위성탑재 영상레이다(SAR)의 광역감시 모드에 대한 체계 성능 분석

Performance Analysis in Wide Swath Mode on a Spaceborne SAR System

이 범 석*
Lee, Bumsuk

ABSTRACT

Synthetic Aperture Radar(SAR) can provide radar imagery in all weather, day and night situations. Recently SAR system consisted of several imaging modes, has been used for not only military purpose, but also commercial and scientific applications. This paper firstly reviews spaceborne SAR theory, specially scansar principle, and secondly the theories and the design procedures of system performance analysis in the scansar mode, which are different from the ones in the conventional stripmap mode. Based on the SAR-related knowledge, it lastly derives the results of performance analysis in wide swath mode using the scansar technique at the design phase. It shows that these results can meet the system requirements as given the customer. In future, they will continuously be updated using the real measurement data, in connection with the development of a spaceborne SAR system.

1. 머리말

영상 레이다 (SAR)는 관심있는 표적에 전자파를 방사하고 반사된 신호를 합성하여 레이다 영상을 획득하는 능동센서로서, 주야간, 강우, 구름. 역상 등 기상조건이나 일조현상에 관계없이 전천후와 높은 임무 성공률로 지표면의 영상을 획득할 수 있는 장점을 보유하고 있어서 군사용뿐만 아니라 민수/과학 등의 활용분야가 점차 증가하는 추세에 있다. 특히 위성 탑재 영상 레이다는 영공침해의 문제를 발생하지 않으면서 주변국을 감시할 수 있는 우수한 능력이 있기 때문에 국가 전장감시, 조기경보용으로 매우 필수적인 정보획득 수단이며, 21세기 미래 정보전을 대비한 독자적인 정보전력 구축의 일환으로 매우 중요한 센서이다.

1950년에 Carl Wiley가 처음으로 SAR의 원리가 되는 DBS(Doppler Beam Sharpening) 이론을 개발한 이래 1950년대와 1960년대에는 주로 군사용 항공기 탑재 SAR를 개발하여 운용하였으며, 1970년대 들

* 국방과학연구소 선임연구원

어서서 과학기술의 발달에 따라서 점차 과학용으로 이용하게 되었다[1]. 특히 1978년에 세계 최초로 SAR 탐사위성인 SEASAT을 미국에서 발사/운용하므로 새로운 위성탑재 SAR 시대가 시작되었다. 그 이후 여러 종류의 유/무인 항공기 및 위성 탑재 SAR 시스템이 개발되어 민수용과 군사용으로 널리 사용되게 되었으며, 현재 상업용으로 개발된 Radarsat은 사용자의 요구에 따라서 원하는 지역의 영상을 획득하여 판매 중에 있다. 다만 선진국에서는 SAR 위성을 개발하여 군사용으로 사용하고 있으나 구체적인 자료는 군사기밀로 분류되어 공개가 되지 않고 있다.

전술한 바와 같이 SAR에 대한 기본적인 이론을 1950대~1960대를 거쳐서 대부분은 알려졌으나 사용자의 다양한 요구를 충족하기 위한 SAR의 영상합성/처리 분야의 기술은 계속적으로 발전하였으며 앞으로도 지속적으로 연구가 진행될 예정이다. 새로운 기술 발전 방향은 다중 주파수 기법, 다중편파 기법, 고해상도 기법, 실시간 처리, 다중모드 처리, 3차원 입체 영상 기술 등의 첨단기술을 개발하고 있으며, 이러한 기술을 적용하므로 관심지역에 대한 다양한 정보를 획득하여 사용자에 제공할 수 있게 되었다.

본 논문에서는 위성탑재 SAR에 대한 기본적인 이론, 영상획득 모드, 스캔 SAR 모드 원리 등을 먼저 설명하고, 이를 토대로 위성 탑재 SAR 시스템 설계하기 위한 SAR 임무/체계 설계 과정을 기술한다. 체계 설계시 가장 중요한 체계 사양을 도출하기 위한 체계 성능 분석 기법 중에서 스캔 SAR 기술을 활용한 광역감시 모드에 대한 설계 절차, 방법 및 관련 이론을 제시한다. 최종적으로 위성탑재 영상레이다(ROK-SAR)[1] 체계에 대한 개괄적인 임무/체계 개념 정립 결과와 본 논문의 핵심부분인 광역감시 모드에 대한 체계 성능 분석 결과를 자세히 설명하고 있다. 즉 거리/방위 해상도, 거리/방위 모호성비, 자료전송률, 첨두/종합 부엽수준, NESZ(Noise Equivalent Sigma Zero) 및 방사 해상도 등의 체계 성능 지수를 이용하여 광역감시 모드에 대한 성능분석을 수행하고 상세한 결과를 제시하고 있다[2].

2. SAR 기본 개념

2.1 SAR 기본 원리

SAR는 용어정의에서 알 수 있듯이 레이다를 이동하는 플랫폼에 탑재하여 움직이면서 레이다 신호를 송수신하고, 이를 동시성을 가지고 합성하므로 마치 큰 안테나와 동일한 보다 향상된 방위 해상도의 영상을 획득하는 센서이다. SAR는 기본적으로 관심지역에 대한 영상을 획득하는 목적으로 사용되므로, 최종 영상의 해상도가 체계 성능을 좌우하는 가장 큰 요소가 된다. SAR 영상의 해상도는 SAR 센서를 통하여 형성된 최종 영상에서 근접된 두 표적을 분리하여 구분할 수 있는 최소 접근거리로 정의하며, 이는 안테나의 전자빔을 표적에 방사하여 반사된 신호를 획득하고 영상처리를 거쳐 최종 영상을 형성하는 전 과정을 포함하는 체계 전체의 성능을 의미한다. 해상도가 좋은 SAR 시스템의 경우 상대적으로 근접된 물체를 구분할 수 있으므로, 실제 표적의 형상을 보다 정확하게 관측할 수 있어서 표적 탐지/식별이 보다 용이하다.

SAR의 기본적인 원리를 이해하기 위한 위성탑재 SAR의 기하학적 위치도는 그림 2-1과 같다[1]. 여기서 실제 안테나의 빔은 고각 방향과 방위 방향으로

1) ROK-SAR는 국방과학연구소가 영국 MMS와 해외기술협력으로 수행한 위성탑재 영상레이다 프로젝트의 약칭임.

2) 본 논문에 제시된 연구결과는 ROK-SAR 프로젝트 결과중 광역감시 모드에 대한 체계 성능 분석결과임.

구분하여 정의하고 있다. 거리 해상도(δR_g)는 일반 레이다와 마찬가지로 송신파형의 대역폭과 관계가 있다. 즉

$$\delta_{R_g} = \frac{c}{2\,BW\,\sin\eta} \qquad (2\text{-}1)$$

여기서 c는 전자파 전파속도, BW는 송신펄스의 대역폭, η는 입사각이다.

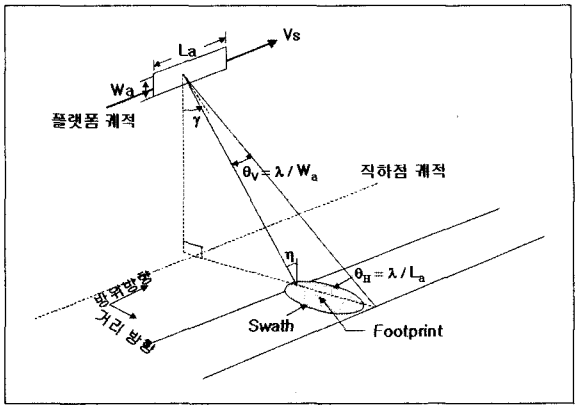
식 (2-1)에서 알 수 있듯이 거리해상도를 향상시키기 위해서는 시스템의 대역폭을 증가시켜야 한다. 시스템의 대역폭을 증가시키기 위해서는 안테나 및 송수신기의 성능을 향상시켜야 한다.

일반 레이다와는 달리 방위 해상도는 방위 방향의 수신신호를 합성하여 마치 긴 안테나에서 얻을 수 있는 SAR 영상을 획득하는 방법을 사용하므로, 합성개구면의 안테나 길이에 따라서 방위 해상도(δx)가 정해진다. 이를 수식으로 표현하면

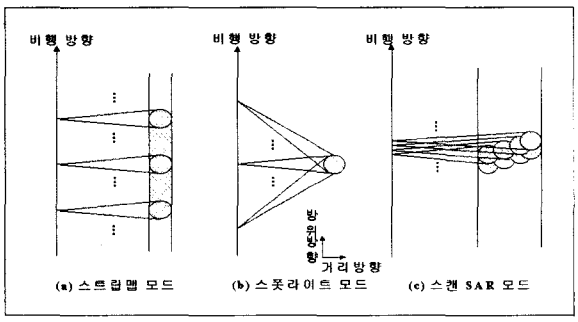
$$\delta x = \frac{\lambda}{2L_{syn}} R_s \qquad (2\text{-}2)$$

여기서 λ : 전자파의 파장

L_{syn}은 방위방향의 합성개구면 안테나의 길이, R_s는 레이다와 표적간의 경사거리를 의미한다. 방위 해상도를 좋게 하기 위해서는 L_{syn}을 크게 해야 한다. 실제 SAR 시스템을 구현함에 있어서 L_{syn}은 안테나의 크기, 빔 조향 방식 또는 빔 운용방식에 따라서 달라지며, 동일한 시스템 내에서도 영상획득 모드나 레이다와 표적간의 거리 등에 따라서 변화하게 된다. 일반적인 SAR 모드에서는 $L_{syn} = (\lambda/L_a)R_s$이므로 이를 식 (2-2)에 대입하여 정리하면 $\delta x = L_a/2$가 된다. 즉 방위 해상도는 안테나 길이의 반(1/2)이 됨을 의미한다.



