

RLSE 기반 신호 파라미터 추정을 통한 위성 SAR 대상 허위 표적 형성 방법 연구

김상원, 이동근, 박영주, 주증민, 김종규, 김정훈, 방종현[Ⓞ]
국방과학연구소

addjhbang@gmail.com[Ⓞ]

A Study on False Target Generation Method for Satellite-Borne SAR Using Recursive Least Square Estimation-Based Signal Parameters Estimation

Kim Sang Won, Lee Dong Keun, Park Young Ju, Joo Jeung Min, Kim Jong Kyu,
Kim Jung Hoon, Bang Jong-Hyeon[Ⓞ]
Agency for Defense Development

요 약

본 논문에서는 현재 수신된 위성 SAR(synthetic aperture radar) 신호로부터 RLSE(recursive least square estimation)를 기반으로 실시간으로 추정된 다음 SAR 신호의 송신 시점과 중심 주파수를 통해 SAR 영상에서의 허위 표적을 형성하는 방법에 대하여 제안한다. 제안하는 방법은 기존의 허위 표적 형성 방법과 달리 거리 축을 기준으로 재머의 앞쪽에도 허위 표적을 형성할 수 있다. 모의 실험을 통해 허위 점표적을 형성한 후 이를 확인하며, 형성된 허위 점표적의 품질을 분석한다.

I. 서 론

감시정찰 능력 강화를 위해 수많은 위성 탑재 영상 레이다가 발사되고 있다. 궤도에 오른 합성 개구면 레이다(synthetic aperture radar, SAR)는 지구 주위를 공전하며 감시정찰, 표적 탐지 및 식별 등 군사적 목적으로도 활용되고 있으며, 이에 대응하기 위해 실제로 존재하지 않는 허위 표적을 SAR 영상에 형성하는 방법에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. 하지만 기존의 연구들은 수신된 SAR 신호에 허위 표적에 대한 정보를 결합하고, 일정 시간 후에 이 신호를 SAR 를 향해 방사하는 방식을 취한다[1]. 이로 인해 SAR 의 관심 영역 내에 거리 축을 기준으로 재머의 뒤쪽에만 허위 표적을 형성할 수 있다는 한계점이 존재한다.

이에 본 논문에서는 허위 표적 형성 측면에서의 자유도를 높이기 위해, 현재 수신된 SAR 신호로부터 recursive least square estimation(RLSE)를 기반으로 실시간으로 추정된 다음 SAR 신호의 송신 시점과 중심 주파수를 활용하여 SAR 영상에서의 허위 표적을 형성하는 방법을 새롭게 제안한다. 제안하는 방법은 거리 축을 기준으로 재머의 앞쪽에도 허위 표적을 형성할 수 있다. 모의실험을 통해 제안하는 방법을 이용하여 허위 점표적을 재머의 앞쪽에 형성하고, 형성된 허위 점표적은 네 가지 품질 척도를 통해 분석한 결과를 제시한다.

II. 제안하는 허위 표적 형성 방법

기존의 허위 표적 형성 연구들은 허위 표적에서 반사된 SAR 신호가 SAR 에 수신되는 시점에 맞춰 허위 신호를 방사하는 것이 핵심이다. 반면 제안하는 방법은 이 핵심을 유지하면서, 이전에 수신된 SAR 신호로부터 현재 SAR 신호의 송신 시점과 중심 주파수를 추정하고, 이를 통해 현재 SAR 신호가 수신되기 전 허위 신호를 방사한다. 그림 1(a), (b)는 각각 기존 방법과 제안하는 방법에 대한 특정 방위 시각의 SAR 와 재머의 송, 수신 흐름도를 나타낸다. 여기서 $t_{jmr,Tx}$, $t_{jmr,Rx}$, $t_{sar,Tx}$, $t_{sar,Rx}$ 는 각각 재머의 허위 신호 방사 시점, 재머의 SAR 신호 수신 시점, SAR 의 신호 송, 수신 시점을 의미하며,

τ_J 와 τ_F 는 각각 SAR 와 재머, SAR 와 허위 표적 간의 단방향 시간 지연을 나타낸다. 또한 일직선 상에 시간의 흐름을 나타내기 위해 SAR 의 송, 수신 시점을 구분하였다. 그림 1(a)의 기존 방법은 재머가 SAR 신호를 수신하고 $\Delta\tau$ 만큼의 시간 지연을 적용한 후 SAR 를 향해 방사한다. 반면 그림 1(b)의 제안하는 방법은 추정된 현재 SAR 신호 송신 시점 \hat{t} 을 통해 아래와 같이 방사 시점을 결정한다.

$$t_{jmr,Tx} = \hat{t} + (2\tau_F - \tau_J) \quad (1)$$

여기서 τ_J 와 τ_F 는 사전에 수집한 위성의 궤도 정보를 통해 안다고 가정한다.

