

해면 저고도 및 고기동 표적의 추적 정확도 향상을 위한 이중대역 다기능 레이더 시스템 활용

Dual Band Multi-Functional Radar System to Improve Tracking Accuracy for Sea Skimming and High-Maneuvering Targets

박 한 · 김 정 훈 · 최 인 오*

Han Park · Junghoon Kim · Inoh Choi*

요 약

적군의 유도미사일 표적은 자함의 다기능레이더(MFR, multi-functional radar) 시스템으로부터 생존성을 높이기 위하여 해면 저고도 및 고기동 특성을 가지도록 설계된다. 여기서, 해면 저고도 특성은 레이더 수신신호에 해수면의 다중경로 반사 문제를 야기하여 표적 고각 추적 성능 저하 문제를 만들고, 고기동 특성은 다수의 임무들을 수행해야 하는 MFR이 고기동 표적 추적 임무에만 많은 자원을 할당해야 하는 레이더 자원 과부하 문제를 유도한다. 이와 동시에, 최신 함정에 탑재시키기 위한 이중대역 MFR 시스템이 최근 활발히 개발되고 있다. 본 논문에서는 이중대역 MFR를 활용하여 해면 저고도 및 고기동 표적 추적 성능 향상 연구를 수행한다. 먼저, 1) 이중대역 레이더 신호를 융합하여 해면 저고도에서 나타나는 해수면 다중경로 고각 추정 문제를 해결하고, 2) 이중대역 레이더 자원을 교차 할당하여 고기동 특성에 의한 표적 움직임을 보다 정밀하게 추적한다. 시뮬레이션 결과, 이중대역 레이더 시스템을 활용할 경우, 보다 효과적으로 해면 저고도 및 고기동 표적에 대한 보다 안정적인 추적이 가능함을 확인할 수 있었다.

Abstract

Sea skimming and high-maneuverability anti-ship cruise missiles have been designed to evade the surveillance and tracking of maritime multi-functional radar (MFR), resulting in difficulties in radar target tracking. Sea skimming and high maneuvering cause two problems: distortion of the estimated elevation angles by multi-path echoes and overload of radar beam resources by precise tracking tasks. Recently, a dual-band MFR has been developed for state-of-the-art battleships. In this study, a dual-band MFR system is used to improve the tracking accuracy of sea skimming and high-maneuvering targets. In particular, the fusion and allocation of dual-band MFR echoes to address the problems caused by multi-path echoes and heavy precision tracking tasks can lead to improved tracking accuracy. The simulation results revealed that our proposed method is capable of performing successful tracking of sea skimming and high-maneuvering targets in a dual-band MFR system.

Key words: Dual Band MFR System, Monopulse Tracking, Sea Skimming, High Maneuvering

「이 논문은 국립부경대학교 자율창의기술연구비(2024년)에 의하여 연구되었음.」

국립한국해양대학교 전자전기정보공학부 전자정보통신공학전공(Division of Electronics and Electrical Information Engineering, National Korea Maritime & Ocean University)

*국립부경대학교 스마트모빌리티공학과(Department of Smart Mobility Engineering, Pukyong National University)

· Manuscript received May 20, 2024 ; Revised June 3, 2024 ; Accepted July 8, 2024. (ID No. 20240520-053)

· Corresponding Author: Inoh Choi (e-mail: inoh@pknu.ac.kr)

I. 서 론

해상용 다기능 레이더(MFR, multi-functional radar)는 위상배열안테나를 바탕으로 표적 탐지, 추적 등의 다양한 임무들을 효과적으로 수행한다. 반면, 함정을 향해 다가오는 적군 유도미사일은 최신 해상용 MFR의 감시에서 벗어나기 위하여, 1) 고기동 움직임 및 2) 해수면 저고도 움직임을 가진다. 이때, 적군 유도미사일의 1) 고기동 특성은 MFR의 모노펄스 추적 빔 폭 내에 적 표적이 갑자기 사라져버려, MFR이 적 표적을 순간적으로 놓치게 만든다^[1]. 이러한 적 표적의 고기동 영향은 MFR이 모노펄스 추적 과정에서 매우 짧은 반복 주기로 추적 빔을 조사하게 만든다. 다음으로, 적군 유도미사일의 2) 해수면 저고도 특성은 해수면 다중경로 레이더 반사 신호를 만들게 되고, 직접 경로 레이더 반사 신호 내 심각한 간섭 영향을 준다^[2]. 이러한 다중경로 레이더 반사 신호 간섭 영향은 모노펄스 추적 과정에서 심각한 적 표적 고각 추정 문제를 야기한다^[3]. 따라서 고기동 및 해수면 저고도 움직임을 가지는 적 표적의 보다 안정적인 MFR 모노펄스 추적을 위해서는 다양한 연구가 반드시 요구된다.

최근, 고기동 움직임에 따른 표적 추적 정확도를 향상하기 위한 연구들이 활발히 수행되어 왔다^{[4]~[6]}. 먼저, 참고문헌 [4]에서는 고기동 표적 측정치가 추적할 실제 대상인지 결정하는 추적 초기화 알고리즘을 제안하여 오탐지된 결과들에 대한 불필요한 추적 임무를 완화한다. 참고문헌 [5]는 표적의 기동 정도에 따른 단계별 잡음 분산을 인공 신경망으로 학습시켜 추적하는 능동형 칼만 필터를 제안한다. 참고문헌 [6]은 표적 측정치를 딥러닝 기반으로 학습시켜 다양한 기동 특성을 예측하고, 최적 가중치를 적용하는 칼만 필터를 제안한다. 이와 동시에, 해수면 저고도 움직임에 따른 표적 고각 추정 문제를 극복하기 위한 연구들이 수행되어 왔다^{[7],[8]}. 그중 참고문헌 [7]은 이동평균 기법을 활용해 고각 측정치의 잡음 영향을 최소화하고, 다중경로 반사 신호 방향으로 안테나 빔이 조사되는 것을 억제하는 부엽 제어 제한조건을 제안한다. 참고문헌 [8]에서는 모노펄스 오차 복소 신호의 허수부에서 나타나는 특징적 곡선에서 유도된 식을 반복계산하여 수렴하는 표적 고각을 구하고, 필터링을 통해 해상 환경 영향을 극복하는 알고리즘을 제안한다. 하지만,