[그림 2-1] 위성탑재 SAR의 기하학적 위치도



[그림 2-2] SAR 영상 획득 모드

2.2 SAR 영상 획득모드

SAR는 전자광학센서와는 달리 영상형성 방법에 따라서 다양한 영상획득 모드를 가지고 있으며, 구현된 시스템에 따라서 다르게 명명하고 있다. 일반적으로 해상도와 관측폭에 따라서는 고해상도 모드, 표준영상 모드, 광역감시 모드 등으로, 영상획득 시 사용되는 기술에 따라서 스폿라이트(spotlight) 모드, 스트립맵(stripmap) 모드, 스캔 SAR(scansar) 모드 등으로 구분하고 있다[2]. 그림 2-2는 SAR의 원시 영상자료를 획득하는 기술을 개념적으로 표현하고 있다.

스트립맵 모드는 그림 2-2(a)에서 표현된 바와 같이 위성이나 항공기에 탑재된 레이다를 플랫폼의 이동방향과 직각인 방향으로 안테나 빔을 연속적으로 주사하면서 주어진 지역에 대한 영상을 띠 모양으로 획득하는 방식으로 가장 일반적인 SAR의 영상획득 모드이다. 이 경우 관측폭은 고각방향의 안테나 빔폭에 따라서 좌우되며 최고 해상도는 레이다와 표적간의 거리에 관계없이 실제 안테나 크기의 1/2에 해당한다.

스폿라이트 모드는 스트립맵 모드에서 해상도는 안테나 크기에 의해 제한됨으로 이를 극복하기 위하여 안테나 빔을 방위방향으로 적절하게 편향하여 합성개구면 안테나의 길이를 증가함으로서 해상도를 보다 좋게 하는 방식이다. 이 모드에 대한 개념도는 그림 2-2(b)에 제시되어 있듯이 관심지역으로부터의 반사신호를 획득할 수 있도록 안테나 빔을 앞쪽으로 지향하도록 하고 이를 직각방향, 뒤쪽으로 지속적으로 지향하도록 하고 있다. 이 모드는 고해상도 영상을 획득하여 표적을 탐지하고 식별하는 용도로 주로 사용되며 안테나 빔을 관심지역에만 집중적으로 주사하므로 해상도가 좋은 영상을 얻을 수는 있으나 상대적으로 관측지역이 제한되는 단점이 있다.

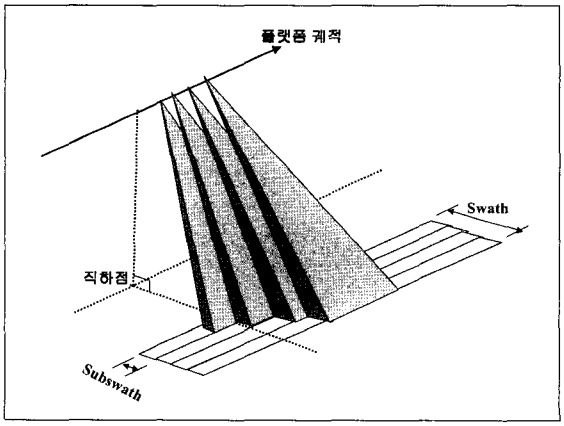
전술한 두 가지의 영상획득 모드와는 달리 주로 과학용이나 상용으로 사용되는 SAR 영상의 경우에는 상대적으로 저해상도의 광역지역을 관측할 필요가 있다. 이러한 목적으로 사용되는 모드가 스캔 SAR 모드로서 그림 2-2(c)에서 표현된 개념과 같이 동일한 안테나 빔을 여러 개로 분할하여 거리방향으로 몇 개의 지역을 순차적으로 빔을 주사하는 방식이며, 빔을 분할하는 개수에 따라서 이에 비례하여 스트립맵 모드보다는 해상도가 저하되고 관측폭은 증가된다.

지금까지 영상획득 모드에 대하여 간략하게 설명하였지만 위성탑재 또는 항공기 탑재 SAR에서는 3가지의 영상획득 모드 중에서 필요에 따라서 두 개 또는 세 개의 모드는 함께 가지고 있으며 임무 계획에 의거하여 관심지역별로 이들을 적절하게 섞어서 운용하게 된다.

2.3 스캔 SAR 모드의 원리

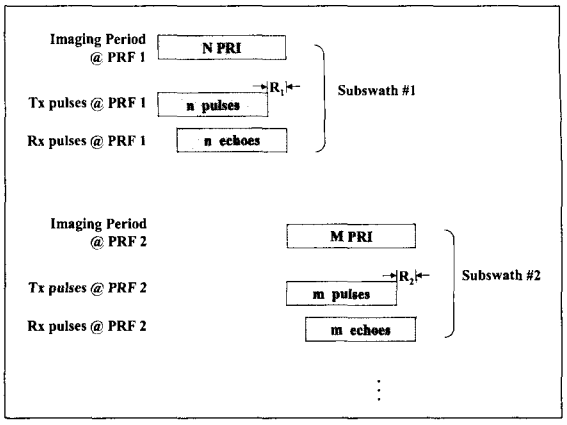
전술한 바와 같이 스캔 SAR 모드는 스트립맵 모드와는 달리 저해상도로 광역감시가 가능하며, 방위방향의 안테나 빔을 여러 개로 분할하여 관심지역을 순차적으로 빔을 조사하고 이로부터 획득된 원시자료를 합성하여 영상을 획득하는 모드이다[3]. 이러한 기본원리를 개념적으로 다시 표현하면 그림 2-3과 같으며, 이 경우에는 안테나 빔을 4개로 분할하여 스트립맵 모드보다는 약 4배정도 넓은 지역(swath)의 영상을 획득할 수 있음을 보여주고 있다. 여기서 분할한 안테나의 빔의 머무르는 지역을 subswath이라고 한다.

이와 더불어 위성탑재 SAR의 경우에는 안테나로부터 방사된 전자파는 레이다와 표적간의 거리가 항공기 탑재 SAR보다 훨신 멀어서 몇 개의 PRI(Pulse Repetition Interval)후에 되돌아오게 되며, 여기서 송



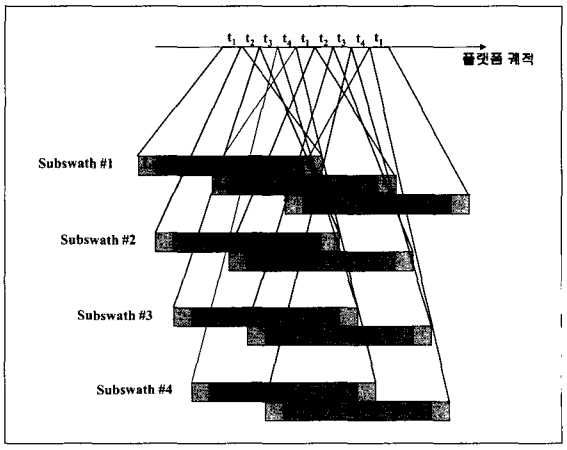
[그림 2-3] 스캔 SAR 모드의 빔 운용 개념도

신된 전자파가 되돌아오는 시간에 대한 PRI의 개수를 rank라고 하고 하며 이 시간 동안은 다음 subswath으로 변경하지 않고 기다려야 한다. 이러한 개념을 그림으로 표현하면 그림 2-4와 같으며 설계 시에는 이를 필히 고려해야 한다. 즉 subswath #1은 N개의 PRI로 구성되어 있으며, 이 중에서 n개의 송신신호를 표적을 향해 방사하게 되고 표적으로부터 반사된 신호는 일정한 시간 간격(rank)을 두고 지속적으로 n개가 되돌아오게 된다. 다음 subswath #2로 시간 간격 없이 빔을 변경할 경우 마지막으로 송신된 신호가 되돌아오기 전에 안테나 빔의 방향이 변화되어 원하는 신호를 얻지 못하게 된다. 이를 방지하기 위하여 n번째 송신된 신호가 표적으로부터 모두 되돌아 온 후에 안테나 빔을 다음 subswath으로 변경해야 함을 보여주고 있다.



[그림 2-4] PRF 변경시 송신시간 변경추이

이러한 시간 분할방식으로 빔을 운용하는 스캔 SAR 모드에서는 방위 해상도 요구조건을 만족하기 위한 최소한의 시간 동안만 안테나 빔을 주어진 subswath에 방사하게 된다. 스캔 SAR 모드에서는 방위 방향의 안테나 빔 형상에 따른 영상을 보정해 주어 반사 신호의 세기를 거의 일정하게 유지하고 신호대 잡음비의 차이를 극복하기 위하여 멀티룩(multi-look) 기능을 추가하게 된다.



[그림 2-5] 상세 빔 운용 개념 (2룩)

방위 방향으로 멀티룩(2개의 룩)을 구사한 경우의 빔 운용 개념을 도시화하면 그림 2-5와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 먼저 t_1 시간동안 subswath #1에 안테나 빔을 주사하고 다음 순간에 subswath #2, #3, #4로 순차적으로 빔을 주사한 후에 다시 t_1 시간동안 먼저 주사했던 subswath #1을 주사하게 된다. 이를 반복하여 수행함으로써 그림에서 관찰할 수 있듯이 주어진 지역을 항상 2번 영상을 얻게 된다. 이러한 방법을 사용하면 처음 룩에서 안테나 빔의 중앙에 위치한 지역을 다음 룩에서는 빔의 가장자리에 존재하게 되므로 두 개의 룩을 합쳐주면 궁극적으로 유사한 특성의 SAR 영상을 형성할 수 있다.