추정된 SAR 중심 주파수 \hat{f}_s 는 허위 신호 $d(t)$ 를 생성하고, 이 신호를 주파수 상향 변환하는데 사용된다. 이때 허위 신호는 허위 표적 형성에 필요한 도플러 주파수 성분과 재머에서 SAR 까지 전파되는 동안 발생하는 도플러 주파수를 상쇄시킬 수 있는 주파수 성분을 포함해야 하며, 방사 시점을 고려하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$d(t) = w_r(\hat{t} - (2\tau_F - \tau_J)) e^{j\pi K_r(\hat{t} - (2\tau_F - \tau_J))^2} \times e^{-j4\pi\hat{f}_s\tau_F} e^{j2\pi\hat{f}_s\tau_J} \quad (2)$$

여기서 $w_r(t)$ 는 펄스 폭이 T 인 구형 함수, K_r 은 처프 비율(chirp rate)을 의미하며, 본 논문에서는 T 와 K_r 또한 추정된 값을 사용한다[2]. 상기 허위 신호를 SAR 에서 수신했을 때의 기저 대역 신호 $s(t)$ 는 아래와 같다.

$$s(t) = w_r(\hat{t} - 2\tau_F) e^{j\pi K_r(\hat{t} - 2\tau_F)^2} e^{-j4\pi\hat{f}_s\tau_F} \times e^{j2\pi(\hat{f}_s - f_s)t} e^{j(\psi_j - \psi_s)} \quad (3)$$

여기서 f_s 는 SAR의 중심 주파수, ψ_j 와 ψ_s 는 각각 재머와 SAR의 초기 국부 발진기 위상을 의미한다.

제안하는 허위 표적 형성 방법을 구현하기 위해 사용되는 SAR 신호의 송신 시점과 중심 주파수 추정치는 크게 두 가지 단계를 통해 획득할 수 있다[2]. 먼저 수신된 SAR 신호를 실시간으로 압축하고, 압축된 펄스로부터 도착 시간과 위상을 측정한다. 그 후 측정된

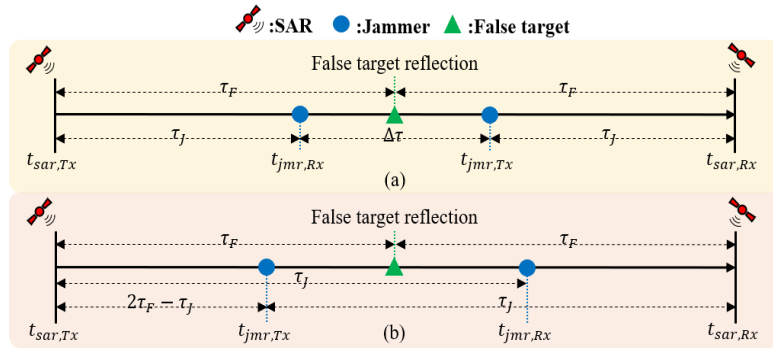


그림 1. SAR와 제머의 송, 수신 흐름도; (a) 기존 방법, (b) 제안하는 방법

도착 시간과 위상을 RLSE의 입력으로 받아 SAR 신호의 송신 시점과 중심 주파수를 추정한다. 최종적으로 추정된 파라미터를 통해 식(2)와 같이 허위 신호를 생성하고, 식(1)과 같이 방사 시점을 결정함으로써 허위 표적 위치를 SAR의 관심 영역 내에서 자유롭게 설정하고, 표적을 형성할 수 있다.

III. 모의실험

본 장에서는 제안하는 허위 표적 형성 방법을 통해 허위 점표적을 형성하고, 허위 점표적에 대한 impulse response width(IRW), peak sidelobe ratio(PSLR), integrated sidelobe ratio(ISLR), main lobe position offset(MLPO)의 네 가지 척도를 통해 분석한 결과를 제시한다. 모의실험은 표 1의 실험 환경을 기반으로 수행하였다. 이때 제머의 초기 중심 주파수는 SAR 중심 주파수 대비 30kHz 작게, 샘플링 주파수는 100 MHz로 설정하였다. 제머는 SAR 영상에서 코너 리플렉터(corner reflector)와 같이 형성된다고 가정하였다.