기존 연구들에도 불구하고, 단일대역 MFR 구조 기반의 교전 상황에서 해수면 저고도 및 고기동하는 적 표적들의 추적 과정에 많은 어려움이 존재한다. 특히, 고기동 표적의 추적 정확도 향상을 위해서는 추적 빔을 자주 조사해야 하는 자원 할당 문제가 발생하고, 저고도 표적의 고각 추정 향상을 위해서는 복잡한 알고리즘^{[7],[8]}을 활용해야 한다. 최근, 두 개의 운용 주파수를 이용하여 해수면 저고도 표적의 고각 추정 문제를 해결하기 위한 연구^[9]가 개발되어 왔다. 이는 모노펄스 채널 수신신호에 포함된 적 표적 고각과 다중경로 반사각을 각각 해석적으로 추정하는 방식이며, 두 개 운용 주파수로 두 개 방정식을 유도하여 두 개의 미지수(i.e., 적 표적 고각 및 다중경로 반사각)를 자명하게 추정하는 알고리즘이다. 따라서, 두 개 운용 주파수를 활용할 경우 심플한 알고리즘^[9]을 통해 고각 추정이 가능하다.

최신 함정 사업에서는 이중대역(i.e., S-대역 및 X-대역) MFR을 개발하고 있다. 여기서, 이중대역의 활용은 다양한 공학적 문제를 단일대역보다 효율적으로 해결할 수 있게 한다^{[10],[11]}. 본 논문에서는 고기동 및 해수면 저고도 움직임을 가지는 적 표적의 보다 정확한 모노펄스 크기 비교 추적을 수행하기 위하여, 최근 개발되어 오고 있는 이중대역 MFR 시스템을 활용한다. 먼저, 적 표적이 높은 고도에서 고기동 움직임을 가질 경우, 이중대역 MFR 수신 신호들을 교차 활용하여 보다 많은 측정치를 확보하고, 적 표적이 추적 빔 내를 벗어나지 못하게 한다. 그리고 적 표적이 낮은 고도에서 해수면 저고도 움직임을 가질 경우, 이중대역 MFR 수신 신호를 동시 활용하여 참고문헌 [9]의 방식으로 표적 고각 추정을 수행한다. 교전 상황을 고려한 시뮬레이션 결과, 제안된 기법을 통하여 고기동 및 해수면 저고도 움직임을 가지는 적 표적의 보다 안정적인 추적이 가능함을 확인할 수 있었다.

II. 해수면 저고도 및 고기동 표적의 반사 신호 모델 및 기존 모노펄스 추적 성능 분석

2-1 다중경로 환경 레이더 반사 신호 모델

본 논문은 해수면 다중경로 환경에서 적 표적의 레이

다 반사 신호를 모델링하기 위하여 지구의 곡률을 고려한다. 그림 1의 A는 MFR의 위치, B는 해수면의 다중경로 반사 지점, C는 적 표적의 위치라 가정한다. 이때, h_R 은 해수면으로부터 MFR의 높이, h_T 는 해수면으로부터 적 표적의 높이, α_E 는 지구의 실효 반지름이다. 지구 곡률을 고려한 적 표적과 MFR의 직접경로 거리 R 은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$R = \sqrt{(h_R + \alpha_E)^2 + (h_T + \alpha_E)^2 - 2(h_R + \alpha_E)(h_T + \alpha_E)\cos(\frac{r}{\alpha_E})}, \quad (1)$$

여기서, r_1, r_2 는 표적의 움직임에 따른 지표면에 투영된 다중경로 거리이고, ϕ_1, ϕ_2 는 r_1, r_2 에 대응되는 지구 중심에서의 각도이다. 또한, $\phi_1 + \phi_2 = \phi$, $r = r_1 + r_2$ 이며, 이는 식 (2)와 같은 관계를 갖는다.

$$r_1 = \frac{r}{2} - \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{4\alpha_E(h_R + h_T) + r^2} \times \sin(\frac{\phi}{3}). \quad (2)$$

지구 곡률을 고려한 해수면에서 반사되는 다중경로 거리 R_1, R_2 는 식 (3)과 같이 정의된다^[7].

$$R_1 = \sqrt{(h_R + \alpha_E)^2 + \alpha_E^2 - 2(h_R + \alpha_E)\alpha_E \cos(\frac{r_1}{\alpha_E})}, \quad (3)$$

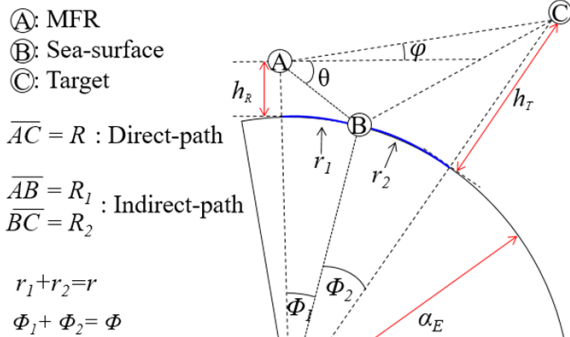


그림 1. 해수면 다중경로 환경에서 모노펄스 크기비교 추적을 위한 지구 곡률 모델링^[7]

Fig. 1. Earth curvature modeling for monopulse amplitude comparison tracking in a sea-surface multipath environment^[7].

$$R_2 = \sqrt{(h_T + \alpha_E)^2 + \alpha_E^2 - 2(h_T + \alpha_E)\alpha_E \cos(\frac{r_2}{\alpha_E})}. \quad (4)$$

다음으로, 다중경로 환경에서 적 표적에 반사된 레이더 기저 대역 수신신호 $S_r(t)$ 는 식 (5)와 같이 정의한다.

$$S_r(t) = \sqrt{P_r} \times \exp(j\frac{4\pi}{\lambda_c} R) + \sqrt{P_0} \times \exp(j\frac{4\pi}{\lambda_c} (R_1 + R_2)), \quad (5)$$

