

위성 SAR 성능향상을 위한 엔트로피 최소화 기반 안테나 빔 패턴 최적화 연구

Study on Spaceborne SAR System Performance Improvement Using Antenna Beam Pattern Optimization Based on an Entropy Minimization

강 민 석

Min-Seok Kang

요 약

위성 탑재 합성 개구면 레이더(SAR: synthetic aperture radar) 시스템에서는 거리방향 해상도, 방위각방향 해상도, 관측 폭, NESZ(noise equivalent sigma zero), 거리방향 모호성 비(RASR: range ambiguity to signal ratio) 등의 성능 요구조건을 만족시키기 위해 안테나 빔 패턴의 특성을 정밀하게 분석하고 최적화하여야 한다. 특히 고각 방향의 부엽 레벨은 거리방향 모호성 신호의 크기에 직접적인 영향을 미치므로, SAR 영상 품질 향상을 위해 부엽 영역의 전력 분포를 효과적으로 제어하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 위성 SAR 시스템 성능향상을 위하여 새로운 비용함수 기반의 안테나 빔 패턴 최적화 기법을 제안한다. 제안한 비용함수는 마스크 패턴의 상한을 초과하는 불요 부엽 전력과 마스크 내부에 존재하는 부엽 전력을 동시에 고려하며, Shannon 엔트로피 정규화를 통해 부엽 전력 분포를 비용함수로 구성한다. 이후 입자 군집 최적화(PSO: particle swarm optimization) 기법을 이용하여 마스크 패턴에 적합한 안테나 소자의 급전 크기 및 위상을 산출한다. 시뮬레이션에서는 실제 위성 SAR 시스템 설계 변수를 기반으로 원시 빔 패턴과 제안한 비용함수를 통해 합성된 빔 패턴을 비교하고, RASR 분석을 통해 제안한 기법의 성능을 검증한다. 그 결과, 원시 빔 패턴에서는 RASR 요구조건을 만족하지 못하였으나, 제안한 비용함수를 적용한 빔 패턴 최적화 이후 RASR 최댓값이 개선되어 주어진 SAR 시스템 성능 요구조건을 만족함을 확인하였다.

Abstract

To satisfy the performance requirements of a spaceborne synthetic aperture radar (SAR) system, antenna beam pattern characteristics should be carefully analyzed and optimized. In particular, the sidelobe level in the elevation direction has a significant influence on the range ambiguity-to-signal ratio (RASR), which directly affects the quality of SAR images. In this paper, an antenna beam pattern optimization method based on a new cost function is proposed to improve the performance of a spaceborne SAR system. The proposed cost function simultaneously considers the excess undesired sidelobe power, which exceeds the upper sidelobe mask limit, and the inner sidelobe power, which exists within the allowable mask region. The combined sidelobe power was normalized using Shannon entropy to construct the optimization cost function. Then, the particle swarm optimization algorithm was applied to determine the amplitude and phase excitations of antenna elements. In the simulation, the initial and optimized beam patterns synthesized using the proposed cost function were analyzed based on practical spaceborne SAR system parameters. The RASR results show that the proposed method effectively reduced the range ambiguity and satisfied the required SAR system performance condition.

Key words: Spaceborne SAR, SAR System Performance, Range Ambiguity to Signal Ratio (RASR), Particle Swarm Optimization (PSO), Antenna Pattern Optimization

「이 논문은 2026년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2021R111A3043152).」

국립공주대학교 전기전자제어공학부(Division of Electrical, Electronic and Control Engineering, Kongju National University)

· Manuscript received May 2, 2026 ; Revised May 13, 2026 ; Accepted May 20, 2026. (ID No. 20260502-043)

· Corresponding Author: Min-Seok Kang (e-mail: mskang@kongju.ac.kr)

I. 서 론

위성 탑재 합성 개구면 레이더(SAR: synthetic aperture radar) 시스템은 기상 조건과 주야에 관계없이 지표면을 관측할 수 있는 능동형 원격탐사 시스템^{[1]-[14]}으로, 고해상도 지구 관측, 재난 감시, 해양 감시, 군사 정찰 등 다양한 분야에서 활용되고 있다^{[15]-[24]}. 위성 SAR 시스템의 성능은 중심 주파수, 펄스 반복 주파수(PRF: pulse repetition frequency), 위성 고도 및 속도, 관측 기하, 스캔 방식, 안테나 크기와 빔 패턴 등에 의해 결정된다. 이 중 안테나 빔 패턴은 거리방향 해상도, 방위각방향 해상도, 관측 폭(SW: swath width), NESZ(noise equivalent sigma zero), 방사 정확도(RA: radiometric accuracy), 거리방향 모호성 비(RASR: range ambiguity to signal ratio)와 같은 핵심 SAR 시스템 성능변수에 직접적인 영향을 미친다^{[25]-[29]}.

위성 SAR 안테나는 제한된 플랫폼 크기와 전력 조건 내에서 높은 이득, 적절한 3 dB 빔 폭, 낮은 부엽 레벨을 동시에 만족해야 한다. 특히 거리방향 모호성은 주엽을 통해 수신되는 원하는 신호와 부엽을 통해 수신되는 원하지 않는 신호가 함께 영상 형성 과정에 기여함으로써 발생한다. RASR이 요구조건을 만족하지 못하면 최종 SAR 영상에서 실제 표적 위치와 다른 지점에 클러스터 성분이 겹쳐 나타날 수 있으며, 이는 표적 탐지 및 식별 성능 저하로 이어진다. 따라서 위성 SAR 시스템 설계 단계에서는 RASR 요구조건을 만족할 수 있도록 고각 방향 안테나 빔 패턴의 부엽 레벨을 정밀하게 제어해야 한다.

기존의 안테나 빔 패턴 최적화에서는 설계된 마스크 패턴과 실제 빔 패턴 사이의 초과 오차를 비용함수로 정의하고, 이를 최소화하는 방식이 주로 사용되었다. 이러한 방식은 마스크 상한을 초과하는 지점의 오차를 직접적으로 줄일 수 있다는 장점이 있으나, 부엽 영역 전체에 분포하는 전력의 형상과 분포 특성을 함께 고려하기에는 한계가 있다. 위성 SAR 시스템에서 거리방향 모호성은 특정 지점의 부엽 초과뿐 아니라 모호성 영역 전반에 걸친 부엽 전력 분포에 의해 결정되므로, 단순 초과 오차보다 부엽 전력의 전체적인 분포 특성을 반영하는 비용함수 설계가 필요하다^{[25]-[29]}.

