

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.5.169>
JIIBC 2019-5-24

초소형위성 SAR 탑재체 운용모드 설계 및 성능분석

Operation Mode Design and Performance Analysis for Small Satellite SAR Payload

박종민*, 김동식, 김완식, 김종필

Jongmin Park*, Dongsik Kim, Wansik Kim, Jongpil Kim

요약 본 논문에서는 SAR 탑재체의 운용모드 설계방안 및 설계결과 그리고 주요성능에 대한 분석 결과를 제시하였다. SAR 시스템 설계는 요구사항을 만족하는 주요변수의 설계값 도출로 진행된다. 저궤도에서 운용하는 100kg 미만의 초소형위성을 가정하고 고해상의 영상을 위하여 X-대역의 주파수를 선정하였다. 주어진 설계 요구사항을 반영하여 주파수 대역폭, 관측영역 설계, 안테나 설계를 진행하고, 설계결과를 반영하여 목표 영상품질인 NESZ 만족여부를 확인하였다. 또한 설계값을 반영하여 관측영역별로 최적의 PRF를 설계하였다. 또한 소형, 경량화를 위한 안테나 형태를 제안하였다. 또한 설계된 변수를 적용하여 체계성능을 확인하였다.

Abstract In this paper, SAR payload operation mode design method, results and performance analysis results are suggested. To SAR payload design, primary parameter should be identified and designed. It is designed considering the small satellite of less than 100kg operated in low earth orbit. Also, an antenna structure for small size and light weight is proposed. Performance analysis is performed by applying the design values.

Key Words : Payload design, Performance analysis, Small satellite

1. 서 론

영상레이다(Synthetic Aperture Radar)는 안테나를 이용하여 전자기파를 방사하고 목표물을 통해서 반사되는 신호를 수신하여 영상을 획득하는 시스템이다. 전자기파의 가장 큰 특성으로 대기 중의 수증기나 구름, 먼지, 강우 등의 기상상태와 태양의 고도, 즉 밤낮에 관계없이 영상을 얻을 수 있어서 군사용 및 과학, 상업용으로 널리 사용된다. 주로 위성 및 항공기에 탑재하여 지구관측 및 군사용의 감시정찰에 활용된다. SAR위성은 무게에 따라

표 1과 같이 분류된다. 기존의 위성 SAR는 개발기간이 길고, 대형의 고가 위성이 개발되었다. 그러나 1990년대 이후, 발사비용이 낮아지고 SAR 기술의 발전과 부품 및 재료의 발전으로 더 빠르고 싸면서 고성능의 개발전략 아래, 소형/초소형위성 개발이 활발하게 진행되고 있다 [1]-[6].

본 논문에서는 최근 활발하게 개발이 진행되고 있는 저궤도의 소형/초소형위성이 고해상도 영상획득이 가능한 SAR 탑재체의 설계 연구결과를 제시한다. 주어진 임무 요구조건을 바탕으로 해상도, 입사각, 탐지폭등의 요

*정회원, LIGNEX1 감시정찰연구소
접수일자 2019년 9월 3일, 수정완료 2019년 10월 3일
게재확정일자 2019년 10월 4일

Received: 3 September, 2019 / Revised: 3 October, 2019 /
Accepted: 4 October, 2019

*Corresponding Author: jongmin.park@lignex1.com
Suveillance reconnaissance Lab. LIGNEX1, Korea

구조조건과 영상품질을 나타내는 NESZ의 요구조건을 만족하는 설계 방안에 대하여 설명하고, 표준영상모드에 대한 설계결과 및 성능분석결과를 제시한다.

표 1. 무게에 따른 위성 분류

Table 1. The classification of the satellite in weight

무게(kg)	위성명
0.1 ~ 1	피코 위성
1 ~ 10	나노 위성
10 ~ 100	마이크로 위성
100 ~ 500	소형 위성
500 ~ 1000	중형 위성
1000이상	대형 위성

II. SAR 탑재체 설계방안

SAR 탑재체의 체계설계는 위성체, 발사체, 지상체 등의 전체 위성 체계 구성요소를 고려하고 위성의 개발, 발사, 운용을 포함하여 전체 비용과 성능을 결정하여야 한다. SAR 탑재체 설계를 위해서는 우선 사용자의 요구사항이 정의되어야 한다. 이에 따라 Top-Down 방식으로 위성체의 요구사항이 결정되고 이를 만족하기 위한 탑재체의 요구사항이 도출된다. 초소형 SAR위성의 경우 100kg이하의 무게를 만족하여야 한다. 위성의 궤도는 탑재체의 출력전력 및 무게의 제한과 고해상의 영상획득을 고려하여 저궤도로 설정하였다. 운용 주파수 또한 고해상도를 획득하기 위한 대역폭을 고려하여 X-대역을 선택하였다. 운용모드는 기계적 또는 전기적 빔조향이 필요 없는 표준영상모드로 설정하였다. SAR 시스템 설계 시 주요 요구사항은 표 2와 같다.

