SAR 위성 검보정을 위한 반사기 개발

금정훈^{1†}, 나성웅²

¹한국항공우주연구원 다목적5호체계팀, ²충남대학교 전기정보통신공학부

A Development of Reflector for CAL/VAL of SAR Satellite

Jung-Hoon Keum^{1†} and Sung-Woong Ra²

¹KOMPSAT-5 Program Office, Korea Aerospace Research Institute(KARI), Daejeon 305-333, Korea

²Division of Electrical Engineering and Information & Communication Engineering,

Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

E-mail: jhkeum@kari.re.kr

(Received September 17, 2009; Accepted November 20, 2009)

요 약

탐재체(Payload)는 수동형과 능동형으로 분류되며, 다양한 형태의 레이더 영상(Radar Image)을 획득하기 위한 위성은 일반적으로 능동형 탐재체인 SAR(Synthetic Aperture Radar)를 이용한다. SAR 위성은 탐재체에서 송신한 전파가 반사되는 것을 획득하여 영상을 형성한다. 때문에 위성이 반사신호를 설계한대로 획득하여 영상을 구성하기 위해서는 궤도에서 실제로 획득한 지상 영상을 기반으로 검보정을 수행하여야 한다. 이에 필요한 것이 지상 목표물인 각면판 반사기(CR; Corner Reflector)이다. 반사기(Reflector)는 다양한 형태가 있으며, SAR를 탑재한 위성의 특성 및 운영목적에 적절하게 설계되어 활용된다. 여기서는 최적의 반사기와 효율적인 반사기들의 특성을 확인하고 그에 대한 고찰을 수행하였다. 또한 그 결과를 바탕으로 삼면판 반사기(Trihedral Corner Reflector)를 설계하고 관련 성능을 확인하였다.

Abstract

The payload can be classified as a passive and active type. Generally radar satellite to acquire specific information through various radar images will use the SAR (Synthetic Aperture Radar) as active type payload. the principal of SAR satellite is to receive the signal returned from certain objects and/or surfaces in order to construct an radar image. The data acquired from the satellite in its real orbit shall be needed to perform successful CAL/VAL (Calibration & Validation) because the SAR satellite have to receive the returned signal for SAR image construction. In order to do the above, the returned signal shall be related to ground targets. Especially ground target is the corner reflector (CR) for CAL/VAL. Generally the reflector has various types and shapes. Their selection can be dependent on characteristics and mission objectives of SAR satellite. In this paper, reflector focused on the optimal case and effective case has been studied and then the trihedral corner reflector under this study has been designed and its performance also analyzed.

Keywords: corner reflector, calibration & validation, SAR satellite, radar cross section, Luneburg-

lens

[†]corresponding author

그림 1. 일반적 레이더 개념.

1. 서론

원격탐사를 위해 현재까지 다양한 기술이 개발되어 왔다. 이에 부응하기 위해 다양하고 새로운 개념의 위성개발도 이루어지고 있다. 위성기술은 인공위성에 광학카메라를 장착하여 다양한 지역의 지상영상자료를 수집하고 분석하면서 수요가 증가하였고 그로인해 기반기술들의 비약적인 발전이 이루어졌다(신재민 외 2005).

위성에 탑재하여 주로 지구관측에 이용되는 탑재체는 크게 두 종류로 구분되며, 그것은 수동형 센서와 능동형 센서로 구분된다. SAR(Synthetic Aperture Radar)은 능동형으로 센서자체에서 방사되는 전자기파에 대한 대상물의 응답을 획득함으로써 주변에서 방사되는 여타의 정보와 무관하게 센서에서 방사되어 반사된 특정신호에만 반응을 할 수 있다. SAR는 대상물의 영상을 직접적으로 획득하는 탑재체는 아니다. 그림 1에서처럼 방사한 신호가 반사되어 돌아오는 것을 획득하여 어떤 대상물이 레이더의 시선(Line of site) 방향으로 어느 정도 거리와 방향에 있는지에 대한 반사 신호의 세기를 기록하는 장치이다(신재민 외 2005).

