

## 방위 위치오차 자동 추출을 활용한 SAR 영상 기반 선박의 거리방향 속도 측정

### Measurement of the Range Velocity of Vessels in SAR Images Using Automatic Estimation of the Azimuth Offset

송주영 · 김덕진 · 김진우\* · 전영범\* · 김종건\* · 김혁\* · 김휘송 · 이혁빈 · 안상호 · 이정훈 · 김준우

Juyoung Song · Duk-jin Kim · Jin-Woo Kim\* · Yung-Beom Jeon\* · Jong-Gun Kim\* · Hyuk Kim\* ·  
Hwisong Kim · Hyokbeen Lee · Sangho An · Jung-hoon Lee · Junwoo Kim

#### 요약

SAR 영상을 활용한 이동 물체의 속도 측정 기술은 대부분 거리방향으로 이루어졌으며, 이는 물체의 거리 방향속도에 의해 발생하는 방위 위치오차를 측정하여 역산하는 형태로 계측되었다. 해상물체인 선박의 경우, 이동 선박의 항적과 선박 형상 간의 거리를 활용하여 방위 위치오차를 추정하는 것이 가능하다, 항적의 형상이 선박의 속도, 해양기상, 레이다 편파에 크게 의존하기에 정밀한 거리 방향속도 측정이 불가능하였다. 본 연구에서는 방위 위치오차 자동 추출을 통해 이동 선박의 거리 방향속도를 정밀하게 추출할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 레이다 시선방향에 따라 이동 물체의 거리 방향속도가 변화한다는 특징을 활용하여 도플러 서브룩에 따른 선박의 이동을 자동 정량하고, 선박의 이동 방향 정보를 기반으로 방위 위치오차가 존재하지 않는 지점과 SAR 영상 내 선박 위치 사이의 거리를 정밀하게 추정하여 방위 위치오차를 자동 추출한다. 이를 기반으로 변환한 거리 방향속도와 선박의 실제 속도 정보인 AIS 정보와의 비교 결과, ICEYE SAR 영상 기반 평균오차는 0.51 m/s로 나타났다. 본 연구에서 제시한 방법은 이동 물체의 거리 방향속도를 방향 정보만을 통해 자동 측정할 수 있다는 특징이 있다.

#### Abstract

Estimation of the moving target velocity from SAR images is widely focused on range projection, exploiting the azimuth offset caused by the target range velocity. For marine vessels, positional distortion between the vessel signature and the wake enables velocity estimation. However, the wake signature is highly influenced by the vessel velocity, weather conditions, and SAR polarization, thereby preventing accurate velocity estimation. This study proposed an automated estimation of the azimuth offset that enabled the precise measurement of the range velocity. Given that different line-of-sight directions modify the range velocity, the movement of the vessel in each Doppler sublook was estimated. Accordingly, the distance of the vessel in SLC and the position without the azimuth offset were measured and used to accurately estimate the target range velocity; tested against the AIS velocity, 0.51 m/s of average offset was measured from ICEYE SAR images. The algorithm uniquely proposed the automatic estimation of the target range velocity using the target heading angle.

Key words: SAR, Doppler Sublook, Azimuth Offset, Velocity Estimation, AIS

「이 연구는 LIG NEX 1 산학협력과제 및 대한민국 정부(산업통상자원부 및 방위사업청) 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업의 연구비 지원(과제번호 22-CM-16)으로 수행되었음.」

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

\*LIG 넥스원 (LIG NEX 1)

· Manuscript received August 24, 2023 ; Revised September 11, 2023 ; Accepted October 11, 2023. (ID No. 20230824-066)

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

## I. 서 론

SAR 영상을 활용한 이동 물체 탐지 및 속도 추출은 기상 상황과 무관히 모니터링을 필요로 하는 지상 표적 및 선박의 감시에 중요한 역할을 한다<sup>[1]</sup>. 특히, 도플러 신호를 활용하여 영상을 합성하는 SAR 영상의 특성에 의해 이동 물체의 속도는 표적 신호에 도플러 왜곡을 일으키기에, 이를 역산하여 물체의 속도를 추산하기에 적합하다<sup>[2]</sup>. 거리(range) 방향으로 움직이는 표적이 방위(azimuth) 방향으로 움직이는 표적에 비해 군사적인 위협을 일으킬 가능성이 크기에, 대다수의 표적 속도 추출은 이동 물체의 거리 방향속도에 집중하였다<sup>[3]-[7]</sup>. 이동 물체의 거리 방향 속도는 도플러 중심 주파수(Doppler centroid)를 왜곡시켜 물체의 형상이 실제 위치로부터 방위 방향으로 떨어져 나타나게 한다<sup>[5]</sup>. 이 방법을 활용하여 도플러 중심 주파수를 취득할 경우, SAR 영상 내의 이동하는 물체의 거리방향 속도를 추정하는 것이 가능하다<sup>[2]</sup>.

