

단일 채널 SAR 영상을 활용한 다중 이동 방위 표적 속도 추정

Multiclass Target Azimuth Velocity Estimation Using Single-Channel SAR Imagery

송주영 · 김덕진* · 이도영** · 이창민* · 이혁빈*

Juyoung Song · Duk-jin Kim* · Doyoung Lee** · Changmin Lee* · Hyokbeen Lee*

요약

본 연구에서는 단일 채널 SAR 영상에서 특정 방위 속도에 대한 표적의 위상왜곡을 모의할 수 있는 SAR 위상 재초점화 함수가 다중 표적의 속도 추정에 활용되었다. 엔트로피를 활용한 최적화 과정을 거칠 경우, 본 알고리즘을 활용하여 이동 표적의 속도를 단일 채널 SAR 영상만으로부터 효과적으로 추출할 수 있다. 실시간 선박과 항공기의 위치 및 속도 정보인 AIS, ADS-B 정보를 부착한 선박 42척과 항공기 17척에 대해 본 알고리즘을 적용한 결과 0.59 m/s, 2.94 m/s의 평균 오차를 보였으며, 선박, 항공기, 차량, 기차와 같은 다중 이동 표적에도 본 연구의 속도 추정 기법을 적용할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

This study employs a target-motion SAR phase-refocusing algorithm that generates a moving target phase as a function of azimuth velocity. Combined with a minimum-entropy optimization strategy, this proposed algorithm effectively estimates the moving target velocity from a single-channel SAR system. The accuracy of velocity estimation is validated by applying it to 42 AIS-equipped vessels and 17 ADS-B-equipped aircraft, whose average offset with reference data was 0.59 m/s and 2.94 m/s, respectively. The proposed algorithm was effectively applied to vessels, aircraft, vehicles, and trains, confirming its robust applicability to different types of moving targets.

Key words: Synthetic Aperture Radar, Moving Target Indication, Azimuth Defocusing, Phase Refocusing

I. 서론

인공위성 및 항공기를 활용한 원격탐사는 지상과 해상에서 발생하는 자연 현상과 인공 표적의 움직임을 광역적

으로 감시할 수 있는 효과적인 수단으로 평가된다. 특히 기상 조건과 무관하게 주기적으로 영상을 획득할 수 있는 합성개구레이다(SAR, synthetic aperture radar)를 이용한 원격탐사는 전천후 지구 관측에 매우 유용한 기법으로 간주

「본 연구는 대한민국 정부(산업통상자원부 및 방위사업청) 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다(과제번호 22-CM-16).」

서울대학교 기초과학연구원(Research Institute of Basic Sciences, Seoul National University)

*서울대학교 지구환경과학부(School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University)

**서울대학교 미래혁신연구원(Future Innovative Research Institute, Seoul National University)

· Manuscript received September 8, 2025 ; Revised September 29, 2025 ; Accepted October 22, 2025. (ID No. 20250908-095)

· Corresponding Author: Duk-jin Kim (e-mail: djkim@snu.ac.kr)

된다^[1]. 야간이나 악기상 시에도 안정적인 영상취득이 가능한 SAR는 군용 표적이나 불법선박의 이동을 모니터링하는 데 다수 사용되어 왔으며, 이들은 실시간 위치 추적 센서가 부재하기에 원격탐사 자료를 기반으로 한 속도 추정을 적용하는 것이 적합하다고 판단된다^[2]. 인공 표적에 대한 속도 추정은 일반적으로 이동 표적 탐지(MTI, moving target indication) 기술로 구현되어 왔다^{[3]-[5]}. 전통적인 MTI 기술은 둘 이상의 다중 채널 SAR 안테나를 활용하여 동일 지역 또는 해역에 대한 두 장 이상의 SAR SLC (single-look complex) 영상을 취득하고, 이들의 진폭의 차이를 구하는 DPCA(displaced phasecentered antenna) 기법을 적용하여 이동 표적 자체를 영상으로부터 탐지한다^[4]. 이후, 탐지된 이동 표적들에 대해 위상차를 구하는 ATI (along-track interferometry) 기법을 적용하여 이동 표적의 속도를 추정하는 것이 가능하다^[5]. 특히, ATI 기법을 통해 차량, 선박 등의 인공표적의 속도뿐 아니라 해류와 같은 자연물의 속도를 추정하는 것도 가능하다^[6].

그러나, ATI를 기반으로 한 속도 추정은 SAR SLC 위상을 기반으로 하며, 이는 $-\pi$ 에서 π 까지 주기적으로 반복되는 wrapped phase이기에 속도 추정과정에서 2π 를 주기로 위상 모호성(phase ambiguity)이 발생하여 고속 이동 표적의 정확한 속도 추정이 어렵다는 단점이 있다^{[5]-[7]}. 여기에 더해, 다중 채널 SAR 시스템이 인공위성에 대부분 탑재되지 않았기에, MTI를 기반으로 한 연구들의 상당수는 항공기 SAR 실험이나 시뮬레이션으로 구현되었다^{[7],[8]}. 그러나, 군용 표적 및 불법선박 모니터링의 필요성을 고려할 때, 단순히 실험적인 조건에서 시뮬레이션에 이동 표적 속도 추정을 구현할 경우 실용성이 저하되기에, 단일 채널 SAR 영상 기반의 이동 표적 속도 추정 알고리즘을 개발할 필요가 있다. 단일 채널 SAR 영상의 도플러 주파수 정보를 직접 추정하는 방식으로 표적 속도를 추정하는 연구들이 존재하였으나, 정확도가 낮고 배경과의 대비가 높은 선박에만 제한적으로 적용되었다^{[9],[10]}.

