

효과적인 인공위성 SAR 기만 재밍을 위한 요구 조건 분석

Analysis of the Requirements for Effective Satellite-Borne SAR Deceptive Jamming

이경민 · 이인혁 · 홍상근* · 전영일* · 나인석* · 김경태

Kyung-Min Lee · In-Hyeok Lee · Sang-Geun Hong* · Young-Il Jeon* · In-Seok Na* · Kyung-Tae Kim

요 약

본 논문은 합성 개구면 레이더(synthetic aperture radar, SAR)에 대응하기 위한 SAR 기만 재밍(deceptive jamming)의 재머(jammer) 성능 변화에 따른 재밍 효과를 분석하였다. 재머 시스템의 성능 변화로 1) SAR-재머 간 시간 동기화, 2) 재머의 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform, FFT) 포인트 가용 개수, 3) 재머의 최소 신호처리 요구 시간, 그리고 4) 재머의 수행 가능한 최소 시간 간격 4가지 항목을 채택하였으며, 각 항목별 재머 성능 변화에 따른 SAR 기만 재밍 효과를 분석하기 위해 인공위성 기반 SAR 및 기만 재밍 시뮬레이션 환경을 구축, 허위 표적의 영상형성 결과를 정량적 영상 품질 지표들을 활용하여 분석하였다. 분석 결과, 상기 4가지 항목들의 변화에 따라 허위 표적의 SAR 영상 품질이 영향을 받는 것을 확인하였으며, 보다 정확한 SAR 기만 재밍 신호처리를 수행하기 위해 본 논문에서는 재머 시스템의 실시간 신호처리 수행 능력이 효과적인 SAR 기만재밍에 매우 중요한 요소임을 확인하였다.

Abstract

In this study, we analyzed the deceptive jamming performance of a synthetic aperture radar (SAR). Four cases were considered: (1) time synchronization between the SAR and the jammer, (2) the number of fast Fourier transform (FFT) points that the jammer can use, (3) the minimum signal processing time of the jammer, and (4) the minimum feasible time interval in the jammer. To analyze the effectiveness of each case, the satellite-borne SAR and jammer simulation environment were used. From the results, it was confirmed that the four cases of jammer performance can affect the false SAR image quality, leading to the deterioration of its deceptive jamming performance. Therefore, we suggest that an analysis of the ability of the jammer is necessary for implementing more sophisticated SAR deceptive jamming signal processing.

Key words: Synthetic Aperture Radar(SAR), SAR Imaging, SAR Deceptive Jamming

I. 서 론

합성 개구면 레이더(synthetic aperture radar, SAR)는 전자기파를 송·수신하여 지형 및 표적에 대한 고해상도

「이 연구는 LIG Nex1 산학협력과제 지원으로 연구되었음.」

포항공과대학교 전자공학과(Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

*LIG넥스원(주) (LIG Nex1 Co., Ltd)

· Manuscript received December 30, 2021 ; Revised January 17, 2022 ; Accepted February 14, 2022. (ID No. 20211230-116)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

영상을 형성하는 레이더 기술로, 주야 및 날씨에 무관하게 지형 정보를 영상화 할 수 있기 때문에 상시 관측이 가능한 장점이 있다^{[1][2]}. SAR 영상은 주로 국방 분야에서 감시정찰, 표적 탐지 및 식별을 목적으로 활용되고 있으며, 고해상도 SAR 영상형성 기술의 발전에 따라 보다 정밀한 SAR 표적 탐지 및 식별 알고리즘들이 개발되고 있다^{[3]~[6]}.

상기 SAR 영상 기반 감시정찰 기술에 대응하기 위해 SAR 기만 재밍(deceptive jamming)에 관한 연구가 최근 해외 연구소들의 주도로 수행되고 있다^{[7]~[11]}. SAR 기만 재밍은 아군의 사전 정찰(reconnaissance) 시스템으로부터 적 SAR 시스템에 대한 사전 정보를 제공 받은 후, 이를 활용하여 실시간으로 적 SAR 시스템 신호를 수신, 인위적인 신호 변조 후, SAR 시스템에 재송신함으로써 적 SAR 영상에 허위 표적 및 지형을 형성하는 기술이다^[8]. 이는 기존 SAR 잡음 재밍(barrage jamming)이 SAR 영상의 전체 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio, SNR)를 낮추는 것과 달리, SAR 영상 내 허위 표적 및 지형만을 유도하기 때문에 적으로부터의 재머(jammer)의 노출 위험성이 낮으며, 잡음 재밍 대비 상대적으로 낮은 전력량을 사용할 수 있는 장점이 있다^{[8][11]}. 최근 주파수 영역 신호처리 기반의 정밀 SAR 기만 재밍 신호처리 기술들이 지속적으로 연구되고 있으며, 이로 인해 보다 정밀하고 넓은 허위 표적 및 지형을 적 SAR 영상에 형성할 수 있게 한다^{[7]~[9][11]}.

그러나 현재까지의 SAR 기만 재밍 기술들은 재머 시스템의 현실적 제약이 반영되지 않은 이상적인 SAR 재밍 신호처리 환경을 가정하기 때문에 재머 시스템 성능이 고려된 정확한 SAR 재밍 신호처리 분석이 미비한 상황이다. SAR 기만 재밍을 위한 재머 시스템은 사전 설계된 기만 재밍 신호처리 임무를 실시간으로 수행해야 하기 때문에, 재머 시스템의 실시간 신호처리 수행 능력이 불충분할 경우, 온전한 SAR 기만 재밍 신호처리를 구현하지 못하게 되며, 이에 따라 허위 표적, 지형의 영상 품질 및 위치 정확도가 악화될 수 있다. 따라서 재머 시스템 성능 변화에 따른 SAR 기만 재밍 효과에 대한 분석이 반드시 필요하다.

이에 본 논문에서는 인공위성 기반 SAR 시스템 시뮬레이션 환경을 구축한 다음, 해당 SAR 시스템에 재머 시

스템의 성능 변화가 반영된 기만 재밍을 수행하여 SAR 영상에 형성된 기만 표적의 영상 품질 변화를 분석하였다. 본 논문에서 다룬 기만 재밍 성능 영향 요소는 총 네 가지로, 1) SAR - 재머 시스템 간 시간 동기화, 2) 주파수 영역 기반 신호처리를 위한 재머의 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform, FFT) 포인트 가용 개수, 3) 재머 시스템 최소 신호처리 요구 시간, 그리고 4) 재머 시스템의 최소 수행 가능한 시간 지연 간격이다. 기만 재밍 성능 평가를 위해 단일 점 산란원 표적을 허위 표적으로 형성한 다음, 거리(range) 및 방위(azimuth) 방향별 고해상도 거리 측면도(high resolution range profile, HRRP)를 추출하였다. 추출한 각 HRRP 별로 Peak Sidelobe Ratio(PSLR), Integrated Sidelobe Ratio(ISLR)^[12] 및 해상도(resolution)를 상기 네 가지 항목 별로 계산하여 SAR 기만 재밍 결과를 분석하였다. 또한 다중 산란원을 가지는 비행 표적 모델을 SAR 영상에 허위 표적으로 형성한 다음, 각 항목 별, 해당 허위 표적에 대한 영상 엔트로피(entropy)를 계산하여 허위 표적의 영상 품질 변화를 정량적으로 분석하였다.

