

지상 레이더에 의한 위성 SAR 재밍 시나리오 설계 및 효과 분석

Scenario Design and Analysis of Satellite SAR Jamming Performance by Ground Radar

이희우 · 최민호 · 이우경 · 김성표*

Hee-Woo Lee · Min-Ho Choi · Woo-Kyung Lee · Seong-Pyo Kim*

요약

SAR(synthetic aperture radar) 영상 기술은 군사 및 국방 응용 분야에서 널리 활용되고 있다. 위성 SAR 시스템은 고정 궤도에서 운용됨에 따라 지상 레이더 신호로 인한 재밍에 취약하다. 본 논문에서는 실제 위성 SAR에서 발생한 간섭 사례를 통해 재밍 효과를 정량적으로 분석하고, 이를 기반으로 다양한 재밍 시나리오를 설계한다. JCR(jamming to clutter ratio)을 주요 재밍 성능 지표로 설정하고, 지상 재머와 위성 시스템 간의 관계를 분석한다. 다양한 레이더 사양 및 위성 궤도에 따른 SAR 영상 분석 모의실험을 수행하여 효과적인 재밍 발생 환경을 제시한다. 지상 재머 시스템의 성능에 따른 SAR 영상의 품질 저하를 확인하고, 실제 SAR 재밍 사례와 비교하여 검증한다. 본 연구는 위성 SAR 재밍에 대한 이해를 높이고, 적대적 우주 감시 시스템에 대한 효과적인 방어 전략 개발에 기여할 수 있을 것이다.

Abstract

Synthetic aperture radar (SAR) imaging is critical in military and national defense applications. Spaceborne SAR systems operate in fixed orbits, making them vulnerable to the jamming effects of ground radar signals. This study quantitatively analyzed jamming effects based on actual interference cases observed in the currently operational satellite SAR. Subsequently, various jamming scenarios were designed for hostile satellite SAR systems. SAR jamming simulations were conducted based on the ground radar specifications derived from real jamming cases by considering the jamming-to-clutter ratio (JCR) as a key metric for evaluating the jamming performance. The SAR image corruption was quantitatively analyzed for various ground jammers, with the results verified by comparison with real SAR jamming cases. This study attempted to understand the principles of satellite SAR jamming and contribute to the development of defense strategies against adversarial space surveillance systems in the near future.

Key words: SAR, Jamming, Jammer, JCR

I. 서론

합성 개구 레이더(SAR: synthetic aperture radar)는 주 · 야간, 날씨 등에 영향을 받지 않고, 전자기파를 송 · 수신

「이 논문은 국방과학연구소의 대위성재밍체계 사전개념연구 중 위성 SAR 시스템의 재밍효과 분석 연구(계약번호: UE222043AD)의 지원으로 수행되었다. 한국항공대학교 항공전자정보공학과(Department of Electronic and Information Engineering, Korea Aerospace University)

*국방과학연구소(Agency for Defence Development)

· Manuscript received January 16, 2024 ; Revised January 25, 2024 ; Accepted February 5, 2024. (ID No. 20240116-008)

· Corresponding Author: Woo-Kyung Lee (e-mail: wklee@kau.ac.kr)

하여 지형 및 표적에 대한 고해상도 영상을 형성하는 레이더 기술로 목표 영역에 대한 안정적인 영상 정보 획득이 가능하다^{[1][2]}. SAR 영상 기술은 국방 분야에서 감시정찰, 표적 탐지 등 식별을 목적으로 널리 활용되는데, 최근 현대전에서의 감시정찰 활용도가 높아지고 전자전 기능이 강화되면서, 재밍(jamming)을 인가하거나 대응하는 연구의 필요성이 증가하고 있다^[3]. 특히 최근 소형 위성을 활용한 기술의 발전으로 위성 개발과 운용의 장벽이 낮아지고 있으며, 국내에서도 주변 적성국의 감시 위성에 대응할 수 있는 필요성이 대두된다.

감시용 위성 SAR는 X-대역 이하에서 운용되어 지상 레이더 및 통신 간섭원으로 인한 영상 품질 저하의 가능성이 크고, 이는 실제 획득된 다수의 영상 사례를 통해 확인되고 있다. 이러한 전파 간섭이나 재밍은 SAR 영상을 왜곡시키고, 표적식별 능력을 저하시키는 등 다양한 방식으로 영상 품질에 영향을 미친다^[2]. 일정한 궤도를 따라 움직이는 위성에 장착된 SAR 시스템은 인위적인 지상 재밍 신호에 매우 취약할 수 있으며, 재머(jammer)의 종류 및 운용 방식에 따라 시스템 성능이 마비될 가능성도 있다^[2]. 현재까지 SAR 재밍 기술들은 재머 시스템의 현실적인 제약이 반영되지 않은 이상적인 재밍 신호처리 환경을 가정하는 경우가 많으며, 실제 위성과 지상 재머의 운용 환경 및 시스템 성능을 고려한 실질적인 SAR 재밍 신호처리 분석 사례는 미비하다. 기존 운용되고 있는 위성 SAR 영상에서 재밍 또는 간섭이 포착되는 사례가 지속적으로 관찰되고 있으나, 대부분 저해상도의 저대역 주파수에서 운용되는 경우이며, 정찰 감시용 SAR 영상 사례는 공개되지 않고 있다. SAR 재밍 신호 시스템은 고속으로 이동하는 위성의 궤도 및 레이더 신호에 실시간으로 대응해야 하므로 사전에 정밀한 운용 시나리오가 수립되어야 한다.

본 논문에서는 한반도 상공에서 정찰 임무를 수행하는 위협 위성을 가정하여 지상에서 재밍 신호를 인가하였을 때, 그 성능을 예측할 수 있는 시나리오를 설계하고 그에 따른 효과 측정 결과를 제시한다. 기술적 타당성을 확보하기 위해 먼저 실제 위성 SAR 재밍 사례를 분석하여 재밍 신호 전력 및 간섭을 유발하는 재머 제원을 추정하는 체계를 수립한다. 재밍 신호를 반영한 SAR 영상 품질 분

석 틀을 설계한 후, 지상 재머의 위치 및 사양에 따른 효과 분석을 위한 모의실험을 수행한다. 이를 위해 논문의 II장에서 위성 레이더의 전파 간섭 이론 및 사례 분석 결과를 소개하고, III장에서는 실제 사례 기반의 위성 SAR 재밍 시나리오를 구현하고, 모의실험을 통해 검증한다. 마지막으로 IV장에서는 지상 재머의 위치 선정에 따른 SAR 영상의 정량적 품질 저하 수준과 유효 재밍 영역 변화를 통계적으로 산출함으로써, 지상 재머 시스템을 설계하는 기준을 제시하도록 구성하였다.

II. 위성 레이더 전파 간섭 이론 및 사례 분석

2-1 위성 레이더 간섭 이론

위성 SAR는 광대역 전파자원을 사용하여 신호처리를 수행하는데, 스펙트럼의 일부만이라도 손실될 경우, 영상 품질의 저하가 발생할 수 있다. 따라서 위성의 궤도 정보 및 레이더 제원이 확보된 경우에는 협대역 간섭 재밍 신호만으로도 큰 효과를 기대할 수 있다.

