

이중대역 레이다를 이용한 해상 저고도 고속 표적 탐지 성능 향상 연구

A Study on Improving the Performance of Low-Altitude, High-Speed Target Detection at Sea Using Dual-Band Radar

라기준 · 이건 · 강기봉* · 김민** · 김시호*** · 김경태

Ki-Jun Rah · Geon Lee · Ki-Bong Kang* · Min Kim** · Si-Ho Kim*** · Kyung-Tae Kim

요 약

해면 밀착 비행을 하는 저고도 고속 표적은 일반적으로 단일 대역의 MTI(moving target indicator) 기법을 통해 탐지되고 있다. MTI 기법은 해상 클러터 도플러 스펙트럼을 필터 차단하고, 이동 표적을 검출해 내는 방법이다. 그러나 해면 밀착 비행을 하는 저고도 고속 표적 탐지 시, 표적의 빠른 기동 특성으로 blind speed 문제가 발생할 수 있으며, 바다의 영향으로 다중경로(multipath) 현상 및 오탐지가 발생하여 탐지가 어렵다. 본 논문에서는 이중 대역 레이다를 사용하여 해상 상황에서 고속의 표적에 적합한 탐지기를 제안한다. 해상 상황을 고려하여 저고도 고속 표적에 대해 모델링을 수행하였으며, 각 대역 수신 신호 평균 도플러 전력에 제안된 기법을 적용하여 blind speed와 다중경로 현상에 강인한 탐지가 가능함을 확인하였다. 최종적으로 표적의 다양한 속도와 거리에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과, 제안한 기법이 해상 상황에서 기존 단일대역 기법보다 향상된 표적 탐지 성능을 보임을 확인하였다.

Abstract

Low-altitude and high-speed targets that fly close to the sea level are generally detected using a single-band moving target indicator (MTI) technique. The MTI technique detects a moving target by filtering out the sea-clutter Doppler spectrum. However, when detecting a low-altitude, high-speed target flying close to the sea, blind speed problems can occur because of the fast maneuvering characteristics of the target. Moreover, multipath phenomena and false alarm may occur due to the influence of the sea. Such problems make detection difficult. In this paper, we propose a detector suitable for high-speed targets in sea conditions using dual-band radar. Low-altitude and high-speed targets were modeled by considering the maritime situation, and robust detection against blind speed and multipath phenomena was confirmed by applying the proposed technique to the average Doppler power of the received signal in each band. Finally, simulations for various speeds and distances of the target confirmed that the proposed method showed improved target detection performance than the existing single-band method when detecting low-altitude, high-speed targets in sea conditions.

Key words: Dual-Band Radar, Target Detection, Multipath, Blind Speed, Sea Clutter

†이 연구는 2022년도 국방과학연구소가 지원하는 연구비의 지원으로 연구되었음(UD210015YD).」

포항공과대학교 전자전기공학부(Department of Electronic Engineering, Pohang University of Science and Technology)

*삼성전자 환경안전연구소(Department of Environment and Safety Research Institute, Samsung Electronics)

**한국해양대학교 전자전기정보공학부(Department of Electrical and Electrical Information Engineering, Korea Maritime & Ocean University)

***국방과학연구소(Radar & EW Technology Center, Agency for Defence Development)

· Manuscript received December 07, 2022 ; Revised December 14, 2022 ; Accepted January 5, 2023. (ID No. 20221207-103)

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

I. 서 론

해상 상황에서 함정의 레이다는 적 전투기, 군함 등의 각종 위협 표적을 탐지하기 위해 사용되고 있다. 특히, 해면 밀착 비행을 하는 저고도 고속 표적은 함정의 안전을 위해 필수적으로 탐지해야 하는 표적이다^[1]. 고속의 저고도 표적을 탐지하는 상황에서는 함정의 생존율을 높이기 위해 탐지에 소요되는 시간을 최대한 줄이는 것이 중요하며, 대표적인 짧은 탐지 시간에서의 단일 대역 펄스 도플러 레이다를 이용한 탐지 기법에는 MTI(moving target indicator) 기법이 있다^[2].

MTI 기법은 거리 방향으로 샘플링된 수신 신호에 도플러 축 방향으로 FFT(fast Fourier transform)를 수행하여 거리-도플러(range-Doppler) 맵을 만들어내고, 해당 거리-도플러 맵에 대해 해상 클러스터의 도플러 스펙트럼을 대역 차단 필터(band-pass filter)로 차단하여 남아있는 표적을 탐지하는 기법이다. 하지만 해면 밀착 고속 표적을 대상으로 단일대역에서 MTI 기법을 수행할 경우, 표적 신호의 다중경로(multipath), blind speed, 그리고 해상 클러스터에 의해 표적 탐지 성능이 저하될 수 있다^{[3][4]}. 다중경로 현상으로 인해 레이다가 직접경로 신호와 다중경로 신호가 합쳐진 신호를 수신하게 되고, 이는 파장에 비례한 수신 신호 전력 요동을 유발한다. 또한 단일 PRF를 사용하는 레이다에서 표적이 최대 탐지 속도보다 높은 속도를 가질 때 aliasing 현상이 발생하여 표적의 추정 속도와 해상 클러스터의 추정 속도가 같아지게 되고, 대역 차단 필터를 적용함에 따라 표적의 수신 전력이 필터 차단되는 blind speed 문제가 발생할 수 있다. 다중경로 현상과 blind speed로 인해 표적의 수신 전력이 낮은 상황에서는 표적의 탐지 성능에 악영향을 줄 수 있다. 또한, 해상 클러스터에서 필터를 적용하였을 때 완전히 차단되지 않고 남아있는 성분들은 오탐지를 유발하게 된다.

본 논문에서는 단일 대역 탐지에서 발생하는 위와 같은 문제들에 대해 분석하고, 해당 문제들에 대해 X-대역(8~12 GHz), S-대역(2~4 GHz)의 이중대역 레이다를 사용하여 각 대역의 파장 차이를 통해 해결하는 표적 탐지 기법을 제안한다. 해상 클러스터 모델링과 수치해석을 통한 해상 표적 신호를 결합한 후, 다중경로, blind speed 현상

이 발생할 때 제안한 기법과 기존 단일대역 탐지 기법의 성능을 시뮬레이션을 통해 비교하여 제안한 기법의 우수함을 보인다.