본 논문에서는 위성 SAR 성능향상을 위하여 새로운

비용함수 기반 안테나 빔 패턴 최적화 기법을 제안한다. 제안한 비용함수는 마스크 상한을 초과하는 불요 부엽 전력 E_p 와 마스크 내부에 존재하는 부엽 전력 I_p 를 동시에 고려한다. 또한 두 전력 성분을 가중합한 뒤 Shannon 엔트로피 기반 정규화를 적용하여, 부엽 전력 분포의 집중도와 초과 성분을 함께 반영하는 비용함수를 구성한다. 이후 입자 군집 최적화(PSO: particle swarm optimization) 기법^{[30]-[34]}을 이용하여 안테나 소자의 급전 크기와 위상을 최적화하고, 최적화된 빔 패턴의 RASR 성능을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 SAR 시스템 성능변수와 안테나 마스크 패턴 설계 기법, RASR의 개념 및 특징을 설명하고, 새로운 비용함수 기반 안테나 빔 패턴 합성 및 최적화 기법을 서술한다. III장에서는 위성 SAR 시스템 설계 변수를 이용한 시뮬레이션 결과를 제시하고, 원시 빔 패턴과 제안한 비용함수를 통해 합성한 빔 패턴의 RASR 성능을 비교 분석한다. 마지막으로 IV장에서 결론을 도출한다.

II. 본 론

2-1 SAR 시스템 성능변수 분석 및 마스크 패턴 설계

위성 SAR 시스템에서 요구되는 성능을 만족하기 위해서는 안테나 빔 패턴과 SAR 시스템 성능변수 사이의 관계를 분석해야 한다. SAR 시스템의 대표적인 성능변수는 거리방향 해상도, 방위각방향 해상도, 관측 폭, NESZ, RA, RASR 등이 있다. 이러한 성능변수는 안테나의 크기, 배열 구조, 급전 분포, 빔 조향각, 주엽 이득, 3 dB 빔 폭, 부엽 레벨과 밀접한 관련을 갖는다.

평면 배열 안테나에서 방위각 방향의 안테나 크기는 방위각방향 빔 폭과 해상도에 영향을 미치며, 고각 방향의 안테나 크기는 거리방향 관측 폭과 관련된다. 고각 방향 빔 패턴의 주엽 폭은 관측 가능한 지표면 범위를 결정하며, 주엽 이득은 NESZ와 관련된다. 또한 주엽 주변의 마스크 상한 및 하한은 방사 정확도와 관련되고, 외부 부엽 영역의 마스크 레벨은 거리방향 모호성에 영향을 준다. 따라서 SAR 시스템 성능변수 요구조건을 만족하기 위해서는 각 성능변수와 대응되는 안테나 마스크 패턴을

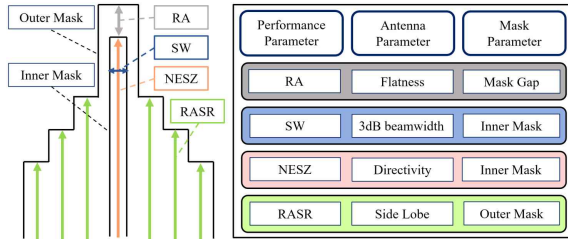


그림 1. 안테나 마스크 패턴과 SAR 시스템 성능변수의 관계도

Fig. 1. Relationship between antenna mask pattern and SAR system performance parameters.

설계한 뒤, 실제 안테나 빔 패턴이 해당 마스크를 만족하도록 최적화해야 한다.

그림 1은 안테나 마스크 패턴과 SAR 시스템 성능변수 사이의 관계를 나타낸다. 내부 마스크(inner mask)는 주로 관측 폭, NESZ, 주엽 이득과 관련되며, 외부 마스크(outer mask)는 부엽 레벨과 RASR 요구조건을 반영한다. 마스크 패턴 설계에서는 주엽 영역의 이득과 빔 폭을 유지하면서, RASR에 영향을 주는 모호성 영역의 부엽 레벨을 낮게 설정하는 것이 중요하다.

위성 SAR에서 RASR 요구조건을 만족하기 위해서는 모호성 영역에 해당하는 부엽 레벨을 조절해야 한다. 마스크 패턴의 부엽 레벨을 낮추면 해당 영역에서 수신되는 모호성 신호의 세기가 감소하고, 결과적으로 RASR이 개선된다. 따라서 본 논문에서는 SAR 시스템 성능변수 분석을 통해 주어진 RASR 요구조건을 만족할 수 있는 외부 마스크 패턴을 설계하고, 이후 새로운 비용함수를 이용하여 해당 마스크 패턴에 적합한 안테나 빔 패턴을 합성한다.

2-2 RASR의 개념 및 특징

RASR은 원하는 반사 신호(desired return signal)에 대한 거리방향 모호성 신호(ambiguous return signal)의 비율로 정의된다. 위성 SAR 시스템에서는 송신 펄스 간 시간 간격이 위성 고도에 비해 상대적으로 짧기 때문에, 이전 또는 이후에 방사된 펄스에 의해 형성된 클러터 반사 신호가 현재 수신되는 원하는 신호와 함께 수신될 수 있다. 이러한 현상은 거리방향 모호성을 유발하며, 고각 방향 안

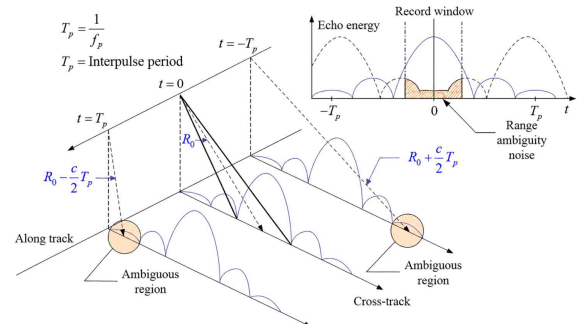


그림 2. 거리방향 모호성의 기하 형상

Fig. 2. Concept of range ambiguity.

