

# X 밴드 고해상도 소형 위성탑재 SAR 체계설계와 성능특징

## Performance Characteristics of the High Resolution, X-band Small Satellite SAR System Design

곽 영 길

Young-Kil Kwag

### 요 약

영상 레이다(SAR)는 기상여건에 무관하게 전천후로 광범위한 지역에 대해 고해상도의 영상획득능력이 우수하므로 군용으로는 물론 과학 및 상업용으로 광범위한 활용분야를 가지고 있다. 본 논문에서는 소형 위성 탑재 SAR 시스템의 임무 및 체계 요구조건을 만족하기 위한 주요 설계변수와 함께 X 밴드 고해상도의 SAR 체계 설계에 관하여 논한다. 그리고, SAR 영상모드 설계 기법을 기술하고 표준 영상모드 설계 결과를 영상성능 관점에서 분석한다. 그리고, 소형 위성 SAR 탑재체 및 지상 수신처리의 설계와 주요 성능결과들을 제시한다. 설계된 위성 SAR 시스템은 광역모드에서 고해상도 모드까지 다양한 영상 모드 구현이 가능하며, 소형, 고성능, 저 비용 관점에서 효율적인 전천후 영상획득 시스템이다.

### Abstract

A synthetic aperture radar (SAR) system is able to provide all-weather, day-and-night, high resolution imaging capability in the wide area of interest, and thus is extremely useful in surveillance for both civil and military applications. In this paper, the X-band high resolution spaceborne SAR system design is described with the key design parameters for the mission and system requirement characterized by the small satellite platform. The SAR imaging mode design technique is presented, and the standard imaging mode design results are analyzed with respect to image quality performance. In line with the system requirement, X-band SAR payload and ground reception/processing subsystems are designed and the key design results are demonstrated with the outstanding performance characteristics. The designed small satellite SAR system shows the wide range of imaging capability, and proves to be an effective surveillance systems in the light weight, high performance and cost-effective points of view.

### I. 서 론

영상 레이다 SAR (Synthetic Aperture Radar)는 전자파를 이용하는 능동센서이므로 비, 구름, 안개 등 기상조건이나 주야간, 역광 등 일조현상에 관계 없이 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 반사 특성을 가지므로 매우 유용한 영상정보를 제공한다. SAR의 공간 해상도는 주어진 안테나 크기에 제약을 받지만 합성빔 원리를 이용하면, 파장이나 탐지 거리에 무관하게 고해상도의 영상을 얻을 수 있는 특징이 있다<sup>1-2)</sup>. 위성 SAR는 지구 온난화 현상으

국방과학연구소 책임연구원(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20000727-086

· 수정완료일자 : 2000년 8월 30일

로 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. SAR 영상활용은 주로 홍수, 산불, 기름유출, 지진과 같은 자연재해 및 환경감시분야, 산림벌목, 농작물 작황, 지질탐사, 해양연구, 도시개발 등 자원탐사와 국토개발분야, 국경감시, 군시설탐지, 선박이동, 미사일, 전차, 군부대 이동 변화 탐지 등 군사 응용분야 등에 주로 활용된다.

1950년대 초 Carl Wiely가 SAR의 원리를 발명한 이래 주로 우주선 및 항공기 탑재 SAR 등 군사용으로 활용이 국한되어 왔으나, 1970년대 이후 위성탑재 SAR를 이용한 지구관측에 많은 관심을 가지게 되었다. 1978년 미국 최초의 SAR 위성인 Seasat을 시작으로, NASA의 우주왕복선 탑재 SIR- A/B/C/X-SAR 및 최근 SRTM이 성공적으로 개발되었으며, 유럽우주국(ESA)의 ERS-1/2 AMI 및 ENVISAT ASAR, 캐나다 우주국(CSA)의 RadarSat-1/2, 일본 우주국(NASDA)의 JERS-1 등 주로 개발기간이 길고, 대형, 고가 위성이 운용되어 왔다. 그러나, 1990년대 이후, 급속한 SAR 기술 발전에 힘입어, "Faster, Better, Cheaper, Smaller" 개발 전략 아래, 개발 기간이 짧고, 소형 경량급의 고성능 SAR 위성을 적은 비용으로 개발하는 방향으로 발전하고 있다. 미국 NASA/JPL이 주도하는 LightSAR 계획은 고성능의 소형 SAR 기술 개발의 견인차 역할을 하고 있다<sup>[3]</sup>. 최근, SAR 기술은 초고해상도 표적 식별 능력을 향상시키기 위한 다중주파수, 다중편파, 집중조사모드 기술과 인터페로메트리를 이용하여 정밀한 고도 정보를 추출하기 위한 입체 영상기술 등이 적용되고 있다. 또한, 탑재체 질량을 줄이기 위한 소형 경량 안테나 및 송수신 모듈의 소형화 기술과 초고속 데이터 전송기술, 초고속 온 보드 SAR 프로세서 및 이동표적 탐지(GMTI) 기술 등을 적용하여 소형 경량 고성능의 SAR 위성을 개발하고 있다<sup>[4]</sup>.

본 논문에서는 고해상도 영상획득을 위한 소형 위성탑재 X 밴드 SAR 체계설계 연구결과를 제시한다.

다. 주어진 임무 요구조건을 바탕으로 주어진 해상도와 영상 질을 얻을 수 있는 시스템 설계 요구조건과 영상획득 모드 설계 기법에 대하여 설명하고, 표준영상 모드에 대한 설계 및 분석 결과를 제시한다. 그리고, 체계설계 결과와 체계성능을 만족할 수 있는 X-밴드 소형 SAR 탑재체 및 지상 수신처리에 대한 주요 설계 결과를 제시한다.

## II. 위성 SAR 임무체계 설계

위성의 임무설계는 우선적으로 사용자의 위성사용 요구조건에 따라 기술적으로 도달해야 하는 임무 요구사항을 도출하고 이를 근거로 체계설계를 수행한 후 최종 체계사양을 결정한다. 위성 사용자는 관심 표적의 종류, 위성 관측영역, 거리 및 방위 해상도, 영상의 질, 운용관점에서 고려되어야 할 동작모드, 사용목적에 따른 응용분야, 수명, 및 비용 등을 일반 사용 요구조건으로 제시하게 된다.

