

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(4), 318-327(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.4.318

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

위성용 영상레이더 시스템 성능 분석 시뮬레이터 개발

원영진*, 이재현**

Development of System Performance Analysis Simulator for
Spaceborne Synthetic Aperture Radar

Young-Jin Won* and Jae-Hyun Lee**

KOMPSAT-6 Systems Engineering & Integration Team, Korea Aerospace Research Institute*
Department of Radio & Information Communications Engineering,
Chungnam National University**

ABSTRACT

Synthetic Aperture Radars (SARs) that can be performed regardless of weather and day-and-night conditions have been developed for Earth remote sensing in recent decades. Korea Aerospace Research Institute (KARI) has developed and launched successfully the KOrea Multi-Purpose SATellit-5 (KOMPSAT-5) which is the first Korean SAR satellite in 2013, and is currently developing the KOMPSAT-6 which is the next generation series of the SAR satellite. This paper describes the development of the system performance analysis simulator which is necessary for spaceborne SAR payload design and analysis. The system performance analysis simulator consists of the antenna pattern generation simulator, the SAR performance analysis simulator, and the image quality analysis simulator. The simulation results of this research show that this simulator can be applicable as the design and analysis tool for the spaceborne SAR payload system during the design phase.

초 록

최근 날씨와 주야 조건에 상관없이 지구 관측을 수행할 수 있는 영상레이더 탑재체가 활발하게 연구되고 있다. 한국항공우주연구원은 2013년 한국 최초의 영상레이더 위성인 다목적실용위성5호를 성공적으로 개발 및 발사하였으며 현재 영상레이더 차세대 시리즈 위성인 다목적실용위성6호를 개발하고 있다. 본 논문은 영상레이더 탑재체의 설계와 분석을 위하여 필수적인 영상레이더 탑재체 시스템 성능 분석 시뮬레이터의 개발에 관한 것이다. 시스템 성능 분석 시뮬레이터는 안테나 패턴 생성 시뮬레이터와 시스템 성능 분석 시뮬레이터, 그리고 영상 품질 분석 시뮬레이터로 이루어진다. 영상레이더시스템 성능 분석 시뮬레이터의 시뮬레이션 결과로부터 영상레이더 설계 단계에서 위성용 영상레이더 탑재체의 설계 및 분석 틀로써 적용 가능할 것으로 기대한다.

Key Words : Synthetic Aperture Radar(영상 레이더), System Performance Analysis Simulator(시스템 성능 분석 시뮬레이터)

† Received : December 26, 2016 Revised : March 15, 2017 Accepted : March 21, 2017

** Corresponding author, E-mail : jaehyun@cnu.ac.kr

I. 서 론

영상레이더(SAR) 탑재체는 기후와 밤낮에 관계없이 전천후의 영상 촬영을 가능하게 하는 탑재체로서 최근에 많은 연구 개발이 진행되고 있다. SAR 탑재체는 주로 전자적인 빔 조향에 의해 영상 촬영을 원하는 지역에 최적화된 안테나 빔 패턴을 조향하여 영상 획득 임무를 가능하게 하는 능동 위상 배열 SAR 탑재체 방식과 전기적인 빔 조향이 아닌 기계적인 조향 또는 위성의 기동을 통하여 빔 조향을 수행하여 영상 획득 임무를 수행하는 리플렉터 타입 SAR 탑재체 방식으로 주로 나뉘며 원하는 임무를 전자적인 빔 조향에 의해 신속한 임무 수행을 수행할 수 있는 능동 위상 배열 SAR 탑재체 방식이 구현의 복잡도가 증가하고 비용이 증가하는 단점이 있음에도 불구하고 많은 연구 및 위성 탑재체로 주로 적용되고 있다. 능동 위상 배열 SAR 탑재체인 X-band 주파수 대역의 능동 위상 배열 안테나(Active Phased Array Antenna)로 구성된 SAR 탑재체를 탑재한 다목적실용위성5호는 2013년 8월에 발사되어 현재 성공적으로 운영되고 있으며 [1], 한국항공우주연구원에서는 차기 SAR 위성으로 역시 능동 위상 배열 안테나를 탑재한 다목적실용위성6호를 후속으로 개발하고 있다[2]. 다목적실용위성5호에 장착된 능동 위상 배열 안테나는 기계적인 조향 없이 전자적인 빔 조향에 의하여 위성을 운영할 수 있기 때문에 다양한 탑재체 운영 모드를 가지며 시스템 성능 요구 조건을 만족하도록 설계된다[3]. 특히 SAR 시스템에서 주요한 성능 파라미터는 방사정확도(Radiometric Accuracy, RA), 관측폭(Swath Width, SW), 잡음 등가수신감도(Noise Equivalent Sigma Zero, NESZ), 모호성비(Ambiguity to Signal Ratio, ASR) 등이 있으며 모호성비는 고도각 모호성비(Range Ambiguity to Signal Ratio, RASR)와 방위각 모호성비(Azimuth Ambiguity to Signal Ratio, AASR)가 있다[3]. 이러한 SAR 시스템 성능 파라미터는 SAR 탑재체의 성능을 결정하는 중요한 구성품인 능동 위상 배열 안테나의 안테나 패턴과 밀접한 관계를 가지며 최종적으로 영상 품질과도 상관 관계를 가진다. 또한 영상 품질을 결정하는 주요한 성능 요구 조건은 공간 해상도(Spatial Resolution)와 임펄스 응답 특성(Impulse Response Function, IRF)을 통한 최대 부엽비(Peak to Side Lobe Ratio, PSLR)와 누적 부엽비(Integrated Side Lobe Ratio, ISLR) 등이 있다[4]. 이상의 능동 위상 배열 안테나의 SAR

안테나 설계와 SAR 시스템 성능 파라미터 그리고 영상 품질 파라미터는 설계 단계에서부터 서로간의 관계를 잘 고려하여 시뮬레이션 및 분석 과정을 통하여 설계에 반영되어야 한다. 따라서 향후 위성체 레벨의 선행 연구 단계에서 설계 단계까지 SAR 탑재체의 요구 사양 도출 및 성능 분석 등의 선행적인 위성체 체계종합 업무에 적용하기 위한 SAR 탑재체의 안테나 패턴 설계에서 성능 분석 그리고 영상 품질 분석까지의 전체 SAR 시스템 성능을 분석하기 위한 통합 시뮬레이터 틀에 대한 필요성이 제기되었다.

