

## RLSE 기반 신호 파라미터 추정을 통한 위성 SAR 기만 재밍 기법

Deceptive Jamming Method for Satellite-Borne SAR  
Using RLSE-Based Signal Parameters Estimation

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

본 논문에서는 RLSE(recursive least squares estimation)를 기반으로 추정된 SAR(synthetic aperture radar) 신호 파라미터를 이용한 위성 SAR 기만 재밍 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 기존의 변조-재송신 기반 기만 재밍 기법과 달리 기만 재밍에 필요한 파라미터를 실시간으로 추정하고, 추정된 파라미터를 통해 기만 신호를 생성하여 SAR 신호가 수신되기 전 기만 신호를 방사한다. 이에 따라 정확한 SAR 신호 제원을 모르더라도 기만 재밍을 수행할 수 있으며, 거리 축 상에서 재머의 앞쪽에도 허위 표적을 형성할 수 있다. 제안하는 기법의 효과를 분석하기 위해 모의실험을 통해 허위 점 표적을 형성하고, 형성 결과를 정량적 영상 품질 지표들을 활용하여 분석한 결과를 제시한다.

## Abstract

In this study, we propose a deceptive jamming method for satellite-borne synthetic aperture radar (SAR) using SAR signal parameters estimated based on recursive least squares estimation (RLSE). Unlike traditional modulation retransmission-based deceptive jamming methods, the proposed method estimates the parameters required for deceptive jamming in real-time and generates deceptive signals using these estimated parameters. Deceptive signals were emitted before the SAR signals were intercepted. This approach enables deceptive jamming even without exact prior knowledge of the SAR signal parameters and allows the formation of false targets ahead of the jammer along the range direction. To assess the effectiveness of the proposed method, we conducted simulations to focus on false-point targets and analyzed the results using SAR image quality measurements.

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

## I. 서 론

합성 개구면 레이더(SAR, synthetic aperture radar)는 고 해상도 이미징 레이더 기술로, 전천후적인 특성을 가지며

주야간에 상관없이 운용할 수 있기 때문에 군사 및 민간 분야에서 널리 활용되고 있다<sup>[1]~[4]</sup>. 특히 위성 SAR는 지구 주위를 공전하며 넓은 지역을 관측할 수 있기 때문에 감시, 정찰, 표적 탐지 및 식별과 같은 군사적 목적으로

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

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received August 2, 2024 ; Revised August 19, 2024 ; Accepted September 10, 2024. (ID No. 20240802-079)

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

활발히 사용되고 있다. 이에 따라 더욱 강건한 우주 기반 감시정찰 시스템을 구축하기 위해 SAR가 탑재된 수많은 위성이 발사되고 있다.

한편, 적성 SAR로부터 아군의 자산과 정보를 보호하기 위해 SAR 재밍 기법이 많은 관심을 받고 있다. 일반적으로 SAR 재밍 기법은 잡음 재밍과 기만 재밍으로 분류되며, 각 재밍 기법은 그 목적에 따라 다르게 사용된다. 잡음 재밍의 경우, 적이 관심 있어 하는 표적을 잡음 속에 묻어버림으로써 유의미한 정보를 적이 획득하지 못하도록 한다. 반면 기만 재밍의 경우, 적성 SAR 이미지에 실재로는 존재하지 않는 허위 표적을 형성함으로써 적이 거짓 정보를 획득하도록 유도한다. 이와 같은 목적을 달성하기 위해, 잡음 재밍과 달리 기만 재밍은 실제 레이더 반사 신호와 구별하기 어려운 기만 신호를 방사한다. 이에 따라 기만 재밍은 적이 재밍 유무를 판단하기 어렵게 만들며, 거리 측과 방위 측에서의 SAR 처리 이득도 활용할 수 있기 때문에 적은 전력을 소모한다<sup>[5],[6]</sup>.

이러한 장점으로 인해 기만 재밍에 관한 많은 연구가 수행되었으며, 지금까지 연구된 대부분의 기만 재밍 기법은 변조-재송신 메커니즘에 기반한다<sup>[7]~[18]</sup>. 변조-재송신 기반 기만 재밍 기법은 재머에 수신된 SAR 신호를 실제 표적 반사 신호와 유사하게 시간 지연, 크기, 위상을 조정하여 SAR를 향해 재송신한다. SAR는 이같이 변형된 신호를 실제 표적 반사 신호로 간주하고 신호처리를 수행하며, 그 결과 SAR 이미지에 허위 표적이 형성된다. 하지만 변조-재송신 기반 기만 재밍 기법은 SAR 신호를 수신하고, 일정 시간 뒤에 기만 신호를 방사하기 때문에 SAR의 관심 영역 내에서 거리 측을 기준으로 재머의 앞쪽에 허위 표적을 형성할 수 없다. 따라서 기존의 기만 재밍 기법은 허위 표적 위치 설정 측면에서 분명한 한계점이 존재한다.

이에 본 논문에서는 RLSE(recursive least squares estimation)를 기반으로 추정된 SAR 파라미터를 이용하여 기만 신호를 생성하고, 생성한 기만 신호를 SAR 신호가 수신되기 전에 방사할 수 있는 새로운 기만 재밍 메커니즘을 제안한다. 제안하는 기법의 주요 목적은 SAR의 관측 영역 내에서 거리 측을 기준으로 재머의 뒤쪽뿐만 아니라, 앞쪽에도 허위 표적을 형성하는 것이다. 이러한 목적을

달성하기 위해 이전 연구에서 RLSE 기반 SAR 신호 송신 시점 및 중심 주파수 추정 알고리즘을 개발하였다<sup>[19]</sup>. 본 논문에서는 추정된 송신 시점을 바탕으로 기만 신호 방사 시점을 유도하였으며, 추정된 파라미터를 기반으로 기만 신호를 모델링하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 변조-재송신 기반 기만 재밍 기법과 이전 연구에서 수행된 기만 재밍에 필요한 SAR 파라미터 추정 기법을 소개한다. III장에서 추정된 파라미터를 이용하여 허위 표적 위치 설정의 한계점을 극복할 수 있는 기만 재밍 기법에 대하여 서술한다. IV장에서 모의실험을 통해 제안하는 기만 재밍 기법의 효과를 분석하며, V장에서 본 논문의 결론을 내린다.