### 2-1 설계과정

SAR 체계설계는 그림 1과 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 병행함으로써 개발비용을 줄이면서 구성품간의 효율적인 인터페이스를 설계할 수 있다. SAR 임무/체계 설계과정은 그림 2에서 보는 바와 같이 위성 사용자가 요구조건을 제시하면 이로부터 임무 요구조건으로서 운용주파수, 편파, 수명, 탑재체 질량, 소모전력, 운용모드 및 모드별 해상도, 관측폭, 부엽수준 등에 대한 기술적인 성능을 도출한다. 임무/체계 요구조건이 주어지면 각 전문기술 분야 별로 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 분

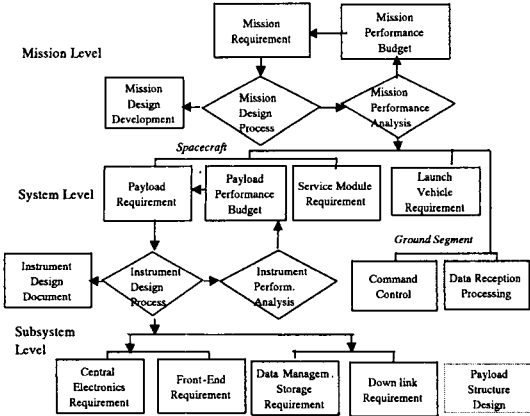


그림 1. 위성 SAR 체계설계 구성도

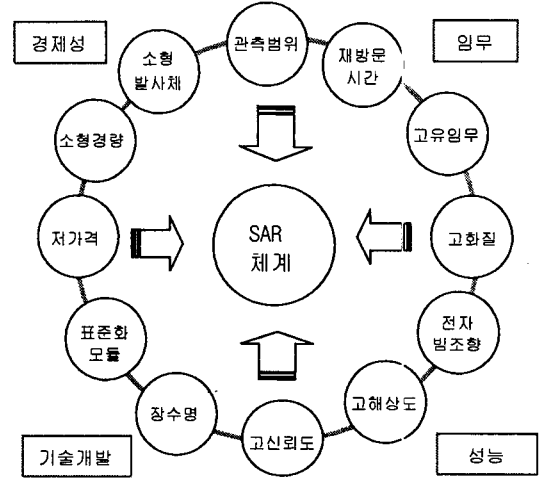


그림 3. 소형위성 SAR 주요설계 고려요소

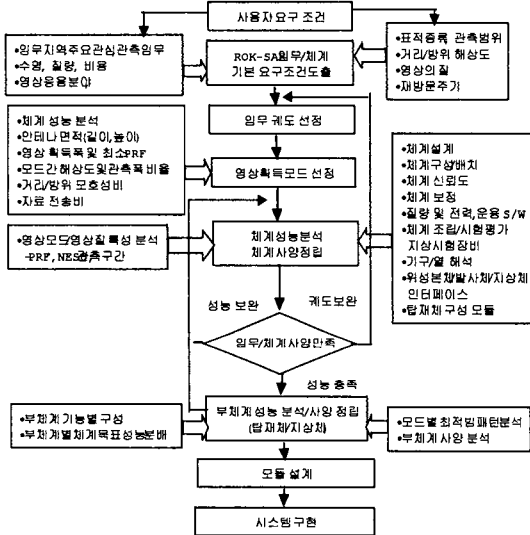


그림 2. SAR 임무체계 설계 흐름도

석을 반복 수행하여 체계 설계개념을 정립하고, 개략설계를 수행하여 부체계 레벨의 탑재체 및 지상처리부의 설계사양을 결정하며, 상세설계를 통하여 모듈레벨의 상세한 기능과 성능을 설계한다. 그림 3에서 보는 바와 같이 위성 SAR 전체의 임무 체계를 효율적으로 설계하기 위해서는 체계 전반적인 제반 성능 요소들간의 상대적인 제약요소들에 대한 Trade-Off를 수행하여 성능의 우선순위를 설정하여 최적의 효율적인 시스템을 설계하는 것이 바람직하다.

### 2-2 SAR 임무 요구조건

임무 요구조건은 사용자의 요구조건을 구체적인

시스템 사양으로 정의하기 위한 단계의 성능 요소로서 다음과 같은 사항을 우선적으로 결정해야 한다.

- 임무지역 : SAR 위성의 운용목적에 따라 특정 관측지역을 설정하여 위성을 제어하고 획득된 원시 영상을 지상으로 전송하는 관측반경과 관제 및 전송반경을 정의한다.
- 재 방문주기: 위성이 임무지역내의 특정 관심지점을 재 관측하는데 소요되는 시간간격으로 위성의 수, 궤도, 및 입사각 범위에 따라 결정된다.
- 위성 궤도 : 관측범위와 재방문 빈도를 고려하여 원형 극궤도나 경사 타원궤도를 사용하며 소요전력에 따라 태양동기 궤도를 적용한다.
- 관측 폭 : 영상획득 모드에 따라 안테나 빔의 거리 방향 조사 폭에 의해 광역 및 협역 탐사 범위를 결정한다.
- 해상도 : 영상획득 모드별로 거리 및 방위 해상도로 나누며 탐지범위와 표적식별 목적에 따라 저해상도와 고해상도 수준을 결정한다.
- 입사각 : 전파 빔의 조사 각도 범위에 따라 반사신호 감도와 관측범위가 결정된다.
- 영상획득 모드: 사용자 요구조건 및 응용분야에 따라서 각 영상 모드별로 해상도와 관측 폭을 결정한다.
- 수명 : 위성의 임무수행 기간동안 주어진 신뢰도를 유지할 수 있도록 고장가능 구성품은 예비장

치가 필요하며 위성체 질량과 비용증가의 제약요 소이다.

- 질량 및 부피 : 탑재체 및 위성본체를 포함하여 발사체의 규모에 수용하여야 하므로 설계성능의 주요 제약요소이다.
- 소모전력 : 위성본체가 제공 가능한 전력범위에 따라 송수신 SNR에 영향을 받으므로 설계성능에 주요 제한요소로 작용한다.

### 2-3 체계 성능 요소

주어진 위성 임무 요구 조건을 시스템 레벨에서 구현하기 위한 성능 요소로서 다음과 같이 영상 해상도, 주파수, 부엽 수준, 거리/방위 모호성 비, 신호 감도, 방사 해상도 및 정확도, 자료 전송률 등이 포함된다.

- 영상 해상도 : 공간상의 방위 해상도는 다음과 같이 주어진다.

$$\delta_a = R_s \frac{\lambda}{L_a} \quad (1)$$

여기서  $R_s$ 는 경사 탐지거리,  $\lambda$ 는 파장,  $L_a$ 는 안테나의 물리적인 길이이다. SAR의 최대 방위 해상도는  $\delta_{a_{max}} = L_a/2$  로 주어지며, 빔 조사영역의 도플러 대역폭에 의해 결정된다.

거리방향 해상도는 입사각도에 따라 식 (2)와 같이 주어진다.