본 논문의 진행 순서는 다음과 같다. 2장에서는 SAR 기만 재밍 신호처리 기법에 대한 기본 이론을 정리한다. 3장에서는 각 네가지 재머 시스템 성능 항목 별로 단일 점 산란원 허위 표적 및 다중 산란원 비행 모델의 허위 표적을 형성하여 영상 품질 성능 지표를 계산, 결과를 분석하였다. 4장에서는 3장의 시뮬레이션 분석 결과에 대한 고찰 및 결론을 기술하였다.

II. SAR 기만 재밍 신호처리

SAR 기만 재밍 방법은 크게 리바운드(rebound) 재밍^{[1]~[15]}과 직접 재송신(direct retransmitted) 재밍^{[7]~[11][16][17]}로 분류할 수 있으며, 본 논문에서는 SAR 시스템에 직접 재송신 방법을 기반으로 하는 SAR 재밍 기법을 채택하였다. 인공위성 탑재 SAR 시스템은 그림 1과 같이 이동체적에 따라 합성개구면을 형성하며, 펄스 반복 간격(pulse repetition interval, PRI)마다 레이더 신호를 송, 수신한다. 이때 재머의 위치가 O, 유도하고자 하는 허위 표적의 위치 좌표를 (x, y) 로 가정할 때, 방위 시간, t_s 변화에 따른 SAR 시스템과 재머, 허위 표적 간 거리는 다음과 같이 표

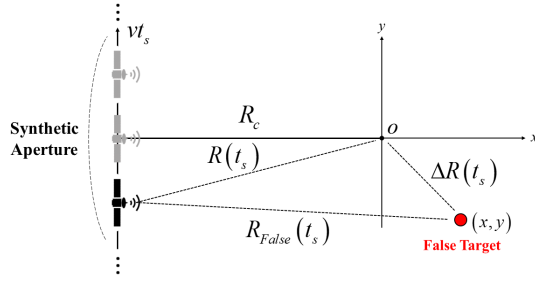


그림 1. SAR 기만 재밍 기하구조
Fig. 1. Deceptive SAR jamming geometry.

현된다^[11].

$$\begin{aligned} R(t_s) &= \sqrt{R_c^2 + (vt_s)^2} \\ R_{False}(t_s) &= \sqrt{(R_c + x)^2 + (y - vt_s)^2} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 R_c 는 합성 개구면의 중심 지점과 재머 간의 거리, v 는 인공위성 SAR 시스템의 이동 속력, 그리고 R_{False} 는 허위 표적과 SAR 시스템 간의 t_s 일 때의 거리를 나타낸다. 이때 R_c 가 $R_c \gg vt_s$, $R_c \gg y$ 를 충족할 때, 재머 시스템과 허위 표적간의 거리, $\Delta R(t_s)$ 는 다음과 같이 근사할 수 있다^[11].

$$\Delta R(t_s) \approx R_{False}(t_s) - R(t_s) \quad (2)$$

재머 시스템이 허위 표적을 (x, y) 위치에 정확히 유도하기 위해 $(2 \cdot \Delta R(t_s))/c$ 만큼의 시간 지연이 유도되어야 한다. 여기서 c 는 빛의 속도로 3×10^8 m/s로 가정한다. 따라서 정확한 시간 지연 유도를 위한 $\Delta R(t_s)$ 에 대한 수학적 표현이 요구되며, 이는 $R(t_s)$ 와 $R_{False}(t_s)$ 의 개별 테일러 급수(Taylor series) 근사 과정으로 다음과 같이 표현할 수 있다^[11].

$$\begin{aligned} R(t_s) &\approx R_c + \frac{(vt_s)^2}{2R_c} \\ R_{False}(t_s) &\approx R_c + x + \frac{y^2}{2R_c} - \frac{y(vt_s)}{R_c} + \frac{(vt_s)^2}{2R_c} \\ &= R(t_s) + x + \frac{y^2}{2R_c} - \frac{y(vt_s)}{R_c} \\ \Delta R(t_s) &\approx x + \frac{y^2}{2R_c} - \frac{y(vt_s)}{R_c} \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 수신된 SAR 신호에 $(2 \cdot \Delta R(t_s))/c$ 만큼의 시

간 지연을 유도한 후 SAR 시스템으로 재송신을 수행하면 (x, y) 지점의 허위 표적을 SAR 영상에 형성할 수 있다. 해당 수신-시간지연-송신 과정은 다음과 같이 표현된다^[11].

$$\begin{aligned} s_{rt}(t, t_s) &= s_r(t, t_s) \\ &\otimes \left\{ G_J \sigma(x, y) \cdot \delta \left(t - \frac{2\Delta R(t_s)}{c} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

이때 t 는 거리 방향 시간(fast time), $s_r(t, t_s)$ 는 재머로부터 수신된 SAR 신호, $s_{rt}(t, t_s)$ 는 재머에서 재송신한 SAR 신호, G_J 는 재머의 전압 이득, $\sigma(x, y)$ 는 (x, y) 지점에 형성하고자 하는 허위 표적의 레이다 단면적(radar cross section, RCS), \otimes 은 하다마드(Hadamard) 곱 연산자, 그리고 $\delta(\cdot)$ 는 임펄스 응답함수이다.

상기 과정은 단일 점 산란원에 대한 수식 도출 과정이므로, 이를 확장하여 형성하고자 하는 표적을 $X_J = \{x \mid 0 \leq x \leq X\}$, $Y_J = \{y \mid -Y/2 \leq y \leq Y/2\}$ 구간을 가지는 템플릿(template)으로 재구성하면 다음과 같이 수식을 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} s_{rt}(t, t_s) &= s_r(t, t_s) \\ &\otimes \left\{ G_J \sum_{x \in X_J} \sum_{y \in Y_J} \sigma(x, y) \cdot \delta \left(t - \frac{2\Delta R(t_s; x, y)}{c} \right) \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

정밀한 허위 표적 및 지형을 표현하기 위해선 상기 시간 지연과정을 주파수 영역에서 위상 곱으로 재표현하는 과정이 필요하다^{[8],[11]}. 이에 식 (5)를 거리 방향 주파수 영역으로 표현하면 다음과 같이 정리할 수 있다^[11].

$$\begin{aligned} s_{rt}(f, t_s) &= G_J s_r(f, t_s) \cdot \sum_{y \in Y_J} \left(T_1(t_s; y) \cdot \sum_{x \in X_J} T_2(x, y) \right) \\ T_1(t_s; y) &= \exp \left(j2\pi f \frac{2yvt_s}{cR_c} \right) \\ T_2(x, y) &= \exp \left(-j2\pi f \left(\frac{2x}{c} + \frac{y^2}{cR_c} \right) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $T_1(t_s; y)$ 은 t_s 와 관련된 항인 반면, $T_2(x, y)$ 는 t_s 에 무관한, 허위 표적의 좌표 정보만으로 구성됨을 알 수 있다. 따라서 $T_1(t_s; y)$ 은 t_s 에 따른 실시간 신호처리를, $T_2(x, y)$ 는 사전 구성이 가능한 항임을 알 수 있다.