3. 스캔 SAR 모드 체계 설계

3.1 임무/체계 설계

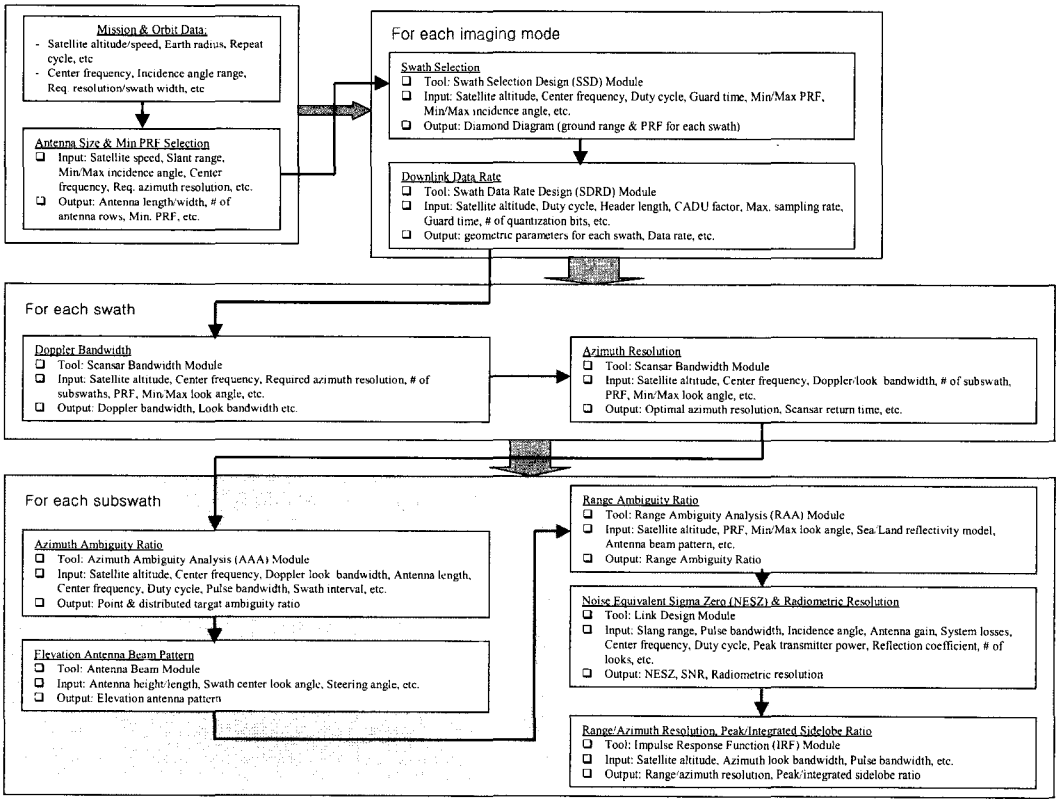
SAR의 임무/체계 설계는 대부분의 다른 시스템 설계와 마찬가지로 top-down 방식으로 이루어지며, 임무/체계 설계 요소에 관련된 여러 분야의 설계가 동

시(concurrent) 에 수행하게 된다. 그림 3-1은 SAR 의 임무/체계 설계 흐름도를 보여주고 있다. 사용자 요구조건을 토대로 기술적으로 도달해야 하는 임무/체계 요구조건을 도출하게 되고 SAR 위성의 임무 궤도를 선정하여야 한다. 선정된 궤도 자료를 이용하여 보다 구체적인 SAR 체계 설계를 수행하게 된다. SAR 체계 설계 요소는 체계 성능분석, 체계 보정 방안, 체계 조립/종합/시험평가, 구조/열 해석 등 다양한 분야를 포함하고 있으며, 각 분야별로 전문가에 의하여 설계가 동시에 이루어지게 된다. 최종 설계 결과가 기존에 선정된 임무/체계 요구조건을 만족하는지 여부를 판단하여 만족하지 못하는 경우에는 다시 부분적으로 체계 설계를 수정/보완하게 되고, 최종적으로 체계 사양/설계를 확정하게 되면 다음 순서인 부체계/모듈 설계를 계속하여 진행하게 된다.

체계 설계 중에서 체계 성능분석은 영상획득 모드별, 즉 그림 3-1에서 알 수 있듯이 스폿라이트 모드, 스트립맵 모드 및 스캔 SAR 모드 등으로 구분하여 수행되며, 각 모드별 주요 성능지수는 거리/방위 해상도 및 모호성비 분석, 방사 해상도, 자료 전송률 계산 등이 있다. 본 논문에서는 스캔 SAR 모드의 체계 성능 분석에 국한하여 설명하고자 한다.

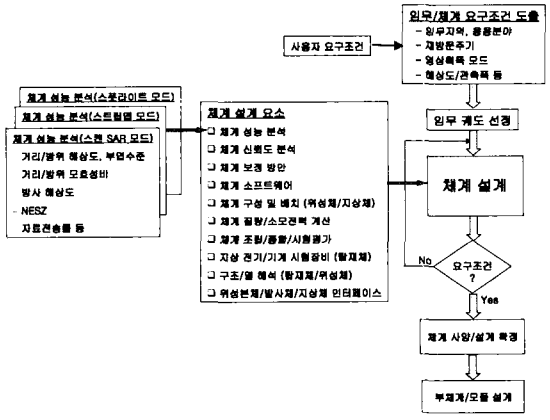
3.2 체계 설계 및 관련 성능 지수

보다 구체적으로 스캔 SAR 모드에 대한 구체적인 체계 성능분석 흐름도를 살펴보면 그림 3-2와 같다.



[그림 3-1] SAR 체계 성능분석 상세 흐름도(스캔 SAR 모드 기준)

즉 임무와 궤도 자료를 근거로 하여 체계 설계 초기 단계에서 안테나 크기 및 최소 PRF를 결정한 후 Matra Marconi Space [MMS]의 설계도구[4-5](세부 성능지수별로 별도의 Module로 구성)를 이용하여 본격적인 광역감시 모드의 체계 성능분석을 시작하게 된다. 본 모드에 대한 체계 성능분석은 먼저 입사각의 범위로 정해진 지역 내에서 스캔 SAR 모드에서 요구되는 swath 및 subswath에 해당하는 구역을 diamond diagram을 이용하여 선정하게 되며, 선정된 결과인 각 subswath마다의 지상거리와 PRF를 토대로 자료전송링크의 전송률을 계산하게 된다. 정해진 기하학적 위치에 따라서 각 swath마다 도플러 대역폭과 방위 해상도를 계산하며, 다음으로 각 subswath의 성능을 분석하게 된다. 먼저 고각방향의 안테나 빔 형상을 만들고 방위/거리 모호성비를 계산하며, 영상의 화질을 결정하여 NESZ를 산출하게 된다. 최종적으로 거리/방위 해상도 및 첨두/종합 부엽 수준을 계산하게 된다. 체계 성능분석과정에서 일부 성능이 요구조건을 만족하지 못하게 되면 설계 과정을 거슬러 올라가서 기존의 설계 결과를 수정한 뒤에 나머지 과정을 반복 수행하게 된다.



[그림 3-2] SAR 임무/체계 설계 흐름도

3.2.1 Swath 선정

위성 고도 자료와 최소 PRF 선정 결과를 기본으로 하여, 안테나 부엽에 의한 직하방향 반사신호(Nadir Return)와 송신시간 간의 간섭을 방지하는 swath 및 subswath에 대한 적절한 지상거리와 PRF를 선정하여야 한다. Swath 선정은 SSD(Swath Selection Design) Module[5]에 위성 궤도 자료, 송신주파수, guard time 및 duty factor 등을 입력하여 구해진 diamond diagram을 활용하여 설계자가 직접 구하게 된다. Diamond diagram의 송신시간 및 직하 반사신호 간섭과 관련된 사항을 수식으로 표현하면, 송신신호 간섭배제 구간은

$$\mathrm{Frac}(2R_1 f_p/c)/f_p > T_p + T_g,$$

$$\mathrm{Frac}(2R_N f_p/c)/f_p > 1/f_p - T_g \quad (3\text{-}1)$$

$$\mathrm{Int}(2R_N f_p/c) = \mathrm{Int}(2R_1 f_p/c) \quad (3\text{-}2)$$

여기서 R_1과 R_N : 레이다와 관심영역의 근지점과 원지점까지의 경사거리,

f_p : PRF,

T_p와 T_g : 송신 펄스폭과 guard time

직하 반사신호 배제 구간은

$$2H/c + j/f_p > 2R_N/c,\ j = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \pm n_h \quad (3\text{-}3)$$

$$2H/c + 2T_p + j/f_p > 2R_N/c,\ j = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \pm n_h \quad (3\text{-}4)$$

여기서 H와 n_h : 위성의 고도와 직하점까지의 거리에 해당하는 PRF 개수.

3.2.2 거리 해상도 및 자료 전송률

자료 전송률(downlink data rate)은 위성 고도 자

료, 선정된 swath/subswath 정보, 각 subswath별 해상도 요구조건과 SDRD[Swath Data Rate Design] Module[5]을 이용하여 관측범위 전부에 대하여 각 subswath별로 자료전송률을 계산하게 된다. 먼저 거리 해상도는 임무/체계 요구조건을 만족하도록 적절한 송신 대역폭은 식 (2-1)을 이용하여 선정해 주어야 한다. SAR 위성의 원시자료를 전송링크로 통해 지상으로 보내기 위한 통신 프로토콜의 형식에 따라서 자료전송률이 변화하게 된다. 수식으로 표현하면 식 (3-5)와 같으며 subswath 선정결과와 A/D변환 bit수의 함수임을 알 수 있다.

$$DR = f_p CADU\{(head + (Q\,T_{win}) f_{samp}\} \quad (3\text{-}5)$$

여기서 CADU(Channel Access Data Unit) : 통신 채널의 패킷 데이터량,

Q와 head : A/D bit수와 패킷 head의 길이,

T_{win}와 f_{samp} : 수신 window의 폭과 A/D 변환 주파수.

