

위성탐재용 광대역 영상레이다의 빔 분산 및 고도 변화에 의한 거리 방향 모호성 성능 개선 방안

Enhancement Method for Range Ambiguity to Signal Ratio due to Beam Dispersion and Altitude Change in Wideband Satellite Synthetic Aperture Radar

성진봉 · 홍성용*

Jin-Bong Sung · Sung-Yong Hong*

요약

광대역 레이더에서는 주파수에 따른 지연 특성을 보정하기 위하여 실시간 시간 지연기를 이용한다. 본 논문에서는 실시간 지연기가 없는 광대역 영상레이다의 안테나 패턴 특성을 분석하고, 빔 분산 영향을 보상하기 위한 안테나 패턴을 정의하였다. 또한 실시간 지연기 유무에 따른 거리방향 신호 대 모호성(RAR, range ambiguity to signal ratio) 성능을 비교하였다. 신호 대 모호성 성능을 기준으로 SAR 운용변수인 PRF 범위를 도출하였으며, 빔 분산 영향에 의해 저하된 RAR 성능을 개선하는 방안을 제시하였다. 위성 운용을 고려하여 고도변화에 의한 운용변수 최적화 방안을 연구하였으며, 이를 반영한 고도별 RAR 성능 향상 결과를 도출하였다. 제안된 방법은 운용고도의 함수인 식을 사용하여 운용변수를 계산하므로 실제 위성운용에서 활용이 용이하다. 35 km의 운용고도 가변 범위에 대하여 RAR 성능 개선도를 분석하였으며, 분석결과, 표준, 광역관측 그리고 고해상도모드에서 각각 최소 2.1 dB, 0.9 dB, 2.1 dB가 개선되었다. 표준모드에서는 시스템 규격을 만족하고, 광역관측과 고해상도모드에서는 각각 규격 대비 충분한 여유를 갖는다.

Abstract

In a wideband radar, a true time delay line (TTDL) is used to compensate for the propagation delay that has a different value according to the operational frequency. This study analyzes the antenna pattern characteristics of wideband synthetic aperture radar (SAR) that does not require any TTDL. In addition, it defines an antenna pattern to compensate for beam dispersive effects and a method to improve the range ambiguity to signal ratio (RAR). Considering the altitude change that occurs in a SAR satellite, this paper proposes a method to optimize the operational parameters and consequently enhance the RAR performance. The proposed method uses altitude-dependent equations to calculate the operational parameters; hence it can be easily applied to the real operation of a SAR satellite. The RAR analysis for operational altitude variation of 35 km shows that an improvement of approximately 2.1-dB, 0.9-dB, and 2.1-dB is achieved at the stripmap, wide-swath, and high-resolution modes respectively. The RAR is improved to comply with the requirement in the stripmap mode, whereas the wide-swath and high-resolution modes have a sufficient margin.

Key words: Synthetic Aperture Radar, True Time Delay Line, Range Ambiguity Ratio

국방과학연구소(Agency for Defense and Development)

*충남대학교 전파정보통신공학과(Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University)

· Manuscript received June 12, 2021 ; Revised June 30, 2021 ; Accepted July 19, 2021. (ID No. 20210612-061)

· Corresponding Author: Sung-Yong Hong (e-mail: syhong@cnu.ac.kr)

I. 서 론

위성 탑재 영상레이다의 송신대역폭은 해상도 향상을 위해 점차 증가하는 추세이다. 현재 능동위상배열 안테나를 적용한 X-대역 영상레이다의 송신 대역폭은 ITU (International Telecommunication Union) 규정에 따라 최대 1,200 MHz 정도로 광대역이다. 광대역 레이더 신호를 송수신하면 주파수별로 전파 지연에 차이를 보이므로 실시간 시간 지연기(TTDL, true time delay line)를 사용하여 대역내의 주파수 지연 특성을 송신 중심주파수의 지연 값으로 조절하여야 한다^[1]. 이러한 TTDL이 없는 구조에서는 주파수별로 빔 분산 특성이 발생하므로 중심주파수에서의 안테나 빔 패턴만을 적용하여 설계하는 기존의 시스템 설계와 다른 접근이 필요하다. 본 논문에서는 TTDL 없는 구조에서 발생하는 빔 분산 특성을 고려하여 주파수 대역 내에서의 안테나 빔 패턴 특성을 분석하였고, 상대적으로 높아진 안테나 부엽 레벨의 영향에 의한 거리 방향 신호 대 모호성 비(RAR, range ambiguity to signal ratio)의 성능 저하를 개선하기 위한 방안을 제시하였다.

위성 탑재 영상레이다의 운용변수는 지상에서 계산하여 S-대역으로 전송되며, 위성 접속 시간제한에 의해 한정된 크기의 표 형태의 변수로 계산된다. 약 35 km 정도의 변화를 갖는 위성 고도 값을 고려하여 운용변수를 최적화하여야 하며, 임무계획부터 실제 영상레이더 운용까지의 시간을 단축하기 위하여 운용변수 식은 위성고도의 함수로 정의되어야 한다.