민간 위성 SAR에서 사용하는 L-대역 신호는 지상 레이더 및 통신 시스템에서 많이 사용되고 있어 외부 신호와의 간섭 사례가 자주 발생한다^{[4]~[6]}. 일본의 JERS-1 위성에서 획득한 홋카이도의 쿠나시리 섬 영상은 간섭신호에 의해 일부 지역에 밝은 선 형태의 왜곡이 나타나는 것을 확인할 수 있다^[4]. 또한 2021년 5월 TerraSAR-X 위성에서 획득한 영상에서 발생한 왜곡은 타 위성인 Tandem-L 간섭계 레이더에 의해 발생한 간섭 사례이다^[7]. 이처럼 SAR는 전파 간섭이 발생할 경우, 영상 품질이 저하되거나 신호가 왜곡되어 표적 탐지가 어려워지고, 감시정찰 임무에 영향을 받게 된다.

2-1-1 재밍 시나리오 모델 및 간섭신호 정의

재밍 방식은 사용되는 레이더 시스템에 따라 변경될 수 있으나 크게 잡음 재밍(noise jamming)과 기만 재밍(deceptive jamming)으로 분류할 수 있다. 잡음 재밍은 구현이 쉽고 효과적인 재밍 기법 중 하나로, 표적에서 반사되어 수신기로 돌아가는 신호에 잡음과 유사한 전파 교란 신호가 추가적으로 수신되도록 하는 기법이다^{[8],[9]}. 잡

음 재밍은 변조 방식 및 대역폭에 따라 성능이 다르나 단순히 재밍 신호의 출력을 높이는 것만으로도 쉽게 SAR 영상 품질 저하를 유발한다. 기만 재밍은 SAR 신호에 동기화된 재밍 신호를 이용하는 기법으로, SAR 영상 내의 허위 표적을 생성시키거나 주파수 천이를 이용하여 다양한 왜곡을 발생시킬 수 있으나 실제 구현이 매우 어렵고 적용 사례가 드물다^[2].

잡음 및 위상 재밍 신호는 주파수, 진폭, 위상 정보에 따라 분류할 수 있으며, 이러한 변수를 고려한 간섭신호 r_j 는 식 (1)로 나타낼 수 있다^[10].

$$r_j(t, \eta) = w_j \exp\{2\pi(f_0 + f')t + \pi Kt^2 + 2\pi(f''(\eta') + f''')\} \quad (1)$$

식 (1)에서 w_j 는 시간 t 일 때 잡음 신호의 진폭을 의미하고 f' 는 간섭신호의 중심 주파수 이동을 나타내는데, 이는 일정한 주파수 이동 성분과 함께 무작위로 변하는 주파수 이동 성분이 포함된다. f'' 는 반복적으로 송신하는 잡음 신호에 대하여 선형적으로 변화하는 주파수 성분을 나타내며, 방위 방향의 신호에 대한 주파수 이동을 의미한다. f''' 는 거리 및 방위 방향의 시간과 상관없이 위성 센서가 데이터를 획득하는 시간 동안에 임의로 추가되는 위상 이동을 나타낸다^[5].

여러 개의 지상 재머가 분산되어 분포하는 경우에는 식 (1)에서 변형된 형식을 갖는 복수의 간섭신호가 레이더 수신부에 유입된다^[10]. 시스템 잡음 등을 고려한 수신부 유입 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x(t) = s_l(t) + n(t) + \sum_{i=1}^N r_j(t-t_i) \quad 1 \leq l \leq N \quad (2)$$

여기서 $s_l(t)$ 는 표적에서 반사된 수신신호, $n(t)$ 는 시스템 잡음, N 은 재밍 유발 지상 간섭원의 수, t_i 은 l 번째 간섭원까지의 거리에 의한 간섭신호의 시간 지연 값이다. 그림 1은 위성 SAR 운용 시에 재밍이 발생하는 시나리오이다. 스트립 모드의 위성 SAR 탐지 영역 내에 표적과 지상 재머가 동시에 위치하는 경우, 재밍 신호 역시 수신기의 주엽(main lobe)으로 유입되어 적은 간섭 신호 출력으로도 SAR 영상 품질 저하가 가능하다. 반면 재머가 관측 영역 외부에 위치하는 경우에는 수신 안테나의 부엽(side lobe) 방향으로 유입되므로 상대적으로 재밍 효과가 저하

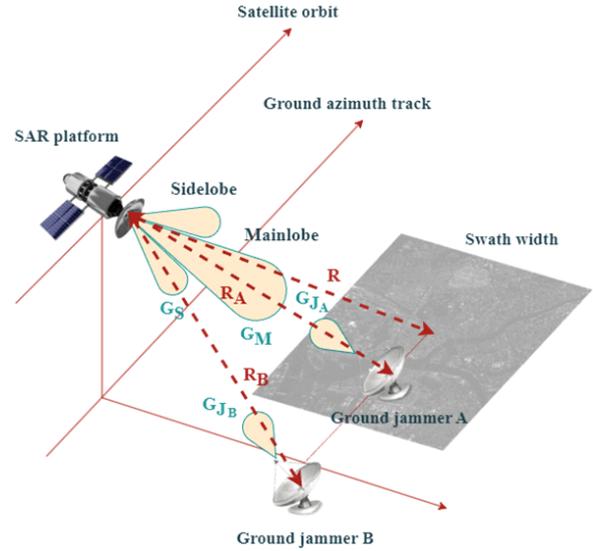


그림 1. 위성 SAR 재밍 기하구조
Fig. 1. Satellite SAR jamming geometry model.

된다. 그림 1의 지상 재머 A는 위성 안테나 빔의 주엽에서 운용되는 재머이며, 지상 재머 B는 부엽을 통해 재밍 효과를 유발하는 재머이다.

위성 SAR 수신단에 입력되는 표적 영역의 클러터 (clutter) 레벨 C 는 2차원 관측 지형의 면적과 해당 영역의 평균 산란 계수인 σ_0 와 송신기의 출력을 반영한 2차원 레이더 방정식을 활용하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다^{[11][9]}.

$$C = P_i G_M \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right)^2 \sigma_0 A_e \frac{\lambda R}{L} \frac{c T_p}{2 \sin \phi} \quad (3)$$

여기서 P_i 는 최대 송신 전력, G_M 은 안테나 주엽의 이득, R 은 위성 SAR와 지상 표적 중심 간의 거리, A_e 는 SAR 수신 안테나의 유효 면적을 의미한다. λ 는 파장, L 은 안테나 방위 방향 길이, c 는 빛의 속도, T_p 는 신호의 펄스폭, ϕ 는 입사각이다.