따라서, 본 연구에서는 단일 채널 SAR 위성 및 항공기 영상에 강건하게 적용할 수 있는 이동 표적 속도 추정 알고리즘을 활용하였으며, 이를 위해 이동 표적의 속도에 의해 발생하는 위상왜곡을 보정하는 SAR 위상 재초점화 함수를 제안하여 선박, 항공기, 차량과 같은 다중 이동 표적의 속도 추정에

적용하였다. 본 연구에서 제안한 SAR 위상 재초점화 알고리즘으로부터 추출한 선박 및 항공기의 속도와 선박과 항공기의 실시간 위치 및 속도 정보인 AIS(automatic identification system), ADS-B(automatic dependent surveillance-broadcast) 자료와의 비교를 통해 정확도를 평가하였다.

II. 연구방법

2-1 이동 표적에 대한 SAR 신호 모델

SAR는 안테나가 이동하면서 표적에 대한 영상을 취득하며, SAR 신호형성에는 안테나와 표적 사이의 거리가 큰 영향을 미치게 된다. 안테나의 진행방향인 방위 (azimuth), 시선방향인 거리(range), 고도 방향의 축을 (x, y, z) 로 두고, 방위방향의 시간 η 에 대해 안테나와 표적 사이의 거리에 대한 식을 근사할 수 있다^[11]. 이때, 지상표적의 기준 위치는 $(0, y_0, 0)$, 안테나의 기준 위치는 $(0, 0, H)$ 이기에 기준 거리는 $R_0 = \sqrt{y_0^2 + H^2}$ 이 된다. 그러나, 안테나가 이동하며 표적의 영상을 취득하는 SAR의 특성을 고려할 때, 방위 시간 η 에 따른 거리 방정식은 식 (1)과 같이 나타나게 된다.

$$R(\eta) = R_0 + \frac{v_y y_0}{v_a} \eta + \frac{1}{2R_0} (v_a - v_x)^2 \eta^2 \quad (1)$$

SAR의 도플러 주파수는 안테나와 표적 사이의 거리에 의존하는 주파수를 의미하며, 그에 따라 식 (1)에서 제시된 거리 방정식을 기반으로 이동 표적의 도플러 주파수와 SAR 위상함수가 유도된다.

일반적으로 SAR 안테나가 이동 중에 지상이나 해상에 대한 신호를 합성하여 영상을 복원할 때, 특정 표적에 대해 도플러 효과가 발생하게 된다. 고정 표적의 경우, 안테나가 접근할 때는 높은 주파수를, 멀어질 때는 낮은 주파수를 가지게 되며, 이는 SAR 안테나의 속도인 v_a 를 활용하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다^[11].

$$f_{D,ref}(\eta) = -\frac{2v_a^2}{\lambda_0 R_0} \eta = K_a \eta \quad (2)$$

이때, 기준 도플러 주파수 $f_{D,ref}$ 는 SAR 안테나의 진행

방향인 방위 방향 시간 η 의 함수이며, SAR 시스템의 기준 파장 λ_0 과 안테나와 표적 간의 기준 거리인 R_0 에 의존한다. 식 (2)에서의 도플러 주파수의 기울기는 K_a 로 나타낸다. 일반적으로 도플러 주파수는 위상(phase)의 도함수로 정의되기에 SAR 위상 함수를 식 (3)과 같이 정의할 수 있다^{[11],[12]}. 식 (3)에서 정의된 식은 점표적에 대해서도 2차 함수인 포물선의 형태로 정의되며, 이를 SLC의 형태로 영상복원을 하기 위해서는 SAR 안테나의 속도를 활용한 신호처리를 필수적으로 수행하여야 한다^[12]. 즉, 식 (3)에서 2차항이 제거된 상수항만이 실제 고정 표적의 위상이 된다.

$$\phi_{ref}(\eta) = -\frac{4\pi}{\lambda_0}R_0 + \frac{2\pi}{\lambda_0 R_0}v_a^2\eta^2 \quad (3)$$

그러나, 속도를 가지고 이동하는 표적에 대해서는 도플러 주파수가 식 (4)와 같이 정의된다. 이때, 표적의 속도를 방위 방향 속도인 v_x 와 거리 방향 속도인 v_y 로 분리할 경우, v_x 는 도플러 주파수의 기울기를, v_y 는 도플러 주파수의 상수항을 왜곡시키게 된다. 이동 표적에 대한

SAR 위상 함수는 식 (5)와 같이 정의되며, SAR 안테나로부터 멀어지는 방향이 양의 속도이다.

$$f_D(\eta) = \frac{2v_y y_0}{\lambda_0 R_0} - \frac{2(v_a - v_x)^2}{\lambda_0 R_0} \eta \quad (4)$$

$$\phi(\eta) = -\frac{4\pi}{\lambda_0}R_0 - \frac{4\pi}{\lambda_0} \frac{v_y y_0}{R_0} \eta + \frac{2\pi}{\lambda_0 R_0} (v_a - v_x)^2 \eta^2 \quad (5)$$

