위성탑재 SAR 시스템 설계와 성능 특징

Spaceborne SAR System Design and Performance Characteristics for Military Applications

곽 영 길* 이 범 석** 이 상 인** 황 용 철**
Young-Kil Kwag Bum-Suk Lee Sang-In Lee Yong-Chul Hwang

ABSTRACT

A synthetic aperture radar (SAR) system can provide all-weather, day and night, superior imaging capability, and thus is very useful in surveillance for military applications. In this paper, a X-band spaceborne SAR system design concept is introduced with the key design parameters for mission and system requirements characterized by small satellite system. The SAR imaging mode design procedure is presented, and the standard imaging mode design results are analyzed as an example. In line with the given mission and system requirements, the X-band SAR payload and ground reception/processing subsystems are designed and presented with the key design results. The designed small satellite SAR system shows the wide range of imaging capability, and proves to be an effective surveillance system in light-weight, high-performance and cost-effective points of view.

1. 머리말

영상 레이다 SAR (Synthetic Aperture Radar)는 전자파를 이용하는 능동센서이므로 비, 구름, 안개 등 기상조건이나 주야간, 역광 등 일조현상에 관계없이 전천후로 광범위한 지역의 영상 획득이 가능하다. SAR는 전파 반사 표면의 특성, 즉 지표면의 굴곡, 지형, 물과 육지의 경계, 인공 가공물의 재질 및 특징, 흙의 습도, 해수면 등에 따라 고유한 반사특성을 가지므로 매우 유용한 영상정보를 제공한다. 또한, 철구조물과 같은 군사 표적물에 대한 반사특성이 우수하므로 주어진 해상도 보다 작은 크기의 표적도 탐지가 가능하고, 위장망을 투과하여 은폐 표적도 탐지가 용이하다. 일반 레이다의 공간 해상도는 주어진 안테나 크기에 제약을 받지만 SAR는 합성 빔 원리를 이용하면 파장이나 탐지거리에 무관하게 고해상도의 영상을 얻을 수 있는 특징이 있다. SAR는 지구 온난화 현상으로 더욱 불규칙해지는 기상 변화에도 무관하게 지속적으로 영상을 획득할 수 있는 장점이 있으며, 특히, 한반도 주변의 년 중 기상여건을 고려할 때 강우 및 구름 낄 확률이 년 평균 50% 이상이므로 광학 카메라에 비해, 위성의 주기적인 재 방문 시간마다 영상획득 기회가 높아 영상획득 임무수행 성공률이 상대적으로 매우 높다.

* 국방과학연구소 책임연구원
** 국방과학연구소 선임연구원

최근 SAR 기술의 발달로 광학센서와 같은 고품질의 고해상도 영상을 전천후로 얻는 것이 가능해짐에 따라 활용 분야가 날로 증가하고 있다. SAR 영상활용은 주로 홍수, 산불, 기름유출, 지진과 같은 자연재해 및 공해감시분야, 산림벌목, 농작물 작황, 지질탐사, 해양연구, 도시개발 등 자원탐사와 국토개발분야, 국경감시, 군사시설 탐지, 선박이동, 미사일, 전차, 군부대 이동 변화 탐지 등 군사 응용분야 등에 주로 활용된다.

1950년대 초 Carl Wiley가 SAR의 원리를 발명한 이래 주로 우주선 및 항공기 탑재 SAR 등 군사용으로 국한되어 왔으나, 1970년대 이후 위성탑재 SAR 기술개발의 발전에 힘입어 지구관측을 위한 SAR 영상 활용분야가 날로 증가하고 있다[1]-[2]. 1978년 미국 최초의 SAR 위성인 Seasat을 시작으로, NASA의 우주왕복선 탑재 SIR-A/B/C/ X-SAR 및 최근 SRTM[3]-[4]이 성공적으로 개발되었으며, 유럽 우주국(ESA)의 ERS-1/2 AMI 및 ENVISAT ASAR, 카나다 우주국(CSA)의 RadarSat-1/2, 일본 우주국(NASDA)의 JERS-1 등 주로 개발기간이 길고 대형, 고가의 위성위주로 운용되어 왔다. 그러나, 1990년대 이후, 급속한 SAR 기술 발전에 힘입어, "Faster, Better, Cheaper, Smaller" 개발 전략 아래, 개발 기간이 짧고, 소형 경량의 고성능 SAR 위성을 적은 비용으로 개발하는 방향으로 발전하고 있다[5]. 미국 NASA가 주도하는 LightSAR[6] 계획은 고성능의 소형 SAR 기술 개발의 견인차 역할을 하고 있다. 최근, SAR 기술은 다중주파수, 다중편파, 집중조사 모드 기술을 이용하여 초고해상도의 표적 식별 능력을 향상시키고, 인터페로메트리를 이용하여 정밀한 고도 정보를 추출하기 위한 입체 영상기술과 탑재체 질량을 줄이기 위한 소형 경량 안테나 및 송수신 모듈의 소형화 기술과 초고속 데이터 전송기술, 초고속 온보드 SAR 프로세서 및 이동표적 탐지(GMTI) 기술 등을 소형 SAR 위성에 적용하는 추세이다.

본 논문에서는 소형 위성탑재 SAR 체계설계 및 영상모드 성능 분석 결과를 제시한다. 먼저 임무체계 요구 조건을 바탕으로 소형 플랫폼에 제한된 질량, 부피 및 전력을 고려하여 주어진 해상도와 영상 질을 얻을 수 있는 임무 성능과 시스템 설계 요구조건에 대하여 논한다. 그리고, 구체적인 영상획득 모드 설계 기법에 대하여 설명하고, 특히 표준영상 모드에 대한 설계 및 분석 결과를 제시한다. 그리고, 체계설계 성능 특징을 설명하고, 체계성능을 만족 할 수 있는 X-밴드 소형 SAR 탑재체 및 지상 수신처리에 대한 주요 설계 결과를 제시한다.

2. SAR 원리

공간상의 레이다 해상도는 안테나의 빔 폭이 좁을수록 비례적으로 좋아지므로 실제 개구면을 사용하는 일반 레이다 RAR(Real Aperture Radar)의 경우 해상도를 증가시키기 위하여 실제 안테나의 개구면을 크게 만들어 주어야한다. 영상 레이다 SAR는 위성이나 항공기 등의 비행체를 이용하여 일정 비행 이동거리 동안 빔을 합성하여 안테나의 길이를 합성적으로 길게 만들어 줌으로서 해상도를 증가시킬 수 있다.

방위 해상도는 그림 1을 이용하여 다음과 같이 주어진다.

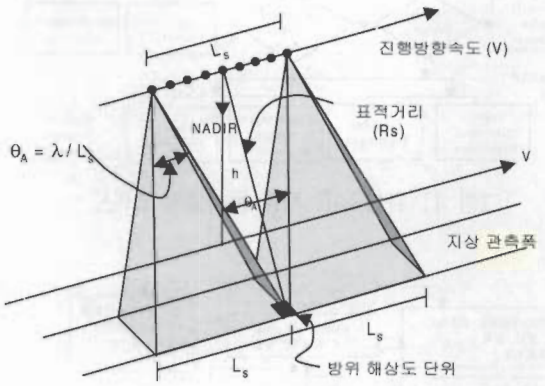
$$\delta_a = R_s \frac{\lambda}{L_a} \tag{1}$$

여기서 R_s : 경사 탐지거리

λ : 송신 주파수 파장

L_a : 안테나의 물리적인 길이

식(1)에서 보는 바와 같이 일반 레이다의 방위 해상도는 안테나의 길이에 비례하여 좋아지며, 탐지거리에 비례하여 나빠진다.



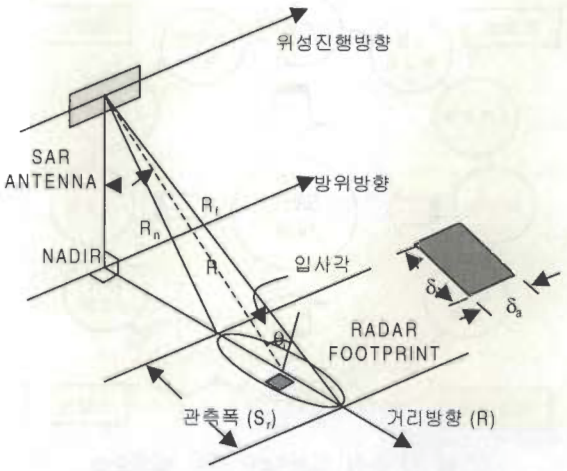
〔그림 1〕 SAR 방위해상도 구조

그러나, SAR의 경우 합성 안테나 길이는 탐지거리에 비례하여 길어지며, 최대 방위 해상도는 $\delta_{a_{max}} = L_a/2$가 된다. 따라서 SAR의 방위 해상도는 거리에 관계없이 일정하게 유지 할 수 있다.