2-1-2 JCR(Jamming to Clutter Ratio)

지상의 인위적 재머에 의해 발생한 신호가 SAR 수신단에 입력되는 수준을 정량적으로 표현하기 위해 클러터 신호 대비 재밍 신호의 전력비(JCR: jamming to clutter ratio)를 사용한다^[9]. JCR은 SAR 플랫폼 신호가 표적에서

반사된 신호 C 와 재머로부터 유입된 신호 J 의 비인 J/C 로 정의한다. 그림 1과 같이 SAR 안테나의 관측 영역 내에 존재하는 지상 재머 A로부터 수신되는 재밍 신호 전력 J 는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$J = \frac{P_f G_{J_A} A_e}{4\pi R_A^2 L_J} \simeq ERP_J \frac{A_e}{4\pi R^2} \quad (4)$$

P_f 는 재머의 송신 출력, G_{J_A} 는 재머의 안테나 이득, L_J 는 재머의 시스템 손실, R_A 는 지상 재머와 위성 간의 거리를 의미한다. 일반적으로 고해상도 위성 SAR 영상의 관측폭은 고도에 비해 매우 작으므로 지상 재머가 SAR 탐지 영역 내에 위치할 경우, R_A 는 R 로 근사할 수 있다. $P_f G_{J_A} / L_J$ 는 간섭신호의 실효 방사 전력값(ERP: equivalent radiated power)을 의미하며 ERP_J 로 표현할 수 있다. 지상 재머 A로부터 유입되는 실효 방사 전력값이므로 ERP_{J_A} 로 표기하면 SAR 수신단에서의 JCR은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$JCR = \frac{J}{C} = \frac{ERP_{J_A} \frac{A_e}{4\pi R^2}}{P_t G_M \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right)^2 \sigma_o A_e \frac{\lambda R}{L} \frac{c T_p}{2 \sin \phi}} \quad (5)$$

위성 속도가 ν 일 때, 일반적인 SAR 운용 조건은 펄스 반복 주파수(PRF: pulse repetition frequency)가 $PRF=2\nu/L$ 을 만족한다. 또한, 위성 안테나의 폭이 W 일 때 모호성 발생을 억제하기 위해 $\frac{\lambda R \tan \phi}{W} = \frac{c}{2PRF}$ 조건을 만족하여야 한다. 이를 이용하여 SAR 송신부의 평균 전력 P_{av} 를 $P_t T_p PRF$ 로 표현하고, SAR 안테나의 길이 L 과 폭 W 의 곱으로 안테나의 면적 A_e 를 표현하면 $A_e = WL = \frac{4\nu}{c} \lambda R \tan \phi$ 와 같다. 이를 식 (5)에 대입하면 식 (6)과 같이 JCR을 근사적으로 표현할 수 있다.

$$JCR = \frac{J}{C} = ERP_{J_A} \frac{\cos \phi}{P_{av} \sigma_o} \quad (6)$$

식 (6)은 재밍 간섭이 SAR 수신 안테나의 주빔(main beam)을 통해서 발생한 것을 가정한 것으로 주어진 시나리오에서 기대할 수 있는 최대 재밍 전력에 해당한다.

반면 그림 1의 지상 재머 B와 같이 재머가 SAR 관측 영역의 외부에 있는 시나리오의 경우, 식 (4)의 재밍 신호 전력은 식 (7)과 같이 변형될 수 있다.

$$J = \frac{P_f G_{J_B} A_{e_{side}}}{4\pi R_B^2 L_J} = ERP_{J_B} \frac{A_{e_{side}}}{4\pi R_B^2} \quad (7)$$

여기서 G_{J_B} 는 지상 재머 B의 안테나 이득, $A_{e_{side}}$ 는 부엽 방향으로의 안테나 유효 면적, R_B 는 지상 재머와 위성 간의 거리를 표현하며, 이에 대응되는 실효 방사 전력값은 ERP_{J_B} 로 표현할 수 있다. 지상 재머가 SAR 관측 영역 외부에 위치하므로 R_B 는 R 로 근사화하는 것이 어렵다. 또한, 유입되는 재밍 신호는 위성 SAR 수신 안테나의 주엽이 아닌 부엽 빔 방향의 이득인 G_s 에 비례하는 유효 면적에 의해 결정된다. 따라서, 지상 재머 B에 의한 JCR을 근사적으로 표현하면 식 (8)과 같다.

$$JCR = \frac{J}{C} = ERP_{J_B} \frac{G_s R^2 \cos \phi}{G_M P_{av} \sigma_o R_B^2} \quad (8)$$

2-2 위성 SAR 시스템 간섭 실제 사례 분석

Sentinel-1 SAR 위성이 사용하는 주파수 대역은 지상에서 운용하는 통신 및 레이더 장비와 운용 범위가 겹치고, 관측 범위 또한 광범위하여 간섭 발생 빈도가 높아 재밍 연구에 적합한 환경을 제공한다. 본 논문에서는 위성 SAR 재밍 사례를 정량적으로 분석하기 위해 Google earth engine을 기반으로 한 CSAR Eye를 사용하였다^[11]. 해당 틀은 Sentinel-1 위성의 level-1 데이터를 기반으로 설정한 기간 동안 촬영된 SAR 영상을 사용자에게 제공하고 측정된 신호를 분석할 수 있도록 지원한다.

2-2-1 해외 사례

2022년 2월에서 8월 사이에 페르시아만 영역을 관측한 Sentinel-1 위성의 C-대역 SAR 영상에서 지속적인 간섭이 관찰된다. 주변 영역과 비교하여 비정상적으로 높은 신호가 수집된 구간을 붉은색으로 표기해 보면, 그림 2의 특정 지점 (a)를 중심으로 X자 형태로 분포됨을 확인할 수 있다. 재밍 영향을 정량적으로 분석하기 위해 재밍이 발

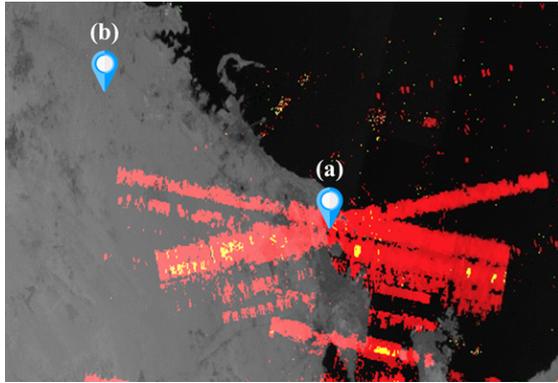


그림 2. 재밍 신호 측정 위치(페르시아만) (a) 재밍이 발생한 영역, (b) 재밍이 발생하지 않은 영역
 Fig. 2. Signal measurement in effective jamming areas (Persian Gulf) (a) jamming-affected area, (b) non-jamming area.

생하지 않은 영역 (a)와의 비교군으로 재밍 영향이 없는 영역을 대표하는 임의의 지점 (b)를 구분하여 데이터 수집 위치를 선택하였다. 두 지점에서 VH 편파로 획득된 신호 레벨을 각각 6개월 동안 관측하여 결과를 수집하여

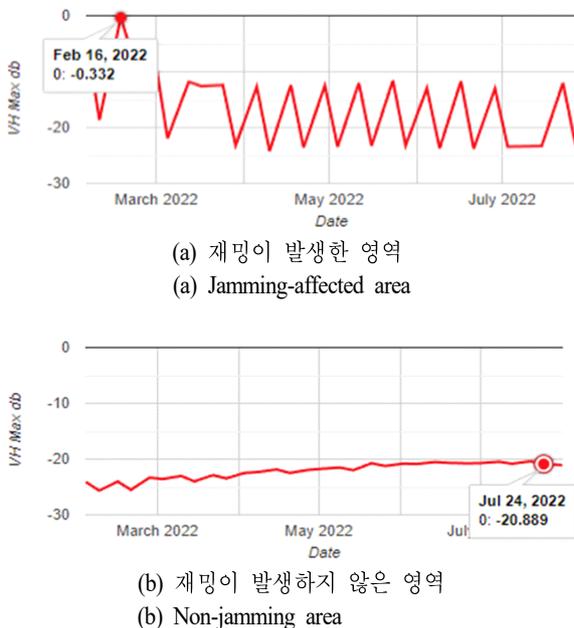


그림 3. 페르시아만에서 획득한 레이더 신호 레벨 분석 결과
 Fig. 3. Analysis of measured radar signal levels in Persian Gulf.