## II. 관련 연구 및 배경

### 2-1 변조-재송신 기반 기만 재밍 기법

그림 1과 같이 방위 시간  $t_a$ 에 따라  $y$ 축과 평행하게 일정 속도  $v$ 로 이동하고 있는 SAR에 대하여 재머의 위치 좌표를  $J(0, 0, 0)$ , 허위 표적의 위치 좌표를  $F(x_f, y_f, z_f)$ 라고 할 때, SAR와 재머, SAR와 허위 표적 간의 경사 거리는 각각  $R_j(t_a)$ ,  $R_f(t_a)$ 로 표현된다. 이러한 기하 구조에서 변조-재송신 기반 기만 재밍은 다음과 같은 순서로 수행된다. 먼저 RF(radio frequency) 수신기를 통해 SAR

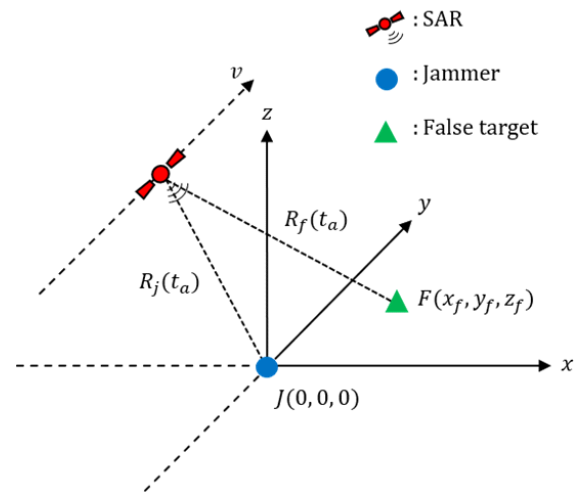


그림 1. 위성 SAR 기만 재밍 기하 구조  
Fig. 1. Geometry of deceptive SAR jamming.

신호를 수신하고, 주파수 하향 변환한 뒤, 디지털 신호로 변환한다. 그 후 변환된 신호는 FFT(fast Fourier transform)를 통해 주파수 스펙트럼으로 표현되며, 여기에 아래와 같은 재머 시스템 함수(JSF, jammer system function)  $H$ 를 곱한다.

$$H(f_r, t_a) = \sum_{f \in T} \sigma_f e^{-j2\pi(f_r + f_s) \frac{2\Delta R_f(t_a)}{c}}, \quad (1)$$

여기서  $f_r$ ,  $T$ ,  $\sigma_f$ ,  $f_s$ ,  $c$ 는 각각 거리 측 주파수, 허위 표적 템플릿, 허위 표적의 반사 계수, SAR의 중심 주파수, 빛의 속도이며,  $\Delta R_f(t_a)$ 는  $R_f(t_a)$ 와  $R_j(t_a)$ 의 차를 의미한다. 마지막으로 생성된 기만 신호의 주파수 스펙트럼을 IFFT(inverse fast Fourier transform)를 통해 시간 도메인으로 변환하고, DAC(digital-to-analog converter)와 주파수 상향 변환을 통해 RF 신호로 SAR를 향해 재방사된다.

하지만 변조-재송신 메커니즘은 수신된 SAR 신호를 특정 시간만큼 지연시킨 후 재방사하기 때문에 거리 측 상에서 재머의 뒤쪽에만 허위 표적을 형성할 수 있다. 허위 표적을 재머의 앞쪽에 형성하기 위해선 시간 지연 값이 음수가 되어야 하는데, 이는 SAR 신호가 수신되기 전 기만 신호가 방사됨을 의미한다. 따라서 변조-재송신 기반 기만 재밍 기법은 허위 표적 위치 설정 측면에서 제약 사항이 존재한다.

## 2.2 SAR 파라미터 추정 기법

RF 수신기를 통해 수신되어 기저대역으로 변환된 SAR 신호는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r(t_r, t_a) = & Arect\left(\frac{t_r - \tau_j(t_a)}{T_r}\right) e^{j\pi K_r(t_r - \tau_j(t_a))^2} \\ & \times e^{-j2\pi f_s \tau_j(t_a)} e^{j2\pi(f_s - f_j)t_r} \\ & \times e^{j(2\pi(f_s - f_j)t_a + (\psi_s - \psi_j))} + w(t_r), \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $A$ ,  $t_r$ ,  $T_r$ ,  $K_r$ ,  $f_j$ ,  $\psi_s$ ,  $\psi_j$ ,  $w(t_r)$ 은 각각 수신된 신호의 크기, 거리 측 시간, 펄스 폭, 처프 비율(chirp rate), 재머의 중심 주파수, SAR와 재머의 초기 국부 발진기 위상, 가우시안 백색 잡음을 의미한다. 일반적으로 재머의 중심 주파수는 주파수 스펙트럼 상에서 측정된 SAR의 중심 주파수로 설정될 수 있으나, 분해능 대역폭(resolution

bandwidth)에 의해 수 kHz에서 수백 kHz까지의 오차를 가진다<sup>[20]</sup>. 따라서 SAR 신호 수신 모델은 SAR와 재머 간의 주파수 오프셋을 포함한다.