SLC 영상복원을 위한 신호처리 과정에서 레이더 플랫폼 속도만을 고려한 2차항이 제거되기에, v_y 에 의한 1차항은 잔류하게 되며, 이는 방위 시간(azimuth time) 축에서 이동 표적이 실제 위치가 아닌 다른 위치에 나타나게 하는 효과를 야기한다. 이를 방위 오차(azimuth offset)라 한다. 또한, v_x 는 안테나와 표적에 대한 상대 속도를 v_a 에서 $v_a - v_x$ 로 왜곡시키고, 그에 따라 신호처리 과정의 정확도가 낮아져 표적의 초점화 성능이 저하되어 포물선의 형태로 상이 왜곡되게 된다. 이를 방위 위상왜곡(azimuth defocusing)이라 한다^[11]. 그림 1은 식 (4) 및 식 (5)에 기술된 이동 표적의 SAR 도플러 주파수의 신호모델 및 실제

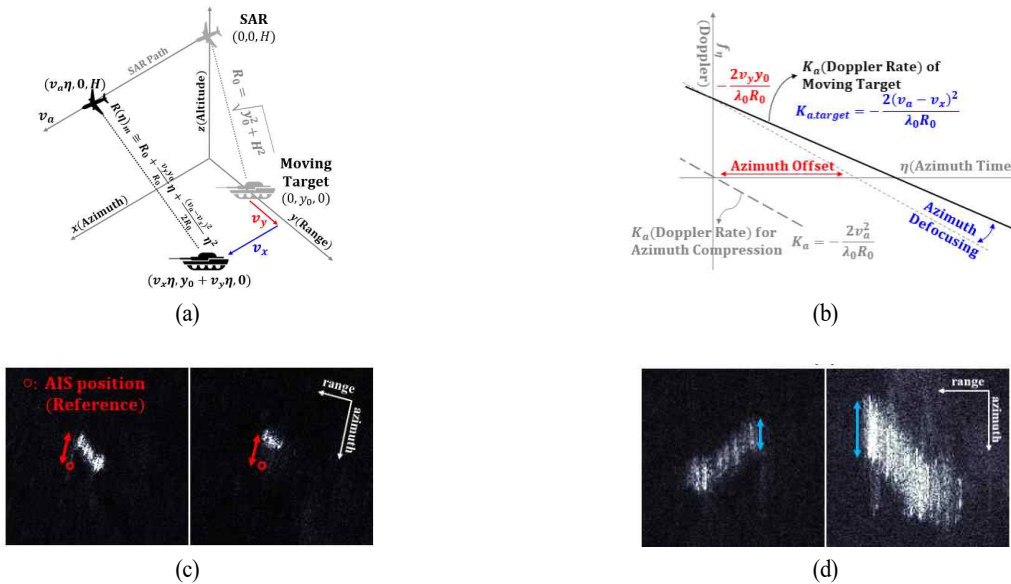


그림 1. (a) SAR 영상 취득 기하구조와 (b) 이동 표적에 대한 SAR 도플러 주파수 신호 모델 및 (c) 이동 선박의 속도에 의한 실제 SAR 영상 내 방위 오차 및 (d) 방위 위상왜곡

Fig. 1. (a) SAR acquisition geometry (b) SAR Doppler frequency model of a moving target with a typical moving vessel in the SAR image subject to (c) azimuth offset and (d) azimuth defocusing.

SAR 영상 내 이동 선박에 발생하는 방위 오차와 방위 위상왜곡 효과의 예시를 나타낸다. 본 연구에서는 방위 위상왜곡을 역산하여 이동 표적의 속도를 추정하는 기술을 활용하는 것을 목표로 하였기에, 식 (5)에서 위상왜곡을 야기하는 2차항 성분을 제거하였다.

2.2 SAR 위상 재초점화 기반 이동 표적 속도 추정

본 연구에서 활용한 SAR 위상 재초점화 함수(target motion SAR phase refocusing)는 정지한 표적의 위상을 제거하고 특정 방위 방향속도 v_x 로 이동하는 표적의 위상을 추가하여 해당 속도로 이동하는 표적의 SAR 표적 형상을 생성해 내는 알고리즘이다. 즉, 정지한 표적의 위상 ϕ_{ref} 와 특정 속도로 이동하는 표적의 위상 ϕ 에 대한 위상 재초점화 함수 ϕ_{comp} 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 허수 단위는 j 로 나타낸다.

$$\exp(-j\phi_{comp}) = \exp(j\phi_{ref})\exp(-j\phi) \quad (6)$$

식 (4)의 2차항을 식 (5)에 대입할 경우, SAR 위상 재초점화 함수를 얻을 수 있으나, 방위 방향에만 의존하는 식을 도출된다. SAR 시스템의 거리 방향 주파수는 중심 주파수 f_0 에 대해 대역(bandwidth)을 가지고 변조되기에, 이에 따라 고정된 기준 파장 λ_0 가 아닌 식 (7)과 같이 거리 방향의 주파수에 의존하는 파장 λ_τ 를 가지게 된다^[13]. 이때, 광속은 c_0 로 나타낸다.

$$\lambda_\tau = \frac{c_0}{f_0 + f_\tau} \quad (7)$$

식 (7)을 식 (5) 및 식 (6)과 결합하여 거리 및 방위 방향의 주파수 도메인 (f_τ, f_η) 에서 유도한 SAR 위상 재초점화 함수는 식 (8)과 같이 표현할 수 있다. 이 함수는 특정 초기값 속도 v_x 에 대해 거리 및 방위 방향 주파수 영역에서 정의되며, 이를 사용하여 특정 속도로 움직이는 표적의 SAR 형상을 생성할 수 있다.