본 논문은 위성체 레벨에서 SAR 시스템의 선행 연구 단계 및 설계 단계에서 적용하기 위한 SAR 시스템 성능 분석 시뮬레이터 프로토타입 설계에 관한 것이다. 최적의 SAR 시스템 성능을 만족하기 위하여 SAR 시스템의 가장 중요한 구성품인 SAR 안테나 패턴 생성 시뮬레이터와 SAR 성능 분석 시뮬레이터, 그리고 영상 품질 분석 시뮬레이터로 구성되며 pseudo code 레벨에서 각각의 시뮬레이터 기능을 구현하였다. 다목적실용위성5호의 여러 설계 파라미터를 적용하여 검증 및 시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이터의 구현 및 시뮬레이션 결과를 분석 및 정리하였다.

II. 본 론

2.1 SAR 시스템 성능 분석 시뮬레이터

SAR 시스템 성능 분석 시뮬레이터는 Fig. 1과 같이 크게 3개의 모듈로 구성되며 안테나 패턴 생성 시뮬레이터(Antenna Pattern Generation Simulator)와 SAR 성능 분석 시뮬레이터(SAR Performance Analysis Simulator), 그리고 영상 품질 분석 시뮬레이터(Image Quality Analysis Simulator)로 구성된다.

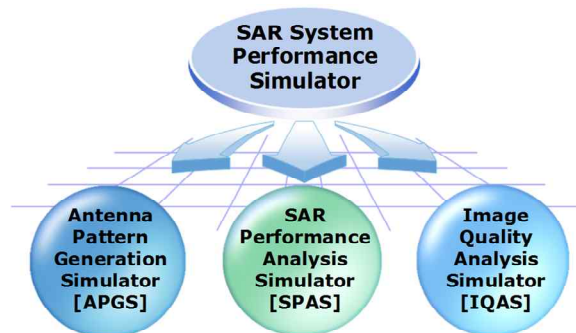


Fig. 1. SAR system performance simulator

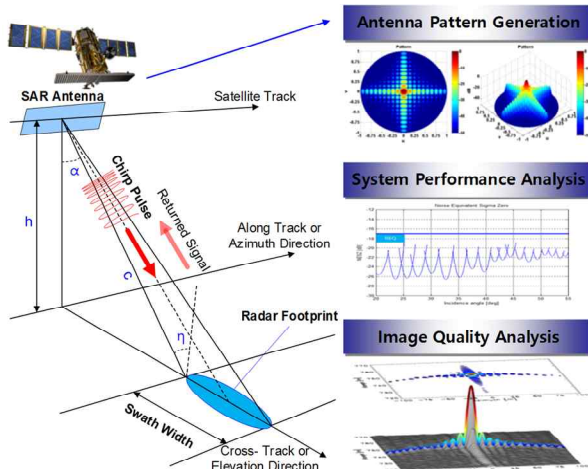


Fig. 2. Overview of SAR simulator

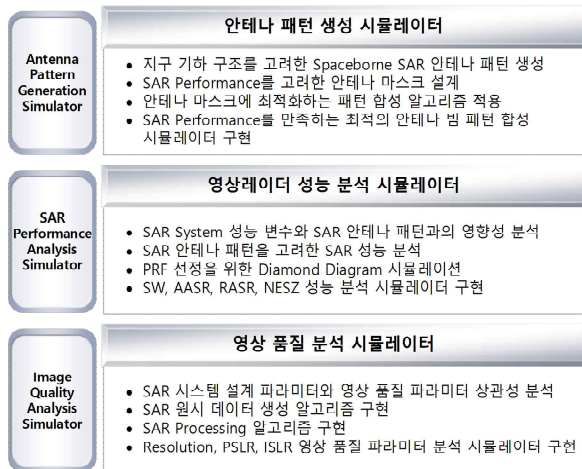


Fig. 3. Simulator description

SAR 시스템 성능 분석 시뮬레이터의 전체적인 개념은 Fig. 2와 같다. SAR 탑재체의 안테나 패턴 생성에서부터 시스템 성능 분석 그리고 영상 품질 분석까지 SAR 탑재체 시스템의 전체 성능 분석이 가능한 툴을 구현하는 것이다.

SAR 시스템 성능 분석 시뮬레이터의 각 모듈별 기능 및 구현 사항은 Fig. 3과 같다. 안테나 패턴 생성 시뮬레이터는 위상 배열 안테나의 설계 파라미터를 이용하여 실제 안테나 빔 패턴을 생성하는 시뮬레이터로서 지구 기하 구조를 고려한 위성용 SAR 안테나 패턴을 형성하고 SAR 시스템 성능을 만족하기 위한 안테나 마스크를 설계하고, 마스크를 최적화하는 패턴 합성 알고리즘을 적용하여 원하는 최적의 안테나 패턴을 설계할 수 있도록 구현하였다. 영상레이더 성능 분석 시뮬레이터는 안테나 패턴 생성 시뮬레이터를 통하여 생성된 안테나 패턴을 입력하여 SAR 시스템 성능을 분석할 수 있도록 하였으며 파라미

터 선정 단계에서 중요한 변수인 펄스 반복 주파수(Pulse Repetition Frequency, PRF)를 diamond diagram을 통하여 선정할 수 있도록 구현하였다. 최종적으로 SAR 안테나 패턴과 밀접한 관계가 있는 중요한 SAR 시스템 성능 파라미터인 SW, NESZ, RASR, AASR 등의 성능을 분석할 수 있도록 구현하였다. 영상 품질 분석 시뮬레이터는 가상의 시나리오를 기반으로 표적과 클러스터를 배치한 다음 SAR 원시 데이터를 생성하는 알고리즘을 구현하고 실제 SAR processing 알고리즘을 적용하여 영상을 획득하고 임펄스 응답 특성(IRF)을 통하여 공간 해상도와 PSLR, ISLR 등의 영상 품질 지표를 분석할 수 있도록 구현하였다.