위성들은 획득할 관측자료의 성격 또는 탑재체의 목적에 맞는 정확하고 견실한 자료를 생성하기 위해 검보정(Calibration & Validation; CALVAL) 수행이 필수적이다. 일반적으로 광학영상의 경우 검보정을 위해 지상에 원형이나 수직/수평라인등의 보정체를 설치한다. SAR 위성의 경우는 이 보정체가 레이더신호를 반사하도록 하여야하므로, 특정형태의 반사기를 지상에 설치한다. 인공적인 반사기는 설계기간과 제작 후에 직접적인 측정을 통해 특성을 명확히 확인할 수 있다. 이로 인해 실제 SAR 안테나 패턴 및 빔조향에 의한 패턴변경 정확도의 비교분석이 가능하다. 그러므로 분석결과를 바탕으로 절대방사정확도(Absolute Radiometric Accuracy)를 위한 검보정 작업이 가능하다. 그림 2는 Envisat에 탑재된 C-대역 ASAR(Advanced Synthetic Aperture Radar)에 의한 CR(Corner Reflector)의 영상이며, 승교점 통과궤적(Ascending Pass)에서 VV 편파로 획득되었다.

여기에서 CR 주변에 존재하는 인공구조물들에 의한 송신신호의 반사가 CR 반사신호에 영향을 주고 있다. 이로 인한 검보정의 절대방사보정은 오차를 포함할 수 밖에 없다. 따라서 가능한 인공구조물이 없는 사이트를 선정하여야한다. 또한 CR의 RCS(Radar Cross Section)를 높여 주변배경 또는 인공구조물과의 변별력을 높이는 것이 검보정사이트 환경에 의한 오차를 줄이는데 중요한 요소이다. 이를 위해 반사기는 가능한 넓은 신호입사각에도 일정한 RCS를 나타내며, 같은 단위면적이라도 높은 RCS를 가지도록 하는 것이 중요하다. 다음장에서는 여러형태 CR에 대한 RCS의 특성을 확

그림 2. ASAR가 획득한 반사기 SAR 영상(Gong et al. 2008).

인하고, 적합한 형태를 선정하도록 한다.

2. 반 사 기

레이더를 탑재한 위성의 영상획득은 식 (1)의 레이더 방정식(Radar Equation)을 기반으로 한다(Merrill 2008). 이 레이더 방정식에서 가장 중요한 요소가 RCS이다. 이는 결국 레이더를 탑재한 위성을 통하여 영상정보를 획득하기 위해서는 RCS에 대한 이해가 있어야 한다는 의미이며, 광학위성영상에서처럼 영상을 통한 지형/지물 판독 및 인식을 위해서는 설계된 레이더 위성이 획득한 영상이 지형/지물을 어느정도 표현할 수 있는지를 정량화해야 한다.

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi R^2} \times \frac{\sigma}{4\pi R^2} \times A_e \quad (1)$$

여기서 P_t 는 = trnasmitted power, G_t 는 antenna gain, A_e 는 antenna effective area, σ 는 object RCS이다.

언급된 정량화는 검보정의 목적이며, 정확한 검보정을 위해서는 반드시 탑재체가 방사한 레이더 신호의 안테나패턴(Antenna Pattern) 및 절대이득(Absolute Gain)을 획득하여야 한다. 따라서 이 작업을 수행하기 위해서 반사기라고 불리는 보정체를 사용하며, 검보정에서 이를 반사기(Reflector)라 한다. 반사기는 다르게 재귀반사기(Retro-Reflector)라고도 하며, 이는 반사기에 입사된 신호가 가능한 최소의 산란(Scattering) 상태로 신호를 송신한 물체에 정확하게 반사하도록 한다는 의미이다. 상

그림 3. 전도성 구체의 RCS.

기의 관점을 고려하면 일반적으로 영상에서의 지형 또는 배경에 해당하는 산란체(Scatterer)와 어떤 물체에 의해 나타나는 RCS를 오차를 가능한 배제하고 분석하기 용이하게 구성하는 것이 필요하다. 이것은 크게 수동 반사기(Passive Reflector)와 신호를 직접 생성하여 송신하는 능동 반사기(Active Reflector)로 나누며, 능동 반사기는 수신한 신호를 확인하여 동일한 특성의 신호를 직접 생성하여 방사하는 것이며, 수동 반사기는 물리적으로 입사된 신호가 반사되도록 하는 것이다. 수동 반사기는 여러 가지 형태가 있으나 구형 반사기(Spherical Reflector)와 각면판 반사기(Corner Reflector)가 주류를 이룬다.

2.1 Spherical Reflectors - 구형 반사기

구형 반사기는 일반적으로 레이더에서 기준목표물로써 사용된다. 이는 물리적으로 구형 반사기가 레이더의 운영주파수와 무관하게 반응하고, 반사된 신호에 교차편파(Cross Polarization)를 생성하지 않기 때문이다. 그림 3은 구형 반사기의 RCS를 보여준다. 그림 3은 구형 반사기의 RCS 분석 영역을 나타내는데, 일반적인 레이더를 탑재한 위성은 원거리장(Far-Field) 경우를 고려하는 것이므로 “광학영역(Optical Region)”에 해당 한다. 이는 “ $\lambda \ll \text{Range}(R)$ ”와 “ $\lambda \ll \text{radius}(r)$ ”인 경우가 된다.