$$\phi_{comp}(f_\tau, f_\eta) = \frac{\pi\lambda_0 R_0}{2(1 + \frac{\lambda_0 f_\tau}{c_0})} \left(\frac{1}{v_a^2} - \frac{1}{(v_a - v_x)^2} \right) f_\eta^2 \quad (8)$$

즉, 식 (8)을 활용하여 다양한 속도에 대한 이동 표적의 위상왜곡 형상을 생성한 뒤, 그중 위상왜곡이 가장 작은 표적의 영상과 그때 초기값으로 사용된 속도 v_x 를 선택하면 이동 표적의 속도를 추정하는 것이 가능하다. 일반적으로 위상왜곡을 정량적으로 평가하기 위한 지표로 엔트로피(entropy)를 활용하며, 식 (9)의 식에서 도출된 값이 작을수록 위상왜곡이 작은 것으로 판단한다^[14]. 정규화 후의 SAR 진폭은 $N(\tau, \eta)$ 로 나타낸다.

$$H = - \sum_{\eta} \sum_{\tau} N(\tau, \eta) \log N(\tau, \eta) \quad (9)$$

그림 2는 이동 표적의 속도 추정을 위한 SAR 위상 재초점화 함수 및 엔트로피를 활용하는 과정을 나타낸 모

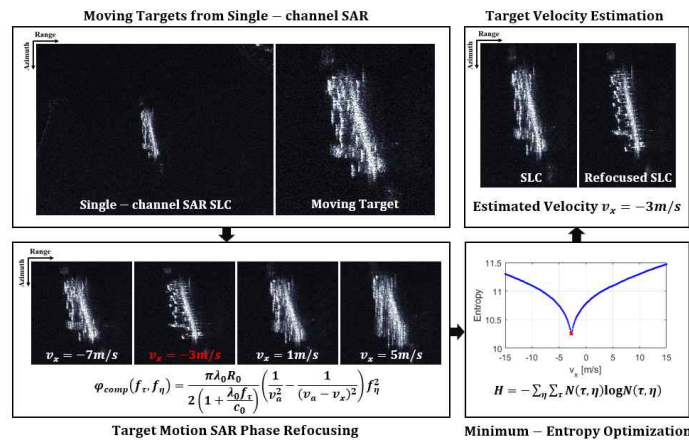


그림 2. 단일 채널 SAR 영상에 적용한 SAR 위상 재초점화 적용 개념도
 Fig. 2. Application flow of target motion SAR phase refocusing on a single-channel SAR image.

식도이다. 본 알고리즘은 단일 채널 SAR 영상의 도플러 주파수 특성에 의존하기에 선박, 항공기, 차량 등 다중 이동 표적에 모두 강건하게 적용할 수 있다는 장점이 있다.

III. 연구 결과

SAR 위상 재초점화를 활용한 이동 표적 속도 추정 알고리즘의 정확도 평가를 위해서는 이동 표적에 대한 실시간 위치 및 속도 정보를 확보하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 이동 선박에 대한 AIS 자료와 이동 항공기에 대한 ADS-B 자료를 확보하여 이동 표적이 존재하는 SAR 영상에 대하여 동기화를 수행하였다. 본 알고리즘은 고해상도 단일 채널 SAR 위성인 ICEYE, Umbra와 단일 채널 항공기 SAR인 UAVSAR에 적용되었고, 정확도 평가를 위해 42척의 선박과 17척의 항공기에 대해 속도 추정을 실행하였다. 표 1은 ICEYE, Umbra, UAVSAR에 대한 제원을 나타낸다.

그림 3은 3종의 단일 채널 SAR 영상인 ICEYE, Umbra, UAVSAR 내의 42척의 선박에 대한 추정 속도와 AIS 기반 속도를 비교한 결과이다. 평균 오차는 0.59 m/s로 기존의, 오차가 1 m/s 이상에 달했던 선박 속도 추정 알고리즘 대비 높은 정확도로 나타났다^{9),15)}. 또한, 그림 4는 단일 채널 SAR 영상인 Umbra 내의 17척의 항공기에 대한 추정 속도와 ADS-B 기반 속도를 비교한 결과이다. 평균 오차는 2.94 m/s로 나타났다.

SAR 위상 재초점화 기반의 이동 표적 속도 추정 알고리즘은 단순히 특정 종류의 표적에만 적용이 가능한 것이 아닌, 선박, 항공기, 차량 등의 다중 표적에도 활용할 수 있다. 본 연구에서는 ICEYE, Umbra, UAVSAR 영상들

표 1. 본 연구에 사용된 단일 채널 SAR 영상 제원
Table 1. Specifications of single-channel SAR systems.

	ICEYE	Umbra	UAVSAR
Center frequency (GHz)	9.65	9.80	1.26
Antenna velocity (m/s)	7,600	7,600	240
Wavelength (m)	0.03	0.03	0.23
Resolution (range) (m)	0.5	0.15	1.6
Resolution (azimuth) (m)	0.3	0.3	0.8

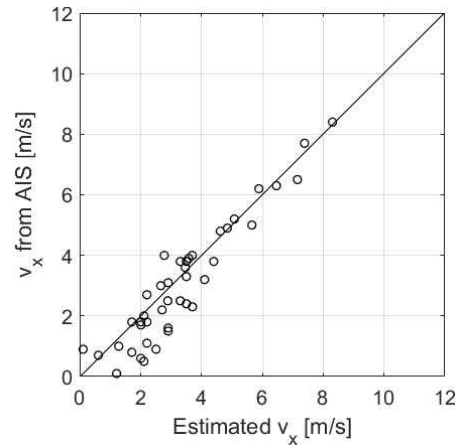


그림 3. 실시간 선박 AIS 기반 속도와 비교한 SAR 위상 재초점화 기반 선박 속도 추정 결과

Fig. 3. Comparison on estimated vessel velocity using target motion SAR phase refocusing with real-time vessel AIS data.

