 확인해 보기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 영상에서 배경을 제거한 TCR의 IRF를 추출하였다. 크기가 1.5 m인 TCR의 IRF를 추출하였으며, 추출된 RCS는 이론값과 같은 43.49 dBsm이다. 그림 7은 추출된 IRF와 임의로 발생시킨 후방 산란 계수를 더하여 얻은 TCR의 SAR 영상을 보여 준다. 이 때 TCR이 위치한 중앙 픽셀의 산란 계수는 35.2 dB이고, 배경 후방 산란 계수의 크기는 0 dB이며, 후방 산란 계수의 표준 편차는

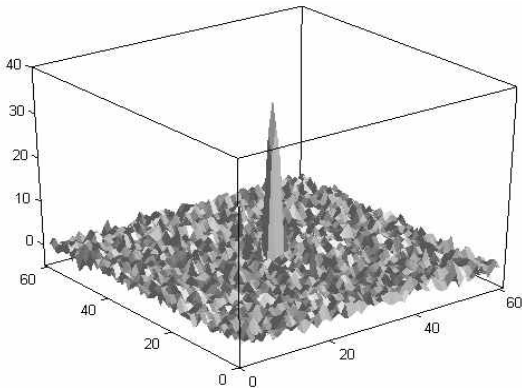


그림 7. TCR의 SAR 영상 생성  
Fig. 7. SAR image of a TCR.

1 dB이고, 방위와 거리 방향의 상관 길이는 1픽셀이다.

그림 8은 배경 후방 산란 계수 크기가 -10 dB에서 10 dB까지 변할 때 표준 편차 크기가 2, 4, 6 dB이고, 상관 길이가 1픽셀인 경우에 TCR의 RCS 변화를 계산한 그림이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 배경 후방 산란 계수가 높을수록 오차가 커진다. 표준 편차의 크기에 관계없이 배경 후방 산란 계수 크기가 -5 dB 이하에서는 오차가 0.06 dB 이하이고, 배경 후방 산란 계수가 0 dB일 때는 표준편차가 각각 2, 4, 6 dB일 경우에 0.05, 0.11, 0.13 dB의 오차를 보인다.

이 계산에 사용한 1.5m TCR의 경우, 최대 산란 계수가 중앙에서 35 dB이므로 오차 발생 기준점인 0

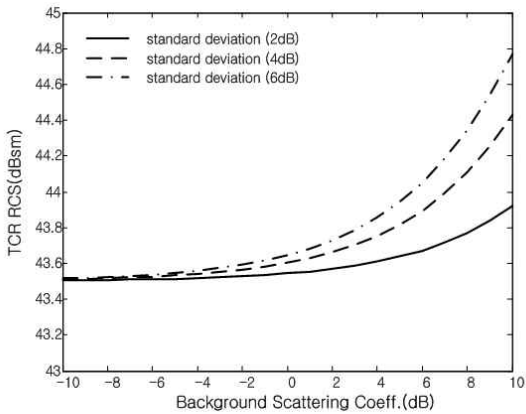


그림 8. 배경 후방 산란 계수와 표준편차 변화에 따른 RCS 변화  
Fig. 8. TCR RCS vs. background scattering coefficient with various standard deviations.

dB와는 35 dB의 차이가 있다. 0.1 dB 이하의 오차를 갖기 위해서는 시스템의 dynamic range가 충분하다는 가정에서, 보정기 설치 픽셀의 산란 계수와 35 dB 이상의 차이가 나는 배경을 선정하여 보정기를 설치하여야 한다.

표 3에서 보듯이 TCR 픽셀의 후방 산란 계수와 주변 픽셀의 후방 산란 계수 차이가 40 dB보다 크므로, 그림 8의 시뮬레이션 결과에 의하면 주변 영향에 의한 오차는 매우 적을 것이다. 그러므로 1.65 m와 1.8 m TCR들에서 보이는 이론적 RCS와 영상 추출 RCS와의 차이는 TCR 설치 혹은 TCR 구조 변형이 주는 오차로 여겨진다. 또한, TerraSAR-X의 영상 보정이 완벽하지 않을 가능성도 배제할 수 없으므로 향후에 여러 다른 배경을 이용한 SAR 외부 보정 실험들을 수행할 필요가 있다.

## VI. 결 론

SAR 영상에서 TCR의 정확한 RCS 추출을 위해서 기준이 되는 이론적 RCS를 단일 반사파, 이중 반사파, 삼중 반사파와 모서리 회절파를 고려하여 정확하게 계산하였다. 시화호 지역에 5개의 TCR을 설치하고 TerraSAR-X 영상을 획득하여 그 영상에서 적분법을 이용하여 후방 산란 계수를 추출하였다. 이론값과 비교하여 SAR 보정 상수를 얻었으며, 이 보정 상수의 오차를 분석하기 위해 적분 면적 크기의 변화와 배경 후방 산란 계수 크기 변화에 따른 RCS 오차를 계산하였다.

TCR 크기가 1.2 m와 1.8 m 사이일 때에 X-밴드 Spot-mode 영상을 이용하여 보정한다면, 적분 면적 크기는 최소한 7×7픽셀 이상이어야 하며, SAR IRF 특성을 고려한 TCR 중간 픽셀의 크기보다 30 dB 이상 작은 후방 산란 계수를 갖는 지역에 설치하는 것을 제안한다.

## 사 의

측정에 도움을 준 홍익대학교 황지환, 박성민, 항공우주연구원의 이경엽과 SAR 영상 해석에 도움을 준 서울대학교 김덕진 교수와 LIG NEX1의 나재호에게 감사드립니다.



참 고 문 헌

- [1] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing Active and Passive*, vol. III, Artech House, 1986.
- [2] K. Sarabandi, L. E. Pierce, and F. T. Ulaby, "Calibration of a polarimetric imaging SAR", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 30, no. 3, pp. 540-549, May 1992.
- [3] F. T. Ulaby, C. Elachi, *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*, Artech House, Inc, 1990.
- [4] C. Buck, "ASAR external calibration", *Proc. of the Envisat Calibration Review*, ESTEC, ESA publication SP-520, Sep. 2002.
- [5] K. Sarabandi, T. C. Chiu, "Optimum corner reflectors for calibration of imaging radars", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 44, no. 10, pp. 1348-1361, Oct. 1996.
- [6] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- [7] T. Fritz, "TerraSAR-X ground segment level 1b product format specification", Dec. 2007.  
<http://sss.terrasar-x.dlr.de/>
- [8] J-H. Na, Y. Oh, "Examination of spatial integration method for extracting the RCS of a calibration target from SAR images", *Intern. Symp. Remote Sensing*, vol. 1, pp. 254-257, 2007.

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 컴퓨터공학과 (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

윤 지 형



2008년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)  
 2010년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)  
 2010년 3월~현재: 주식회사 모피언스 연구원  
 [주 관심분야] 전파산란, 전파회절