상기 기만 재밍 신호처리는 재머와 허위 표적 간의 거리가 상대적 인접했을 때를 가정한다. 재머와 허위 표적 간 최대 인접 거리는 다음과 같다^[11].

$$|x| < \frac{\lambda R_c^2}{2(v T_{SA})^2} \quad (7)$$

여기서 T_{SA} 는 합성 개구면 형성에 걸리는 시간인 코히어런트 통합 시간(coherent integration time)이다. 따라서 정밀한 SAR 기만 재밍 신호처리를 위해선, 식 (7)의 최대 인접 거리 내에 허위 표적 템플릿을 형성한 다음, 식 (6)에 따른 실시간 SAR 기만 재밍 신호처리를 수행해야 한다.

III. SAR 기만 재밍 효과 분석

2장에서 기술한 정밀 SAR 기만 재밍을 구현하기 위해, 본 장에서는 SAR 기만 재밍 신호처리를 수행하기 위한 인공위성 기반 SAR 시스템에 가해지는 기만 재밍 시뮬레이션 환경을 구축한 다음, 재머 시스템의 네가지 주요 실시간 신호처리 관련 성능 변화에 따른 SAR 기만 재밍 효과를 단일 점 산란원 및 다중 산란원 모델의 비행 표적의 허위 표적 영상을 통해 기만 재밍 효과를 분석하였다.

3-1 SAR 기만 재밍 시나리오

본 논문에서 구축한 인공위성 SAR 시스템의 규격은 그림 2 및 표 1과 같으며, 재머는 SAR 관측 영역에 배치되어 실시간으로 SAR 시스템의 송출 신호를 수신한다. 재머 다음 영역으로 허위 표적 및 지형 템플릿을 사전 구성한 다음, 2장에서 기술한 신호처리 과정을 통해 의도된 허위 표적 및 지형 정보를 SAR 시스템에 유도한다.

본 논문에서 성능 평가를 위해 사용한 표적은 단일 점 산란원과 다중 산란원으로 구성된 비행 표적(Boeing-737)

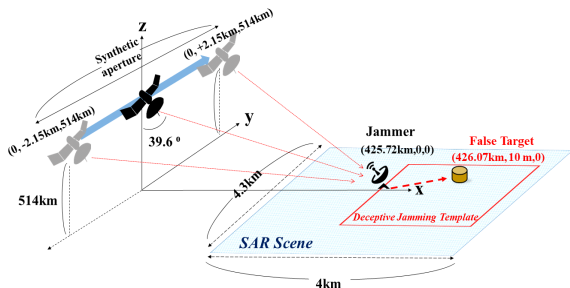


그림 2. SAR 기만 재밍 시뮬레이션 기하구조
Fig. 2. Simulation geometry of SAR deceptive jamming.

표 1. 시뮬레이션 운용 지표
Table 1. Parameters of simulation.

Carrier frequency (f_c)	9.65 GHz
Bandwidth	150 MHz
Pulse repetition frequency	5 kHz
Height	514 km
Lookangle	39.6°
Antenna elevation beamwidth	3°
Antenna azimuth beamwidth	0.37°
Velocity	7,050 m/s

이다. 단일 점 산란원은 그림 2와 같이 재머로부터 (350 m, 10 m, 0) 만큼 떨어진 지형에 형성되도록 템플릿을 구성하며, 비행 표적은 동일 위치에서 그림 3과 같은 다중 산란원 모델이 형성되도록 템플릿을 구성한다.

상기 시뮬레이션 환경에서 수행한 SAR 기만 재밍 결과는 그림 4와 같다. 형성된 허위 표적의 영상 품질의 정량적 평가를 위해 본 논문에서는 PSLR, ISLR, 해상도, 위치 오차 및 영상 엔트로피를 계산하였다.

PSLR은 주엽(mainlobe)과 첫 번째 부엽(sidelobe)의 최대치 비율을 의미하며, 다음과 같이 정의한다^[12].

$$PSLR = 20 \log_{10}(I_{main}/I_{side}) \quad (8)$$

여기서 I_{main} 은 주엽의 최대치, I_{side} 는 첫 번째 부엽의 최대치이다. ISLR은 주엽의 면적과 부엽들의 면적의 비율을 의미하며, 다음과 같다.

$$ISLR = 10 \log_{10}(A_{main}/A_{side}) \quad (9)$$

여기서 A_{main} 은 주엽의 면적, A_{side} 는 전체 부엽의 면

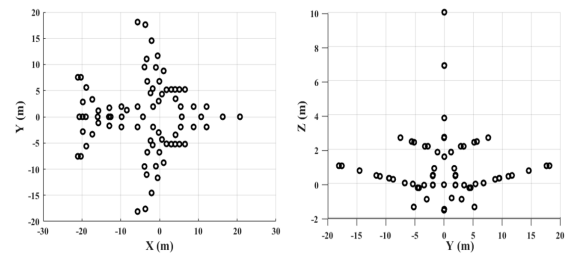
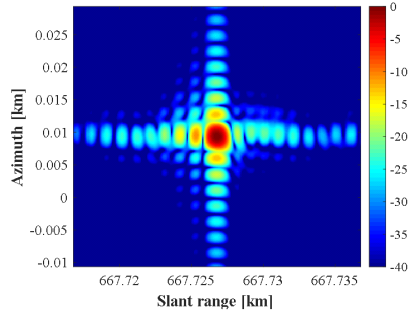
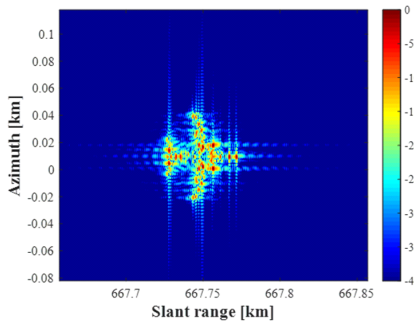


그림 3. 다중 산란원 비행 표적 모델(Boeing-737)
Fig. 3. Point-scatterers model of Boeing-737.



(a) 단일 점 산란원 표적
(a) A single point-scatterer target



(b) 비행 표적
(b) Aircraft target

그림 4. SAR 기만 재밍 시뮬레이션 결과
Fig. 4. SAR deceptive jamming results.

적을 의미한다^[12]. 해상도는 점 산란원의 주엽의 최대치에서 거리 및 방위 방향별 -3 dB 간격을 계산하였으며, 위치 오차는 유도된 허위 표적 좌표와 실제 배치된 표적의 좌표의 오차를 계산한 것으로 다음과 같다.

$$Error = \left(\frac{x_{desired} - x_{actual}}{x_{desired}} \right) \times 100 (\%) \quad (10)$$

여기서 $x_{desired}$ 는 유도하고자 하는 허위 표적의 좌표값, x_{actual} 은 실제 허위 표적의 좌표값이다. 거리 및 방위 방향의 좌표값 별로 도출하였다. 마지막으로 비행 표적 모델로 형성된 허위 표적 영상은 영상 엔트로피를 활용하여 정량적 품질을 표현하였다.

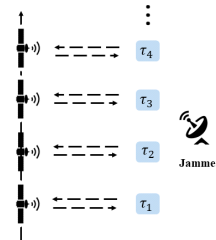
상기 SAR 기만 재밍 시뮬레이션을 수행한 결과, 표 2와 같은 영상 품질 지표가 각 거리, 방위 방향 HRRP 별로 도출되었으며, 허위 비행 표적의 엔트로피가 계산되었다. 이를 기준으로 각 재머 성능 별 영상 품질을 평가한다.