II. 해상 클러스터 환경에서의 단일대역 탐지

2-1 해상 클러스터 모델링

해상 클러스터 모델은 K 분포를 따르며, 확률 분포 함수는 다음과 같다^[5].

$$f_x(x) = \frac{2b\sqrt{\pi}}{\Gamma(v)} \left(\frac{b}{2}\sqrt{\pi}x\right)^v K_{v-1}(\sqrt{\pi}bx) \quad (1)$$

$f_x(x)$ 는 K 분포를 의미하며, b 는 K 분포의 크기(scale) 매개변수이고, v 는 K 분포의 모양(shape) 매개변수이다. $\Gamma()$ 는 감마(gamma) 함수, $K_\alpha()$ 는 차수가 α 인 베셀(Bessel) 함수를 의미한다. K 분포는 파도의 높이 및 주기 특성을 나타내는 텍스처(texture) 성분과 클러스터의 한 해상도 셀 내에 존재하는 여러 산란점들의 벡터 합으로 나타나는 스펙클(speckle) 성분으로 구성된다. 텍스처 성분의 루트 감마(root-gamma) 분포 $f_y(y)$ 와 스펙클 성분의 레일리(Rayleigh) 분포는 다음과 같다^[5].

$$f_y(y) = \sqrt{g(y)}, g(y) = \frac{2b^{2v}}{\Gamma(v)} y^{2v-1} \exp(-b^2 y^2) \quad (2)$$

$$f(x|y) = \frac{\pi x}{2y^2} \exp\left(-\frac{\pi x^2}{4y^2}\right) \quad (3)$$

이중 대역 해상 클러스터 모델링을 수행할 때, 대역별 후방산란계수, 해상 스파이크, 해상 클러스터의 도플러 분포 등을 고려해야 한다. 해상 클러스터의 후방 산란 계수는 TSC(technology service corporation) 모델을 기반으로 모델링 하였으며^[6], TSC 모델에서 후방 산란 계수는 파장에 비례한 값을 가진다. 스펙클의 분포는 중심 주파수에 따라 각 대역에서 다른 분포를 보이지만, 높은 파도 및 쇄파(breaking wave)로 인해 발생하고, 이산적인 특성을 갖는 해상 스파이크(sea-spike)는 각 대역에서 같은 레인지 빈에 위치하게 된다^{[7][8]}. 해상 스파이크의 발생 확률은 포아송 분포를 따른다^[9].

마지막으로 파도의 속도를 고려한 도플러 분포에 대한

모델링을 수행한다. 해상 클러터 도플러 분포 $\Psi(f)$ 는 다음과 같다^[10].

$$\Psi(f) = \frac{1}{w\sqrt{\pi}} \exp\left(-\left(\frac{f-f_{doppler}}{w}\right)^2\right),$$

$$f_{doppler} = \frac{2v_{wave}}{\lambda}, w = \frac{0.48v_{wind}}{\lambda} \quad (4)$$

$f_{doppler}$ 는 파도 속도에 의한 도플러 주파수를 의미하며, v_{wave} 는 파도의 속도, λ 는 파장을 의미한다. w 는 평균 도플러 대역폭(bandwidth)을 의미하고, v_{wind} 는 바람의 속도를 의미한다. 일반적으로 해상 상태(sea-state) 3에서의 파도의 속도 분포는 3~5 m/s로 알려져 있으며^[11], 이를 반영한 해상 클러터 크기 모델은 그림 1, 거리-속도 모델은 그림 2와 같이 나타난다.

그림 1(a) 및 그림 1(b)에서 대역별 크기 분포는 스펙클 외에 큰 차이를 보이지 않는 것을 볼 수 있으며, 그림 2(a) 및 그림 2(b)의 대역별 거리-속도 모델에서는 각 대역의 특성에 따라 최대 탐지 속도 및 속도 해상도 차이가 존재함을 볼 수 있다.

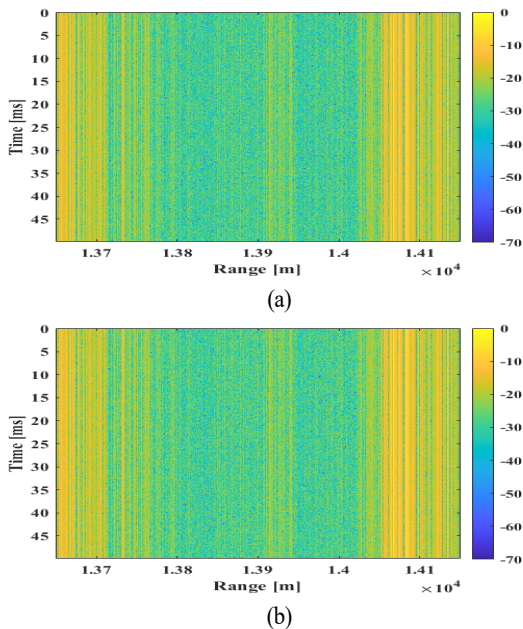


그림. 1 (a) X- 및 (b) S-대역 해상 클러터 크기 모델
Fig. 1. Sea-clutter amplitude model for (a) X- and (b) S-band.

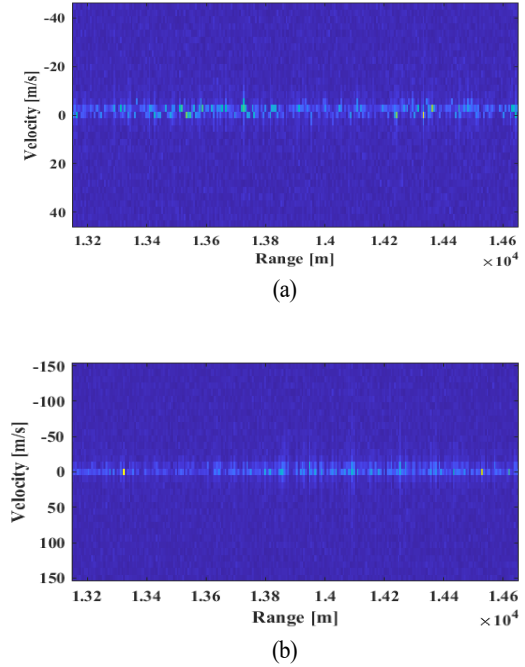


그림. 2 (a) X- 및 (b) S-대역 해상 클러터 거리-속도 모델
Fig. 2. Sea-clutter range-velocity model for (a) X- and (b) S-band.

2-2 단일대역 표적 탐지

단일대역 탐지는 일반적으로 수신 신호에 대해 거리 방향의 펄스 압축(pulse compression)을 거치고 수신 펄스를 거리 방향으로 샘플링한 후, 도플러 축 방향으로 FFT (fast Fourier transform)를 수행하여 거리-도플러(range-Doppler) 맵을 만들어낸다. 해당 거리-도플러 맵에 대해 해상 클러터의 도플러 스펙트럼을 필터링하는 MTI 기법을 사용할 수 있다. 이때 필터 차단 주파수는 표적의 스펙트럼이 차단되는 것을 방지하기 위해, 실제 바람의 속도와 주파수의 특성을 고려하여 식 (4)의 평균 도플러 대역폭을 기반으로 설정한다. 필터링 후의 스펙트럼에 대해 각 레인지 빈별로 평균 도플러 전력을 계산하면 상대적으로 강한 표적의 스펙트럼이 남아 있게 된다. 따라서 평균 도플러 전력에 대해서 CA-CFAR(cell averaging constant false alarm rate) 탐지기를 적용하면 표적의 탐지를 기대할 수 있다.