거리방향 해상도는 송신 펄스의 대역폭에 비례하여 해상도가 증가한다. 그림 2의 기하구조에서 보는 바와 같이 지상 거리방향 해상도는 입사각도에 따라 식(2)와 같이 된다.

$$\delta_r = \frac{c}{2B\sin\theta_i} \quad (2)$$

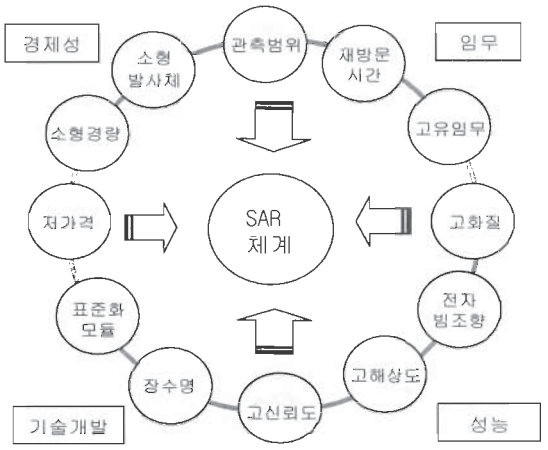
여기서 c : 빛의 속도
B : 펄스 대역 폭
θ_i : 입사각



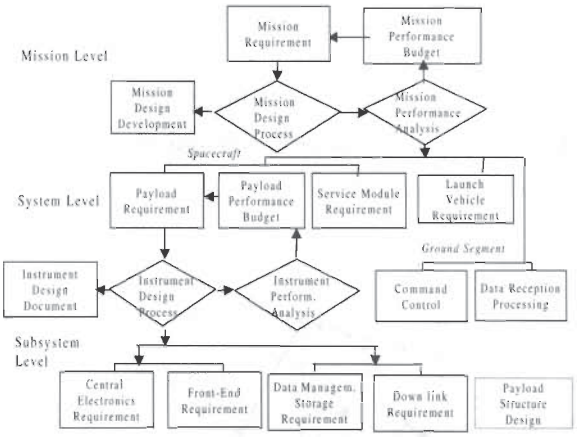
〔그림 2〕 SAR 거리해상도 구조

3. 임무체계 설계

위성의 임무설계는 우선적으로 사용자의 위성사용 요구조건에 따라 기술적으로 도달해야하는 임무요구사항을 도출하고 이를 근거로 체계설계를 수행한 후 최종 체계사양을 결정한다. 위성 사용자는 관심 표적의 종류, 위성 관측영역, 거리 및 방위 해상도, 영상의 질, 운용관점에서 고려하여야 할 동작모드, 사용목적에 따른 응용분야, 수명 및 비용 등을 일반 사용 요구조건으로 제시하게 된다. 현재 세계적인 SAR 기술 발전 추세를 고려해 볼 때 소형, 저가, 고성능의 기술 구현이 주요한 설계 요건이 되고있다. 따라서, 그림 3에서 보는 바와 같이 소형위성 SAR 전체의 임무 체계를 효율적으로 설계하기 위해서는 체계 전반적인 제반 요소들을 모두 완벽하게 충족하여야 하지만, 요구조건 간의 상대적인 제약들이 많기 때문에 설계요소에 우선 순위를 두는 것이 바람직하다.



〔그림 3〕 소형 위성SAR 주요 설계요소

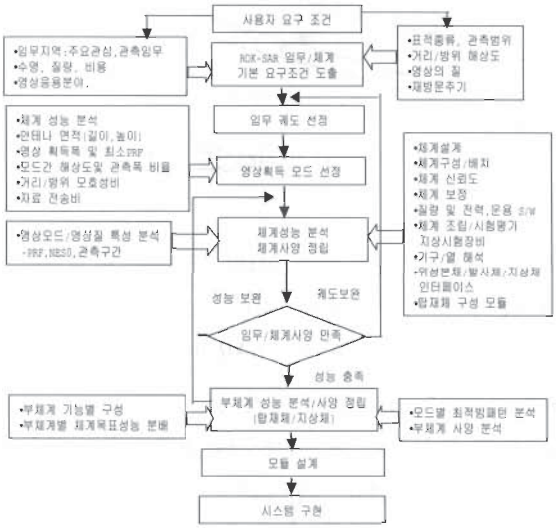


〔그림 4〕 위성SAR 체계 동시설계 흐름도

3.1 설계과정

SAR 체계설계는 그림 4와 같이 탑재체, 위성본체, 발사체 및 지상체 등의 전체적인 체계구성 요소를 모두 고려한 SAR 위성의 개발, 발사, 운용을 포함하여 체계 전체 비용과 성능을 결정해야 한다. 따라서, 전체 SAR 체계는 Top-Down 방식으로 설계가 이루어지며 우주공간에서 기술적인 위험요소가 해결되어 사용이 입증된 기술분야는 동시설계(Concurrent) 방식으로 설계를 병행함으로 개발비용을 줄이면서 구성품 간의 효율적인 인터페이스를 설계할 수 있다.

SAR 임무/체계 설계과정은 그림 5에서 보는 바와 같이 위성 사용자가 요구조건을 제시하면 이로부터 임무 요구조건으로서 운용주파수, 편파, 수명, 탑재체 질량, 소모전력, 운용모드 및 모드별 해상도, 관측폭, 부엽 수준 등에 대한 기술적인 성능을 도출한다. 임무 및 체계 설계는 체계 모델링 및 시뮬레이션을 위한 설계도구를 활용하여 요구조건을 만족하는 임무궤도를 포함한 체계 설계 결과를 도출하는 과정이다.



〔그림 5〕 SAR 임무체계 설계 흐름도

임무/체계 요구조건이 주어지면 각 전문기술 분야별로 체계 성능 계산, 신뢰도 분석, 체계 보정, 질량 및 소모 전력계산, 기계구조 설계 및 열 해석 등을 독립적으로 수행하며, 타 구성분야와 연관된 설계 결과는 상호 점검하여 전체 체계 설계가 최적화 되도록 한다. 영상모드 설계 및 성능 분석 절차에 따라

임무 체계 성능을 설계하며, 체계 성능 분석을 반복 수행하여 체계 설계개념을 정립하고, 개략설계를 수행하여 부체계 레벨의 탑재체 및 지상처리부의 설계 사양을 결정하며, 상세설계를 통하여 모듈레벨의 상세한 기능과 성능을 설계한다. 이 과정을 통하여 얻어진 설계결과를 다시 임무 체계 성능 요구조건에 부합되는지 지속적으로 반복 수정, 보완한다.

3.2 임무 성능 요소

임무 요구조건은 사용자의 요구조건을 구체적인 시스템 사양으로 정의하기 위한 단계의 성능 요소로서 다음과 같은 사항을 우선적으로 결정해야한다. 이들 임무 성능은 요구 조건사이에 제약 요소들이 존재하므로 우선 순위를 고려하여 결정해야한다.

1) 임무지역은 SAR 위성을 원하는 목적으로 운용하기 위해서는 위성을 제어하고 운용상황을 파악하며, 획득된 원시영상을 지상으로 전송하기 위하여 우선적으로 정의한다. 2) 재 방문주기는 위성이 임무지역내의 특정 관심지점을 재 관측하는데 소요되는 시간간격으로 위성의 궤도와 입사각도 범위에 따라 결정된다. 3) 위성 궤도의 종류는 크게 지구적도 궤도, 경사궤도, 극궤도로 나눌 수 있으며, SAR 위성 궤도는 지구 전체를 관측범위로 할 수 있는 태양동기 극궤도를 사용한다. 4) 관측 폭은 거리 방향의 길이를 의미하며 데이터 량은 위성 진행방향의 영상 길이에 비례한다. 5) 해상도는 각 영상획득 모드별로 거리 해상도와 방위 해상도로 나눈다. 표적 탐지 및 식별 수준에 따라 고해상도와 저해상도로 구분하여 정한다. 6) 입사각은 반사신호 감도와 관측범위에 직접 영향을 준다. 입사각도가 낮으면 근 거리에서 반사되므로 탐지거리는 유리하고 입사각도가 크면 원 거리 탐지가 가능하나 반사신호의 세기가 낮아진다. 7) 영상모드는 사용자 요구조건 및 응용분야에 따라서 각 영상 모드별로 해상도와 관측 폭을 정의한다. 대표적인 영상 획득 모드는 표적 탐지, 식별을 위한 고해상도 모드, 일반 감시를 위한 표준 영상 모드 및 넓은 지역을 관측하기 위한 저해상도의 광역감시 모드가 있다. 8) 운용 주파수는 SAR 위성을 이용하여 관측, 탐지하고자 하는 표적의 종류에 따라 결정되며, 원격탐사용으로 사용되는 위성 SAR의 경우 S, C, X 밴드를 주로 사용하고 각 주파수 밴드별로 WARC에서 할당한 최대 허용 밴드 폭이 제한된다. 또한 반사지면의 수분 함량과 운용 주파수에 따라서 지면 투과율/반사율도 달라진다. 또한, ITU에서 규정한 주파수별 대역폭은 L밴드에서 85MHz, C 밴드에서 100MHz, X 밴드에서 300MHz로 제한한다. 따라서, 요구 해상도와 관측목적에 따라 주파수를 선택한다. 9) 편파는 표면 반사특성에 따라 차이가 있으므로 관측목적에 따라 선택한다. 수직편파의 경우에는 주로 해양 탐사 등에 유리하고, 지표면 탐사에는 수평편파가 유리하다. 탑재체의 질량을 고려하여 다양한 편파를 사용할 수 있다. 10) 수명은 우주환경에서 정상적으로 임무를 수행하는 기간을 말하며, 고장수리가 불가능하므로 각 구성품의 신뢰도를 분석하여 수명동안에 고장이 날 확률이 높은 부분은 예비장치를 둔다. 11) 질량은 탑재체 및 위성본체를 포함한 총 위성체 질량이며, 질량이 크지면 발사체비용이 증가하여 체계 전체에 영향을 미친다. 10) 전력은 위성본체가 제공하는 전력에 제한을 받으며, SAR의 송신출력에 영향을 준다.

