

위성 SAR 기만 재밍을 위한 RLSE 기반 SAR 파라미터 추정 기법

Accurate Estimation of SAR Parameters via RLSE for Satellite-Borne SAR Deceptive Jamming

김상원 · 이동근 · 박영주 · 주증민 · 김종규 · 김정훈 · 방종현

Sang-Won Kim · Dong-Keun Lee · Young-Ju Park · Jeung-Min Joo ·
Jong-Kyu Kim · Jung-Hoon Kim · Jong-Hyeon Bang

요 약

감시정찰 능력 확보를 위해 수많은 합성 개구면 레이더(SAR, synthetic aperture radar) 위성들이 발사됨에 따라, 이에 대비하기 위한 SAR 재밍 기법 또한 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 수신된 SAR 신호를 활용하여 기만 재밍을 수행하는 기법들이 많은 관심을 받고 있다. 하지만 이 기법들은 SAR 신호가 수신된 이후 기만 재밍을 수행하기 때문에, 거리축을 기준으로 재머의 앞쪽에 허위 표적을 형성할 수 없다는 한계점이 존재한다. 이에 본 논문에서는 이러한 한계점을 극복하기 위한 기만 재밍 기법 연구의 일환으로서 현재 수신된 SAR 신호로부터 다음 SAR 신호의 송신 시점과 중심 주파수를 실시간으로 추정하는 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 펄스 압축과 RLSE(recursive least square estimation)를 기반으로 SAR 파라미터를 정밀하게 추정할 수 있으며, 모의실험을 통해 이를 확인한다.

Abstract

As numerous synthetic aperture radar (SAR) satellites have been launched to secure surveillance and reconnaissance capabilities, considerable research has focused on SAR jamming methods. In particular, methods that utilize the received SAR signals for deceptive jamming have drawn increasing attention. However, because these methods perform deceptive jamming after the SAR signal is received, they cannot create a false target ahead of the jammer along the range axis. Accordingly, as part of the research on deceptive jamming methods to overcome this limitation, this study aims to estimate the transmission time of the next SAR signal and the center frequency in real time from the received SAR signal. The proposed method precisely estimates these parameters using pulse compression and recursive least squares estimation, and the estimation results are confirmed through simulations.

Key words: Synthetic Aperture Radar, Deceptive Jamming, Parameter Estimation

I. 서 론

합성 개구면 레이더(SAR, synthetic aperture radar)는 전

자기파를 통해 획득한 지표면 및 표적에 대한 정보를 고 해상도 영상으로 변환해 주는 레이더 시스템이다^[1]. 광학 영상과는 달리 SAR는 주야 및 기상에 무관하게 영상을

「본 논문은 2024년 정부의 재원으로 수행된 연구임(912916201).」

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received January 29, 2024 ; Revised February 26, 2024 ; Accepted March 5, 2024. (ID No. 20240129-012)

· Corresponding Author: Jong-Hyeon Bang (e-mail: jhbang@add.re.kr)

획득할 수 있다는 장점으로 인해 군수 및 민수 분야에서 활발히 사용되고 있다^{[2]-[4]}. 특히 위성 SAR는 그 특성상 지구 주위를 공전하며 넓은 지역을 관측하기 때문에, 감시정찰과 표적 탐지 및 식별 등 군사적 용도로 많이 활용되고 있다. 이에 따라 더욱 강건한 우주 기반 감시정찰 시스템을 구축하기 위해 수많은 SAR 위성들이 발사되고 있으며, 효과적인 임무 수행을 위해 다양한 SAR 기술들 또한 개발되고 있다^{[5]-[7]}.

이와 동시에 적성 SAR의 감시정찰에 대항하여 아군의 주요 자산 및 정보를 보호하기 위해, SAR 재밍(jamming) 기법 또한 많은 관심을 받고 있다. SAR 재밍 기법은 그 목적에 따라 잡음 재밍(noise jamming)과 기만 재밍(deceptive jamming)으로 구분되며, 그중 기만 재밍은 적성 SAR 영상에 실제로 존재하지 않는 허위 표적에 대한 정보가 형성되도록 하는 기법이다^{[8],[9]}. SAR 영상에 허위 표적을 형성하기 위해 재머(jammer)는 SAR의 신호 특성을 반영한 기만 신호를 방사하며, 이러한 특징으로 인해 기만 재밍은 적이 재밍 유무를 판단하기 어렵게 만든다. 또한 기만 재밍은 잡음 재밍과 같이 영상의 전체 또는 일부를 전력의 큰 잡음으로 덮어버리는 것이 아니기 때문에, 적은 전력을 소모한다는 장점도 가진다^{[10],[11]}.

기존의 기만 재밍 기법들은 SAR의 신호 특성을 반영한 기만 신호를 방사하기 위해, 수신된 SAR 신호 자체를 활용하여 기만 재밍을 수행하는 데 초점을 맞추고 있다. 그중 직접 재송신 기반 기만 재밍 기법은 수신된 SAR 신호에 허위 표적에 대한 정보를 결합하고, 특정 시간을 지연시킨 후 SAR를 향해 방사한다^{[12]-[14]}. 하지만 이 기법은 하나의 허위 점 표적만을 형성할 수 있다. 이에 따라 여러 개의 점 표적으로 구성된 허위 표적을 형성하기 위해, 변조-재송신 기반 기만 재밍 기법이 주로 연구되고 있다^{[15]-[20]}. 이 기법은 주파수 축에서 템플릿(template)으로 구성된 허위 표적에 대한 정보와 수신된 SAR 신호를 결합하여 SAR를 향해 방사한다. 그러나 두 기법 모두 SAR 신호를 수신하고, 특정 시간 뒤에 기만 신호를 방사함에 따라 SAR의 관심 영역 내에서 거리측을 기준으로 재머의 뒤쪽 위치에만 허위 표적을 형성할 수 있다. 이는 허위 표적 위치 설정 측면에서 명백한 한계점으로 작용한다. 이를 극복하기 위해 기만 신호를 사전에 생성해 놓고, 재머에

SAR 신호가 수신되기 전에 기만 신호를 방사하는 새로운 기만 재밍 기법을 고려해볼 수 있다.