여기서, 식 (5)의 첫 줄은 직접경로 신호, 두 번째 줄은 다중경로 반사 신호이다. 특히, 다중경로 반사 신호는 그림 2와 같이 전파 경로의 증대와 해수면의 반사 특성에 따라 크기와 위상이 직접 경로 신호와 다르게 변조되어 나타난다. 그리고, 식 (5)에서 λ_c 는 파장, P_r 은 직접경로 수신전력, P_0 는 다중경로 수신전력이며, 식 (6)과 같다.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda_c^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4},$$

$$P_0 = \frac{P_t G_t G_r \lambda_c^2 \sigma I D \rho_s}{(4\pi)^3 (R_1 + R_2)^4}. \quad (6)$$

식 (6)에서 P_t 는 송신전력, G_t, G_r 은 각각 송신 및 수신 안테나 이득, σ 는 표적의 레이더 반사 단면적, 그리고 I 는 유전율 및 해수면 입사각(grazing angle)에 따른 해수면의 반사 계수로 식 (7)과 같이 나타낸다^[12].

$$\Gamma = \frac{\sin\psi - \sqrt{\epsilon - \cos^2\psi}}{\sin\psi + \sqrt{\epsilon - \cos^2\psi}}. \quad (7)$$

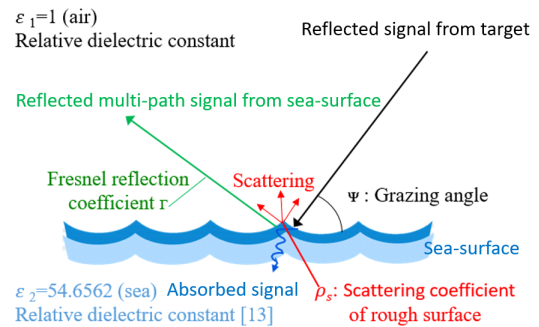


그림 2. 해수면의 다중경로 반사 현상 예시

Fig. 2. Example of multipath reflection phenomenon for sea-surface.

여기서, ψ 는 그림 2과 같이 해수면으로 입사하는 grazing angle, ϵ 는 해수면 복소 유전율이다^[13]. 그리고, 식 (6)의 D 는 지구 곡률에 따른 해수면의 divergence factor로 식 (8)과 같이 근사할 수 있다^[14].

$$D \approx \left(1 + \frac{2r_1 r_2}{a_E \times r \sin \psi}\right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

그리고, 식 (6)의 ρ_s 는 해수면의 랜덤한 파고(sea spike)에 의한 산란 계수(scattering coefficient)이며, 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$\rho_s = \begin{cases} e^{-8(\pi k)^2} & , 0 \leq k \leq 0.1 \\ \frac{0.812537}{1 + 8(\pi k)^2} & , 0.1 \leq k \leq 0.3 \end{cases}, \quad (9)$$

여기서, k 는 roughness factor이다^[15].

2-2 해수면 저고도 및 고기동 표적의 기존 모노펄스 추적 성능 분석

해수면 저고도 표적의 추적 과정에서 다중경로 반사 신호는 표적의 고각 추정 문제를 야기한다. 이 문제를 해석하기 위하여, 그림 3과 같이 2개의 모노펄스 안테나 수신 빔이 고각을 추정하는 기하 구조를 가정한다. 이때, 모노펄스 안테나 Rx 1, Rx 2의 수신신호 $S_{r1}(t)$, $S_{r2}(t)$ 는 식 (5)로부터 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

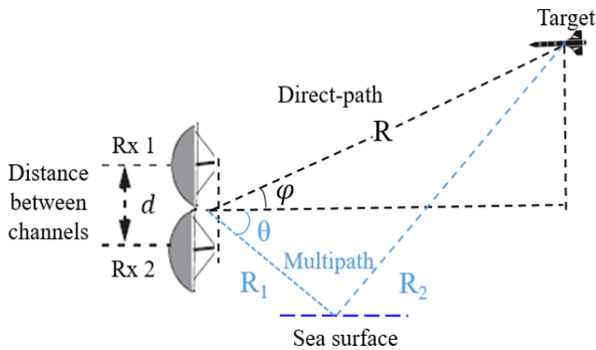


그림 3. 해수면 환경에서 고각 추정을 위한 모노펄스 추적 기하 구조 예시

Fig. 3. Example of monopulse tracking geometry for elevation estimation in a sea-surface environment.

$$\begin{aligned} S_{r1}(t) &= \sqrt{P_{r1}} \times \exp(j \frac{4\pi}{\lambda_c} R(1 + \frac{d}{2R} \sin \phi)) \\ &\quad + I_1(t), \\ S_{r2}(t) &= \sqrt{P_{r2}} \times \exp(j \frac{4\pi}{\lambda_c} R(1 - \frac{d}{2R} \sin \phi)) \\ &\quad + I_2(t), \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, P_{r1} , P_{r2} 는 각 모노펄스 안테나에 수신되는 직접경로 신호의 전력이고 $I_1(t)$, $I_2(t)$ 는 각 안테나에 수신된 다중경로 반사 신호로 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_1(t) &= \sqrt{P_{01}} \times \exp(j \frac{4\pi}{\lambda_c} R_1(1 + \frac{d}{2R_1} \sin \theta)) \\ &\quad \times \exp(j \frac{4\pi}{\lambda_c} R_2), \\ I_2(t) &= \sqrt{P_{02}} \times \exp(j \frac{4\pi}{\lambda_c} R_1(1 - \frac{d}{2R_1} \sin \theta)) \\ &\quad \times \exp(j \frac{4\pi}{\lambda_c} R_2). \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 P_{01} , P_{02} 는 각 안테나에 수신된 다중경로 반사 신호의 전력이다. 모노펄스 크기 비교 기반의 각도 추정을 위하여 식 (10)을 활용하여 합 신호(Σ)와 차 신호(Δ)를 식 (12)와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \Sigma &= S_{r1}(t) + S_{r2}(t) \\ &= \Sigma_{direct}(\phi) + |\rho| e^{ja} \Sigma_{indirect}(\theta), \\ \Delta &= S_{r1}(t) - S_{r2}(t) \\ &= \Delta_{direct}(\phi) + |\rho| e^{ja} \Delta_{indirect}(\theta), \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 ρ 는 직접경로 신호와 다중경로 신호의 크기 변조 차이, $a = (4\pi/\lambda_c) R_2$, $\Sigma_{direct}(\phi)$ 및 $\Delta_{direct}(\phi)$ 는 직접경로 고각 ϕ 를 매개변수로 하는 각 안테나에서 수신된 직접경로 신호의 합과 차 신호, 그리고 $\Sigma_{indirect}(\theta)$ 및 $\Delta_{indirect}(\theta)$ 는 다중경로 반사각 θ 를 매개변수로 하는 각 안테나에 수신된 다중경로 신호의 합과 차 신호이다. 최종적으로 모노펄스 크기 비교에서는 식 (12)의 합과 차 신호비를 통해 식 (13)과 같은 각도 오차를 검출한다.