3.3 SAR 성능 파라미터

주어진 위성 임무 요구 조건을 시스템 레벨에서 구현하기 위한 성능 요소로서 다음과 같이 시스템

임펄스 응답, 영상 해상도, 대역폭, 부엽 수준, 거리/방위 모호성 비, 신호감도, 방사 해상도 및 정확도, 자료 전송률 등이 포함된다.

3.3.1 시스템 임펄스 응답 함수(IRF)

시스템의 IRF(Impulse Response Function)는 SAR 최종 영상에서 이상적인 점 표적에 대한 거리 및 방위방향의 2차원 응답으로 정의되며, 영상에서 주요 특성은 공간 해상도와 최대 부엽비, 종합 부엽비 성능으로 주어진다.

(가) 공간 해상도

SAR의 공간 해상도는 지표면상에 있는 작은 물체를 구분할 수 있는 능력으로서 IRF의 3dB 폭을 공간 해상도로 정의된다. 거리방향 해상도는 송신펄스 대역폭과 입사각도에 따라 달라진다. 방위 해상도는 안테나 조사면에 걸친 도플러 대역폭에 의하여 결정된다. PRF는 이들 스펙트럼을 샘플하기에 충분해야 한다.

(나) 부엽 수준

SAR 영상의 IRF에서 부엽 수준(Sidelobe Level)은 영상의 화질과 밀접한 관계를 가지고 있는 중요한 요구조건이다. 부엽 수준은 최대(Peak) 부엽 수준과 종합(Integrated) 부엽 수준으로 구분하며, 거리/방위 방향의 영상형성 과정에서 사용되는 가중치 함수에 따라서 결정된다. 거리/방위 부엽 수준, PSLR_R 및 PSLR_A는 각각 거리/방위방향의 임펄스 응답(IRF)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$PSLR_R = \max IRF[t_{Range}(i)] \tag{3}$$

$$PSLR_A = \max IRF[t_{Azimuth}(i)] \tag{4}$$

여기서 부엽의 갯수 i는 주엽에서 단위 해상도 셀이 20개 정도 벗어난 셀 범위까지 고려한다. 합성 부엽 수준 ISLR은 다음과 같이 주어진다.

$$ISLR = 10\log_{10}\left[\frac{outer - inner}{inner}\right] \tag{5}$$

여기서, Outer는 임펄스 응답의 주엽으로 부터 20개 셀을 누적한 크기이고, Inner는 주엽으로 부터 2개 셀을 누적한 것이다.

3.3.2 영상의 모호성 비

펄스 반복주파수(PRF)와 SAR 안테나의 부엽에 따라 거리/방위 방향의 관심지역 외에서의 반사신호가 안테나의 부엽을 통해 수신되어 수신기의 수신시간에 합쳐짐으로 거리/방위 방향의 모호성이 발생하여 영상의 화질을 저하하게 된다. 이러한 영상 화질 저하 정도를 원 영상의 반사도와 비교하여 거리 모호성비(RAR) 및 방위 모호성비(AAR) 로 다음과 같이 정의한다.

$$RAR = 10\log_{10}(\sum P_A / P_T) \tag{6}$$

여기서

$$\text{표적신호 } P_T = \frac{G_{TT} \cdot G_{RT} \cdot \sigma_{0T}}{R_T^3 \sin\theta_T} \tag{6-a}$$

$$\text{모호신호 } P_A = \frac{G_{TA} \cdot G_{RA} \cdot \sigma_{0A}}{R_A^3 \sin\theta_A} \tag{6-b}$$

$$AAR = 10\log_{10}(\sum P_A / P_T) \tag{7}$$

여기서, 모호신호 및 표적신호는 다음과 같다.

$$P_A = \sum_{\substack{j=-N \\ j\neq 0}}^{N} \left(\frac{1}{L_A} \cdot \sum_{k=1}^{L_A} \cdot \alpha_k \cdot \beta_k \right) \quad (7\text{-a})$$

$$P_T = \frac{1}{L_A} \cdot \sum_{k=1}^{L_A} \alpha_k \cdot \beta_k \quad (7\text{-b})$$

L는 Look 수, N=모호 표적 개수, α_x, β_x는 각각 k 번째 Look 합성 가중치 및 에너지를 나타낸다.

3.3.3 신호 감도

주어진 관측폭에서 반사되는 신호의 크기가 수신기의 잡음과 동등하게 되는 표적의 반사도로서 NE σ_0(Noise-equivalent Sigma Zero)로 식 (8)과 같이 정의된다. 즉 NE σ_0가 낮은 값일수록 반사도가 작은 표적을 탐지할 수 있음을 의미하며, 송신출력, 수신감도, 대역폭, 표적까지의 거리 등의 전체 체계변수와 연관되어 있어서 SAR 탑재체 영상의 화질을 직접적으로 결정한다.

$$NE\sigma_0 = \frac{(4\pi)^3 R^3 N_f L_s L_p k T_0 B_m v_s \sin(\theta)}{P_t G_T G_R L_B^2 \lambda^3 c f_a} \quad (8)$$

여기서 R=경사거리, N_f=잡음지수, L_s=시스템손실, L_p=신호처리 손실, k= Boltsmann 상수, T_0=290K, v_s=위성속도, θ=입사각, P_t=평균송신 전력, G_T, G_R=송수신 안테나 이득, L_B^2=빔조정 손실, λ=파장, c=광속, f_a=방위 빔폭 확장계수, σ_0= 반사계수이다.

3.3.4 방사 해상도

SAR 영상 표적은 관심지역에서의 해상도 범위 내에 존재하는 수많은 표적으로부터 반사된 신호가 서로 다른 랜덤위상을 가지게 되어 합쳐짐으로 거친 스페클(Speckle) 잡음이 나타나서 영상의 화질을 저하하게 된다. 이를 줄여주기 위해서는 원시영상의 화질 (NE σ_0)이 좋아야 하며, 영상합성 과정에 멀티 룩(Multil-look) 기법을 적용해야 한다. 방사 해상도는 다음 식으로 주어진다.

$$\gamma = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \frac{1}{\sqrt{N_L}} \left(1 + \frac{1}{SNR} \right) \right\} \quad (9)$$

여기서 L: 룩의 수, $SNR = \sigma_0 / NE\sigma_0$

3.3.5 방사 정확도

SAR 영상은 관심 지역에 대한 반사도 영상으로 방사 정확도는 표적의 반사도를 정확하게 영상화할 수 있는 정도를 나타내는 지수로서 SAR 영상을 농작물 작황을 등 지표면 특성인 반사계수를 정확히 파악할 필요가 있을 경우 매우 중요하다.

$$RA(3\sigma) = RSS[R_{ec}, RS_{ec}, RS_{ob}, AL, DR] \quad (10)$$

여기서 RSS는 Root Sum Square, Rec는 외부 보정 방사오차, RSec는 외부보정 방사 안정도, RSob는 관측시 방사안정도, AL는 강우에 의한 대기 손실변화량, DR 는 표적의 동적 변화 오차를 각각 의미한다.

3.3.6 자료 전송률

자료 전송률은 관심지역으로부터 수신된 원시 SAR 자료를 지상전송 안테나를 통하여 지상수신소로 전송할 수 있는 최대 전송속도로 정의하며, 영상 관측폭 및 해상도의 함수이다. 최종 자료 전송률은 다음 식과 같다.

$$DR = PRF \times N_b \times CADU \quad (11)$$

여기서 N_b는 각 관측 폭으로부터 반향 신호 윈도우 당 비트 수로서 Nb=2WSQ+h 로 주어진다. 여기서 S는 신호의 샘플링 주파수, Q는 양자화 레벨, W는

관측영역의 근 지점과 원 지점간의 시간차이로 인한 윈도우 길이로서 다음 식 (12)로 주어진다.

$$W = \tau_p + 2\frac{(R_f - R_n)}{c} + g_t \qquad (12)$$

여기서, τ_p는 펄스의 길이, g_t는 가드 타임, R_f와 R_n는 각각 원근 경사거리이고, CADU(Channel Access Data Unit)는 패킷에 부가되는 추가 데이터 량이다.

4. 영상모드 설계 기법

4.1 영상 모드

SAR의 주요 장점 중의 하나는 하나의 안테나를 이용하여 다양한 영상모드를 구현할 수 있다는 것이다. 본 연구에서는 광역감시 모드, 표준영상 모드, 고해상도 모드의 세 가지 빔 운용 모드를 필요에 따라 지상명령에 의해 운용할 수 있도록 설계하였다. 그림 6에 SAR 영상 획득 모드가 도시되어 있다.