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

여기서  $c$ 는 빛의 속도,  $B$ 는 펄스 대역폭,  $\theta_i$ 는 입사각이다. 거리 해상도는 송신 펄스의 밴드폭에 비례하며 입사각도에 따라 지면 해상도에 영향을 준다.

- 운용 주파수 : 운용 주파수는 SAR 위성을 이용하여 관측, 탐지하고자 하는 표적의 종류와 지표면 특성에 따라 결정된다. 또한, ITU에서 규정한 주파수별 대역폭은 L 밴드에서 대역폭은 85 MHz로 제한되며, C-밴드 범위에서 100 MHz, X 밴드에서 300 MHz로 대역폭이 규정되어 있다. 따라서, 요구 해상도에 따라 주파수와 입사각 범위가 제한을 받는다.

- 부엽 수준 : SAR 영상의 임펄스 응답(Impulse Response)에서 부엽수준(Silelobe Level)은 최대(Peak) 부엽 수준과 합성(Integrated) 부엽 수준으로 구분되며 거리/방위방향의 영상형성 과정에서 사용되는 가중치 함수에 따라서 결정된다. 거리 및 방위부엽 수준은 각각의 임펄스 응답(IRF)으로부터 구하는데 부엽의 갯수는 주엽에서 단위 해상도 셀이 20 개 정도 벗어난 셀 범위 까지 고려한다. 합성 부엽 수준은 임펄스 응답의 주엽으로부터 20개 정도 벗어난 부엽의 크기를 누적한 값과의 비율을 사용한다.
- 영상의 모호성 비 : 펄스 반복주파수(PRF)와 SAR 안테나의 부엽에 따라 거리/방위 방향의 관심지역 외에서의 반사신호가 안테나의 부엽을 통해 수신되어 거리/방위 방향의 모호성이 발생하여 영상의 화질을 저하하게 된다. 이러한 영상 화질 저하 정도를 원 영상의 반사도와 비교하여 거리 모호성 비(RAR) 및 방위 모호성비(AAR) 로 표시한다.
- 신호 감도 : 주어진 관측폭에서 반사되는 신호의 크기가 수신기의 잡음과 동등하게 되는 표적의 반사도로 정의하며 NE00로 나타낸다. SAR 영상의 화질을 직접적으로 결정한다.
- 방사 해상도 : SAR 영상 표적은 관심지역에서의 해상도 범위 내에 존재하는 수 많은 표적으로부터 반사된 신호가 서로 다른 랜덤위상을 가지게 되어 합쳐짐으로 거치른 스펙클(Speckle) 잡음이 나타나서 영상의 화질을 저하하게 된다. 이를 줄여주기 위해서는 원시영상의 화질 ( $NE \sigma_0$ )이 좋아야 하며, 영상합성 과정에 멀티 룩(Multil-look) 기법을 적용한다.
- 방사 정확도 : SAR 영상은 관심있는 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.
- 자료 전송률 : 자료 전송률은 관심지역으로부터 수신된 원시 SAR 자료를 지상전송 안테나를 통하여 지상수신소로 전송할 수 있는 최대 전송속도로 정의하며, 영상 관측폭 및 해상도의 함수이다.

### Ⅲ. 영상모드 설계 기법

SAR의 주요 장점은 하나의 안테나를 이용하여 다양한 영상모드를 구현할 수 있다는 점이다. 본 연구에서는 그림 4와 같이 광역모드, 표준모드, 고해상도 모드의 세 가지 빔 운용 모드를 필요에 따라 사용할 수 있도록 설계하였다. 위성의 고도와 입사각은 그림 5와 같이 SAR 시스템의 기하학적 변수에 의하여 정의된다. 요구하는 해상도로부터 안테나 최소 면적이 유도되고 안테나 길이, 높이가 결정된다. 또한 방위 해상도와 위성의 지상 속도에 의하여

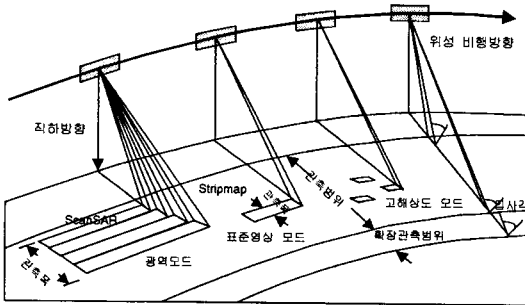


그림 4. SAR 영상획득 모드

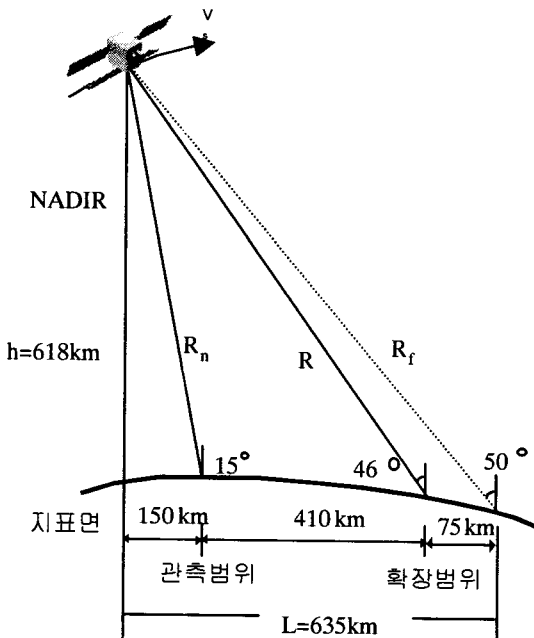


그림 5. 위성 SAR 고도 및 관측범위

최소 PRF 값이 결정된다. 임무 요구조건, 안테나 크기 및 최소 PRF 등의 결과와 관측각 선정을 위한 Diamond Diagram으로부터 각 영상 모드별로 적절한 관측지역을 선정하여 각 지상관측구역별로 PRF를 구한다. 이 결과를 근거로 하여 거리/방위 해상도, 거리/방위 모호성비,  $NE\sigma_0$ , 안테나 마스크/빔 패턴, 방사해상도, 자료전송율 등을 계산한다.

#### 3-1 안테나 크기

주어진 관심지역을 관측하는데 필요한 위성의 고도와 입사각 범위는 잘 알려진 Space System Analysis Tool Set<sup>[5]</sup>을 이용하여 구할 수 있으며 SAR 안테나의 최소 면적  $A$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$A = \frac{4v_s R \tan(\theta_i)}{f} \quad (3)$$

여기서,  $v_s$ 는 위성의 속도,  $R$ 는 위성과 지상 경사 거리,  $\theta_i$ 는 최대 입사각도,  $f$ 는 동작 주파수이다. 안테나의 면적이 구해지면 다음에는 주어진 방위 해상도를 만족하는 요구 안테나의 길이를 다음 식을 이용하여 구한다.

$$L_a = \frac{2v_s \delta_a}{f_a v_g} \quad (4)$$

여기서,  $f_a$ 는 빔 확장계수,  $\delta_a$ 는 방위방향 해상도,  $v_g$ 는 위성체의 지상 추적속도이다.