본 논문 II장에서는 실시간 지연기가 없는 광대역 영상레이다의 안테나 패턴 특성을 분석하였고, 빔 분산 특성을 보상하기 위한 안테나 패턴을 정의하였다. III장에서는 시스템 규격과 RAR 성능을 정의하였으며, 위성 고도 525 km에서의 RAR 분석 결과를 제시하였다. IV장에서는 RAR 성능 개선 방법을 제시하였으며, 운용변수 최적화 방안과 고도별 RAR 분석 결과를 정리하였다. V장에서는 결론을 제시하였다.

II. 광대역 실시간 지연기와 안테나 패턴 특성

안테나 빔패턴 특성은 영상레이더 성능에 영향을 주는

중요한 변수로, 해상도, 관측폭, 시스템감도(NESZ, noise equivalent sigma zero), RAR 및 방위방향 신호 대 모호성 비(AAR, azimuth ambiguity to signal ratio) 성능에 영향을 준다. 광대역 안테나에서는 일반적으로 주파수에 따른 시간 지연 특성을 보정하기 위한 실시간 시간 지연기를 포함한다. 파수와 n 번째 복사소자의 지향 벡터는 각각 식 (1), 식 (2)와 같다.

$$k = k_c + \Delta k = \frac{2\pi}{c}(f_c + BW) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} e_n &= a_n \cdot \exp(-jk \cdot d \cdot n \cdot \sin\theta) \\ &= a_n \cdot \exp(-j(k_c + \Delta k)d \cdot n \cdot \sin\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서, k 는 파수, f_c 는 RF 중심주파수, BW 는 RF 송신대역폭, c 는 빛의 속도, a_n 은 진폭 여기 계수, d 는 안테나 요소(element) 간격이다. 이때, n 은 전체 배열 요소 개수가 $2N$ 일 때 $-N$ 부터 $N-1$ 까지 1씩 증가하는 값이다. Δk 는 빔 분산 효과와 관련된 변수로 중심 주파수로부터의 주파수 오프셋을 나타낸다.

배열 요소 F_a 와 안테나 이득 G 는 각각 식 (3), 식 (4)와 같다.

$$F_a(\theta, f) = \sum_{n=-N}^{n=N-1} a_n \cdot \exp(-j(k_c + \Delta k) \cdot d \cdot n \cdot \sin\theta) \cdot \exp(j\phi_{\omega, n}) \quad (3)$$

$$G(\theta, f) = \left| \sum_{n=-N}^{n=N-1} a_n \cdot \exp(j(\phi_{\omega, n}) \cdot x \right|^2 \quad (4)$$

$$x = \sqrt{G_n(\theta, f)} \exp(-j(k_c + \Delta k) \cdot d \cdot n \cdot \sin\theta) \quad (5)$$

여기에서, ϕ_{ω} 는 위상배열안테나의 위상 여기 계수로 안테나 지향 각을 조정하기 위한 6비트 위상변위기로 구현된다. x 는 복소 임베디드 부배열 패턴 진폭이다.

TTDL이 없으면 빔 지향 오프셋 $\Delta\theta$ 가 식 (6)과 같이 발생하며, 안테나 배열 소자의 침투 지향성 특성 ΔD 는 주파수에 따라 식 (7)과 같이 변한다. 여기에서, θ_0 는 지향하고자 하는 빔 조향각이다.

$$\Delta\theta = \sin^{-1}\left(\frac{f_c}{f_c + f} \cdot \sin\theta\right) - \theta_0 \quad (6)$$

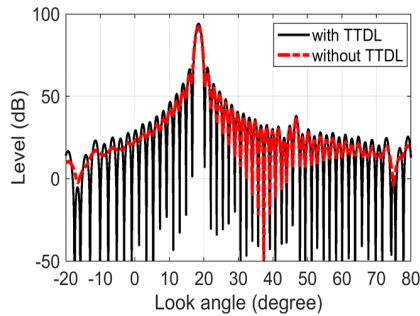
$$\Delta D_{dB} = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{\Delta k^2 + 2\Delta k \cdot k_c}{k_c^2} \right) \quad (7)$$

TTDL이 없는 광대역 안테나를 갖는 영상레이다에서는 영상획득 이후 지상에서의 신호처리 단계에서 빔 분산 특성을 보상해야 한다. 주파수별 빔 분산 특성을 보상하기 위한 안테나 이득 특성 $G_{compensated}$ 은 식 (8)과 같이 RF 송신대역폭을 고려하여 정의한다.

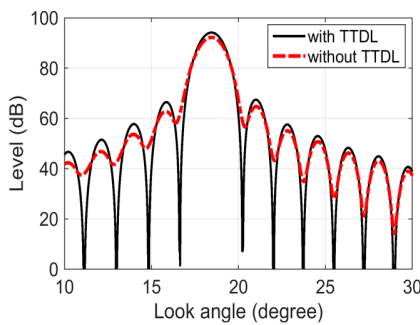
$$G_{compensated}(\theta) = f_c^3 \frac{\int_{-BW/2}^{BW/2} \frac{G_{tx}(\theta, f) G_{rx}(\theta, f)}{f^3} W^2(f) df}{\int_{-BW/2}^{BW/2} W^2(f) df} \quad (8)$$

여기에서, G_{tx} 와 G_{rx} 는 각각 안테나 송신이득 및 안테나 수신이득이고, W 는 윈도우 계수이다.