4.4.1 표준 영상 모드 (Standard Mode)

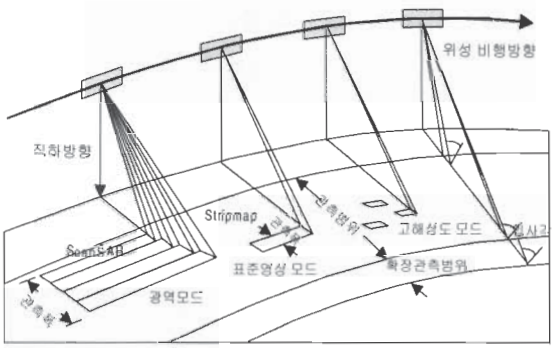
표준영상 모드는 10m 정도의 영상 해상도를 스트립 맵 방식을 이용, 연속적인 관측폭을 유지할 수 있다. 안테나의 빔을 고도방향으로 조향하여 특정 관심 지역을 위성이 진행하면서 연속적으로 영상을 획득할 수 있으므로 광범위한 지역에 대한 영상을 얻을 수 있는 특징이 있다.

4.4.2 고해상도 모드 (Fine Mode)

스트립 맵 방식이나 스폿라이트 방식을 이용하여 비교적 좁은 국부 관심 지역에 대하여 스냅 샷 (Snapshot) 개념으로 빔을 조사하여 고해상도 영상을 얻는다. 따라서, 스트립 맵 방식을 이용하여 연속적인 스트립 영상을 얻을 수도 있으나, 광역모드나 표준모드에서 나타난 징후 표적을 집중적으로 자세히 식별하는데 주로 이용한다.

4.4.3 광역모드 (Wide Swath Mode)

스캔 방식을 이용하여 100km 이상의 광범위한 지역의 영상을 얻기 위하여, 표준 빔을 조향하여 주기적으로 전체 관측영역이 포함되도록 고도 빔을 연속적으로 재 조사한다. 넓은 지역을 관측하기 위해 고도 빔은 일부분 중복시킨다. 관측 폭이 넓으므로 해상도는 비교적 낮으나 재 방문 주기의 빈도를 증가시키는 광역관측에 유리하다.

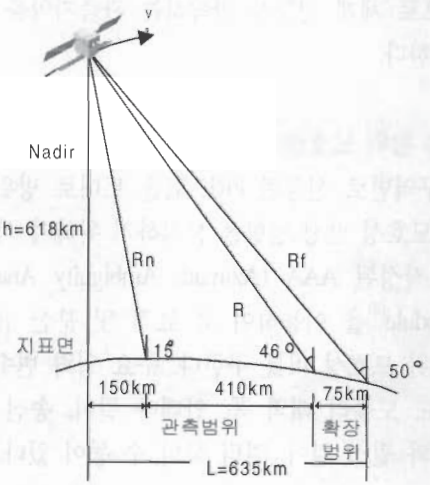


〔그림 6〕 SAR 영상획득 모드

4.2 설계과정

영상모드 설계를 위한 SAR 시스템의 기하학적인 구조는 그림 7과 같다. 초기 설계 치로서 위성 고도, 사용 주파수, 거리/방위 해상도 및 입사각과 관측 범위를 정의한다. 요구하는 해상도로부터 안테나 최소 면적이 유도되고 안테나 길이, 높이가 결정된다. 또한 방위해상도와 위성의 지상 속도에 의하여 최소 PRF 값이 결정된다. 임무 요구조건, 안테나 크기 및 최소 PRF 등의 결과와 관측폭 선정을 위한 Diamond

Diagram으로부터 각 영상 모드별로 적절한 관측지역을 선정하여 각 지상관측 구역별로 PRF를 구한다. 이 결과를 근거로 하여 거리/방위 해상도, 거리/방위 모호성비, NE σ_0, 안테나 마스크/빔 패턴, 방사해상도, 자료전송율 등을 계산한다. 설계과정에서 임무/체계 요구조건을 만족하지 못하는 체계 성능이 산출되면 설계절차를 반복하여 수행한다.



〔그림 7〕위성 SAR 고도 및 관측범위 구조

4.4.1 안테나 크기

주어진 관심지역을 관측하는데 필요한 위성의 고도와 입사각 범위는 잘 알려진 Space System Analysis Tool Set [6]을 이용하여 구할 수 있다. 주어진 고도와 입사각에 의하여 다음 식과 같이 SAR 안테나의 최소 면적 A를 구할 수 있다.

$$A = \frac{4 v_s R \tan(\theta_i)}{f} \tag{13}$$

여기서 v_s : 위성의 속도,

R : 위성과 지상 경사 거리

θ_i : 최대 입사각도

f : 동작 주파수

안테나의 면적이 구해지면 다음에는 주어진 방위 해상도를 만족하는 요구 안테나의 길이를 다음 식을 이용하여 구한다.

$$L_a = \frac{2 v_s \, 0.885 \delta_a}{f_a v_g} \tag{14}$$

여기서 f_a : 빔 확장계수

δ_a : 방위방향 해상도

v_g : 위성체의 지상 추적속도

빔 확장계수 f_a는 임펄스 응답의 부엽을 줄이기 위하여 사용된 해밍 웨이팅과 위상과 진폭오차로 인해 발생한 확장계수로서 1.059이다. 따라서 요구되는 안테나의 높이는 식(13)과 (14)를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$L_w = \frac{A}{L_a} \tag{15}$$

위상배열 안테나의 슬롯 도파관의 열(Row) 간격 d는 관심영역에서 Grating Lobe가 발생하지 않도록 통상적으로 d = 0.74 λ이상 떨어지지 않도록 한다.

4.4.2 최소 PRF

방위방향의 요구 해상도를 충족 할 수 있는 도플러 대역폭은 다음 식과 같이 주어진다.

$$B = \frac{f_a v_{g_{max}}}{\delta_a} \tag{16}$$

여기서, v_{gmax} 는 도플러 주파수가 최대가 되는 입

사각 15도의 경우의 지상 속도이다. 해밍 웨이팅 0.72를 적용하기 위한 확장계수 f_a는 1.059를 사용할 경우 임펄스 응답의 최대 부엽값을 -23dB, 오차가 포함될 경우 -20 dB까지 낮출 수 있다. 따라서, 원하는 방위 해상도를 얻기 위한 최소 PRF는 다음 식과 같다.

$$PRF_{\min} = 1.15 \times 1.05 \times B \quad (17)$$

여기에서는 15%의 과도 샘플링 요소와 5%의 오차를 고려하여 최소 PRF를 결정하고 있다. 방위 해상도를 좋게 하기 위해서는 실제 안테나 길이는 작아야한다. 그러나, 이 경우 영상의 모호성이 발생한다. 거리 모호성은 PRF의 상한 범위를 제한한다. 상한 PRF_{high} 는 연속적인 두 펄스가 동시에 수신되는 것을 피하도록 선정한다.

$$PRF_{high} = 1/[2T + 2(R_f - R_n)/c] \quad (18)$$

여기서 T : 실제 펄스 길이
R_f : 원 경사거리
R_n : 근 경사거리
c : 빛의 속도

관측 폭과 입사각이 커지면 펄스 간의 간격을 훨씬 더 두어야 하므로 PRF를 낮추어야 한다. 그러나, 이 경우 방위방향의 해상도를 저해하게 되므로 도플러 모호성이 발생한다.

4.4.3 관측 폭 설계

위성 고도 자료와 최소 PRF 선정 결과를 기본으로 하여, 안테나 부엽에 의한 직하방향 반사신호(Nadir Return)와 송신시간 간의 간섭을 방지하는 적절한 관측지역을 선정하여야 한다. 관측지역 결정은 SSD (Swath Selection Design) Module[8]을 이용하여 관측범위 내에서 관측폭 별로 PRF를 선정한다. Diamond Diagram은 적절한 Guard Time과 Duty factor 및 관측지역간의 중첩 정도 등을 사전에 설정하여 그린다. 수동으로 선정된 관측구역 별 PRF 선정 결과를 토대로 각종 영상의 화질과 관련된 체계 성능을 계산하게 되는데 일부 항목이 체계 요구조건을 만족하지 못할 경우 반복하여 관측지역을 변경, 재 선정하여 최종적으로 체계 성능을 만족하는 관측지역을 결정하여야 한다.

4.4.4 방위 모호성비 분석

관측구역별로 선정된 PRF 값을 토대로 방위방향 영상의 모호성 발생 영향을 분석하기 위하여 식(7)을 근거로 작성된 AAA (Azimuth Ambiguity Analysis) S/W Module[8]을 이용하여 점 표적 및 분산 표적에 대한 방위 모호성 비를 구한다. 주요 입력 변수로서 위성고도, 도플러 대역 폭, 안테나 길이, 송신 주파수, PRF와 펄스 길이, 멀티 룩의 수 등이 있다.

4.4.5 자료 전송율

자료 전송율은 위성궤도 자료와 선정된 관측구역 정보와 SDRD (Swath Data Rate Design) S/W Module[8]을 이용하여 자료 전송율을 계산하게 된다. 여기서는 자료전송링크에 대한 하드웨어/소프트웨어 구현을 고려하여 전송 프로토콜의 Head/CADU 항목을 SDRD의 입력으로 사용하며, 통상 원격 탐사위성에서 주로 사용하는 기본 값을 사용할 수 있다.

4.4.6 안테나 마스크 및 빔 패턴

관측구역 선정결과를 바탕으로, 거리/방위 모호성비 요구조건과 Elevation Mask Design Module[8]을 이용하여 모호성 구역을 표시해 주는 안테나 마스크

패턴을 그리게 된다. 이 패턴을 이용하여 안테나 빔 설계 시 모호성 구역에서의 안테나 부엽이 존재하게 하므로 모호성비 요구조건 만족여부를 사전에 판단한다. 안테나 빔 패턴은 안테나 크기 정보와 Antenna Beam Module[8]을 활용하여 계산할 수 있으며, 초기에는 Uniform Weight을 적용하여 시작하고, 점차적으로 주어진 성능을 얻기 위하여 설계오차 및 부엽 수준을 최소화하는 방향으로 최적화된 합성 빔을 형성하게 된다.