표 2. 단일 점 산란원 허위 표적의 영상 품질 성능 지표
Table 2. SAR image quality parameters of a single point-scatterer false target.

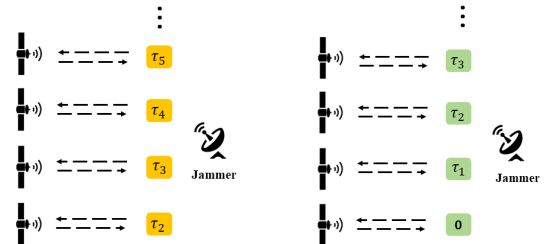
A single point-scatterer false target		
	Range	Azimuth
PSLR	-10.79 dB	-12.53 dB
ISLR	-8.91 dB	-9.22 dB
Resolution	0.90 m	2.14 m
Position error rate	0.03 %	0.25 %
Aircraft false target		
Entropy	11.93	

3-2 SAR - 재머 시스템 간 시간 동기화

SAR 기만 재밍을 수행하기 위해선 SAR 시스템이 PRI 마다 송신된 신호에 대한 재머 시스템의 실시간 신호처리가 반드시 요구된다. 특정 $n \cdot PRI$ 시간에 재머가 지연시켜야 하는 시간 지연 값을 τ_n 라 할 때, 그림 5 (a)와 같이 재머는 순차적으로 예정된 τ_n 를 수신된 SAR 신호에



(a) 예상 동기화 시나리오
(a) Expected scenario



(b) 선행 동기화 오류 (c) 지연 동기화 오류
(b) Scenario with leading error (c) Scenario with lagging error

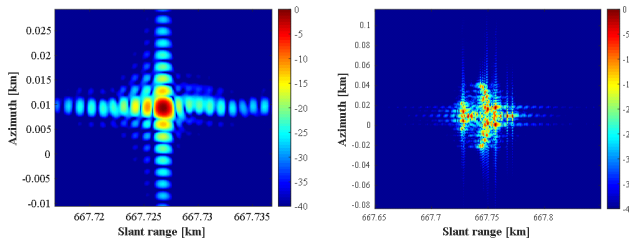
그림 5. SAR-재머 간 시간 동기화
Fig. 5. SAR-jammer time synchronization.

지연시켜야 한다. 그러나, 사전 정보의 오차 혹은 재머의 하드웨어 문제로 인해 그림 5(b)와 같이 재머의 시간 동기화 오차가 발생, 예정보다 재머가 빠르게 시간 지연을 수행할 경우, 선행(leading) 동기화 오류가 발생하며, 허위 표적의 형성 과정에 영향을 끼치게 된다. 마찬가지로 그림 5(c)와 같이 재머가 예정보다 늦게 시간 지연을 수행할 경우, 지연(lagging) 동기화 오류가 되며 이 또한 허위 표적의 영상 품질에 영향을 준다. 이는 식 (6)에 $T_1(t_s; y)$ 항과 관련되어 있으며, t_s 에 따라 재머 시스템이 수신된 $s_{rt}(f, t_s)$ 에 주파수 영역에서 변조를 수행해야 한다.

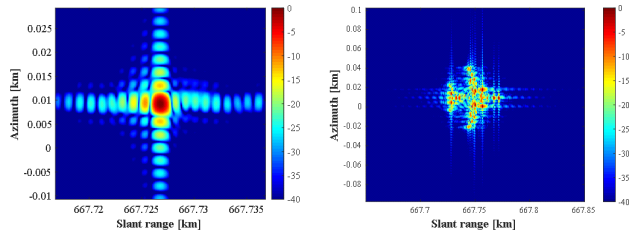
본 항목에서는 시간 동기화가 전체 $T_{SA}=0.6$ s에서 10

%, 20 %, 30 %인 0.06 s, 0.12 s, 0.18 s 만큼 재머의 시간 동기화가 선행 혹은 지연되었을 경우의 허위 표적의 영상 품질을 분석하였으며 이는 그림 6 및 표 3과 같다.

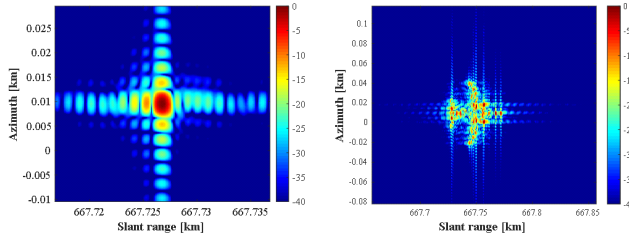
수행 결과, 시간 동기화 오차가 증가함에 따라 선행, 지연 모두 방위 방향의 해상도 및 위치 오차가 악화됨을 볼 수 있다. 이는 재머의 시간 동기화 오차가 허위 표적이 형성하는 도플러(Doppler) 주파수 대역폭을 제한하기 때문에, 온전한 방위 방향 신호 압축을 SAR 시스템이 수행하지 못하며, 이로 인해 방위 방향의 해상도가 증가하게 된다. 마찬가지로 재머 신호의 선행 및 지연으로 인해 식 (6)에 의한 계획된 실시간 신호처리가 일부 불가능해짐에



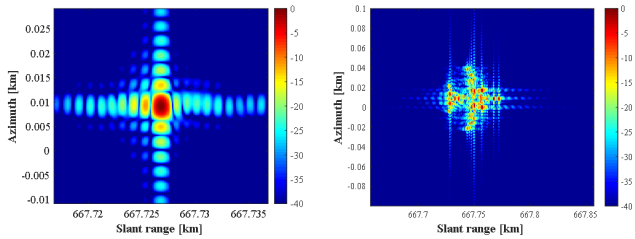
(a) 10 % 시간 동기화 지연 오류
(a) 10 % time synchronization lagging error



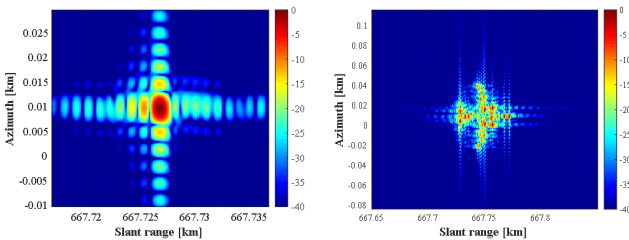
(b) 10 % 시간 동기화 선행 오류
(b) 10 % time synchronization leading error



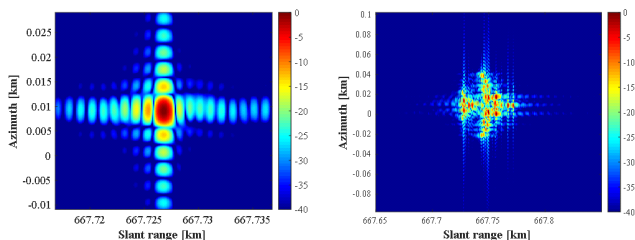
(c) 20 % 시간 동기화 지연 오류
(c) 20 % time synchronization lagging error



(d) 20 % 시간 동기화 선행 오류
(d) 20 % time synchronization leading error



(e) 30 % 시간 동기화 지연 오류
(e) 30 % time synchronization lagging error



(f) 30 % 시간 동기화 선행 오류
(f) 30 % time synchronization leading error

그림 6. 재머의 시간 동기화 오차에 따른 허위 표적 영상형성 결과

Fig. 6. SAR deceptive jamming results with time synchronization errors.