표 2. SAR 시스템 설계 요구사항

Table 2. SAR system design requirements

parameter	value
고도	약 500km
입사각	20 ~ 40도
해상도	1m
운용주파수	X-대역
운용모드	표준영상모드
NESZ	-15dB이하
탐지폭	5km

다음과 같은 요구사항을 바탕으로 하부장비의 성능 (PRF, duty, Noise figure, loss, 송신출력, etc)의 한계

를 고려하여 탑재체의 설계진행한다. 우선 고도, 입사각을 고려하여 탐지폭을 만족하는 안테나의 최소 빔폭 및 NESZ를 만족시키는 안테나의 최소 Directivity를 도출한다. 또한 위성체의 무게 및 크기를 고려하여 안테나의 형태 및 크기를 결정한다. 초소형위성의 무게 및 크기의 제약을 고려하여 안테나의 형태는 mesh형태의 전개형 반사판 안테나를 가정하였다. mesh형태로 초경량의 특성을 가지며 전개형 특성은 발사 시 접어서 크기의 제한을 극복하고 운용 궤도에서는 전개하여 넓은 면적을 가지는 안테나의 구현이 가능하다. 이를 통해 높은 Directivity를 가지는 안테나 구현이 가능하다.

위성의 고도와 입사각에 따른 기하학적 조건은 그림 1과 같다. 지구의 반경과 탐지폭 규격에 따라 ξ 의 범위가 결정되고, 고도와 입사각에 따라 직거리(R_s)가 결정된다. 이를 고려하여 안테나의 HPBW가 결정된다.

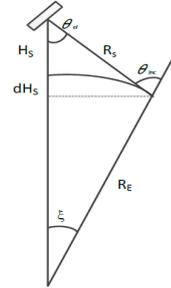


그림 1. 기하학 변수

Fig. 1. Geometric parameter

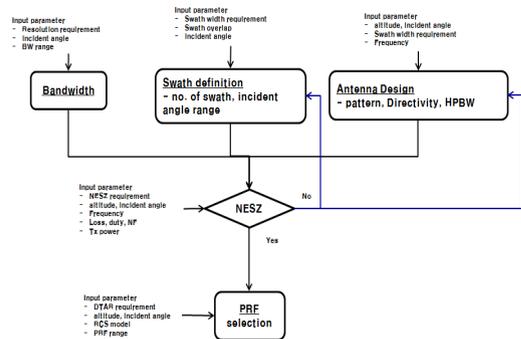


그림 2. SAR 시스템 설계 과정

Fig. 2. SAR system design process

시스템의 주요 설계변수인 주파수 대역폭, swath 정의, 안테나 설계, PRF선택 및 SAR의 품질을 나타내는 NESZ와 DTAR의 처리과정은 그림2와 같다. 각 주요 설계변수를 결정하기 위한 입력변수들을 고려하여 각 설계 변수들을 결정하고 이를 적용하여 NESZ 성능의 요구구

격 만족여부를 판단한다. 불만족시 주요 설계변수들을 재 조정해서 NESZ 성능이 만족하는 값을 찾는다. 그리고 각 swath에 대한 PRF diamond diagram을 이용하여 최적의 PRF를 선택한다.

안테나의 특성 분석을 위해 uniform circular aperture를 가정하고 안테나의 field 및 빔폭, Directivity을 분석하였다. 관련 식은 아래와 같다.

$$E = \sqrt{1 - \sin(\theta)^2 \sin(\phi)^2} \frac{2J_1(kas \sin(\theta))}{kas \sin(\theta)} \quad (1)$$

$$HPBW = 29.47 \frac{\lambda}{a} \text{ [deg]} \quad (2)$$

$$Directivity = 4\pi \frac{Area}{\lambda^2} \quad (3)$$

k는 전파상수, a는 aperture의 반지름, Area는 aperture의 면적을 나타낸다. 주어진 기하학적 조건에서 탐지폭을 만족시키는 aperture의 최대 반지름 크기를 결정한다. 탐지폭과 HPBW의 관계식은 아래와 같다.

$$Swath Width = \frac{R_s \cdot HPBW}{\cos(\theta_i)} \quad (4)$$

식 (2), (4)를 이용하여 안테나의 탐지폭을 만족하기 위한 안테나 반지름의 크기를 결정할 수 있다. Directivity는 aperture의 반경에 따라 계산할 수 있다. 또한 주어진 Directivity와 장비의 특성, 기하학적 조건 등을 고려하여 요구되는 NESZ의 만족여부를 판단이 가능하다.