4.4.7 거리 모호성비 분석

관측구역 선정 결과를 바탕으로, 안테나 마스크 패턴, 임무지역에 대한 표적 또는 클러터 모델 및 RAA (Range Ambiguity Analysis) Module[8]을 이용하여 분산 표적에 대한 거리 모호성을 계산한다. 입력변수로서 안테나 빔 패턴, 관측폭, PRF, 반사특성 모델 등이 입력된다. PRF가 높은 관측지역에서는 거리 모호성비 요구조건을 만족하기 어려우므로 반복하여 관측지역을 재 선정하는 과정을 반복하여야 한다.

4.4.8 NE σ_0 및 방사 해상도

신호감도는 영상의 화질을 결정하는 중요한 시스템 변수이다. 안테나 빔 패턴의 지향도, 송신출력, 대역폭, 탐지거리, 시스템 구현 손실 등을 정의한 후 식(8)을 근거로 만들어진 Link Design Module을 이용하여 NE σ_0와 방사 정확도를 계산할 수 있다. 본 설계에서는 NE σ_0보다는 실제 지상/해상 표적의 반사도와의 상대적인 크기인 NE σ_0 Margin을 체계 요구조건을 선정하였다.

$$NE\sigma_0 margin = NE\sigma_0 - \sigma_0 \quad (19)$$

5. 영상모드 설계 결과 및 분석

5.1 설계결과

영상모드 설계를 위해서는 먼저 사용주파수, 위성고도, 관측범위 등의 임무설계 요건들을 설정하여야 한다. SAR 위성의 운용 주파수 대역은 체계 설계 및 성능 분석에서 중요한 요소로서 영상의 고해상도, 반사특성, 영상 화질, 재 방문 주기 및 소형 SAR 임무 등의 제반조건을 고려하여 X 밴드로 선정하였다. 특히, 고해상도 구현과 탑재체 질량 측면에서 상대적으로 파장이 긴 L, S, C 밴드는 허용 송신 대역폭이 좁고, 소형 발사체의 탑재 가능 질량 범위를 벗어나므로 제외하였다. SAR 위성의 임무 궤도는 19일 반복주기를 갖고 위성고도는 한반도 기준으로 618 Km이다. 광범위한 관측을 위하여 안테나 빔 입사각 범위는 15°~46°로 설정하여 최대한 자주 관심지역을 관측할 수 있도록 설계하였다[9]-[10].

본 설계에서 영상획득 모드는 광역감시 모드, 표준영상 모드 및 고해상도 모드를 해상도와 관측 폭에 따라서 적절하게 선정하였다. 여기서는 앞 절에서 설명한 설계분석 절차에 따라 표준 영상모드에 대한 최종 설계 결과를 중심으로 성능을 분석한다.

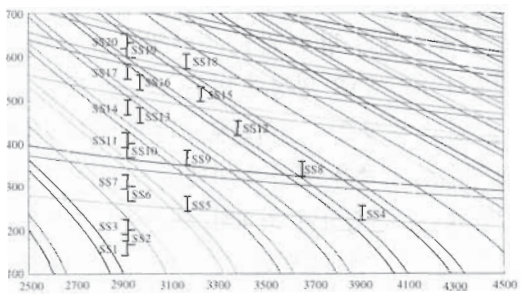
5.5.1 안테나 크기 및 최소 PRF 선정

SAR 안테나 빔의 최대 입사각 46°에서의 위성 고도 618km에서 위성속도 7.55km/s를 식(13)에 대입하여 계산된 최소 안테나 면적은 최소 2.737m^{2}이며, 본 체계에서 고려중인 고해상도 모드의 요구해상도와 최소 입사각에서의 위성체 지상속도 등을 적용하여 식(14)으로부터 산출된 안테나 길이는 5.53m가 된다. 식(15)과 도파관 열 간격을 고려하면, 단순 계산된 도

파관 열은 21.7이나 실제적으로 전력 분배기를 3의 배수일 때 구현이 용이하므로 24열이 되도록 안테나 크기를 정하였다. 따라서 안테나 최종 크기는 X 대역에서 5.53m x 0.54m로 선정하였다. 최소 PRF는 식 (17)을 이용하고 고해상도 모드의 방위 해상도를 적용하여 2910Hz를 최소 PRF로 선정하였다.

5.5.2 관측구역, 방위 모호성비 및 전송률

관측 구역은 Guard Time 5 us, Duty cycle 7%를 적용하여 만들어진 Diamond Diagram을 이용하여 그림 8과 같은 최종 결과를 얻었다.



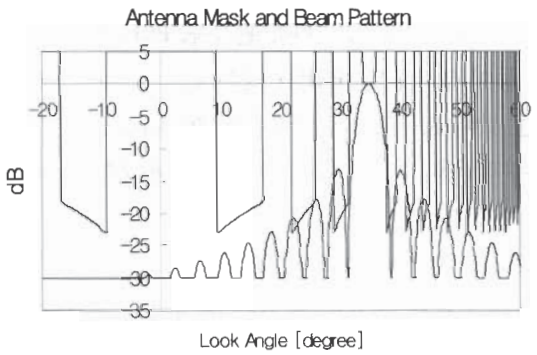
〔그림 8〕 표준영상 모드 관측구역 선정

최소 PRF 2910Hz와 관측지역간의 중첩 거리는 8km를 적용하였으며, 입사각 15°~50° 범위에 해당하는 지상거리 150km~640km 범위에서 총 20개의 세부 관측구역을 선정하였다. 세부 관측 구역별로 PRF와 입사각, 해상도와 펄스 대역폭, 방위 모호성비, 자료 전송율 등의 상세 데이터를 얻었다[10]. 결과적으로 PRF는 관측구역에 따라 2910Hz~3900Hz 범위에서 선정되었으며, 특히 4번 Swath (SS4)의 경우 높은 PRF의 선정으로 거리 모호성비 성능이 나빠졌으나, 반복설계를 통하여 요구성능에 만족하도록 조정하였다.

표준영상 모드의 방위 모호성비는 점표적의 경우 -25.9dB이하, 분산 표적의 경우 -21.7dB이하로 설계되어 요구조건인 -20dB이하에 만족함을 확인하였다. 자료 전송률은 132.08~317.39Mbps로서 최대 허용 전송속도인 210Mbps를 초과하는 관측 구역이 SS1, SS2, SS4 로 나타났다. 이 경우 탑재체 내부에 자료 저장장치를 이용하여 초과자료를 저장함으로서 자료 손실 없이 지상으로 전송할 수 있게 하였다.

5.5.3 안테나 빔패턴 및 거리 모호성비 성능

안테나는 전자적으로 15-46°까지 전자적으로 조향하므로 전 관측 구역에서 동일한 관측 폭을 얻기 위해서 전자빔의 조향 범위의 중간인 27.2°를 안테나의 기계적인 지향 각도가 되도록 한다. 그림 9는 표준영상 모드 중 SS12 관측구역에 대한 마스크 패턴 및 고각빔 패턴 결과이다.



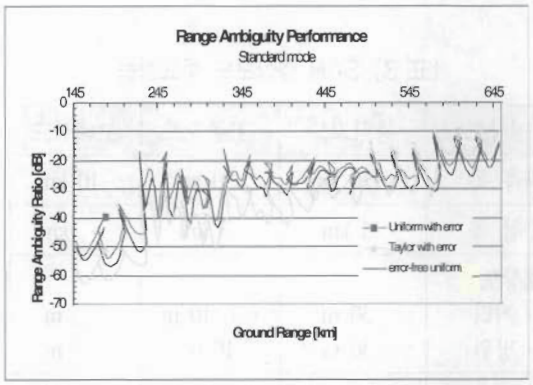
〔그림 9〕 안테나 마스크 및 빔 패턴

그림에서 보는 바와 같이 안테나 주 빔의 빔 조향 각도는 34° 근처에 있으며, 부엽은 대부분 마스크 패턴의 모호성 구역밖에 존재하게 되므로 거리 모호성 발생 가능성이 거의 없으나, 일부 부엽의 경우 모호성 구역 내에 존재하므로 거리 모호성비 요구조건이 만족되지 않으므로 이를 조정하여야 한다.

거리 모호성비는 ESA (European Space Agency)의

Land/Sea Clutter 모델을 이용하여 표준영상 모드의 20개 관측구역에 대하여 Uniform 및 Taylor Weight와 하드웨어 구현 오차를 고려하여 그림 10과 같은 결과를 얻었다.

지상거리 200km 근처 구역에서는 거리 모호성 비를 줄이기 위하여 Taylor Weight를 적용하였고 원 거리에서는 수신신호가 약하므로 Uniform Weight가 적절함을 알 수 있다.