3.2.3 도플러 대역폭과 방위 해상도

제2.3절에서 언급한 바와 같이 빔운용 개념이 다른 영상획득 모드와는 차이가 있으므로 스캔 SAR 모드에서는 도플러 대역폭과 방위 해상도를 별도로 구해야 한다. 즉 위성 고도 자료, 선정된 subswath 정보와 Scansar Bandwidth Module[5]을 이용하여 먼저 주어진 해상도 요구조건을 만족하기 위한 도플러 대역폭을 swath마다 계산하고 이를 이용하여 방위 해상도 성능을 산출하게 된다. 도플러 대역폭 B_p 및 방위 해상도 δ_x'와 관련하여 유도된 수식은 식 (3-6)과 (3-7)로 표현되며, 각 subswath의 경사거리 (시간적으로는 rank에 해당함)와 깊은 관련이 있음을 보여주고 있다.

$$B_p = \frac{v_g\left[\sum_{k=1}^{N} R_k + 1\right]}{[(\lambda f_a / 2v_s)/[(\lambda f_a/(\delta_{ak}' 2v_s)) + 2/c]]} \quad (3\text{-}6)$$

여기서 v_s와 v_g : 위성 속도와 지상속도,

f_a : 방위 압축 시 확장계수,

R_k : 레이다와 k번째 subswath의 원지점까지의 경사거리,

δ_k' : k번째 subswath에서의 방위 해상도.

각 subswath별 방위 해상도는

$$\delta_{ak}' = \delta_{opt}\left[\frac{m\sum_{k=1}^{N} R_k}{R_N} + 1\right]\left[\frac{N_k}{N_k'}\right] \quad (3\text{-}7)$$

여기서 $\delta_{opt}(=f_a v_g / B_p)$: 최적 방위 해상도,

N_k와 N_k' : k번째 subswath의 송수신 펄스 개수.

3.2.4 방위/거리 모호성비

SAR 영상에서의 모호성은 영상의 화질과 관련된 매우 중요한 성능지수로서 강한 점표적 주위에 여러 개의 허상의 표적을 만들어서 사용자로 하여금 오판을 하게 하거나 주변의 존재하는 분산표적으로 인하여 약한 표적을 관측할 수 없도록 하는 정도를 나타낸다.

SAR의 경우 주기적으로 송수신을 번갈아 하므로 PRF의 개념이 존재하며, 안테나 빔도 일반적으로 사용하는 3dB 범위를 벗어나도 비록 이득을 떨어지지만 일정한 이득을 가지고 있어서 영상화하고자 하는 관심지역 이외의 지역에서의 반사신호가 안테나 부엽을 통하여 수신되어 원래의 신호와 합쳐지게 됨으로

써 영상의 화질을 저하하게 한다. 이러한 영상화질 저하 정도를 모호성비라고 하며, 영상형성과정에 따라서 방위 및 거리 모호성비로서 구부할 수 있다. 이를 줄여주기 위해서는 안테나의 부엽수준이 낮은 안테나를 사용해야 하며 적절한 PRF를 선정해야 한다. 즉 PRF를 높여주면 방위 모호성비를 좋아지나 이에 비례하여 거리 모호성비가 나빠지게 된다.

일반적으로 SAR 영상 획득 시스템에서는 모호성비(ambiguity ratio)에 의한 원영상과의 오차를 -18~-20dB(약 1/100) 이하가 되도록 함으로써 원영상에 미치는 영향을 최소화하도록 하고 있다. 모호성비는 방위/거리 모호성비로 나눌 수 있다.

3.2.4.1 방위 모호성비

위성 고도 자료와 swath 선정결과를 토대로 AAA [Azimuth Ambiguity Analysis] Module[5]을 이용하여 방위 모호성비를 계산한다. 이를 식으로 표현하면 식 (3-8)과 같으며, 모호성지역에 존재하는 점표적 또는 분산표적을 고려함에 따라서 각각 점표적 또는 분산표적에 대한 방위 모호성비라고 지칭한다.

$$AAR = 10\log_{10}(\sum P_A/P_T) \quad (3\text{-}8)$$

여기서

$P_T = \frac{1}{L_A} \cdot \sum_{k=1}^{L_A} \beta_k$: 점표적의 룩 에너지의 합

$P_A = \sum_{\substack{j=-N \\ j\neq 0}}^{N} \left(\frac{1}{L_A} \sum_{k=1}^{L_A} \beta_k \right)$: 모호성 지역에 존재하는 분산/점 표적 에너지 합

β_k : k번째 룩 에너지

L_A 및 N : 룩 개수 및 모호성비 계산에서 고려하는 부엽 개수

3.2.4.2 안테나 빔형상과 거리 모호성비

거리 모호성비를 계산하기 위해서는 필히 고각 방향의 안테나 빔형상을 알아야 한다. 따라서 먼저 안테나 고각 빔형상은 안테나 높이와 길이 자료 및 Elevation Antenna Beam Pattern Module[5]을 이용하여 계산되고, swath 선정결과, 안테나 빔형상, 임무지역에 대한 클러터 모델 및 RAA[Range Ambiguity Analysis] Module[5]을 이용하여 거리 모호성비를 산출한다. 거리 모호성비를 구체적인 수식으로 표현하면 식 (3-9)와 같다. 즉 거리 모호성비는 안테나의 주빔에 위치한 관심있는 분산표적에서의 수신전력과 여러 개의 안테나 부엽에서 들어오는 모호성 표적으로부터의 수신전력과의 비로서 정의된다.

$$RAR = 10\log_{10}(\sum P_A/P_T) \quad (3\text{-}9)$$

여기서 $P_T = \frac{G_{TT} \cdot G_{RT} \cdot \sigma_{0T}}{R_T^3 \sin\eta_T}$: 주빔 수신 전력

$P_A = \frac{G_{TA} \cdot G_{RA} \cdot \sigma_{0A}}{R_A^3 \sin\eta_A}$: 모호성 수신전력

G_{TT}와 G_{RT} : 표적의 송/수신 안테나 이득

G_{TA}와 G_{RA} : 모호성 송/수신 안테나 이득

σ_{0T}와 σ_{0A} : 관심/모호성 표적의 표준화된 레이다 유효 단면적

$\eta_T(\eta_A)$와 $R_T(R_A)$: 관심(모호성) 표적의 입사각 및 경사거리

3.2.5 NESZ와 방사 해상도

사용자에게 공급되는 영상의 화질을 좌우하는 주요한 체계 성능 지수중의 하나가 NESZ와 방사 해상도(radiometric resolution)이다. NESZ는 용어 자체가 의미하듯 주어진 관측거리에서 반사되는 수신신호의 크기가 수신기의 잡음과 동등하게 되는 표적의 반사

도로 정의된다. 즉 NESZ가 낮은 값일수록 반사도가 작은 표적을 탐지할 수 있어서 상대적으로 화질이 좋은 SAR 영상을 획득할 수 있음을 의미한다. 또한 SAR 영상은 관심지역에서의 해상도 범위 내에 존재하는 수많은 표적으로부터 반사된 신호가 서로 다른 랜덤위상을 가지고 합쳐짐으로 매우 거친 스펙클(speckle) 잡음이 나타나서 영상의 화질을 저하하게 된다. 이를 줄여주기 위해서는 기본적으로 시스템의 NESZ가 낮아야 하며, 영상합성과정에 멀티룩 기법을 적용해야 한다. 즉 도플러 영역에서 여러 개의 분리된 도플러 필터를 사용하여 영상을 형성하고 최종적으로 이를 평균화해줌으로서 스펙클 잡음을 줄여줄 수 있다. 다만 이 경우 해상도 저하를 감수해야 한다. 이러한 스펙클 잡음의 정도를 나타내 주는 지수가 방사해상도이다.

체계 구현과 관련된 주요 변수인 안테나 이득, 송신출력/대역폭, 시스템 손실, 임무지역에 대한 클러터 모델 및 Link Design Module[5]을 이용하여 NESZ와 방사 해상도를 계산할 수 있다. NESZ와 방사 해상도(γ)를 식으로 표현하면 식 (3-10)~(3-12)과 같다. 즉 송신되는 전자파의 전력이 크고 수신기의 감도가 좋은 수록 NESZ가 낮은 값을 가지게 되며, 동일한 NESZ 값에서도 멀티룩을 많이 하게 되면 방사해상도가 좋아짐을 알 수 있다.

$$NESZ = \frac{(4\pi)^3 R_s^3 N_f L_s L_p k T_0 B_m v_s \sin(\eta)}{P_t G_T G_R L_B^2 \lambda^3 c f_a} \quad (3\text{-}10)$$

$$SNR(\text{or NESZ margin}) = (\sigma_0 / NESZ) \quad (3\text{-}11)$$

$$\gamma = 10 \log_{10}\left\{1 + \frac{1}{\sqrt{N_L}}\left(1 + \frac{1}{SNR}\right)\right\} \quad (3\text{-}12)$$

여기서 N_f, B_m, P_t, $G_T(G_R)$: 잡음지수, 대역폭, 송신출력, 송(수)신 안테나 이득

L_s, L_p, L_B : 시스템, 지상처리, Beam shaping과 관련된 손실,

k와 T_0 : Boltzman 상수와 시스템 온도

σ_0와 N_L : 클러터 반사계수 및 멀티룩 개수

식 (3-11)의 수식은 클러터 반사 계수와 NESZ와의 비율로서 관심지역의 표적에 대한 영상의 화질인 신호대 잡음비를 나타내 준다.