이에 본 논문은 상기에서 언급한 기만 재밍 기법에 대한 연구의 일환으로서, 현재 수신된 SAR 신호로부터 다음 SAR 신호의 송신 시점과 중심 주파수를 추정하는 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 크게 펄스 압축을 통한 신호의 도착 시간과 위상을 측정하는 단계와 측정된 도착 시간과 위상, 그리고 RLSE(recursive least square estimation)를 통해 다음 SAR 신호의 송신 시점과 중심 주파수를 추정하는 단계로 구분된다. 이 기법은 다음 신호의 송신 시점을 샘플링 간격 미만의 오차로, 중심 주파수를 0.1 Hz 미만의 오차로 정확하게 추정할 수 있다. 추정된 중심 주파수는 사전에 생성된 기만 신호를 RF(radio frequency) 대역으로 변환하는 데 사용되며, 추정된 신호의 송신 시점은 이 기만 신호의 방사 시점을 결정하기 위해 사용된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서 제안하는 기법의 연구 배경에 대하여 기술한다. 다음으로 III장에서 제안하는 SAR 파라미터 추정 기법과 추정된 파라미터를 통해 허위 표적 위치 설정의 한계점을 극복할 수 있는 기만 재밍 기법을 설명한다. 그 후 IV장에서 모의실험을 통해 제안하는 추정 기법의 성능을 분석하며, 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 내린다.

II. 연구 배경

2.1 직접 재송신 기반 기만 재밍 기법

그림 1과 같이 방위 시간 t_a 에 따라 x 축과 평행하게 일정 속도 v 로 이동하고 있는 SAR의 위치 좌표를 $S(vt_a, 0, h)$, 고정된 재머의 위치 좌표를 $J(0, y, 0)$, 허위 표적의 위치 좌표를 $F(x_f, y_f, 0)$ 라고 할 때, SAR와 재머, 허위 표적 간의 거리는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_J(t_a) = |\mathbf{SJ}| = \sqrt{(vt_a)^2 + y^2 + h^2},$$

$$R_F(t_a) = |\mathbf{SF}| = \sqrt{(vt_a - x_f)^2 + y_f^2 + h^2}. \quad (1)$$

여기서 $R_J(t_a)$ 와 $R_F(t_a)$ 는 각각 t_a 에 따라 변화하는 SAR와 재머 간의 거리와 SAR와 허위 표적 간의 거리를 나타낸다. 만약 조건 $\sqrt{y^2 + h^2} \gg vt_a$, $\sqrt{y^2 + h^2} \gg vt_a - x_f$,

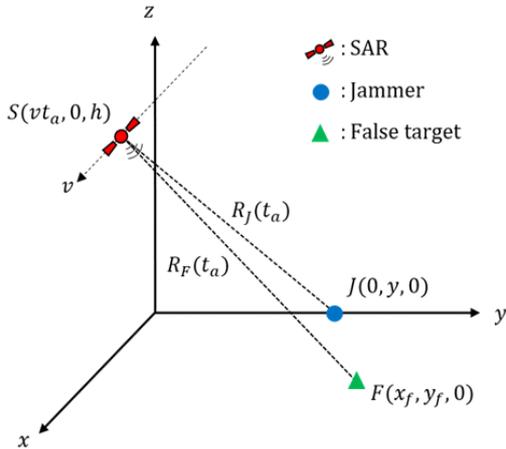


그림 1. 위성 SAR 기만 재밍 기하 구조
Fig. 1. Geometry of deceptive SAR jamming.

$\sqrt{y^2 + h^2} \gg y_f - y$ 를 만족한다면, SAR와 재머, SAR와 허위 표적 간의 거리 차 $\Delta R(t_a)$ 는 식 (2)와 같이 근사하여 나타낼 수 있다.

$$\Delta R(t_a) = R_F(t_a) - R_J(t_a) \approx \sqrt{x_f^2 + (y_f - y)^2}. \quad (2)$$

상기 유도 과정을 토대로 직접 재송신 기반 기만 재밍의 기본적인 수행 과정은 재머에서 SAR 신호를 수신하고, 수신된 신호에 $(2 \times \Delta R(t_a))/c$ 만큼의 시간 지연을 적용한 후(여기서 c 는 빛의 속도), 허위 표적에 대한 정보를 결합하여 SAR를 향해 방사한다^{[12]~[14]}. 이러한 수행 과정에 의해 SAR 영상에서의 좌표 $F(x_f, y_f, 0)$ 에는 단일 점 표적 하나가 형성된다.

하지만 근사를 통해 허위 표적을 생성할 경우, 근사 조건을 만족하지 않으면 허위 표적의 위치와 해상도 등에서 오차가 발생하게 된다. 이 때문에 일반적으로는 아군의 정찰 시스템으로부터 SAR의 궤도 정보를 제공받았다고 가정하고, 이를 활용하여 기만 재밍을 수행한다. 결과적으로 직접 재송신 기반 기만 재밍 기법의 핵심은 허위 표적 위치 좌표에서 반사된 SAR 신호가 SAR에 수신되는 시점에 맞춰 기만 신호를 방사함으로써, 해당 좌표에 허위 표적을 형성하는 것이다.

2-2 변조-재송신 기반 기만 재밍 기법

변조-재송신 기반 기만 재밍 기법은 직접 재송신 기반

기만 재밍 기법과 전반적으로 수행 과정이 동일하다. 다만 변조-재송신 기반 기법은 사전에 템플릿 자체를 시스템 함수로 생성하여 수신된 SAR 신호와 결합한다. 또한 단일 점 표적이 아닌 시스템 함수를 결합해야 하므로, 주파수 축에서의 콘볼루션을 통해 허위 표적에 대한 정보를 결합한다는 점도 다르다^{[15]~[20]}. 이러한 수행 과정으로 인해 일반적으로 변조-재송신 기반 기법은 SAR의 궤도 정보와 함께 신호 정보도 사전에 획득한 상태에서 수행한다고 가정한다.

그러나 상기 직접 재송신과 변조-재송신 기반의 기만 재밍 기법은 신호가 수신된 후부터 기만 재밍에 관한 동작을 수행하기 때문에, 거리축을 기준으로 재머의 뒤쪽 위치에만 허위 표적을 형성할 수 있다. 재머의 앞쪽 위치에 허위 표적을 형성하기 위해서는 $\Delta R(t_a) < 0$ 을 만족해야 하는데, 이는 SAR 신호가 재머에 수신되기 전에 기만 신호가 방사됨을 의미한다^[21]. 따라서 기존의 기만 재밍 기법들은 허위 표적 위치 설정 측면에서 한계점이 존재한다.

III. 제안하는 SAR 파라미터 추정 기법

II장에서 서술한 한계점을 극복하기 위해, 본 장에서는 현재 수신된 SAR 신호로부터 펄스 압축 및 RLSE를 통해 다음번 SAR 신호의 송신 시점 및 중심 주파수를 추정하는 기법을 제안한다. 제안하는 추정 기법은 그림 2와

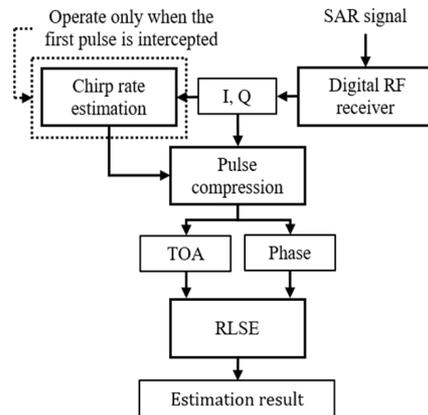


그림 2. 제안하는 SAR 파라미터 추정 기법 블록도
Fig. 2. Block diagram of the proposed estimation method for SAR parameters.