2.2 안테나 패턴 생성 시뮬레이터

2.2.1 능동 위상 배열 안테나

능동 위상 배열 안테나 시스템은 Fig. 4와 같이 구성되며 마이크로스트립 패치나 waveguide 타입 형태의 방사 소자(Radiating Element)와 증폭기(Amplifier), 위상변위기(Phase Shifter), 감쇄기(Attenuator) 등으로 구성되는 송수신 모듈(Transmit/Receive Module)로 이루어진다[5]. 능동 위상 배열 안테나의 안테나 패턴은 방사 소자가 보통 특정 간격으로 배치되는 2차원 배열로 이루어지며, $M \times N$ 배열로 구성된 안테나의 방사 패턴은 다음 수식 (1)과 같이 방사 소자 각각의 element pattern과 전체 array factor (AF)의 곱으로 결정된다.

$$E_{Far}(\theta, \phi) = E_{Ele}(\theta, \phi) \cdot AF(\theta, \phi) \quad (1)$$

여기서 array factor는 각 방사 소자 element들의 위상과 진폭을 고려한 수식에 의해 결정되며 능동 위상 배열 안테나의 송수신 모듈의 위상변

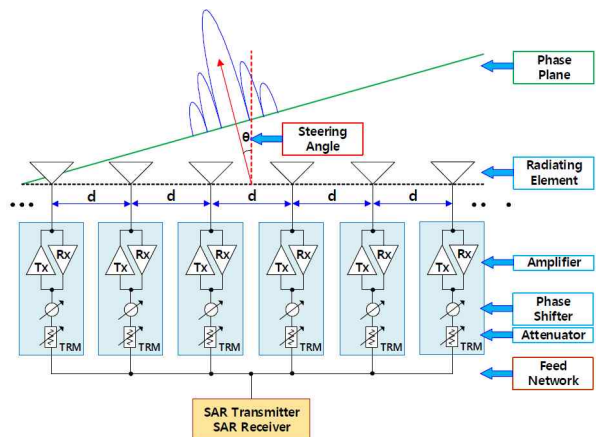


Fig. 4. Active phased array antenna system configuration

위기와 감쇄기의 위상과 진폭으로 결정되기 때문에 송수신 모듈의 위상과 진폭을 조정함으로써 원하는 안테나 패턴을 생성할 수 있다.

2.2.2 안테나 패턴과 시스템 성능 간의 관계

SAR 안테나 패턴과 SAR 시스템 성능은 밀접한 관계를 가지는데 도식화하면 Fig. 5와 같다 [6]. SAR 시스템 성능을 만족하는 안테나 패턴을 생성하기 위해서는 우선 안테나 마스크를 생성해야 하는데 SAR 시스템 성능과 안테나 패턴 간의 상관 관계를 있기 때문에 이를 고려하여 안테나 마스크를 생성해야 한다. 방사정확도(RA)는 패턴의 내부 마스크와 외부 마스크의 편평도(Flatness)가 중요하며 잡음등가수신감도(NESZ)의 경우 안테나의 지향성(Directivity)과 관련이 있으며, 관측폭(SW)의 경우 안테나의 3-dB 빔폭(Beamwidth)에 영향을 받으며 고도각 모호성(RASR)은 안테나의 부엽 레벨에 의해 결정된다. 따라서 SAR 시스템 성능을 최적화하기 위해서는 우선적으로 최적화된 안테나 마스크를 설계해야 하며 설계된 마스크에 최적화되도록 안테나의 송수신 모듈의 위상과 진폭을 조절하여 원하는 안테나 빔 패턴을 생성할 수 있다.

2.2.3 안테나 마스크와 패턴 합성 결과

안테나 마스크를 따르는 패턴이 합성되도록 최적화 알고리즘을 적용하여 안테나 패턴을 생성하였으며 그 결과는 Fig. 6과 Fig. 7, Fig. 8과 같다. Fig. 6은 Elevation 방향의 안테나 패턴이며 Fig. 7과 Fig. 8은 3D와 2D 평면상에 투영된 안테나 패턴을 각각 보여준다.

패턴 합성을 위한 최적화 알고리즘으로는 기본적인 유전알고리즘(Genetic Algorithm, GA)과 개체 군집 최적화(Particle Swarm Optimization, PSO) 기법을 적용하여 안테나 패턴을 생성할 수 있도록 구현하였다. 안테나 패턴 분석 시뮬레이터를 적용하여 SAR 시스템 성능을 고려한 안테