$$\epsilon = \frac{|\Delta|}{|\Sigma|}. \quad (13)$$

여기서, 기존 모노펄스 크기 비교 방식은 다중경로 영향이 없을 때, 직접경로 고각 ϕ 의 추정이 가능하다. 하지

만, 식 (13)에는 다중경로 영향이 존재하기 때문에, 합과 차 신호비 방정식 1개에 미지수 2개(φ, θ) 존재하는 과소결정계 문제로 해석되고, 직접경로 고각 추정 문제는 자명하지 않다.

다음으로 고기동 표적의 추적 과정에서 고기동 움직임은 적 표적이 MFR의 추적 빔을 이탈하여 추적 실패 문제를 야기한다. 이 문제를 직관적으로 분석하기 위하여, 그림 4와 같은 시나리오를 가정한다. 이때, MFR이 다른 임무를 수행하는 동안 적 표적이 급격하게 고기동하여 예측된 추적 빔 영역을 벗어날 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 MFR은 매우 짧은 주기로 추적 빔을 조사해야 하나, 다수의 임무를 수행해야 하는 MFR 입장에서 자원 부족 문제가 생길 수 있다.

앞서 언급한 문제를 보다 직관적으로 분석하기 위하여, 그림 5(a)와 같은 시나리오에서 기존 추적 기법의 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 실시간 성능 검증을 위하여 AMD Ryzen 5기반의 Window 10 운영체제에서 MATLAB R2024a버전을 활용하였다. 고기동 표적의 추적을 위하여 S-대역 추적 빔을 1.5초 주기로 반복하여 조사하였고, 이외 다중경로 모델링 변수는 표 1, MFR 시스템 변수는 표 2와 같다. 그림 5(b)는 모노 펄스 크기 비교 기반 고각 추정 결과이며, 저고도에서 고각의 오차가 크게 발생함과 동시에 급하강 구간에서 추적에 실패함을 볼 수 있다. 이는 고각의 급격한 변화로 추적 빔 영역 안에 표적이 벗어나기 때문이다. 따라서, 해수면 저고도 및 고기동 표적의 정확한 추적을 위해서는 위 두 가지 공학적 문제를 보다 효율적으로 해결하기 위한 새로운 알고리즘이 필요하다.

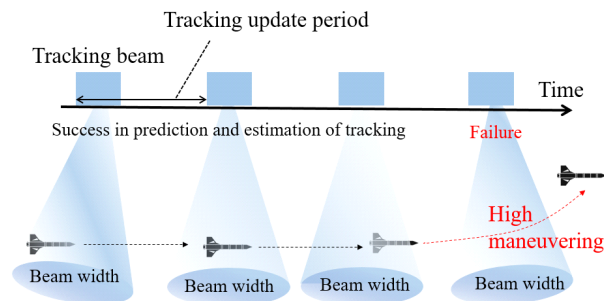
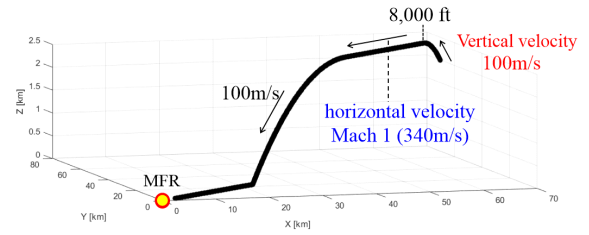
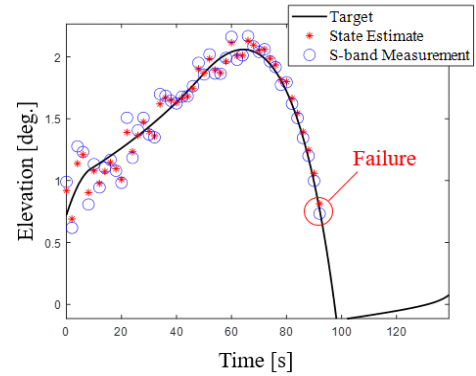


그림 4. 표적 측정치 획득 실패 예시
Fig. 4. Example of fail to obtain target measurements.



(a) 교전 시나리오 예시
(a) Example of engagement scenario



(b) 표적의 고각 추적 결과
(b) Target elevation tracking result

그림 5. 해수면 저고도 및 고기동 표적의 기존 추적 결과
Fig. 5. Simulation results of conventional tracking method for sea skimming and high maneuvering target.

표 1. 다중경로 모델링 변수들

Table 1. Parameters for multipath modeling.

Effective earth radius α_E	6,500 km
Temperature of sea surface	25 °C
Salinity	50 ‰
Complex dielectric constant ϵ	63.97+56.08i V/m
Roughness factor k	0.05
Scattering coefficient of rough coefficient ρ_s	0.8209

표 2. S-대역 MFR 시스템 변수들

Table 2. Parameters for S-band MFR system.