같이 디지털 RF 수신기를 통해 수신된 I(in-phase)와 Q (quadrature-phase)를 실시간으로 압축하고, 압축된 신호의 피크 지점에서 도착 시간과 위상을 측정한다. 측정된 도착 시간과 위상은 RLSE의 입력으로 들어가며, 출력으로 신호의 중심 주파수와 다음 송신 시점의 추정 결과를 획득한다.

제안하는 기법을 설명하기에 앞서, RLSE에 대해 먼저 간략히 소개한다. 그 후 기존 기법들의 한계점을 극복할 수 있는 새로운 기만 재밍 기법에 대하여 설명하고, 본 장의 III절에서 제안하는 추정 기법을 구체적으로 서술한다. 또한 제안하는 기법을 서술함에 있어 현재 수신된 신호는 n 번째 신호를, 그 다음번에 수신된 신호는 $n+1$ 번째 신호를 의미함을 알린다.

3-1 Recursive Least Square Estimation

LSE(least square estimation)에서 계산량과 실시간성을 개선하기 위해 고안된 RLSE는 데이터가 순차적으로 측정될 때마다 최소 자승 관점에서 오차를 실시간으로 줄여나간다는 특징을 가지며, 크게 초기화 단계와 업데이트 단계로 구분된다²²⁾. 초기화 단계에서는 추정하고자 하는 변수가 포함된 상태 벡터 $\hat{\mathbf{x}}_0$ 와 추정 오차 공분산 행렬 P_0 를 적절한 값으로 초기화한다. 업데이트 단계에서는 먼저 측정값 z_k 를 획득하고, 이때 z_k 는 식 (3)을 만족한다고 가정한다.

$$z_k = H_k \mathbf{x} + v_k. \quad (3)$$

여기서 H_k 는 출력 행렬, v_k 는 공분산이 R 인 백색 잡음을 의미한다. 이후 식 (4)와 같이 이득 행렬 K_k 를 계산하고, 상태 벡터와 추정 오차 공분산 행렬을 업데이트한다.

$$\begin{aligned} K_k &= P_{k-1} H_k^T (H_k P_{k-1} H_k^T + R)^{-1}, \\ \hat{\mathbf{x}}_k &= \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + K_k (z_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1}), \\ P_k &= (I - K_k H_k) P_{k-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

상기 과정을 초기화 이후 $k = 1, 2, \dots$ 동안 반복하며, 매 반복마다 업데이트된 상태 벡터를 획득한다.

3-2 제안하는 기만 재밍 기법

기존 기만 재밍 기법의 핵심은 허위 표적 위치 좌표에

서 반사된 SAR 신호가 SAR에 수신되는 시점에 맞춰 기만 신호를 방사하는 것이다. 반면 제안하는 기만 재밍 기법은 이 핵심을 그대로 유지하되, 이전에 수신된 SAR 신호로부터 파라미터를 추정하고, 이를 활용해 현재 SAR 신호가 재머에 수신되기 전에 기만 신호를 방사하는 것이다. 그림 3(a) 및 그림 3(b)는 각각 기존의 기만 재밍 기법과 제안하는 기만 재밍 기법에 대한 특정 방위 시각의 SAR와 재머의 송, 수신 흐름도를 나타낸다. 여기서 $t_{jmr, Tx}$, $t_{jmr, Rx}$, $t_{sar, Tx}$, $t_{sar, Rx}$ 는 각각 재머의 기만 신호 방사 시점, 재머의 SAR 신호 수신 시점, SAR 신호 송신 시점, SAR 신호 수신 시점을 의미하며, 일직선상에 시간의 흐름을 표현하기 위해 편의상 SAR의 송, 수신을 따로 구분하였다. 또한 R_j/c 와 R_F/c 는 각각 SAR와 재머 간의 거리와 SAR와 허위 표적 간의 거리에 따른 단방향 시간 지연을 나타낸다.

그림 3(a)를 보면 기존의 기만 재밍 기법은 재머에서 SAR 신호를 수신하고, 수신된 신호에 특정 시간 지연을 적용한 후 SAR를 향해 방사하는 것을 볼 수 있다. 반면 그림 3(b)를 보면 이전 신호로부터 추정된 현재 SAR 신호의 송신 시점을 알기 때문에, 재머의 기만 신호 방사 시점을 식 (5)와 같이 설정할 수 있다.

$$t_{jmr, Tx} = t_{sar, Tx} + \left(\frac{2R_F(t_{sar, Tx})}{c} - \frac{R_j(t_{sar, Tx})}{c} \right). \quad (5)$$

여기서 R_j 와 R_F 는 사전에 수집한 위성의 궤도 정보를 통해 계산한다고 가정한다. 상기 수식과 같이 기만 신호 방사 시점을 설정함으로써 허위 표적의 위치를 재머의 위치와 상관없이 SAR의 관심 영역 내에서 자유롭게 설정할 수 있다.

제안하는 기만 재밍 기법은 사전에 생성된 기만 신호를 설정된 기만 신호 방사 시점에 SAR를 향해 방사한다. 방사 시 기존의 기법처럼 수신된 신호를 활용하는 것이 아니기 때문에, 기저대역에서 RF 대역으로의 주파수 상향 변환이 요구된다. 이를 위해 수신기를 통해 탐지된 SAR 신호의 중심 주파수를 간단하게 측정하여 사용할 수 있지만, 주파수 측정 해상도에 의해 수 kHz에서 수십 kHz의 오차를 포함한다. 이 같은 오차로 인한 SAR와 재머의 중심 주파수 차이는 SAR 신호처리 시 위상 천이를 초래