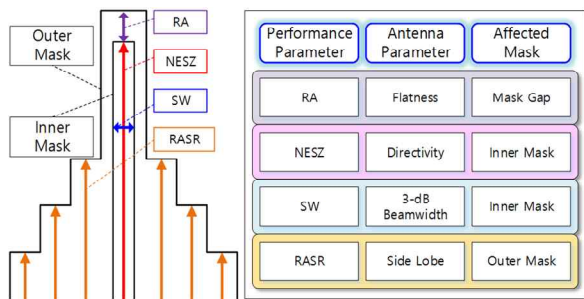


Fig. 5. Relationship between SAR system performance and antenna pattern mask

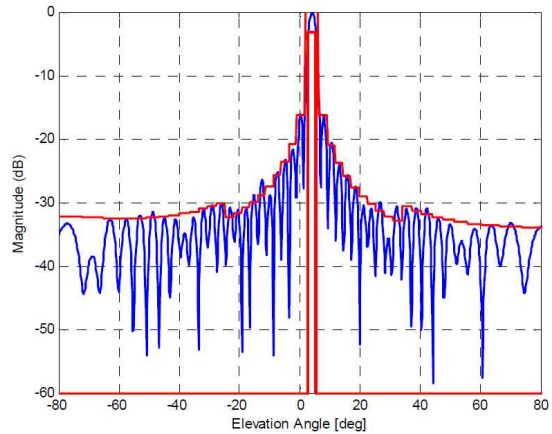


Fig. 6. Synthesized antenna pattern result

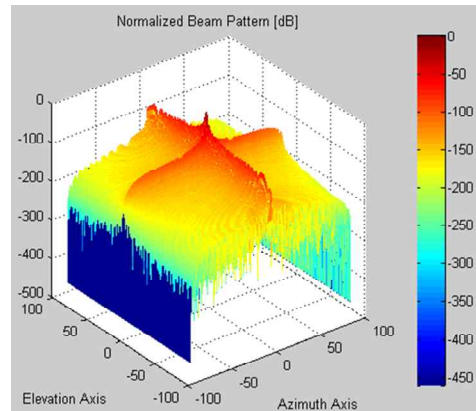


Fig. 7. 3D antenna pattern result

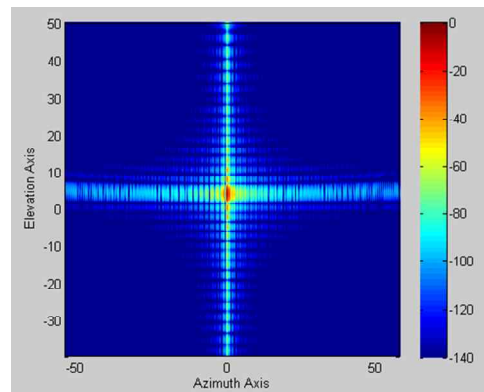


Fig. 8. 2D projected antenna pattern result

나 마스크를 생성할 수 있으며 생성된 마스크에 최적화되도록 다양한 패턴 합성 알고리즘을 적용하여 원하는 안테나 패턴을 합성할 수 있도록 구현하였으며 다목적실용위성5호의 안테나 패턴을 합성하기 위한 파라미터를 적용하여 원하는 성능의 최적화된 안테나 패턴을 생성할 수 있음을 확인하였다.

2.3 SAR 성능 분석 시뮬레이터

2.3.1 SAR 시스템 성능 파라미터

SAR 시스템의 주요한 성능 파라미터는 방사정확도(RA), 관측폭(SW), 잡음등가수신감도(NESZ), 모호성비(ASR) 등이 있으며 상세한 정의는 다음과 같다[3].

방사정확도는 SAR 시스템 장비의 특성으로 인한 통계적인 radiometric error의 정도를 나타내며, 관측폭은 고도각 방향으로의 영상 획득 지역의 거리를 의미한다. 잡음등가수신감도는 uniform target을 가정한 backscattering 값이 열잡음과 동일한 intensity의 신호를 수신할 때 zero로 가정하였을 때 주어진 SAR 시스템의 수신 감도를 나타내며 더 낮은 값을 가질수록 좋은 수신 감도를 가지게 된다. 모호성비는 고도각 또는 방위각 방향으로의 레이더 신호가 원치않는 지역인 ambiguous 영역에서의 반사되어 돌아오는 수신 신호의 mean intensity와 원하는 지역인 unambiguous 영역에서 반사되어 돌아오는 수신 신호의 mean intensity의 비로 정의된다. 따라서 잡음등가수신감도와 모호성비는 낮은 값을 가질수록 영상 품질이 좋은 특성을 나타내게 된다.

방사정확도는 일반적으로 알고 있는 레이더 반사 단면적(Radar Cross Section)과 calibration 표적으로부터 측정된 레이더 반사 단면적 사이의 절대적인 차이의 평균값으로 정의되며 calibration 상수를 사용하여 구하게 된다[7].

잡음등가수신감도는 다음 수식 (2)와 같이 표현된다[8].

$$NESZ = \frac{4 \cdot (4\pi)^3 \cdot R^3 \cdot V_s \cdot \sin\eta \cdot k \cdot T_0 \cdot NF \cdot B \cdot L_{tot}}{\lambda^3 \cdot c \cdot G_t \cdot G_r \cdot \tau \cdot P_t \cdot PRF} \quad (2)$$

여기서 R 은 위성으로부터 관측점까지의 slant range를 V_s 는 위성의 속도, η 는 입사각, k 는 Boltzmann 상수, T_0 는 등가잡음 온도, NF 는 시스템 잡음지수, B 는 신호의 대역폭, L_{tot} 는 시스템 손실, λ 는 파장, c 는 빛의 속도, G_t 는 송신 안테나 패턴 이득, G_r 은 수신 안테나 패턴 이득, τ 는 송신 펄스 길이, P_t 는 송신 전력, PRF 는 펄스 반복 주파수를 나타낸다. 수식 (2)로부터 안테나 패턴과 직접적인 상관관계가 있음을 확인할 수 있다.

모호성비는 고도각 방향의 모호성비(RASR)와 방위각 방향의 모호성비(AASR)가 있으며 고도각 모호성비는 수식 (3)과 같다.

$$RASR = \frac{\sum_{i=1}^N S_{ai}}{\sum_{i=1}^N S_i} \quad (3)$$

여기서 S_{ai} 는 고도각 방향의 잡음으로 작용하는 ambiguous 영역에서의 수신 전력을 나타내며, S_i 는 관심있는 영역인 unambiguous 영역에서의 수신 전력을 나타낸다. 그리고 i 는 데이터 recording window의 time interval 순서를 나타내며 N 은 time interval의 전체 수를 의미한다.

S_{ai} 는 수식 (4)와 같이 표현되며 S_i 는 수식 (5)와 같이 표현된다.

$$S_{ai} = \sum_{\substack{j=-n \\ j \neq 0}}^{j=n} \frac{\sigma_{ij} G_{ij}^2}{R_{ij}^3 \sin(\eta_{ij})} \quad \text{for } j \neq 0 \quad (4)$$

$$S_i = \frac{\sigma_{ij} G_{ij}^2}{R_{ij}^3 \sin(\eta_{ij})} \quad \text{for } j = 0 \quad (5)$$

여기서 j 는 pulse 수, σ_{ij} 는 주어진 입사각 η_{ij} 에서의 normalized backscatter 계수, G_{ij} 는 고도각 방향의 안테나 패턴 이득, 그리고 R_{ij} 는 위성으로부터 관측 지점까지의 slant range를 의미한다.