따라서 요구되는 안테나의 높이는  $h = AL_a$ 로 주어진다. 위상배열 안테나의 슬롯 도파관의 열(row) 간격  $d$ 는 관심영역에서 Grating Lobe가 발생하지 않도록 통상적으로  $d = 0.74 \lambda$  이상 떨어지지 않도록 한다.

#### 3-2 최소 PRF

방위방향의 요구 해상도를 충족할 수 있는 도플러 대역 폭은 다음 식과 같이 주어진다.

$$B = \frac{f_a v_{g_{max}}}{\delta_a} \quad (5)$$

여기서,  $v_{g_{max}}$ 는 도플러 주파수가 최대가 되는 입사각 15도의 경우의 지상 속도이다. 원하는 방위 해

상도를 얻기 위한 최소 PRF는 다음 식과 같다.

$$PRF_{min} = 1.15 \times 1.05 \times B \quad (6)$$

여기에서는 15%의 과도 샘플링 요소와 5%의 오차를 고려하여 최소 PRF를 결정하고 있다.

### 3-3 관측 폭 설계

위성 고도 자료와 최소 PRF 선정 결과를 기본으로 하여, 안테나 부엽에 의한 직하방향 반사신호(Nadir Return)와 송신시간간의 간섭을 방지하는 적절한 관측지역을 선정하여야 한다. 관측지역 결정은 Diamond Diagram<sup>[6]</sup>을 이용하여 관측범위 내에서 관측폭 별로 PRF를 선정한다. Diamond Diagram은 5μs 정도의 적절한 Guard Time과 7% 정도의 Duty Factor 및 관측지역간의 중첩 정도 등을 사전에 설정하여 그린다. 선정된 관측구역 별 PRF 선정 결과를 토대로 각종 영상의 화질과 관련된 체계 성능을 계산한다.

### 3-4 방위 모호성비 분석

관측구역별로 선정된 PRF 값을 토대로 방위방향 영상의 모호성 발생 영향을 분석하기 위하여 방위 모호성 비는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

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

여기서, 모호신호  $P_A$  및 표적신호  $P_T$ 는

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

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

$L$ 는 Look 수,  $N$ 는 모호 표적 개수,  $\alpha_k, \beta_k$ 는 각  $k$  번째 Look 합성 가중치 및 에너지를 나타낸다.

### 3-5 자료 전송률

자료 전송률은 관심지역으로부터 수신된 원시 SAR 자료를 지상전송 안테나를 통하여 지상수신소로 전송할 수 있는 최대 전송속도로서 영상 관측폭 및 해상도의 함수이다. 자료 전송률  $DR$ 은 다음 식

으로 주어진다.

$$DR = PRF \times N_b \times CADU \quad (8)$$

여기서  $N_b$ 는 각 관측 폭으로부터 반향 신호 원도우 당 비트 수로서  $N_b = 2WSQ + h$ 로 주어진다. 여기서  $S$ 는 신호의 샘플링 주파수,  $Q$ 는 양자화 레벨,  $W$ 는 관측영역의 근지점과 원지점간의 시간 차이로 인한 원도우 길이이다.

CADU(Channel Access Data Unit)는 패킷에 부가되는 추가 데이터 량이다.

### 3-6 안테나 마스크 및 빔 패턴

주어진 관측구역 선정결과를 바탕으로, 거리/방위 모호성 비 요구조건과 모호성 구역을 표시해주는 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<sup>[6]</sup>을 활용하여 계산할 수 있으며, 초기에는 Uniform Weight를 적용하여 시작하고, 점차적으로 주어진 성능을 얻기 위하여 설계 오차 및 부엽수준을 최소화하는 방향으로 최적화된 합성빔을 형성하도록 한다.

### 3-7 거리 모호성비 분석

관측구역 선정 결과를 바탕으로, 안테나 마스크 패턴, 임무지역에 대한 표적 또는 클러스터 모델 및 RAA(Range Ambiguity Analysis) Module<sup>[6]</sup>을 이용하여 분산 표적에 대한 거리 모호성을 계산한다. 거리 모호성비는 다음식으로 주어진다.

$$RAR = 10 \log_{10}(\sum P_A / P_T) \quad (9)$$

여기서

$$\text{표적신호 } P_T = \frac{G_{TT} \cdot G_{RT} \cdot \sigma_{0T}}{R_T^3 \sin \theta_T} \quad (9-a)$$

$$\text{모호신호 } P_A = \frac{G_{TA} \cdot G_{RA} \cdot \sigma_{0A}}{R_A^3 \sin \theta_A} \quad (9-b)$$

### 3-8 NE $\sigma_0$ 및 방사 해상도

신호감도는 영상의 화질을 결정하는 중요한 시스

템 변수이다. 안테나 빔 패턴의 지향도, 송신출력, 대역폭, 탐지거리, 시스템 구현 손실 등을 정의한 후  $NE\sigma_0$ 와 방사 정확도를 계산할 수 있다.  $NE\sigma_0$ (Noise-equivalent Sigma Zero)는 다음 식과 같다.

$$NE\sigma_0 = \frac{(4\pi)^3 R^3 N_f L_s L_b k T_0 B_m v_s \sin(\theta)}{P_t G_T G_R L_B^2 \lambda^3 c f_a} \quad (10)$$

여기서  $R$ 는 경사거리,  $N_f$ 는 잡음지수,  $L_s$ 는 시스템 손실,  $L_b$ 는 신호처리 손실,  $k$ 는 Boltzmann 상수,  $T_0$ 는 290K,  $v_s$ 는 위성속도,  $\theta$ 는 입사각,  $P_t$ 는 평균송신 전력,  $G_T, G_R$ 는 송수신 안테나 이득,  $L_B$ 는 빔조정 손실,  $\lambda$ 는 파장,  $c$ 는 빛의 속도,  $f_a$ 는 방위 빔폭 확장계수이다.

방사해상도는 다음 식으로 주어진다.

$$\gamma = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \frac{1}{\sqrt{N_L}} \left( 1 + \frac{1}{SNR} \right) \right\} \quad (11)$$

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

#### IV. 영상모드 설계 결과 및 분석

본 장에서는 영상획득 모드 설계과정에 따라 광역모드, 표준영상 모드 및 고해상도 모드의 해상도와 관측폭을 설계하며, 특히 표준 영상모드를 중심으로 최종 결과를 제시하고 성능을 분석한다<sup>[7]</sup>.