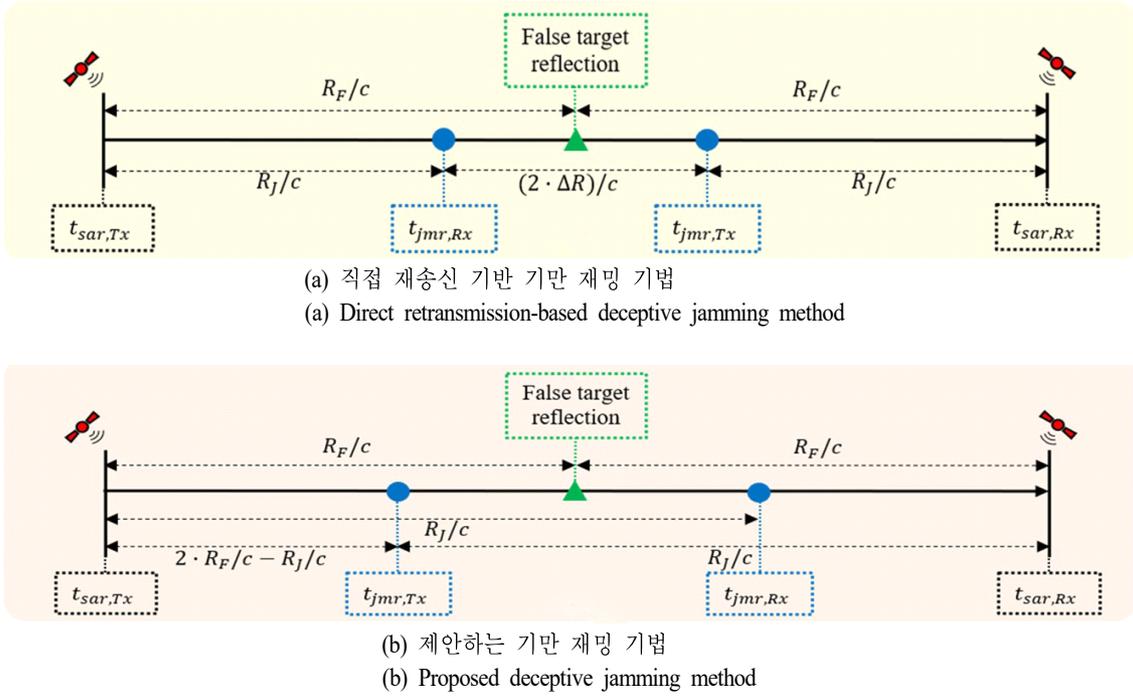


그림 3. SAR와 제머의 송/수신 흐름도

Fig. 3. Flow chart of transmission/reception in SAR and jammer.

하고, 이는 방위축에서의 허위 표적 위치 오차를 발생시킨다. 따라서 이를 방지하기 위해, 본 논문에서는 수신된 SAR 신호로부터 중심 주파수를 정확하게 추정하고, 이를 제머의 중심 주파수로 사용한다.

3-3 제안하는 다음번 SAR 신호 송신 시점 및 중심 주파수 추정 기법

디지털 RF 수신기는 원하는 주파수 대역 사이의 주파수 신호를 RF 밴드 패스 필터와 아날로그 디지털 변환기 등을 거쳐 I, Q로 변환한다. 본 논문에서는 관심 주파수 대역을 X 대역으로 설정하고, 균일한 대역폭을 가지는 RF 밴드 패스 필터 i 개를 사용하여 X 대역의 SAR 신호가 탐지되었다고 가정하였다. 탐지되어 기저대역으로 변환된 SAR 신호 $r(t)$ 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다^[1].

$$r(t) = s(t - \tau) \exp\{-j2\pi f_{sar} \tau\} \times \exp\{j2\pi(f_{sar} - f_{jmr})t\} \times \exp\{j(\psi_{sar} - \psi_{jmr})\}. \quad (6)$$

여기서 $s(t)$ 는 위성 SAR에서 일반적으로 사용되는 처프(chirp) 펄스 신호를 의미하며, τ 는 SAR와 제머 간의 거리에 따른 단방향 시간 지연, f_{sar} , f_{jmr} 는 SAR와 제머의 중심 주파수, ψ_{sar} , ψ_{jmr} 는 초기 SAR와 제머의 극부 발진기 위상을 나타낸다.

기저대역의 SAR 신호는 디지털 신호로 변환되어 복소수 샘플로 표현되며, 변환된 신호와 정합 필터 간의 컨볼루션을 통해 펄스 압축을 수행한다^[1]. 여기서 정합 필터는 제머의 동작 이후 가장 먼저 수집된 SAR 신호 샘플로부터 처프 비율(chirp rate)을 추정하고, 추정된 처프 비율로부터 정합 필터를 생성하여 사용한다. 처프 비율의 추정은 신호 샘플들의 위상값으로부터 순시 주파수를 구하고, 순시 주파수에 대한 선형 회귀를 통하여 추정할 수 있다. 거리 포락선이 구형 함수인 펄스는 압축되면서 싱크 함수 형태로 변환되고, 그와 동시에 신호 대 잡음비(SNR, signal-to-noise ratio)가 크게 증가한다. 따라서 압축된 펄스를 제외한 성분들의 크기는 압축된 펄스의 크기에 비해 작기 때문에, 피크 지점을 찾음으로써 신호의 도착 시

간과 위상을 매우 높은 정확도로 측정할 수 있다.

3-3-1 SAR 신호 송신 시점 추정 기법

측정된 도착 시간으로부터 RLSE를 통해 다음 신호의 송신 시점을 추정하기 위해, 본 논문에서는 정합 필터가 생성된 이후 재머에 수신된 첫 번째 신호의 송신 시점 T_{x_1} 과 펄스 반복 주기(PRI, pulse repetition interval)를 추정하고자 하는 변수로 설정하고, 추정된 두 변수를 통해 식 (7)과 같이 다음 신호의 송신 시점을 추정하였다.

$$\hat{t}_{n+1, Tx} = T_{x_1} + n \times PRI. \quad (7)$$

여기서 $\hat{t}_{n+1, Tx}$ 는 현재 신호가 수신되었을 때 추정된 다음 신호의 송신 시점이며, 펄스 반복 주기는 일정하다고 가정하였다. 상태 벡터 \mathbf{x} 는 추정하려는 변수 T_{x_1} 과 PRI로 구성되며, 이때 측정값 z_n 은 현재 수신된 신호의 송신 시점으로 설정함으로써 RLSE의 측정값에 대한 가정을 식 (8)과 같이 만족할 수 있다.

$$z_n = H_n x + v_n = [1 \ n-1] \begin{bmatrix} T_{x_1} \\ PRI \end{bmatrix} + v_n. \quad (8)$$

측정값을 현재 수신된 신호의 송신 시점으로 설정함에 따라, 본 논문에서는 측정된 도착 시간과 SAR, 재머 간의 거리에 따른 시간 지연을 통해 현재 수신된 신호의 송신 시점을 획득하였다. 그림 4와 같이 SAR 신호가 고정 PRI로 송신되고, 현재 송신 신호가 재머에 수신될 때의 도착

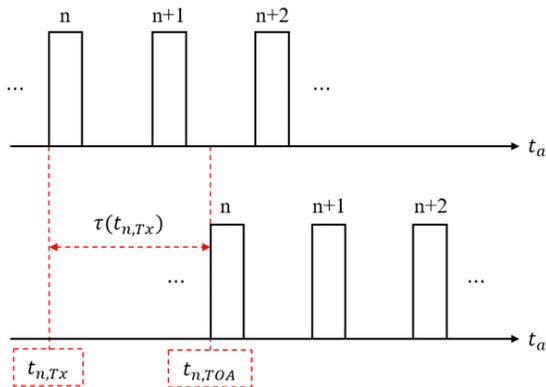


그림 4. SAR의 송신(위쪽)과 재머의 수신(아래쪽) 시점
Fig. 4. Timing of SAR transmission (upper) and jammer reception (lower).