주파수의 대역폭은 해상도에 의해서 결정된다.

$$B = \frac{c}{2 \cdot \text{resol} \cdot \sin(\theta_i)} \quad (5)$$

식 (5)와 같이 해상도 및 입사각의 요구사항에 따라 시스템의 주파수 대역폭이 결정된다.

영상의 품질을 판단하는 지표인 NESZ(Noise Equivalent Sigma Zero)는 신호의 세기와 잡음신호의 세기가 같아지는 분산표적의 후방산란계수로 정의된다. 즉, 영상의 SNR이 0dB가 되는 후방산란계수를 의미한다. NESZ는 기하학적 조건(고도, 입사각) 및 안테나의 field 패턴, 손실(송신, 수신, 대기, 강우), 대역폭, duty등에 의해 결정된다.

$$NESZ = \frac{4^4 \pi^3 K \cdot T_e \cdot B \cdot NF \cdot L \cdot R_s^3 \cdot \sin(\theta_i) \cdot V_s}{\lambda^3 \cdot c \cdot \tau \cdot PRF \cdot P_t \cdot G_{tx} \cdot G_{rx}} \quad (6)$$

K는 boltzman's 상수, T_e는 잡음온도, B는 주파수대역폭, NF는 잡음지수, L은 손실, R_s는 직거리, θ_i는 입사각, V_s는 위성의 속도, τ는 펄스폭, PRF는 펄스반복주파수, P_t는 출력파워, G_{tx}/G_{rx}는 송수신 이득을 나타낸다.

펄스폭과 PRF의 곱은 duty로 표현이 가능하다. 주파수 대역폭은 해상도 및 입사각 요구사항에 의해 결정되고, 잡음지수, 손실, duty, 출력파워 등은 장치의 특성에 따라 결정된다. 안테나의 송수신 이득은 안테나의 directivity와 efficiency에 의해 결정된다. 이에따라 NESZ 요구사항을 만족여부를 확인가능하며 불만족 시 요구조건의 조정을 통해 재설계를 수행한다.

PRF는 시스템의 송신 시기와 지구천저반사를 고려하여 swath별 사용가능한 PRF를 확인하고, DTAR(distributed target ambiguity ratio)를 고려하여 최적의 PRF를 선택한다. DTAR는 거리방향모호성(RAR, range ambiguity ratio)과 방위각방향모호성(AAR, azimuth ambiguity ratio) 중 최대값으로 결정된다. RAR은 다음과 같이 계산된다.

$$RAR = \frac{\sum_{\substack{n=N_{near}^{RAR} \\ n \neq 0}}^{N_{far}^{RAR}} \sigma_0(\phi_n) \frac{G_{tx}(\phi_n) G_{rx}(\phi_n)}{R_s^3(\phi_n) \cdot \sin(\theta_{i,n})}}{\sigma_0(\phi_0) \frac{G_{tx}(\phi_0) G_{rx}(\phi_0)}{R_s^3(\phi_0) \cdot \sin(\theta_{i,0})}} \quad (7)$$

N은 near와 far 범위에서 모호영역의 수를 나타낸다. φ_n은 안테나의 고각, σ₀는 고각에 따른 레이더 단면적(RCS, radar cross section)을 나타낸다. RAR은 PRF가 작을수록 작아진다.

AAR은 다음과 같다.

$$AAR = \frac{\sum_{\substack{l=N_{near}^{AAR} \\ l \neq 0}}^{N_{far}^{AAR}} \int_{-\frac{B_D}{2}}^{+\frac{B_D}{2}} G_{az}(f_D' + l \cdot PRF) df_D'}{\int_{-\frac{B_D}{2}}^{+\frac{B_D}{2}} G_{az}(f_D') df_D'} \quad (8)$$

f_D는 도플러중심주파수, B_D는 도플러대역폭을 나타낸다. AAR은 PRF가 클수록 작아진다. 즉, DTAR의 최적화를 위해서는 RAR과 AAR의 최대값이 최소가 되는 PRF를 선정하여야한다.