기만 재밍에 필요한 파라미터를 획득하기 위해, 수신된 SAR 신호로부터 펄스 폭, 처프 비율, SAR 신호 송신 시점 및 중심 주파수를 추정한다. 펄스 폭은 SAR 신호만 수신된다는 가정하에 수신된 신호의 크기가 검출 임계값 이상인 구간을 측정함으로써 추정할 수 있다<sup>[20]</sup>. 처프 비율은 임계값 이상의 구간에서의 데이터 샘플에 대하여 각 샘플 간의 위상차를 계산하고, 계산된 위상차에 선형 회귀를 수행하여 추정할 수 있다<sup>[21]</sup>. 구체적으로는 수신된 신호의 순시 주파수가 식 (3)과 같이 표현되기 때문에 위상차에 선형 회귀를 적용하여 생성한 선형 모델의 기울기 값을 취함으로써 처프 비율을 추정한다.

$$\begin{aligned} f(t_r, t_a) = & \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t_r, t_a)}{dt_r} \\ = & K_r(t_r - \tau_j(t_a)) + (f_s - f_j). \end{aligned} \quad (3)$$

펄스 폭과 처프 비율은 재머의 동작 이후 첫 번째로 수신된 신호에 대해서만 추정되는데, 이는 두 파라미터가 일반적으로 고정된 값을 가지기 때문이다.

추정된 펄스 폭과 처프 비율은 정합 필터를 생성하는 데도 사용된다. 생성된 정합 필터를 기반으로 수신된 신호와의 펄스 압축을 수행하며, 압축된 펄스의 피크 지점에서 도착 시간과 위상을 측정한다. 그 후 현재 수신된 신호로부터 측정된 도착 시간과 위상을 참고문헌 [19]에서 서술된 RLSE 기반 추정 알고리즘의 입력으로 인가하며, 출력으로 다음번에 수신될 신호의 SAR 신호 송신 시점과 SAR와 재머 간의 주파수 오프셋 추정치를 획득한다. 이때 재머의 중심 주파수를 알고 있기 때문에 SAR의 중심 주파수는 재머의 중심 주파수와 주파수 오프셋을 더하여 추정할 수 있다. 따라서 매 PRI(pulse repetition interval)마다 신호의 송신 시점과 중심 주파수 추정치를 얻으며, 추정된 파라미터를 기반으로 기만 재밍을 수행한다.

## III. 제안하는 기만 재밍 기법

본 장에서는 제안하는 위성 SAR 대상 기만 재밍 기법에 대하여 서술한다. 그림 2는 제안하는 기법의 블록도이

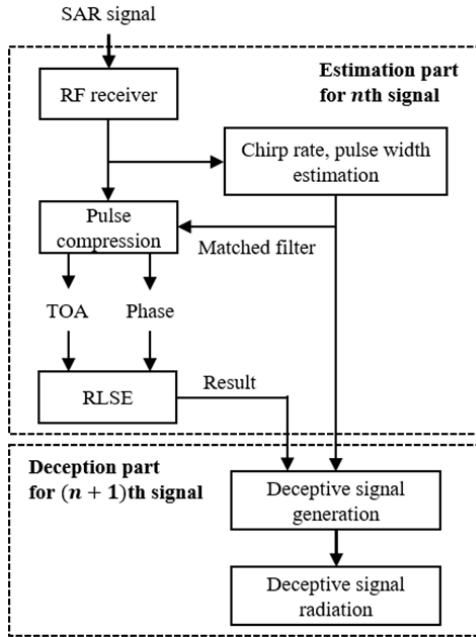


그림 2. 제안하는 기만 재밍 기법 블록도  
Fig. 2. Block diagram of the proposed deceptive jamming method.

며, 크게 추정 파트와 기만 파트로 구분된다. 여기서 추정 파트는 현재 수신된 SAR 신호에 대하여 동작하며, 기만

파트는 다음번에 수신되는 SAR 신호에 대하여 수행된다. 이는 추정된 파라미터를 통해 기만 재밍을 수행할 때 SAR 신호가 수신되기 전에도 기만 신호가 방사될 수 있어야 하기 때문이다. 설명의 편의를 위해 현재 수신된 신호를  $n$ 번째 신호, 다음번에 수신될 신호를  $n+1$ 번째 신호로 표현한다.

### 3-1 제안하는 기만 재밍 기법의 원리

그림 3(a) 및 그림 3(b)는 각각 변조-재송신 기반 기만 재밍 기법과 제안하는 기만 재밍 기법에서  $n+1$ 번째 신호에 대한 기만 재밍의 타임라인을 나타낸다. 여기서  $t_{n+1,jTx}$ ,  $t_{n+1,jRx}$ ,  $t_{n+1,sTx}$ ,  $t_{n+1,sRx}$ 는 각각 재머의 기만 신호 방사 시점, 재머의 SAR 신호 수신 시점, SAR 신호 송신 시점, SAR 신호 수신 시점을 의미하며,  $R_j/c(=\tau_j)$ 와  $R_f/c(=\tau_f)$ 는 SAR와 재머 간의 거리와 SAR와 허위 표적 간의 거리에 따른 단방향 시간 지연을 나타낸다. 또한 일직선상에 시간의 흐름을 표현하기 위해 SAR의 송, 수신을 따로 구분하였다.

그림 3(a)에서 변조-재송신 기반 기만 재밍 기법은 재머에서 SAR 신호를 수신한 후  $2\Delta R_j/c$ 만큼의 시간을 지연시켜 SAR를 향해 방사한다. 반면 그림 3(b)의 제안하는

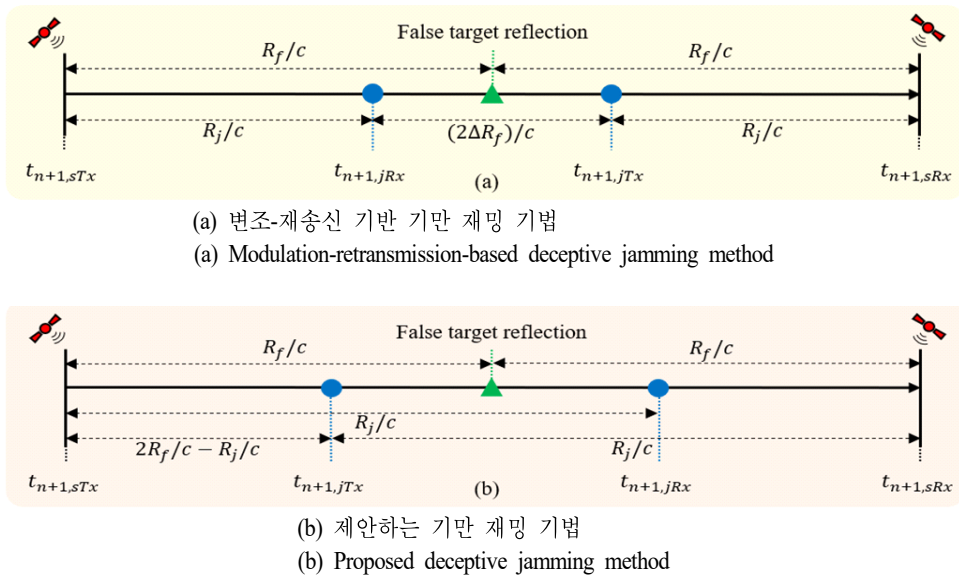


그림 3. 기만 재밍에 대한 타임라인  
Fig. 3. Timeline of the deceptive jamming.