하지만 해상 클러터 및 저고도 고속 표적의 특성으로 인해 탐지 성능이 급감하는 문제가 발생한다. 해당 문제점은 표적의 고속 특성으로 인한 blind speed 문제, 밀착 비행으로 인한 다중경로 문제, 해상 클러터의 특성으로 인한 오탐지 문제의 3가지 문제로 분류할 수 있다.

2-2-1 고속 특성으로 인한 Blind Speed 문제

레이다의 최대 탐지 속도 V_{unamb} 와 최대 탐지 거리 R_{max} 는 식 (5) 및 식 (6)과 같이 정의된다.

$$V_{unamb} = \frac{PRF \cdot \lambda}{4} \quad (5)$$

$$R_{max} = \frac{c}{2 \cdot PRF} \quad (6)$$

위의 식에서 최대 탐지 속도는 PRF(pulse repetition frequency)와 파장 λ 에 비례하는데, 단일 PRF를 사용하는 상황에서 고속의 표적을 탐지하기 위해 높은 PRF를 사용하면 최대 탐지 속도가 늘어나지만, PRF에 반비례하는 최대 탐지 거리가 줄어든다. 해면 밀착 비행을 하는 고속 표적은 일반적으로 먼 거리에서 비행하여 다가오기 때문에 최대 탐지 거리를 일정 수준으로 확보해야 하는 제한 조건이 있다. 하지만, 최대 탐지 거리를 높이기 위해 낮은 PRF를 사용하게 되면 최대 탐지 속도가 줄어들어 표적의 정확한 속도를 추정하는 데에 문제가 발생한다.

예를 들어 25 km 거리의 표적을 탐지하기 위해서는 6,000의 PRF값이 필요하다. 이때 X-대역의 최대 탐지 속도는 45 m/s, S-대역의 최대 탐지 속도는 150 m/s가 된다. 저고도 고속 표적의 속도는 270 m/s~300 m/s를 가정하기 때문에 두 대역에서 모두 aliasing 현상이 발생할 수 있다. 표적의 속도가 최대 탐지 속도를 넘어서면 표적 도플러 주파수와 샘플링 주파수의 차이가 거리-도플러 맵에 나타나게 되며 음의 주파수 형태로 나타나게 되기 때문에, 표적의 속도가 최대 탐지 속도를 넘어서면 속도를 추정하는 것은 불가능하지만 표적의 탐지는 가능하다^[3]. 하지만, 표적의 도플러 스펙트럼이 클러터의 도플러 스펙트럼과 중복되어 대역 저지 필터를 거쳤을 때 표적과 클러터의 스펙트럼이 동시에 차단될 수 있다. 이때의 속도를 blind speed로 정의하고, 이 값은 각 대역에서 최대 탐지

속도의 2배가 된다. 표적 속도가 blind speed인 상황에서 표적의 도플러 스펙트럼이 필터에 의해 제거되면 평균 도플러 스펙트럼에서 표적의 전력이 낮아지고, 결국 탐지 성능이 크게 감소한다.

2-2-2 밀착 비행으로 인한 다중경로 문제

저고도 고속 표적의 해면 밀착 비행은 레이더 송신 신호가 해면과 표적에 여러 번 반사되는 다중경로 현상을 유발하게 되며 다중경로에 대한 모델링을 그림 3에 나타내었다.

멀리 있는 표적 B에 대해서 직접경로 AB와 다중경로 AMB=A'MB의 위상차가 발생하게 되고, 위상차는 식 (7)을 통해 표현된다^[2].

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R \approx \frac{4\pi h_r h_t}{\lambda R} \quad (7)$$

ΔR 은 경로 간 거리 차이를 의미하며, h_t 는 표적의 높이, h_r 은 레이더 높이, R 은 레이더와 표적의 수평거리를 의미한다. 해당 위상 차이로 인한 영향을 알아보기 위해 간접경로 신호와 직접경로 신호의 관계를 식 (8)과 같이 정의한다.

$$E_i = \Gamma E_d \quad (8)$$

E_d 는 직접 경로 신호를 의미하고, E_i 는 간접 경로 신호, Γ 는 반사 계수(reflection coefficient)를 의미한다. 다중경로 신호와 자유공간에서의 신호의 비를 전파 계수 F_p 로 정의하며, 그 식은 식 (9)와 같다.

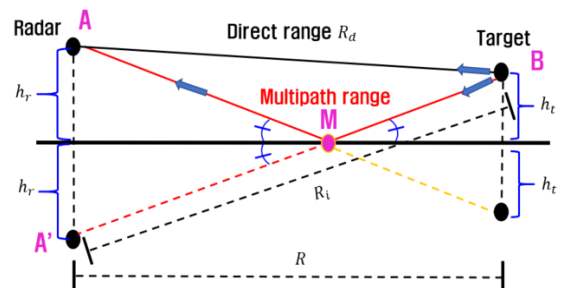


그림 3. 다중경로 모델링
Fig. 3. The multipath modeling.

$$F_p = \left| \frac{E_d}{E_d + E_i} \right| = |1 + \Gamma e^{j\Delta\phi}| \quad (9)$$

전파 계수에 직접경로와 다중경로의 차이로 인한 위상 차이가 영향을 주는 것을 알 수 있으며, 표적에서의 신호는 전파계수의 제곱에 비례하고, 표적에서 반사되어 레이더로 수신되는 신호는 전파계수의 네제곱에 비례하게 된다. 요동이 적고 지표각이 작은 바다 경계면을 가정하였을 때 수신 신호의 전력비는 식 (10)과 같다.

$$F_p^4 = 16 \sin^4 \left(\frac{2\pi h_r h_t}{\lambda R} \right) \quad (10)$$

다중경로로 발생한 위상 차이로 인해 파장에 반비례하는 \sin 항이 추가된 것을 볼 수 있다. 이에 따라 레이더 수신 신호는 식 (11)과 같이 표현된다.

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \cdot 16 \sin^4 \left(\frac{2\pi h_r h_t}{\lambda R} \right) \quad (11)$$

G 는 안테나 이득을 의미하며, σ 는 레이더 단면적을 의미한다. 레이더 수신 신호에 곱해진 \sin 항에는 레이더의 높이, 표적의 높이, 파장, 표적과의 거리가 영향을 주게 된다. 그림 4에서는 레이더의 높이를 고정한 상태에서 S-대역에서 수신 전력의 요동을 도시하였다. 그림 4(a)에서 높이에 따라 수신 전력이 요동하는 것을 보이고, 그림 4(b)에서는 표적의 거리에 따라 수신 전력의 요동을 보였다. 이와 같이, 다중경로 현상으로 수신 전력의 요동이 생기면 특정 거리에서 표적의 전력이 급감하게 되고, 해상 클러터로 인한 수신 전력이 더 강해지게 되어 표적을 탐지할 수 없게 되기 때문에 탐지 성능에 악영향을 준다.