TTDL 유무에 따른 안테나 패턴을 비교한 결과는 그림 1과 같다. TTDL이 있을 때의 안테나 이득은 검정색 실선



(a) 양방향 안테나 이득 특성
(a) Two-way antenna gain



(b) 주엽 부분 레벨 특성
(b) Main lobe level

그림 1. 실시간 시간 지연기 유무에 따른 안테나 빔 패턴 특성 비교 결과

Fig. 1. Comparison of antenna patterns depending on existence of TTDL structure.

으로, TTDL이 없는 구조에서의 안테나 이득은 적색 점선으로 표시하였다. 이때의 RF 대역폭은 600 MHz, 관측각은 약 18.46°, 윈도우 계수는 0.77이다. TTDL이 없을 때는 안테나 이득이 감소하고 빔 분산 특성이 나타나며, 안테나 부엽레벨이 증가한다.

III. 시스템 규격과 RAR 성능

3-1 시스템 규격 및 주요 특성

영상레이다가 운용되는 고도는 약 520 km이며, 영상레이다 주요 규격 및 특성은 표 1과 같다^{[2],[3]}. 운용모드에는 표준모드, 고해상도 모드 및 광역관측모드가 있으며, 입사각 범위, 모드별 관측폭이 각각 정의된다. 거리방향 모호성비와 방위방향 모호성비 규격은 각각 -20 dB 이하이다. PRF(pulse repetition frequency) 가용 값은 최소 2 kHz, 최대 16 kHz이며, 최대 송신 펄스폭은 100 μ s이다. 송신/수신 신호 간 이격 시간은 각각 4.3 μ s, 1.7 μ s이며, 해당 구간은 영상레이다 운용 제약 사항으로 RF 송신 신호와 RF 수신 신호 타이밍 설계 및 PRF 선정에 영향을 주는 지표이다.

3-2 RAR 정의

RAR은 그림 2와 같이 레이다 신호를 지상 표적으로

표 1. 시스템 규격 및 주요 특성

Table 1. System requirements and main characteristics.

Parameter		Value	Unit
Requirements	Altitude	505 ~ 540	km
	Incidence angle range	20 ~ 60	degree
	Ground swath width	Stripmap mode	≥ 30 km
		High-resolution mode	≥ 5 km
		Wide-swath mode	≥ 100 km
Characteristics	NESZ ¹⁾	≤ -20	dB
	PRF range	2 ~ 16	kHz
	Maximum pulse width	100	μ s
	Tx-to-Rx guard time	4.3	μ s
	Rx-to-Tx guard time	1.7	μ s

¹⁾ Incident angle range is limited to [20~55]°, both range and azimuth direction are applicable.

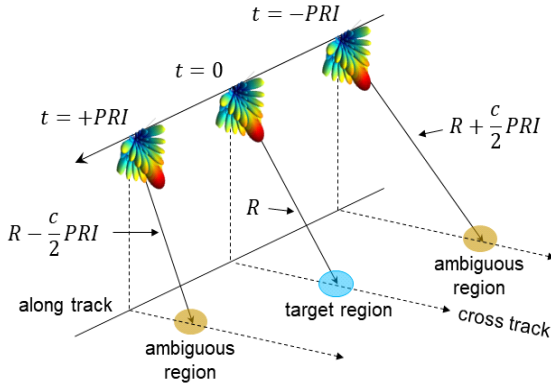


그림 2. 거리방향 신호 대 모호성 비 발생 원인
Fig. 2. Reason for occurrence of RAR.

송신하고, 원하는 신호를 수신하기 위한 수신 구간에 놓일 수 있는 송신 신호 이전과 이후에 해당하는 지상 위치로부터의 모호 신호에 의해 발생하며, 이러한 모호 신호들의 합과 원하는 수신신호 간의 전력 값 차이로 RAR을 분석한다. 영상레이다 신호는 펄스 주기 단위로 신호를 송수신하므로 송신 신호 간 간격은 PRF의 역수인 PRI (pulse repetition interval)이다.

RAR을 분석하기 위한 기하학은 그림 3과 같다. 여기에서, 지상으로부터의 영상레이다 높이는 h , 표적으로부터 반사되는 수신신호는 P_t , 지구반경은 R_E , 영상레이다부터 표적까지의 탐지거리는 R , 모호 신호들은 $S_{\pm n}^{\pm}$ 로 정의하였다.