방위각 방향의 모호성비는 Doppler domain에서의 SAR correlator processing bandwidth (Bp) 내에서 ambiguous 신호 대 unambiguous 신호의 비로 정의되며 수식 (6)과 같다.

$$AASR = \frac{\sum_{\substack{m=-\infty \\ m \neq 0}}^{m=\infty} \int_{-B_p/2}^{B_p/2} G^2(f + mf_p) df}{\int_{-B_p/2}^{B_p/2} G^2(f) df} \quad (6)$$

여기서 B_p 는 SAR correlator azimuth processing bandwidth를 나타내며, G 는 Doppler domain에서의 방위각 방향의 안테나 패턴 이득, f_p 는 펄스 반복 주파수(PRF)를 의미한다. 따라서 수식 (3)-(6)으로부터 모호성비 역시 안테나 패턴과 수식적으로 직접 연관되어 있음을 알 수 있다.

2.3.2 SAR 시스템 성능 최적화

SAR 시스템 성능 파라미터가 안테나 패턴과 직접적인 연관 관계가 있으므로 SAR 시스템 성능을 최적화하기 위해서는 SAR 안테나 패턴 합성 결과를 피드백하여 SAR 시스템 성능 최적화 과정을 반복하여야 한다. SAR 시스템 성능 최적화를 위한 절차는 Fig. 9와 같다.

안테나 주엽 빔 폭과 방향 이득, 부엽 레벨,

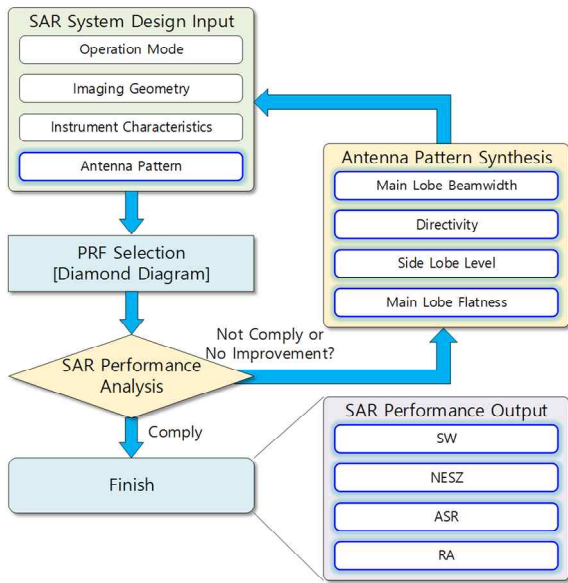


Fig. 9. Procedure of SAR performance optimization

주엽 편평도 등을 고려한 안테나 마스크를 설계하여 마스크에 최적화하도록 안테나 패턴을 생성한 다음 SAR 운영 모드, 영상 획득 기하 구조, SAR 장비의 특성, 생성된 안테나 패턴을 입력으로 하고 펄스 반복 주기를 선정한 다음 SAR 시스템 성능 분석을 수행하게 된다. 만약 성능이 요구 조건을 만족하지 못하게 되면 다시 반복적으로 안테나 패턴을 개선하여 과정을 반복적으로 수행하여 최적의 SAR 시스템 성능을 만족하도록 절차를 수행하게 된다.

2.3.3 펄스 반복 주파수(PRF) 선정

SAR 시스템 성능을 결정하는 펄스 반복 주파수는 해당 안테나 빔 패턴 별로 2가지의 중요한 event를 회피하여 선정되어야 하는데, 송신하는 동안에 수신할 수 없기 때문에 transmitter signal event가 고려되어야 하며, 위성의 직하(Nadir) 방향으로의 높은 전력의 신호가 수신되는 시간을 회피해야 하기 때문에 nadir return event가 고려되어야 한다. 이렇게 해당 event를 회피하도록 PRF를 선정하는 도표를 diamond diagram 또는 timing diagram이라고 하며 다목적실용위성5호의 펄스 반복 주파수를 선정하기 위한 diamond diagram 시뮬레이션 결과는 Fig. 10과 같으며 해당 안테나 패턴의 입사각 별로 펄스 반복 주파수를 선정하면 된다[9].

2.3.4 SAR 시스템 성능 분석 결과

SAR 성능 분석 시뮬레이터는 운영 모드, 위성 고도 등의 영상 획득 기하 구조, SAR 장비 특성,

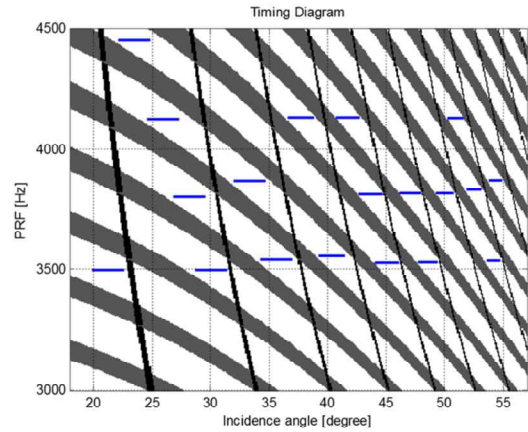


Fig. 10. Diamond diagram simulation for PRF selection

Table 1. Simulation parameters for performance optimization

| Parameter | Value |
|---------------------------------|---------|
| Frequency [GHz] | 9.66 |
| Satellite altitude [km] | 550 |
| Incidence angle [deg.] | 20 ~ 45 |
| 2 Way antenna gain (min.) [dBi] | 90 |
| Swath width [km] | 30 |
| Radiating element No. | 32 |
| Element spacing | 0.7 λ |
| RASR requirement [dB] | ≤ -17 |

SAR 안테나 패턴 등의 변수를 입력하여 관측폭, 잡음등가수신감도, 모호성비 등의 SAR 시스템 성능을 한번에 분석하여 출력할 수 있으며 다목적실용위성5호의 입력 변수를 적용 시 실제 결과와 유사함을 비교 분석하였다.

SAR 시스템 성능 분석 시뮬레이터의 검증 해석을 위한 시뮬레이션 입력 파라미터는 Table 1과 같다.

SAR 성능 분석 시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션한 관측폭 결과는 Table 2와 같으며 잡음등가수신감도와 고도각 모호성비와 방위각 모호성비는 각각 Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13과 같다.

관측폭과 잡음등가수신감도, 고도각과 방위각 모호성비는 각각 Table 3과 같이 성능 요구 조건을 설정하고 안테나 패턴 합성 및 시스템 성능 분석을 수행하였다[9].