해상 이동 선박은 항적을 남기고, 항적의 산란 특성이 SAR 영상에 나타날 경우 항적의 수렴점과 선박의 형상과의 거리를 측정하는 방법으로 취득할 수 있다<sup>[7]</sup>. 그러나, 선박의 항적은 선박의 이동 속도, 해상풍 및 파고와 같은 기상 조건에 따라 그 형상이 큰 영향을 받으며, HV 또는 VH 편파 조건에서는 관측이 매우 어렵다는 특성이 있다<sup>[8]</sup>. 항적의 형상이 선명히 나타난 SAR 영상에서도 항적의 수렴점이 불분명할 경우 방위 위치오차(azimuth offset)를 정확히 추정하는 것이 어렵고, 그에 따라 거리 방향속도의 측정오차가 커지게 된다<sup>[7]</sup>. 또한, 육상 이동 물체의 경우 SAR 영상 내의 실제 위치가 더욱 불분명하여 방위 위치오차의 육안 판독을 통한 거리 방향 속도 추출은 적용하기 어렵다. 이를 개선하기 위한 방법이 SAR 영상 간섭(interferometry)을 활용한 ATI (along track interferometry)로, 동시간에 취득한 두 개의 SAR 안테나 신호의 간섭 위상으로 속도를 추정하는 방법이다<sup>[4],[9]</sup>. 그러나 이 방법의 경우, 단일 밴드 SAR 영상에는 적용이 불가능하다.

거리 방향은 SAR 안테나의 전자기파의 시선 방향(line-of-sight)으로, 시선 방향이 변화하거나 squint 조건에서는 달리 정의될 수 있다<sup>[10]</sup>. 이 특성을 SAR 간섭기법에 활용하여 도플러 서브룩(Doppler sublook) 간의 간섭을 통

한 다개구 간섭도(multi aperture interferogram)를 생성할 수 있으며, 이를 통하여 대기 위상 지연 효과와<sup>[11]</sup> 광범위한 지역을 촬영한 SAR 영상의 정합(co-registration)에 활용할 수 있다<sup>[12]</sup>. 본 연구에는 도플러 서브룩이 시선 방향과 이동물체의 거리 방향속도를 변화시킬 수 있다는 점에 착안하여 기존에 육안 판독을 이루어졌던 방위 위치오차 추정을 자동화하고, 보다 정밀하게 이동 물체의 거리 방향속도를 측정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 이를 위하여 고해상도 ICEYE spotlight SAR 영상을 활용하여 선박의 형상을 다양한 도플러 서브룩을 통해 복원하고, 선박의 정렬 방향을 기반으로 하여 시선 속도가 존재하지 않는 SAR 안테나의 시선각을 역산하였다. 이후 정밀하게 방위 위치오차량을 추정하고 이를 이동 물체의 거리 방향속도로 변환한 다음, 실제 선박의 위치 및 속도 정보인 AIS(automatic identification system) 자료 기반 속도와 비교하여 그 정확도를 평가하였다.

## II. 연구방법

### 2-1 SAR 도플러 서브룩 영상 생성

SAR 안테나가 지상을 조망하며 영상을 생성할 때, 안테나와 물체 사이의 거리를 나타내는 range equation은 원시영상 및 SLC(single look complex) 영상을 생성하는 데 결정적이다. 방위방향  $x$ , 거리 방향  $y$ 에 대해 이동 물체의 range equation과 이에 상응하는 도플러 주파수는 식 (1) 및 식 (2)와 같다<sup>[1]</sup>. Range equation 및 도플러 주파수의 개념도는 그림 1과 같이 묘사할 수 있다.

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

$$f_D(\eta) \approx -\frac{2v_y y_0}{\lambda R_0} + \frac{2}{\lambda R_0} (v_a - v_x)^2 \eta \quad (2)$$

식 (2)의 상수항은 이동 물체의 거리 방향속도가 방위 위치오차를 유도하여 실제 물체의 위치로부터 방위 방향으로 다른 곳에 형상을 생성한다는 것을 의미한다. 방위 위치오차는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$\delta_x = \frac{v_y y_0}{v_a} \quad (3)$$