그림 3에서 제시하였다.

2022년 2월 16일에 유입된 신호의 레벨은 2022년 7월 24일의 재밍이 발생하지 않은 영역과 비교하면 약 20 dB 높게 측정된다. 영상에서 나타난 재밍 영역을 분석하여 재밍원의 위치를 추적해 보면 인근에서 사우디아라비아 군 군사기지가 확인된다. 따라서 본 재밍 사례는 활발한 군사 활동을 하는 동안 발생한 레이더 신호에 의한 간섭에 기인한 것으로 유추할 수 있다. 실제로 해당 군사기지에서 C-대역을 사용하는 AN/MPQ-53 레이더를 운용하고 있어 영상에 나타난 재밍과 연관되었을 것으로 추정할 수 있다¹²⁾.

2-2-2 국내 사례

국내에서도 다양한 기상 및 군용 레이더가 운용되고 있어 운용 대역이 겹치는 경우 Sentinel-1 위성의 간섭 영상 사례로 나타나게 된다. 실제로 2020년 3월과 4월에 국내 군산 영역 영상을 보면 해외 사례와 유사한 재밍 현상이 발견된다. 이에 대한 분석을 위해 그림 4와 같이 재밍이 발생한 영역과 비재밍 영역으로 구분하여 데이터를 수집하였다. 수집된 영상에서 재밍이 발생한 지점 (a)와 비재밍 영역 내 지점 (b)의 수신신호의 레벨을 날짜별로 분석한 결과는 그림 5와 같다.

2020년 4월 15일에 유입된 신호의 레벨은 재밍이 식별되지 않은 영역과 비교하여 약 22 dB 높게 측정된다. 관

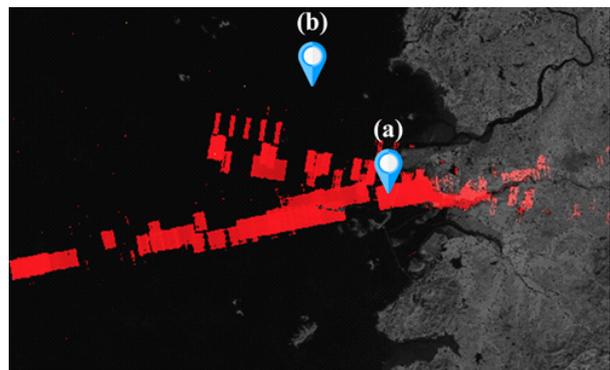


그림 4. 재밍 신호 측정 위치(군산) (a) 재밍이 발생한 영역, (b) 재밍이 발생하지 않은 영역
 Fig. 4. Signal measurement in effective jamming areas (Gunsan). (a) jamming-affected area, (b) non-jamming area.

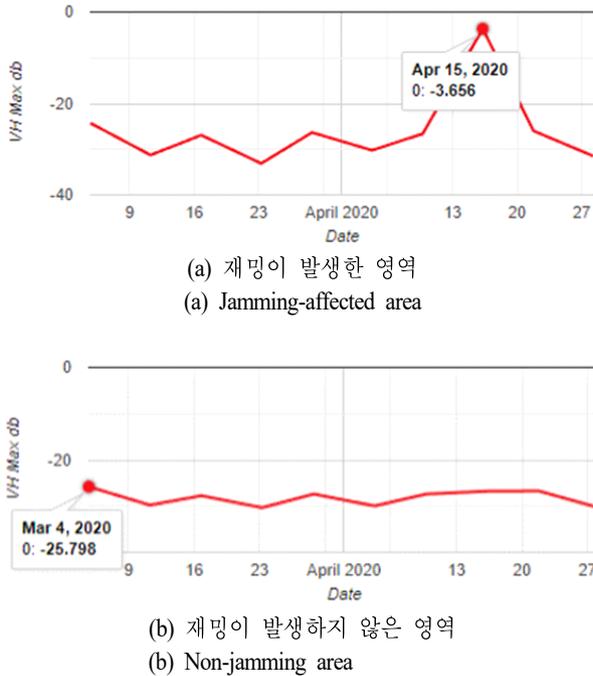


그림 5. 군산에서 획득한 레이더 신호 레벨 분석 결과
Fig. 5. Analysis of measured radar signal levels in Gunsan.

측 영역 내 위도 35.9°, 경도 126.6° 지점에서 군산공항이 식별되며, 공항 시설의 레이더에 의한 영향으로 간섭이 유발되었을 것으로 추정할 수 있다.

이와 유사한 방식으로 국내외 총 8가지 사례를 통해 재밍 신호 레벨을 분석한 결과, 재밍이 발생한 영역은 비발생 영역에 비해 평균적으로 JCR이 약 18 dB 이상 증가하는 것으로 계산되었다. 따라서 현존하는 지상 레이더 장비를 통해 JCR을 18 dB 이상 증가시키는 시나리오에서는 Sentinel-1 위성 영상에서 관측되는 수준의 유의미한 재밍이 발생할 것임을 예측할 수 있다. 국내외 다양한 사례들을 추가로 분석해 보면, 주로 공항 부근의 전략적 시설과 기상 레이더의 주변에서 재밍이 발생하였다. 재밍에 사용된 전파원들의 세부 정보를 파악하기 어려운 경우가 많으나, 획득한 SAR 영상의 재밍 수준을 정량적으로 분석하면 시스템 제원 유추가 가능하다. 재머의 제원 및 위치, 위성과의 상대적인 궤도 특성에 따른 재밍 효과의 변화 관계를 정량적으로 수립하기 위해서는 정확한 재밍 시나리오 예측 모델을 반영한 SAR 재밍 모의실험 시스템을 구축하는 것이 필요하다.

III. 위성 SAR 재밍 시나리오 설계 및 실제 사례 기반 모의실험 검증

STK(system tool kit)는 우주 궤도 환경에서 위성 운용 모사를 지원하며, SAR 모듈, 재머 시스템 사양 및 안테나 빔 패턴을 임의로 설정할 수 있는 환경을 제공한다^[13]. 본 논문에서는 STK를 활용하여 위성의 궤도, 고도, 경사각, SAR 운용 모드를 설정하고, 위성 제원, 송신 출력, 수신 감도, 안테나 빔 패턴을 설정하여 SAR 모듈을 설정한다. 또한, 지상 표적의 좌표 및 반사도를 설정하고, 지상 재머의 주파수 대역, 출력 및 신호 변조 특성을 설정하여 재밍 구간에서 시간에 따른 재밍 영역을 확인한다. 위성 및 지상 재머의 제원을 설정하여 위성체가 재머 영역으로 진입할 때 인위적으로 위성체에 영향을 주는 시뮬레이션을 수행한다. 이를 통해 산출된 데이터를 활용하여 MATLAB 기반 SAR 영상 품질 분석 툴을 구현하고, 실제 사례와 비교하여 신호 강도를 확인하는 모의실험을 수행하였다. 그림 6은 이를 구현한 실험 순서도를 보인다.