RAR 분석 수식은 식 (9)와 같이 원하는 신호가 분모에

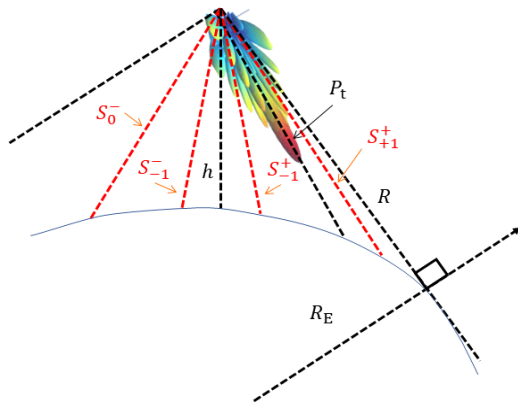


그림 3. 거리방향 신호 대 모호성 비 분석 기하
Fig. 3. Geometry for analysis of RAR.

위치하고 원하지 않는 모호 신호들의 합이 분자에 정의된다^{[4] ~ [10]}.

$$RAR = \frac{\sum_{n \neq 0} \frac{G^2 \left[\theta \left(\tau + \frac{j}{PRF} \right), \phi \right] \sigma_0(\psi_{a_j})}{R_a^3 \sin \psi_{a_j}}}{\frac{G^2[\theta(\tau), \phi] \sigma_0(\psi_t)}{R_t^3 \sin \psi_t}} \quad (9)$$

여기에서, τ 는 송신 펄스폭, $G^2(\theta, \phi)$ 은 양방향 안테나 이득, ψ_t 와 ψ_a 는 각각 수신 신호와 모호 신호에 대응하는 입사각, R_t 와 R_a 는 각각 수신신호와 모호 신호에서 대한 탐지거리이다. 또한, σ_0 은 후방산란계수이다.

3.3 시스템 설계 결과

표준모드는 영상레이다 운용모드 중에서 거리방향 관측폭이 가장 넓은 운용모드이므로 시스템 설계 단계에서 PRF를 선정하기 가장 어려운 운용모드이다. 입사각이 증가할수록 선정할 수 있는 PRF 범위가 점점 줄어들며, 특히 50° 이상의 입사각 범위에서는 RAR 성능이 다른 운용모드에 비해 상당히 저하된 값을 보이는 운용모드이다. 따라서 본 논문에서는 표준모드를 기준으로 RAR 성능을 개선하기 위한 방안을 제시하였다.

표준모드는 관측폭 규격 30 km를 고려하여 총 21 개의 swath로 입사각 범위를 설계하였다. 표준모드 16번째 swath에 대하여 TTDL 유무에 따른 RAR 성능 비교 결과를 PRF의 함수로 그림 4에 나타내었다. 이때의 고도는

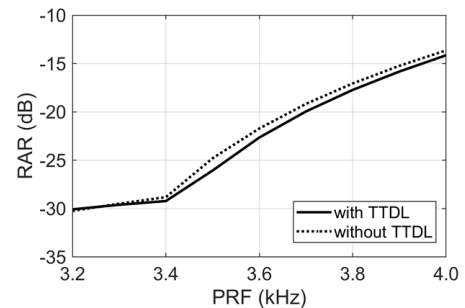
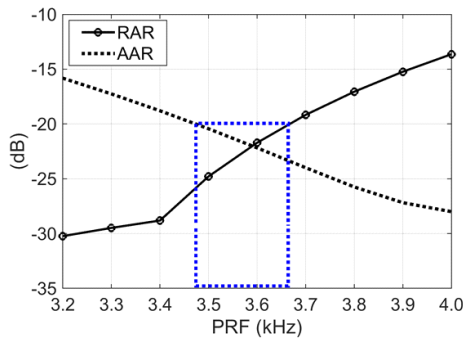


그림 4. 표준모드 16번째 swath에서의 TTDL 유무에 따른 RAR 성능 비교 결과

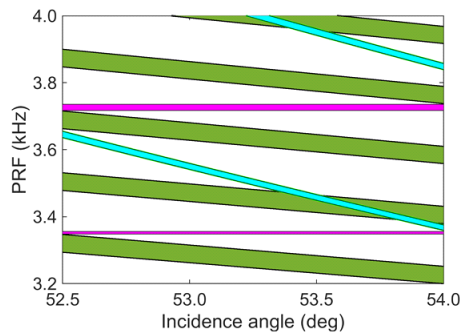
Fig. 4. RAR comparison depending on existence of TTDL structure.

525 km이다. TTDL이 있는 경우를 실선으로, TTDL이 없는 경우를 점선으로 표현하였으며, PRF 3.6 kHz에서 약 0.9 dB 정도 차이를 보이고 있다.