표 3. 시간 동기화 오차에 의한 허위 표적의 영상 품질 성능 지표

Table 3. SAR image quality parameters of false target with time synchronization error.

A single point-scatterer false target												
	10 % lagging		20 % lagging		30 % lagging		10 % leading		20 % leading		30 % leading	
	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth
PSLR	-10.61 dB	-12.81 dB	-10.45 dB	-13.00 dB	-10.26 dB	-13.10 dB	-10.86 dB	-12.80 dB	-10.96 dB	-12.98 dB	-11.09 dB	-13.08 dB
ISLR	-8.75 dB	-9.46 dB	-8.61 dB	-9.63 dB	-8.43 dB	-9.73 dB	-8.96 dB	-9.42 dB	-9.01 dB	-9.57 dB	-9.10 dB	-9.67 dB
Resolution	0.90 m	2.37 m	0.90 m	2.66 m	0.90 m	3.03 m	0.90 m	2.37 m	0.90 m	2.66 m	0.90 m	3.03 m
Position error rate	0.03 %	1.43 %	0.03 %	2.21 %	0.03 %	3.39 %	0.03 %	0.53 %	0.03 %	1.31 %	0.03 %	2.49 %
Aircraft false target												
	10 % lagging		20 % lagging		30 % lagging		10 % leading		20 % leading		30 % leading	
	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth
Entropy	11.98		12.02		12.09		11.99		12.03		12.10	

따라 방위 방향의 위치 오차가 발생하였다. 그러나 거리 방향의 성분들은 크게 변화하지 않았으며, 이는 거리 방향의 신호 압축을 결정하는 변수들에 대해 시간 동기화 오차가 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 허위 비행 표적의 경우, 선행 및 지연 시간이 증가할 경우, 엔트로피가 증가하여 영상 품질이 악화되었으나, 크게 변화하지는 않은 것으로 분석된다.

3-3 재머 시스템의 FFT 포인트 가용 개수

식 (6)과 같이, 재머 시스템이 보다 정밀한 허위 표적 및 지형을 형성하기 위해선, 다중 산란원에 대한 시간 지연이 구현되어야 하며, 재머 시스템이 주파수 영역에서의 신호처리를 수행할 수 있어야 한다^{[8],[11]}. 그러나, 일반적으로 주파수 영역에서의 실시간 신호처리는 FFT 포인트 가용 개수에 영향을 받게 되며, FFT 포인트 가용 개수가 증가할수록, 실시간 신호처리를 위한 재머 시스템의 하드웨어 부담이 증가하게 되며, finite impulse response(FIR) 필터로의 구현 가능성을 저하시킨다.

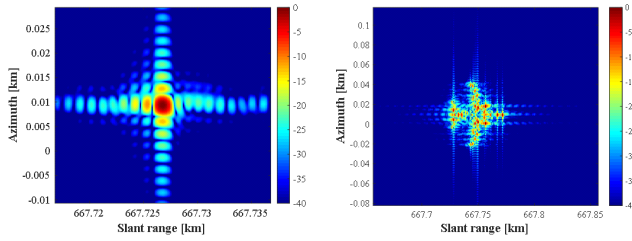
따라서 본 항목에서는 FFT 포인트 가용 개수 제한에 따른 허위 표적의 영상 품질을 분석하였다. SAR 기만 재밍 시뮬레이션을 위해 사용한 기본 FFT 포인트 개수는 11,851개로, 나이퀴스트 샘플링 조건을 만족하는 최소

FFT 포인트 개수는 7,900개이다. 본 논문에서 고려한 FFT 포인트 개수는 7,901, 1,078 및 516개를 사용하였으며, 개별 허위 표적 영상을 형성하여 영상 품질을 분석하였다. 또한 추가적으로 전체 SAR 영상의 거리 방향 HRRP를 확인하여 거리 신호의 앨리어싱(Aliasing) 여부를 확인하였으며, 이는 그림 7 및 표 4와 같다.

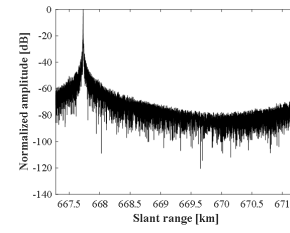
수행 결과, 나이퀴스트 조건과 동일한 7,901개를 사용할 경우, 허위 표적의 영상 품질이 악화되지 않으며, 거리 HRRP 또한 앨리어싱 현상이 발생하지 않았다. 그러나, 1,078 및 516개 이하의 FFT 포인트를 사용한 경우, 거리 HRRP에 앨리어싱 현상이 크게 발생한 것을 볼 수 있으며, 이는 전체 SAR 영상에 재머가 의도하지 않은 표적 영상이 반복적으로 형성됨을 의미한다. 따라서 재머가 충분한 FFT 포인트를 사용하지 않고 기만 재밍 신호처리를 수행할 경우, 전체 SAR 영상에 앨리어싱 현상을 유발할 수 있음을 확인하였다.

3-4 재머 최소 신호처리 요구 시간

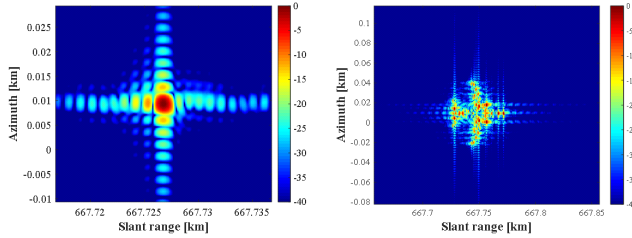
SAR 기만 재밍을 위한 재머 시스템은 수신-신호지연-재송신 과정에서 필연적으로 최소한의 신호처리 요구 시간이 존재하며, 이는 정밀한 실시간 시간 지연을 유도하는 기만 재밍 시나리오에 큰 영향을 줄 수 있다. 상기 과



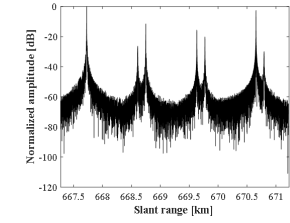
(a) 7,901개 FFT points 사용
(a) 7,901 FFT points



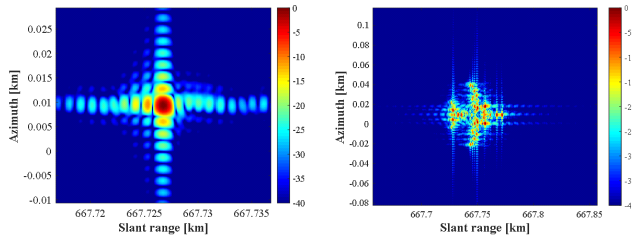
(b) 7,901개 FFT points 사용 시 거리 방향 HRRP
(b) Range HRRP using 7,901 FFT points



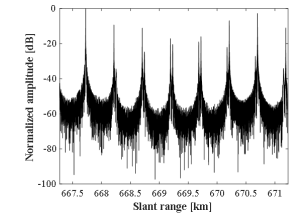
(c) 1,078개 FFT points 사용
(c) 1,078 FFT points



(d) 1,078개 FFT points 사용 시 거리 방향 HRRP
(d) Range HRRP using 1,078 FFT points



(e) 516개 FFT points 사용
(e) 516 FFT points



(f) 516개 FFT points 사용 시 거리 방향 HRRP
(f) Range HRRP using 516 FFT points

그림 7. 재머의 FFT 포인트 가용 개수에 따른 허위 표적 영상형성 결과
Fig. 7. SAR deceptive jamming results with the number of FFT points.