III. SAR 탑재체 설계 결과

표2의 시스템 요구사항과 식(2), (4)를 이용하여 탐지폭을 만족하는 최대 안테나의 반경은 1.82m 이다. 마진을 고려하여 안테나 반경은 1.5m로 설계하였다. 설계된 안테나의 HPBW는 0.61°, 탐지폭은 6.04km이다. 그리고 안테나 방사패턴은 아래 그림 3과 같다.

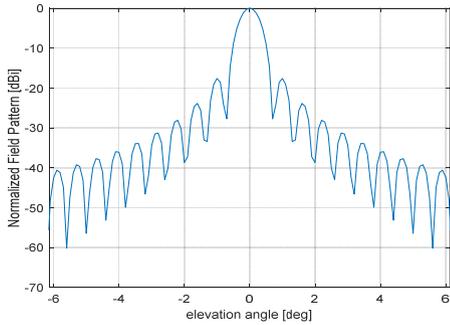


그림 3. 안테나 방사패턴
Fig. 3. Normalized field pattern

식(5)를 이용하여 운용주파수대역폭을 계산할 수 있다. 입사각에 따른 필요 대역폭은 아래 그림 4와 같다. 입사각이 20°일 때, 해상도 1m를 만족하기 위해 필요한 대역폭은 약 450MHz로 마진을 고려하여 500MHz로 설계하였다.

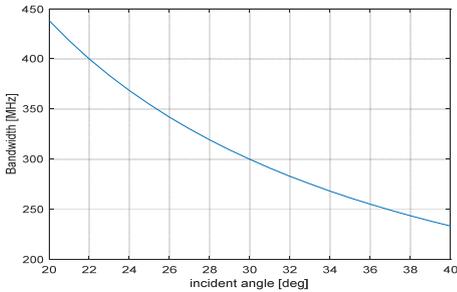


그림 4. 입사각에 따른 주파수대역폭
Fig. 4. Bandwidth according to incident angle

NESZ를 분석하기 위한 설계변수는 아래와 같다.

표 3. SAR 설계변수
Table 3. SAR design parameter

parameter	value	
duty[%]	30	
안테나 효율[%]	65	
잡음지수[dB]	4	
손실 [dB]	송신	1.5
	수신	1.5
	대기	0.5
	강우	0.4
송신출력 [W]	400	

표2, 3의 요구사항 및 설계변수, 안테나 특성을 식 (6)에 적용하여 계산된 입사각에 따른 NESZ의 크기는 아래 그림 5와 같다. 모두 운용 입사각 내에서 목표요구성능 -15dB이내를 만족하는 것을 확인할 수 있다.

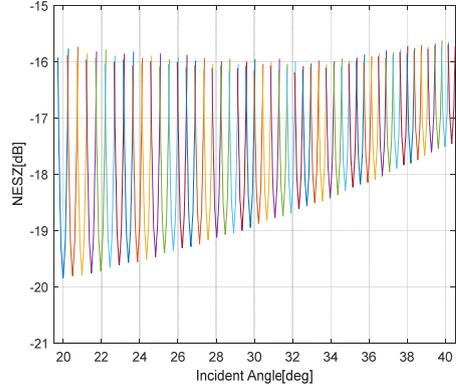


그림 5. 입사각에 따른 NESZ
Fig. 5. NESZ according to incident angle

설계된 SAR 변수와 식(7), (8)을 이용하여 최적의 PRF를 선정하였다. PRF 선택을 위한 diamond diagram은 그림 6에서 확인이 가능하다. 그림 6에서 노란색 영역은 송신신호와 수신신호가 겹쳐서 수신 불가능한 영역으로 PRF선택 불가능한 영역이다. 초록색 영역은 최단거리인 지구의 천저에서 안테나의 부엽신호가 반사되어 수신되는 영역으로 거리방향 모호성이 커지는 영역이다. 실제 안테나 방사패턴이 적용될 시에는 무시가 가능하나 초기 설계단계에서는 피해서 PRF를 선택한다. 5km의 관측폭을 만족하는 입사각영역을 점선으로 표시하였다. 각 관측영역별로 PRF선택이 가능한 주파수 중 영상품질 DTAR의 성능이 가장 뛰어난 PRF를 선택하여 각 관측영역별