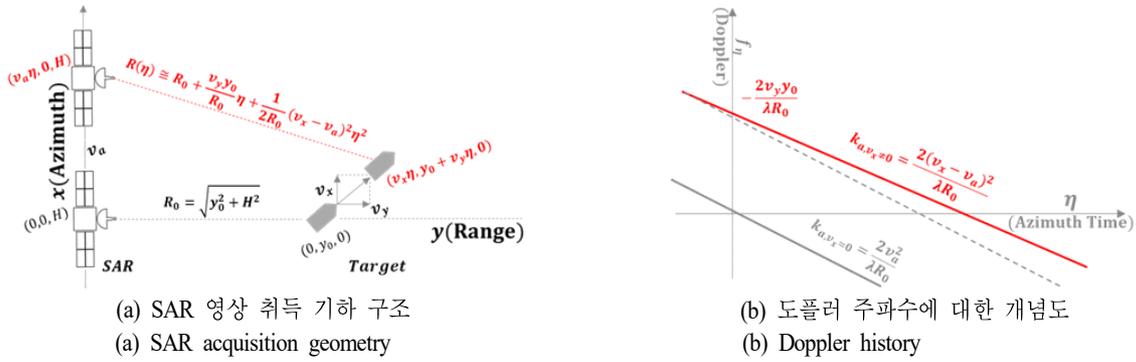


그림 1. SAR 영상 취득 기하구조 및 이에 대한 도플러 주파수 개념도  
Fig. 1. Schematic diagram on SAR acquisition geometry and corresponding Doppler history.

이때, 거리 방향속도인  $v_y$ 는 시선 방향이며, 이는 서브룩에 의한 가상의 squint에 의해 변화하게 된다. 도플러 서브룩 SAR 영상은 방위 주파수(azimuth frequency) 일부 구간만을 사용하여 생성한 영상으로, 방위 주파수가 물체의 상대속도의 방위 방향 정사영을 나타낸다는 것을 감안할 때 인위적으로 squint가 유도된 SAR 영상이라고 해석할 수 있다<sup>[13]</sup>.

일반적인 SAR SLC 영상은 개구 전체를 합성하기에 도플러 중심 주파수가 0이 되지만, 서브룩 영상을 생성할 경우 도플러 중심 주파수가 이동하게 된다. 그림 2는 도플러 서브룩 SLC 영상 생성 과정을 나타낸다. 거리-방위 도메인에 대해 2차원 푸리에 변환(Fourier transform)을 수행하여 거리 주파수-방위 주파수 도메인으로 전환한 뒤, 방위 주파수의 특정 구간에 대해 window를 적용하여 가

중치 1을, 나머지 구간에 대해 0으로 채워진 행렬을 생성한 뒤 주파수 도메인으로 전환한 영상과 곱한다. 이를 다시 양방향 역푸리에 변환(inverse Fourier transform)을 취하여 거리-방위 도메인으로 전환할 경우, 특정 도플러 중심 주파수에 대한 서브룩 영상을 얻을 수 있다. 그러나, 합성개구 길이가 길수록 방위 해상도가 향상되기에<sup>[14]</sup>, 서브룩 영상의 방위 해상도는 SLC 영상 대비 낮아지게 된다. 생성된 서브룩 영상  $S'$ 와 SLC 영상  $S$ 는 식 (4)와 같은 관계식을 가진다.

$$S'(\tau, \eta, f_\tau, f_\eta) = FT^{-1}(g(f_\tau, f_\eta) \cdot FT(S))(\tau, \eta) \quad (4)$$

본 연구에서는 표 1의 제원을 가진 ICEYE spotlight SLC 영상의 방위 방향 길이의 1/10에 해당하는 서브룩을 설정하고, 서로 다른 8개의 도플러 주파수를 설정하여 각

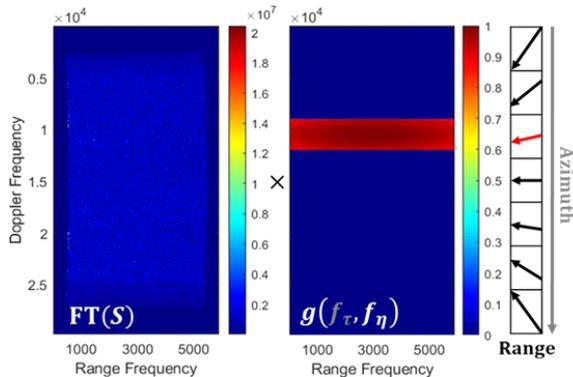


그림 2. 도플러 서브룩 SAR 영상 생성도  
Fig. 2. Illustration of generating Doppler sublook SAR image.

표 1. 거리 방향속도 추출에 사용된 ICEYE spotlight SAR 영상 제원  
Table 1. Specifications of ICEYE spotlight SAR image utilized to range velocity estimation.

Radar parameters	Value	Notation
Carrier frequency [GHz]	9.65	$f_c$
Bandwidth [MHz]	300	BW
Resolution [m]	0.25 (Azimuth) 0.5 (Range)	
PRF [Hz]	6,200 (Acquisition) 38,000 (Processing)	
Polarization	VV	

기 다른 시선 방향을 가진 도플러 서브룩 영상을 생성하였다.