시간을 $t_{n, TOA}$ 라고 할 때, 이 신호의 송신 시점 $t_{n, Tx}$ 는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{n, Tx} = t_{n, TOA} - \tau(t_{n, Tx}). \quad (9)$$

여기서 $\tau(t_{n, Tx})$ 는 송신 시점이 $t_{n, Tx}$ 일 때, SAR와 재머의 단방향 시간 지연을 의미하며, 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\tau(t_a) = \frac{|\mathbf{S}\mathbf{J}|}{c} = \frac{R_f(t_a)}{c}. \quad (10)$$

하지만 식 (9)는 $t_{n, Tx}$ 를 계산하는데 $t_{n, Tx}$ 가 필요하게 된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 도착 시간을 통해 단방향 시간 지연을 계산할 수 있는 함수를 다항식 곡선 피팅을 통해 생성한다^[23]. 피팅된 단방향 시간 지연 함수 $\tilde{\tau}(t_a')$ 는 피팅 전 단방향 시간 지연 함수 $\tau(t_a)$ 와 식 (11)과 같은 관계를 가진다.

$$\tau(t_a) = \tilde{\tau}(t_a') = \tilde{\tau}(t_a + \tau(t_a)), t_a' = t_a + \tau(t_a). \quad (11)$$

따라서 측정된 도착 시간과 피팅된 단방향 시간 지연 함수를 통해, 현재 신호의 송신 시점을 식 (12)와 같이 계산할 수 있다.

$$t_{n, Tx} = z_n = t_{n, TOA} - \tilde{\tau}(t_{n, TOA}). \quad (12)$$

최종적으로 제안하는 SAR 신호 송신 시점 추정 기법은 도착 시간으로부터 측정값을 획득하고, 초기화된 상태 벡터와 오차 공분산의 업데이트를 알고리즘 1과 같이 수행함으로써 다음 신호의 송신 시점을 추정할 수 있다. 여기서 상태 벡터의 초기화는 $n=1$ 일 때 T_{x_1} 을 첫 번째 측정값으로 초기화하고, $n=2$ 일 때 PRI를 두 번째 측정값과 첫 번째 측정값의 차로 초기화한다. 또한 측정 잡음 공분산과 추정 오차 공분산 행렬의 초기화는 샘플 간격에 기인한 측정 오차에 기반하여 초기화한다.

3-3-2 SAR 신호 중심 주파수 추정 기법

측정된 위상으로부터 RLSE를 통해 신호의 중심 주파수를 추정하기 위해, 본 논문에서는 SAR와 재머의 중심 주파수 차 $\Delta f (= f_{sar} - f_{jmr})$ 와 SAR와 재머의 초기 국부 발진기 위상의 차 $\Delta \psi (= \psi_{sar} - \psi_{jmr})$ 를 추정하고자 하는 변수로 설정하였다. 이때 $\Delta \psi$ 는 Δf 를 추정하는데 사용

알고리즘 1. SAR 신호 송신 시점 추정 기법
Algorithm 1. Estimation method for the transmission time of SAR signals.

Input: $t_{n,TOA}$
Output: $\hat{t}_{n+1,Tx}$

```

1  $z_n = t_{n,TOA} - \tilde{\tau}(t_{n,TOA})$ 
2 if  $n = 1$  then
3    $\hat{\mathbf{x}}_n = \begin{bmatrix} Tx_1 \\ PRJ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_n \\ 0 \end{bmatrix}$ 
4    $R = \sigma_{0,t}^2$ 
5 end
6 if  $n = 2$  then
7    $\hat{\mathbf{x}}_n = \begin{bmatrix} Tx_1 \\ PRJ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{n-1}(1) \\ z_n - \hat{\mathbf{x}}_{n-1}(1) \end{bmatrix}$ 
8    $P_n = \text{diag}(\sigma_{1,t}^2, \sigma_{2,t}^2)$ 
9 end
10 if  $n = 3, 4, \dots$  then
11    $H_n = [1, n - 1]$ 
12    $K_n = P_{n-1}H_n^T(H_nP_{n-1}H_n^T + R)$ 
13    $\hat{\mathbf{x}}_n = \hat{\mathbf{x}}_{n-1} + K_n(z_n - H_n\hat{\mathbf{x}}_{n-1})$ 
14    $P_n = (I - K_nH_n)P_{n-1}$ 
15 end
16 return  $\hat{\mathbf{x}}_n$ 
17  $\hat{t}_{n+1,Tx} = \hat{\mathbf{x}}_n(1) + n \times \hat{\mathbf{x}}_n(2)$ 

```

되는 변수이며, 신호의 중심 주파수를 추정하는 직접적으로 관여하지 않는다. 신호의 중심 주파수는 재머의 중심 주파수를 이미 알고 있으므로 Δf 를 추정함으로써 쉽게 추정할 수 있다. 상태 벡터 \mathbf{x} 는 추정하려는 변수 Δf 와 $\Delta \psi$ 로 구성되며, 측정값 z_n 은 식 (13)과 같이 설정한다.

$$z_n = \exp\{j\phi_n\} + 2\pi f_{jmr} \tilde{\tau}(t_{n,TOA}). \quad (13)$$

여기서 $\exp\{j\phi_n\}$ 는 피크 지점에서 측정된 현재 수신된 신호의 접힌(wrapped) 위상, ϕ_n 은 펼친(unwrapped) 위상이며, 식 (6)의 SAR 신호 모델로부터 식 (14)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_n &= -2\pi(\Delta f + f_{jmr})\tilde{\tau}(t_{n,TOA}) \\ &\quad + 2\pi\Delta f t_{n,TOA} + \Delta\psi \\ &= -2\pi f_{jmr} \tilde{\tau}(t_{n,TOA}) + 2\pi\Delta f t_{n,Tx} + \Delta\psi. \end{aligned} \quad (14)$$

이때 측정값에 대한 가정이 선형 방정식이므로, 접힌 위

상에 의한 모호성 문제를 방지하기 위해 측정값을 펼친 위상으로 변환하여 사용한다. 이에 따라 수신된 신호의 펼친 위상을 측정값에 대하여 정리한다면 RLSE의 측정값에 대한 가정을 식 (15)와 같이 만족할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_n &= H_n x + v_n = [2\pi t_{n,Tx} \ 1] \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta \psi \end{bmatrix} + v_n, \\ Z_n &= \text{unwrap}[z_n]. \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 $\text{unwrap}[\cdot]$ 은 접힌 위상을 펼친 위상으로 변환해주는 함수를 의미한다.