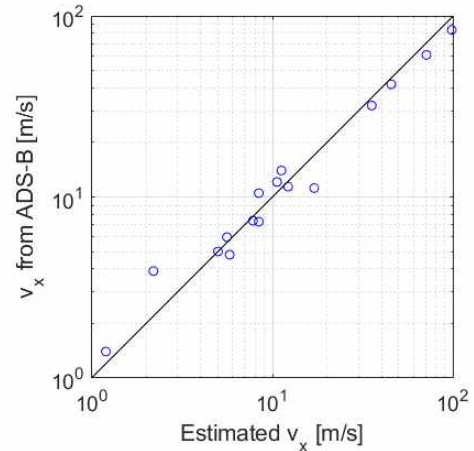


그림 4. 실시간 항공기 ADS-B 기반 속도와 비교한 SAR 위상 재초점화 기반 항공기 속도 추정 결과

Fig. 4. Comparison on estimated aircraft velocity using target motion SAR phase refocusing with real-time aircraft ADS-B data.

에서 다수의 이동 표적을 선택하고, 그들에 대한 속도 추정이 정상적으로 수행되는지 확인하였다. 초기값으로 대입한 속도 범위는 -120 m/s에서 120 m/s까지 0.1 m/s 간격으로 적용하였다.

그림 5는 Umbra SAR로부터 획득한 이동하는 두 항공기로, SAR 위상 재초점화를 활용한 속도 추정이 적용되었다. 그림 5(a)에서 나타난 항공기의 경우 큰 위상왜곡을 보이며 추정 속도 역시 100 m/s를 상회하기에, 이를 통해 해당 항공기가 이착륙 중이라는 것을 판단할 수 있다. 그림 5(b)에서 나타난 항공기의 경우 위상왜곡도 그림 5(a)보다는 작으며 추정 속도 또한 25.3 m/s이기에 해당 항공기가 단순히 이동 중(taxiing)이라는 사실을 추정할 수 있다.

그림 6은 ICEYE SAR로부터 획득한 이동하는 선박으로, 위상 재초점화를 활용한 속도 추정결과와 함께 선박

의 상부 구조물을 더 선명하게 확인하는 것이 가능하다. 이는 이동하는 표적을 식별하기 위해서는 속도에 의한 위상왜곡을 보정하는 작업이 불가결하다는 사실을 증명하며, 본 알고리즘이 느린 속도로 이동하는 표적에 대해서도 적용이 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 7은 ICEYE SAR로부터 획득한 이동하는 기차로, 위상왜곡이 보다 현저하게 줄어든 기차의 형상을 확인할 수 있다.

그림 8은 항공기 SAR인 UAVSAR로부터 획득한 이동하는 선박과 차량으로, SAR 위상 재초점화 적용 후 위상 왜곡이 정상적으로 보정되고 표적 속도도 추출된 것을