2-2-3 해상 클러터의 특성으로 인한 오탐지 문제

해상 클러터에는 무작위로 발생하는 스펙클, 강하고 이산적인 특징을 갖는 스파이크 성분이 존재한다^[12]. 스펙클은 여러 산란점의 벡터 합으로 나타나기 때문에 표적에 비해 매우 약한 전력을 갖거나 상대적으로 강한 전력을 가질 수 있으며, 스파이크 성분 또한 높은 파도 및 쇄파로 발생하는 성분이므로 표적보다 강한 전력을 가질 수 있다. 해상 클러터 도플러 스펙트럼에 필터를 적용하

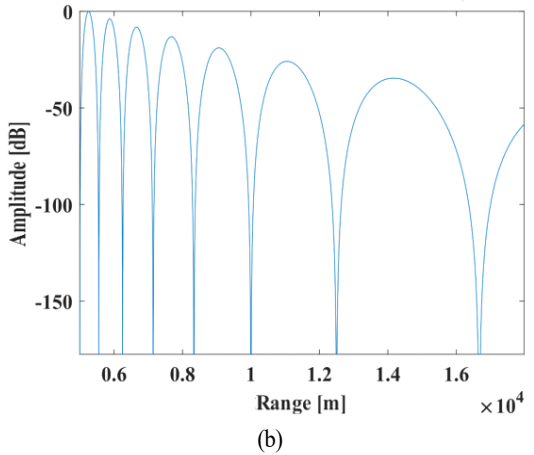
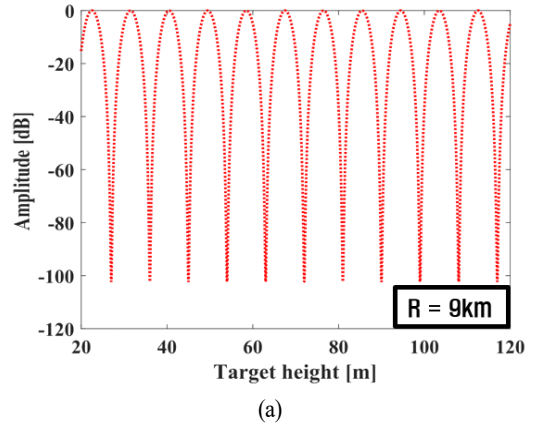


그림 4. (a) 표적 높이 및 (b) 표적 거리에 따른 S-대역 전력 변화

Fig. 4. S-band target received power change with (a) target height and (b) target distance.

더라도 필터의 차단 범위를 벗어난 스펙트럼을 가진 스펙클, 스파이크 성분이 존재할 수 있으며, 이는 탐지 성능을 떨어트릴 수 있다.

III. 이중대역 탐지 기법

앞서 살펴본 단일대역 탐지에서의 문제점들에 대해 해결하기 위해 본 논문에서는 X-대역, S-대역의 이중대역 레이더를 이용한 탐지기법을 제안한다. 제안하는 기법은 1) 이중대역 평균 도플러 전력의 곱과 2) 해상 클러터로 인한 오탐지 제거로 구성된다.

3-1 이중대역 평균 도플러 전력의 곱

각 대역 레이다에서 단일대역 탐지기법을 적용하면 필터를 거친 거리-도플러 맵의 레인지 빈별 평균 도플러 전력을 얻을 수 있다. Blind speed와 다중경로 현상에서 표적 전력의 감소가 각 대역 주파수의 파장에 영향을 받기 때문에 표적의 특정 위치에서 두 대역 간 전력 감소치는 동일하지 않다. 따라서 해당 평균 도플러 전력을 서로 곱해서 표적 전력의 감소를 보완한다. 각각의 특성에 대한 분석은 다음과 같다.

3-1-1 고속 특성으로 인한 Blind Speed 문제

최대 탐지 속도는 식 (5)에서 살펴본 바와 같이 각 대역의 파장에 비례한다. Blind speed는 최대 탐지 속도의 두 배로 정의하였고, 해당하는 blind speed V_{blind} 는 식 (12)과 같다.

$$V_{blind} = \frac{PRF \cdot \lambda}{2} \quad (12)$$

X-대역의 파장 λ_x 는 약 3 cm이고, S-대역의 파장 λ_s 는 약 10 cm이며, 두 파장의 비율과 blind speed의 비율은 고정된 PRF 값을 사용하는 상황에서 식 (12)에 의해 동일하다. 따라서, PRF 값이 6,000일 때의 각 대역의 첫 blind speed는 각각 90 m/s, 300 m/s이며, 표적의 속도가 특정 대역의 첫 blind speed보다 높다면, aliasing 현상이 다시 발생할 수 있고, 이는 blind speed 또한 배수로 반복되는 특성이 있음을 의미한다. 각 대역 blind speed의 중복은 식 (12)와 같은 식으로 계산한다.

$$k \cdot \frac{PRF \cdot \lambda_x}{2} = n \cdot \frac{PRF \cdot \lambda_s}{2} \quad (13)$$

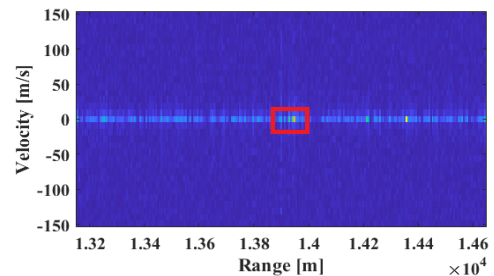
k, n 은 자연수 상수이며, 위의 식을 통해 blind speed가 중복되게 하는 상수 k, n 은 $k = 10, n = 3$ 임을 알 수 있다. 이에 따라 각 대역의 blind speed가 중복되는 속도는 900 m/s가 된다. 저고도 고속 표적의 속도는 일반적으로 270~300 m/s이기 때문에 특정 대역에서는 blind speed 현상이 발생하더라도 다른 대역에서 blind speed 현상이 발생하지 않는 특성이 있다.

그림 5는 PRF가 6,000인 각 대역 레이다에서 300 m/s의 속도를 갖는 표적을 포함한 신호를 수신하여 만든 거리-도플러 맵을 나타낸다. 그림 5(a)에서 S-대역 레이다의 blind speed인 300 m/s와 표적의 속도가 일치하여 해상 클러스터의 도플러 스펙트럼과 표적의 스펙트럼이 중복된 것을 볼 수 있고, 이에 따라 그림 5(b)에서 표적의 도플러 스펙트럼이 필터 차단되는 현상을 보인다. 하지만 그림 6(a)의 X-대역 거리-도플러 맵에서는 표적과 해상 클러스터의 도플러 스펙트럼이 중복되지 않는 것을 볼 수 있고, 그림 6(b)에서 필터를 거치더라도 표적의 스펙트럼이 차단되지 않는 것을 볼 수 있다.