표 4. FFT point 가용 개수에 의한 허위 표적의 영상 품질 성능 지표
Table 4. SAR image quality parameters of false target with the number of FFT points.

A single point-scatterer false target						
	7,901 points		1,078 points		516 points	
	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth
PSLR	-10.79 dB	-12.53 dB	-10.79 dB	-12.53 dB	-10.77 dB	-12.53 dB
ISLR	-8.91 dB	-9.22 dB	-8.91 dB	-9.22 dB	-8.91 dB	-9.23 dB
Resolution	0.90 m	2.14 m	0.90 m	2.14 m	0.90 m	2.14 m
Position error rate	0.03 %	0.25 %	0.03 %	0.25 %	0.03 %	0.25 %
Aircraft false target						
	7,901 points		1,078 points		516 points	
	11.93		11.94		11.94	
Entropy						

정을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$s_{rt}(t, t_s) = s_r(t, t_s) \otimes_t h_r(t - t_{HW}, t_s) \quad (11)$$

여기서 \otimes_t 는 t 방향의 컨볼루션(Convolution) 연산자, $h_r(t, t_s)$ 는 식 (6)의 $T_1(t_s; y)$ 및 $T_2(x, y)$ 에 의해 구성된 재머 시스템의 임펄스 응답 함수, t_{HW} 는 재머 시스템의 최소 신호처리 요구 시간이다. t_{HW} 로 인해 SAR 신호는 $c \cdot t_{HW}/2$ 만큼의 추가 거리 변화가 발생하게 되며, 이는 허위 표적의 거리가 변화할 수 있게 된다. t_{HW} 는 계획된 기만 표적 템플릿의 크기 및 정밀도에 따라서 FIR 필터 등의 하드웨어 구성에 의해 변화할 수 있다. 본 논문에서는 $1 \mu s$ 이하로 재머 시스템이 t_{HW} 값을 가질 것으로 가정하였으며 t_{HW} 를 1 ns, 10 ns, 100 ns, $1 \mu s$ 로 두어 기만 표적의 영상 품질 변화를 분석하였다. 이는 그림 8 및 표 5와 같다.

시뮬레이션 수행 결과, 단일 산란원 허위 표적의 영상 품질은 t_{HW} 증가에 따라 소폭으로 악화된 것을 볼 수 있으며, 그 중 거리 방향의 위치 오차가 크게 상승하였다. 이는 t_{HW} 에 의한 추가 거리 지연으로 인해 발생한 것으

로, $c \cdot t_{HW}/2$ 만큼의 추가 거리 지연이 각 허위 표적마다 발생하였다. 따라서 재머 시스템의 최소 신호처리 요구 시간이 발생할 경우, 해당 요구 시간만큼의 거리 방향의 영상 품질 및 위치 오차가 주요한 영향을 받는 것으로 판단된다.

3-5 재머의 수행 가능한 최소 시간 지연 간격

마지막으로 재머 시스템이 수행할 수 있는 최소 시간 지연 간격에 대한 분석을 수행하였다. 효과적인 SAR 기만 재밍을 위해선 보다 정밀한 허위 표적 및 지형 형성이 요구되며, 정교한 허위 표적을 위해, 방위 시간인 t_s 에 따른 미세한 시간 지연이 필요하다. 이에 본 항목에서는 재머 시스템의 수행 가능한 최소 시간 지연 간격을 설정하여 이에 따른 형성된 허위 표적의 영상 품질을 분석하였다. 재머 시스템의 최소 시간 지연 간격은 일반적으로 아날로그-디지털 샘플링 레이트(A/D sampling rate)에 영향을 받는다. 현재 상용화 되는 하드웨어의 A/D sampling rate는 최대 5 GHz까지 수행할 수 있는 것으로 알려져 있으며^{[18]~[20]}, 이에 따라 1 ns 전후의 최소 시간 지연 간격

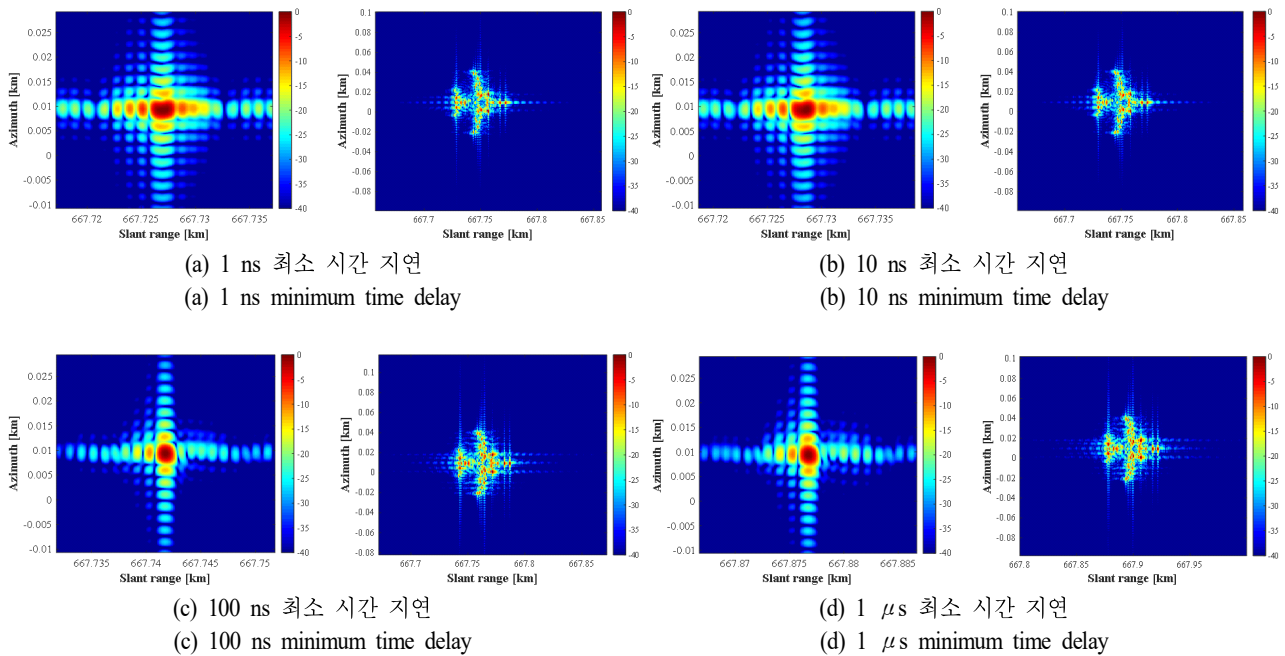
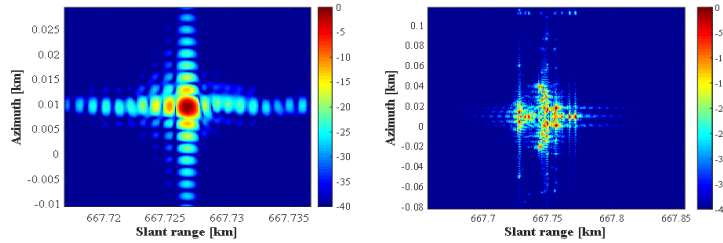


그림 8. 재머 최소 신호처리 요구 시간에 따른 허위 표적 영상형성 결과
Fig. 8. SAR deceptive jamming results with jammer's minimum time delay.