##### 4-1 설계결과

###### 4-1-1 운용주파수 및 궤도

SAR 운용 주파수 대역은 고해상도 구현과 소형 위성 탑재체 질량 제한, 반사특성, 영상 화질, 재 방문 주기 및 소형 SAR 임무 등의 제반조건을 고려하여 X 밴드로 선정하였다. SAR 위성은 태양동기 극궤도로서 19일 반복주기를 갖고 고도는 한반도 기준으로 618 km이다. 광범위한 관측을 위하여 입사각 범위는 15° ~ 46°로 설계하였다.

###### 4-1-2 안테나 크기 및 최소 PRF 선정

식 (3)을 이용하여 계산된 최소 안테나 면적은 최소 2.737 m<sup>2</sup>이며, 고해상도 모드의 요구해상도를 적

용하여 산출된 안테나 길이는 5.52 m이다. 계산된 도파관 열은 21.7이나 실제적으로 전력 분배기를 3의 배수로 고려하여 24열이 되도록 안테나 크기를 정하였다. 따라서 안테나 최종 크기는 X 대역에서 5.52 m × 0.55 m로 선정하였다. 최소 PRF는 고해상도 모드의 방위 해상도를 적용하여 2910 Hz를 최소 PRF로 선정하였다.

##### 4-1-3 관측구역, 방위 모호성비 및 전송률

관측 구역은 Guard Time 5μs, Duty cycle 7%를 적용하여 만들어진 Diamond Diagram을 이용하여 그림 6과 같은 최종 결과를 얻었다.

최소 PRF 2910 Hz와 관측지역간의 중첩 거리는 8 km를 적용하였으며, 입사각 15° ~ 50° 범위에 해당하는 지상거리 150 km ~ 640 km 범위에서 총 20개의 세부 관측구역이 선정되었다. 세부 관측 구역별로 PRF는 관측구역에 따라 2910 Hz ~ 3900 Hz 범위에서 선정되었으며, 특히 Swath No.4의 경우 높은 PRF의 선정으로 거리 모호성비 성능이 나빠졌으나 반복설계를 통하여 요구성능에 만족하도록 조정하였다.

표준영상 모드의 방위 모호성비는 점표적의 경우 -25.9 dB 이하, 분산 표적의 경우 -21.7 dB 이하로 설계되어 요구조건인 -20 dB 이하에 만족함을 확인하였다. 자료 전송률은 132.08 ~ 317.39 Mbps로서 최대 허용 전송속도인 210 Mbps를 초과하는 관측 구역이 SS1, SS2, SS4로 나타났다. 이 경우 탑재체 내부에 자료 저장장치를 이용하여 초과자료를 저장함으로써 자료 손실없이 지상으로 전송할 수 있게 하였다.

##### 4-1-4 안테나 빔 패턴 및 거리 모호성비 성능

안테나의 기계적인 지향각도는 빔의 전자조향 범위를 고려하여 27.2°가 되도록 하였다. 그림 7은 표준영상 모드 중 12번 관측구역(SS12)에 대한 마스크 패턴 및 고각빔 패턴 결과이다.

그림에서 보는 바와 같이 부엽은 대부분 마스크 패턴의 모호성 구역 밖에 존재하게 되므로 거리 모호성 발생 가능성이 거의 없다. 거리 모호성비는 ESA (European Space Agency)의 Land/Sea Clutter

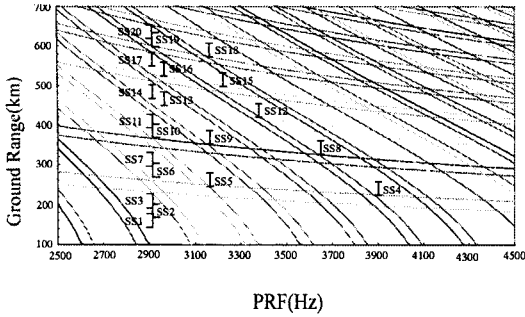


그림 6. 표준영상 모드 관측구역 선정

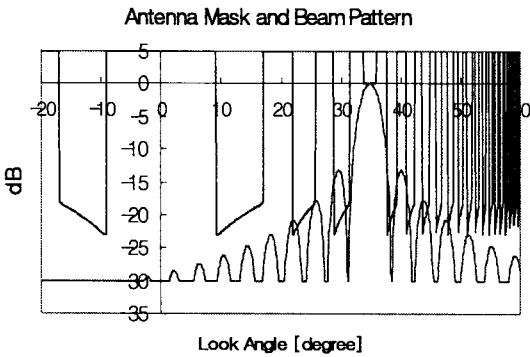


그림 7. 안테나 마스크 및 빔 패턴

모델을 이용하여 표준영상 모드의 20개 관측구역에 대하여 Uniform 및 Taylor Weight와 하드웨어 구현 오차를 고려하여 그림 8과 같은 결과를 얻었다. 지상거리 200 km 근처 구역에서는 거리 모호성 비를 줄여주기 위하여 Taylor Weight를 적용하였고 원 거리에서는 수신신호가 약하므로 Uniform Weight가 적절함을 보여주고 있다. 입사각이 최대인 원 거리에 존재하는 SS15와 SS16의 가장자리에서는 관측 폭을 다소 축소하여 거리 모호성비를 충족시킬 수 있었다. 소형위성의 질량 증가 문제를 고려하여 안테나를 키우는 것보다 관측 폭을 줄이고 Swath 수를 증가시키는 것이 바람직하다.