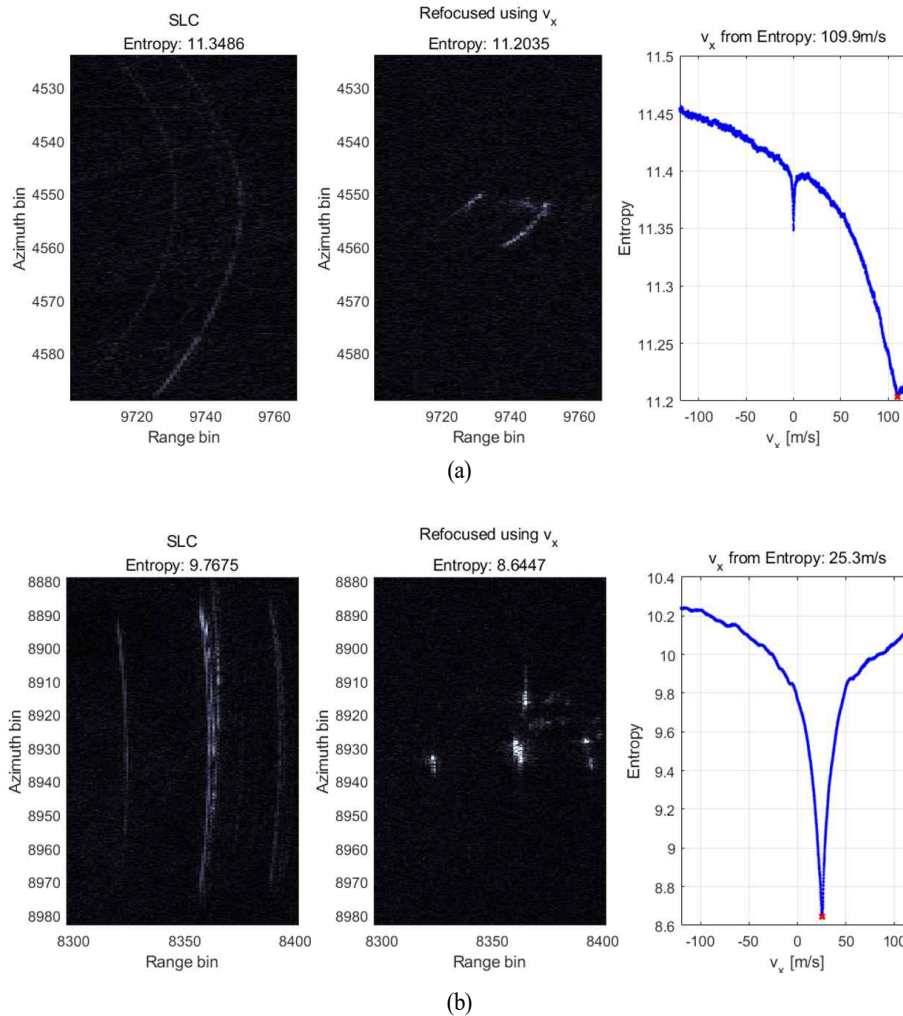


그림 5. Umbra SAR 영상에서 취득한 두 항공기의 SAR 위상 재초점화 처리 결과

Fig. 5. Two aircrafts captured from an Umbra SAR image, accompanied by application of target motion SAR phase refocusing.

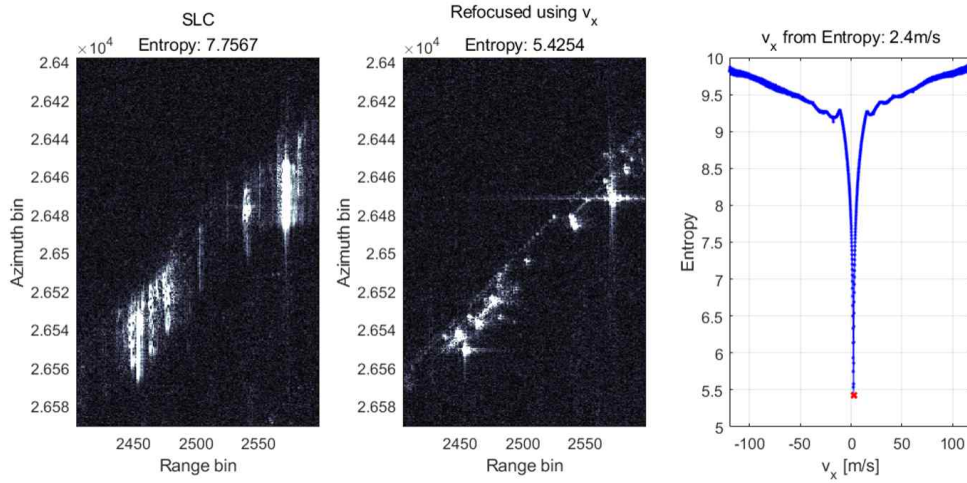


그림 6. ICEYE SAR 영상에서 취득한 선박의 SAR 위상 재초점화 처리 결과
 Fig. 6. A moving vessel captured from an ICEYE SAR image, accompanied by application of target motion SAR phase refocusing.

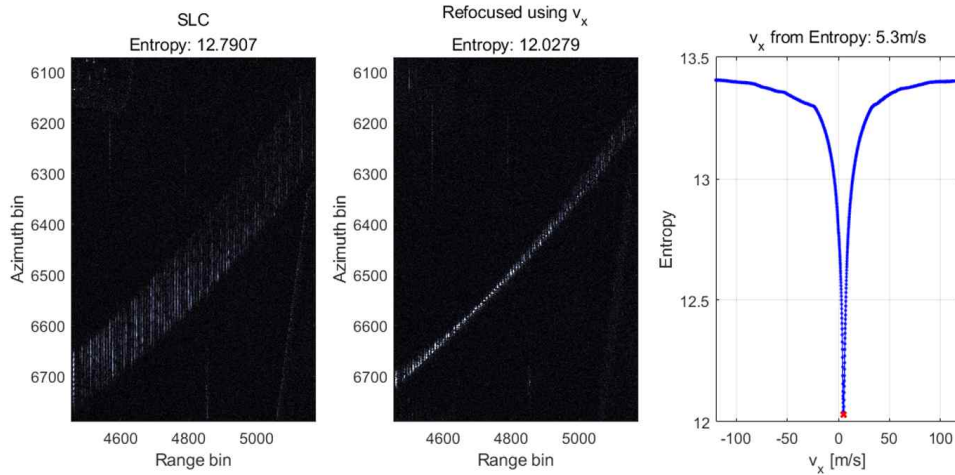


그림 7. ICEYE SAR 영상에서 취득한 기차의 SAR 위상 재초점화 처리 결과
 Fig. 7. A moving train captured from an ICEYE SAR image, accompanied by application of target motion SAR phase refocusing.