Carrier frequency f_c	3 GHz	Wave length λ_c	0.1 m
Effective aperture area	4.9 m ²	Beam width	4.09°
Thermal noise power	4×10^{-18} W	Transmit power	50 kW

III. 제안된 기법

본 논문에서는 해수면 저고도 및 고기동 특성을 가진 표적의 추적 정확도를 향상하기 위하여 이중대역(i.e. S-대역, X-대역) MFR 시스템을 활용한다. 이때, MFR은 모노펄스 크기 비교를 통해 적 표적 정보(i.e., 거리, 방위각, 고각)를 측정 후, 확장형 칼만 필터(extended Kalman filter)를 활용하여 3차원 좌표(i.e., $[X, Y, Z]$)를 추정할 수 있다. 여기서, Z 값은 적 표적 고도를 의미하며, 고도 Z 가 일정 임계값보다 높으면 고고도 고기동, 낮으면 해수면 저고도 기동으로 적 표적 비행 특성을 판단할 수 있다. 여기서, 일정 임계값은 표 1의 조건에서 다중경로 반사 신호가 약 66.2 % 이상 정반사되어서 직접경로 고각추정에 영향을 줄 수 있는 고도로 정의되며, 대략 0.133 km로 추정된다(그림 6). 만약 해수면 저고도에서 적 표적이 기동할 경우(i.e. $Z < 0.133$ km), 이중대역 추적 빔을 동시에 활용하여 직접 경로 고각을 자명하게 추정한다. 반면에, 만약 고고도에서 적 표적이 고기동할 경우(i.e. $Z \geq 0.133$ km), 이중대역 추적 빔을 교차 할당하여 추적 실패율을 낮추고, 추적 오차 표준 편차를 보다 빠르게 감소시킨다. 본 논문의 전반적인 알고리즘 구조는 그림 7과 같다.

먼저, 해수면 저고도에서 적 표적이 기동할 경우(i.e. $Z < 0.133$ km), 이중대역의 합 및 차 신호를 다음과 같이 2개 방정식으로 유도한다^[9].

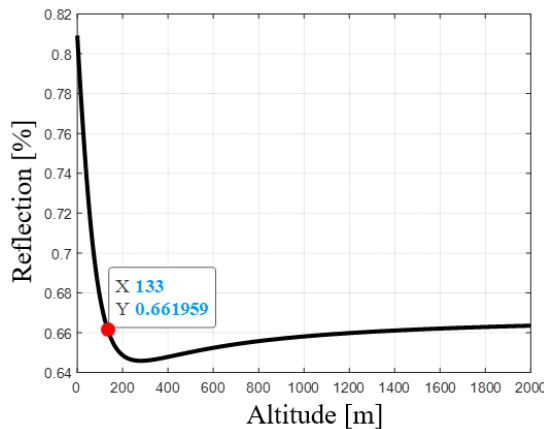


그림 6. 고도에 따른 해수면 반사
Fig. 6. Reflection at sea-surface along altitude.

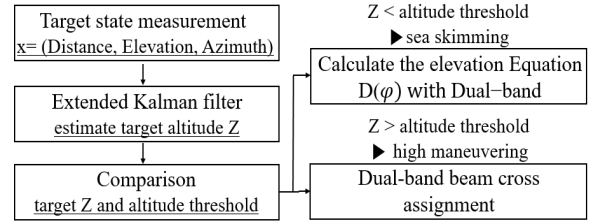


그림 7. 제안된 이중대역 추적 알고리즘의 구조
Fig. 7. Framework of proposed dual-band tracking algorithm.

$$T_1 = \frac{|\Delta_S|^2 - |\Delta_X|^2}{|\Sigma_S|^2 - |\Sigma_X|^2}$$

$$= \frac{2|\rho|(\cos(\alpha_S) - \cos(\alpha_X))\Delta_{direct}(\varphi)\Delta_{indirect}(\theta)}{2|\rho|(\cos(\alpha_S) - \cos(\alpha_X))\Sigma_{direct}(\varphi)\Sigma_{indirect}(\theta)}$$

$$= \frac{\Delta_{direct}(\varphi)}{\Sigma_{direct}(\varphi)} \times \frac{\Delta_{indirect}(\theta)}{\Sigma_{indirect}(\theta)} = D(\varphi)I(\theta), \quad (14)$$

$$T_2 = \frac{|\Sigma_S|^2 Re \frac{\Delta_S}{\Sigma_S} - |\Sigma_X|^2 Re \frac{\Delta_X}{\Sigma_X}}{|\Sigma_S|^2 - |\Sigma_X|^2}$$

$$= \frac{\Delta_{direct}(\varphi)\Sigma_{indirect}(\theta) + \Delta_{indirect}(\theta)\Sigma_{direct}(\varphi)}{2\Sigma_{direct}(\varphi)\Sigma_{indirect}(\theta)}$$

$$= \frac{D(\varphi) + I(\theta)}{2}, \quad (15)$$

여기서, Σ_S 및 Δ_S 는 각각 S-대역의 모노펄스 합 신호와 차 신호이고 Σ_X 및 Δ_X 는 각각 X-대역의 모노펄스 합 신호와 차 신호이다. $\alpha_S = \frac{4\pi}{\lambda_S}R_2$, $\alpha_X = \frac{4\pi}{\lambda_X}R_2$ 이며, 여기서 λ_S 및 λ_X 는 각각 S-대역 파장 및 X-대역 파장이다. 그리고 $D(\varphi)$ 는 적 표적 고각(φ)을 매개변수로 하는 방정식, $I(\theta)$ 는 다중경로 반사각(θ)을 매개변수로 하는 방정식이다. 다음으로 $D(\varphi)$ 에 대하여 T_1 , T_2 을 정리하면 최종적으로 식 (16)과 같은 직접경로 고각 φ 을 자명하게 추정하기 위한 방정식이 정의된다.

$$D(\varphi) = T_2 + \sqrt{(T_2)^2 - T_1}. \quad (16)$$

다음으로 고고도에서 적 표적이 고기동할 경우(i.e., $Z \geq 0.133$ km), 고기동 표적의 추적 실패율을 낮추기 위하여 이중대역 추적 빔을 교차 할당한다. 이는 한 주파수 대역이 표적에 추적 빔을 조사한 후 다른 임무를 수행하는