테나 부엽을 통해 수신되는 신호 성분의 크기에 따라 RASR이 결정된다.

그림 2는 거리방향 모호성의 기하 구조를 나타낸다. 주엽을 통해 원하는 표적 신호가 수신되는 동안, 부엽 방향에 위치한 모호성 영역으로부터 클러터 신호가 함께 수신된다. 이때 모호성 신호는 SAR 영상 내에서 실제 위치와 다른 위치에 나타날 수 있으며, 영상 해석 성능을 저하시킨다.

RASR은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$RASR(t_k) = \frac{\sum_{j=-N_h, j \neq 0}^{+N_h} \frac{\sigma_{k,j} \times G(\theta_{k,j})}{(R_{k,j})^3 \times \sin(\psi_{k,j})}}{\frac{\sigma_{k,0} \times G(\theta_{k,0})}{(R_{k,0})^3 \times \sin(\psi_{k,0})}} \quad (1)$$

식 (1)은 식 (2)와 같이 단순화하여 나타낼 수 있다.

$$RASR(t_k) = \frac{\sum_{j=-N_h, j \neq 0}^{+N_h} b_{k,j} \times G(\theta_{k,j})}{a_k} \quad (2)$$

여기서

$$a_k = \frac{\sigma_{k,0} \times G(\theta_{k,0})}{(R_{k,0})^3 \times \sin(\psi_{k,0})} \quad (3)$$

$$b_{k,j} = \frac{\sigma_{k,j}}{(R_{k,j})^3 \times \sin(\psi_{k,j})} \quad (4)$$

이다. $\sigma_{k,j}$ 는 k 번째 t_k 시간에서 j 번째 펄스의 후방산란

계수(backscattering coefficient)를 나타내며, $R_{k,j}$ 는 거리, $\psi_{k,j}$ 는 입사각, $G(\theta_{k,j})$ 는 해당 방향에서의 안테나 빔 패턴 이득을 나타낸다.

식 (2)에서 분모 a_k 는 원하는 신호 성분에 해당하며, 분자는 거리방향 모호성 영역에서 수신되는 신호 성분을 나타낸다. 동일한 SAR 관측 기하와 지표면 산란 조건을 가정하면 RASR 개선을 위해 직접적으로 조절 가능한 항은 안테나 빔 패턴 $G(\theta_{k,j})$ 이다. 따라서 RASR 요구조건을 만족시키기 위해서는 모호성 영역에 해당하는 고각 방향 부엽 레벨을 낮추는 안테나 빔 패턴 최적화가 필요하다.

마스크 패턴 설계 관점에서 RASR 요구조건은 외부 부엽 마스크 레벨을 통해 반영할 수 있다. 현재 빔 패턴으로 계산한 RASR이 요구조건을 만족하지 못하는 경우, 모호성 영역에 해당하는 마스크 레벨을 일정량 감소시켜 최적화 목표를 재설정한다. 예를 들어 RASR 요구조건이 현재 RASR보다 x dB 낮게 설정되어야 할 경우, 모호성 영역의 빔 패턴 전력은 식 (5)와 같이 조정될 수 있다.

$$[RASR_{req}]_{dB} = [RASR(t_k)]_{dB} - xdB \quad (5)$$

전력 패턴 기준에서 이는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\hat{G}(\theta_{k,j}) \frac{G(\theta_{k,j})}{10^{\left(\frac{x}{10}\right)}} \quad (6)$$

따라서 dB 기준에서 모호성 영역의 마스크 패턴을 x dB 만큼 낮추는 것은, 선형 전력 기준에서 해당 영역의 빔 패턴 전력을 $10^{x/10}$ 으로 나누는 것과 같다.

2.3 엔트로피 비용함수 기반 안테나 빔 패턴 합성 및 최적화 기법

평면 배열 안테나는 수평 및 수직 방향으로 배열된 다수의 안테나 소자로 구성되며, 안테나 빔 패턴은 각 소자의 급전 크기와 위상에 의해 결정된다. 위성 SAR 시스템에서 RASR은 주로 고각 방향의 부엽 레벨에 의해 영향을 받으므로, 본 논문에서는 고각 방향 1차원 배열 빔 패턴을 대상으로 최적화를 수행한다. 즉, SAR 시스템 성능변

수 요구조건으로부터 설계된 마스크 패턴을 기준으로, 각 안테나 소자의 급전 크기와 위상을 조정하여 마스크 패턴에 적합한 빔 패턴을 합성한다.

고각 방향 배열 안테나의 two-way 빔 패턴은 송신 빔 패턴과 수신 빔 패턴의 곱으로 나타낼 수 있으며, 최적화 변수는 각 소자의 급전 크기와 위상으로 구성된다.

$$P_{tw}(\theta;w) = P_{tx}(\theta;w)P_{rx}(\theta;w) \quad (7)$$

여기서 $w = \{a_n, \phi_n\}_{n=1}^N$, $P_{tw}(\theta;w)$ 는 two-way 빔 패턴의 선형 전력 값, $P_{tx}(\theta;w)$ 와 $P_{rx}(\theta;w)$ 는 각각 송신 및 수신 빔 패턴의 선형 전력 값을 의미한다. 또한 a_n 과 ϕ_n 은 각각 n 번째 안테나 소자의 급전 크기와 위상을 나타낸다. 본 논문에서는 송신 및 수신 안테나 패턴이 동일하다고 가정하여, 동일한 급전 조건에 대해 two-way 빔 패턴을 계산한다.

기존의 안테나 빔 패턴 최적화에서는 빔 패턴이 마스크 패턴의 상한 또는 하한을 벗어나는 정도를 비용함수로 정의하고, 이를 최소화하는 방식이 주로 사용되었다. 그러나 이러한 방식은 마스크를 초과한 일부 지점의 오차는 줄일 수 있지만, 부엽 영역 전체에 분포하는 전력의 특성을 함께 고려하기에는 한계가 있다. 위성 SAR 시스템에서 RASR은 특정 부엽 피크뿐 아니라 모호성 영역 전반의 부엽 전력 분포에 의해 결정되므로, 부엽 전력의 전체적인 분포를 반영하는 비용함수 설계가 필요하다.