볼 수 있다. 이로부터 매우 높은 레이더 플랫폼 속도를 가지는 인공위성뿐만 아니라, 레이더 플랫폼 속도가 낮고 안테나 궤적 오차(SAR antenna motion error)가 큰 항공기 SAR에서도 본 알고리즘을 활용한 이동 표적 속도 추정이 가능하다는 것이 확인되었다. 그림 5부터 그림 8까지 제시된 예시들을 통해 SAR 위상 재초점화 함수는 SAR 탑재체와 이동 표적의 종류를 가리지 않고 적용이 가능한

알고리즘이며, 이를 통해 속도 추정뿐만 아니라 이동 표적상의 선명도를 개선하는 효과를 통해 표적 식별에도 기여할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제시된 SAR 위상왜곡 재초점화 함수는 표적에 대한 도플러 스펙트럼 전체가 포함되어 있으면 적용이 가능하기에, 고해상도 Spotlight SAR 영상을 기준으로 영상 전체, 또는 대상 이동표적이 포함된 부영상 모두에

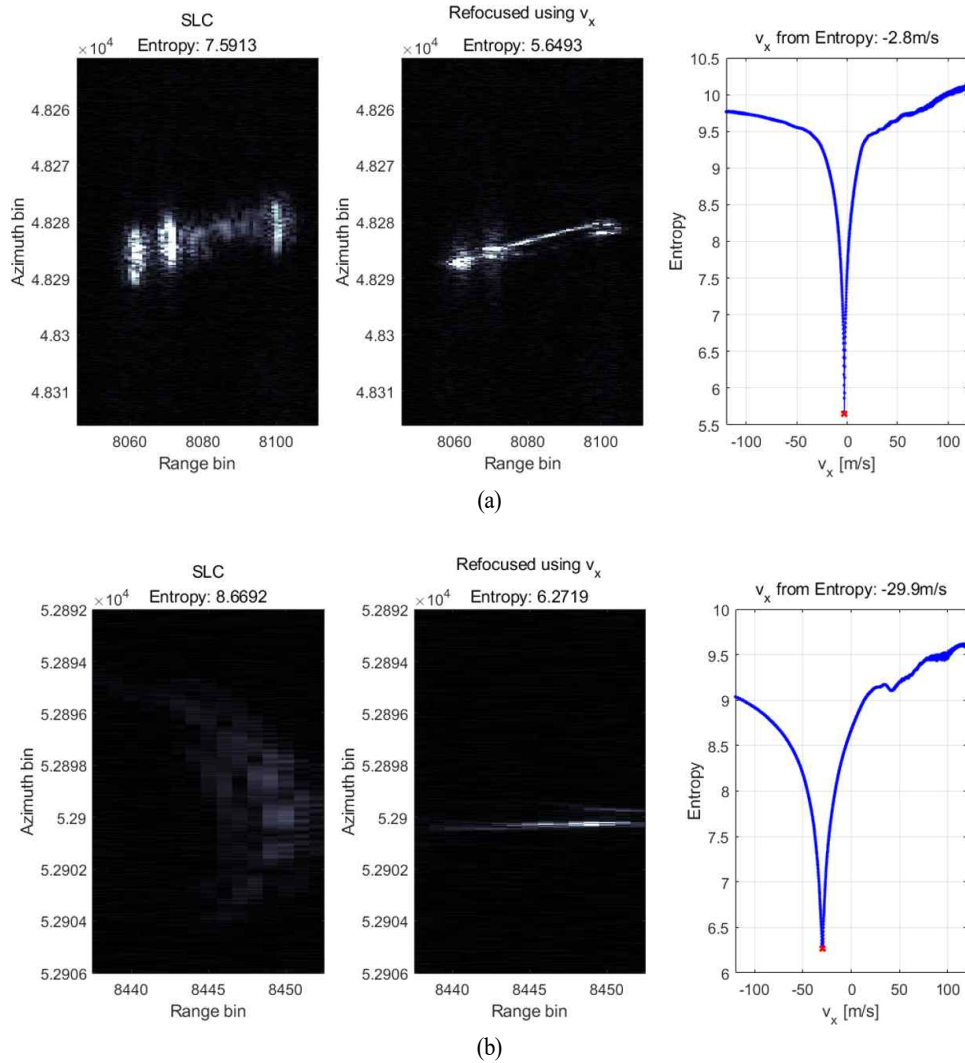


그림 8. UAVSAR 영상에서 취득한 (a) 선박과 (b) 차량의 SAR 위상 재초점화 처리 결과

Fig. 8. (a) A moving vessel and (b) a vehicle captured from an UAVSAR image, accompanied by application of target motion SAR phase refocusing.

대해 활용할 수 있다. 따라서, 본 연구의 항공기와 같이 고속 이동 표적의 속도 추정 시에도 부영상에 대해 적용되기에 소요 시간은 10초 미만으로, 효율적인 처리시간을 가져 전천후 SAR 영상을 실시간으로 활용할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 전천후 SAR를 활용한 이동 표적 속도 추정 알고리즘을 단일 채널 SAR 시스템으로부터 구현하

기 위해 SAR 위상 재초점화 함수를 활용하였고, 이를 AIS 및 ADS-B 센서가 탑재된 선박과 항공기에 대해 적용하여 정확도를 검증하였다. 또한, 3종의 SAR 위성 및 항공기 영상에 대해 이동하는 선박, 차량, 항공기, 기차에 대해 본 알고리즘을 적용하여 SAR 위상 재초점화 알고리즘이 강건하게 적용될 수 있음을 검증하였다. SAR 위상 재초점화 함수는 단순히 다중 이동 표적의 속도 추정뿐만 아니라, 표적의 선명도를 개선하여 식별에 사용할 수 있음을 확인할 수 있다.