최종적으로 제안하는 SAR 신호 중심 주파수 추정 기법은 도착 시간과 위상으로부터 측정값을 획득하고, 초기화된 상태 벡터와 오차 공분산의 업데이트를 알고리즘 2

알고리즘 2. SAR 신호 중심 주파수 추정 기법
Algorithm 2. Estimation method for the center frequency of SAR signals.

Input: $\exp\{\phi_n\}, t_{n,TOA}$
Output: \hat{f}_{sar}

```

1  $z_n = \exp\{\phi_n\} + 2\pi f_{jmr} \tilde{\tau}(t_{n,TOA})$ 
2  $t_{n,Tx} = t_{n,TOA} - \tilde{\tau}(t_{n,TOA})$ 
3 if  $n = 1$  then
4    $\hat{\mathbf{x}}_n = \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ 
5    $R = \sigma_{0,f}^2$ 
6 end
7 if  $n = 2$  then
8    $\hat{\mathbf{x}}_n = \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta \psi \end{bmatrix}$ 
9    $P_n = \text{diag}(\sigma_{1,f}^2, \sigma_{2,f}^2)$ 
10 end
11 if  $n = 3, 4, \dots$  then
12    $H_n = [2\pi t_{n,Tx} \ 1]$ 
13    $K_n = P_{n-1}H_n^T(H_nP_{n-1}H_n^T + R)$ 
14    $Z_n = \text{unwrap}[z_n]$ 
15    $\hat{\mathbf{x}}_n = \hat{\mathbf{x}}_{n-1} + K_n(Z_n - H_n\hat{\mathbf{x}}_{n-1})$ 
16    $P_n = (I - K_nH_n)P_{n-1}$ 
17 end
18 return  $\hat{\mathbf{x}}_n$ 
19  $\hat{f}_{sar} = f_{jmr} + \hat{\mathbf{x}}_n(1)$ 

```

와 같이 수행함으로써 신호의 중심 주파수를 추정할 수 있다. 상태 벡터의 초기화는 $n=1$ 일 때 Δf 와 $\Delta \psi$ 를 모두 0으로 초기화하며, 이는 Δf 를 초기화하는데 현재 측정값과 이전 측정값의 차가 사용되고, $\Delta \psi$ 를 초기화하는데 Δf 가 사용되기 때문이다. $n=2$ 일 때 Δf 는 식 (16)과 같이 초기화한다.

$$\Delta f = \frac{Z_n - Z_{n-1}}{2\pi(t_{n, Tx} - t_{n-1, Tx})}. \tag{16}$$

상기 수식은 현재 신호와 이전 신호 간의 펄친 위상차를 Δf 에 대하여 정리함으로써 유도할 수 있다. 초기화된 Δf 를 통해 $n=2$ 일 때 $\Delta \psi$ 는 식 (17)과 같이 초기화한다.

$$\Delta \psi = Z_n - 2\pi t_{n, Tx} \Delta f. \tag{17}$$

상기 수식은 펄친 위상으로부터 $\Delta \psi$ 에 대하여 나타냄으로써 유도할 수 있으며, 측정 잡음 공분산과 추정 오차 공분산 행렬의 초기화는 열잡음에 기반하여 초기화한다.

IV. 모의실험

제안하는 기법의 파라미터 추정 성능을 확인하기 위해 표 1에 나타난 환경을 기반으로 모의실험을 진행하였다. 여기서 표 1의 B, PRF, PW, f_s 는 각각 SAR의 신호 대역폭, 펄스 반복 주파수, 펄스 폭, 재머의 샘플링 주파수를 의미하며, $\sigma_{0,t}^2, \sigma_{1,t}^2, \sigma_{2,t}^2$ 는 각각 알고리즘 1의 측정 잡음 공분산, 추정 오차 공분산 행렬의 대각 성분, $\sigma_{0,f}^2, \sigma_{1,f}^2, \sigma_{2,f}^2$ 는 각각 알고리즘 2의 측정 잡음 공분산, 추정 오차 공분산 행렬의 대각 성분을 나타낸다. 재머의 위치 좌표는 LLA(latitude-longitude-altitude) 좌표로 [36, 128, 0]으로 설정한 후, ECEF(earth-centered earth-fixed) 좌표로 변환하여 사용하였으며, SAR의 궤도 정보는 ICEYE-X20에 대한 TLE(two-line element)로부터 획득하여 사용하였다^[24]. 시뮬레이션 시간은 23년 7월 12일 05시 25분 14.5초부터 15.5초까지 1초로 설정하였으며, 14.5초에 첫 번째 SAR 신호가 송신된 것으로 시나리오를 설정하였다. SAR에서 송신된 신호는 자유 공간 경로 손실을 겪는다고 가정하였으며, 재머에 수신되는 신호의 SNR은 자유 공간 경로

표 1. 모의실험 파라미터

Table 1. Parameters of simulation.

Parameter	Value
f_{sar}	9.65 GHz
B	300 MHz
PRF	6,283.09 Hz
PW	31.84 μ s
f_s	400 MHz
$\sigma_{0,t}^2$	$(2.5 \times 10^{-9})^2 / 12$ s
$\sigma_{1,t}^2$	$(2.5 \times 10^{-9})^2 / 12$ s
$\sigma_{2,t}^2$	$(2.5 \times 10^{-9})^2 / 18$ s
$\sigma_{0,f}^2$	0.3^2 rad
$\sigma_{1,f}^2$	10^2 rad/s
$\sigma_{2,f}^2$	0.3^2 rad

손실과 송, 수신 안테나 이득, 잡음지수 등을 현실적으로 고려하여 15 dB로 설정하였다. 분석의 편의를 위해 초기화 단계($n=1, 2$)에서의 추정값은 제외하고 파라미터 추정 결과를 도시하였다.