이를 위해 본 논문에서는 새로운 비용함수를 적용한다. 그림 3에서 점선은 상부 부엽 제한선을 나타내며, 제한선을 초과하는 부엽 전력은 초과 불요 부엽 전력 E_p 로, 제한선 내부에 포함되는 부엽 전력은 내부 부엽 전력 I_p 로 정의된다. 제한한 비용함수는 부엽 영역에서 마스크 상한을 초과하는 불요 부엽 전력 E_p 와 마스크 내부에 존재하는 부엽 전력 I_p 를 동시에 고려한다. 부엽 영역의 각 각도 샘플을 θ_m , 마스크 상한을 $U(\theta_m)$ 라 하면 E_p 와 I_p 는 식 (8)과 같이 정의된다.

$$E_p(\theta_m) = \max[P_{tw}(\theta_m;w) - U(\theta_m), 0] \quad (8)$$

$$I_p(\theta_m) = \min[P_{tw}(\theta_m;w), U(\theta_m)] \quad (9)$$

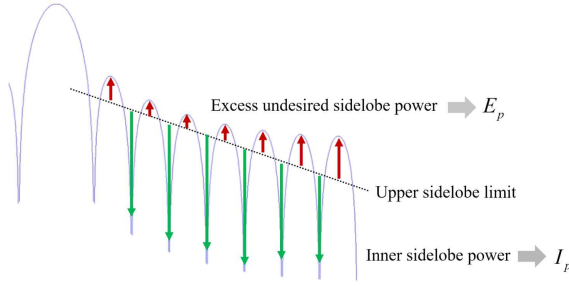


그림 3. 상부 부엽 제한선 기준 부엽 전력 성분의 개념도
Fig. 3. Conceptual illustration of sidelobe power components with respect to the upper sidelobe limit.

식 (8)에서 E_p 는 빔 패턴이 마스크 상한을 초과한 전력 성분을 의미하며, 이는 RASR을 악화시킬 수 있는 주요 요인이다. 반면 식 (9)에서 I_p 는 마스크를 만족하더라도 부엽 영역 내부에 남아 있는 전력 성분을 의미한다. 따라서 E_p 만을 최소화하는 것이 아니라 I_p 까지 함께 고려하면, 마스크 초과 부엽뿐만 아니라 부엽 영역 전체의 전력 분포를 함께 제어할 수 있다.

제안한 비용함수에서는 E_p 와 I_p 를 가중합한 뒤 Shannon entropy^{[35]-[38]} 기반 정규화를 적용한다. 정규화된 부엽 전력 분포와 비용함수는 식 (10)과 같이 정의된다.

$$f_m = \frac{\alpha I_p(\theta_m) + (1-\alpha)E_p(\theta_m)}{\sum_{l=1}^M [\alpha I_p(\theta_l) + (1-\alpha)E_p(\theta_l)]} \quad (10)$$

$$C(w) = - \sum_{m=1}^M f_m \log_2 f_m \quad (11)$$

여기서 M 은 부엽 영역에서의 각도 샘플 개수이며, α 는 $0 \leq \alpha \leq 1$ 의 값을 갖는 가중계수로서 E_p 와 I_p 의 반영 비율을 조절한다. α 가 클수록 마스크 내부에 존재하는 부엽 전력 분포의 영향이 크게 반영되고, α 가 작을수록 마스크 상한을 초과하는 불요 부엽 전력의 영향이 크게 반영된다. 본 논문에서는 $\alpha=0.8$ 를 적용한다. $\alpha=0.8$ 로 설정한 이유는 부엽 영역에서 E_p 와 I_p 가 갖는 전력 분포 특성을 반영하기 위함이다. 본 연구에서 고려한 배열 안테나 빔 패턴에서는 마스크 상한을 초과하는 불요 부엽 전력 E_p 가 마스크를 초과한 일부 각도 샘플 또는 특정

부엽 피크에서 국부적으로 나타나는 반면, 마스크 내부에 존재하는 부엽 전력 I_p 는 부엽 영역 전반에 걸쳐 연속적으로 분포한다. 따라서 RASR에 영향을 주는 모호성 영역 전체의 전력 분포를 고려할 때, I_p 의 영향이 E_p 보다 상대적으로 크게 나타날 수 있다. 이에 따라 본 논문에서는 I_p 에 더 큰 비중을 부여하여 부엽 영역 전체의 잔류 전력 분포를 안정적으로 제어하되, $(1-\alpha)E_p$ 항을 통해 마스크 상한을 초과하는 불요 부엽 전력도 함께 억제할 수 있도록 $\alpha=0.8$ 을 적용하였다.

식 (11)의 비용함수는 부엽 영역에서의 전력 분포를 확률 분포 형태로 정규화한 뒤, Shannon entropy를 이용하여 전력 분포의 특성을 평가한다. 이때 마스크를 초과하는 E_p 성분이 감소하고 부엽 전력 분포가 안정적으로 제어될수록 비용함수 값도 감소한다. 따라서 제안한 비용함수는 단순히 마스크 초과 지점의 오차를 줄이는 기존 방식과 달리, 모호성 영역 전체의 부엽 전력 분포를 고려하여 RASR 개선에 적합한 빔 패턴을 합성할 수 있다.

본 논문에서는 식 (11)의 비용함수를 최소화하기 위해 입자 군집 최적화(PSO: particle swarm optimization) 기법을 사용한다. PSO는 각 입자가 안테나 소자의 급전 크기와 위상을 하나의 해로 갖고 탐색을 수행하며, 반복 과정을 통해 비용함수가 최소가 되는 최적 급전 조건을 산출한다. 최종적으로 PSO를 통해 결정된 급전 크기와 위상을 배열 안테나에 적용하면, 설계된 마스크 패턴을 만족하면서 RASR을 개선할 수 있는 최적화된 안테나 빔 패턴을 형성할 수 있다.

III. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 제안한 새로운 비용함수 기반 안테나 빔 패턴 최적화 기법의 성능을 검증하기 위해 위성 SAR 시스템 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션에서는 위성 SAR 운용 조건을 고려하여 점 산란원 모델을 표적으로 설정하고, 거리방향 모호성 영역에 클러터 산란원을 배치하였다. 표적은 주엽 방향에서 수신되는 원하는 신호로 모델링하였으며, 클러터는 부엽 방향에서 수신되는 모호성 신호로 모델링하였다.

그림 4는 위성 SAR 시뮬레이션의 기하 구조를 나타낸다. 위성은 일정 고도에서 지표면을 관측하며, 안테나 빔은 고각 방향으로 지표면 관측 영역을 형성한다. 주엽 영역에는 표적 산란원이 위치하고, 모호성 영역에는 클러터 산란원이 분포한다. 각 모호성 영역에 배치되는 클러터의 수는 해당 영역의 폭에 비례하도록 설정하였다. 시뮬레이션에 사용한 주요 설계 변수는 표 1과 같다.

먼저 균일 급전 크기와 위상을 적용하여 원시 빔 패턴을 생성하였다. 본 실험에서는 선형 배열 기하구조를 기반으로 제안한 기법으로 최적화를 수행하고 형성된 빔 패턴을 평면 배열 격자로 확장하여 2차원 빔 패턴을 형성하였다.

그림 5(a)는 안테나 소자의 기하도를 나타내며, 그림 5(b)는 원시 two-way 빔 패턴을 나타낸다. 원시 빔 패턴은 주엽 영역에서는 높은 이득을 형성하지만, 거리 방향의

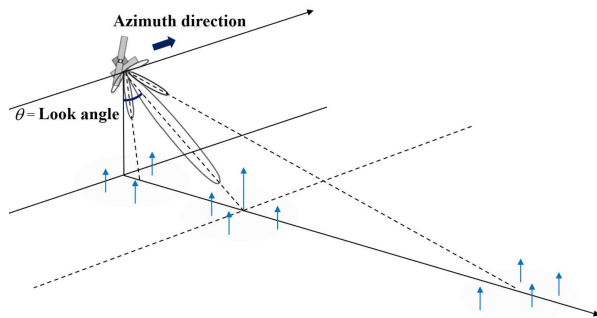
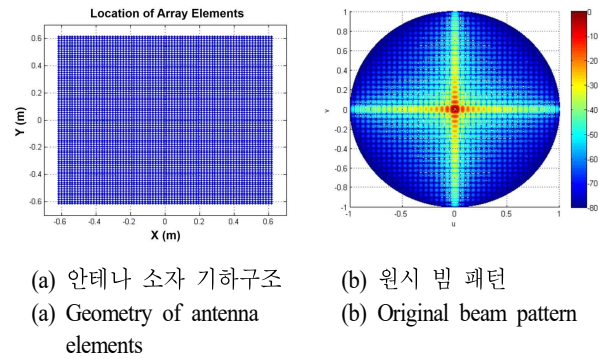


그림 4. 위성 SAR 시뮬레이션 개념도
Fig. 4. The spaceborne SAR geometry.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Table 1. Simulation parameters.

Targets	11
Clutter scatterers	1,000
Guard regions	65
Center frequency	9.6 GHz
RASR requirement	≤ -21 dB
Range beamwidth	2.4 deg
Azimuth beamwidth	0.4 deg
Antenna elements	80×80
Satellite altitude	552 km



(a) 안테나 소자 기하구조 (b) 원시 빔 패턴
(a) Geometry of antenna elements (b) Original beam pattern

그림 5. 안테나 소자 기하구조 및 원시 2차원 빔 패턴

Fig. 5. Geometry of antenna elements and original two-dimensional beam pattern.

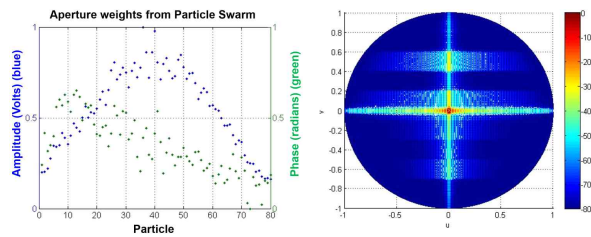
일부 부엽 영역에서 상대적으로 높은 부엽 레벨이 나타난다. 이러한 부엽 성분은 거리방향 모호성 영역으로부터 수신되는 클러터 신호의 크기를 증가시킬 수 있으며, 결과적으로 RASR 성능을 저하시킨다. 원시 빔 패턴을 이용하여 RASR을 계산한 결과, RASR 최댓값은 -19.75 dB로 나타났다. 이는 본 논문에서 설정한 RASR 요구조건인 -21 dB 이하를 만족하지 못하는 값이다. 따라서 원시 빔 패턴의 거리 방향 부엽 레벨을 낮추고, 모호성 영역에서의 불요 전력 성분을 억제하기 위한 안테나 빔 패턴 최적화가 필요함을 확인할 수 있다.

이후 SAR 시스템 성능변수 요구조건을 기반으로 안테나 마스크 패턴을 설계하고, 제안한 비용함수를 이용하여 빔 패턴 최적화를 수행하였다. 제안한 비용함수는 마스크 상한을 초과하는 불요 부엽 전력 E_p 와 마스크 내부에 존재하는 부엽 전력 I_p 를 동시에 고려한다. 또한 두 전력 성분을 가중합한 뒤 Shannon entropy 기반 정규화를 적용함으로써, 특정 부엽 피크뿐 아니라 부엽 영역 전체의 전력 분포가 함께 제어되도록 하였다. 최적화에는 PSO 기법을 사용하였으며, 각 입자는 배열 안테나 소자의 급전 크기와 위상을 최적화 변수로 갖는다. 본 연구의 PSO 알고리즘은 MATLAB R2021a 환경에서 직접 구현하였다. 각 입자는 고각 방향 배열 소자의 정규화된 급전 크기와 위상을 포함하는 $2N$ 차원 벡터로 정의되며, 본 시뮬레이션에서는 $N=80$ 이므로 입자 차원은 160이다. 또한 PSO의 입자 수는 50개, 최대 반복 횟수는 8,000회, 관성 가중치는 0.4,

개인 최적해 및 전역 최적해에 대한 가속 계수는 각각 2로 설정하였다. 반복 과정에서 입자의 과도한 이동을 방지하기 위해 최대 RMS 속도는 0.3으로 제한하였다. 모든 시뮬레이션은 AMD Ryzen 9 5900X 12코어 프로세서(3.70 GHz) 환경에서 수행되었으며, 1회 최적화에 평균 10초가 소요되었다.