References

- [1] R. Scheiber, M. van Kempen, "AIS assisted identification and refocussing of ships in airborne SAR images," in *EUSAR 2018; 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar(EUSAR)*, Aachen, Jun. 2018, pp. 1193-1196.
- [2] M. D. Graziano, A. Renga, "Towards automatic recognition of wakes generated by dark vessels in Sentinel-1 images," *Remote Sensors*, vol. 13, no. 10, p. 1955, May 2021.
- [3] J. Xu, Z. Huang, L. Yan, X. Zhou, F. Zhang, and T. Long, "SAR ground moving target indication based on relative residue of DPCA processing," *Sensors*, vol. 16, no. 10, p. 1676, Oct. 2016.
- [4] S. V. Baumgartner, G. Krieger, "Fast GMTI algorithm for traffic monitoring based on *a priori* knowledge," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 11, pp. 4626-4641, Nov. 2012.
- [5] J. Li, Y. Huang, G. Liao, and J. Xu, "Moving target detection via efficient ATI-GoDec approach for multichannel SAR system," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 13, no. 9, pp. 1320-1324, Sep. 2016.
- [6] D. Kim, W. M. Moon, D. Moller, and D. A. Imel, "Measurements of ocean surface waves and currents using L- and C-band along-track interferometric SAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 12, pp. 2821-2832, Dec. 2003.
- [7] E. Makhoul, S. V. Baumgartner, M. Jäger, and A. Broquetas, "Multichannel SAR-GMTI in maritime scenarios with F-SAR and TerraSAR-X sensors," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, pp. 5052-5067, vol. 8, no. 11, Nov. 2015.
- [8] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms*, Norwood, MA, Artech House, 1995.
- [9] R. Pelich, N. Longépé, G. Mercier, G. Hajduch, and R. Garello, "Vessel refocusing and velocity estimation on SAR imagery using the fractional Fourier transform," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, no. 3, pp. 1670-1684, Mar. 2016.
- [10] J. Song, D. Kim, S. An, and J. Kim, "Restoration of authentic position of unidentified vessels in SAR imagery: A deep learning based approach," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 15, pp. 1064-1078, Dec. 2021.
- [11] J. J. Sharma, C. H. Gierull, and M. J. Collins, "The influence of target acceleration on velocity estimation in dual-channel SAR-GMTI," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 1, pp. 134-147, Jan. 2006.
- [12] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*, Norwood, MA, Artech House, 2005.
- [13] Y. L. Neo, F. H. Wong, and I. G. Cumming, "Processing of azimuth-invariant bistatic SAR data using the range Doppler algorithm," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, no. 1, pp. 14-21, Jan. 2008.
- [14] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and C. V. Jakowatz, "Phase gradient autofocus: A robust tool for high resolution SAR phase correction," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 827-835, Jul. 1994.
- [15] P. Heiselberg, K. Sørensen, and H. Heiselberg, "Ship velocity estimation in SAR images using multitask deep learning," *Remote Sensing of Environment*, vol. 288, p. 113492, Apr. 2023.

송 주 영 [서울대학교/연수연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0083-9490>



2019년 2월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학사)
 2021년 2월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학석사)
 2025년 2월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학박사)
 2025년 1월~2025년 2월: 미국 NASA/JPL

(제트추진연구소) 방문연구원

2025년 3월~현재: 서울대학교 기초과학연구원 연수연구원
 [주 관심분야] 레이더 원격탐사, SAR 신호처리, 선박 모니터링, 이동 물체 속도 추출, SAR 영상활용

이 도 영 [서울대학교/미래혁신연구원]

<https://orcid.org/0009-0009-4780-5387>



2023년 8월: 건국대학교 지리학과 (지리학사)
 2025년 8월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학석사)
 2025년 9월~현재: 서울대학교 미래혁신연구원

[주 관심분야] 레이더 원격탐사, SAR 신호처리, 딥러닝 알고리즘, 이동 표적 탐지

김 덕 진 [서울대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-8147-7641>



1999년 2월: 서울대학교 지구시스템과학과 (이학사)
 2001년 2월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학석사)
 2005년 2월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학박사)
 2001년 9월~2002년 3월: 미국 NASA/JPL

(제트추진연구소) & 캐나다 University of Manitoba 방문연구원

2005년 10월~2006년 1월: 캐나다 University of Manitoba 박사후연구원

2006년 2월~2007년 6월: 미국 University of Michigan 박사후연구원

2007년 7월~2008년 8월: 한국항공우주연구원 선임연구원

2014년 8월~2015년 7월: NASA/JPL(제트추진연구소) 방문연구원

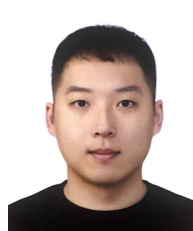
2008년 9월~현재: 서울대학교 지구환경과학부 교수

2020년 5월~현재: 서울대학교 위성활용연구센터 센터장

[주 관심분야] 레이더 원격탐사, SAR 영상활용, 재해재난 모니터링

이 창 민 [서울대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0005-4828-4297>



2022년 2월: 고려대학교 지구환경과학과 (이학사)

2025년 3월~현재: 서울대학교 지구환경과학부 석사과정

[주 관심분야] 레이더 원격탐사, 선박 모니터링, 딥러닝

이 혁 빈 [서울대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0009-0000-9538-0242>



2021년 2월: 충남대학교 항공우주공학과 (공학사)

2021년 9월~현재: 서울대학교 지구환경과학부 석·박사통합과정

[주 관심분야] 77GHz-FMCW RADAR, W-band SAR 영상 신호처리, 카메라 및 레이더 센서 융합, Linear Rail SAR

System