기만 재밍 기법은  $n$ 번째 신호로부터 추정된  $n+1$ 번째 신호의 송신 시점을 알고 있기 때문에, 기만 신호 방사 시점을 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$t_{n+1,jTx} = \hat{t}_{n+1,sTx} + 2\tau_f(\hat{t}_{n+1,sTx}) - \tau_j(\hat{t}_{n+1,sTx}). \quad (4)$$

여기서  $\hat{t}_{n+1,sTx}$ 는  $n$ 번째 신호로부터 추정된  $n+1$ 번째 SAR 신호 송신 시점을 의미하며,  $\tau_j(t_a)$ 와  $\tau_f(t_a)$ 는 사전에 수집한 위성의 궤도 정보를 기반으로 연속 함수로 계산할 수 있다고 가정한다.

방사 시점을 상기 수식과 같이 설정함으로써 기만 신호는 SAR 신호가 수신되기 전에 방사될 수 있다. 이러한 개념은 허위 표적을 거리 축 상에서 재머의 뒤쪽에 위치시킬 때도 동일하게 적용된다. 따라서 제안하는 기법은 SAR의 관심 영역 내에서 허위 표적의 위치를 자유롭게 설정할 수 있다.

### 3-2 제안하는 기만 신호 모델

$n+1$ 번째 신호의 송신 시점을  $\hat{t}_{n+1,sTx}$ 로 판단하였을 때, 재머의 기저대역에서 생성되는  $n+1$ 번째 신호에 대한 기만 신호 모델은 다음과 같다.

$$d(t_r, t_a) = \sum_{f \in T} s_d(t_r - (2\tau_f(\hat{t}_a) - \tau_j(\hat{t}_a) + \Delta e)) \times e^{j-4\pi\hat{f}_s\tau_f(\hat{t}_a)} e^{j2\pi\hat{f}_s\tau_j(\hat{t}_a)} \quad (5)$$

여기서  $\hat{f}_s$ 는 추정된 SAR의 중심 주파수이며,  $\hat{t}_a = \hat{t}_{n+1,sTx}$ ,  $\Delta e = (t_{n+1,sTx} - \hat{t}_{n+1,sTx})$ 는 SAR 신호 송신 시점 추정 오차이다.  $s_d(t_r)$ 은 기만 처프 신호로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$s_d(t_r) = A_d \text{rect}\left(\frac{t_r}{T_r}\right) e^{j\pi\hat{K}_r t_r^2} \quad (6)$$

여기서  $A_d$ ,  $\hat{K}_r$ ,  $\hat{T}_r$ 은 각각 기만 신호의 크기와 추정된

$$\begin{aligned} r_d(t_r, t_a) &= \sum_{f \in T} s_d(t_r - (2\tau_f(\hat{t}_a) - \tau_j(\hat{t}_a) + \Delta e) - \tau_j(\hat{t}_a)) e^{-j4\pi\hat{f}_s\tau_f(\hat{t}_a)} e^{j2\pi\hat{f}_s\tau_j(\hat{t}_a)} e^{j(2\pi\hat{f}_s(t_r - \tau_j(\hat{t}_a)) + (2\pi\hat{f}_s\hat{t}_a + \psi_j))} \\ &\quad \times e^{-(j2\pi\hat{f}_s t_r + (2\pi\hat{f}_s\hat{t}_a + \psi_s))} \\ &= \sum_{f \in T} s_d(t_r - (2\tau_f(\hat{t}_a) + \Delta e)) e^{j-4\pi\hat{f}_s\tau_f(\hat{t}_a)} e^{j2\pi(\hat{f}_s - f_s)t_r} e^{j(2\pi(\hat{f}_s\hat{t}_a - f_s\hat{t}_a) + (\psi_j - \psi_s))} \\ &\approx \sum_{f \in T} s_d(t_r - (2\tau_f(\hat{t}_a) + \Delta e)) e^{j-4\pi\hat{f}_s\tau_f(\hat{t}_a)} e^{j2\pi(\hat{f}_s - f_s)(t_r + \hat{t}_a)} e^{j(\psi_j - \psi_s)} \end{aligned} \quad (7)$$

처프 비율 및 펄스 폭을 의미한다. 생성된 기만 신호는 추정된 중심 주파수를 통해 주파수 상향 변환되어 SAR를 향해 방사된다. 방사된 기만 신호는 재머에서 SAR까지의 전파 지연 후에 SAR에 수신된다. 그러면 수신된 기만 신호는  $\Delta e$ 가 작다면 주파수 하향 변환된 후 기저대역에서 식 (7)과 같이 근사화되어 표현된다.

식 (7)을 보면 허위 표적에 대한 시간 지연된 처프 신호, 방위 위상 변조와 함께 두 번째와 세 번째 지수 항을 포함한다. 여기서 세 번째 지수 항은 고정된 위상이므로 SAR 이미지 형성에 영향을 주지 않는다<sup>[1]</sup>. 그러나 두 번째 지수 항의 경우 거리 및 방위 시간에 따라 중심 주파수 추정 오차만큼 위상이 선형적으로 변화하게 되므로, 방위 축 상에서의 위치 오차를 초래한다<sup>[1]</sup>. 하지만 중심 주파수 추정 오차가 크지 않기 때문에 그 영향이 미미하며, 이에 대한 결과는 모의실험에서 확인할 수 있다.