그림 7은 2020년 4월에 Sentinel-1 위성이 위도 37.1°, 경도 127.8°에 위치한 중원 지역을 지나면서 획득한 영상이다. 광대역 관측 모드로 획득되어 넓은 영역에 걸쳐 간섭

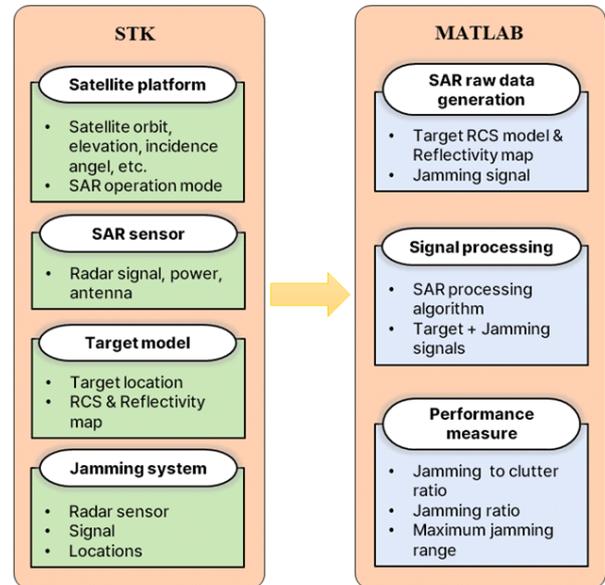


그림 6. 모의실험 과정
Fig. 6. Jamming simulation procedure.

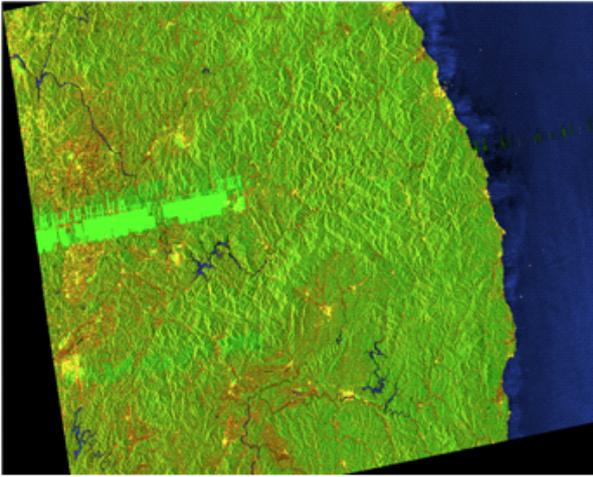
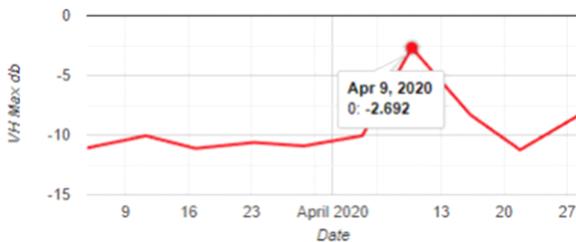
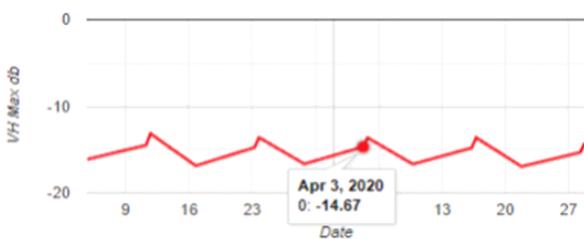


그림 7. 지상 재밍 신호에 의해 영향을 받은 Sentinel-1 SAR 영상(2020년 4월)
 Fig. 7. Sentinel-1 SAR image affected by ground jamming signal (April, 2020).

신호가 분포되어있는 것을 확인할 수 있다. 해당 지역의 정량적인 신호 분포를 분석해 보면 그림 8과 같은 결과를 얻을 수 있다.



(a) 재밍이 발생한 영역
 (a) Jamming-affected area



(b) 재밍이 발생하지 않은 영역
 (b) Non-jamming area

그림 8. 중원에서 획득한 레이더 신호 레벨 분석 결과
 Fig. 8. Analysis of measured radar signal levels in Joongwon.

중원 지역에서 재밍이 발생한 영역과 발생하지 않은 영역의 신호 레벨 차이는 약 12 dB이다. 이는 앞서 제시한 군용 레이더에 의한 재밍 사례보다 낮은 수치인데, 영상에서 간섭원이 있을 것으로 추정되는 영역 인근에 기상 관측 레이더가 운용되고 있어, 군용 레이더에 비해 상대적으로 약한 간섭이 발생한 것으로 추정된다.

위성 SAR 플랫폼은 지속적으로 이동하므로 수신되는 신호 레벨의 변동성이 크다. 재머로부터 수신되는 재밍 전력을 시간별로 분석하기 위해서는 궤도 모델, 대기 감쇄, 시스템 손실, 표적의 반사도 등의 변수가 반영되어야 한다. 본 논문에서는 시간에 따른 수신 재밍 전력 레벨과 표적 수신신호 레벨의 변화를 추적하기 위해 STK에서 추출한 궤도 데이터를 사용하였다. 모의실험을 통해 Sentinel-1 위성에서 식별된 재밍을 유사하게 재현하여 실제 데이터 보정 및 STK를 통해 추출한 데이터의 신뢰성 검증에 이용하였다. SAR 시스템 변수는 Sentinel-1 위성의 제원을 사용하였고, 스트립 모드 운용을 가정하였다^[4]. 시뮬레이션에 사용한 재머 제원은 앞선 사례 분석을 통해 간섭원으로 추정된 기상 관측 레이더의 제원을 참고하였으며, 세부 제원은 표 1에서 보인다. 지상 재머에 의해 발생하는 재밍을 분석하기 위해 일정 기간의 궤적을 따라 위성이 이동하면서 지상으로부터 수신되는 신호를 분석하였다.

모의실험의 신뢰성 검증을 위해 총 7일간의 시뮬레이션을 통해 재밍 발생 효과를 분석하였다. 정량적 결과 분석을 위해 시간에 따른 신호 대 잡음비(SNR: signal to noise ratio)와 신호 대 잡음 신호와 재밍 신호비(S/(N+J): signal to noise and jamming signal ratio)를 추출하였다. 수

표 1. 재밍 시스템 제원
 Table 1. Jamming system parameters.

Parameter	Value
Latitude	37.91°
Longitude	126.61°
Carrier frequency	5.4 GHz
Peak power	1 kW
PRF	1 kHz
Pulse width	50 us
Antenna gain	45 dB

신단에서의 SNR은 다음과 같이 표현할 수 있다^[15].

$$SNR = \frac{T_i PRF P_i \lambda^2 G_T G_R \sigma G_0}{(4\pi)^2 R_i^2 R_r^2 L_{AT} L_{AR} P_N L_r} \quad (9)$$

위 식에서 T_i 는 관측 시간, G_T 와 G_R 는 각각 송·수신 안테나 이득, G_0 는 기타 손실 대 이득 비를 의미하고 σ 는 표적의 RCS(radar cross section), R_i 와 R_r 은 각각 송, 수신 기와 표적 간의 거리로 본 모의실험에서는 동일하다. L_{AT} 와 L_{AR} 은 각각 송, 수신 동안의 대기 감쇄, P_N 은 잡음의 전력, L_r 은 수신기의 전송 선로 손실을 의미한다. 추출한 SNR과 S/(N+J) 값을 날짜별로 분석한 결과는 그림 9와 같다.