그림 5는 제안하는 SAR 신호 송신 시점 추정 기법을 통해 추정된 다음 신호의 송신 시점에 대한 오차를 나타낸다. 여기서 오차는 추정된 결과값에서 참값을 뺀 값을 의미한다. 그림 5를 보면 추정된 송신 시점의 오차가 대

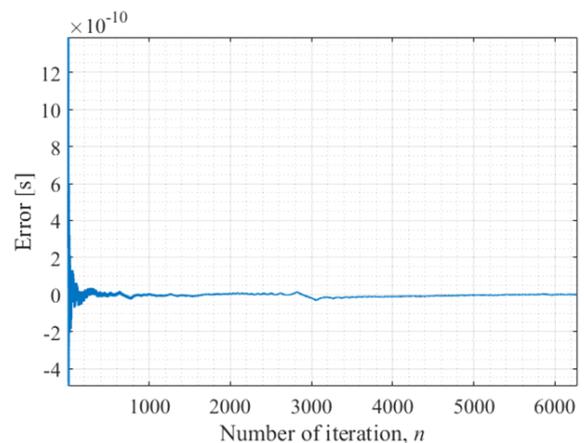


그림 5. SAR 신호 송신 시점 추정 오차

Fig. 5. Estimation error for the transmission time of SAR signals.

략 0.01 ns 이하로, 샘플링 간격보다 작은 값으로 수렴하며 매우 정밀하게 추정되는 것을 볼 수 있다. 또한 대략 100번째 펄스부터 추정 결과가 수렴하기 때문에, SAR 신호가 재머에 수신된 이후 100번째 펄스부터 추정된 결과를 활용하여 허위 표적의 위치를 자유롭게 설정할 수 있다.

그림 6은 재머의 중심 주파수가 SAR의 중심 주파수보다 3 kHz 클 때, 제안하는 SAR 신호 중심 주파수 추정 기법을 통해 추정된 Δf 를 나타낸다. 그림 6을 보면 수신되는 펄스 개수가 증가함에 따라 주파수 차이가 0.1 Hz 미만의 오차를 가지고 -3 kHz로 수렴하며 매우 정확하게 추정되는 것을 볼 수 있다. 또한 대략 50번째 펄스부터 0.1 Hz 미만의 오차를 가지고 추정 결과가 수렴하기 시작하며, 수렴된 추정 결과를 바탕으로 재머의 중심 주파수를 설정하여 주파수 상, 하향 변환을 정확하게 수행할 수 있다.

그림 7은 재머의 중심 주파수가 SAR의 중심 주파수보다 65.8309 kHz 클 때, 제안하는 SAR 신호 중심 주파수 추정 기법을 통해 추정된 Δf 를 나타낸다. 추정된 결과를 보면 그림 6의 결과와 동일하게 Δf 가 -3 kHz로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 재머와 SAR의 중심 주파수 차이가 PRF의 절반보다 커서 모호성이 발생했기 때문이다. 모호성이 발생했을 때의 추정된 결과를 기반으로 재머의 중심 주파수를 설정한다면, SAR의 중심 주파

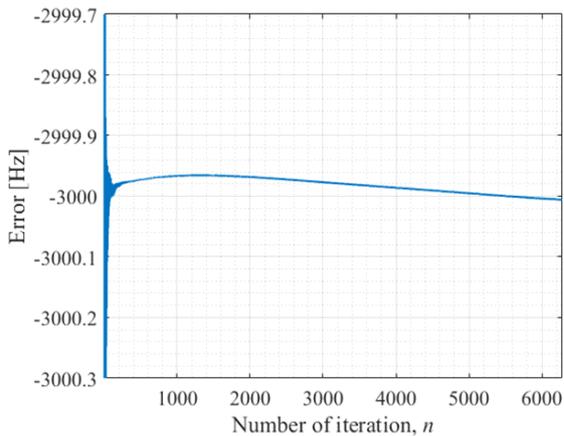


그림 6. 모호성이 없는 SAR와 재머의 중심 주파수 차이 추정 오차

Fig. 6. Estimation error for the center frequency difference between SAR and jammer without ambiguity.

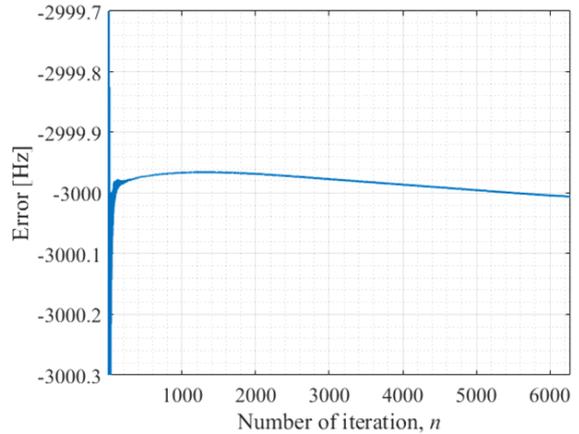


그림 7. 모호성이 있는 SAR와 재머의 중심 주파수 차이 추정 오차

Fig. 7. Estimation error for the center frequency difference between SAR and jammer with ambiguity.

수보다 PRF의 배수 배만큼 크거나 작게 설정될 것이고, 해당 중심 주파수를 가지는 반송파에 기만 신호가 실려 SAR을 향해 방사될 것이다. 하지만 SAR 또한 신호처리 과정에서 방위축으로 PRF에 의한 모호성이 존재한다. 따라서 SAR와 재머의 중심 주파수가 PRF의 배수 배만큼 차이가 나더라도, 방위축에서 허위 표적의 위치 오차가 발생하지 않는다. 결과적으로 제안하는 SAR 신호 중심 주파수 추정 기법을 통해 SAR의 중심 주파수가 정확하게 추정되거나, SAR의 중심 주파수보다 PRF의 배수 배만큼 크거나 작은 값으로 추정이 되지만, 이를 통해 주파수 상향 변환을 하더라도 방위축 상에서 허위 표적을 의도한 위치에 형성할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 기존의 기만 제밍 기법에서 존재하는 한계점을 해결하기 위한 새로운 기만 제밍 기법 연구의 일환으로서, 현재 수신된 SAR 신호로부터 펄스 압축 및 RLSE를 통해 신호의 다음 송신 시점 및 중심 주파수를 추정하는 기법을 제안하였다. 제안하는 추정 기법은 수신된 신호로부터 실시간으로 다음 신호의 송신 시점을 샘플링 간격 이내로, 신호의 중심 주파수를 0.1 Hz 미만의 오차로 정확하게 추정할 수 있으며, 모의실험을 통해 이

를 확인하였다. 추정된 파라미터는 기만 신호 방사 시점을 결정하고, 사전에 기저대역에서 생성된 기만 신호를 RF 대역으로 변환하는 데 사용되며, 이를 통해 허위 표적 위치 설정에 대한 한계점을 극복할 수 있다.