## IV. 모의실험

제안하는 기법의 기만 재밍 효과를 평가하기 위해 표 1에 나타낸 환경을 기반으로 모의실험을 진행하였으며,

표 1. 모의실험 파라미터

Table 1. Parameters of simulation.

Param.	Value
PRF	6,282.31 Hz
$f_s$	9.65 GHz
$\Delta f (= f_s - f_j)$	0, 50, 500 kHz
$B$	50 MHz
$T_r$	5 $\mu$ s
$v$	7,000 m/s
$h$	550 km
Incidence angle	23.4°
Simulation time	1 s

여기서 PRF(pulse repetition frequency)는 펄스 반복 주파수,  $\Delta f$ 는 주파수 오프셋,  $B$ 는 SAR 신호 대역폭,  $h$ 는 위성의 고도를 의미한다. 군사 목적으로 활용되는 위성 SAR에서 대표적으로 활용되고 있는 운용 모드인 Strip-map을 가정하였으며, SAR 신호처리 알고리즘으로 RDA(range Doppler algorithm)를 사용하였다. 앞서 II 장에서 언급한 것과 같이 SAR 중심 주파수 추정을 따로 수행하지 않는 이상 분해능 대역폭으로 인해 주파수 오프셋이 발생한다. 따라서 0, 50, 500 kHz의 주파수 오프셋을 포함하는 수신 신호 모델에 대하여 시뮬레이션을 진행하였다. 또한 파라미터 추정치의 수렴 속도를 고려하여 SAR 신호가 재머에 수신된 이후 100번째 펄스부터 재밍을 시작하였으며, 이때의 주파수 오프셋 추정치를 기만 신호 생성에 사용하였다.

#### 4.1 파라미터 추정 결과

제안하는 기만 재밍 기법의 파라미터 추정 정확도를 확인하기 위해 참값과 추정값의 차인 오차를 분석 척도로 사용하였다. 또한 사전에 수집한 위성의 궤도 정보를 기반으로 안테나 주엽을 위성을 향해 조향함으로써 수신된 SAR 신호 내의 펄스와 잡음이 잘 구분된다고 가정하였다. 즉, 검출 임계값을 기반으로 추정된 펄스 폭 오차는 무시된다. 동일한 가정하에 처프 비율 또한 추정 오차가 매우 작다. 시뮬레이션 조건하에서 추정된 처프 비율은 0.1 % 미만의 오차를 가진다. 이는 임계값 구간에서의 신호와 잡음 성분만을 통해 계산된 위상차에 회귀 분석을 수행할 때, 분석 정확도가 매우 높기 때문이다.

그림 4는 각 주파수 오프셋에 대하여 RLSE 기반 알고리즘을 통해 획득한 SAR 신호 송신 시점 추정 결과를 나타낸다. SAR와 재머 간의 중심 주파수가 일치할 때는 오차가 거의 0으로 수렴한다. 하지만 주파수 오프셋이 50 kHz, 500 kHz인 경우 오차가 각각  $-5$  ns,  $-50$  ns로 수렴한다. 이는 펄스 압축 과정에서 피크 지점의 위치가 주파수 오프셋에 해당하는 시간만큼 원래의 위치로부터 천이되기 때문이다. 본 모의실험의 경우 처프 비율은 50 MHz/5  $\mu$ s이므로, 주파수 오프셋 50 kHz, 500 kHz에 대하여 각각 5 ns, 50 ns의 이론적인 시간 천이가 발생한다. 따라서 피크 지점에서 측정된 도착 시간이 이러한 시간 천이를

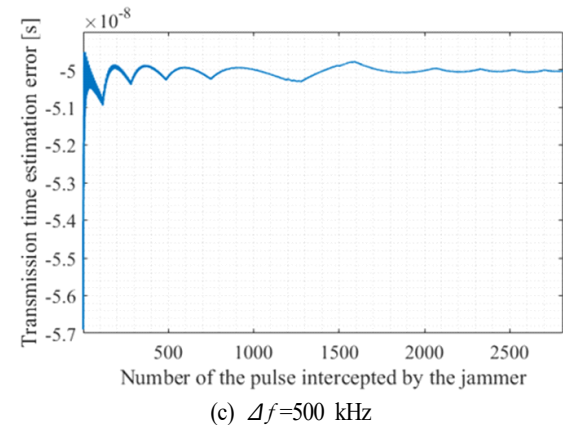
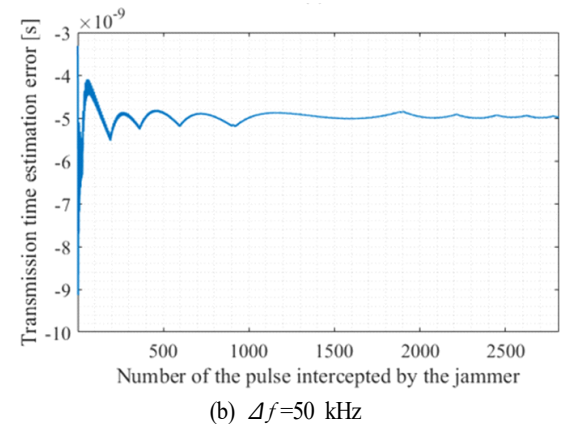
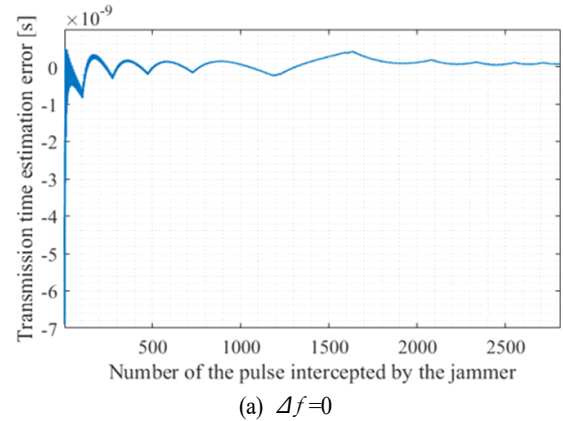


그림 4. 송신 시점 추정 오차 결과

Fig. 4. Results for the transmission time estimation error.