### 2-2 Squint-Doppler-Azimuth Offset 관계식 도출

도플러 서브룩 기법을 활용하여 1장의 SAR 영상으로부터 생성한 8장의 영상에서 이동하는 선박은 서로 다른 시선 방향속도를 가지며, 그에 따라 다른 위치에 방위 위치오차가 나타나게 된다. 본 연구에서는 이러한 특성을 활용하여 방위 위치오차량을 자동으로 파악할 수 있는 알고리즘을 도입하였다. 합성개구의 길이가 동일할 경우 방위 해상도와 물체의 형상이 동일하다는 성질을 활용하여, 중심 주파수는 0이지만 개구의 길이가 전체 방위 개구의 1/10인 영상을 생성한 뒤, SLC 영상에서의 선박의 위치를 기반으로 서브룩에서의 선박의 형상을 추출한다. 추출한 선박의 서브룩 영상은 8장의 다른 도플러 중심 주파수를 가진 서브룩 영상과의 교차상관(cross-correlation)을 통해 선박의 위치를 파악하는데 사용된다.

그림 3과 표 2는 2022년 5월 6일에 취득한 ICEYE SAR 위성 영상 내의 선박에 대한 도플러 서브룩 영상 및 방위, 거리 방향의 이동을 나타낸다. 서브룩에 따른 시선 방향

표 2. 도플러 주파수에 따른 그림 3에 제시된 선박의 방위, 거리 방향 위치 변화

Table 2. Moving vessel position in azimuth and range bin with respect to different Doppler frequency for the vessel described in Fig. 3.

Doppler frequency (processing)	Azimuth bin	Range bin
-13,915 Hz	26,102	5,364
-9,939 Hz	26,128	5,365
-5,912 Hz	26,161	5,365
-1,986 Hz	26,197	5,365
1,990 Hz	26,228	5,365
5,966 Hz	26,262	5,365
9,943 Hz	26,298	5,365
13,919 Hz	26,333	5,364

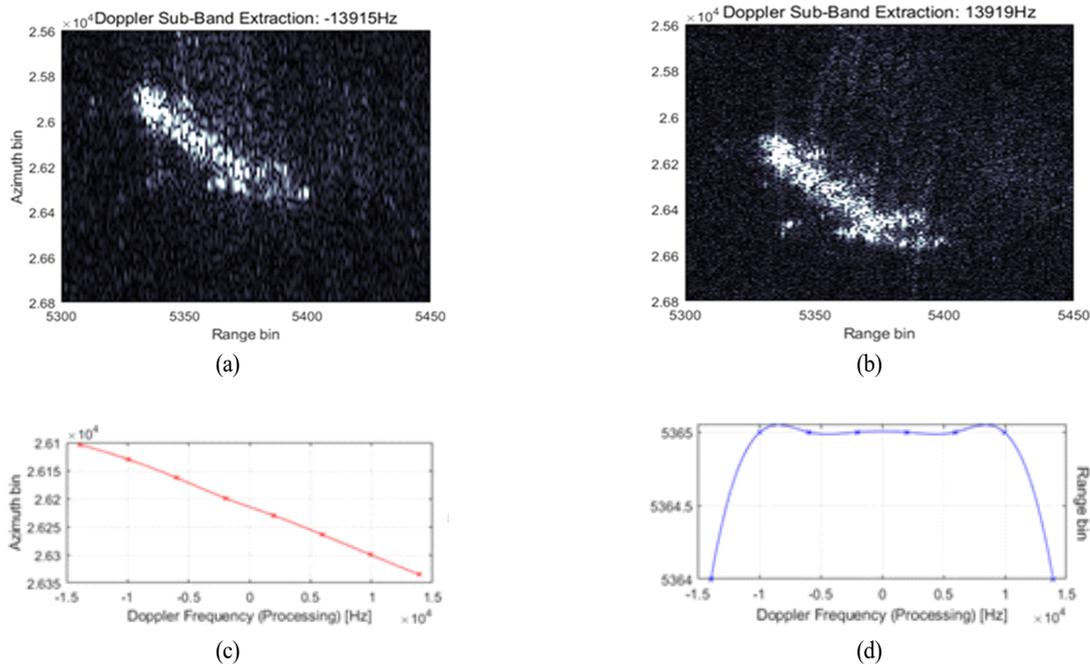


그림 3. 2022년 5월 6일에 취득한 ICEYE spotlight SAR 영상 내 이동 선박에 대한 (a), (b) 서로 다른 도플러 서브룩 영상에 대한 선박의 위치 및 도플러 주파수에 따른 (c) 방위, (d) 거리 방향의 선박 위치 변화

Fig. 3. Moving vessel position in (a), (b) different Doppler subblock SAR images, with different vessel position in (c) azimuth and (d) range bin with respect to Doppler frequency. ICEYE spotlight SAR image was acquired in May 6, 2022.

속도의 변화로 이동 물체의 방위 위치오차는 크게 변화하지만, 거리 방향으로의 위치는 변화가 거의 존재하지 않는다.