해면 저고도 및 고기동 표적의 추적 정확도 향상을 위한 이중대역 다기능 레이더 시스템 활용

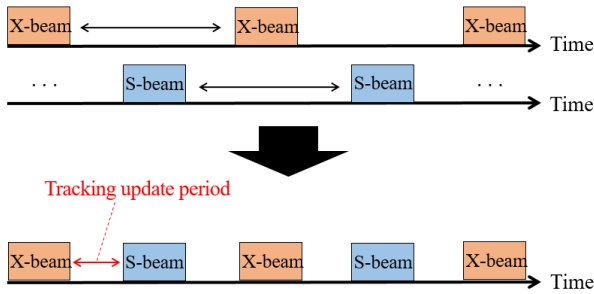
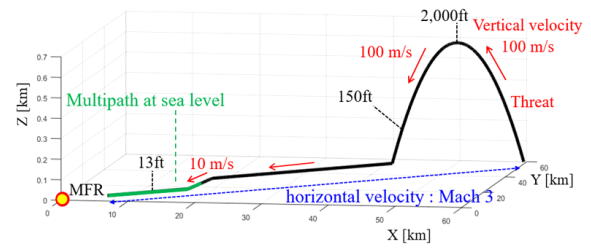


그림 8. 이중대역 추적 빔 교차 할당 예시
Fig. 8. Example of dual-band tracking beam cross allocation.

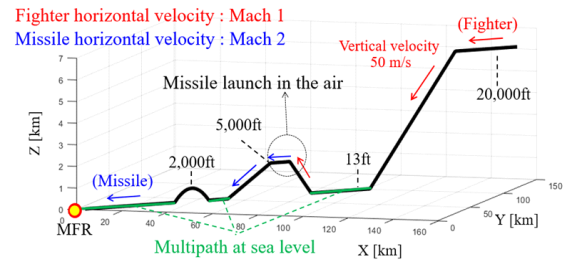
동안, 나머지 주파수 대역이 이 표적에 추적 빔을 조사하는 방식이다(그림 8). 이는 MFR이 다양한 임무들을 수행하는 와중에, 고기동 표적을 추적 빔 내에 벗어나지 않게 할 수 있다. 그리고, 단일대역과 달리 이중대역에서 다수의 측정치를 보다 많이 확보함으로써 고기동 표적의 추적 오차 통계적 값인 표준 편차가 보다 빨리 줄어들 수 있다. 또한, 운용 주파수를 다양하게 활용할 경우 표적의 레이더 반사 단면적이 수치 해석적으로 보다 다양하게 나타난다는 점에서 추적 정확도를 높일 수 있다. 마지막으로, X-대역은 파장이 상대적으로 짧아 좁은 빔 폭을 가지기에 각도 해상도가 뛰어나나, 추적 빔 영역이 좁아 고기동 표적이 사라질 수 있는 단점이 있다. 이와 반대로 S-대역은 상대적으로 긴 파장으로 넓은 빔 폭을 가지기에, 추적 빔 영역이 상대적으로 넓다. 따라서, X-대역과 S-대역을 교차하여 추적 빔을 조사할 경우, 단일대역을 운용하는 것보다 다양한 이점을 가질 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 제안된 이중대역 MFR 기반 추적 알고리즘을 기존 단일대역 MFR 기반 추적 알고리즘과 비교한다. 여기서, 제안된 알고리즘은 확장 칼만 필터의 등속도 모델을 사용하였고, 기존 기법은 등속도 모델과 고기동 표적 추적에 더욱 용이한 등가속도 모델을 각각 사용하였다. 또한, 두 가지 시나리오에서 MFR로 다가오는 해수면 저고도 및 고고도 고기동 적 표적을 가정하였다(그림 9). 여기서, 두 시나리오의 다중경로 모델링 변수는 표 1, S-대역 MFR 시스템 변수는 표 2, X-대역 MFR 시스템 변



(a) 첫 번째 시나리오
(a) The 1st scenario



(b) 두 번째 시나리오
(b) The 2nd scenario

그림 9. 제안된 기법을 검증하기 위한 교전 시나리오 예시
Fig. 9. Example of engagement scenario to verify the proposed method.

표 3. X-대역 MFR 시스템 변수들
Table 3. Parameters for X-band MFR system.

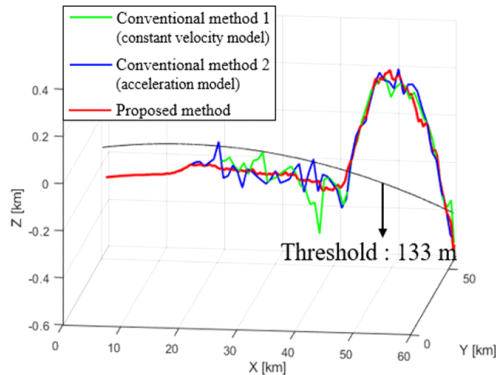
Carrier frequency f_c	9 GHz	Wave length λ_c	0.033 m
Effective aperture area	0.98 m	Beam width	1.36°
Thermal noise power	6×10^{-17} W	Transmit power	5 kW

수는 표 3과 같으며, 1 ft=0.3048 m, 마하 1=340 m/s이다.

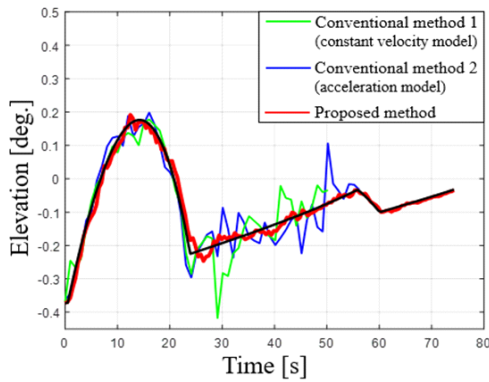
4-1 첫 번째 시나리오 시뮬레이션 결과

그림 9(a)의 첫 번째 시나리오에서 제안된 이중대역 MFR 기반 추적 알고리즘은 각 대역의 추적 빔을 1초 주기로 반복하여 교차 조사하였고, 확장 칼만 필터를 활용하는 기존 단일대역 추적 기법은 S-대역 추적 빔을 1초 주기로 조사하였다.