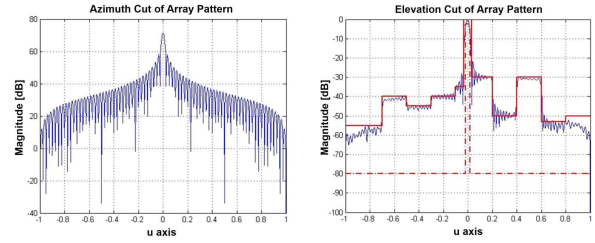
그림 6(a)는 제안한 비용함수를 통해 획득한 최적화된 급전 크기 및 위상을 보여준다. 그림 6(b)는 해당 급전 크기와 위상을 통해 합성한 최적화된 빔 패턴을 나타낸다. 최적화된 빔 패턴은 그림 5(b)의 원시 빔 패턴과 비교하여 거리 방향 부엽 레벨이 감소하였으며, 모호성 영역에서의 불요 전력 성분이 억제된 것을 확인할 수 있다. 특히 RASR에 직접적인 영향을 미치는 거리 방향 외부 부엽 영역에서 빔 패턴이 설계된 마스크 패턴을 만족하도록 조정되었으며, 주엽 영역의 형상은 유지하면서 부엽 전력 분포가 개선되었다.

최적화된 빔 패턴의 방향별 특성을 보다 자세히 분석하기 위해 방위각 방향 및 거리 방향 단면도를 각각 확인하였다. 그림 7(a)는 최적화된 빔 패턴의 방위각 방향 단면도를 나타낸다. 방위각 방향에서는 설계된 빔 폭과 주엽 특성이 유지되며, 방위각 방향 관측 성능에 필요한 빔 형상이 안정적으로 형성됨을 확인할 수 있다. 이는 제안한 최적화 과정이 거리 방향 부엽 억제를 주요 목표로 수행되었음에도, 평면 배열 안테나의 전체 빔 형상에서 방위각 방향 성능이 유지됨을 의미한다.



(a) 최적화된 급전 크기 및 위상 분포
(b) 최적화된 빔 패턴
(a) Optimized amplitude and phase excitations
(b) Optimized beam pattern

그림 6. 최적화된 급전 분포 및 안테나 빔 패턴
Fig. 6. Optimized excitation distribution and antenna beam pattern.



(a) 빔 패턴 방위각 방향 단면도
(b) 빔 패턴 고각 방향 단면도
(a) Azimuth-direction cut of the beam pattern
(b) Elevation-direction cut of the beam pattern

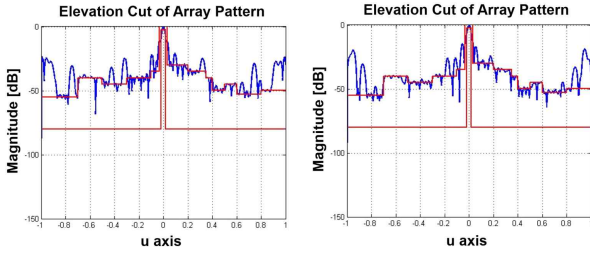
그림 7. 제안한 비용함수를 통해 최적화된 빔 패턴의 방향별 단면도

Fig. 7. Cross-sectional patterns of the beam pattern optimized using the proposed cost function.

그림 7(b)는 최적화된 빔 패턴의 거리 방향 단면도를 나타낸다. 거리 방향 단면도에서는 주엽 주변의 빔 폭이 유지되면서, 모호성 영역에 해당하는 부엽 레벨이 원시 빔 패턴 대비 감소한 것을 확인할 수 있다. 특히 외부 마스크 영역에서 초과 부엽 성분이 억제되어 거리방향 모호성 신호의 크기를 줄일 수 있는 빔 패턴이 형성되었다. 따라서 제안한 비용함수 기반 최적화 기법은 RASR 개선에 직접적으로 기여할 수 있는 거리 방향 부엽 제어에 효과적임을 확인할 수 있다.

제안한 비용함수를 적용한 최적화 이후 RASR 최대값은 -22.24 dB로 계산되었다. 이는 원시 빔 패턴의 RASR 최대값인 -19.75 dB와 비교하여 약 2.49 dB 개선된 결과이다. 또한 최적화 이후의 RASR 값은 본 논문에서 설정한 요구조건인 -21 dB 이하를 만족한다. 이를 통해 제안한 새로운 비용함수 기반 안테나 빔 패턴 최적화 기법이 거리방향 모호성 저감에 효과적이며, 위성 SAR 시스템의 RASR 성능 요구조건을 만족시킬 수 있음을 확인하였다.

추가적으로 비용함수에서 E_p 와 I_p 각 성분의 반영 여부가 최적화 결과에 미치는 영향을 확인하기 위하여 α 를 양 끝값으로 설정한 비교 실험을 수행하였다. 그림 8(a)는 $\alpha=1$ 으로 설정하여 마스크 내부에 존재하는 부엽 전력 I_p 만을 고려한 경우의 빔 패턴을 나타내며, 그림 8(b)는 $\alpha=0$ 으로 설정하여 마스크 상한을 초과하는 불요 부엽 전력 E_p 만을 고려한 경우의 빔 패턴을 나타낸다. $\alpha=1$ 인 경



(a) $\alpha=1$ 인 경우의 빔 패턴 단면도 (b) $\alpha=0$ 인 경우의 빔 패턴 단면도
(a) Beam pattern cut for $\alpha=1$ (b) Beam pattern cut for $\alpha=0$

그림 8. α 값의 설정에 따른 최적화 빔 패턴 단면도
Fig. 8. Beam pattern optimization results for extreme values of α .