Spotlight SAR는 영상의 취득 구간 전후로 긴 구간 동안 인위적인 squint을 취하여 영상을 획득하며, 이는 stripmap이나 scansar 모드 대비 더 긴 합성 개구길이를 통해 해상도를 높이는 데 기여한다. 따라서, 표 1에서와 같이 영상 획득 시 사용한 PRF(pulse repetition frequency)보다 더 높은 PRF를 영상 복원 시 사용하며, 그림 4는 2022년 5월 6일에 취득한 ICEYE SAR 위성의 상태 벡터(state vector)를 나타내며, SAR 영상 취득 시 squint가 없는 zero-Doppler 구간과 있는 구간을 분리하여 나타낸다.

이때, 위성의 상태 벡터로부터 특정 도플러 주파수에 해당하는 위치와 squint 각도를 파악할 수 있기에, 그림 3에서의 도플러 주파수는 모두 일정한 squint 각도와 대응시킬 수 있다. 또한, 특정 도플러 주파수에서는 시선 속도를 변화시켜 다른 방위 위치오차를 일으키므로, squint 각도, 도플러 주파수, 방위 위치오차량 간의 관계식을 이동 물체마다 도출하는 것이 가능하다. SAR spotlight 모드에서도 squint 각도는 2°에 불과하지만, 이 구간으로부터 회귀식을 도출하여 큰 squint 각도에 대해서도 도플러 주파수를 유도할 수 있다. 마찬가지로, 그림 3에서 나타난 방

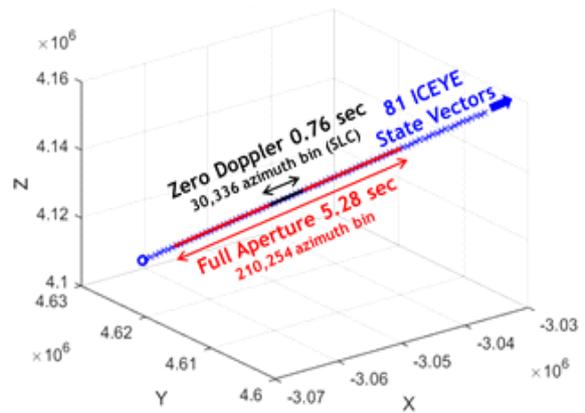


그림 4. 2022년 5월 6일에 취득한 ICEYE spotlight SAR 영상의 전체 개구 구간(빨강) 및 zero-Doppler 구간(검정)의 지심좌표계 상의 위치

Fig. 4. Geocentric position of ICEYE spotlight SAR image acquired in May 6, 2022, where full aperture marked as red and zero-Doppler zone marked as black.

위 오차량과 도플러 주파수간의 관계 역시 더 높은 도플러 주파수로 외삽하는 것이 가능하며, 이를 통해 높은 squint 각도에 대해 Squint-Doppler-Azimuth Offset 관계식을 도출할 수 있다. 그림 5는 그림 3에 나타난 선박에 대한 관계식을 나타낸다.

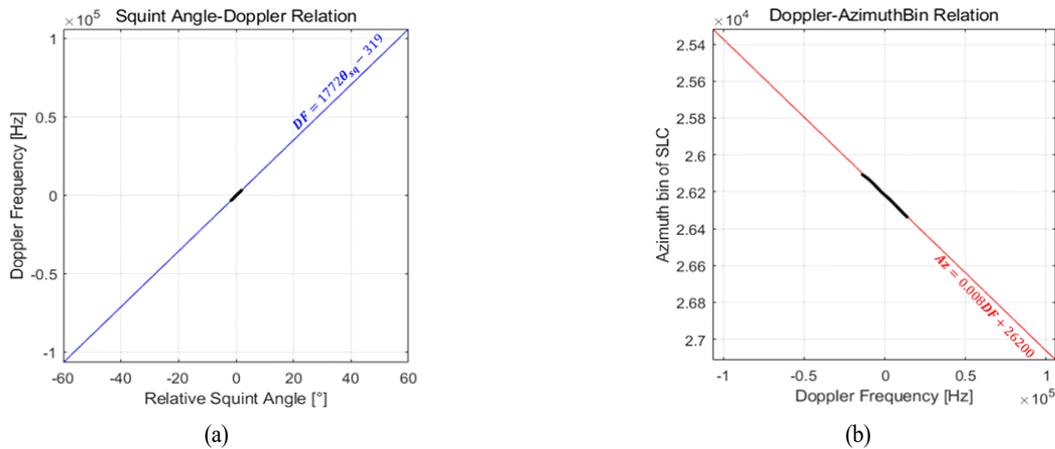


그림 5. 2022년 5월 6일에 취득한 ICEYE spotlight SAR 내 이동 선박으로부터 도출한 (a) squint 각도-도플러 주파수 관계식 및 (b) 도플러 주파수-방위 위치오차 관계식. 실제 SAR SLC 영상으로부터 취득한 구간은 검정색으로 나타내었다.

Fig. 5. Relation of (a) squint angle-Doppler frequency and (b) Doppler frequency-Azimuth Offset derived from the moving vessel from ICEYE spotlight SAR image acquired in May 6, 2022. Black color indicates data acquired from SAR SLC geometry.