다만 제안하는 기만 제밍 기법은 수신된 SAR 신호를 활용하지 않고 SAR의 특성을 반영한 기만 신호를 직접 생성해야 한다. 또한 TLE로부터 획득한 위성의 궤도 정보에 오차가 포함될 수 있고, 추정된 파라미터 또한 이에 의한 오차가 포함될 수 있다. 따라서 향후에는 이러한 점들을 고려하여 제안하는 기만 제밍 기법에 관한 구체적인 연구를 수행하고, 위성 궤도 오차가 허위 표적 형성에 미치는 영향을 분석할 예정이다.

References

- [1] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar*, Norwood, MA, Artech House, 2005.
- [2] S. Martinis, C. Kuenzer, A. Wendleder, J. Huth, A. Twele, and A. Roth, et al., "Comparing four operational SAR-based water and flood detection approaches," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 36, no. 13, pp. 3519-3543, Jul. 2015.
- [3] S. E. Park, Y. T. Jung, "Detection of earthquake-induced building damages using polarimetric SAR data," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 1, p. 137, Jan. 2020.
- [4] G. D. Martino, A. Iodice, *Maritime Surveillance with Synthetic Aperture Radar*, Stevenage, SciTech, 2021.
- [5] S. Li, X. Fu, and J. Dong, "Improved ship detection algorithm based on YOLOX for SAR outline enhancement image," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 16, p. 4070, Aug. 2022.
- [6] 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.
- [7] J. Deng, H. Bi, J. Zhang, Z. Liu, and L. Yu, "Amplitude-phase CNN-based SAR target classification via complex-valued sparse image," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 15, pp. 5214-5221, Jun. 2022.
- [8] X. Lin, P. Liu, and G. Xue, "Fast generation of SAR deceptive jamming signal based on inverse range Doppler algorithm," in *IET International Radar Conference*, Xi'an, Apr. 2013, pp. 1-4.
- [9] B. Zhao, F. Zhou, and Z. Bao, "Deception jamming for squint SAR based on multiple receivers," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 8, no. 8, pp. 3988-3998, May 2014.
- [10] X. He, J. Zhu, J. Wang, D. Du, and B. Tang, "False target deceptive jamming for countering missile-borne SAR," in *2014 IEEE 17th International Conference on Computational Science and Engineering*, Chengdu, Jan. 2015, pp. 1974-1978.
- [11] B. Zhao, L. Huang, and J. Zhang, "Performance improvement of deception jamming against SAR based on minimum condition number," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, no. 3, pp. 1039-1055, Mar. 2017.
- [12] D. Da-hai, X. F. Wu, W. Xue-song, and X. Shun-ping, "SAR active-decoys jamming based on DRFM," in *IET International Conference on Radar Systems*, Edinburgh, Oct. 2007.
- [13] 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. 149-159, Feb. 2022.
- [14] S. K. Kweon, J. W. Kim, H. S. Shin, and E. N. You, "Development of a synthetic aperture radar jamming algorithm using digital radio frequency memory," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 11, pp. 982-985, Nov. 2020.
- [15] Q. Sun, T. Shu, S. Zhou, B. Tang, and W. Yu, "A

- novel jamming signal generation method for deceptive SAR jammer," in *2014 IEEE Radar Conference*, Cincinnati, OH, Aug. 2014, pp. 19-23.
- [16] Y. Liu, W. Wang, X. Pan, Q. Fu, and G. Wang, "Inverse omega-K algorithm for the electromagnetic deception of synthetic aperture radar," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 9, no. 7, pp. 3037-3049, Jul. 2016.
- [17] K. Yang, W. Ye, F. Ma, G. Ji, and Q. Tong, "A large-scene deceptive jamming method for space-borne SAR based on time-delay and frequency-shift with template segmentation," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 1, p. 53, Dec. 2019.
- [18] B. Zhao, L. Huang, J. Li, M. Liu, and J. Wang, "Deceptive SAR jamming based on 1-bit sampling and time-varying thresholds," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 11, no. 3, pp. 939-950, Feb. 2018.
- [19] J. Saeedi, "A new hybrid method for synthetic aperture radar deceptive jamming," *International Journal of Microwave Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 1-14, Jan. 2019.
- [20] K. Yang, W. Ye, X. Wu, F. Ma, and G. Li, "Fast generation of deceptive jamming signal against space-borne SAR," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 13, pp. 5580-5596, Sep. 2020.
- [21] B. Zhao, F. Zhou, M. Tao, Z. Zhang, and Z. Bao, "Improved method for synthetic aperture radar scattered wave deception jamming," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 8, no. 8, pp. 971-976, Oct. 2014.
- [22] D. Simon, *Optimal State Estimation: Kalman, H_∞ , and Nonlinear Approaches*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2006.
- [23] J. Kiusalaas, *Numerical Methods in Engineering with MATLAB*, New York, NY, Cambridge University Press, 2005.
- [24] Satellite Imagery Data Archive, "N2YO," 2024. Available: <https://www.n2yo.com>

김 상 원 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6096-3920>



2007년 2월: 한국과학기술원 전산학과 (공학박사)

1997년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 디지털 신호처리, 수치해석, 전자전, SAR 등

이 동 근 [국방과학연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4350-1895>



1991년 2월: 충남대학교 계산통계학과 (이학석사)

1991년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 수석연구원

[주 관심분야] 광대역 전자전 수신기, 통신/비통신 제밍 기법, 초고주파 신호 방향탐지, 기계학습 등

박 영 주 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7152-1442>



1993년 2월: 성균관대학교 전기공학과 (공학사)
1997년 2월: 성균관대학교 전기공학과 (공학석사)
2017년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)
1997년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임

연구원

[주 관심분야] 전자전 송수신 시스템 설계, 초광대역 안테나 설계, 위성 전자전 시스템 등

김 정 훈 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5683-2402>



2010년 8월: 한양대학교 전자전기제어계측공학과 (공학박사)
2010년 9월 ~ 2012년 8월: 한국산업기술시험원 위촉연구원
2012년 10월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 초고주파 수신기, 주파수

합성기, 전자파 잔향실, EMI 등

주 증 민 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4742-974X>



1999년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)
2001년 2월: 광주과학기술원 정보통신학과 (공학석사)
2005년 2월: 광주과학기술원 정보통신학과 (공학박사)
2005년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임

연구원

[주 관심분야] 정보통신, 신호처리 등

방 중 현 [국방과학연구소/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6108-4071>



2021년 8월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2023년 2월: 부산대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2023년 4월 ~ 현재: 국방과학연구소 연구원

[주 관심분야] 전자전 · 레이더 신호처리,

SAR 재밍 등

김 중 규 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0009-0007-8513-7426>



2004년 8월: 고려대학교 전기전자전파공학부 (공학사)
2006년 8월: 고려대학교 전파통신공학과 (공학석사)
2007년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 정보통신, 신호처리 등