우에는 I_p 만 비용함수에 반영되므로, 마스크 내부에 존재하는 부엽 전력 분포는 고려되지만 마스크 상한을 초과하는 불요 부엽 전력 E_p 에 대한 직접적인 제어 항은 포함되지 않는다. 그 결과, 일부 부엽 영역에서 빔 패턴이 설계된 마스크 패턴에 적절히 수렴하지 못하는 형상이 나타났다. 반대로 $\alpha=0$ 인 경우에는 E_p 만 비용함수에 반영되므로, 마스크 상한을 초과한 지점의 전력 성분은 억제 대상이 되지만 마스크 내부에 분포하는 잔류 부엽 전력 I_p 는 비용함수에 반영되지 않는다. 이 경우에도 부엽 영역 전체의 전력 분포가 안정적으로 제어되지 못하여, 최적화된 빔 패턴이 목표 마스크 패턴에 적합하게 형성되지 않는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 E_p 또는 I_p 중 하나의 전력 성분만을 고려하는 비용함수로는 SAR 시스템의 RASR 개선에 필요한 부엽 영역 전반의 전력 분포와 마스크 초과 성분을 동시에 제어하기 어렵다는 점을 보여준다. 따라서 본 논문에서는 마스크 내부 부엽 전력 분포의 영향을 주로 반영하면서도 마스크 상한을 초과하는 불요 부엽 전력에 대한 제어 항을 함께 포함하는 $\alpha=8$ 을 적용하였다. 이를 통해 그림 6(b) 및 그림 7(b)와 같이 설계된 마스크 패턴에 보다 안정적으로 부합하는 빔 패턴을 형성할 수 있었으며, 최종적으로 RASR 요구조건을 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

결과적으로 제안한 기법은 원시 빔 패턴에서 나타나는 거리 방향 부엽 전력 성분을 효과적으로 억제하고, 모호성 영역의 전력 분포를 개선함으로써 RASR 성능을 향상

시킨다. 또한 최적화된 2차원 빔 패턴과 방향별 단면도 분석을 통해, 제안한 비용함수가 주엽 특성을 유지하면서도 SAR 시스템 성능에 중요한 부엽 영역을 안정적으로 제어할 수 있음을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 위성 SAR 시스템 성능향상을 위한 새로운 비용함수 기반 안테나 빔 패턴 최적화 기법을 제안하였다. 위성 SAR 시스템에서 안테나 빔 패턴은 거리방향 해상도, 방위각방향 해상도, 관측 폭, NESZ, RA, RASR 등의 성능변수와 밀접하게 관련되며, 특히 고각 방향 부엽 레벨은 거리방향 모호성 신호의 크기를 결정하는 핵심 요소이다. 따라서 RASR 요구조건을 만족시키기 위해서는 모호성 영역에 해당하는 부엽 전력의 효과적인 제어가 필요하다.

제안한 비용함수는 마스크 패턴의 상한을 초과하는 불요 부엽 전력 E_p 와 마스크 내부에 존재하는 부엽 전력 I_p 를 동시에 고려한다. 또한 두 전력 성분을 가중합한 뒤 Shannon 엔트로피 기반 정규화를 적용함으로써, 부엽 영역 전체의 전력 분포를 비용함수에 반영하였다. 이를 통해 특정 부엽 피크의 초과 성분뿐 아니라, 허용 마스크 내부에 분포하는 부엽 전력까지 함께 제어할 수 있다.

시뮬레이션에서는 위성 SAR 시스템 설계 변수를 기반으로 원시 빔 패턴과 제안한 비용함수를 통해 합성한 최적화 빔 패턴의 RASR 성능을 분석하였다. 원시 빔 패턴의 RASR 최대값은 -19.75 dB로 계산되어 요구조건을 만족하지 못하였으나, 제안한 비용함수를 적용한 최적화 이후 RASR 최대값은 -22.24 dB로 개선되어 주어진 요구조건을 만족하였다. 이를 통해 제안한 새로운 비용함수 기반 안테나 빔 패턴 최적화 기법이 위성 SAR 시스템의 거리방향 모호성 저감 및 성능향상에 효과적임을 확인하였다.

향후 연구에서는 다양한 관측 모드와 빔 조향 조건에 대해 제안한 비용함수의 적용성을 확장하고, NESZ, 관측 폭, 방사 정확도 등 다른 SAR 시스템 성능변수와의 복합 최적화 문제로 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] M. S. Kang, S. J. Lee, "Super-resolution SAR imaging via compressive sensing", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 23, p. 4009305, May 2026.
- [2] M. S. Kang, S. J. Lee, and S. Han, "Image-domain discrimination of real ship targets and azimuth-ambiguity ghosts in maritime SAR images", *IEEE Access*, vol. 14, pp. 91738-91754, Jun. 2026.
- [3] B. S. Kang, J. H. Bae, M. S. Kang, E. Yang, and K. T. Kim, "Bistatic-ISAR cross-range scaling," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 4, pp. 1962-1973, Aug. 2017.
- [4] S. H. Lee, J. H. Bae, M. S. Kang, and K. T. Kim, "Efficient ISAR autofocus technique using eigenimages," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, no. 2, pp. 605-616, Feb. 2017.
- [5] M. S. Kang, J. M. Baek, "Effective denoising of InSAR phase images via compressive sensing," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 17, pp. 17772-17779, May 2024.
- [6] B. S. Kang, J. H. Bae, M. S. Kang, E. Yang, and K. T. Kim, "ISAR cross-range scaling via joint estimation of rotation center and velocity," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 52, no. 4, pp. 2023-2029, Aug. 2016.
- [7] M. S. Kang, J. H. Bae, B. S. Kang, and K. T. Kim, "ISAR cross-range scaling using iterative processing via principal component analysis and bisection algorithm," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 15, pp. 3909-3918, Aug. 2016.
- [8] M. S. Kang, J. M. Baek, "Robust ISAR autofocus for nonuniformly rotating target," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 61, no. 4, pp. 8972-8983, Aug. 2025.
- [9] S. H. Lee, J. H. Bae, M. S. Kang, C. H. Kim, and K. T. Kim, "ISAR autofocus by minimizing entropy of eigenimages," in *2016 IEEE Radar Conference*, Philadelphia, PA, May 2016.
- [10] M. S. Kang, S. H. Lee, K. T. Kim, and J. H. Bae, "Bistatic ISAR imaging and scaling of highly maneuvering target with complex motion via compressive sensing," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, no. 6, pp. 2809-2826, Dec. 2018.
- [11] S. J. Jeong, B. S. Kang, M. S. Kang, and K. T. Kim, "ISAR cross-range scaling using radon transform and its projection," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, no. 5, pp. 2590-2600, Oct. 2018.
- [12] M. S. Kang, K. T. Kim, "ISAR imaging and cross-range scaling of high-speed manoeuvring target with complex motion via compressive sensing," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 12, no. 3, pp. 301-311, Mar. 2018.
- [13] B. S. Kang, M. S. Kang, I. O. Choi, C. H. Kim, and K. T. Kim, "Efficient autofocus chain for ISAR imaging of non-uniformly rotating target," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 17, pp. 5466-5478, Sep. 2017.
- [14] M. S. Kang, B. S. Kang, S. H. Lee, and K. T. Kim, "Bistatic-ISAR distortion correction and range and cross-range scaling," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 16, pp. 5068-5078, Aug. 2017.
- [15] M. S. Kang, "ISAR autofocus using Rényi entropy minimization," *J Korean Inst Electromagn Eng Sci* vol. 36, no. 10, pp. 1003-1009, Oct. 2025.
- [16] M. S. Kang, "SAR target classification enhancement via synthetic defocused image augmentation using kinematic motion modeling," *IEEE Access*, vol. 14, pp. 6096-6105, Jan. 2026.
- [17] S. B. Chae, M. S. Kang, "Comparison of spatial- and frequency-domain-based SAR target classification performance," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 36, no. 5, pp. 528-534, May 2025.
- [18] M. S. Kang, "Enhanced SAR image formation via a modified omega-K algorithm," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 163509-163520, Sep. 2025.
- [19] S. B. Chae, M. S. Kang, "Comparison of spatial- and eigenspace-domain-based deep learning SAR target classification performances," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol.