결국 구형 반사기의 RCS는 식 (2)와 같이 정의된다(Nadav 1988).

$$\sigma_{\text{sphere}} = \pi \cdot r^2 \quad (2)$$

여기서 r 은 sphere radius이다.

반사기의 목적은 수신신호를 반사하는 것이며, 이상적으로는 어떤 방향에서 입사된 신호라도 입사된 방향으로 신호의 감쇠 없이 반사하도록 설계하는 것이다. 이에 근접하는 형태가 연구되었는데, 구형 반사기에서 응용된 형태로 Luneburg-lens 반사기이다. 그림 4에 나타나듯이 Luneburg-lens는 구형렌즈(Spherical lens) 또는 볼 렌즈로써 구형내부에 물질로 인하여 입사파가 내부를 통과하면서 점차적 굴절을 감쇠로 인해 입사방향 반대편 구형면에 모이게 한다. 또한, 입사파가 모이는 곳에 금속성 물질을 부착하여 입사파에 대한 방향으로 반사가 이루어지게 한다.

이로 인해 이론적으로는 무방향성(Omni-directionality)을 가지는 반사기이며, 동일한 체적의 일반적인 구형 반사기(Spherical Reflector)보다 매우 큰 RCS를 설계할 수 있다. Luneburg-lens 구성을

그림 4. Luneburg-Lens 반사기(Kotajima & Fujita 1981).

위해 시스템에서 요구되는 최대의 RCS가 결정되면, 식 (3)이 물리적 크기를 결정한다. Luneburg-lens 특성상 최대의 RCS는 그림 4b(Kotajima et al. 1981) 처럼 설계된 반사띠(Reflecting Strip)의 재질과 물리적 크기에 따라 변하며, 반사띠 설계가 무방향성을 가질수 있도록 하는 중요한 변수이다.

$$\sigma_{luneberg\ lens} = \frac{4\pi^3 \cdot r^4}{\lambda^2} \quad (3)$$

여기서 r 은 lens radius이고, λ 는 operating wavelength이다.

무방향성 반사기라는 점은 특히, 입사각(Incidence Angle)에 따른 여러 개의 빔을 사용할 수 있는 레이더를 탑재한 위성의 검보정을 위해 반사기를 위성의 실제운용궤도를 확인하여 지향하도록 할 필요가 없으며, 구형체로 설계되므로 외부환경-강우/강수/바람-에 대한 유지보수를 고려할 필요가 없는 이점이 있다.

2.2 Corner Reflectors - 각면판 반사기

각면판 반사기는 기초적인 평면판 반사기를 이용하여 반사기 지향성을 가능한 없애고, 간략한 RCS 설계를 수행할 수 있도록 하며, 제작상의 어려움을 최소화하기 위해 고안되었다. 레이더 위성의 편파에 따라 삼면판 반사기(Trihedral Corner Reflector) 보다 양면판 반사기(Dihedral Corner Reflector)가 식 (4)(Nadav 1988)에서 처럼 RCS가 크고 편파별 RCS 유지에 효과적인 면이 있으나, 설치후 견고성이 낮아 유지관리에 불리하다. 특히 식 (4)에서의 양면판의 설계 각도처럼 구조적인 특성으로 인해 지향성에 대한 고려사항이 있다.

$$\sigma_{dihedral} = \frac{8\pi \cdot a^4}{\lambda^2} \quad (4)$$

여기서 a 는 side length, λ 는 operating wavelength, θ 는 angle between two plates as 45 deg.이다.

삼면판 반사기는 현재까지 가장 많이 사용되고 있는 반사기이며, 특히 레이더 위성의 검보정을 위한 지상목표물로 많이 이용되고 있다. 이는 전반적으로 높은 RCS를 가지며 설계에 따른 제작 용이함 및 구조의 견고성이 높다. 이러한 장점은 설계/제작의 용이함에도 불구하고, 실제 검보정을 위한 사이트의 환경조건에 적응성 및 적합성이 뛰어나다.