표 5. 제머 최소 신호처리 요구 시간에 따른 허위 표적의 영상 품질 성능 지표

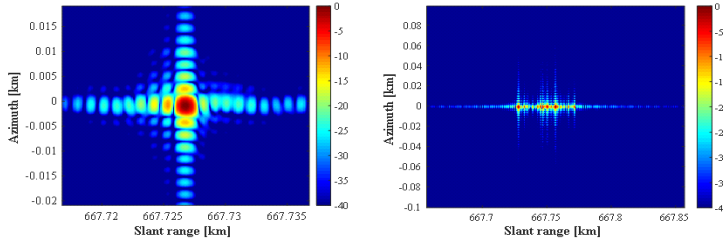
Table 5. SAR image quality parameters of false target with jammer's minimum time delay.

A single point-scatterer false target								
	1 ns		10 ns		100 ns		1 μ s	
	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth
PSLR	-10.97 dB	-12.40 dB	-10.90 dB	-12.11 dB	-10.68 dB	-12.45 dB	-9.79 dB	-11.51 dB
ISLR	-7.64 dB	-8.99 dB	-7.64 dB	-8.93 dB	-8.84 dB	-9.16 dB	-8.17 dB	-8.35 dB
Resolution	0.93 m	2.13 m	0.93 m	2.13 m	0.90 m	2.14 m	0.90 m	2.16 m
Position error rate	0.07 %	0.25 %	0.45 %	0.25 %	4.25 %	0.25 %	42.8 %	0.64 %
Aircraft false target								
	1 ns		10 ns		100 ns		1 μ s	
	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth
Entropy	11.88		11.87		11.94		12.00	



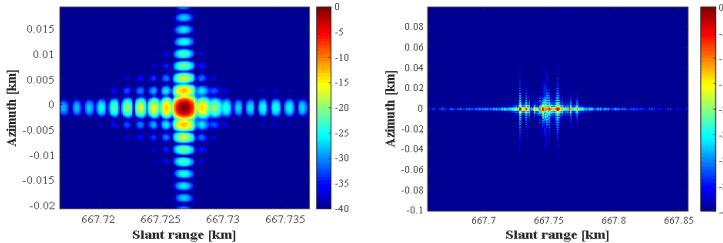
(a) 0.01 ns 최소 시간 간격

(a) 0.01 ns minimum time interval



(b) 0.1 ns 최소 시간 간격

(b) 0.1 ns minimum time interval



(c) 1 ns 최소 시간 간격

(c) 1 ns minimum time interval

그림 9. 제머의 수행 가능한 최소 시간 지연 간격에 따른 허위 표적 영상형성 결과

Fig. 9. SAR deceptive jamming results with the jammer's minimum time interval.

표 6. 재머의 수행 가능한 최소 시간 지연 간격에 따른 허위 표적의 영상 품질 성능 지표
Table 6. SAR image quality parameters of false target with the jammer's minimum time interval.

A single point-scatterer false target						
	0.01 ns		0.1 ns		1 ns	
	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth
PSLR	-10.81 dB	-12.46 dB	-10.94 dB	-12.45 dB	-13.04 dB	-12.51 dB
ISLR	-8.93 dB	-8.36 dB	-8.99 dB	-9.10 dB	-8.83 dB	-9.08 dB
Resolution	0.90 m	2.14 m	0.90 m	2.14 m	0.90 m	2.13 m
Position error rate	0.03 %	0.25 %	0.03 %	97.65 %	0.01 %	100 %
Aircraft false target						
	0.01 ns		0.1 ns		1 ns	
	11.97		10.76		10.84	
Entropy						

을 사용할 수 있을 것으로 예상된다. 이에 본 논문에서는 최소 시간 지연 간격을 0.01 ns, 0.1 ns, 1 ns, 총 세가지 경우를 두어 시뮬레이션을 수행하였으며, 그림 9 및 표 6과 같다.

시뮬레이션 수행 결과, 0.01 ns의 경우, 그림 9 (a)와 같이 형성된 비행 표적의 형태가 온전히 형성된 것을 볼 수 있다. 그러나, 0.1 ns, 1 ns의 경우, 비행 표적의 형태가 방위 방향으로 온전히 나타나지 못한 것을 볼 수 있다. 이는 수행 가능한 최소 시간 간격이 짧아짐에 따라 방위 방향으로의 거리 변화를 재머 시스템이 온전히 반영하지 못한 것으로 판단된다. 점 표적의 경우, 세 경우 모두 상대적으로 기존 허위 표적 영상보다 품질이 근소하게 악화되었으며, 특히 방위 방향의 위치 오차가 크게 발생한 것을 볼 수 있다. 이 또한 비행 표적과 마찬가지로 재머 시스템이 허위 표적의 방위 방향 거리 변화를 SAR 신호 지연에 온전히 반영하지 못한 것으로 분석되었다.

IV. 결 론

본 논문은 SAR 기반 재밍 환경에서 재머 시스템의 신호처리 성능 변화에 따른 기반 재밍 효과를 허위 표적을 형성, 영상 품질 분석을 통해 확인하였다. 단일 산란원 및 비행 표적에 대한 허위 표적 영상을 SAR 영상 내에 형성한 다음, 4가지 항목 별로 각 기반 표적의 SAR 기반 재밍의 유효성을 분석하였다.

먼저 SAR-재머 간 시간 동기화의 경우, 재머 시스템의

계획한 시간 지연 시나리오대로 SAR 신호 변조를 수행하지 못했을 경우로써, 선행 및 지연의 두 가지 경우로 나누어 분석하였다. 수행 결과, 거리 방향의 PSLR, ISLR, 해상도 및 위치 오차는 시간 동기화 문제에 크게 영향받지 않았으나, 방위 방향의 PSLR, ISLR, 해상도 및 위치 오차는 선행, 지연 동기화 오차 비율이 높아질수록 수치가 상승하였다. 이는 방위 방향으로의 허위 표적의 도플러 주파수 대역폭이 시간 동기화 오차에 의해 온전히 형성되지 못하여, SAR 신호처리 과정에서 온전한 신호 압축이 수행되지 못한 것으로 분석된다. 따라서 SAR 기반 재밍에서 SAR-재머 간 시간 동기화 문제는 허위 표적의 방위 방향의 영상 품질에 영향을 주는 요소로 판단되며, 방위 방향의 영상 품질이 중요할 경우, 시간 동기화 문제에 유의해야 될 것으로 예상된다.