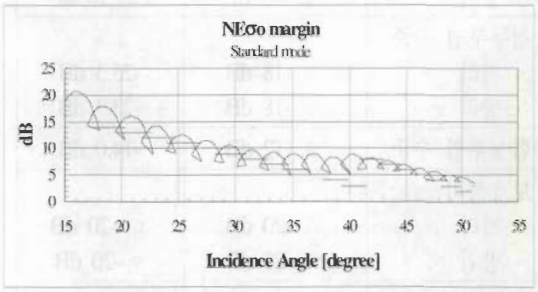


〔그림 10〕 표준영상 모드의 거리 모호성비

또한, 관측 폭의 가장자리에서 성능이 떨어지나 안테나 크기를 약간 증가시키거나 안테나 빔을 재합성하여 향상시킬 수 있다. 특히, 입사각이 최대인 원 거리에 존재하는 SS15와 SS16의 가장자리에서는 거리 모호성비 성능이 저하되므로 이 영역에서는 관측 폭을 다소 축소 조정할 수 있다. 결론적으로, 최종 모호성비가 체계 요구조건을 만족하지 않을 경우에는 소형위성의 질량 증가 문제를 고려하여 안테나를 키우는 것보다 관측 폭을 줄이고 Swath 수를 증가시키는 것이 바람직하다.

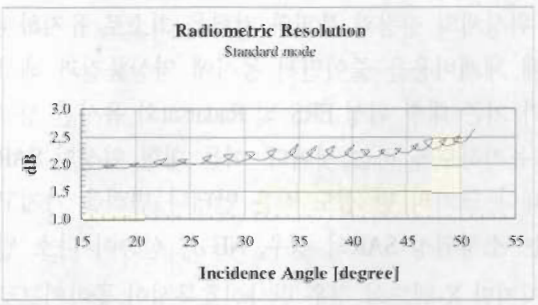
5.5.4 NE σ_0 margin 및 방사 해상도 성능

표준영상모드에 대한 NE σ_0 Margin은 그림 12와 같으며 일반 영상 획득 범위인 입사각 46o이내의 관측 폭인 30km까지 체계 요구 조건인 8dB 이상 만족하고 있다.



〔그림 11〕 표준영상 모드의 NEσo

NE σ_0 margin 계산결과를 토대로 산출된 방사 해상도의 최종 결과는 그림 12에 도시한 바와 같이 1.9~2.34dB 범위에 있으므로 요구조건 2.5 dB이하로서 그 성능이 우수함을 알 수 있다.



〔그림 12〕 표준영상 모드의 방사 해상도

5.2 표준영상모드 성능 분석

표준영상 모드에 대한 최종 설계 및 성능 분석 결과는 표 1과 같다.

〔표 2〕 표준영상모드 성능분석결과

성능 변수	요구 조건	체계 성능
해상도 - 거리 - 방위	 ≤ 10 m ≤ 10 m	 6.3~10 m ≤ 10 m
첨두부엽 수준 - 거리 - 방위	 ≤ -18 dB ≤ -18 dB	 -23.3 dB -23.3 dB
합성부엽 수준	≤ -12 dB	-14.0 dB
모호성비 - 거리 - 방위	 ≤ -20 dB ≤ -20 dB	 ≤ -20 dB < -20 dB
NEσ0 margin	≥ 8 dB	8~22.3 dB
방사 해상도	≤ 2.5 dB	1.9~2.34 dB
관측폭	≥ 30 km	30 km
입사각범위 -일반 모드 -확장모드	 15° ~ 46° 46° ~ 50°	 15°~46° 46°~50°
방사 정확도	≤ 1.0 dB (1σ)	0.94 dB (1σ)

소형 SAR 위성 설계에서 있어서 중요한 고려요소는 위성체의 질량과 부피와 전력을 최소로 유지하여 전체 체계비용을 줄이면서 동시에 영상품질과 해상도가 기존 대형 위성 ERS 및 Radarsat와 유사한 성능을 유지하도록 하는 것이다. 이들 대형 위성의 SAR 안테나 크기의 반 정도 작은 안테나 면적을 가지고 있는 소형위성 SAR의 경우, NE σ_0 성능이 다소 떨어지지만 X-밴드의 경우 반사신호특성이 좋아지므로 보다 많은 Echo Return으로 보상될 수 있다.

또한, 안테나 빔 폭이 작은 소형 SAR 위성 경우 고해상도를 유지하기 위해서는 PRF가 높아지므로 선택 가능한 관측 폭이 제한될 수 있다. 따라서, 주어진 관측 구역에서 거리 및 방위 모호성을 좋게 하기 위해서는 상대적으로 관측 폭을 축소 조정하여 영상의 화질 성능을 유지할 수 있다.

따라서, 위성고도와 탐지거리, 사용 주파수, 밴드폭, 송신 전력, 안테나 크기 등에 의하여 영상모드 별 영상성능에 차이가 있을 수 있으므로, 주어진 임무 요구조건을 우선 순위에 충족할 수 있도록 성능을 분석하고 조정하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 표준 영상 모드에서 소형 위성의 작은 안테나 크기로 구현할 수 있는 최선의 체계성능을 설계하였으며, 광역모드, 표준모드, 고해상도 모드에 대한 설계결과를 표 2에서 요약하였다.

〔표 3〕 SAR 영상모드 주요성능

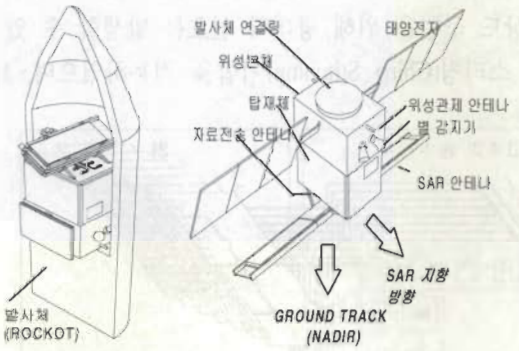
영상모드	광역모드	표준모드	고해상도
관측 폭	120 km	30 km	10 km
중첩 폭	5 km	8 km	- km
해상도 - 거리 - 방위	 30 m 30 m	 6.3 -10 m 10 m	 □ m □ m
대역 폭	5-25MHz	25-65MHz	□ MHz
입사각	15-46도	15-46도	15-46도
고도빔수	4	20	36
PRF(Hz)	2667-4133	2910-3900	2910-3900

6. SAR 체계 설계 성능 특징

SAR 임무 체계성능 분석을 토대로 위성 SAR 체계를 설계하였다. SAR 체계는 크게 위성체, 발사체, 지상체로 나눌 수 있으며, 위성체는 위성 본체와 탑재체로 구분된다. 지상체는 지상수신 및 영상 처리소와 지상 관제로 구분된다. 본 연구를 통하여 체계설계 결과로 얻어진 위성체 외부형상과 탑재체 내부형상, 발사시 적재 형상과 운용시 전개 형상, 탑재체 구성품의 내부 배치도가 그림 13에 각각 도시되어

있다. 전개된 위성체 형상을 보면, SAR 안테나, 자료전송 안테나, 위성관제 안테나, 태양전지판 등으로 구성되어 있다. 탑재체의 크기는 가로 세로 높이가 1 x 1.45 x 1 m^3 으로 소형이며 중소형 발사체의 공간에 적합하게 설계되어 있다.

SAR 안테나는 도파관 슬롯형 위상배열형으로 직하방향에 27.2° 기울여서 설치되며, 발사 시에는 3단으로 접어 발사체에 적재된다. 위성체의 총 질량은 950kg 이내이며, SAR 탑재체 질량은 마진을 포함하여 450kg으로 Eurokot 또는 Athena-II와 같은 소형 발사체에 적합하도록 설계되었다. 소요전력은 영상획득 시 최대 2.3kW가 필요하다.



(a) 발사체 (b) 위성체

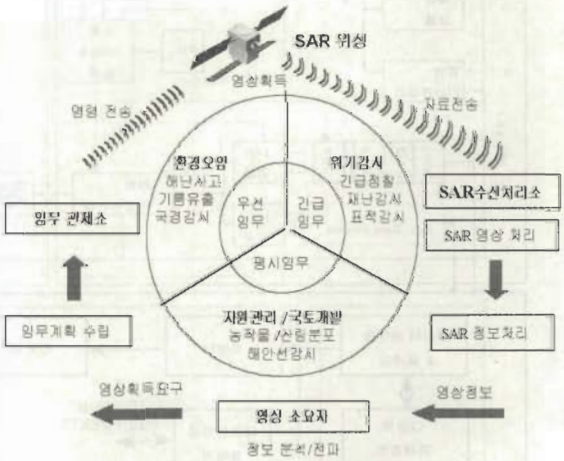


(c) 탑재체 배치

〔그림 13〕 위성 SAR 체계 형상

위성 SAR의 궤도는 태양동기 극궤도로서 97.8도의 경사각을 유지하고 있다. 고도는 한반도에서 618km이며, 궤도 주기는 97분으로서 하루에 지구를 14 +16/19 회 선회하며 반복주기는 19일이다. 재 방문 특성은 양방향 관측시 최소 0.5일에서 2.5일 소요된다. SAR 위성은 필요에 따라 긴급, 우선, 평시 임무로 나눌 수 있다. 그림 14와 같이 영상획득 요구가 들어오면 임무 관제소에서 명령을 전송하여 관심지역의 영상을 획득한 다음, 지상수신소에 자료를 전송, 저장하고, 긴급도에 따라 영상을 처리한 후 사용자에게 영상정보를 제공하게 된다. 위성은 지상 명령에 의해 SAR 안테나 전자빔을 조향하여 원하는 지역을 관측할 수 있다.