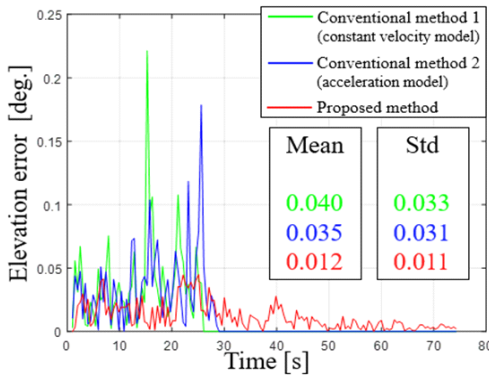
먼저, 그림 10(a)는 표적 좌표 추적 결과를 보여주며, 지구 곡률을 고려함에 따라 적 표적 고도가 음수로 나타났다. 기존 기법은 해수면 저고도 기동 구간에서 다중경



(a) 추정된 표적 좌표
(a) Estimated coordinates of target



(b) 추정된 표적 고각
(b) Estimated elevation angle of target



(c) 추정된 표적 고각 오차
(c) Error of estimated elevation angle

그림 10. 그림 9(a)의 첫 번째 시나리오 표적 추적 시뮬레이션 결과

Fig. 10. Simulation results for target tracking at the 1st scenario in Fig. 9(a).

로 반사 신호 영향에 의해 극심한 오차를 보였으며, 적 표적이 급격하게 기동하는 구간에서 추적 빔 폭을 벗어남에 따라 추적이 실패하였다. 반면에, 제안된 알고리즘은 적 표적을 안정적으로 추적할 수 있었다.

다음으로 그림 10(b) 및 그림 10(c)는 추정된 적 표적 고각 및 고각 오차를 보여준다. 특히, 해수면의 영향을 받는 저고도 구간에서 큰 고각 오차 (i.e. 등속 모델 기반 기준 기법의 평균 오차=0.040°, 가속 모델 기반 기준 기법의 평균 오차=0.035°)를 가지는 기존 기법과 달리, 제안된 알고리즘은 0.012°의 평균 오차로 보다 안정적인 추적이 가능하였고, 고각 오차 표준편차도 0.011°로 보다 안정적으로 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

4.2 두 번째 시나리오 시뮬레이션 결과

그림 9(b)의 두 번째 시나리오에서는 첫 번째 시나리오 시뮬레이션과 달리, 제안된 이중대역 MFR 기반 추적 알고리즘은 각 대역이 추적 빔을 1초 주기로 반복하여 교차 조사하였고, 기존 단일대역 추적 기법은 S-대역 추적 빔을 0.5초 주기로 조사하였다.

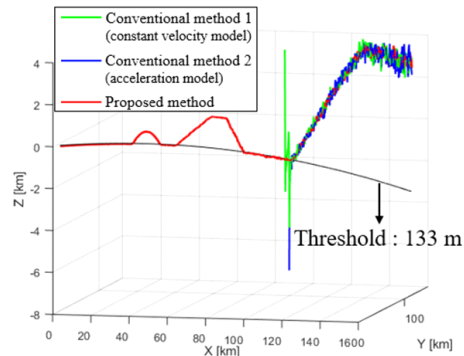
먼저, 그림 11(a)은 적 표적의 좌표 추정 결과를 보여준다. 이때, 기존 기법은 해수면 저고도 기동 구간에서 심한 고각 추정 오차로 인해 추적 빔 폭에서 표적이 벗어남에 따라 추적이 실패하였다. 반면에, 제안된 알고리즘은 고기동 및 해수면 저고도 기동 구간에서 적 표적을 성공적으로 추적하였다.

다음으로 그림 11(b) 및 그림 11(c)는 추정된 적 표적 고각 및 고각 오차를 보여준다. 이때, 다중경로 간섭 영향으로 기존 기법의 고각 오차가 급증한 것을 볼 수 있고, 제안된 알고리즘은 표준편차가 약 0.021°로 고각 오차가 안정적으로 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 그리고, 첫 번째 시나리오에 비하여 보다 급격한 기동 특성을 가지는 두 번째 시나리오에서 두 기존 기법의 고각 오차 평균은 0.075° 및 0.068°인 반면, 제안된 알고리즘은 평균 0.023°의 고각 오차로 표적을 추적할 수 있었다.

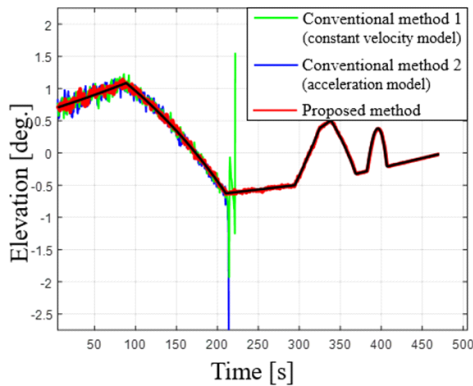
V. 결 론

본 논문에서는 고기동 및 해수면 저고도 비행하는 적

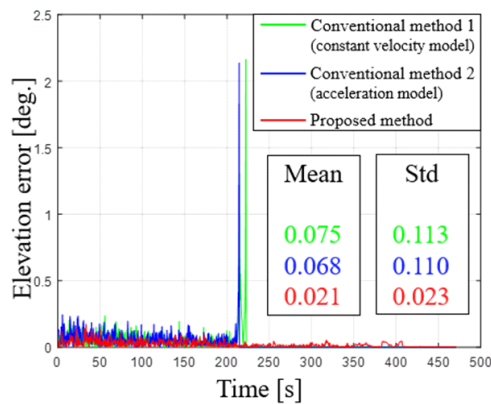
해면 저고도 및 고기동 표적의 추적 정확도 향상을 위한 이중대역 다기능 레이더 시스템 활용



(a) 추정된 표적 좌표
(a) Estimated coordinates of target



(b) 추정된 표적 고각
(b) Estimated elevation angle of target



(c) 추정된 표적 고각 오차
(c) Error of estimated elevation angle

그림 11. 그림 9(b)의 두 번째 시나리오 표적 추적 시뮬레이션 결과

Fig. 11. Simulation results for target tracking at the 2nd scenario in Fig. 9(b).