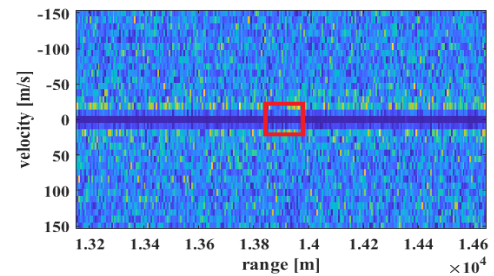
이와 같은 특성으로 각 대역 레이다의 평균 도플러 전력을 서로 곱하면 표적의 전력이 한 대역에서 감소하더라도 상호 보완할 수 있다.

3-1-2 밀착 비행으로 인한 다중경로 문제.

식 (10)으로부터 전파 계수는 표적과의 거리 R , 레이다



(a)



(b)

그림 5. (a) 필터링 전 및 (b) 필터링 후의 S-대역 거리-도플러 맵

Fig. 5. S-band range-Doppler map (a) before and (b) after filtering.

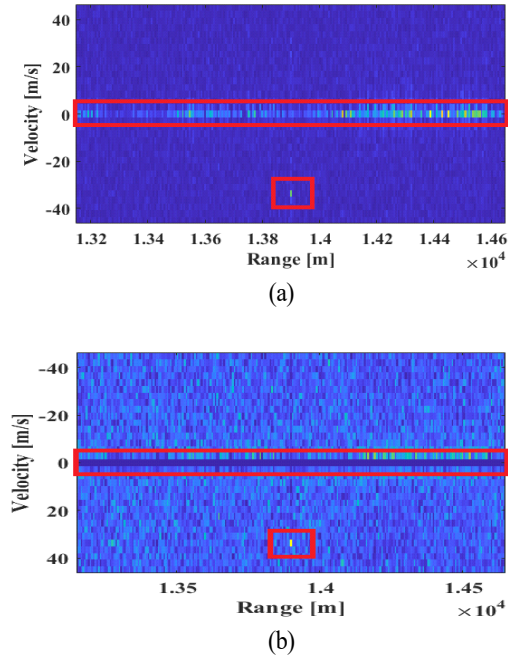


그림 6. (a) 필터링 전 및 (b) 필터링 후의 X-대역 거리-도플러 맵

Fig. 6 X-band range-Doppler map (a) before and (b) after filtering.

의 높이 h_r , 표적의 높이 h_t 그리고 레이다의 파장에 영향을 받을 수 있고, 각 대역 레이다가 동일한 위치에서 표적을 동시에 탐지하는 상황에서는 레이다의 파장만이 전파 계수에 영향을 주기 때문에 두 대역에서의 전력 감소 현상은 표적과의 거리가 일정할 때 중복되지 않는다. 각 대역에서 표적에 곱해지는 \sin 항의 값이 0이 되는 위치 R_s, R_x 는 식 (14)와 같다.

$$R_s = \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda_s n_1}, R_x = \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda_x n_2} \quad (14)$$

n_1, n_2 는 양의 정수를 의미한다. 레이다의 높이와 표적의 높이가 고정되었다고 가정하였을 때, 각 대역에서 거리에 따른 표적의 수신 전력의 변화를 그림 7에 도시하였다.

각 대역에서 수신 전력은 식 (11)에 따라 0~16배까지 변화할 수 있으며, 파장의 차이 때문에 S-대역의 수신 전력 변화가 X-대역보다 상대적으로 거리 변화에 대한 영향이 적은 것을 알 수 있다. 또한, X-대역에서 전력이 급감하는 거리에서 S-대역의 수신 전력은 크게 감소하지 않

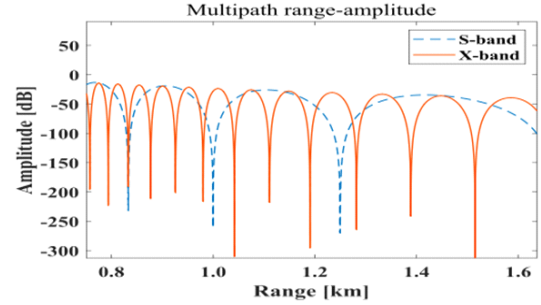


그림 7. 각 대역의 거리별 수신 전력 변화

Fig. 7. Variation of received power by range in each band.

고 작은 변화를 가진다는 것을 확인할 수 있고, X-대역에서 수신 전력이 유지되는 거리일 때, S-대역의 수신 전력은 급감하는 것을 볼 수 있다. 하지만 약 840 m 거리에서 두 대역의 전력 감소가 중복되는 것을 볼 수 있는데, 이는 표적의 속도가 빠르기 때문에 짧은 시간의 일시적인 현상이며, 이를 제외한 대부분의 거리 영역에서는 전력 보완 특성을 기대할 수 있다. 이와 같은 특성에 따라 한 대역에서 수신 전력이 급감하여 표적의 탐지가 불가능한 상황에서 다른 대역에서는 표적의 전력이 유지되기 때문에 각 대역 수신 전력의 곱으로 각 대역의 수신 전력 요동을 보완하여 표적 전력 감소에 강인한 탐지기를 설계할 수 있다.

앞서 살펴본 두 전력 감소 현상은 모두 동시에 발생할 수 있으며, 표적을 탐지하기 전에는 blind speed 현상을 분석하기 위해 필요한 표적의 속도 정보와 다중경로 현상의 분석에 필요한 표적의 높이, 거리 정보를 알 수 없기 때문에 표적의 정보를 통해 표적 전력의 감소를 예측할 수 없다. 뿐만 아니라, 해면 밀착 비행을 하는 표적의 특성상 해상 클러터로 인하여 SCR(signal to clutter ratio)이 낮아 표적 전력이 클러터에 비해 상대적으로 낮을 수 있다. 따라서, 두 대역의 평균 도플러 전력을 곱하여 표적의 전력 감소에 강인한 탐지기를 구성할 수 있다. 해당 방법으로 높은 SCR을 얻음과 동시에 각 대역에서 무작위로 발생하는 노이즈 및 스펙클 성분 중 전력이 약한 성분은 서로 곱해져서 상쇄되는 효과를 얻을 수 있고, 이를 그림 8을 통해 보인다. 그림 8(a) 및 그림 8(b)에서 S-대역, X-대역 각각 평균 도플러 전력에 대해 CA-CFAR 탐지기를 적