### 2.3 방위 위치오차 및 거리 방향속도 추정

그림 5에서 제시한 squint-doppler-azimuth offset 관계식을 기반으로 하여 선박의 방위 위치오차와 그 방위 속도를 도출하기 위해서는 시선 속도가 0이 되는 squint 각도를 파악해야 한다. 시선 속도의 정의에 따라, 선박의 이동 방향과 시선 방향이 직교할 때 방위 위치오차가 발생하지 않으며, 이때의 위치가 선박의 실제 위치가 된다. 본 연구에서는 선박의 형상을 포함하는 가장 작은 직사각형을 도출하고, 그 장축에 해당하는 방향을 선박의 진행 방향으로 판단하였다. 이 방법은 선박의 실제 진행 방향에 따라 180°의 각도 오차를 포함하는데, 항적의 자취를 포함하여 산란이 크게 일어나는 쪽을 선택하게 된다.

선박의 이동 방향을 파악한 뒤, 이와 직교하는 시선 방향을 가지는 squint 각도를 파악한 뒤, 도출한 squint-Doppler-azimuth offset 관계식에 그 각도를 대입하여 방위 위치오차가 발생하지 않은 선박의 위치를 추정할 수 있다. 이 방식으로 방위 위치 오차량을 추산한 뒤, 식 (3)을 활용하여 거리 방향속도를 역산하였다.

### III. 연구 결과

본 연구에서 제시한 도플러 서브룩 영상 기반의 방위 위치오차 추산 및 거리 방향속도 추정 알고리즘을 평가하기 위해 선박 AIS 자료를 SAR 영상 취득 시각에 맞게 일원화하여<sup>[15]</sup> 속도 정보를 추출하였다. 이를 통해, ICEYE spotlight SAR 영상 내의 21척의 선박들에 대하여 속도 추출 정확도를 평가하였다.

그림 6은 선박의 이동 방향인 COG(course-over-ground) 추산 결과를 AIS 정보의 이동각과 비교한 것으로, 평균 방향각 오차는 14.9°로 나타났다. 이는 라돈 변환(Radon transform)을 활용하여 방향각을 구한 기존 연구의 25.1°<sup>[16]</sup> 대비 크게 개선된 결과이다. 그림 7은 방위 위치오차 자동 추정 알고리즘을 활용한 거리 방향속도 추출 결과로, AIS 자료와 비교한 평균 제공된 속도 오차는 0.51 m/s로 나타났다. 그림 6 및 그림 7의 결과를 통해 미루어 볼 때, 본 연구에서 제시한 방위 위치오차 자동 추정은 효과적으로 이동 물체의 속도를 단일 밴드 SAR 영상으로부터 추출할 수 있다고 판단할 수 있다. 이때, 그림 7에서

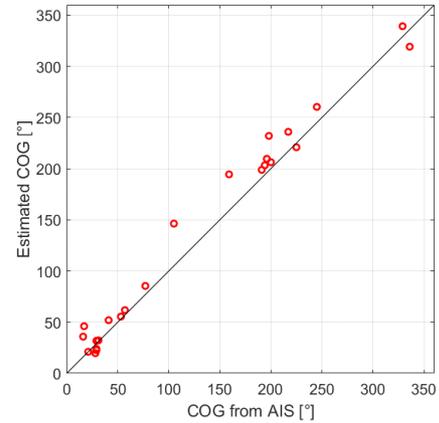


그림 6. ICEYE spotlight SAR 영상 내 선박들에 대한 방향 추정 결과

Fig. 6. Estimation of vessel heading in ICEYE spotlight SAR images.

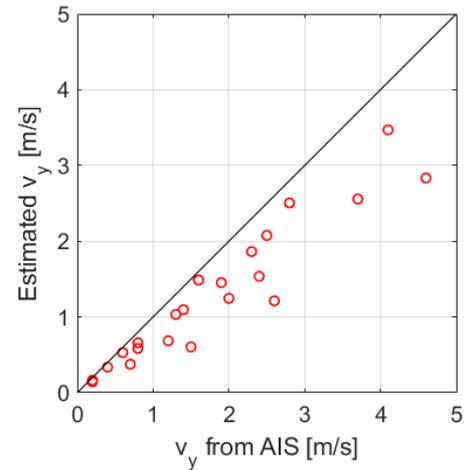


그림 7. ICEYE spotlight SAR 영상 내 선박들에 대한 거리 방향속도 추정 결과

Fig. 7. Estimation of vessel range velocity in ICEYE spotlight SAR images.

나타난 것과 같이, 속도가 빠른 선박에 대하여 거리 방향속도 추정 오차가 커지게 된다. 이는 그림 6에서 나타난 선박의 방향 추정 알고리즘의 오차에 기인한다. 본 연구에서 제시한 속도 추정 알고리즘은 방위 위치오차를 거리 방향속도로 변환하는 과정에 거치기에 선박의 속도가 빠를수록 방향 추정 오차가 크게 반영되게 된다.