3.2.6 임펄스 응답

임펄스 응답 분석은 주어진 시스템의 특성중 가장 중요한 거리/방위 해상도와 부엽수준을 분석하는 척도로 사용하는 성능 변수로서 설계 단계에서는 H/W(hardware)와 S/W(soft ware) 구현에 따른 오차(error)가 없는 이상적인 경우에서의 성능을 계산하며, 개발 단계에서는 실제적인 구현이 진행됨에 따라서 오차를 포함하여 지속적으로 성능 변화를 추적하여야 한다. 최종적으로 위성을 발사하여 우주 공간에서의 모든 환경요소를 반영한 상태에서 임펄스 응답을 측정하여 체계 성능으로 제시되어야 한다.

임펄스 응답은 관측지역에 대한 위치와 송신/도플러 대역폭, 거리/방위 가중치 및 IRF(Impulse Response Function Module)[5]을 이용하여 계산할 수 있으며, 이를 통하여 도출할 수 있는 체계 성능지수는 거리/방위 해상도, 거리/방위 첨부 부엽 수준 및 합성 부엽 수준 등이 있다.

3.2.6.1 거리/방위 해상도

SAR 탑재체의 해상도는 사용자 요구조건을 근거로 하여 각 영상획득 모드별로 정의하며, 크게 거리 해상도와 방위 해상도로 구분된다. 거리해상도는 송신파형의 대역폭과 관심지역에 대한 입사각에 따라서 달라

지며 (식 2-1 참조), 방위해상도는 방위방향의 도플러 대역폭 또는 대역폭에 해당하는 합성 개구면 안테나의 길이와 영상획득 방식에 따라서 달라진다 (식 2-2 참조). 거리/방위 해상도의 경우 전술한 시스템 변수 외에 거리/방위 방향으로 신호를 압축할 때 사용되는 가중치(weighting factor)에 따라서 변화하게 된다. 일반적으로 오차 없는(error-free) 경우의 거리/방위 압축 신호는 식 (3-13)과 같이 표현할 수 있다.

$$IRF(t) = \mathrm{sinc}(t) + [\mathrm{sinc}(t-\pi) + \mathrm{sinc}(t+\pi)] \left(\frac{1-Ham}{2 \cdot Ham}\right) \quad (3\text{-}13)$$

여기서 sinc : sinc 함수인 $\sin(\pi t)/\pi t$,

Ham : Hamming 가중치로서 부엽 수준에 따라 달리 적용.

먼저 거리 방향의 IRF 특성을 분석하기 위해서는 식 (3-13)에서 t를 디지털 형태로 변환된 식 (3-14)을 적용해야 하며,

$$t_{range}(n) = \left(\frac{\pi BW \sin(\eta)}{c}\right) n \triangle t_R \quad (3\text{-}14)$$

여기서 $\triangle t_R$: A/D 변환 시 거리 방향의 sampling 간격.

방위 방향의 IRF 특성을 분석하기 위해서는 식 (3-13)에서 t를 식 (3-15)를 적용해야 한다.

$$t_{azimuth}(m) = \left(\frac{\pi B_L}{v_g}\right) m \triangle t_A \quad (3\text{-}15)$$

여기서 B_L : 방위 방향의 룩 대역폭,

$\triangle t_A$: 디지털 변환시 방위 sampling 간격.

식 (3-14)와 식 (3-15)를 식 (3-13)에 대입하여 구한 IRF 특성을 이용하여 각 방향으로 3dB 폭을 계산하면 이 값들이 거리/방위 해상도(δR_g와 δx)에 해당한다. 이 때 각 방향의 sampling 간격을 충분히 조밀하게 함으로서 보다 정확한 해상도 값을 도출할 수 있다.

3.2.6.2 첨두/합성 부엽 수준

SAR 영상의 임펄스 응답에서의 부엽 수준(sidelobe ratio)은 영상의 화질과 밀접한 관계를 가지고 있는 중요한 요구조건이다. 부엽수준을 거리/방위 첨두(peak) 부엽 수준과 합성(integrated) 부엽수준으로 구분되며 거리/방위 방향의 압축 과정에서 사용되는 가중치 함수에 따라서 결정된다. 거리 및 방위 첨두 부엽수준은 통상적으로 거리/방위방향의 임펄스 응답의 주빔으로부터 벗어난 지점에서 20배의 거리/방위 해상도 범위 내에서 가장 큰 값으로 정의하며, 이를 수식으로 표현하면 식 (3-16)과 (3-17)에 해당한다.

$$PSLR_R = \max\left(IRF(t_{range}(n))\right) \quad (3\text{-}16)$$

여기서 n은 주빔에서 벗어난 지점에서 20배의 거리해상도 범위내

$$PSLR_A = \max\left(IRF(t_{azimuth}(m))\right) \quad (3\text{-}17)$$

여기서 m은 주빔에서 벗어난 지점에서 20배의 방위해상도 범위내

합성 부엽수준은 해상도의 2배에 해당하는 주빔에서의 임펄스 응답의 신호전력과 이들 밖에서 20배의 해상도 범위까지의 임펄스 응답 신호전력의 비로서 정의하며 식 (3-18)과 같다.

$$ISLR = \frac{(P_{out} - P_{in})}{P_{in}} \qquad (3\text{-}18)$$

여기서

$$P_{out} = \sum_{n > -\frac{10\,\delta R_g}{\Delta t_R}}^{n < +\frac{10\,\delta R_g}{\Delta t_R}} \left[\sum_{m > -\frac{10\,\delta x}{\Delta t_A}}^{m < +\frac{10\,\delta x}{\Delta t_A}} | IRF(t_r(n))\, IRF(t_a(m)) | \right]$$

$$P_{in} = \sum_{n > -\frac{\delta R_g}{\Delta t_A}}^{n < +\frac{\delta R_g}{\Delta t_A}} \left[\sum_{m > -\frac{\delta x}{\Delta t_A}}^{m < -\frac{\delta x}{\Delta t_A}} | IRF(t_r(n))\, IRF(t_a(m)) | \right]$$

4. 광역감시 모드 체계 설계 성능 분석

4.1 임무/체계 요구 조건 도출

위성 탑재 영상레이다의 임무 및 체계 설계는 제3장에서 언급한 바와 같이 Top-down 방식으로 진행되었으며, 먼저 사용자 요구조건으로부터 도출된 기술적인 사항인 일반적인 임무/체계 요구조건 도출 결과는 표 4-1과 같다.

[표 4-1] 일반적인 임무/체계 요구조건

항 목	요구 조건	기 타
운용 주파수	X 대역	
편파	수평	
임무 지역	한반도 및 주변	
재방문 주기	3일 이내	양방향 관측 기준
운용 시간	궤도당 최대 10분	
영상 획득 모드	고해상도 모드 표준 영상 모드 광역 감시 모드	스트립맵 적용 스트립맵 적용 **스캔 SAR 적용**
탑재체 질량 /소모전력	□ kg / □ kw	소형 탑재체 수준
수명	□년 이상	

보다 구체적인 체계 요구조건인 각 영상획득 모드별 요구조건에 대한 도출 결과 중에서 스캔 SAR 기술을 활용하는 광역 감시 모드에 대한 요구조건은 표 4-2와 같다. 도출된 임무/체계 요구조건은 세계적인 기술발전 추세에 부합되는 소형/경량/저가격/고성능에 해당하는 사양이며, 기본적인 설계 방향은 체계 성능면에서 기존의 대형 SAR 위성과 유사하게 하고 임무 지역과 관측폭을 상대적으로 적게 하도록 설정하였다. 즉 영상의 화질을 좌우하는 해상도, 부엽수준, 모호성비 등의 체계 성능은 대형 위성과 유사하나, 대형 위성에서 스캔 SAR 기술을 적용하는 모드의 관측폭이 수백 km인데 반하여 본 설계에서는 소형 SAR에 적합하도록 120km 정도로 설정하였다[6-7].

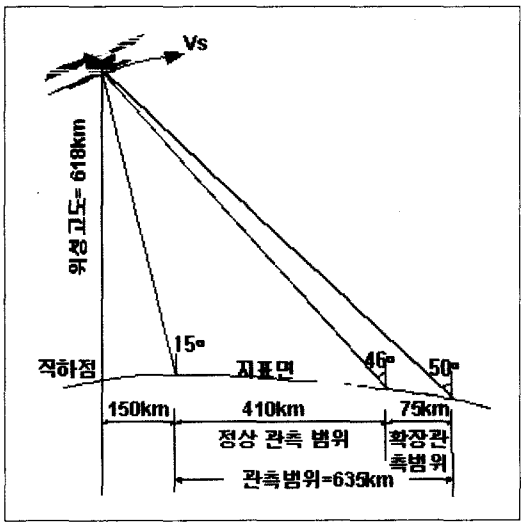
[표 4-2] 광역감시 모드 체계 요구조건

항 목	요구 조건	기 타
해상도 - 거리 - 방위	 ≤ 30 m ≤ 30 m	민군 겸용의 광역 관측에 적합
첨두 부엽수준 - 거리 - 방위	 ≤ -18 dB ≤ -18 dB	유사 장비의 성능 적용
합성 부엽수준	≤ -12 dB	〃
모호성비 - 거리 - 방위	 ≤ -18 dB ≤ -20 dB	〃
방사 해상도	≤ -2.8 dB	〃
NESZ margin	≥ 8 dB	ESA land/sea 모델 적용
관측폭	≥ 120 km	소형/경량/저가격 위성 사양
입사각 범위 - 정상 관측 범위 - 확장 관측 범위	 15° ~46° 46° ~50°	유사 장비의 성능 적용
자료 전송률	210 Mbit/sec	최신 기술 적용

4.2 임무 궤도 선정

임무/체계 요구조건 도출 결과를 토대로 Space Systems Analysis Toolset[8]을 이용하여 선정된 위성 탑재 영상레이다의 임무 궤도 선정 결과를 표 4-3에 열거되어 있으며, 소형 탑재체에 적합하도록 위성의 고도를 600km 근처로 결정하였다. 탑재체를 포함한 SAR 위성 전체의 크기를 최소화하기 위하여 태양동기, dawn-dusk 궤도를, 재방문시간은 고려하여 19일 반복주기의 14+16/19 회전/일 궤도를 임무 궤도로 선정하였다.