영상획득 모드는 관측범위와 해상도에 따라 광역감시, 표준영상, 고해상도의 3개 모드를 필요에 따라 전자적으로 안테나 빔을 변경하여 운용할 수 있다. 본 설계 결과로 얻은 소형 위성 SAR 임무 체계성능을 표 3에 요약하였다[12]-[13].



〔그림 14〕 위성SAR 운용개념

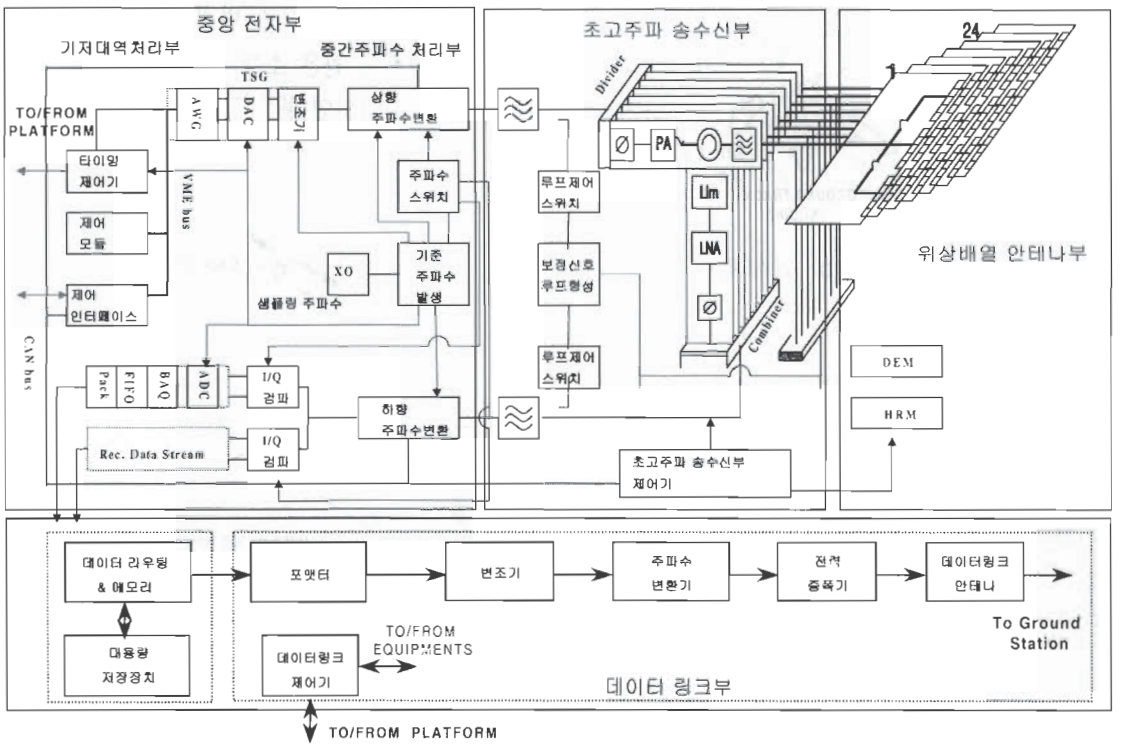
〔표 4〕 임무체계 주요성능

위성 고도	610 km (적도)
위성궤도	태양동기 (Dawn-Dusk)궤도
궤도 경사도	97.8°
궤도주기	97분 (14 + 16/19 회/1일)
반복주기	19일 (282회전)
재방문 주기	0.5 - 2.5일
영상모드	광역, 표준, 고해상도 모드
입사각 범위	15 - 46° (정상모드)
	46 - 50° (확장모드)
위성체 질량	< 950Kg(탑재체 + 플랫폼)
위성체 전력	< 2.5 Kw

6.1 SAR 탑재체

SAR 탑재체 설계는 임무체계 요구 조건에서 주어진 영상의 해상도, 영상의 질, 수명, 신뢰도 등의 설계 요건 들을 만족하기 위한 탑재체 하드웨어 및 소프트웨어를 설계하였다. 먼저 SAR 탑재체의 안테나 및 송수신 모듈에 대한 다양한 Trade-Off를 통하여 기술의 성숙도, 개발기간, 비용 등을 고려하여 기본 아키텍춰를 구성하였다. SAR 탑재체 설계의 주요 설계 목표로서, 1) 고해상도, 고화질 SAR 영상 생성, 2) 다중모드의 전자빔 조향, 3) 실시간 고속자료 전송, 4) 3-5년의 수명 및 고 신뢰도, 5) 소형 경량, 저 비용의 설계조건 등이 포함된다.

SAR 탑재체 설계에 적용된 기술 특징을 요약하면, 고해상도의 군사표적 탐지 특성이 좋은 X-밴드와 지상 반사특성이 좋은 수평편파를 적용하였고, 특히 고해상도 구현을 위해 광대역 신호를 발생할 수 있는 첩 스티칭(Chirp Stitching)기법을 적용하였으며, 1m



〔그림 15〕 SAR 탑재체 구성도

이하 급 해상도까지 모듈 확장이 가능한 특징이 있다. 고화질의 영상 획득을 위해 24채널의 내부 신호 보정장치ㄹ 와 외부 신호 보정장치를 별도로 가지고 있다. 1Gbit 이상의 고속 자료 전송을 위한 데이터 전송장치와 지구상 임의 관측지역의 영상을 획득할 수 있는 온보드 저장장치를 가지고 있다. 소형 경량의 안테나 및 탑재체 구조와 열 제어 개념을 설계에 적용하였다. 또한, 3-5년의 수명기간 동안 고 신뢰도를 유지할 수 있도록 주요 모듈에 예비장치를 추가하였다.

SAR 탑재체는 그림 15와 같이 탑재 레이다 부분과 데이터 링크부로 구성된다. SAR 레이다 부분은 위상배열 안테나부, 초고주파 송수신부, 중앙전자부로 구성되고, 데이터 링크부는 자료저장, 처리기 및 송신기와 안테나로 구성된다. SAR 탑재체의 주요성능은 표4와 같다[12]-[13].

〔표 5〕 SAR 탑재체 주요성능

운용주파수	X 밴드(9 GHz 대역)
질량	450kg 이하
전력	2.3 kW 이하
수명	3년- 5년
외형 크기	1x1.45x1 m^3
편파특성	수평편파
PRF	2900-3500Hz
대역 폭	5 - 85 MHz
자료전송 속도	210Mbps
자료 전송에러	10^{-5}

SAR 안테나는 좁은면 경사슬롯 28개로 구성된 중앙 급전식 공진형 배열 안테나이며, 소형 발사체에 적재 및 전개가 가능하도록 3단의 패널로 구성되고 패널당 3개의 부 패널로 되어 있다. 안테나 빔폭은 방위각방향 0.27도, 고도방향으로 최대 3도까지 조향이 가능하다.

송수신기는 24채널 분산형 MPM 전력 증폭기와 24채널 병렬형 저잡음 수신기로 구성된다. 송신 첨두전력은 MPM 당 160W 이며 삽입손실은 송/수신 채널당 3-4 dB이다. 송수신 채널의 오차보정 회로가 있으며 채널간 위상 및 진폭온도 보상 기능이 있다.

중앙전자부는 중간주파수 처리부와 기저대역 처리부로 구성된다. 고해상도를 위한 광대역 첩 신호발생 및 분리 기능이 있다. 위성본체를 통하여 전달된 원격명령이 중앙통제 장치를 통하여 탑재체 각 부분에 명령을 전달하며 운용 프로그램에 의해 동작된다. 송신 대역폭은 최대 85MHz이며 수신시 8bit으로 샘플되어 가변형 BAQ 방식으로 압축되어 자료저장기로 보낸다.

데이터 링크부는 8GHz 대역의 X 밴드 전송장로서 최대 210Mbps 속도로 자료를 전송한다. 10 Gbits의 고속 대용량 자료 저장장치가 있으며, 반도체 송신기와 9개의 혼 안테나로 구성되어 있다.

탑재체 구조는 고강성 CFRP 하니콤 패널로 설계되어 제작 및 시험 조립이 용이하며, SAR 안테나 및 탑재체 외부의 열 제어를 통하여 안정적인 내부 기기의 동작을 보장해준다. 탑재체의 주요 부체계 성능은 표 5와 같다[12]-[13].

6.2 지상수신처리

지상채는 크게 수신처리소와 임무관제소로 구성된다. 그림 16에서 보는 바와 같이 수신처리소는 지상수신 안테나부, 데이터 수집 및 전처리부, SAR 영상 형성부 및 영상 응용부로 구성된다.

SAR 데이터는 지상 안테나를 통하여 수신된 다음 복조기를 거쳐서 기저대역 신호로 변환된다. 전처리 과정에서 프레임 동기를 찾아 패킷자료를 복원하여, 자료 저장장치에 보내거나, 영상 형성부에서 SAR 원시 데이터의 진폭과 위상정보를 이용하여 신호를 압

축함으로서 레벨 1의 기본 영상을 형성하게 된다. 이 기본 영상은 레디오 메트릭 보정이나 지구 기하적인 보정을 거친 다음, 스테레오 영상, 3차원 간섭영상, 모자이크 영상 처리 등 활용목적에 따라 다양한 정보를 추출할 수 있게 된다. 지상수신처리의 주요성능은 표 6과 같다[13].