포함하며, 이에 따라 추정된 송신 시점과 기만 신호 방사 시점 또한 시간 천이를 포함한다.

하지만 주파수 오프셋으로 인해 펄스 압축에서 발생하

는 시간 천이는 SAR에서 거리 압축을 수행할 때 또한 발생한다. 이때 SAR에서의 주파수 오프셋은 재머에서의 주파수 오프셋과 값은 동일하면서 부호만 반대이다. 따라서 주파수 오프셋으로 인해 재머에서 발생한 시간 천이가 기만 신호 방사 시점에 포함되더라도, SAR에서 거리 압축을 수행할 때 역으로 시간 천이가 발생하면서 서로 상쇄된다. 결론적으로 시간 천이는 거리 축 상에서 의도한 위치에 허위 표적을 형성하는 데 영향을 미치지 않는다.

그림 5는 RLSE 기반 알고리즘을 통해 추정한 주파수 오프셋을 나타낸다. 주파수 오프셋이 0인 경우 추정 결과가 0으로 수렴한다. 반면 주파수 오프셋이 50 kHz인 경우 추정 결과가 258.47 Hz로 수렴한다. 이는 SAR와 재머 간의 중심 주파수 차가 PRF의 절반보다 커서 모호성이 발생하기 때문이다. 구체적으로는 시뮬레이션 조건하에서 50 kHz의 주파수 오프셋은  $8 \times \text{PRF} + 258.47 \text{ Hz}$ 로 표현되고, 이로 인해 주파수 오프셋 추정 결과가 258.47 Hz로 수렴한다. 마찬가지로 500 kHz의 주파수 오프셋은  $80 \times \text{PRF} + 2,584.72 \text{ Hz}$ 로 표현되며, 이로 인해 주파수 오프셋 추정 결과가 2,584.72 Hz로 수렴한다.

모호성이 발생했을 때의 추정된 결과를 바탕으로 재머의 중심 주파수를 설정한다면, SAR의 중심 주파수보다 PRF의 배수 배만큼 크거나 작게 설정될 것이다. 하지만 재머의 중심 주파수를 이같이 설정하더라도 SAR 또한 신호처리 과정에서 방위 축으로 PRF에 의한 모호성이 존재한다. 따라서 SAR와 재머의 중심 주파수가 PRF의 배수 배만큼 차이가 나더라도 방위 축 상에서 의도한 위치에 허위 표적을 형성하는 데 영향을 미치지 않는다.

#### 4.2 허위 점표적 형성 결과

허위 점표적을 분석하기 위해 SAR 이미지의 품질을 측정할 때 주로 사용되는 IRW(impulse response width), PSLR(peak sidelobe ratio), ISLR(integrated sidelobe ratio), MLPO(main lobe position offset)의 네 가지 지표를 사용하였다. 재머는 SAR의 관심 영역 내의 중심에 위치시켰으며,  $x$ 축을 거리 축으로 설정했을 때 허위 점표적은 거리 축을 기준으로 재머의 앞쪽 위치인  $[-500, 250, 0] \text{ m}$ 에 형성하였다.

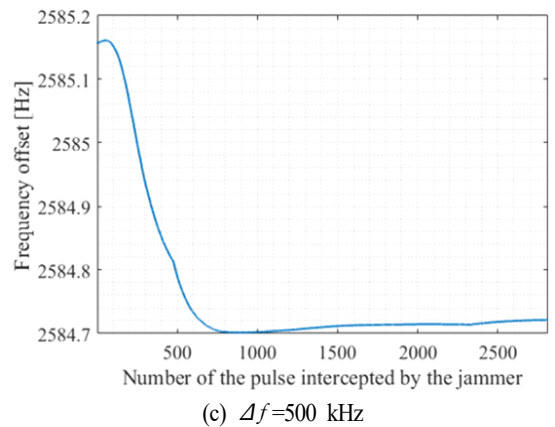
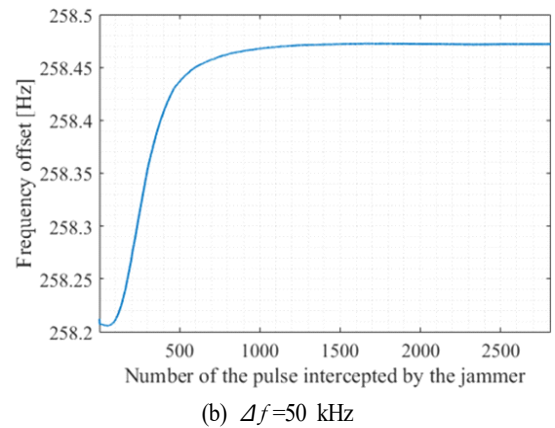
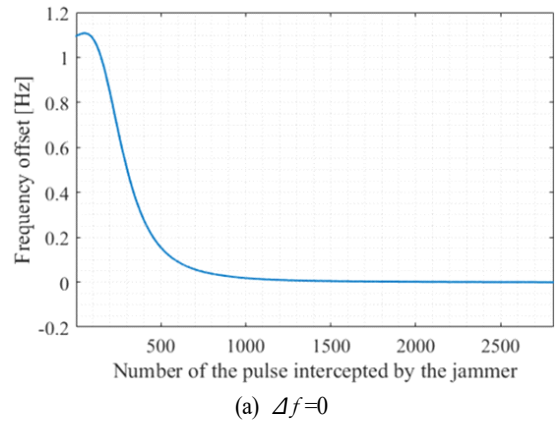
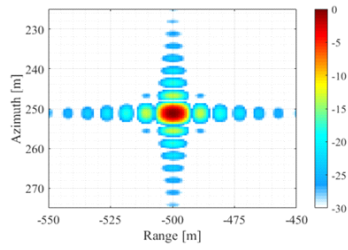


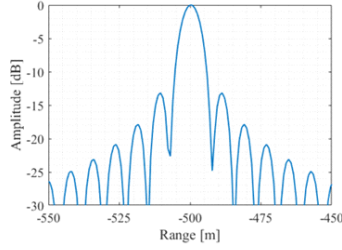
그림 5. 주파수 오프셋 추정 결과

Fig. 5. Results for the frequency offset estimation.