#### 4-1-5 NE $\sigma_0$ margin 및 방사 해상도 성능

표준영상모드에 대한 NE $\sigma_0$  Margin은 그림 9와 같으며 일반 영상 획득 범위인 입사각 46° 이내의 관측폭인 30 km까지는 체계 요구조건인 마진 8 dB 이상 만족하고 있다. NE $\sigma_0$  margin 계산결과를 토대로 산출된 방사 해상도의 최종 결과는 그림 10에

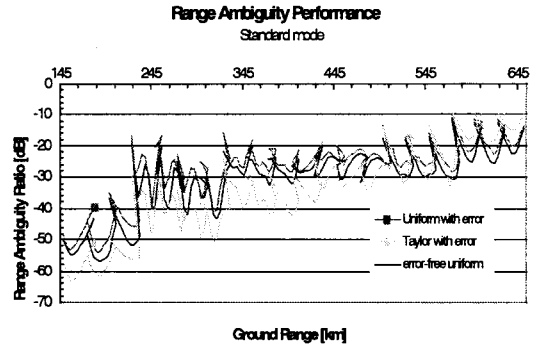


그림 8. 표준영상 모드의 거리 모호성비

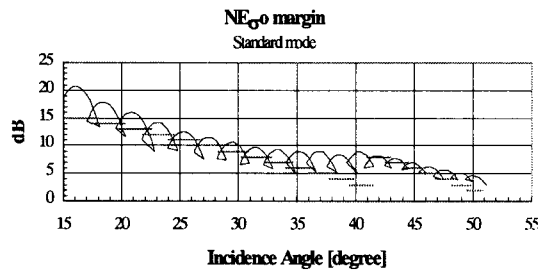


그림 9. 표준영상 모드의 NE $\sigma_0$

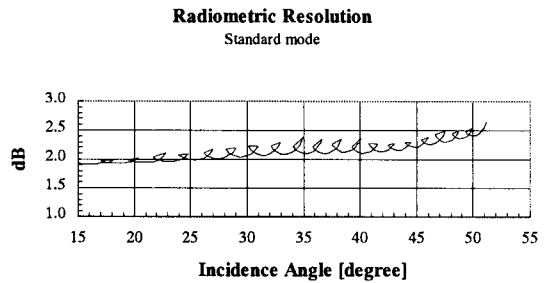


그림 10. 표준영상 모드의 방사 해상도

서 보는 바와 같이 1.9~2.34 dB 범위에 있으므로 요구조건 2.5 dB 이하로서 성능이 우수함을 알 수 있다.

#### 4-2 표준영상모드 성능 분석

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

소형 SAR 위성 설계에서 있어서 중요한 고려요소는 위성체의 질량과 부피와 전력을 최소로 유지하여 전체 체계비용을 줄이면서 동시에 영상 질과 해상도가 기존 대형 위성(ERS 및 Radarsat)과 유사



표 1. 표준영상모드 성능분석결과

성능 변수	· 요구 조건	체계 성능
해상도 - 거리 - 방위	$\leq 10$ m $\leq 10$ m	6.3 ~ 10 m $\leq 10$ m
침투부엽 수준 - 거리 - 방위	$\leq -18$ dB $\leq -18$ dB	-23.3 dB -23.3 dB
합성부엽 수준	$\leq -12$ dB	-14.0 dB
모호성비 - 거리 - 방위	$\leq -20$ dB $\leq -20$ dB	$\leq -20$ dB $< -20$ dB
NE $\sigma_0$ margin*	$\geq 8$ dB	8~22.3 dB
방사 해상도	$\leq 2.5$ dB	1.9~2.34 dB
관측폭	$\geq 30$ km	30 km
입사각범위 - 일반 모드 - 확장모드	$15^\circ \sim 46^\circ$ $46^\circ \sim 50^\circ$	$15^\circ \sim 46^\circ$ $46^\circ \sim 50^\circ$
방사 정확도	$\leq 1.0$ dB (1 $\sigma$ )	0.94 dB (1 $\sigma$ )

한 성능을 유지하도록 하는 것이 중요하다. 이들 대형 위성의 SAR 안테나 크기는 10×1m 정도로서 상대적으로 절반 정도의 안테나 면적을 가진 소형 위성 SAR의 경우, 동일한 단위 관측 폭을 가지는 경우 NESZ 성능이 다소 떨어질 수 있다. 또한, 소형 SAR 안테나로 고해상도를 얻기 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 질 성능을 유지할 수 있다. 본 연구에서는 소형 SAR 위성의 안테나 크기로 구현할 수 있는 최적의 영상모드를 설계하였으며, 광역모

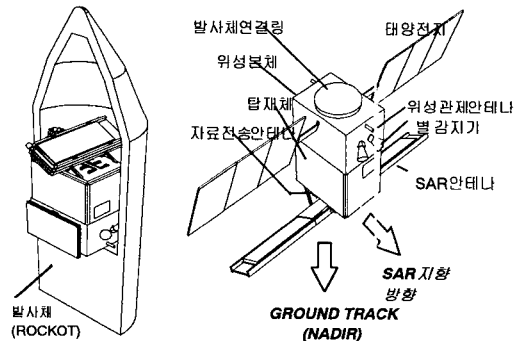
표 2. SAR 영상모드

영상모드	광역모드	표준모드	고해상도
관측 폭	120 km	30 km	10 km
해상도	30 m	10 m	□ m
빔 수	4	20	36
PRF(Hz)	2667~4133	2910~3900	2910~3900

드, 표준모드, 고해상도 모드에 대한 설계결과를 표 2에서 요약하였다.

### V. 체계설계 및 성능특징

SAR 임무 체계성능 분석을 토대로 위성탑재 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 내부 형상, 발사시 적재 형상과 운용시 전개 형상, 탑재체 구성품의 내부 배치도가 그림 11에 각각 그림으로 표시되어 있다. 전개된 위성체 형상은 SAR 안테나, 자료전송 안테나, 위성관제 안테나, 태양전지판 등으로 구성되어 있다. 탑재체의 크기는 가로 세로 높이가 1×1.45×1 m로 소형이며 중소형



(a) 발사체

(b) 위성체



(c) 탑재체 배치

그림 11. 위성 SAR 체계 형상

표 3. 임무체계 주요성능

위성 고도	618 km (한반도)
위성궤도	태양동기 (Dawn-Dusk)궤도
경사각도	97.8도
궤도주기	97분 (14 + 16/19 회/1일)
반복주기	19일 (282회전)
재방문 주기	0.5~2.5일
영상모드	광역, 표준, 고해상도 모드
입사각도	15~46도 (정상모드) 46~50도 (확장모드)
질량	< 950 kg(탑재체+플랫폼)
전력	< 2.5 kw

발사체의 공간에 적합하게 설계되어 있다. SAR 안테나는 도파관 슬롯형 위상배열형으로 크기는 길이 5.5 m, 높이 0.5 m로서, 발사 시에는 3단으로 접어서 발사체에 적재된다. 위성체의 총 질량은 950 kg 이내이며 SAR 탑재체 질량은 마진을 포함하여 450 kg으로 Eurokot과 같은 소형 발사체에 적합하도록 설계되었다.

소요전력은 영상획득 모드에서 최대 2.3 kw 요구된다. 위성 SAR의 궤도는 태양동기 극궤도로서 97.8°의 경사각을 유지하고 있다. 재방문 특성은 양방향 관측이 가능하다. SAR 위성은 필요에 따라 긴급, 우선, 평시 임무로 나누어 운용할 수 있다. 영상획득 모드는 관측범위와 해상도에 따라 광역, 표준, 고해

상도의 3개 모드를 필요에 따라 전자적으로 안테나 빔을 변경하여 운용할 수 있다. 본 설계 결과로 얻어진 소형 위성 SAR 임무 체계성능이 표 3에 요약되어 있다.