[표 6] SAR Payload 부 체계 주요성능

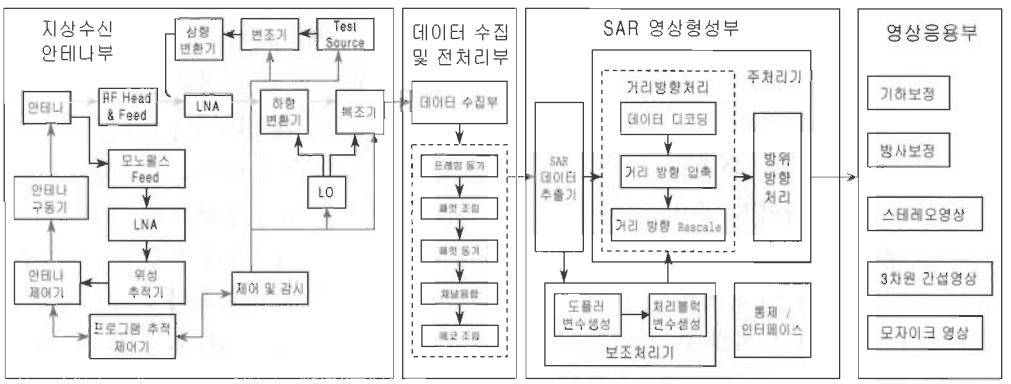
안테나부	
형태	Slotted Waveguide 배열구조
크기	24 열: 5.52m(L)x0.56m(H)
빔폭	0.27°(방위) x 3°(고도가변)
이득	42dBi
송수신부	
송신출력	160W/MPM x 24 채널
펄스 폭	PRF의 10%
위상조정	360°/6-Bit
진폭조정	20dB/6-Bit
중앙전자부	
펄스 대역폭	5-85MHz
샘플링 속도	8 Bits, 61 MHz
자료압축	BAQ, 128 Block
이득 제어	8dB/32 dB(송/수신채널 당)
자료전송부	
자료전송속도	210Mbps
송신주파수	X-밴드(8GHz 대역)
자료저장	10 Gbits
자료전송에러	10^{-5}

[표 7] SAR 지상 수신처리 주요성능

수신 안테나	10m 이상
수신 감도	32.5dB/K G/T이상 (6°고각)
수신 주파수	X 밴드 (8 GHz 대역)
수신 속도	210Mbps
자료저장	56GB/1일
자료전처리	실시간 및 준 실시간
영상형성	준 실시간처리
영상정보	변화탐지, 표적식별, 간섭영상, 입체영상

특히, 영상 형성 프로세서는 지상 처리과정에서 고해상도 영상을 만드는데 매우 중요하며, 고유한 설계부분이다. 첩 스티칭 방법으로 만들어진 광대역 신호를 수신시에는 상, 하 측파대로 나누어 지상에 내려 보내주므로 이 두 신호를 묶어서 거리방향 압축을 해 주어야 이용할 수 있는 장점이 있다. 반사신호 세기를 이용하면 표적인식, 변화감지, 스테레오 지도 등을 만들 수 있고, 위상정보를 이용하면 DEM (Digital Elevation Map) 정밀 고도정보 추출과 보다 정밀한 변화탐지, 분류 등을 할 수 있다.

그림 17 영상은 표준영상모드의 예로서 상용 위성인 RadarSat의 원시 데이터를 처리하여 형성한 10m 해상도의 서울 한강 지역 영상이다. 한강 인도교와



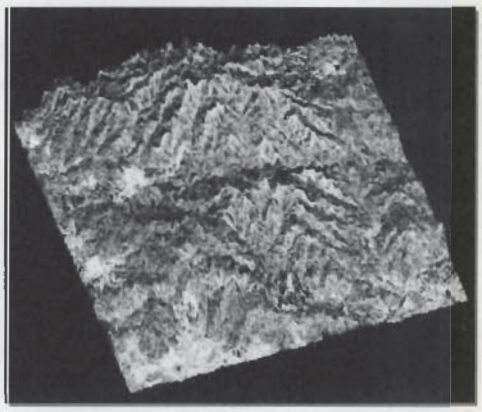
[그림 16] SAR 지상수신처리 구성도

철교를 비교하면 반사표면의 특성에 따른 차이를 쉽게 알 수 있다.

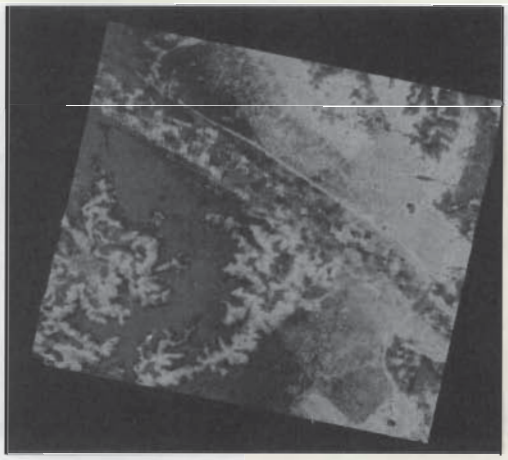


〔그림 17〕 표준영상모드 SAR 영상
(서울 한강지역 10m 해상도)

그림 18은 서울 관악산 지역을 스테레오 맵 기법으로 처리한 3차원 SAR 영상이다. 그림 19는 하루 간격으로 획득한 서울 한강부근의 해상도 30m의 ERS 영상 2장을 Interferometry 기술을 이용, 위상 간섭 처리하여 생성한 위상 간섭무늬이다. 고도 정확도는 영상간의 코히어런스에 영향을 많이 받지만 스테레오 맵에 비하여 정확한 1m이내의 고도 정보를 유지할 수 있다.



〔그림 18〕 SAR 3차원 스테레오 영상
(서울 관악산 지역)



〔그림 19〕 SAR 인터페로메트리 간섭영상
(서울 한강유역, 상대고도 정확도 1m)

7. 맺음말

본 논문에서는, X 밴드의 고해상도 위성탑재 SAR 체계설계와 주요 체계성능 특징을 제시하였다. 특히, 최신 기술발전 추세에 부합하여 소형, 저 가격의 고성능 SAR 위성을 개발하기 위한 전체적인 임무 및 체계 요구조건을 분석하고 소형 위성 SAR 체계의 영상 운용모드 중 표준 영상 모드를 중심으로 시뮬레이션을 통하여 상세한 성능 분석 결과를 제시하였다. X 밴드 SAR 탑재체 및 지상 수신처리부의 주요 설계 개념과 성능 특징에 대하여 개괄적으로 설명하였고, 부체계별 상세 설계를 통하여 체계성능을 확인하였다. 특히, 전천후위성 SAR는 한반도 및 주변국의 기상여건을 고려해 볼 때 광범위한 관측범위에 대해 상대적으로 짧은 재 방문 주기로 광역 감시에서 고해상도 표적식별에 이르기까지 다양한 영상모드로 운용할 수 있는 장점이 있기 때문에, 위기 감시, 자원탐사 및 환경감시 등의 광범위한 민군 활용 분야에서 기술파급 효과가 많을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 영국 Matra Marconi Space(MMS)와 해외 공동연구를 통하여 수행되었다. 본 SAR 설계에 참여한 국방 과학연구소 전문 분야별 연구원과 본 연구를 지원하여 주신 모든 분들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Curlander, J., McDonough, R.," Synthetic Aperture Radar - Systems & Signal Processing". John Wiley & Sons, Inc. 1991, pp. 9-44.
2. Cantafio, L.J., "Space-Based Radar Handbook". Artech House, Inc., 1989.
3. Jordan R.L., Huneycutt B.L., Werner M., "The SIR-C/X-SAR Synthetic Aperture Radar". Proc. of the IEEE, Vol. 79, No.6, June 1991, pp. 827-838.
4. Werner M, "Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)", Proc. of the EUSAR 2000, May 2000, pp.209-212.
5. Klemm R. "SAR Technology-Where Are We Going ?", IEEE AES Magazine, April, 1999. pp.25-29,
6. Cohen, D.A. " A LightSAR Mission Design Study for a NASA-Sponsored Joint Commercial/Science SAR Remote Sensing Mission:, IEEE Geoscience & Remote Sensing Symposium Proceeding, Vol.1, 1998, pp.253-255.
7. Space Systems Analysis Tool Set, Orbit and Coverage Tool, Ver 4 User Guide, 93/TN/412, Systems Eng. and Assessment Ltd., (SEA Software)
8. SAR System Design Tools, Matra Marconi Space, UK, 1997
9. Mission Definition and Requirement Document, ROK-SAR MDR Report No. 3955-KA001-RQZ, ADD/MMS June 1997.
10. System Design and Performance Baseline, ROK-SAR SDR Report No. 3955-KA014-RPD, ADD/MMS Oct. 1997.
11. System Design and Performance Document (Stage 3 Update) ROK-SAR CDR Report No.3955-KA094-RPD, ADD/MMS, Feb. 1999
12 곽영길 외, "위성탑재 영상레이다 임무 및 체계 개념설계, CESD-517-990414L, 국방과학연구소, 1998. 12
13 곽영길 외, "위성탑재 영상 레이다 (ROK-SAR) 체계설계", KTRC-517-991067, 국방과학연구소, 1999.12.