추출한 7일간의 SNR-S/(N+J) 값의 평균은 약 12.2 dB로 계산된다. 이는 Sentinel-1 위성의 국내 중원 지역에서 발생한 재밍 간섭 사례에서 추출한 결과와 매우 유사하다. 이는 재머의 제원 정보와 위치가 주어지는 시나리오 구현을 통해 재밍에 의한 SAR 영상의 품질 저하 산출 알고리즘을 검증한 사례라고 할 수 있다.

IV. 위성 SAR 재밍 효과 모의실험 및 분석

4.1 위성 SAR 재밍 모의실험 설계

국내 감시를 목적으로 한반도를 관측 운용하는 위협 위성 SAR가 지상 재머에 의해 영향을 받는 상황을 가정하여 영상 품질을 측정하는 모의실험을 수행하였다. STK

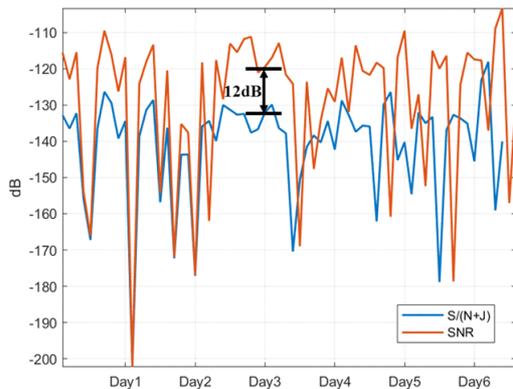


그림 9. 재밍 모의실험을 통해 계산된 SNR과 S/(N+J)
Fig. 9. Calculated SNR and S/(N+J) after jamming simulation.

를 통해 SAR 관측 구간에서 재밍 신호가 유입되는 구간을 파악하고, 구간별 재밍 신호 레벨을 측정하여 JCR로 환산하였다. 모의실험에 사용한 위성 변수는 X-대역 SAR를 운용하는 TerraSAR-X 시스템의 제원을 기반으로 하였으며 자세한 변수는 표 2와 같다. 실제 사례와의 비교를 위해 앞서 재밍 사례가 식별된 중원, 군산 지역에 지상 재머를 위치시켜 재밍 신호의 영향을 분석하였다.

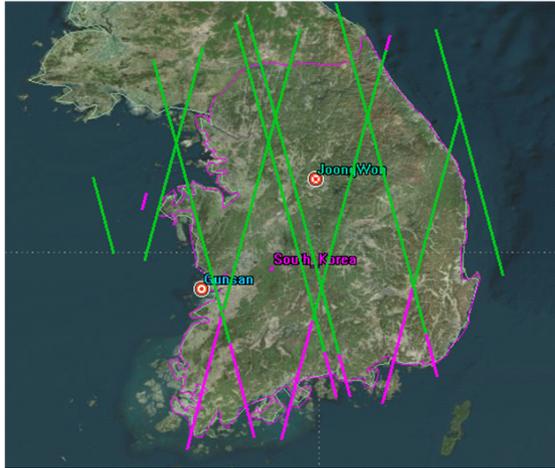
그림 10은 가상의 X-대역 SAR 위성이 한반도를 관측하는 동안 중원과 군산에 위치한 지상 재머가 재밍을 수행할 수 있는 구간을 보인다. 그림 10에서 녹색과 파란색 구간은 각각 중원과 군산 지역의 재머에 의해 영향을 받는 구간이며 분홍색은 재머가 영향을 미치지 않는 구간이다. 본 모의실험에서는 SAR 신호의 주엽뿐만 아니라, 부엽의 영향까지 고려되어 재밍 유효 영역이 확장된 상황에서의 재밍수행 가능 영역을 표시하였다.

모의실험을 위한 지상 재머로는 사양이 공개되어 있는 레이더의 제원을 사용하였다. 레이더 제원의 출력 수준에 따라 3등급으로 분류하여 각각의 성능을 비교하였다. 1등급 재머(J_1)는 상대적으로 높은 수준의 간섭을 유발하는 선박용 레이더의 제원, 2등급 재머(J_2)는 사례 분석을 통해 실제 Sentinel-1 위성의 간섭원으로 지목된 AN/MPQ-53 레이더의 제원 수준으로 설정하였고 3등급 재머(J_3)는 러시아에서 운용하는 레이더 제원 수준으로 설정하였다^{[16],[17]}. 모의실험에 적용한 각 레이더 시스템의 세부 변수는 표 3에서 보인다. 최대 재밍 효과를 얻기 위해 위성

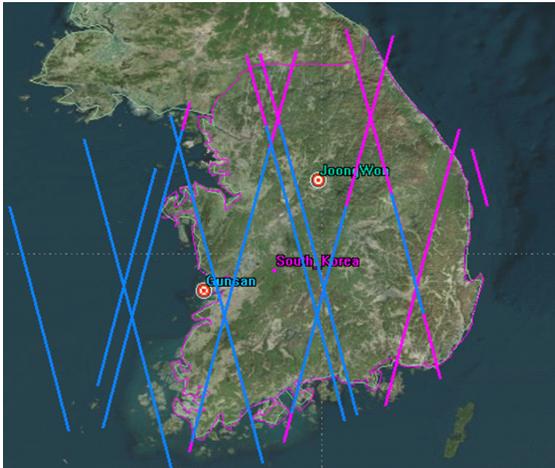
표 2. X-대역 SAR 시스템의 모의실험 변수

Table 2. X-band SAR system simulation parameters.

Orbit	Inclination	Sun-synchronous
	Altitude	514 km
	LTAN	18:00
Radar system	PRF	1 kHz
	Bandwidth	150 MHz
	Pulse width	5.14×10^{-6} sec
	Center frequency	9.65 GHz
	Maximum transmit power	33.54 dBW
Antenna	Size	4.8 m×0.7 m
	Gain	45 dB



(a) 중원
(a) Joongwon



(b) 군산
(b) Gunsan

그림 10. 지상 레이더에 의한 재밍 영역
Fig. 10. Estimated jamming areas by ground radar systems.

SAR와 재머의 PRF가 동기화되어 있다고 가정하였으며 재머가 실시간으로 표적 위성의 위치를 추적하여 재밍 신호를 항상 위성 방향으로 방사하는 것으로 설정하였다. 간섭신호의 실효 등가 방사 전력값(EIRP: equivalent isotropic radiated power)은 식 (4)의 P_{G_j} 에 해당한다.

4-2 위성 SAR 재밍 모의실험 결과 및 분석

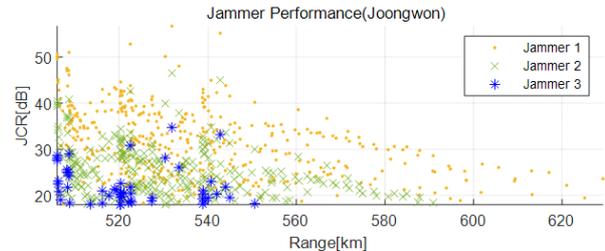
표 3에서 제시한 재머가 중원과 군산 지역에 각각 위치

표 3. 재밍 성능 분류를 위한 재머 시스템 변수
Table 3. Jammer system parameters for jamming performance classification.