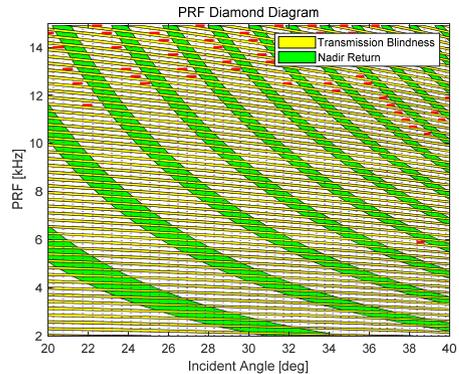


그림 6. PRF diamond diagram
Fig. 6. PRF diamond diagram

로 빨간색 선으로 표시하였다.

설계된 탐지폭에 따라 선택가능한 PRF 중 식(7), (8)을 이용하여 DTAR의 값이 최소가 되는 PRF를 선택한 결과는 그림 6에서 빨간색으로 표시하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 SAR 탑재체의 설계방안 및 설계결과 그리고 주요성능에 대한 분석 결과를 제시하였다. SAR 시스템 설계는 요구사항을 만족하는 주요변수의 설계값 도출로 진행된다. 저궤도에서 운용하는 100kg 미만의 초소형위성을 가정하고 고해상의 영상을 위하여 X-대역의 주파수를 선정하였다. 또한 소형, 경량화를 위한 안테나 형태를 제안하였다. 또한 설계된 변수를 적용하여 체계성능을 확인하였다. 본 논문에서 제시된 초기 설계 결과는 추후 실제 초소형위성 탑재체 설계에 활용이 가능하다.

References

- [1] Jeong-Ho Kim, Hyoung-Bae Kim, "A Development of Algorithm on High Speed SAR Measurement", The Journal of Institute of Internet, Broadcasting and Communication Vol. 7, No. 4, pp. 15-21, 2017.
- [2] Gi-Young Go, Cheol-Woo Park, "SAR Image Processing Using Wavelet-based Sigma Filter and Edgemap", The Journal of Institute of Internet, Broadcasting and Communication Vol. 9, No. 6, pp. 155-161, 2009.
- [3] Young-Kil Kwag, "Performance Characteristics of the High Resolution X-band Small Satellite SAR System Design", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science Vol. 11, No. 7, pp. 1258-1270, 2000.
- [4] Josef Mittermayer, Marwan Younis, Robert Metzger, Steffen Wollstadt, José Márquez Martínez, and Adriano Meta, "Performance Characteristics of the High Resolution X-band Small Satellite SAR System Design", IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 48, NO. 2, FEBRUARY 2010
- [5] Shadrack Yaw Nusenu, "Performance Analysis of Phased Array and Frequency Diverse Array Radar Ambiguity Functions", Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal Vol. 2, No. 3, 389-394 2017.
- [6] Sua Song, Seong-Wan Hong, Hyuk Park, Jin-Young Song and Young Keun Chang, "Analysis of Figure of Merits(FoM) of Small Constellation Satellites for TCT Missions", SASE 2018 Spring Conference.

저 자 소 개

박 종 민(정회원)



- 2006년 : 포항공과대학교 전자전기공학과(공학사)
- 2008년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
- 2014년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)
- 2014년 ~ 현재 : (주)LIG넥스원 선임연구원

• 관심분야 : SAR위성, 영상레이더

김 동 식(정회원)



- 2000년 : 팡운대학교 전자공학과(공학사)
- 2003년 : 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2007년 ~ 현재 : (주)LIG넥스원 수석연구원
- 관심분야 : 레이더, 이동통신, 주파수할성기

김 완 식(정회원)



- 1991년 : 건국대학교 전자공학과(공학사)
- 1993년 : 건국대학교 전자공학과(공학석사)
- 2004년 : 건국대학교 정보통신공학과 (공학박사)
- 1992년 ~ 2001년 : (주)대우전자 선임연구원

• 2001년 ~ 2005년 : 고등기술연구원 책임연구원

• 2005년 ~ 현재 : (주)LIG넥스원 수석연구원

• 주 관심분야 : 초고주파 회로설계, RF/밀리미터파 시스템, MMIC, 레이더 및 관련 센서 시스템

김 중 필(정회원)



- 1997년 : 경기대학교 전자공학과 (공학사)
- 2011년 : 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2000년 ~ 현재 : (주)LIG넥스원 수석연구원
- 주관심분야 : 레이더 및 반도체송수신 모듈