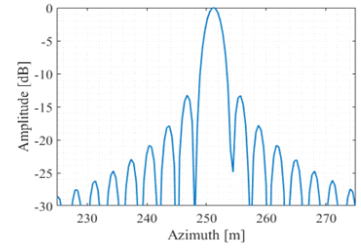
그림 6은 각 주파수 오프셋에 대하여 제안하는 기법을 통해 형성한 허위 점표적과 그에 따른 거리, 방위 축 임펄스 응답을 나타내며, 형성된 허위 점표적 결과에서의 결



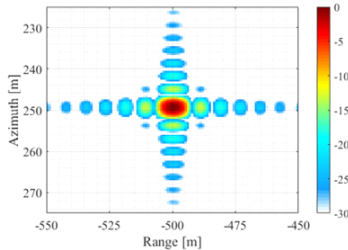
(a)  $\Delta f=0$ 에 대한 허위 점표적  
(a) False point target for  $\Delta f=0$



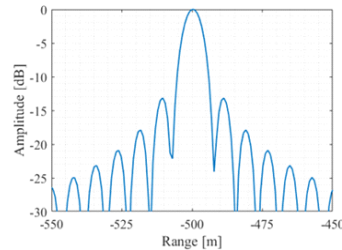
(b)  $\Delta f=0$ 에 대한 거리 임펄스 응답  
(b) Range profile for  $\Delta f=0$



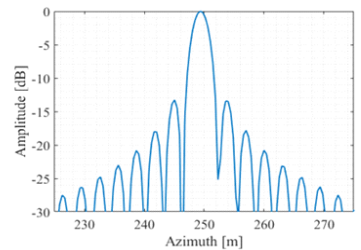
(c)  $\Delta f=0$ 에 대한 방위 임펄스 응답  
(c) Azimuth profile for  $\Delta f=0$



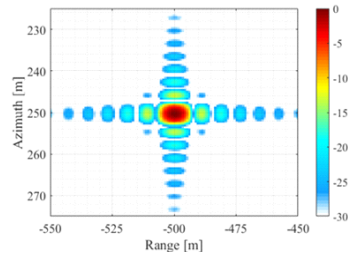
(d)  $\Delta f=50$  kHz에 대한 허위 점표적  
(d) False point target for  $\Delta f=50$  kHz



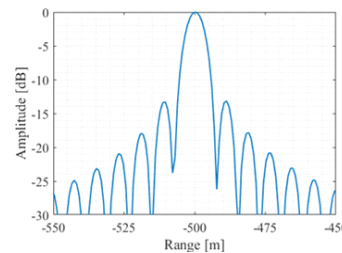
(e)  $\Delta f=50$  kHz에 대한 거리 임펄스 응답  
(e) Range profile for  $\Delta f=50$  kHz



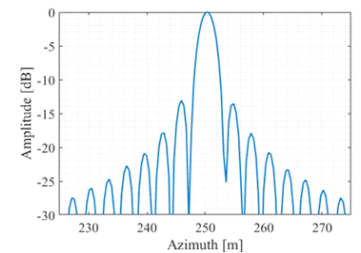
(f)  $\Delta f=50$  kHz에 대한 방위 임펄스 응답  
(f) Azimuth profile for  $\Delta f=50$  kHz



(g)  $\Delta f=500$  kHz에 대한 허위 점표적  
(g) False point target for  $\Delta f=500$  kHz



(h)  $\Delta f=500$  kHz에 대한 거리 임펄스 응답  
(h) Range profile for  $\Delta f=500$  kHz



(i)  $\Delta f=500$  kHz에 대한 방위 임펄스 응답  
(i) Azimuth profile for  $\Delta f=500$  kHz

그림 6. 허위 점표적 형성 결과

Fig. 6. False point target generation result.

러바(colorbar)는 dB(decibel) 스케일로 정규화된 점표적의 크기를 의미한다. 형성된 허위 점표적에 대한 IRW, PSLR, ISLR, MLPO는 표 2에 요약하였다. 그림 6에서 전체적으로 허위 점표적이 의도한 위치에 잘 형성된 것을 볼 수 있다. 거리 축 MLPO는 모두 0이며, 이는 주파수 오프셋에 의한 시간 천이를 제외하고 송신 시점 추정 오차가 모두 거의 0에 수렴하기 때문이다. 반면 각 주파수 오프셋에 대한 방위 축 MLPO는 모두 대략 1 m 내외로 발생한다. 이는 100번째에 추정된 주파수 오프셋을 기반으로 설정된 재머의 중심 주파수가 모호성이 발생하는 수

치를 제외하고 대략 1 Hz의 오차를 포함하기 때문이다. 하지만 항공기나 선박과 같은 실제 기만 표적의 경우 점 표적보다 크기가 매우 크기 때문에, 실제 기만 표적을 형성하는 경우 MLPO에 의한 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

## V. 결 론

본 논문에서는 추정된 SAR 신호 파라미터를 기반으로 한 위성 SAR 대상 기만 재밍 기법을 제안하였다. 구체적으로 추정된 펄스 폭, 처프 비율, SAR 신호 송신 시점 및

표 2. 허위 점표적에 대한 SAR 이미지 품질

Table 2. SAR image quality for false point target.