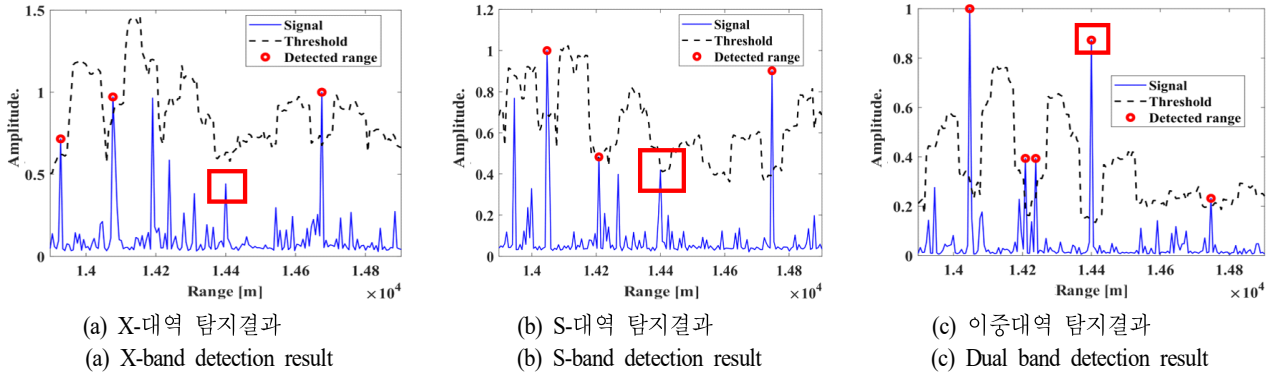


그림 8. CA-CFAR 탐지 결과

Fig. 8. CA-CFAR detection result.

용하고, 그림 8(c)에서는 평균 도플러 전력을 서로 곱하여 탐지기를 적용하였다. 해당 탐지기의 문턱값은 식 (15)와 같이 표현된다.

$$T = \beta P_n$$

$$P_n = \frac{1}{N_r} \sum_{n=1}^{N_r} x_n$$

$$\beta = N_r \left(\left(-\frac{1}{N_r} \right) - 1 \right) \quad (15)$$

T 는 문턱값(threshold)을 의미하며, N_r 은 훈련(training) 셀 개수, x_n 은 훈련 셀 샘플 그리고 P_{fa} 는 지정 오탐지율을 의미한다. 지정 오탐지율이 10^{-3} 일 때, 각 대역에서 표적이 탐지가 되지 않는 상황에서 이중대역 탐지 결과에서는 표적을 탐지해 내는 것을 볼 수 있다. 위와 같이 평균 도플러 전력을 곱하여 표적의 탐지율을 높일 수 있지만, 같은 레인지 bin에서 발생하는 스파이크 성분과 스펙클 성분 중 강한 전력을 갖는 성분이 서로 곱해지게 되어 표적과 동일하게 강한 전력을 얻게 되고, 이에 따라 오탐지율 또한 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 해상 클러터로 인한 오탐지 제거 기법이 추가로 적용되어야 한다.

3-2 해상 클러터로 인한 오탐지 제거

필터로 완전히 차단되지 않는 해상 클러터의 스펙클, 스파이크 성분으로 인한 오탐지는 각 대역의 추정 속도를 비교하여 해결할 수 있다. 표적이 정면에서 다가오고 있음을 가정할 때 수신 신호에 대한 속도 추정은 식 (16)을 통해 수행할 수 있다.

$$v_c = \frac{f_{Doppler} \cdot \lambda}{2} \quad (16)$$

v_c 는 추정 속도이며, $f_{Doppler}$ 는 도플러 주파수를 의미한다. 해상 클러터의 속도 분포는 3~5 m/s를 가지며, 이에 따라 각 대역에서의 추정 속도 또한 3~5 m/s의 분포를 가진다. 따라서 그림 8(c)의 표적을 제외한 오탐지 레인지 bin에 속도를 추정하면 동일한 속도로 추정된다. 표적의 경우 270~300 m/s의 고속 표적을 가정할 때, 해당 속도는 두 대역에서 모두 aliasing 현상이 발생할 수 있는 속도이다. 식 (5)에서 살펴본 바와 같이 S-대역 보다 파장이 짧은 X-대역이 더 작은 최대 탐지 속도를 가지므로, 본 논문에서 가정하는 PRF가 6,000인 상황에서의 X-대역 최대 탐지 속도는 45 m/s이고, S-대역의 최대 탐지 속도는 150 m/s이다. 따라서 각 대역에서 aliasing 현상이 발생하게 되므로 300 m/s의 속도를 갖는 표적의 추정 속도는 X-대역에서는 30 m/s, S-대역에서는 0 m/s가 된다. 그림 9에서 표적의 속도가 증가함에 따라 각 대역의 추정 속도를 도시하였다. 0~45m/s 이상의 표적 속도에 대해 각 대역의 추정 속도가 서로 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 45 m/s보다 빠른 고속 표적은 각 대역에서 추정 속도가 다르기 때문에 각 대역에서 추정 속도가 다른 레인지 bin은 표적일 가능성이 존재하므로 탐지 결과에서 유지한다. 하지만, 각 대역 추정속도가 같은 레인지 bin은 저속의 해상 클러터로 인한 오탐지로 간주할 수 있다. 따라서 해당 레인지 bin은 탐지 결과에서 제외시켜 오탐지를 제거한다.

제안한 기법의 1) 이중대역 평균 도플러 전력의 곱과

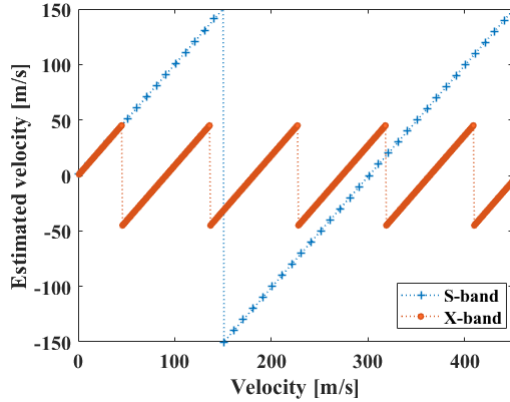


그림 9. 각 대역의 추정 속도

Fig. 9. Estimated speed in each frequency band.

2) 해상 클러터로 인한 오탐지 제거 두 방법을 모두 적용하면, 각 대역에서 표적 전력 감소 현상에도 강인하게 되고, 해상 클러터로 인한 오탐지를 제거할 수 있어 오탐지율 대비 높은 탐지율을 기대할 수 있다.

IV. 실험 결과

본 논문에서는 X-대역, S-대역에서의 단일대역 탐지 기법과 제안한 이중대역 탐지 기법에 대해 다중경로로 인해 각 대역에서 표적의 전력이 손실되었을 때와 blind speed로 인해 표적의 전력이 필터 차단되었을 경우에 대해 탐지 성능을 비교, 분석하고자 한다.

시뮬레이션의 매개변수는 표 1에 정의 하였고, 그림 10은 탐지 시뮬레이션 모델링을 나타낸다. 시뮬레이션을 수행하기 위해 다음 상황을 가정했다. 먼저, 고속의 위협 표적을 가정하여 짧은 시간 동안 탐지하고, 한 번의 scan 동안 range migration이 발생하지 않는다. 그리고, 함선 상의 두 레이더를 동시 운용하고 같은 지역을 동시에 탐지한다. 마지막으로 함선의 속도는 보상되었음을 가정하였다. 표적은 해면에서 50 m상에 위치하고, 5~20 km 범위에서 다가오고 있는 표적에 대해 각 100 m당 200번의 시뮬레이션을 통해 실험을 진행하였다.