임무/체계 요구조건과 궤도 선정 결과를 토대로 위성탑재 SAR의 기하학적 위치도를 살펴보면 그림 4-1과 같다. 본 설계에서 고려중인 관측 범위는 크게 정상 관측 범위인 입사각 15°~46°(지상거리 150~560km) 지역과 확장 관측 범위인 46°~50°(지상거리 560~635km) 지역으로 나눌 수 있으며, 정상 관측 범위 내에서는 정상적인 체계 성능을 만족하는 영역이고 확장 관측 범위는 비록 체계 성능을 다소 떨어지지만 영상 획득이 가능한 지역으로 정의하였다.



[그림 4-1] 위성탑재 SAR의 기하학적 위치도

[표 4-3] 임무 궤도변수 선정 결과

궤도변수	변 수 값
궤도형태	태양동기 궤도, 원형궤도, Dawn-dusk 궤도
고도	610km(적도), 618 km(북위 38°)*
궤도 경사각	97. 8°
1일 회전수	14+16/19 회/일
위성 공전주기	97.03 분
위성 속력	7.541 km/s(고도 610km) 6.883 km/s(지표면 상대속력)
반복주기	19일
재방문시간	최대 3일 이내(양방향 관측시), 최대 6일 이내(우측 관측시)
상승노드시간	오후 6시
관측방향	우측(통상), 좌/우측 양방향(필요시)

4.3 체계 성능 분석 가정치

위성 탑재 SAR의 체계 성능을 분석하기 위해서는 체계 성능 분석과 관련된 기본적인 가정이 이루어져야 한다. 즉 영상 획득 모드별 체계 성능을 계산하기 위해서는 기본적인 탑재체 구현 방안, 운용환경 및 영상화하고자 하는 표적 모델 등을 가정하여야 한다. 이러한 가정은 SAR의 실제적인 운용 상황에 적합하도록 적절하게 설정하고 시스템 설계, 제작 및 시험평가 과정에서 실제 운용 상황을 고려하여 기존의 가정치를 보다 구체적으로 수정/보완되어야 한다. 표 4-4는 본 설계에서 고려중인 위성탑재 SAR의 체계 성능과 관련된 매개변수들에 대한 가정치이다. 이들 값들은 임무 궤도 선정 결과와 본 SAR 탑재체에서 추구하는 고해상도 모드의 해상도 요구조건 및 체계 H/W 구현 방식 등을 종합적으로 고려하여 선정된 결과이며,

[표 4-4] 매개변수들에 대한 가정치

	매개 변수	가정치
1	위성 고도 / 속도	618 km / 7542.3 km/s
2	지구 반경	6370 km
3	안테나 길이 / 높이	5.52 m / 0.56 m
4	안테나 열 개수	24
모든 영상 획득 모드 적용		
5	Hamming 가중치 변수	0.72
6	도플러 추적 오차	100 Hz
7	입사각 범위 - 정상 관측 범위(정상 성능) - 확장 관측 범위	 15° ~46° 46° ~50°
8	관심 표적 반사도 모델	ESA Land/ Sea 모델
9	안테나 빔 형상	Uniform illumination
10	안테나의 기계적 지향각	27.205°
11	MPM 개수	24
12	첨두 출력 / Duty Cycle	160 W / 10%
13	손실 버짓	8.94 dB
14	대기권 손실 / Beam Shaping 손실	1.96-2.92 dB / 1.8 dB
15	잡음 지수	2.5 dB
16	양자화 bit수	4+4/128 bit I and Q
17	Header 길이	256 bits
18	Guard Time	5 us
광역 감시 모드 적용		
19	Swath 개수 / Subswath 개수	4 / 4
20	Subswath 가중치	Equal
21	Subswath 폭 / 중복	40 km / 5 km
22	Swath 폭(사용자 제공)	120 km
23	최소 PRF	2667 Hz
24	송신 대역폭	To achieve 30m
25	도플러 / 룩 대역폭	2551 Hz / 318.9 Hz

체계 설계 과정에서 수 차례 변경되어 최종적으로 확정된 결과이다. 보다 구체적인 H/W의 개발과정에서 본 수치는 측정결과를 토대로 재 조정되어야 한다.

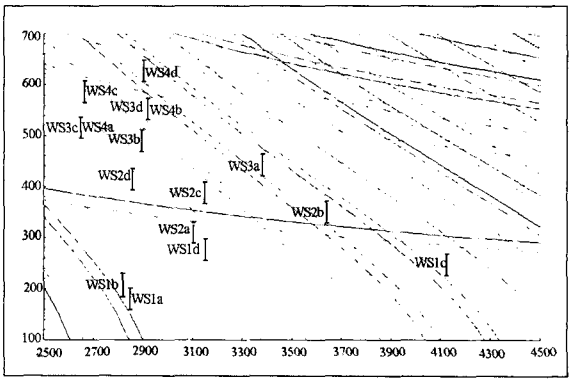
본 설계에서 고려하는 위성탑재 SAR의 주 응용분야가 지상표적 감시이므로, 표적 모델은 ESA (European Space Agency)에서 권장하는 지상표적 모델[9]을 사용하고 직하점과 근접하는 영역에서는 지상표적 모델보다 더 강한 반사특성을 가지고 있는 해상표적 모델을 혼합하여 사용하였다.

4.4 광역감시 모드 체계 성능 분석 결과

4.4.1 Swath 선정 결과

송신펄스에 의한 장애와 직하방향의 반향신호(nadir return)에 의한 영향을 받지 않는 수신 가능 지역을 선정하기 위하여 SSD Module의 출력인 diamond diagram을 활용하여 광역감시모드의 swath 및 subswath을 선정하였다. 선정된 결과는 그림 4-2에 해당한다.

본 설계에서는 접근 가능 영역의 범위인 입사각 15° ~50° 범위내의 모든 지역을 관찰할 수 있도록 swath을 선정하였다. 각 subswath의 폭은 40km로, subswath간의 중복은 위성궤도의 변화, 지상영상처리



[그림 4-2] 광역감시 모드 Swath 선정 결과

의 여유 등을 고려하여 5km로 결정하였고, swath의 폭은 4개의 subswath을 합친 140km 정도이다. 이 경우 PRF는 2667~4133Hz 범위 내에 있게 된다. Swath #4에서는 실제로 2개의 subswath만을 선정하였으며, 스캔 SAR 기술을 적용하기 위하여 swath #3에서 2개의 subswath을 중복하여 사용하므로 전체 subswath 숫자가 4개가 되도록 하였다.

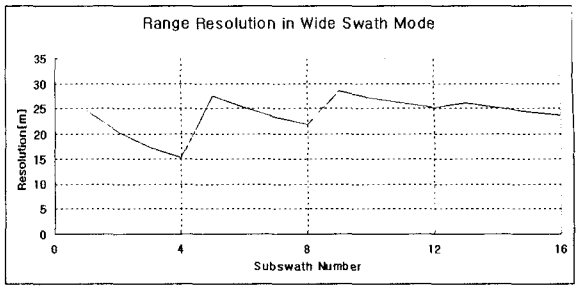
4.4.2 거리 해상도와 자료 전송률 분석

Diamond diagram에서 선정된 PRF를 근거로, SDRD Module을 이용하여 각 subswath의 거리 방향의 해상도가 30m 이하가 되도록 swath 마다 송신 신호의 대역폭을 적절하게 선정하였으며, swath내의 모든 subswath에서는 최종적으로 합성된 영상의 형태가 유사하게 되도록 동일한 대역폭을 사용하였다. 선정된 결과는 표 4-5과 같으며, 각 swath의 대역폭은 기본 대역폭인 50MHz의 1/2인 25MHz, 1/4인 12.5MHz와 9MHz로 결정하였다. 이 경우에 해상도는 15.29~28.61m 정도로서 모두 30m의 요구조건을 만족한다. 이들 결과를 그림으로 표현하면 그림 4-3(a)와 같다.