PRF는 RAR과 AAR 성능을 기준으로 선정한다. 그림 5는 PRF 선정 방법을 예로 든 것으로 표준모드 16번째 swath에서의 결과이다. PRF 선정 순서는 크게 두 단계로 정의된다. 먼저, 정의된 입사각 범위에서 RAR과 AAR 성능을 PRF의 함수로 분석하면 그림 5(a)와 같은 결과를 얻게 되고, 요구규격인 -20 dB를 만족하는 PRF 범위인 약 3.48 kHz부터 3.68 kHz를 찾을 수 있다. 다음으로, PRF를 송신 간섭신호와 위성 직하(Nadir) 방향 간섭신호의 함수로 정의하여 간섭신호가 없는 영역의 PRF를 찾게 도와주는 PRF 다이아몬드 다이어그램을 이용하여 최종 PRF를 선택한다. 그림 5(b)는 앞에서 획득한 약 3.6 kHz 근처의 PRF 범위를 기준으로 최종 PRF를 선택하기 위하여 도시



(a) PRF에 따른 RAR과 AAR 성능
(a) RAR and AAR performances according to PRF



(b) PRF 다이아몬드 다이어그램을 이용한 PRF 선정 가능 범위
(b) Selectable PRF range in PRF diamond diagram

그림 5. 표준모드 525 km에서의 PRF 선정
Fig. 5. PRF selection at 525-km altitude in stripmap mode.

한 PRF 다이아몬드 다이어그램으로 녹색은 송신 간섭신호 구간, 밝은 하늘색은 직하 방향 간섭 신호 구간이며, 이들 간섭 신호 구간을 회피하면서 원하는 관측폭을 얻을 수 있는 PRF 영역을 분홍색으로 표현하였다. 또한, 하드웨어 특징을 반영하기 위하여 표 1에서 정의한 송신-수신 이격 시간과 수신-송신 이격 시간을 적용하였다. 결과에서 보이듯이, RAR과 AAR 규격을 동시에 만족하는 PRF 영역에는 간섭 신호가 존재하므로 이 영역은 선택할 수 없다. 그림 5(a) 결과를 보면서 RAR과 AAR 성능을 가급적이면 요구규격 근처가 되도록 만드는 PRF를 최종적으로 선택해야 한다. AAR 성능은 방위방향 안테나 빔패턴, 도플러대역폭 및 PRF에 의해 정의되며^[11], 운용변수 조정이 아닌 방위방향 안테나 빔패턴 최적화에 의한 성능 개선이 유용하다. 운용변수 조정에 의한 AAR 성능 개선방법은 위성 운용환경을 고려하여 적용 가능성을 확인해야 한다. 안테나 빔패턴 정보는 위성에 탑재된 영상레이다에 저장되므로, 지상에서 위성으로 업로드되는 운용변수에 대해서만 고도변화를 반영하여 조정하는 위성 운용환경에서는 35 km 정도 변하는 예측 고도 범위에 대하여 고도별로 안테나 빔패턴을 다르게 적용하기 어렵다^[11]. 따라서 본 논문 IV장에서 제안하는 운용변수 조정에 의한 성능개선이 가능한 RAR 성능보다는 AAR 성능 만족을 우선순위로 하여 PRF를 선정하였다. 선택된 PRF는 3.727 kHz이다.

그림 6은 선정된 PRF를 이용하여 분석한 고도 525 km

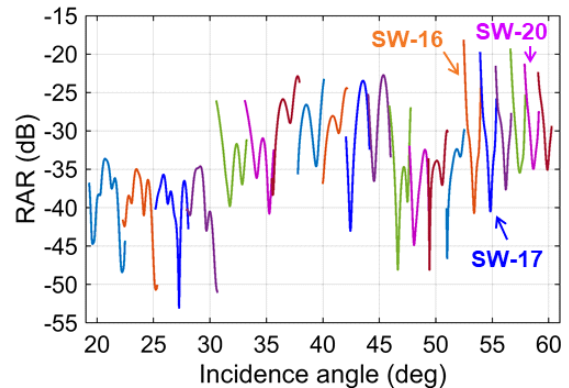


그림 6. 고도 525 km에서의 RAR 성능
Fig. 6. RAR performance at 525-km altitude.

에서의 표준모드의 RAR 성능이다. 성능 만족 기준이 되는 입사각 범위 $20^\circ \sim 55^\circ$ 에 대하여 입사각 52° 이상인 16번째 swath(SW-16)와 17번째 swath(SW-17)에서 RAR 최댓값이 요구규격인 -20 dB를 초과하므로 RAR 성능을 개선하기 위한 추가적인 최적화가 필요하다.

IV. RAR 성능 개선 방안과 최적화 결과

위성에 탑재된 영상레이다를 운용하기 위한 운용명령과 운용변수는 지상에서 생성하여 촬영임무 전에 위성으로 송신해야 하므로 제한된 크기를 갖는다. 영상레이다 운용변수는 지상과 위성 간에 상호 약속된 정의를 통해 생성되며, 위성 고도변화를 고려하여 간섭 신호 없이 요구규격을 만족하는 표적신호를 수신할 수 있도록 최적화 과정을 거쳐야 한다. 영상레이다로 전송되는 운용변수는 PRF, 안테나 관측각, 수신 타이밍 시작시간과 길이, 영상 획득 시간 등이며, 해당 변수들은 위성고도의 함수로 정의되어 위성 고도 변화에 따라 최적화되어 생성된다.