실험 결과에 대해 ROC(receiver operating characteristic) 커브를 통해 결과를 확인한다. ROC 커브의 인자는 탐지율과 오경보율을 기반으로 구성되며, 각 인자는 식 (17)과 같이 계산된다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Table 1. Simulation paremeters.

Paremeter	Value
Center frequency	10 GHz, 3 GHz
Bandwidth	10 MHz
PRF	6,000
Radar height	50 m
SCR	-30 dB
Sea state	3
Target height	50 m
Target speed	245, 270, 300 m/s
Target range	5~20 km

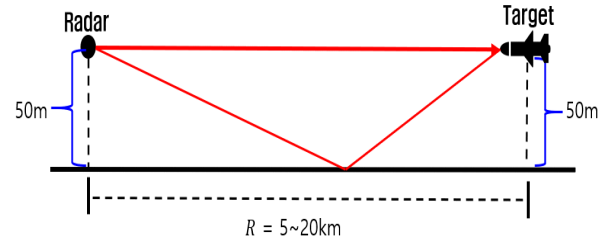


그림 10. 시뮬레이션 모델링

Fig. 10. The simulation modeling.

$$P_D = \frac{N_{dt}}{N_{oper}}, P_{FA} = \frac{N_{dc}}{N_c} \quad (17)$$

P_D 는 탐지율, P_{FA} 는 오경보율을 의미한다. N_{oper} 는 전체시뮬레이션 횟수를 의미하며, N_{dt} 는 표적이 탐지된 시뮬레이션 횟수를 의미한다. N_c 는 전체 해상클러터 레인지 빈 개수를 의미하고, N_{dc} 는 탐지된 해상 클러터 레인지 빈 개수를 의미한다.

그림 11은 각 대역에서 다중경로 현상으로 전력이 급감하는 상황에서의 ROC 커브이다. 각 대역의 ROC 커브를 표시하였고, 융합 탐지 기법의 ROC 커브는 fusion으로 표시하여 도시하였다. 그림 11(a)에서는 표적의 거리가 X-대역에서 다중경로 현상으로 표적 전력 감소가 발생하는 거리인 13.9 km일 때 저하된 탐지 성능을 보여준다. 융합 탐지 기법의 경우, 상대적으로 높은 전력을 얻고 해상 클러터로 인한 오탐지 제거가 적용되어 각 대역의 탐지 성능보다 우수한 성능을 보인다. 그림 11(b)에서는 S-대역

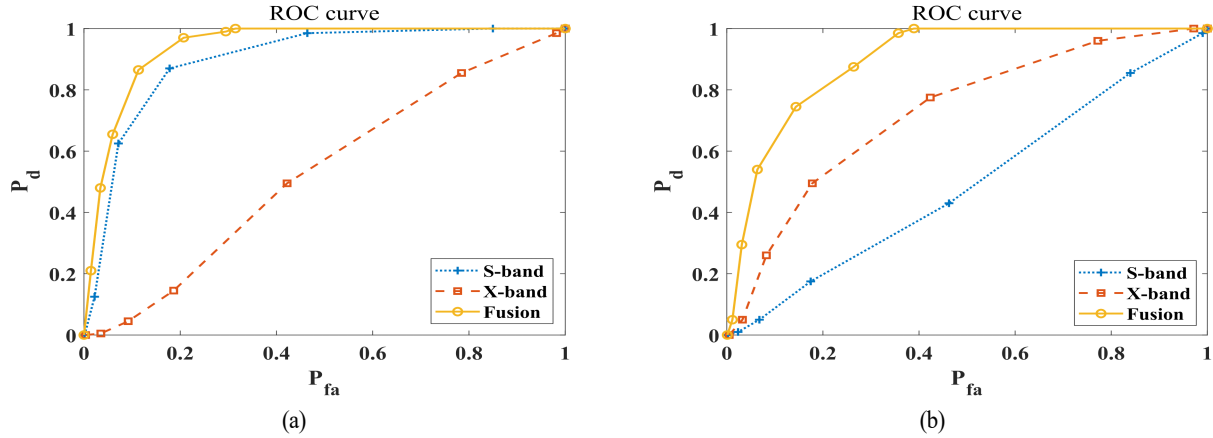


그림 11. (a) X- 및 (b) S-대역에서 다중경로 전력 감소 현상이 발생했을 때의 ROC 커브
Fig. 11. ROC curve when the multipath power reduction phenomena occurs in (a) X- and (b) S-band.

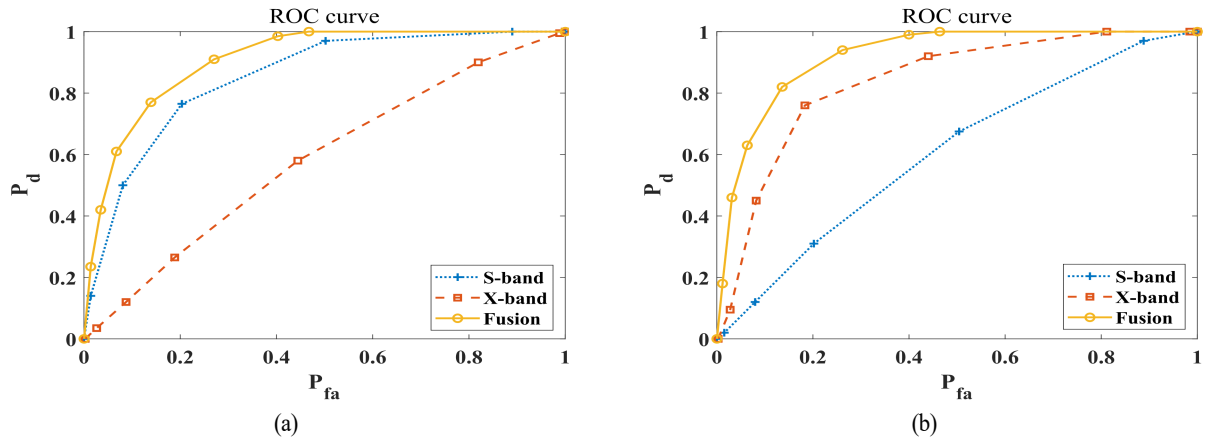


그림 12. (a) X- 및 (b) S-대역에서 표적이 blind speed 속도일 때 ROC 커브
Fig. 12. ROC curve when target speed is blind speed in (a) X- and (b) S- band.