일반적인 방위 위치오차량 추정은 식 (3)을 활용하지

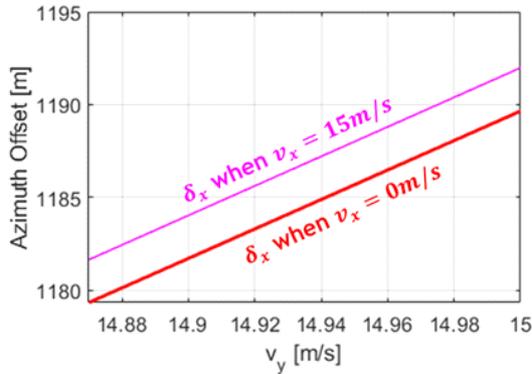


그림 8. 높은 방위 방향속도에 따른 SAR 영상 내 이동 물체의 거리 속도 추정 오차

Fig. 8. Estimation error of target range velocity using SAR image under rapid target azimuth velocity condition.

만, 안테나의 속도는 상대속도이기에 유의미한 이동 물체의 방위 방향 속도가 존재할 경우 식 (3)은 식 (5)와 같은 식으로 다시 나타낼 수 있다.

$$\delta_x = \frac{v_y y_0}{v_a - v_x} \quad (5)$$

즉, 유의미한 방위 방향속도가 존재할 경우 방위 위치 오차에서 거리 방향속도를 추정 시 큰 오차가 발생할 수 있으므로, 표 1과 같은 조건을 가지는 SAR 영상 촬영조건을 모의하여 식 (3)과 식 (5)를 활용하여 거리 방향속도 추출을 재현하였다. 그림 8은 매우 빠른 방위 방향속도인 15 m/s를 가지는 선박과 거리 방향으로만 움직이는 선박에 대하여 방위 위치오차를 모의한 결과로, 큰 거리 방향속도 조건에서도 속도 추출 결과는 큰 차이를 보이지 않았다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 도플러 서브룩 SAR 영상을 기반으로 방위 위치오차를 자동으로 추정하여 이동 물체인 선박의 거리 방향속도를 측정하는 알고리즘을 제안하였다. 이를 위해 합성 개구와 도플러 주파수의 일부분만을 사용한 서브룩 SAR 영상을 생성하여 선박의 시선 속도의 변화를 자동으로 감지하였고, 이를 통해 squint-Doppler-azimuth offset 관계식을 도출하여 방위 위치오차와 거리 방향속도

를 역산하였다. 본 연구에서 도출한 거리 방향속도와 선박의 AIS 자료 기반 속도를 비교한 결과, 그 오차는 0.51 m/s로 나타났다. 본 연구에서 제시한 알고리즘은 물체의 이동각에 대한 정보만으로 거리 방향속도를 정밀하게 역산할 수 있어, 지상 이동 물체의 속도를 SAR 영상으로 추정할 때 활용도가 높을 것으로 기대한다.

#### References

- [1] J. Sharma, C. Gierull, and M. 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, 2006.
- [2] K. Kang, D. Kim, S. Kim, and W. Moon, "Doppler velocity characteristics during tropical cyclones observed using ScanSAR raw data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, no. 4, pp. 2343-2355, 2016.
- [3] P. Heiselberg, K. Sorensen, and H. Heiselberg, "Ship velocity estimation in SAR images using multitask deep learning," *Remote Sensing of Environment*, vol. 288, p. 113492, 2023.
- [4] D. Kim, W. Moon, D. Moller, and D. 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, 2003.
- [5] Y. Wang, J. Chen, W. Liu, C. Li, and W. Yang, "A moving target velocity estimation method based on the MC-MASA SAR mode," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 9, p. 1632, 2021.
- [6] M. Graziano, M. D'Errico, and G. Rufino, "Wake component detection in X-Band SAR images for ship heading and velocity estimation," *Remote Sensing*, vol. 8, no. 6, p. 498, 2016.
- [7] K. Kang, D. Kim, "Ship velocity estimation from ship wakes detected using convolutional neural networks," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 12, no. 11, pp. 4379-4388, 2019.
- [8] G. Zilman, A. Zapolski, and M. Marom, "The speed and

beam of a ship from its wake's SAR images," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 10, pp. 2335-2343, 2004.

[9] T. Yoshida, K. Ouchi, and C. Yang, "Application of MA-ATI SAR for estimating the direction of moving water surface currents in Pi-SAR2 images," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 14, pp. 2724-2730, 2021.

[10] P. Mastro, C. Serio, G. Masiello, and A. Pepe, "The Multiple aperture SAR interferometry (MAI) technique for the detection of large ground displacement dynamics: An overview," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 7, p. 1189, 2020.