그림 5a는 삼면판 반사기가 입사파가 반사하기 위해 가지는 유효 개구면(Effective Aperture)을 보여주며, 그림 5b에서 입사파는 기하학적으로 어떤 형태의 반사가 이루어지는지 보여준다. 정확한

그림 5. 삼면판 반사기(Bird 2005).

RCS의 해석은 3면으로 구성된 특징으로 인해 입사각에 따른 반사가 여러 번 일어날 수 있으므로, 현실적인 운용에서 RCS 값을 예측하는데 어려움인 존재하기도 한다. 여러 반사와 즉, 2회 또는 3회 반사로 인해 나타나는 반사기 물질특성에 의한 신호 손실 등도 고려하여야 한다.

그러나, 다양한 형태의 반사기 중에서 설계 및 제작에 비해 넓은 각도영역에서 RCS를 유지하며, 이는 반사기 운용에 있어서 양면판 반사기 보다 유리한 점을 가진다. 식 (5)는 삼면판 반사기의 최대 RCS를 나타내는데, 구형 반사기와는 달리 RCS는 주파수에 따라 변한다. 구조물의 크기에서는 외곽 길이에 의존하는 것이 아니라 실제 입사파가 3면에 대해 반사되므로 반사기 내부길이에 의존적이다. 설계시 주의할 점은 각 3면이 모두 90도를 유지하여야 하며, 그렇지 않으면 양면판 반사기 내부각이 45도 유지를 위한 구조적 견고함을 가지기 어려움에 따라 식 (5)(Nadav 1988)처럼 RCS의 변화가 일어나는 것처럼 유사한 양상을 나타낸다.

$$\sigma_{trihedral} = \frac{4\pi \cdot a_{inner}^4}{3\lambda^2} \quad (5)$$

여기서 a_{inner} 는 length of inner side이고, λ 는 operating wavelength이다.

각면판 반사기는 여러 가지 형태가 있고, SAR 위성이 필요로 하는 정보를 위해 주파수 및 편파를 적절히 유지하도록 설계를 진행하여야 한다. 그러나, 실제 제작상 매우 간단한 구조이며, 무지향성은 아니나 상당히 넓은 각도에 대해 설계된 RCS를 크게 벗어나지 않는 특성을 가진다. 또한, 그림 6에서 확인할 수 있듯이 Luneburg-lens 보다는 낮지만 상당히 높은 RCS 값을 가지며, 제작에 용이하고 제작 단가가 낮으며 설치에 비교적 유리하므로 삼면판 반사기의 이용이 효율적임을 확인할 수 있다.

3. 삼면판 반사기 개발

반사기의 선정 및 설계 시 고려사항은 다음과 같이 요약할 수 있다(Bird 2005).

- ① 반사기 RCS가 크며, 값의 조정이 용이할 것
- ② 동일한 RCS 일때, 구조적이 크기가 작고 설치에 용이할 것
- ③ 가능한 전방향성(Omni-directionality)을 가질 것

그림 6. 구형, Luneburg-lens, 양면판, 삼면판 반사기의 RCS 비교.

반사기 고찰을 통해서 구형 반사기의 변형인 Luneburg-lens 반사기의 경우는 최적의 상황으로 상기의 고려사항을 만족하며, 그림 6에서 확인되듯이 동일 크기의 다른 반사기보다 매우 큰 값의 RCS를 나타낸다. 이는 레이더를 탑재한 위성의 검보정에 있어서 산란체(Scatterer)가 되는 배경보다 큰 값으로 RCS를 설계할 수 있으며, 유지관리에 유리한 측면이 있다. 특히 무지향성이라는 특성은 다른 반사기보다 활용성 측면에서 매우 유리한 조건을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 실제 Luneburg-Lens 반사기의 제작은 여러 가지 어려움을 가지고 있다. 그 중 입사파가 구형내부를 투과할 때 굴절율을 줄여주기 위한 유전체 또는 그와 같은 특성을 가지게 하는 다중 구형물을 구성하는 문제가 있으며, 굴절율에 따라 무지향성의 완결함이 이루어지므로, 입사파가 처음으로 만나는 최외각 표면의 유지관리가 필요하므로 레이돔(Radome) 등과 같은 표면보호 문제가 고려되어야 한다.