- 36, no. 6, pp. 585-593, Jun. 2025.
- [20] M. S. Kang, J. M. Baek, "Compressive sensing-based omega-K algorithm for SAR focusing," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 22, p. 4003405, Jan. 2025.
- [21] M. S. Kang, J. M. Baek, "SAR image reconstruction via incremental imaging with compressive sensing," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 59, no. 4, pp. 4450-4463, Aug. 2023.
- [22] S. B. Chae, M. S. Kang, "Multidomain-based deep learning for synthetic aperture radar target classification," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 36, no. 7, pp. 708-715, Jul. 2025.
- [23] M. S. Kang, J. M. Baek, "Efficient SAR imaging integrated with autofocus via compressive sensing," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, p. 4514905, Oct. 2022.
- [24] M. S. Kang, K. T. Kim, "Compressive sensing based SAR imaging and autofocus using improved Tikhonov regularization," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 14, pp. 5529-5540, Jul. 2019.
- [25] M. S. Kang, K. T. Kim, "Ground moving target imaging based on compressive sensing framework with single-channel SAR," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 1238-1250, Feb. 2020.
- [26] S. H. Lee, I. O. Choi, M. S. Kang, and K. T. Kim, "Efficient sparse representation algorithm for accurate DOA estimation of multiple targets with single measurement vector," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 60, no. 1, pp. 31-37, Jan. 2018.
- [27] M. Kang, J. Baek, "Efficient and accurate synthesis for array pattern shaping," *Sensors*, vol. 22, no. 15, p. 5537, Jul. 2022.
- [28] N. H. Jeong, S. H. Lee, M. S. Kang, C. W. Gu, C. H. Kim, and K. T. Kim, "Target prioritization for multi-function radar using artificial neural network based on steepest descent method," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 1, pp. 68-76, Jan. 2018.
- [29] M. Kang, J. Baek, "SAR image change detection via multiple-window processing with structural similarity," *Sensors*, vol. 21, no. 19, p. 6645, Oct. 2021.
- [30] M. S. Kang, "SAR autofocus via backprojection-based flight trajectory estimation using particle swarm optimization," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 23, p. 4009005, May 2026.
- [31] M. S. Kang, S. J. Lee, S. H. Lee, and K. T. Kim, "ISAR imaging of high-speed maneuvering target using gapped stepped-frequency waveform and compressive sensing," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 26, no. 10, pp. 5043-5056, Oct. 2017.
- [32] M. S. Kang, Y. J. Won, B. G. Lim, and K. T. Kim, "Efficient synthesis of antenna pattern using improved PSO for spaceborne SAR performance and imaging in presence of element failure," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 16, pp. 6576-6587, Aug. 2018.
- [33] 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, Aug. 2018.
- [34] M. S. Kang, S. H. Lee, S. H. Park, S. Y. Shin, E. Yang, and K. T. Kim, "Inter-pulse motion compensation of an ISAR image generated by stepped chirp waveform using improved particle swarm optimization," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 26, no. 2, pp. 218-225, Feb. 2015.
- [35] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 379-423, Jul. 1948.
- [36] M. S. Kang, J. H. Bae, S. H. Lee, and K. T. Kim, "Efficient ISAR autofocus via minimization of Tsallis entropy," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 52, no. 6, pp. 2950-2960, Dec. 2016.
- [37] M. S. Kang, K. T. Kim, "Automatic SAR image registration via Tsallis entropy and iterative search process," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 14, pp. 7711-7720, Jul. 2020.
- [38] M. S. Kang, "Robust ISAR autofocus via Newton-based Tsallis entropy minimization," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 22, p. 3505905, Aug. 2025.

강 민 석 [국립공주대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7021-6873>



2013년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)

2015년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학
학과 (공학석사)

2019년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학
학과 (공학박사)

2019년 3월~2020년 8월: 국방과학연구소
선임연구원

2020년 9월~2024년 8월: 국립공주대학교 전기전자제어공학부
조교수

2024년 9월~현재: 국립공주대학교 전기전자제어공학부 부교수
[주 관심분야] 레이더 신호 및 영상처리, 레이더 영상 활용, 배열 안테나 합성 및 빔 패턴 최적화, 최적화 이론 및 압축센싱 응용, 딥러닝