그림 6에서 16번째 swath 이후에서의 RAR 경향을 보면, 낮은 입사각에서의 성능이 높은 입사각에서의 성능에 비해 높게 나타나고 있다. RAR 분석 식 (9)와 비교하면, 입사각과 탐지거리, 지상에 투영되는 안테나 이득 차이로 인하여 거리방향 관측폭 양 끝에서의 RAR 성능이 비대칭성을 갖는 것을 예측할 수 있다. 이러한 비대칭성을 해소하면 RAR 성능을 개선할 수 있다.

RAR 분석 식 (9)는 안테나 빔패턴과 그 외의 부분으로 구분이 가능하다. 입사각, 후방산란계수, 탐지거리 등은 레이더 수신 타이밍의 함수이므로 안테나 빔 포인팅과 관계가 없다. 안테나 빔패턴 부분과 나머지 부분을 분리하고, 안테나 지향 각에 오프셋을 적용하면 식 (10)으로 정의된다.

$$RAR = \frac{\sum_{n \neq 0} G^2 \left[\theta \left(\tau + \frac{j}{PRF} \right) + \theta_{offset}, \phi \right] x_2}{G^2 [\theta(\tau) + \theta_{offset}, \phi] x_1} \quad (10)$$

이때, $x_1 = \sigma_0(\psi_t)/R_t^3 \sin \psi_t$ 로 원하는 신호에 해당하는 부분이고, $x_2 = \sigma_0(\psi_a)/R_a^3 \sin \psi_a$ 로 모호 신호에 해당한다.

빔 오프셋 값은 위성고도 변화를 고려하여 최적화된 값을 영상레이다로 전송하는 운용변수에 반영해야 한다. 따라서 빔 오프셋 값은 고도의 함수로 정의해야 한다. 본 논문에서는 빔 오프셋 값을 고도 변화에 따라 선형적으로 변화도록 식 (11)과 같이 정의하였다. 지상에서 임무에 따른 예측 고도가 추정되면 이를 반영하여 영상레이다 운용을 위한 빔 오프셋 값을 산출하고, 안테나 관측각에 반영하여 최적화된 관측각 정보를 위성으로 전송하여 영상레이다를 운용한다.

$$x_3 = \frac{H_{p,max} - H_{p,min}}{\theta_{offset,max} - \theta_{offset,min}} \quad (11)$$

$$\theta_{offset,p} = x_3(H_p + H_{p,min}) + \theta_{offset,min} \quad (12)$$

그림 6에서 표준모드 RAR 성능이 -22 dB를 초과하는 16번째 swath부터 20번째 swath에 대하여 관측각 최적화를 적용한 RAR 성능 개선 결과를 그림 7에 도시하였다. 최소 고도 505 km, 고도 525 km 그리고 최대 고도 540 km 결과를 각각 나타내고 있으며, 관측각 최적화가 안 된 결과를 점선으로, 최적화가 된 결과를 실선으로 각각 표현하였다. RAR 성능은 swath별로 설계된 관측폭 범위 안에서의 최댓값이 규격을 만족하여야 한다. 점선으로 표현된 최적화 이전의 RAR 성능을 보면 일부 swath에서 표 1에서 정의된 규격인 -20 dB를 초과하는 것을 볼 수 있다. 관측각 최적화 결과를 보면, 개별 swath의 관측폭 양쪽 가장자리에서의 RAR 값이 거의 비슷한 성능을 보이고 있다. RAR 최적화 설정 기준은 다음 두 가지로 정의하였다. 먼저, swath 내에서의 RAR 최댓값이 -22 dB를 초과하는 swath에 대해 수행한다. 다음으로, 거리방향 관측폭 양쪽 가장자리에서의 RAR 최적화 결과가 0.2 dB 이하가 되면 최적화를 중지한다. 개별 swath에서의 고도별 RAR 개선 정도를 그림 7(d)에 정리하였다. 빔 오프셋 값 최적화에 의한 RAR 개선 정도는 약 2.1 dB에서 2.8 dB 정도이다.

빔 오프셋 최적화 방안을 다른 운용모드인 광역관측모드와 고해상도모드에서 적용하여 본 논문에서 제안하는 관측각 최적화 방안에 대한 검증을 수행하였다. 광역관측모드에서의 최적화 결과를 그림 8에 나타내었다. 고도 540 km에서 25번째 swath(SW-25)부터 36번째 swath(SW-36)에