시스템 성능 분석 결과 입사각 45도 이상의 extended access 영역에서 일부 고도각 모호성비(RASR)의 결과가 요구 조건을 만족하지 못하는

안테나 패턴 생성 시뮬레이터와 SAR 성능 분석 시뮬레이터를 사용하여 SAR 성능 요구 조건을 개선하는 최적의 안테나 패턴을 생성할 수 있으

며 다목적실용위성5호를 이용한 검증을 수행한 결과는 다음과 같다[10]. 고도각 방향 모호성비를 개선하기 위하여 유전알고리즘과 개체 군집 최적화 기법을 적용하여 합성한 안테나 패턴은 Fig. 14와 같으며 개선된 고도각 모호성비 결과는 Fig. 15와 같다. 고도각 모호성비는 26.3도 이상의 입사각에서는 약간 열화되지만 전체적인 평균값은 상당히 개선됨을 확인할 수 있다. 따라서

Table 2. Performance analysis result of SW

| Swath No. | Incident Angle | | | Swath Width [km] |
|-----------|----------------|-------|-------|------------------|
| | Near | Mid | Far | |
| 1 | 19.00 | 20.65 | 22.31 | 32.882 |
| 2 | 22.19 | 23.69 | 25.19 | 30.970 |
| 3 | 24.20 | 25.69 | 27.19 | 31.700 |
| 4 | 26.30 | 27.80 | 29.29 | 32.775 |
| 5 | 28.85 | 30.20 | 31.55 | 30.700 |
| 6 | 31.36 | 32.78 | 34.20 | 33.875 |
| 7 | 34.00 | 35.30 | 36.60 | 32.666 |
| 8 | 36.40 | 37.55 | 38.70 | 30.316 |
| 9 | 38.60 | 39.79 | 40.99 | 33.106 |
| 10 | 40.80 | 41.70 | 42.59 | 26.068 |
| 11 | 42.16 | 43.15 | 44.14 | 29.839 |
| 12 | 43.55 | 44.53 | 45.51 | 30.680 |
| 13 | 45.38 | 46.25 | 47.12 | 28.527 |
| 14 | 47.00 | 47.87 | 48.75 | 30.184 |
| 15 | 48.69 | 49.46 | 50.24 | 28.099 |
| 16 | 50.21 | 50.86 | 51.51 | 24.625 |
| 17 | 51.46 | 52.15 | 52.84 | 27.228 |
| 18 | 52.81 | 53.55 | 54.29 | 30.683 |
| 19 | 54.00 | 54.58 | 55.16 | 25.035 |

Table 3. SAR performance requirement

| Performance Parameter | Requirement |
|-----------------------|--|
| SW | ≥ 30 km @ 45 Incidence Angle |
| NESZ | ≤ -17 dB @ Nominal Access Region |
| RASR | ≤ -17 dB @ Nominal Access Region |
| AASR | ≤ -17 dB @ Nominal Access Region |

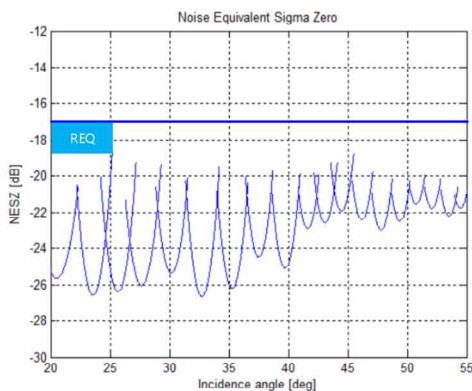


Fig. 11. Performance analysis result of NESZ

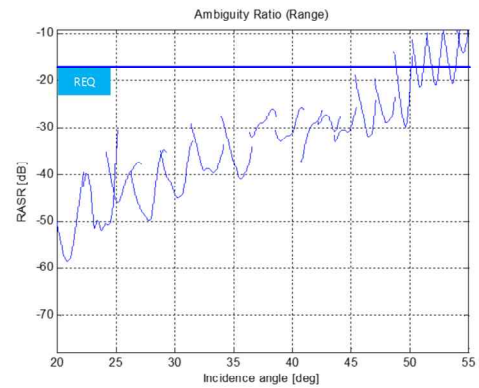


Fig. 12. Performance analysis result of RASR

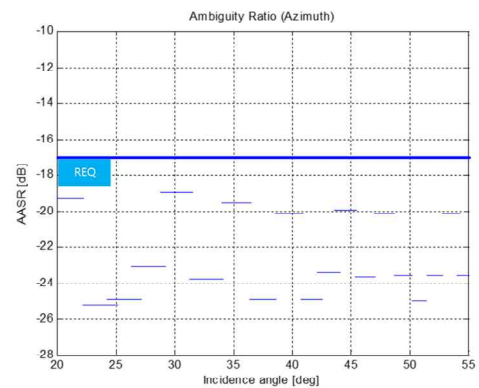


Fig. 13. Performance analysis result of AASR

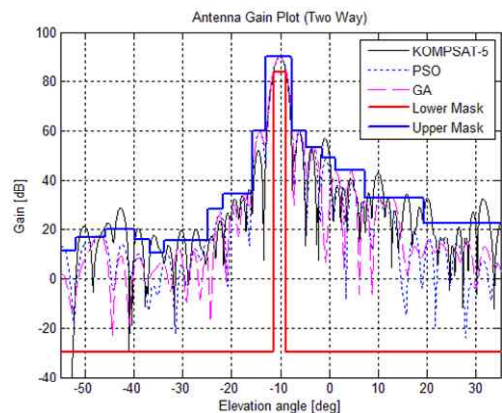


Fig. 14. Antenna pattern optimization

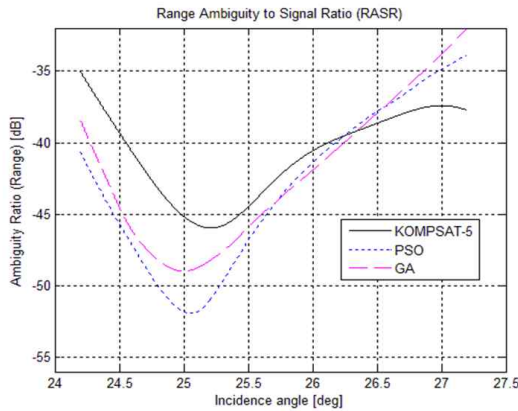


Fig. 15. Performance improvement of RASR

PSO와 GA 둘 다 마스크를 따르는 안테나 패턴을 효과적으로 생성하는 것을 확인할 수 있다.