### 5-1 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. SAR 탑재체 설계의 주요 설계 목표로서, 1) 고해상도, 고화질 SAR 영상 생성 2) 다중모드의 전자빔 조향 3) 실시간 고속자료 전송, 3) 3~5년의 수명 및 고 신뢰도 4) 소형 경량, 저 비용의 설계조건 등이 포함된다. SAR 탑재체 설계에 적용된 기술 특징을 요약하면, 고해상도의 탐지 특성이 좋은 X-밴드와 지상 반사특성이 좋은 수평편파를 적용하였고, 특히 고해상도 구현을 위해 광대역 신호를 발생할 수 있는 칩 스티칭(Chirp Stitching)기법을 적용하였다. 고화질의 영상획득을 위해 24채널의 내부 신호보정 장치(Calibration)와 외부 신호 보정 기능을 가지고 있다. 또한 1 GB 이상의 고속자료 전송을 위한 데이터 전송구조와 지구상 임의의 지역 관측이 가능하도록 온 보드 저

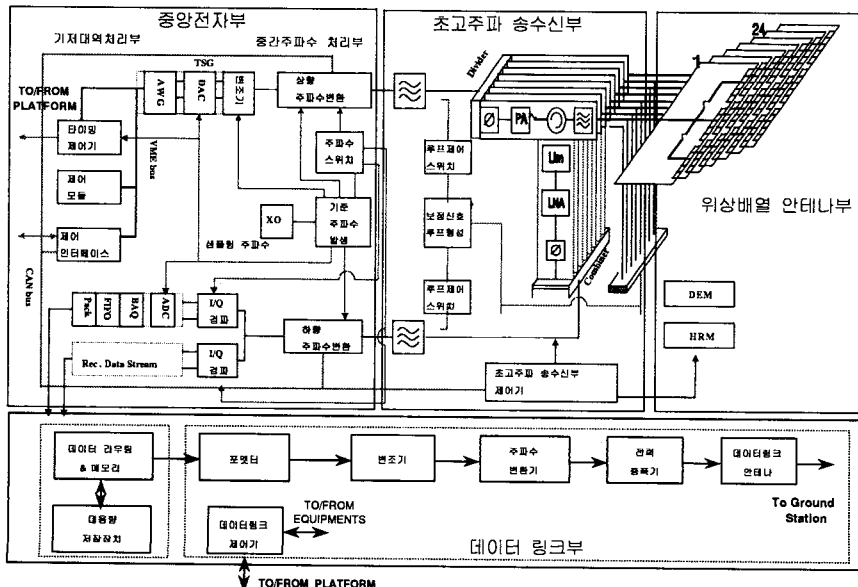


그림 12. SAR 탑재체 구성도

표 4. SAR 탑재체 주요성능

운용주파수	X 밴드(9 GHz 대역)
질량	450 kg 이하
전력	2.3 kw 이하
수명	3년~5년
외형 크기	1×1.45×1 m
편파특성	HH 수평편파
PRF	2900~3500 Hz
송신출력	160 W/MPM×24채널
안테나 크기	5.52×0.56 m
안테나 빔폭	0.27(방위각)×최대 3도(고각)
펄스 폭	PRF의 10%
송신 대역 폭	5~85 MHz
자료전송 속도	210 MBps (2 채널)
자료저장 용량	10 Gbits
자료 전송에러	10 <sup>-5</sup>

장기능을 포함하고 있다.

SAR 탑재체 구성은 그림 12와 같다. SAR 레이더 부분은 위상배열 안테나부, 초고주파 송수신부, 중앙 전자부로 구성되고, 데이터 링크부는 자료저장, 처리기 및 송신기와 안테나로 구성된다. 안테나는 좁은면 경사슬롯 28소자로 구성된 중앙 급전식 공진형 배열 안테나이며, 소형 발사체에 적재 및 전개가 가능하도록 3단의 패널로 구성되고 패널당 3개의 부 패널로 되어 있다. 안테나 빔 폭은 방위0.27도, 고도방향으로 최대 3°까지 조향 가능하다. 송수신기는 24채널 분산형 MPM 전력 증폭기와 24채널 병렬형 저잡음 수신기로 구성된다. 송신 첨두 전력은 MPM 당 160 W이며 삽입손실은 송/수신 채널당 3~4 dB이다. 송수신 채널의 오차보정 회로가 있으며 채널간 위상 및 진폭은 보상 기능이 있다. 중

양전자부는 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 85 MHz이며 수신시 8bit으로 샘플되어 가변형 BAQ 방식으로 압축되어 자료저장기로 보낸다. 데이터 링크부는 8 GHz 대역의 X 밴드 전송장치로서 최대 210 Mbps 속도로 자료를 전송한다. 10 Gbits의 고속 대용량 자료 저장장치가 있으며, 반도체 송신기와 9개의 혼 안테나로 구성되어 있다. 또한, 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. SAR 탑재체의 주요 성능은 표 4와 같다<sup>19-101</sup>.

### 5-2 지상수신처리

지상체는 크게 수신처리소와 임무관제소로 구성된다. 그림 13에서 보는 바와 같이 수신처리소는 지상수신 안테나부, 데이터 수집 및 전처리부, SAR 영상형성부, 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 압축함으로써 레벨 1의 기본 영상을 형성

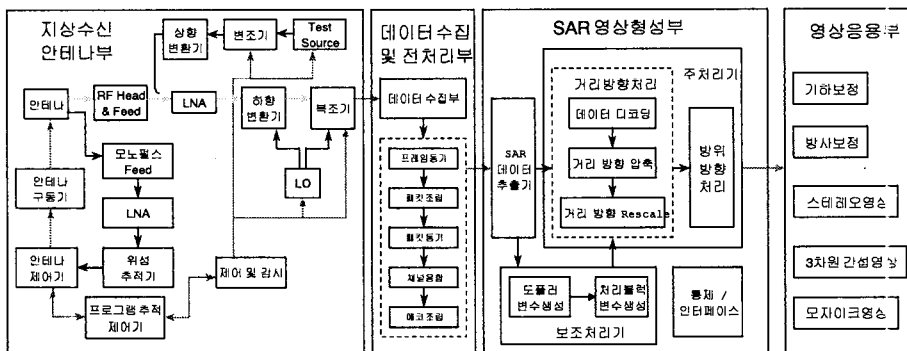


그림 13. SAR 지상수신처리 구성도

표 5. SAR 지상 수신처리 주요성능

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

하게 된다. 이 기본 영상은 레디오 매트릭 보정이나 지구 기하적인 보정을 거친 다음, 스테레오 영상, 3차원 간섭영상, 모자이크 영상 처리 등 활용목적에 따라 다양한 정보를 추출할 수 있게 된다. 지상수신 처리의 주요 성능은 표 5와 같다.