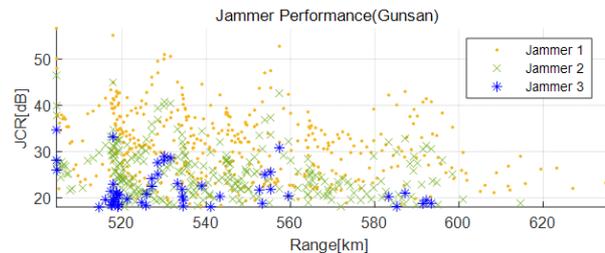
Jammer ID	System parameters			
	Peak power [kW]	Antenna gain [dB]	EIRP [dBW]	Bandwidth [MHz]
J ₁	25	46	90	19
J ₂	10	39.8	79.8	17.5
J ₃	2.7	33.7	68	16

함을 가정하여 모의실험을 수행하였다. 표 2의 SAR 시스템에 유입되는 재밍 신호를 측정하여 이를 JCR로 환산한 결과를 그림 11에 도시하였다.

X축은 재머와 위성 간의 거리, Y축은 위성 SAR 수신단에서 측정되는 JCR 레벨이다. Sentinel-1 위성에서 관측된 다수의 재밍 사례에서 JCR 수준이 평균적으로 18 dB 인 것을 반영하여 본 모의실험에서는 JCR이 18 dB 이상인 영역을 선별하여 도시하였다. 표 3에서 분류한 재머



(a) 중원
(a) Joongwon



(b) 군산
(b) Gunsan

그림 11. SAR 수신기에서 측정된 거리에 따른 JCR 분포
Fig. 11. Estimated JCR distributions according to range measured at SAR receivers.

J_1, J_2, J_3 에 따라 구분하였으며 재머 종류에 따라 재밍 조건을 충족하는 분포가 다름을 확인할 수 있다.

지상 재머의 수준에 따라 위성 SAR의 정상적인 운용을 침해하는 구간이 달라지는데 이를 개별적으로 산출하기 위해서는 정량적 재밍 성능 지표가 필요하다. 본 논문에서는 지상 관측이 가능한 위성 SAR의 전체 운용 시간 대비 재밍이 발생하는 유효 재밍 구간의 비를 재밍율로 정의하여 각 시나리오에서 성능 지수로 사용하였다. 모의실험에서 위성 SAR가 남한 지역을 관측하는 전체 운용 기간은 1달(2022년 11월 1일~2022년 11월 30일)로 설정하였다. 지상 재머에 의한 최대 재밍 거리는 재밍 효과를 기대할 수 있는 구간 중 위성이 지상 재머로부터 가장 멀리 떨어져 있을 때의 거리에 해당되며 부엽 방향으로도 신호가 유입된다. 앞선 사례와의 비교를 위해 최소 요구 재밍 레벨을 18 dB로 설정하였고 동일한 제원의 재머가 중원과 군산에 위치하는 경우를 가정하여 각각의 최대 재밍 거리와 재밍율을 요약한 결과는 표 4에 나타내었다. J_1 의 경우 모든 구간에서 요구 재밍 레벨을 만족하여 재밍율 100%를 달성하였으나 J_2 는 재밍율이 62%, J_3 는 4% 이하 수준으로 낮아진다.

4-3 MATLAB 기반 재밍 성능 모의실험

MATLAB 기반의 SAR 운용 모의실험을 통해 재밍 신호에 의한 SAR 영상 품질의 저하를 분석하였다. 모의실험에서 사용한 X-대역 위성의 변수는 표 2와 같고 표 3의 J_1 제원과 동일한 재머가 관측 영역의 중심에 위치한다고

표 4. 중원과 군산에 위치한 지상 재머에 의한 재밍 성능 비교

Table 4. Comparison of jamming performances by ground jammers at Joongwon and Gunsan.

Performance measures		Joongwon	Gunsan
J_1	Max. jamming range [km]	629.23	634.87
	Probability of jamming [%]	100	100
J_2	Max. jamming range [km]	590.9	614.61
	Probability of jamming [%]	62	60
J_3	Max. jamming range [km]	550.6	593.45
	Probability of jamming [%]	3	4

가정하였다. 관측 영역 데이터로 Cosmo-skymed 위성이 국내 서해안을 촬영한 1 m급 해상도의 실제 SAR 영상을 활용하였으며 서로 다른 클러터 특성 분포를 갖는 해안가와 도심 영역으로 구분하여 모의실험을 수행하였다. 앞서 수행한 재밍 사례 분석 방식과 같이, 재밍 신호가 식별된 영역과 식별되지 않은 영역 중 서로 인접한 4곳을 선정하여 수신신호 레벨을 측정하였다. 모의실험 수행 결과인 SAR 영상 내에서 각각의 신호 수집 위치는 그림 12에서 보인다.

빨간색으로 표기된 지점은 재밍 효과가 발생한 영역이며 파란색으로 표기된 지점은 근접한 일반 영역으로 재

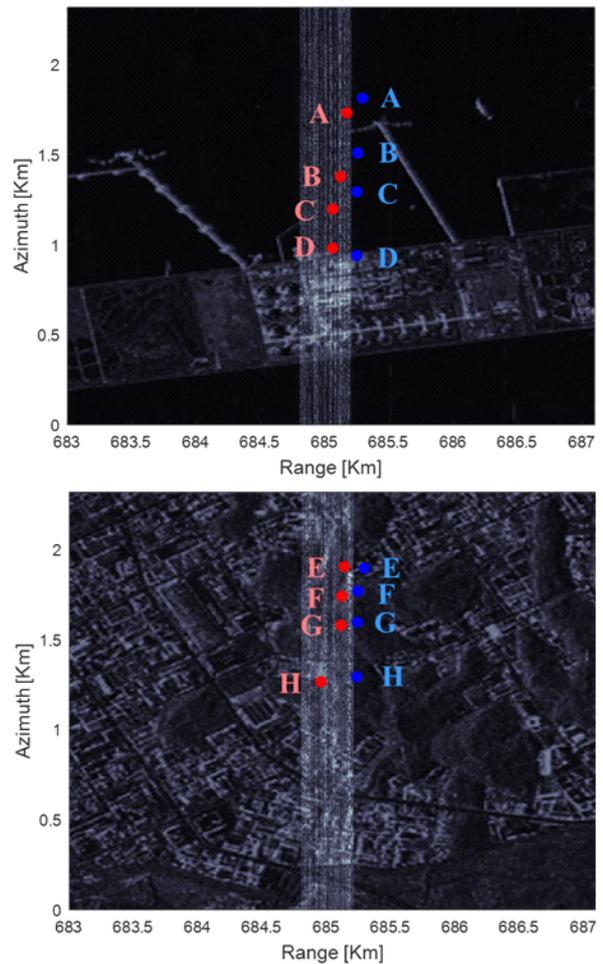


그림 12. 지상 재머에 의한 영향을 받은 SAR 모의실험 영상

Fig. 12. Simulated SAR images affected by ground jammers.