[11] W. Mao, X. Wang, G. Liu, R. Zhang, Y. Shi, and S. Pirasteh, "Estimation and compensation of ionospheric phase delay for multi-aperture InSAR: An azimuth split-spectrum interferometry approach," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, p. 5209414, 2020.

[12] K. Wang, X. Xu, and Y. Fialko, "Improving burst align-

송 주 영 [서울대학교/박사과정]

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



2019년 2월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학사)  
 2021년 2월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학석사)  
 2021년 3월~현재: 서울대학교 지구환경과학부 박사과정  
 [주 관심분야] 마이크로파 원격 탐사, 선박

모니터링, 레이더 신호처리, SAR 영상 기하보정, 이동 물체 속도 추출, SAR 영상 재초점화

ment in TOPS interferometry with bivariate enhanced spectral diversity," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 14, no. 12, pp. 2423-2427, 2017.

[13] Z. Zhang, W. Xu, P. Huang, W. Tan, Z. Gao, and Y. Qi, "Azimuth full-aperture processing of spaceborne squint SAR data with block varying PRF," *Sensors*, vol. 22, no. 23, p. 9328, 2022.

[14] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Kreiger, I. Hajnsek, and K. Papathanassiou, "A tutorial on synthetic aperture radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 6-43, 2013.

[15] J. Song, D. Kim, and K. Kang, "Automated procurement of training data for machine learning algorithm on ship detection using AIS information," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 9, p. 1443, 2020.

[16] J. Song, D. Kim, S. An, and J. Kim, "Restoration of authentic position of unidentified vessels in SAR imagery," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 15, pp. 1064-1078, 2022.

김 덕 진 [서울대학교/교수]

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



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

(제트추진연구소) & 캐나다 University of Manitoba 방문 연구원

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

김진우 [LIG NEX1 위성체계연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3776-6697>



2008년 8월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학석사)  
2014년 2월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학박사)  
2014년 4월~2014년 8월: UNIST 도시환경공학부 박사후연구원  
2014년 9월~2018년 12월: LIG NEX1 위성체계연구소 선임연구원

2019년 1월~현재: LIG NEX1 위성체계연구소 수석연구원  
[주 관심분야] 위성/항공 SAR 원격탐사, SAR 체계공학, SAR 신호처리

김혁 [㈜LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0007-7565-9298>



2010년 3월: 한국항공대학교 항공전자 및 제어시스템 (공학사)  
2014년 3월: 한국항공대학교 항공전자 및 제어시스템 (공학석사)  
2022년 4월~현재: (주)LIG넥스원 선임연구원  
[주 관심분야] SAR 체계공학

전영범 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0221-3221>



2010년 2월: 한서대학교 항공전자공학과 (공학사)  
2013년 8월: 항공대학교 항공전자공학과 공학석사  
2013년 7월~현재: LIG넥스원 선임연구원  
[주 관심분야] SAR 체계공학

김희송 [서울대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-5296-4707>



2021년 8월: 고려대학교 지리교육 (문학사), 지구환경과학과 (이학사)  
2023년 8월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학석사)  
2023년 9월~현재: 서울대학교 지구환경과학부 박사과정  
[주 관심분야] 마이크로파 원격 탐사, 홍수 모니터링, SAR 객체 탐지, 딥러닝

김종건 [LIG NEX1 위성체계연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-4783-8873>



2014년 2월: 한국항공대학교 정보통신공학 (공학사)  
2014년 1월~현재: LIG NEX1 위성체계연구소 선임연구원  
[주 관심분야] SAR 체계공학, SAR 제어 SW

이혁빈 [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

안 상 호 [서울대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-1975-0576>



2020년 8월: 부산대학교 대기환경과학과 (이학사)

2020년 9월~현재: 서울대학교 지구환경과학부 석·박사통합과정

[주 관심분야] 마이크로파 원격 탐사, 레이다 신호처리, SAR 간섭 기법, SAR 요동 보상, SAR 시뮬레이션, SAR 지상 이동 표적 탐지/식별

동 표적 탐지/식별

김 준 우 [서울대학교/연구교수]

<https://orcid.org/0000-0002-3784-1060>



2011년 8월: 영남대학교 건축공학부 (공학사)

2014년 2월: 경북대학교 지리학과 (지리학 석사)

2019년 3월: University of Leeds School of Geography (이학박사)

2019년 9월~현재: 서울대학교 미래혁신

연구원 연구교수

[주 관심분야] 원격 탐사, GIS, 인공지능

이 정 훈 [서울대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0009-0000-1412-3245>



2020년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)

2022년 2월: 아주대학교 AI융합네트워크학과 (공학석사)

2022년 3월~현재: 서울대학교 지구환경과학부 박사과정

[주 관심분야] 딥러닝, 고해상도 SAR 영상 생성, 데이터셋 구축

상 생성, 데이터셋 구축