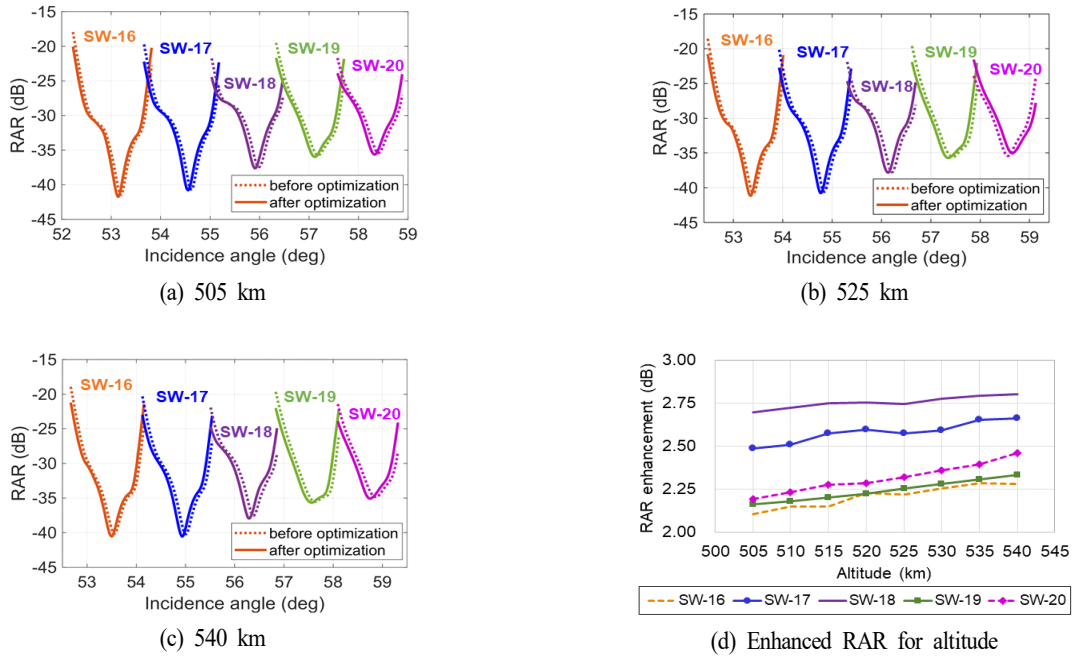


그림 7. 표준모드에서의 고도별 RAR 성능 최적화 결과 비교
Fig. 7. RAR in stripmap mode at an altitude.

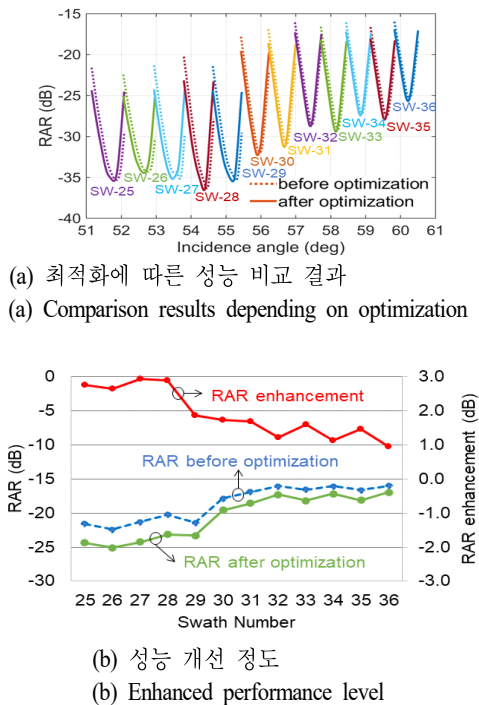


그림 8. 광역관측모드에서의 RAR 성능 최적화 결과
Fig. 8. RAR optimization results in wide-swath mode.

대하여 최적화를 수행한 결과이다. 점선으로 표현된 최적화 이전의 RAR 성능 최댓값, 실선으로 표현된 최적화 이후의 성능 최댓값, 그리고 RAR 개선 정도를 그림 8(b)에 나타내었으며, 최대 2.9 dB 정도 개선된 결과를 볼 수 있다. 특히 표 1에서 정의한 최대 입사각 50° 범위 안에 포함되는 28번째 swath(SW-28)를 보면, 최적화 이전의 RAR 성능 최댓값 -20.25 dB는 RAR 성능이 최적화 이후에는 규격 -20 dB를 충분히 만족하는 -23.15 dB를 보이며 본 논문에서 제안하는 최적화가 성공적으로 수행된 것을 확인할 수 있다.

고도 509 km에서의 고해상모드에 대한 RAR 최적화 결과는 그림 9에 도시하였다. RAR 최적화는 RAR 최댓값이 -25 dB를 초과하는 swath에 대해 수행하였다. 보라색으로 표시된 입사각 35° 에 위치하는 swath와 파랑색으로 표시된 입사각 55° 에서의 swath에서의 RAR 성능을 확인하면, 점선으로 표시된 관측각 최적화 이전의 RAR 성능 최댓값은 각각 -24.58 dB와 -21.48 dB이며, 최적화 이후에는 각각 -27.22 dB와 -23.64 dB로 각각 2.64 dB와 2.16 dB의 성능 개선 정도를 확인하였다.

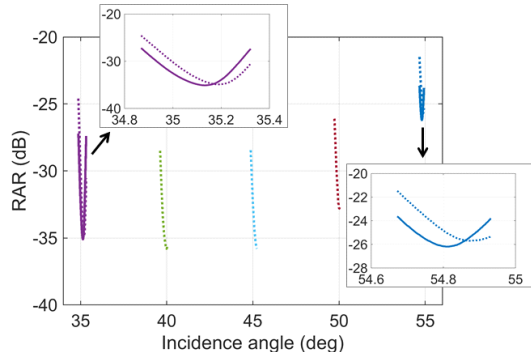


그림 9. 고해상도 모드에서의 RAR 성능 최적화 결과
Fig. 9. RAR optimization results in high-resolution mode.