특히, 영상 형성 프로세서는 지상 처리과정에서 고해상도 영상을 만드는데 매우 중요하며, 고유한 설계부분이다. 칩 스티칭 방법으로 만들어진 광대역 신호를 수신시에는 상, 하 측파대로 나누어 지상에 내려 보내주므로 이 두 신호를 묶어서 거리방향 압축을 해 주어야 원래의 고해상도 영상을 얻을 수 있다. SAR의 정보는 반사신호 크기와 위상 정보를 각각 이용할 수 있는 장점이 있다. 반사신호 세기를 이용하면 표적인식, 변화감지, 스테레오 지도등을 만들 수 있고, 위상정보를 이용하면 DEM(Digital Elevation Map) 정밀 고도정보 추출과 보다 정밀한 변화탐지, 분류등을 할 수 있다. 그림 14 영상은 상

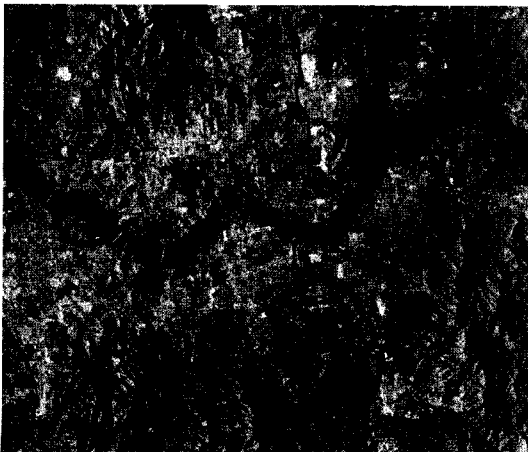


그림 14. 표준영상모드 SAR 영상  
(서울 한강지역 10 m 해상도)



그림 15. SAR 인터페로그램 영상  
(서울 한강지역 ERS 영상)

용 위성인 RadarSat 영상을 이용, 10 m 해상도의 표준영상 모드로 서울 한강 지역 영상을 처리한 결과물이다. 그림 15는 서울 한강 부근을 하루 간격으로 획득한 해상도 30 m의 ERS 영상을 Interferogram 기술을 이용, 위상간섭 처리하여 생성한 등고선에 따른 위상 간섭 무늬이다. 고도 정확도는 영상간의 코히어런스에 영향을 많이 받지만 스테레오 맵에 비하여 1m 이내의 고도 정밀도를 유지할 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 X 밴드의 고해상도 위성탑재 SAR 체계설계와 주요 체계성능 특징을 제시하였다. 특히, 소형 위성 SAR의 전체적인 임무 및 체계 성능요소를 분석하고 SAR 체계의 영상 운용모드 중 표준 영상 모드를 중심으로 시뮬레이션을 통하여 상세한 성능 분석 결과를 제시하였다. X 밴드 SAR 탑재체 및 지상 수신 처리부의 주요 설계 결과와 성능 특징에 대하여 설명하였으며, 부 체계별 주요 상세설계를 통하여 체계성능을 확인하였다. 특히, 제안된 소형 위성 SAR 체계는 한반도 및 주변국의 기상여건을 고려해 볼 때 광역 감시에서 고해상도 표적식별에 이르기까지 다양한 영상모드로 운용할 수 있는 장점이 있기 때문에, 위기감시, 자원탐사 및 환경감시 등의 광범위한 민간 활용 분야에서 기술과 급 효과가 많을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 영국 Matra Marconi Space(MMS)와 현지 해외공동연구를 통하여 수행되었다. 본 설계에 참여한 국방과학연구소 전문 분야별 연구원과 MMS사의 기술 협력에 감사드린다.

## 참 고 문 헌

[1] J. Curlander, R. McDonough, *Synthetic Aperture Radar - Systems & Signal Processing*. John Wiley & Sons, Inc. pp. 9-44, 1991.  
 [2] L. J. Cantafio, *Space-Based Radar Handbook*. Artech House, Inc., 1989.  
 [3] D. A. Cohen, "A LightSAR Mission Design Study for a NASA-Sponsored Joint Commercial /Science SAR Remote Sensing Mission," *IEEE Geoscience & Remote Sensing Symposium Proceeding*, vol. 1, pp.253-255, 1998.  
 [4] R. Klemm, "SAR Technology-Where are We

Going?", *IEEE AES Magazine*, pp.25-29, April, 1999.  
 [5] Space Systems Analysis Tool Set. Ver 4 User Guide, Systems Eng. and Assessment Ltd., 1995.  
 [6] M. Newey, *SAR System Design Tools*, Matra Marconi Space, UK, 1997  
 [7] Mission Definition and Requirement Document, ROK-SAR MDR Report No. 3955-KA001-RQZ, ADD/MMS June, 1997.  
 [8] *System Design and Performance Baseline*, ROK-SAR SDR Report No. 3355-KA014-RPD, ADD/MMS Oct. 1997 and Revised in Feb., 1999.  
 [9] 광영길 등, "위성탐재 영상레이더 임무 및 체계 개념설계, CESD-517-990414L. 국방과학연구소, 1998. 12.  
 [10] 광영길 등, "위성탐재 영상 레이더 (ROK-SAR) 체계설계", KTRC-517-991067, 국방과학연구소, 1999. 12.

## 광 영 길



1972~1976: 한국항공대학교 항공통신공학과 학사(B.S)  
 1979~1981: 한국과학기술원 전기전자공학과 석사(M.S)  
 1983~1987: 미국 오하이오대학교 전기공학과 박사(Ph.D)  
 1984. 1~1987. 6: 미국 오하이오대학 Avionics Research Center, R.A  
 1992. 3~1993. 2: 한국과학기술원 전기전자공학과 겸임교수, Adaptive Array 및 Radar 강의  
 1997. 3~1999. 2: 영국 Matra Marconi Space사 파견, 위성 SAR 해외공동연구 팀장  
 1990~2000: 국방과학연구소 레이더/신호처리 연구실장, SAR 연구실장  
 1976~현재: 국방과학연구소 책임연구원  
 [주 관심분야] Adaptive Array, Radar System, Radar Signal Processing, Synthetic Aperture Radar(SAR) System, SAR Image Processing & Applications