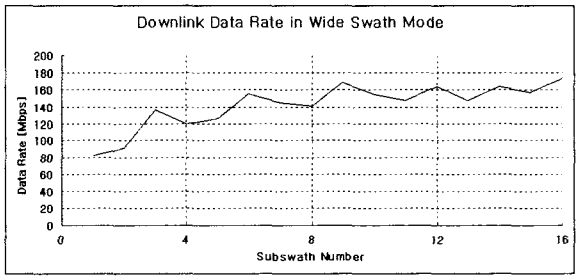
[표 4-5] 광역감시 모드의 Swath Geometry

Swath No.	Sub-swath No.	PRF	Incidence Angle [degs]		Look Angle [degs]		Slant Range [km]		Ground Range [km]		Sub-swath Width [km]	Over-lap [km]	Swath Width [km]	Sel. Pulse BW [MHz]	Ach. Range Resn [m]	Ach. Data Rate [Mbps]
			Near	Far	Near	Far	Near	Far	Near	Far						
1	1	2858	15	18.7	13.6	17	637.7	649.2	150	190	40	5	145	25	24.61	82.48
	2	2817	18.3	21.9	16.6	19.9	647.7	661.4	185	225	40	5		25	20.27	91.5
	3	4133	21.5	25	19.5	22.6	659.6	675.3	220	260	40	5		25	17.36	136.5
	4	3158	24.5	27.9	22.3	25.3	673.2	690.9	255	295	40	5		25	15.29	119.9
2	5	3083	27.5	30.7	24.9	27.8	688.6	708.1	290	330	40	5	145	12.5	27.5	126.6
	6	3667	30.3	33.4	27.4	30.1	705.5	726.7	325	365	40	5		12.5	25.14	155.8
	7	3158	33	36	29.8	32.4	723.9	746.6	360	400	40	5		12.5	23.29	145.5
	8	2858	35.6	38.4	32.1	34.5	743.7	767.7	395	435	40	5		12.5	21.81	140.5
3	9	3367	38.1	40.7	34.2	36.5	764.6	790	430	470	40	5	140	9	28.61	168.4
	10	2900	40.4	42.9	36.2	38.3	786.8	813.4	465	505	40	10		9	27.23	154
	11	2667	42.3	44.7	37.8	39.8	806.6	834.1	495	535	40	5		9	26.22	147.7
	12	2925	44.4	46.6	39.6	41.5	830.6	859.1	530	570	40	5		9	25.23	164.4
4	13	2667	42.3	44.7	37.8	39.8	806.6	834.1	495	535	40	5	145	9	26.22	147.7
	14	2925	44.4	46.6	39.6	41.5	830.6	859.1	530	570	40	5		9	25.23	164.4
	15	2683	46.3	48.5	41.3	43	855.5	885	565	605	40	5		9	24.38	156.9
	16	2925	48.2	50.3	42.8	44.5	881.2	911.5	600	640	40	5		9	23.65	172.9

* 음영부분은 swath #3와 공유하는 subswath을 의미함.



(a)



(b)

[그림 4-3] 거리 해상도(a) 및 자료 전송률(b)의 변화

위성에서 얻어진 SAR 원시자료를 지상으로 전송하기 위한 자료 전송 링크의 전송률은 주어진 송신 대역폭과 관측폭에 따라서 결정되며, 표 4-5에서 알 수 있듯이 4bit의 BAQ(Block Adaptation Quantization)의 경우에는 82.48~172.87Mbps 정도로서 본 체계 설계에서 고려중인 자료전송링크의 최대 전송속도 210Mbps이하이므로 획득된 원시자료를 모두 실시간으로 지상전송이 가능하다. 자료 전송률을 그림으로 표현한 결과는 그림 4-3(b)과 같다.

4.4.3 도플러 대역폭 및 방위 해상도 분석

4.4.3.1 도플러 대역폭 분석

광역감시 모드에서는 스캔 SAR 기술을 활용하므로 스트립맵과는 다소 다른 분석 과정이 필요하다. 즉 먼저 방위 해상도 요구조건을 만족하는 방위 방향

의 도플러 대역폭을 계산하여야 한다. 본 설계에서는 임무궤도 및 swath/subswath 선정 결과와 Scansar Bandwidth Module을 이용하여 각 swath에서의 도플러 대역폭과 룩 대역폭을 구한다. 여기서는 제2장에서 설명한 바와 같이 각 subswath에서 구한 영상이 안테나 빔의 위치에 따라서 신호대 잡음비를 달리하게 되므로 이를 보정하기 위하여 방위 방향의 2개의 멀티룩을 고려하고 있다.

전체 swath에 대한 도플러 및 룩 대역폭 계산 결과는 표 4-6과 같으며, 도플러 대역폭은 2490.39~2551.54Hz로서 방위 해상도를 일정하게 유지하기 위하여 지상거리가 증가함에 따라서 약간 증가되는 경향을 보여주고 있다. 이에 따른 룩 대역폭은 311.30~318.94Hz 범위에 있다.

4.4.3.2 방위 해상도 분석

표 4-6의 도플러 대역폭과 임무궤도 선정 결과 및 Scansar Resolution Module을 이용하여 각 subswath에 대한 방위 해상도를 구한 결과는 표 4-6에 보여 주고 있다. 방위 해상도는 29.93~29.96m로서 관련 요구조건 30m를 모두 만족함을 알 수 있다. 또 송신펄스 개수와 수신펄스 개수는 약간의 차이가 있으며 이는 subswath을 변경하기 위해서 본 subswath에서 송신될 펄스가 모두 되돌아 온 후에

[표 4-6] 광역감시 모드의 도플러 대역폭 및 방위 해상도 변화

Swath #	Subswath #	PRF	Look Angle(deg)		Doppler Bandwidth	Look Bandwidth	Imaging Period	No. of PRI	No. of echoes	Azimuth resolution	Scansar return time
			Near	Far							
1	1a/1a	2858	13.60	17.01	2490.39	311.30	0.0506	145	133	29.96	0.4154
	1b/1b	2817	16.59	19.88			0.0514	145	133	29.96	
	1c/1c	4133	19.48	22.64			0.0523	217	199	29.96	
	1d/1d	3158	22.25	25.27			0.0534	169	155	29.96	
2	2a/2a	3083	24.90	27.77	2533.20	316.65	0.0546	169	155	29.96	0.4541
	2b/2b	3667	27.42	30.13			0.0560	206	189	29.95	
	2c/2c	3158	29.80	32.27			0.0574	182	167	29.95	
	2d/2d	2858	32.06	34.48			0.0590	169	155	29.96	
3	3a/3a	3667	34.19	36.47	2545.25	318.16	0.0607	205	188	29.96	0.5059
	3b/3b	2900	36.19	38.33			0.0624	182	167	29.95	
	3c/3c	2667	37.81	39.84			0.0640	171	157	29.93	
	3d/3d	2925	39.59	41.50			0.0659	205	188	29.96	
4	3c/3c	2667	37.81	39.84	2551.54	318.94	0.0640	171	157	29.93	0.5059
	3d/3d	2925	39.59	41.50			0.0659	193	177	29.96	
	4c/4c	2683	41.27	43.05			0.0679	183	168	29.93	
	4d/4d	2925	42.83	44.50			0.0699	205	188	29.96	

다음 subswath의 송신펄스를 방사해야 하기 때문이다. Scansar return time은 방위 방향으로 2개의 룩을 구현하기 위하여 4개의 subswath을 모두 주사한 뒤에 다시 처음부터 4개의 subswath을 주사하는 방식으로 영상을 형성하기 위하여 필요한 전체 시간을 의미한다.

4.4.4 모호성비 분석

4.4.4.1 방위 모호성비 분석

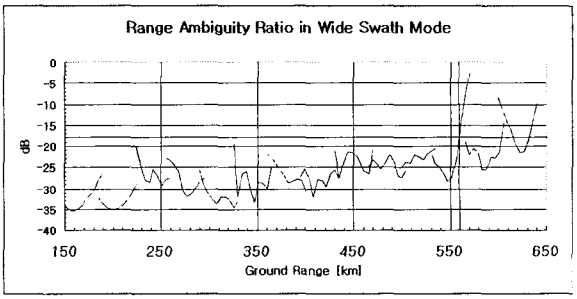
광역감시 모드의 방위 모호성비 분석은 임무궤도, 전술한 swath 선정 및 Scansar module의 출력과 AAA Module을 이용하여 계산할 수 있다. 광역감시 모드의 전체 swath에 대한 방위 모호성비 계산 결과는 표 4-7과 같다. 정상 관측범위인 입사각 15°~46°(swath #1~#3) 범위 내에서는 점표적에 대한 방위 모호성비는 -23.3~-50.1dB이고 분산표적은 -22.7~-47.6dB로서 모두 방위 모호성비 요구조건인 -20dB를 만족하고 있다.

4.4.4.2 거리 모호성비 분석

광역감시 모드의 거리 모호성비 분석은 임무궤도, 전술한 swath 선정 및 고각방향의 안테나 빔 형상과 RAA Module을 이용하여 계산할 수 있다. 광역감시 모드의 전체 swath에 대한 거리 모호성비를 그림으로 표현하면 그림 4-4와 같다. 정상 관측범위인 입사각 15°~46° 범위 내에서는 거리 모호성비는 -19.5~-35.2dB로서 관련 요구조건인 -18dB를 잘 만족함을 알 수 있다. 본 성능은 입사각이 적은 영역에서는 고각 빔 최적화 시 Taylor 가중치를 적용하고, 입사각이 큰 영역에서는 안테나 빔 최적화에 따른 이득 감소를 없애기 위하여 최적화를 하지 않은 균일(uniform) 가중치를 적용하였다.

[표 4-7] 광역감시 모드의 방위 모호성비 변화

Swath #	Subswath #	Azimuth Ambiguity Ratio[dB]	
		Point Target	Distributed Target
1	1a	-49.3	-44.5
	1b	-50.1	-47.6
	1c	-27.1	-24.0
	1d	-32.7	-29.5
2	2a	-27.8	-26.8
	2b	-26.4	-25.0
	2c	-26.7	-25.8
	2d	-29.8	-26.6
3	3a	-26.1	-25.2
	3b	-30.2	-28.1
	3c	-23.3	-22.7
	3d	-28.7	-26.4
4	4a	-25.4	-24.8
	4b	-29.8	-27.9
	4c	-23.6	-23.0
	4d	-28.6	-26.2



[그림 4-4] 거리 모호성비 변화

4.4.5 NESZ와 방사 해상도 분석

Swath 선정 결과, 안테나 이득, 송신출력, 대역폭, 경사거리 및 시스템 손실 등과 Link Design Module을 이용하여 NESZ와 방사 해상도를 계산할 수 있다.

본 설계에서는 단순 NESZ보다는 실제 표적의 반사도와의 상대적 크기인 NESZ margin(NESZ-σ_0)을 체계 성능 지수로 정의하였다.