표적을 보다 정확히 추적하기 위하여, 1) 적 표적이 해수면 저고도 기동할 때, 이중대역 수신 신호를 활용하여 직접경로 고각을 자명하게 추정하고, 2) 고고도 고기동 할 때, 이중대역 추적 빔을 교차 할당하는 이중대역 MFR 기반의 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 제안된 알고리즘은 해수면 저고도에 의한 다중경로 간섭을 효과적으로 보상할 수 있었고, 고기동 표적을 보다 안정적으로 추적할 수 있었다.

References

- [1] Y. S. Jung, K. S. Kim, and T. L. Song, "Performance improvement for tracking small targets," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 16, no. 11, pp. 1044-1052, Nov. 2010.
- [2] D. Kwon, H. Ko, S. Hong, B. L. Cho, K. S. Kim, and C. H. Kim, "Research of selective exponential smoothing method for estimating low-altitude target elevation in marine multipath environment," *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, vol. 20, no. 9, pp. 115-123, Sep. 2022.
- [3] C. H. Lee, S. M. Chon, J. Park, H. K. Na, and S. H. Kim, "Multi-frequency monopulse direction detection method for suppression of multipath effects in low-altitude sea target tracking," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 3, pp. 306-314, Mar. 2021.
- [4] G. Lee, N. Kwak, J. Kwon, E. Yang, and K. Kim, "Track initiation algorithm based on weighted score for TWS radar tracking," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 1-10, Feb. 2019.
- [5] S. Y. Myung, S. Y. Chun, "Study on improvement of target tracking performance for RASIT(RAdar of Surveillance for Intermediate Terrain) using active Kalman filter," *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea SC*, vol. 46, no. 3, pp. 52-58, May 2009.

- [6] J. H. Hwang, J. M. Lee, "Improvement of track tracking performance using deep learning-based LSTM model," in *Proceedings of the Korean Institute of Information and Communication Sciences Conference*, Yeosu, May 2021, pp. 189-192.
- [7] C. H. Lee, S. M. Chon, J. Park, H. K. Na, and S. H. Kim, "Improving the tracking accuracy of a low-altitude sea target in a multipath environment using adaptive beam-forming techniques," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 2, pp. 190-199, Feb. 2021.
- [8] T. H. Kim, C. H. Jung, H. S. Lee, J. H. An, S. H. Kim, and J. H. Kim, "Elevation angle measurement of sea-skimming targets for fine tracking in multipath environments of sea surfaces," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 4, pp. 396-406, Apr. 2021.
- [9] M. A. Sebt, M. Goodarzi, and H. Darvishi, "Geometric arithmetic mean method for low altitude target elevation angle tracking," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 59, no. 5, pp. 5111-5119, Oct. 2023.
- [10] F. Laghezza, F. Scotti, D. Onori, and A. Bogoni, "ISAR imaging of non-cooperative targets via dual band photonics-based radar system," in *2016 17th International Radar Symposium(IRS)*, Krakow, May 2016, pp. 1-4.
- [11] K. J. Rah, G. Lee, K. B. Kang, M. Kim, S. H. Kim, and K. T. Kim, "A study on improving the performance of low-altitude, high-speed target detection at sea using dual-band radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 2, pp. 155-166, Feb. 2023.
- [12] D. Park, E. Yang, S. Ahn, and J. Chun, "Adaptive beamforming for low-angle target tracking under multipath interference," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 4, pp. 2564-2577, Oct. 2014.
- [13] S. J. Wu, A. K. Fung, "A theory of microwave apparent temperature over the ocean," *University of Kansas Center for Research*, Lawrence, KS, NASA CR-2329, Nov. 1973.
- [14] D. E. Kerr, *Propagation of Short Radio Waves*, New York, NY, McGraw-Hill, 1964.
- [15] D. Y. Northam, "A stochastic simulation of low grazing angle, forward scatter, over-water multipath effects," *Naval Research Laboratory*, Washington, DC, NRL Report 5658, Dec. 1981.

박 한 [국립한국해양대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0009-7099-3822>



2023년 8월: 국립한국해양대학교 전자통신공학과 (공학사)
2023년 9월~현재: 국립한국해양대학교 전자통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 이중대역 레이더 신호 처리, 비접촉식 걸음걸이/생체신호 센싱

최 인 오 [국립부경대학교/조교수]

<http://orcid.org/0000-0002-0410-1066>



2012년 8월: 부경대학교 전자정보통신공학과 (공학사)
2014년 8월: 부경대학교 전자공학과 (공학 석사)
2020년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2019년 12월~2021년 2월: 국방과학연구소 선임연구원

2021년 3월~2024년 2월: 국립한국해양대학교 전자전기정보공학부 전자통신공학전공 조교수

2024년 3월~현재: 국립부경대학교 정보융합대학 스마트모빌리티공학과 조교수

[주 관심분야] 이중대역 레이더자원관리, 휴먼 걸음걸이 센싱, 탄도미사일 방어시스템, 생체신호탐지, 미세도플러 분석/식별, 다중편파 SAR 영상 보정, 레이더표적식별, FMCW 차량 레이더 및 LiDAR 등

김 정 훈 [국립한국해양대학교/조교수]

<https://orcid.org/0000-0003-3587-2039>



2008년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2008년 2월~2014 7월: 삼성전자 무선사업부 선임연구원
2015년 11월: University College London, Dept. Electronic and Electrical Engineering (공학석사)

2020년 7월: Imperial College London, Dept. Electrical and Electronic Engineering (공학박사)

2020년 4월~2022년 3월: Imperial College London, Dept. Electrical and Electronic Engineering, Research Associate

2022년 4월~현재: 국립한국해양대학교 전자전기정보공학부 전자정보통신공학전공 조교수

[주 관심분야] 무선 정보/전력 동시전송, 에너지 하베스팅, MIMO, 전송률 분할 다중접속, 통신 시스템 프로토타입, Integrated Radar and Communication (ISAC)