재머의 FFT 포인트 가용 개수는 나이퀴스트 조건과 유사한 7,901개를 채용할 경우, 전체 허위 표적의 영상 품질에 큰 영향을 주지 않는 것을 볼 수 있으나, 그 이하의 FFT 포인트 개수인 1,078, 516개를 사용할 시, 전체 SAR 영상에 앨리어싱 현상이 발생하며, 재머가 의도치 않은 허위 표적들이 거리 방향으로 다량 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 재머 시스템이 나이퀴스트 조건을 충족하는 충분한 FFT 포인트 개수를 사용할 수 없을 경우, 온전한 허위 표적 형성을 위한 재밍 신호처리가 불가능해지며, 이는 주파수 대역을 활용하는 정밀 기반 재밍 신호처리 기법들^[7-11]의 사용에 제약이 생길 것으로 판단된다.

재머의 최소 신호처리 요구 시간은 재머 시스템이 수신-신호지연-재송신 과정에서 필연적으로 발생하는 최소 신호처리 수행 시간이며, 본 논문에서는 1 ns, 10 ns, 100 ns, 1 μ s 네가지 경우에 대해 영상 분석을 수행하였다. 수행 결과, 최소 신호처리 시간이 증가할수록, 거리 방향의 위치 오차가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 거리 방향으로 $c \cdot t_{HW}/2$ 만큼의 추가 거리 지연이 허위 표적에 발생하기 때문이다. 따라서 재머의 최소 신호처리 요구 시간은 거리 방향으로 정밀한 SAR 기만 재밍 수행에 영향을 줄 것으로 판단된다.

마지막으로 재머의 수행 가능한 최소 시간 지연 간격 여부에 따른 허위 표적의 영상 품질을 분석하였다. 0.01 ns일 경우, 재머가 온전한 허위 표적을 형성하는 것을 볼 수 있으나, 0.1 ns, 1 ns 일 경우, 비행 표적 이 방위 방향으로 온전히 형성되지 않은 것을 볼 수 있으며, 이는 재머의 최소 시간 지연 간격이 방위 방향으로의 허위 표적 형성에 영향을 주는 것으로 볼 수 있으며, 표적의 정밀한 방위 방향 영상형성을 위해선 재머 시스템이 보다 세밀한 최소 시간 지연 간격을 가져야 할 것으로 판단된다.

상기 분석 결과, SAR 기만 재밍은 재머 시스템의 성능 변화에 따라 상이한 허위 표적 형성 결과를 보여줄 수 있음을 확인되었다. 따라서 보다 실효성 있는 SAR 기만 재밍 신호처리를 위해, 본 논문은 재머 시스템의 수행 능력이 고려된 SAR 기만 재밍의 연구 방향 및 관점에 대해 제시하였다. 향후 상기 내용을 기반으로 재머 시스템의 제약을 극복할 수 있는 정밀 SAR 기만 재밍 신호처리 기법에 대한 연구를 추가적으로 수행할 예정이다.

References

- [1] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms*, New York, NY, John Wiley & Sons, 2005.
- [2] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar*, Norwood, MA, Artech House, 2005.
- [3] M. J. Lee, N. H. Jeong, J. H. Choi, G. Lee, B. H. Ryu, and K. T. Kim, "A study on performance of SAR change detection depending on co-registration condition," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 9, pp. 826-835, Sep. 2021.
- [4] G. Lee, M. J. Lee, N. H. Jeong, J. H. Choi, and K. T. Kim, "A study on the acceleration of a speckle reduction algorithm using GPUs," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 9, pp. 826-835, Sep. 2021.
- [5] M. J. Lee, S. J. Lee, B. S. Kang, B. H. Ryu, B. K. Lim, and T. B. Oh, et al., "Comparison of GMTI performance using DPCA for various clutters," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 2, no. 6, pp. 487-496, Jun. 2017.
- [6] M. J. Lee, S. J. Lee, B. H. Ryu, B. G. Lim, and K. T. Kim, "Reduction of false alarm rate in SAR-MTI based on weighted kurtosis," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 59, no. 4, pp. 3122-3135, Apr. 2021.
- [7] 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.
- [8] 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, Apr. 2016.
- [9] 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. 2020.
- [10] 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, Mar. 2018.

- [11] 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.
- [12] J. C. Curlander, R. N. McDonough, *Synthetic Aperture Radar: System and Signal Processing*, New York, NY, John Wiley & Sons, 1991.
- [13] B. Zhao, F. Zhou, M. L. Tao, Z. J. 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.
- [14] L. Huang, C. X. Dong, Z. B. Shen, and G. Q. Zhao, "The influence of rebound jamming on SAR GMTI," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 12, no. 2, pp. 399-403, Feb. 2015.
- [15] W. Q. Wang, J. Y. Cai, "A technique for jamming bi-and multistatic SAR systems," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 80-82, Jan. 2007.
- [16] X. H. Lin, P. G. Liu, and G. Y. Xue, "Fast generation of SAR deceptive jamming signal based on inverse range Doppler algorithm," in *IET International Radar Conference 2013*, Xi'an, Apr. 2013, pp. 1-4.
- [17] Q. F. Liu, J. Dong, X. S. Wang, S. Q. Xing, and B. Pang, "An efficient SAR jammer with direct radio frequency processing(DRFP)," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 137, pp. 293-309, Feb. 2013.
- [18] J. Goldsmith, C. Ramsay, D. Northcote, K. W. Barlee, L. H. Crockett, and R. W. Stewart, "Control and visualisation of a software defined radio system on the Xilinx RFSoc platform using the PYNQ framework," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 129012-129031, Jul. 2020.
- [19] Xilinx, *Zynq UltraScale+ RFSoc Data Sheet: Overview DS889*, San Jose, CA, Jul. 2018.
- [20] Xilinx, *Zynq UltraScale+ RFSoc RF Data Converter 2.0 PG269*, San Jose, CA, Apr. 2018.

이 경 민 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-1999-5242>



처리

2018년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 2020년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2020년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
 [주 관심분야] SAR/ISAR 및 레이더 신호

이 인 혁 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-7112-13318>



신호처리

2019년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
 2021년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2021년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
 [주 관심분야] SAR/ISAR 이미징, 레이더

홍 상 근 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6597-4039>



법 M&S

2004년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)
2010년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)
2004년~현재: LIG넥스원 전자전연구소 수석연구원
[주 관심분야] 전자전 EA 시스템, 재밍 기법

나 인 석 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6634-9091>



1993년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2012년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
1993년~현재: LIG넥스원 전자전연구소 수석연구원
[주 관심분야] 전자전, 통신 시스템

전 영 일 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3704-1255>



신기

2015년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학사)
2017년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
2017년~현재: LIG넥스원 전자전연구소 선임연구원
[주 관심분야] 전자전 EA 시스템, RF 송수신기

김 경 태 [포항공과대학교/정교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1200-5282>



공학과 교수

1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전자공학과 교수

2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
2012년 9월~2017년 12월: 레이더/IR 표적식별 특화연구실실장
2018년 1월~현재: 무인감시정찰기술연구센터장
2019년 4월~현재: 차세대 영상레이더시스템 연구센터장
2020년 11월~현재: 차세대 국방융합기술 연구센터장
[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정