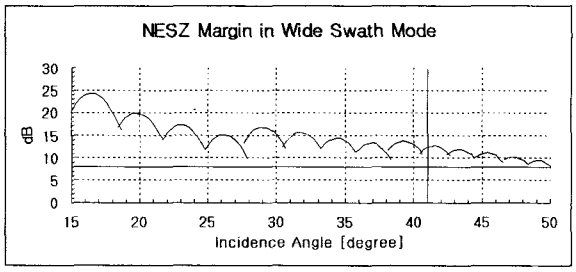
광역감시 모드에 대한 NESZ 계산 결과는 그림 4-5(a)에 나타나 있다. 정상적인 관측범위인 입사각 15°~46° 범위에서의 NESZ margin은 9.35~24.26dB 정도이며, 관련 요구조건인 8dB를 만족함을 알 수 있다.

다음은 NESZ 자체에 대하여 알아보자. 그림 4-5 (b)는 광역감시 모드의 NESZ 계산 결과를 그림으로 나타내고 있다. 정상 관측범위에서의 NESZ는 -16.94 ~-24.78dB 정도이며, subswath #1d의 가장자리를 제외한 모든 영역에서 유사 시스템의 체계 요구조건인 -18dB를 만족함을 알 수 있다. Subswath #1d에서도 안테나 빔을 좀 더 최적화하고 송신 대역폭을 해상도 요구조건과 일치하도록 최소화한다면 성능 개선이 가능하리라 여겨진다.

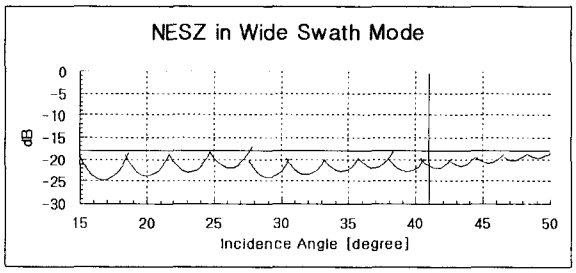
그림 4-5(a)의 NESZ margin 계산결과와 멀티룩 개수(광역감시 모드에서는 2개임) 및 Link Design Module을 이용하여 계산된 방사 해상도는 그림 4-6과 같다. 정상 관측범위에서 2.33~2.53dB로서 요구조건인 -2.8dB를 잘 만족하고 있다.

4.4.6 임펄스 응답 분석

본 과정은 설계 단계에서의 이상적인 환경 하에서의 결과만을 도출하였다. 광역감시 모드의 해상도는 거리/방위 방향에 따라서 달라지며, 특히 방위 방향으로는 일정한 해상도를 유지할 수 있으나 거리 방향은 하나의 swath내에서 비록 여러 개의 subswath이 존재하지만, 모두 동일한 대역폭을 가진 송신신호를 사용하므로 swath내에서 입사각의 변화에 따라서 거리 해상도는 달라진다.

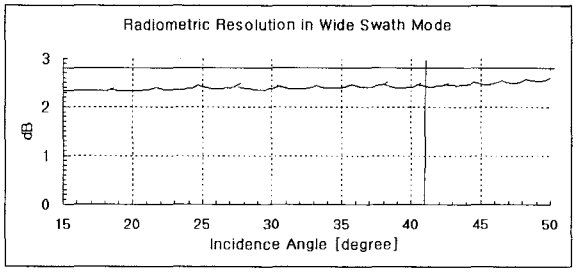


(a)



(b)

[그림 4-5] NESZ margin(a) 및 NESZ(b) 변화



[그림 4-6] 광역감시 모드의 방사 해상도 변화

광역감시 모드의 임무궤도 선정, 도플러 및 송신펄스 대역폭, 입사각, 거리/방위 가중치와 IRF Module을 이용하여 subswath #1a에 대한 임펄스 응답 출력 자료는 표 4-8에 나타나 있다. 거리/방위 해상도는 약 23m 정도이며, 첨두 부엽수준은 약 -23dB, 종합 부엽수준은 -14dB 정도로서 관련 체계 요구조건인 30m의 해상도, -18dB의 첨두 부엽수준 및 -12dB의 종합 부엽수준을 약간의 여유를 가지고 만족함을 알

[표 4-8] Swath #1a의 임펄스 응답

Error Free Impulse Response Function(Swath #1a)	
==========	
INPUT PARAMETERS:	
Earth Radius	= 6370 km
Satellite Altitude	= 618 km
Look Bandwidth	= 311.3 Hz
Pulse Bandwidth	= 25 MHz
Incidence Angle	= 14.95 deg
Range Hamming Weighting	= 0.72
Azimuth Hamming Weighting	= 0.72
OUTPUT PARAMETERS:	
Azimuth Resolution	= 22.58 m
Range Resolution	= 23.76 m
Peak Sidelobe Ratio - Azimuth	= -23.27 dB
Peak Sidelobe Ratio - Range	= -23.27 dB
Integrated Sidelobe Ratio	= -13.98 dB

수 있다. 다른 subswath에서도 비슷한 성능을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

4.4.7 광역 감시 모드 성능 요약

전술한 광역감시 모드의 체계 성능을 요약하면 표 4-9와 같다. 전반적인 성능은 임무/체계 요구조건에서 제시한 목표치를 잘 만족하고 있으며, 이러한 성능을 대형 SAR 위성의 체계 성능과 동등한 수준에 해당한다. 광역감시 모드의 체계 성능을 포함한 위성 탑재 영상레이다의 구체적인 연구결과는 참고문헌[9-13]에 자세히 언급되어 있다.

5. 맺음말

본 논문에서는 SAR의 기본원리로부터 스캔 SAR 모드의 동작 원리를 살펴보고, 다른 일반 SAR 모드와는 다른 스캔 SAR 모드의 체계 설계 과정을 각 설계 단계별로 상세히 제시하였다. 설계 과정을 보다 명확히 파악하기 위하여 설계와 관련된 수식도 포함하였다. 스캔 SAR 기술을 적용한 위성탑재 SAR 시스템의 광역감시 모드에 대한 체계 설계 결과를 임무/체계 요구조건 도출에서 임무 궤도 선정, 광역감시 모드의 체계 성능 분석 순으로 보여 주고 있다. 특히 체계 성능 분석에서는 현 단계에서 예측되는 기본적인 가정치를 근거로 하여 swath 선정, 자료전송률,

[표 4-9] 광역감시 모드의 체계 성능 요약

체계 성능 지수	광역 감시 모드	
	요구 조건	체계 성능
해상도		
- 거리	≤ 30m	16~29m
- 방위	≤ 30m	29.9m
멀티 룩 개수		
- 거리	1	1
- 방위	2	2
첨두 부엽 수준		
- 거리	≤ -18dB	-23.27dB
- 방위	≤ -18dB	-23.27dB
합성 부엽 수준	≤ -12dB	-13.98dB
모호성비		
- 거리	≤ -18dB	-19.5~-35.2dB
- 방위	≤ -20dB	- 22.7~50.1dB
방사 해상도	≤ 2.8dB	2.33~2.53dB
NEσ0 margin	≥ 8dB	9.33~24.26dB
관측폭	> 120km	135~145km
입사각 범위		
- 정상 관측 범위	15° ~46°	15° ~46°
- 확장 관측 범위	46° ~50°	46° ~50°
자료 전송률	210Mbps	89.89~74.51Mbps

도플러 대역폭, 방위/거리 해상도, 방위/거리 모호성비, NESZ와 방사 해상도, 부엽 수준 등의 체계 성능 지수별로 결과를 제시하였으며, 성능면에서 체계 요구조건을 잘 만족함을 보여 주고 있다.

따라서 본 연구결과는 체계 설계 단계에서 체계 성능을 예측하는 데 매우 유용하게 활용할 수 있다. 더 나아가서 시스템을 구현하는 과정인 개발/시험 단계나 실제 운용 단계에서 예를 들면 위성 고도, 안테나 빔 형상, 각종 손실 등의 기본적인 가정치가 변경될 수 있으므로 정확한 실측 자료를 이용하여 보다 구체적인 체계 성능 분석이 계속적으로 이루어져야 할 것으로 여겨진다.

참 고 문 헌

1. Carrara, Walter G., et al, Spotlight Synthetic Aperture Radar. Artech House Inc., 1995.
2. Curlander, J. C., McDonough R. N., Synthetic Aperture Radar: Systems & Signal Processing, Wiley Interscience Publi., 1991.
3. Scansar Principle of Operation, Matra Marconi Space UK document, 1997
4. SAR Design Tool Data Pack, Matra Marconi Space, April 1997
5. SAR System Design Tools, Matra Marconi Space, UK, 1997
6. ROK-SAR System Requirement Specification, ROK-SAR CDR Report No. 3955-KA027-RQO, ADD/MMS Feb. 1999.
7. Mission Definition and Requirement Document, ROK-SAR MDR Report No. 3955-KA001-RQZ, ADD/MMS June 1997.
8. Space Systems Analysis Tool Set, Orbit and Coverage Tool, Ver 4 User Guide, 93/TN/412, Systems Eng. and Assessment Ltd., (SEA Software)
9. System Design and Performance Baseline, ROK-SAR SDR Report No. 3955-KA014-RPD, ADD/MMS Oct. 1997.
10. System Design and Performance Document (Stage 3 Update) ROK-SAR CDR Report No. 3955-KA094-RPD, ADD/MMS, Feb. 1999
11. 이범석 외 다수, "위성탑재 영상레이다 임무 및 체계 개념설계, CESD-517-990414L, 국방과학연구소, 1998. 12.
12. 이범석 외 다수, "위성탑재 영상 레이다(ROK-SAR) 체계설계", KTRC-517-991067, 국방과학연구소, 1999. 12.
13. 곽영길, 이범석, 이상인, 황용철, "위성탑재 SAR 시스템 설계와 성능 특징", 한국군사과학기술학회지 제3권 제2호, 2000년 12월, pp101~120.