V. 결 론

본 논문은 위성에 탑재되는 광대역 영상레이다 설계에 대한 것으로 실시간 시간 지연기 유무에 따른 안테나 패턴 특성을 비교하였다. 실시간 시간 지연기가 없는 영상레이다에서의 안테나 빔은 주엽 이득이 감소하고, 부엽 레벨이 증가하며, 빔 분산 특성이 나타나는 것을 확인하였다. 더불어 빔 분산 특성을 보상하기 위한 안테나 패턴을 정의하였다. 실시간 시간 지연기 유무에 의한 RAR 성능 저하 정도를 분석하였으며, 신호 대 모호성비 성능인 RAR 성능과 AAR 성능, 그리고 PRF 다이아몬드 다이어그램을 활용한 PRF 선정 방안을 제시하였다. 요구규격을 만족하지 못하는 swath에서의 RAR 성능을 개선하기 위한 방안을 제안하였다. 위성 운용을 고려하여 위성 고도 변화를 고려한 영상레이다 운용변수 최적화 방안을 연구하였으며, 운용고도의 함수를 갖는 운용변수 조정 식을 제안하여 실제 위성운용에서의 활용이 용이하도록 하였다. 운용고도 가변 범위 35 km에 대하여 RAR 성능 개선도를 분석하였다. 표준모드, 광역관측모드 그리고 고해상도 모드에서 RAR 성능은 각각 최소 2.1 dB, 0.9 dB, 2.1 dB 개선되었다. 특히 표준모드에서는 시스템 규격을 만족하도록 최적화되었으며, 광역관측모드와 고해상도 모드에서는 규격 대비 충분한 여유를 갖도록 개선되었다.

References

[1] S. K. Kim, M. K. Chong, S. B. Kim, H. G. Na, S. Y.

Kim, and J. B. Sung, et al., "Design of 4-bit TDL(True-Time Delay line) for elimination of beam-squint in wide band phased-array antenna," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 10, pp. 1061-1070, Oct. 2009.

[2] Y. C. Hwang, C. H. Nam, U. Y. Pak, S. Y. Kim, and J. H. Lee, "KOMPSAT-6 SAR payload system design," in *Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Hamburg, Jun. 2016, pp. 1-3.

[3] S. H. Lee, J. C. Yoon, and J. H. Kim, "KOMPSAT-6 mission, operation concept, and system design," in *11th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Hamburg, Jun. 2016, pp. 161-164.

[4] J. C. Curlander, R. N. McDonough, *Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 294-308. 1991.

[5] S. Y. Kim, N. H. Myung, and M. J. Kang, "Antenna mask design for SAR performance optimization," *IEEE Geoscience Remote Sensing Letter*, vol. 6, no. 3, pp. 443-447, Jul. 2009.

[6] S. Y. Kim, N. H. Myung, "An optimal antenna pattern synthesis for active phased array SAR based on particle swarm optimization and adaptive weighting factor," *Progress in Electromagnetics Research C*, vol. 10, pp. 129-142, 2009.

[7] D. W. Yi, S. J. Yang, J. B. Sung, and N. H. Myung, "Improvement of antenna model accuracy using error matrix optimization for an active synthetic aperture radar," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 3163-3167, 2017.

[8] M. Jäger, B. Gabler, and A. Reigber, "High precision antenna characterisation for broadband synthetic aperture radar processing," in *the 8th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP 2014)*, The Hague, Apr. 2014, pp. 3216-3220.

[9] M. Jäger, A. Reigber, and R. Scheiber, "Accurate consideration of sensor parameters in the calibration and

focusing of F-SAR data," in *EUSAR 2012; 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Nuremberg, Apr. 2012, pp. 20-23.

- [10] M. S. Kang, Y. J. Won, B. G. Lim, and K. T. Kim, "Study on spaceborne SAR system performance improvements using antenna pattern resynthesis in presence of element failure," *The Journal of Korean Institute of*

Electromagnetic Engineering and Science, vol. 29, no. 8, pp. 624-631, 2018.

- [11] J. B. Sung, S. Y. Hong, "In-orbit operational parameter calculation and performance optimization in KOMPSAT-6 synthetic aperture radar," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 12, p. 2342, Jun. 2021.

성 진 봉 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5028-0990>



1998년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
2000년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2001년~2006년: 한국전자통신연구원 연구원
2007년 3월~현재: 국방과학연구소 책임

연구원

2016년 3월~현재: 충남대학교 전파정보통신공학과 박사과정
[주 관심분야] 영상레이다

홍 성 용 [충남대학교/정교수]

<https://orcid.org/0000-0001-6505-7663>



1985년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
1988년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1994년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1994년 2월~1996년 8월: 한국쌍신 전자

통신 연구소장

1996년 9월~현재: 충남대학교 전파정보통신공학과 교수
[주 관심분야] 초고주파 회로, RF 송수신기, 필터, 레이더