	Range				Azimuth			
	IRW [m]	PSLR [dB]	ISLR [dB]	MLPO [m]	IRW [m]	PSLR [dB]	ISLR [dB]	MLPO [m]
$\Delta f = 0$ kHz	6.66	-13.15	-9.56	0	2.70	-13.24	-9.75	-1.01
$\Delta f = 50$ kHz	6.66	-13.41	-9.57	0	2.70	-13.27	-9.72	0.70
$\Delta f = 500$ kHz	6.71	-13.16	-9.62	0	2.70	-13.06	-9.75	-0.15

중심 주파수를 통해 기만 신호의 방사 시점을 결정하고, 기만 신호를 생성하였다. 이를 통해 SAR 신호가 수신되기 전에도 기만 신호를 방사할 수 있으며, 기만 재밍에 필요한 신호 파라미터를 추정하여 기만 재밍을 수행하기 때문에 정확한 SAR의 신호 제원을 모르더라도 기만 재밍을 수행할 수 있다. 모의실험을 통해 제안하는 기법의 파라미터 추정 정확도가 매우 높음을 확인하였으며, 허위 점표적 형성 결과를 통해 거리 축 상에서 재머의 앞쪽에 허위 표적을 형성할 수 있음을 확인하였다. 또한 SAR 이미지 품질 지표를 통해 형성된 허위 표적이 의도한 위치에 잘 형성되는 것을 확인하였다. 따라서 제안하는 기법은 SAR와 재머 사이에 허위 표적을 생성할 때 효과적으로 활용될 것으로 기대된다.

제안하는 기법을 수행하기 위해선 매 PRI마다 기만 재밍에 요구되는 파라미터를 추정하고, 이를 바탕으로 기만 신호를 생성하여 방사할 수 있어야 한다. 펄스 폭과 처프 비율의 경우 직관적이고 단순한 추정 방법을 사용하였으며, RLSE는 실시간 동작을 위해 고안된 알고리즘이므로 파라미터 추정에 필요한 연산량은 실시간성을 만족할 수 있다. 하지만 기만 신호 생성의 경우 기만 템플릿의 크기가 작다면 식 (7)과 같이 모든 픽셀에 대하여 하나하나 기만 신호를 생성하고 중첩시킬 수 있겠지만, 실제로 활용되는 기만 템플릿은 허위 표적의 크기에 따라 그 크기가 커질 수 있다. 따라서 실시간 동작을 위해 기만 신호를 빠르게 생성하는 기법이 요구된다.

또한 제안하는 기법은 대부분의 기만 재밍 기법 연구와 동일하게 위성의 궤도 정보를 사전에 수집할 수 있다는 가정하에 수행된다. 만약 위성의 궤도 정보가 실제 궤도 정보와 다르다면, 기만 재밍 수행 시 의도하지 않은 결과를 초래할 수 있다. 이러한 한계점을 해결하기 위한 방

안이 필요하며, 이는 향후 연구로서 수행될 예정이다.

## References

- [1] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Norwood, MA, Artech House, pp. 108-110, 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*, Raleigh, NC, SciTech, 2021.
- [5] B. Zhao, F. Zhou, and Z. Bao, "Deception jamming for squint SAR based on multiple receivers," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing*, vol. 8, no. 8, pp. 3988-3998, Aug. 2015.
- [6] H. M. Lee, K. W. Kim, "Effective barrage noise jamming for spotlight SAR using extended Kalman filter-based kinematic parameter estimation," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing*, vol. 16, pp. 6579-6600, Jul. 2023.
- [7] P. E. Pace, D. J. Fouts, S. Ekestorm, and C. Karow, "Digital false-target image synthesiser for countering ISAR," *IEEE Proceedings, Radar, Sonar and Navigation*, vol. 149, no. 5, pp. 248-257, Oct. 2022.

- [8] Z. Yan, Z. Guoqing, and Z. Yu, "Research on SAR jamming technique based on man-made map," in *CIE International Conference on Radar*, Shanghai, Oct. 2007, pp. 1-4.
- [9] W. Wenqin, C. Jingye, "A technique for jamming bi- and multistatic SAR systems," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 80-84, Jan. 2007.
- [10] S. Long, Z. Hong-rong, T. Yue-sheng, and Z. Changyao, "Research on deceptive jamming technologies against SAR," in *Proceeding of the 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, Xi'an, Oct. 2009, pp. 521-525.
- [11] 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 Observation and Remote Sensing*, vol. 11, no. 3, pp. 939-950, Mar. 2018.
- [12] 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 Observation and Remote Sensing*, vol. 13, pp. 5580-5596, Sep. 2020.
- [13] F. Zhou, B. Zhao, M. Tao, X. Bai, B. Chen, and G. Sun, "A large scene deceptive jamming method for space-borne SAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 8, pp. 4486-4495, Aug. 2013.
- [14] K. Yang, W. Ye, F. Ma, G. Li, 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.
- [15] Q. Sun, T. Shu, K. Yu, and W. Yu, "Efficient deceptive jamming method of static and moving targets against SAR," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 9, pp. 3610-3618, May 2018.
- [16] Y. Liu, W. Wang, X. Pan, D. Dai, and D. Feng, "A frequency-domain three-stage algorithm for active deception jamming against synthetic aperture radar," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 8, no. 6, pp. 639-646, Jul. 2014.
- [17] L. Xiaohong, L. Peiguo, and X. Guoyi, "Fast generation of SAR deceptive jamming signal based on inverse range doppler algorithm," in *Proceeding of the IET International Radar Conference*, Xi'an, Apr. 2013, pp. 1-4.
- [18] 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 Observation and Remote Sensing*, vol. 9, no. 7, pp. 3037-3049, Jul. 2016.
- [19] S. W. Kim, D. K. Lee, Y. J. Park, J. M. Joo, J. K. Kim, and J. H. Kim, et al., "Accurate estimation of SAR parameters via RLSE for satellite-borne SAR deceptive jamming," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 6, pp. 485-496, Jun 2024.
- [20] A. De Martino, *Introduction to Modern EW Systems*, Norwood, MA, Artech House, 2018.
- [21] D. A. Freedman, *Statistical Models: Theory and Practice*, Cambridge, Cambridge University.

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

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

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

김 종 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

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

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

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·레이다 신호처리, 딥러닝, SAR 제밍 등