2.4 영상 품질 분석 시뮬레이터

2.4.1 영상 품질 파라미터

SAR 영상 품질 분석은 SAR 시스템 성능을 최종적으로 확인하기 위한 중요한 단계이다.

그러나 SAR 영상의 품질을 정량적으로 분석하기 위해서는 여러 가지 고려 사항이 많으며 복잡한 과정이다. 따라서 본 SAR 시스템 성능 분석 시뮬레이터에서는 점표적(Singe Point Target)에 대한 영상의 분석에 초점을 맞추고 구현을 수행하였다.

우선 점표적의 SAR 영상 품질을 정량화하기 위한 파라미터는 공간 해상도(Spatial Resolution)와 최대 부엽비(PSLR), 누적 부엽비(ISLR) 등이 있으며 Fig. 16과 같이 임펄스 응답 특성을 통하여 분석이 가능하다. 점표적에 대한 SAR 시스템의 응답 특성을 임펄스 응답 특성(IRF)이라고 하며, 공간 해상도는 SAR 영상의 임펄스 응답에서 주엽의 최대치에서 3 dB 낮은 지점의 폭을 나타낸다. 그리고 최대 부엽비(PSLR)는 주엽의 peak intensity와 부엽(Side Lobe)의 peak intensity의

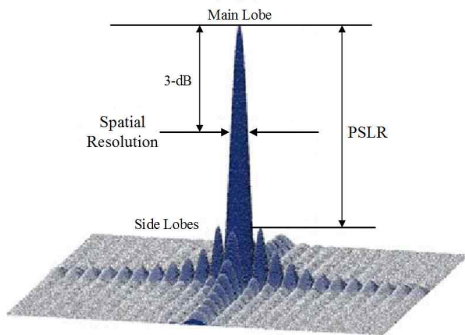


Fig. 16. Impulse response function

Table 4. Simulation parameters for raw data signal generation

| Parameter | Value |
|-----------------------------|--------|
| Satellite altitude [km] | 550 |
| Platform velocity [m/s] | 7585 |
| Operating frequency [GHz] | 9.66 |
| Pulse width [us] | 48.92 |
| Chirp Bandwidth [MHz] | 66.45 |
| PRF [Hz] | 4088 |
| Data acquisition time [sec] | 0.68 |
| Antenna look angle [deg.] | 34.129 |
| Elevation beamwidth [deg.] | 2.39 |
| Azimuth beamwidth [deg.] | 0.35 |

비로서 정의되며 최대 부엽비는 낮으면 낮을수록 인접한 표적에 의한 영향을 줄일 수 있으므로 성능이 좋아진다. 또한 windowing 기법을 통하여 최대 부엽비를 개선할 수 있지만 공간 해상도의 성능 저하가 동반되므로 적절한 trade-off가 필요하다. 누적 부엽비(ISLR)는 주엽의 최대 전력(또는 에너지) 대비 임의의 영역 내에 있는 부엽 레벨의 전체 전력 값을 누적한 비를 나타낸다 [4, 11].

2.4.2 원시 데이터 생성

SAR 영상 품질은 IRF 특성을 분석함으로써 평가할 수 있으며 현재 운용 중인 시스템은 지상의 코너 리플렉터나 능동형 트랜스폰더 등으로부터 획득된 점표적 영상으로부터 IRF의 추출이 가능하지만, 설계 단계에서는 SAR 시스템의 점표적 원시 데이터(Raw Data)의 모델링과 시뮬레이션으로부터 영상품질을 분석할 수 있다[12].

따라서 본 시뮬레이터의 목적이 설계 개발 단계에서의 적용이므로 탑재체와 플랫폼의 설계 파라미터와 궤도 요소 등의 여러 입력 파라미터들을 기초하여 점표적 원시 데이터를 생성하고 시뮬레이션 할 수 있도록 구현하였다. 원시 데이터 생성을 위한 주요한 파라미터의 입력값은 Table 4와 같다.

2.4.3 SAR 데이터 프로세싱

영상 품질 분석 시뮬레이터 구현을 위하여 SAR 프로세싱 알고리즘으로는 Range Doppler Algorithm(RDA)과 Chirp Scaling Algorithm(CSA), 그리고 Omega-K Algorithm(OKA)을 적용하여 구현하였다[13].