2장에서 언급하였듯이 삼면판 반사기는 Luneburg-lens 반사기처럼 무방향성이 아니라 레이더가 신호를 방사하는 방향으로 반사기 중심이 정렬되어야 설계된 최대의 RCS를 획득할 수 있다. 따라서 그림 7처럼 반사기의 삼면체 부분을 방위각(Azimuth Angle) 및 고도각(Elevation Angle) 방향으로 조정할 수 있도록 구성하였다. 반사기를 고정하는 지지대는 풍압에 강인하도록 지표면 아래에 설치된 지반에 고정하여 물을 수 있게 삼발이 형태의 폴형(Pole Type)으로 설계하였다. 그림 8d에서 삼면체 아래 부분에 사다리꼴 형태의 구조물이 설계되어 있다. 이는 삼면체의 90도 및 45도 내각을 안정적으로 유지하여 외부환경에 대해 삼면판 반사기의 RCS를 보장하기 위함이다.

그림 8a는 삼면판 반사기의 설치형상을 보여준다. 와이어 등에 의한 지상 고정방식으로 향후 반

그림 7. 삼면판 반사기 설계.

그림 8. 삼면판 반사기의 RCS 해석.

사기 방향변경에 어려움이 있으므로, 그림과 같은 지지대(Pole or Supporting Structure)를 사용하여 삼면판 반사기를 지상에 고정하도록 설계하였다. 반사기의 방향변경은 방위각과 고도각으로 이루어 지는데, 이는 기계적인 조정으로 구성하고, 이중너트 고정(Double-Nut Fixing) 방식을 사용한다.

그림 8b는 9.54GHz에서의 삼면판 반사기 RCS해석을 나타내고 있으며, 그림 8c는 결과로써 35.3 dBm²의 수치를 가짐을 해석적으로 확인하였다. 그림 9은 운용 중심주파수에 따른 RCS 변화에 대한 실측값을 보여준다. 삼면판 반사기 구조적 중심을 기준으로 할 때, 고도각 및 방위각 0도에서 최대의 RCS인 35.57dBm²가 측정되었다. 해석적 결과와 거의 동일한 값을 나타내는 것으로써, 설계 시 주의되는 반사기 내부 직각(90도) 및 재료 물성치가 분석된 설계대로 적합하게 제작되었음을 확인하였다.

4. 결 론

이 논문에서는 SAR 위성의 검보정을 위한 최적의 반사기와 효율적인 반사기들의 특성을 확인하고 설계시 요구조건을 만족하는 삼면판 반사기를 구성하였다. 삼면판 반사기는 와이어 등에 의한 지상 고정방식으로 향후 반사기 방향변경에 어려움이 있으므로 지지대를 사용하여 삼면판 반사기를 지

그림 9. 삼면판 반사기 RCS의 측정치.

상에 고정하도록 설계하였다. 반사기의 방향 변경은 방위각과 고도각으로 이루어지는데 이를 위해 기계적인 조정으로 구성하고 이중너트 고정 방식을 사용하였다. 9.54GHz에서의 삼면판 반사기 RCS 값은 35.3dBm^2 이었으며, 삼면판 반사기 구조적 중심을 기준으로 할 때 고도각 및 방위각 0도에서 최대의 RCS인 35.57dBm^2 가 측정 되었다. SAR 위성의 운영주파수가 결정되어 있는 경우, 삼면판 반사기의 설계는 반사기 재료의 물성 치에 따른 변화는 존재하지만, RCS 변경의 핵심은 삼면판 길이 변경과 면판사이의 직각유지이다. 반면에 Luneburg-lens 반사기 또한 구체의 반경에 의해 RCS가 변경되지만, 설계 시 매우 중요한 사항인 입사파의 반사를 위한 완벽한 내부굴절을 고려하는 것이 어렵다. 따라서 Luneburg-lens 반사기가 최적이지만, 실제 SAR 위성 검보정을 위한 시간 및 자금 등을 고려한다면 삼면판 반사기의 구성을 통해 확인한 내용으로써 RCS 조정과 설계의 용이함 등이 효율성을 제공한다는 것을 확인하였다.

참고문헌

- 신재민, 윤재철, 문홍열, 이진호, 천용식, 최해진, 2005, 항공우주산업기술동향, 3, 65
- Bird, D. 2005, THALES COMMUNICATIONS SOMERSET (Design and Manufacture of a Low-Profile Radar Retro-Reflector), RTO-MP-SCI-145
- Gong, L., Zhang, J., Zeng, Q., Luo, Y., & Yan, S. 2008, in Proceedings of the 2008 Dragon Symposium (Paris: ESA), id.2558
- Kotajima, H. & Fujita, H. 1981, ECJ, 64-6, 58

Merrill, S. 2008, Radar Handbook (New York: McGraw-Hill), p.1.11

Levanon, N. 1988, Radar Principles (Hoboken: John Wiley & Sons), pp.19-35