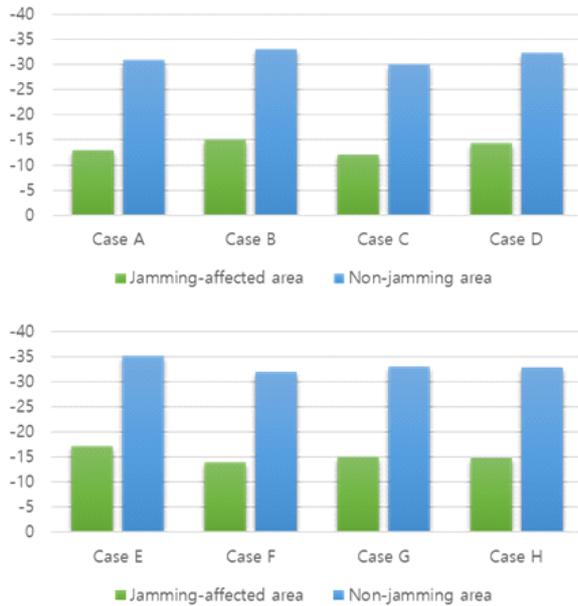


그림 13. 지상 재머 운용에 따른 수신신호 레벨
 Fig. 13. Estimated signal levels before and after ground jammer operations.

밍 성능을 측정하기 위한 대조군으로 사용하였다.

A~H 지점에서 수신신호 강도를 추출한 결과는 그림 13에서 보인다. 각 지점에서의 재밍 전후에 따른 수신신호 레벨의 차이는 평균적으로 약 18 dB로 계산된다. 이는 Sentinel-1 위성의 재밍 사례를 통해 확인한 실제 신호 강도 차이와 매우 유사함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 실제 위성 SAR 재밍 사례에 근거하여 재밍 성능에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 조건을 분석하고 이를 기반으로 재밍 성능 분석 알고리즘을 설계하고 구현하였으며, 실제 사례를 기반으로 구현된 위성 SAR 재밍 시나리오를 통해 효과적인 재밍을 수행할 수 있는 조건을 제시하였다. 이를 위해 다양한 지상 재머 사양에 따른 위성 SAR 품질 저하 효과를 정량적으로 분석하였고 이는 실제로 관측된 사례와 매우 유사함을 검증하였다. 재밍 효과는 일반적으로 재머 시스템의 사양과 위성 SAR 플랫폼의 상대적인 위치에 의해 결정되며 두

정보가 주어지면 위성 SAR 영상의 품질을 예측할 수 있음을 보였다. 이를 이용하여 관측된 재밍 SAR 영상을 통해 지상 재머의 제원을 유추하는 것도 가능할 것이다. 본 연구를 통해 수립된 영상 분석 체계는 위성 SAR 시스템의 재밍에 대한 이해를 높이고 보다 효과적인 대응 및 방어 전략을 개발하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] W. G. Walter, *Synthetic-Aperture Radar and Electronic Warfare*, Norwood, MA, Artech House, 1993.
- [2] K. M. Lee, I. H. Lee, S. G. Hong, Y. I. Jeon, I. S. Na, and K. T. Kim, "Analysis of the requirements for effective satellite-borne SAR deceptive jamming," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 2, pp. 146-159, Feb. 2022.
- [3] M. Tao, J. Su, Y. Huang, and L. Wang, "Mitigation of radio frequency interference in synthetic aperture radar data: Current status and future trends," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 20, p. 2438, Oct. 2019.
- [4] M. Shimada, "L-band radio interferences observed by the JERS-1 SAR and its global distribution," in *Proceedings of the 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Seoul, Jul. 2005, pp. 2752-2755.
- [5] S. K. Lee, W. K. Lee, and J. W. Lee, "An analysis of radio frequency interferences in L-band SAR images," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 12, pp. 1388-1398, Dec. 2012.
- [6] F. J. Meyer, J. B. Nicoll, and A. P. Doulgeris, "Correction and characterization of radio frequency interference signatures in L-band synthetic aperture radar data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 10, pp. 4961-4972, Apr. 2013.
- [7] N. Hendy, F. Kurnia, T. Kraus, M. Bachmann, M. Martorella, and R. Evans, et al., "SEMUS - An open-source RF-level SAR emulator for interference modelling

- in spaceborne applications," *TechRxiv*, pp. 1-14, Jul. 2023.
- [8] R. S. Harness, M. C. Budge, "A study on SAR noise jamming and false target insertion," in *IEEE SOUTH-EASTCON 2014*, Lexington, KY, Mar. 2014, pp. 1-8.
- [9] K. Dumper, P. S. Cooper, A. F. Wons, C. J. Condley, and P. Tully, "Spaceborne synthetic aperture radar and noise jamming," in *Radar 97(Conference Publication No. 449)*, Edinburgh, Oct. 1997, pp. 411-414.
- [10] X. F. Wu, D. Dai, and X. Wang, "Study on SAR jamming measures," in *IET International Conference on Radar Systems 2007*, Edinburgh, Oct. 2007, pp. 1-5.
- [11] Earth Engine Apps, "CSAR eye," 2022. Available: <https://orbtwz.users.earthengine.app/view/csar-eye>
- [12] Defense Security Cooperation Agency, "Kingdom of Saudi Arabia-AN/TPQ-53(V) radar systems and related support no. 16-84," 2017. Available: <https://www.dsca.mil/press-media/major-arms-sales/kingdom-saudi-arabia-antpq-53v-radar-systems-and-related-support>
- [13] B. Y. Lee, S. K. Lee, and W. K. Lee, "High resolution spaceborne SAR operation and target recognition simulator using STK," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 3, pp. 299-309, Mar. 2013.
- [14] ESA eoPortal, "Copernicus: Sentinel-1," 2023. Available: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/copernicus-Sentinel-1#spacecraft>
- [15] ANSYS System Tool Kit v12, STK Help, "SAR constants and equations," 2024. Available: https://help.agi.com/stk/index.htm#comm/CommRadarA-07.htm?ToCPath=Capabilities%257CCommunications%2520%2526%2520Radar%257CTechnical%2520Notes%257C___9
- [16] Radartutorial.eu, "Pariot radar AN/MPQ-53," 2022. Available: <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/06.missile/karte003.en.html>
- [17] Air Power Australia, "Russian/Soviet/WarPac ground based ECM systems: Technical report APA-TR- 2009-0501," 2009. Available: <https://www.ausairpower.net/APA-REB-Systems.html>

이 희 우 [한국항공대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0006-5344-9698>



2022년 8월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학사)

2022년 8월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사과정

[주 관심분야] SAR 신호처리, 재밍기술

최 민 호 [한국항공대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0008-5089-247X>



2024년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학사)

2024년 3월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사과정

[주 관심분야] SAR 신호처리, 재밍기술

이 우 경 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-2092-2048>



1994년 2월: 한국과학기술원 전자 및 전자 공학과 (공학사)

1996년 2월: 한국과학기술원 전자 및 전자 공학과 (공학석사)

1999년 12월: 런던대학교(UCL) 전기전자 공학과 (공학박사)

1999년 10월~2002년 12월: 한국과학기술원 인공위성센터 연구교수

2003년 1월~2004년 8월: 삼성종합기술원 책임연구원

2004년 9월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 교수
[주 관심분야] 위성탐재체, SAR 영상, 레이더 시스템 및 신호 처리

김 성 표 [국방과학연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8688-7412>



1987년 3월: 공군사관학교 국제관계학과 (문학사)

1996년 8월: Oklahoma State University 전기 및 컴퓨터공학과(공학석사)

2004년 8월: University of Missouri 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)

2015년 10월~현재: 국방과학연구소 수석 연구원

[주 관심분야] 우주전 기술, 미사일방어 기술, 대위성재밍기술, 사이버전자전 기술, 위성기술, 네트워크 성능분석