생성된 원시 데이터는 Fig. 17과 같으며 CSA

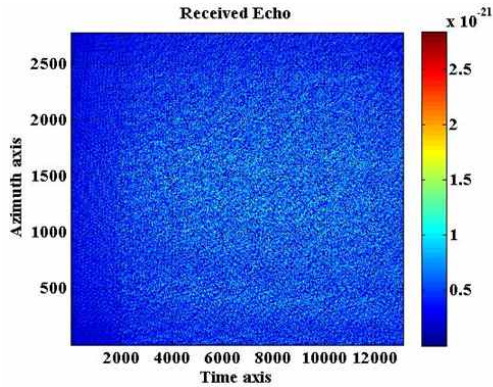


Fig. 17. Raw data generation result

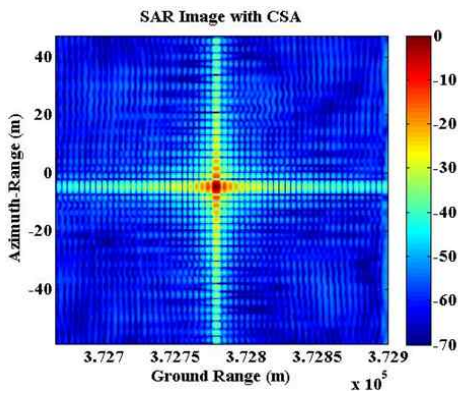


Fig. 18. Impulse response function result

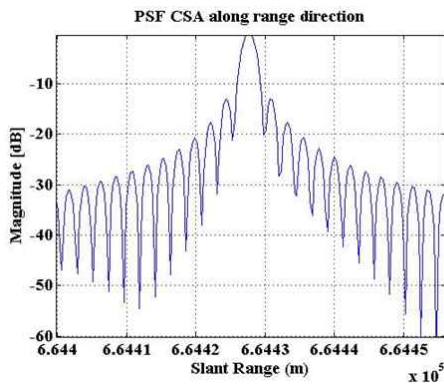


Fig. 19. Elevation impulse response function

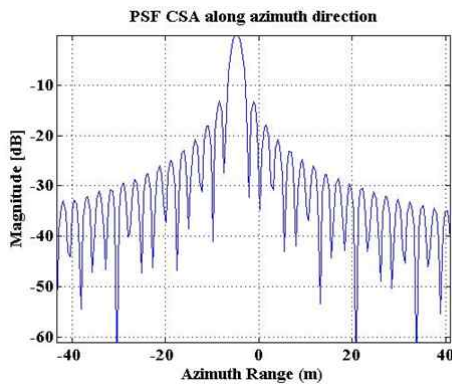


Fig. 20. Azimuth impulse response function

Table 5. Summary of image quality analysis

| Parameter | Range IRF | Azimuth IRF |
|------------|-----------|-------------|
| Resolution | 2.00 | 2.24 |
| PSLR | -12.89 | -13.27 |
| ISLR | -9.62 | -10.00 |

SAR 프로세싱 알고리즘을 적용하여 생성된 점포적 임펄스 응답 특성은 Fig. 18과 같다. 또한 고도각 방향과 방위각 방향의 임펄스 응답 특성은 Fig. 19와 Fig. 20과 같으며 영상 품질 분석 결과를 요약하면 Table 5와 같다. Windowing과 같은 기법을 적용했을 경우의 공간 해상도의 요구 조건은 3m이고, PSLR과 ISLR의 요구 조건은 각각 -19 dB와 -13 dB이지만, windowing을 적용하지 않은 실제적인 시뮬레이션 조건의 결과로는 이론적인 값과 유사한 값이므로 문제없음을 확인하였다.

SAR 영상 품질 분석 시뮬레이터는 입력 파라미터를 고려하여 원시 데이터를 생성하고 다양한 SAR 프로세싱 알고리즘을 적용하여 공간해상도, PSLR, ISLR 등의 영상 품질을 분석할 수 있음을 다목적실용위성5호 결과를 통하여 검증하였다.

III. 결 론

본 연구에서는 위성체 레벨에서 SAR 탑재체의 요구 사양을 도출하기 위한 선행 연구 단계 또는 초기 설계 단계에서 적용하기 위한 위성용 SAR 시스템의 성능 분석 시뮬레이터 개발에 대하여 기술하였다.

SAR 시스템 성능 분석 시뮬레이터는 SAR 시스템 성능 파라미터와 직접적인 관련을 가지는 능동 위상 배열 안테나의 패턴 설계를 위한 안테나 패턴 생성 시뮬레이터와 시스템 성능을 분석하기 위한 SAR 성능 분석 시뮬레이터, 그리고 영상 품질을 분석하기 위한 영상 품질 분석 시뮬레이터로 구성되었다. 본 시뮬레이터를 이용하여 SAR 탑재체의 성능 요구 조건을 만족하기 위한 최적의 설계를 수행하도록, 가장 중요한 설계 구성품인 SAR 안테나의 설계에서부터 시스템 성능 분석, 그리고 영상 품질 분석까지의 SAR 탑재체 개발 전반의 full chain의 설계 및 분석을 선행 연구 단계 또는 초기 설계 단계에서 미리 수행해 볼 수 있는 시뮬레이터를 구현했다는 것에 의미를 가질 수 있을 것으로 판단된다.

현재 MATLAB을 이용한 pseudo code 레벨에

서 시뮬레이터의 구현이 완료된 상태이며 추후 프로토타입으로 개발된 본 시뮬레이터의 GUI 구축 및 알고리즘 보완 등의 과정을 거쳐서 좀 더 시뮬레이터의 완성도를 높일 예정이다. 현재까지 주로 다목적실용위성5호의 설계 결과를 적용하여 검증은 수행하였으며, 설계 보완 및 완성도를 높인다면 향후 다목적실용위성6호 설계에 활용 또는 차세대 SAR 위성의 예비 설계 검증 툴로써 활용 가능할 것으로 기대한다.

References

- 1) Sang-Ryool Lee, "Overview of KOMPSAT-5 Program, Mission, and System," *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE*, 2010, pp.797-800.
- 2) Sun-Ho Lee, et al., "KOMPSAT-6 Mission, Operation Concept, and System Design," *European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2016, pp.161-164.
- 3) J. C. Curlander and R. N. McDonough, *Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing*, John Wiley & Sons, 1991.
- 4) A. Martinez, et al., "SAR Image Quality Assessment," *Revista de Teledeteccion*, No. 2, 1993.
- 5) Robert J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Artech House, 2005.
- 6) S. H. Lim, et al., "Azimuth Beam Pattern Synthesis for Airborne SAR System Optimization," *Progress In Electromagnetic Research*, Vol. 106, 2010, pp.295-309.
- 7) H. Laur, et al., "ERS-1 SAR Radiometric Calibration," *SAR Calibration Workshop, ESA WPP-048*, 1993.
- 8) S. Y. Kim, et al., "Antenna Mask Design for SAR Performance Optimization," *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, Vol. 6, No. 3, 2009, pp.443-337.
- 9) Young-Jin Won, et al., "System Performance Analysis for Next Generation SAR Satellite," *Conference of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2015.
- 10) Young-Jin Won, et al., "Spaceborne SAR Performance Improvement By Antenna Pattern Optimization," *International Symposium on Antennas and Propagation*, 2016.
- 11) Tae-Bong Oh, et al., "Development of SAR Image Quality Performance Analysis Tool for High Resolution Spaceborne Synthetic Aperture Radar," *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 38, No. 2, 2010, pp.188-194.
- 12) Chul-Ho Jung, et al., "SAR Image Impulse Response Analysis in Real Clutter Background," *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, No. 2, 2008, pp.99-106.
- 13) Ian G. Cumming and Frank H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Artech House, 2005.