의 표적 전력이 0이 될 수 있는 10 km 거리의 표적에 대한 탐지 성능을 도식하였다. S-대역 표적 전력이 낮아 표적이 아닌 해상 클러터의 수신 전력에 대해 탐지기가 적용되기 때문에 탐지기의 성능과 상관없이 오탐지율과 탐지율이 유사한 것을 볼 수 있다. 하지만 융합 탐지 기법은 각 대역의 탐지 성능보다 더 나은 성능을 보이는데, 이는 X-대역의 표적 전력과 S-대역의 클러터 성분 전력이 서로 곱해져 표적의 전력이 낮아질 수 있지만 각 대역에서 표적의 추정 속도가 다르기 때문에 오탐지 제거 기법을 적용할 수 있기 때문이다.

그림 12는 각 대역의 blind speed에서 탐지 성능을 비교

하였다. 그림 12(a)에서는 표의 속도가 X-대역 blind speed인 270 m/s여서 표적 전력이 필터 차단될 때의 ROC 커브이다. X-대역의 성능이 저하되는 것을 볼 수 있으며, 이는 표적의 전력이 X-대역에서 필터 차단되기 때문이다. 하지만, 융합 탐지 기법을 적용하면 높은 전력을 얻을 수 있고, 오탐지를 제거할 수 있기 때문에 X-대역뿐만 아니라, S-대역 탐지 성능보다 융합 탐지 성능이 더 나은 성능을 보여준다. 반대로 그림 12(b)는 표적의 속도가 300 m/s로 S-대역의 blind speed와 일치할 때의 ROC 커브이고, 마찬가지로 S-대역의 탐지 성능 저하가 발생하지만 융합 탐지 성능이 더 우수한 성능을 보여주고 있다. 한편, 그림 12(b)

의 S-대역 탐지 성능은 그림 11(b)의 S-대역 탐지 성능보다 나은 성능을 보인다. 이는 blind speed 현상에서는 표적의 도플러 스펙트럼이 완전히 필터로 차단되지 않는 상황이 발생할 수 있어 표적이 탐지되는 경우가 있기 때문이다. 결과적으로는 이중대역 탐지 기법이 각 대역의 성능보다 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 해면 밀착 비행을 하는 저고도 고속 표적에 대해 단일 대역 탐지 기법을 이용한 탐지의 문제점에 대해 분석하고 이를 해결하기 위해 X-대역, S-대역의 이중대역 레이더를 사용하여 문제점을 보완할 수 있음을 보였다. Aliasing 현상을 이용하여 표적과 해상 클러터를 구분하는 기법을 제안하였고, 해상 상황에서 blind speed, 다중경로 현상이 발생하였을 때 각각의 대역의 탐지 성능보다 제안한 융합 기법이 우수함을 ROC 커브를 통해 보였다. 추후 연구로는 고속 표적뿐만 아니라 저속 표적에 대한 추가적인 탐지 성능 향상 연구가 필요하다.

References

- [1] L. O. Upton, L. A. Thurman, "Radars for the detection and tracking of cruise missiles," *Lincoln Laboratory Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 355-366, 2000.
- [2] M. I. Skolnik, *Introduction to RADAR Systems*, New York, NY, McGraw-Hill, 2001.
- [3] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, New York, NY, McGraw-Hill, 2014.
- [4] M. Greco, P. Stinco, and F. Gini, "Identification and analysis of sea radar clutter spikes," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 4, no. 2, pp. 239-250, Apr. 2010.
- [5] M. J. Lee, J. Kim, S. M. Lee, H. M. Jeon, W. Y. Yang,

- and K. T. Kim, "Detection of low-RCS targets in sea-clutter using multi-function radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 6, pp. 507-517, Jun. 2019.
- [6] A. Irina, "Simulation of sea clutter returns," Salisbury, Australia, Defence Science and Technology Group, DSTO-TR-0679, Jun. 1998.
- [7] A. Irina, "Analysis of sea clutter data," Salisbury, Australia, Defence Science and Technology Group, DSTO-TR-0647, Mar. 1998.
- [8] V. Corretja, J. Petitjean, J. M. Quellec, S. Kemkemian, H. Thuilliez, and S. Watts, "Sea-spike analysis in high range and Doppler resolution radar data," in *2014 International Radar Conference*, Lille, Oct. 2014, pp. 1-6.
- [9] S. N. Shi, X. Liang, P. L. Shui, J. K. Zhang, and S. Zhang, "Low-velocity small target detection with Doppler-guided retrospective filter in high-resolution radar at fast scan mode," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 57, no. 11, pp. 8937-8953, Nov. 2019.
- [10] A. M. Raynal, A. W. Doerry, "Doppler characteristics of sea clutter," Livermore, CA, Sandia National Laboratories, SAND2010-3828, Jun. 2010.
- [11] H. W. Melief, H. Greidanus, P. van Genderen, and P. Hoogeboom, "Analysis of sea spikes in radar sea clutter data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 4, pp. 985-993, Apr. 2006.
- [12] K. Ward, R. Tough, and S. Watts, *Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance*, London, Institution of Engineering and Technology, 2013.

라 기 준 [포항공과대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-0915-8050>



2017년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)
2018년 7월~2020년 12월: LG CNS
2021년 2월~현재: 포항공과대학교 전자
전기공학과 석사과정
[주 관심분야] 레이더 신호처리

김 민 [한국해양대학교/연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7520-3513>



2015년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학
사)
2017년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학
석사)
2017년 3월~2018년 7월: 포항공과대학교
전자전기공학과 연구원
2022년 2월: 포항공과대학교 전자전기공
학과 (공학박사)
2022년 3월~현재: 한국해양대학교 전자전기정보공학부 연구
원
[주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 신호처리, 표적 탐지
및 추적

이 진 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-6607-5177>



2019년 8월: 경북대학교 전자공학부 (공학
사)
2019년 9월~2021년 8월: 포항공과대학교
전자전기공학과 (공학석사)
2021년 9월~현재: 포항공과대학교 전자
전기공학과 박사과정
[주 관심분야] 레이더 신호처리

김 시 호 [국방과학연구소/연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7632-822X>



1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학
사)
2001년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학
석사)
2006년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학
박사)
2011년 1월~현재: 국방과학연구소 연구
원
[주 관심분야] 레이더 통제/처리, 레이더 표적 인식

강 기 봉 [삼성전자/연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2846-3616>



2015년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학
사)
2017년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학
석사)
2017년 2월~2018년 8월: 포항공과대학교
전자전기공학과 연구원
2022년 2월: 포항공과대학교 전자전기공

학과 (공학박사)

2022년 3월~현재: 삼성전자 환경안전연구소 연구원
[주 관심분야] 레이더 표적식별, 레이더 신호처리, 미세도플러
분석

김 경 태 [포항공과대학교/교수]

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



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공
학과 (공학사)
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공
학과 (공학석사)
1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공
학과 (공학박사)
2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전
자공학과 교수
2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
2012년 9월~2017년 12월: 레이더/IR 표적식별 특화연구실 실
장
2018년 1월~현재: 무인감시정찰기술연구센터장
[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및
패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정