그림 2는 원점에서 형성된 제머와 의도한 허위 표적 위치에서 형성된 허위 점표적을 나타낸다. 거리 축을 기준으로 제머의 앞쪽에 허위 점표적이 형성된 것을 볼 수 있다. 표 2는 허위 점표적에 대한 네 가지 품질 척도를 거리, 방위 축에 대하여 나타낸 것이다. MLPO의 경우 거리 축은 0.2 m, 방위 축은 1.2 m 정도의 오차를 보이며, 이는 거리 축의 경우 방사 시점 결정 과정에서, 방위 축의 경우 중심 주파수 추정 과정에서 생긴 오차로 인해 발생한 것으로 판단된다. 거리 축의 PSLR과 ISLR의 경우 방위 축과 비교하였을 때 대략 1.5 dB 정도 증가된 것을 볼 수 있다. 이는 허위 신호 형성 시 사용된 처프 비율 추정치가 오차를 포함하고 있고, SAR에 수신된 허위 신호가 정합 필터에 의해 완벽하게 압축되지 않기 때문이다.

IV. 결론

본 논문에서는 군사 목적으로 활용되는 정찰 위성 효과적으로 대응하기 위해, RLSE를 기반으로 추정된 파라미터를 활용한 위성 SAR 대상 허위 표적 형성 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 RLSE를 기반으로 실시간으로 추정된 SAR 송신 시점과 중심 주파수를 통해 허위 신호를 생성하고, 방사함으로써, 거리 축을 기준으로 제머의 앞쪽에 허위 표적을 형성할 수 있다. 모의실험을 통해 허위 점표적을 형성함으로써 이를 확인하였으며, IRW, PSLR, ISLR, MLPO의 네 가지 품질 척도를 통해 허위 점표적을 분석하였다. 그 결과 허위 점표적은 의도한 위치에서 거리 축과 방위 축으로 각각 0.2 m, 1.2 m 정도의 오차를 가지고 형성되는 것을 확인하였다. 그러나 처프 비율 추정치의 오차로 인해 허위 점표적의 부엽 성분이 커지면서 거리 축으로 PSLR과 ISLR이 저하되는 것을 볼 수 있었다.

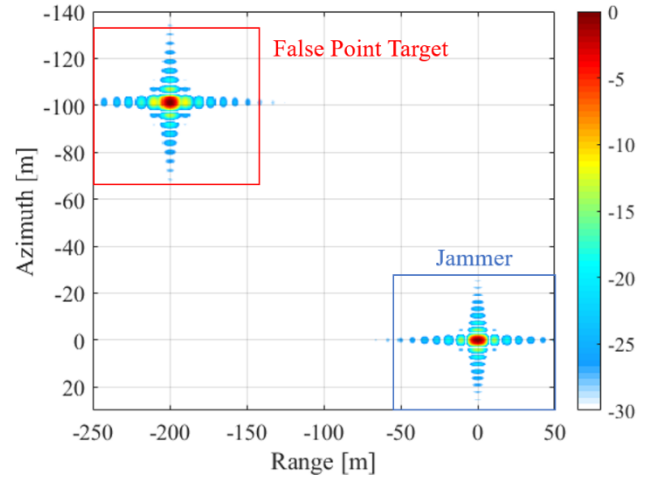


그림 2. 제안하는 허위 표적 형성 방법 수행 결과

표 1. 모의실험 파라미터

SAR 중심 주파수	9.65 GHz	위성 높이	550 km
대역폭	50 MHz	위성 속도	7 km
펄스 폭	5 μ s	지향 각도	23.4°
펄스 반복 주파수	4758.78 Hz	운용 모드	Stripmap
제머 위치	[0, 0, 0] m	허위 표적 위치	[-200, -100, 0] m

표 2. 허위 점표적에 대한 네 가지 품질 측정 결과

	Range	Azimuth
IRW	6.92 m	3.42 m
PSLR	-11.57 dB	-13.26 dB
ISLR	-8.34 dB	-9.68 dB
MLPO	0.21 m	1.22 m

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2024년 정부의 재원으로 수행된 연구임(912916201)

참고 문헌

- [1] K. Yang et al, "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, Jan. 2020.
- [2] S.-W. 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. 5, May. 2024.