

레이다 플랫폼 이동에 따른 3차원 탐지 영역의 겹침 비율 분석 및 클러터맵 갱신 전략

윤 주 열*

The Overlap Ratio Analysis of 3D Sector Detection Areas and Clutter Map Update Strategies Depending on Radar Platform Movement

Juyeol Yun*

요 약

본 논문은 레이다 플랫폼 이동에 따른 레이다 클러터맵의 공간적 불일치 문제를 해결하기 위해, 탐지 체적의 3차원 기하학적 겹침 비율 산출 기법을 제안한다. 기존의 2차원 투영 방식이 지닌 한계를 극복하기 위해 탐지 영역을 3차원 점군으로 모델링하고 볼록껍질(Convex hull) 알고리즘을 적용하여 기동 방향, 속도, 탐지 거리 및 고각 변수에 따른 겹침률을 산출하였다. 분석 결과, 전진 기동 시 겹침률 감소가 가장 취약하나 원거리로 갈수록 안정성이 회복됨을 확인하였다. 이를 바탕으로 연산 부하를 최소화하는 상황 인식형 갱신 전략을 제시한다. 궁극적으로 본 연구는 급변하는 동적 환경에서 레이다의 자원 분배 효율성을 극대화하고 표적 탐지의 연속성을 보장하는데 기여할 것이다.

Abstract

This paper proposes a method to calculate the 3D geometric overlap ratio of detection volumes to resolve the spatial mismatch of radar clutter maps caused by radar platform maneuvers. To overcome the limitations of conventional 2D projection methods, the detection area was modeled as a 3D point cloud, and the Convex hull algorithm was applied to accurately calculate the overlap ratio according to speed, direction, detection range and elevation. The results showed that forward maneuvering is the most vulnerable to overlap ratio loss, but stability recovers at longer ranges. Based on these findings, we present a situation-aware update strategy that minimizes computational load while ensuring target detection reliability. Ultimately, this study will contribute to maximizing radar resource allocation efficiency and maintaining continuous target tracking in dynamic environments.

Keywords

overlap ratio analysis, convex hull algorithm, clutter map update, radar signal control

* 국방과학연구소 연구원
- ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3470-5969>

· Received: Apr. 07, 2026, Revised: Apr. 28, 2026, Accepted: May 01, 2026
· Corresponding Author: Juyeol Yun
Agency for Defense Development, Yuseong P.O.Box 35, DaeJeon,
34186, Korea
Tel.: +82-42-821-4497, Email: yunjy0517@add.re.kr

1. 서 론

현대 해상전 및 연안 작전 환경에서 함정용 레이더는 대함 및 대공 표적을 조기에 탐지하고 추적하여 함정의 생존성을 보장하는 가장 핵심적인 센서 체계이다[1]. 그러나, 해양 환경에서 고성능 레이더를 운용할 경우 해면의 파도, 조류, 기상 현상 등에 의해 발생하는 해면 클러터와 연안 지형에 의한 지면 클러터가 복합적으로 유입되어 표적 탐지 성능을 심각하게 저하시킨다[2]. 특히, 해면 클러터는 해상 상태에 따라 매우 비선형적이고 비정상성을 띄는 통계적 분포 특성을 가지므로, 단순히 고정 임계치 기반의 탐지 기법으로는 수많은 오경보(False alarm)를 유발하거나 실제 표적의 미약한 반사 신호를 마스킹하는 결과를 초래한다[3].

일반적으로 레이더 시스템에서는 이러한 클러터를 억제하고 표적의 신호 대 클러터 비(SCR, Signal-to-Clutter Ratio)를 극대화하기 위해 이동 표적 지시기(MTI, Moving Target Indicator)나 펄스 도플러 필터링 기법을 폭넓게 적용해 왔다[1]. 그러나, 해면 위를 저속으로 비행하는 무인기, 호버링 중인 헬리콥터 등 도플러 속도가 0에 가깝거나 해면 클러터의 스펙트럼 대역 내에 완전히 중첩되어 존재하는 교전 표적에 대해서는 주파수 영역에서의 억제 및 분리가 매우 제한적이다[4][5]. 이러한 물리적 한계를 극복하기 위해 최신 레이더 시스템은 탐지 영역 내의 배경 잡음 및 클러터 전력을 공간적으로 지도화하여 저장하고, 이를 기반으로 탐지 임계치를 적응적으로 조절하는 클러터 맵 기반 오경보율(CFAR, Constant False Alarm Rate) 기법을 필수적으로 채택하고 있다[6]. 클러터 맵 기반 CFAR는 방위각 및 거리 단위로 세분화된 개별 분해능 셀(Resolution cell)마다 수신된 클러터 전력의 시간적 평균을 재귀적으로 추정하고, 이를 기반으로 적응적인 탐지 임계치를 설정함으로써 클러터 환경 내에서 표적의 가시성을 안정적으로 확보하는 역할을 수행한다[7][8].

하지만, 지상 고정형 레이더와 달리 함정용 레이더와 같은 이동형 플랫폼 체계에서는 자함의 연속적인 기동으로 인해 레이더 안테나의 공간적 위치와 지향 각도가 실시간으로 변화하는 구조적 제약이 존

재한다[9][10]. 함정이 특정 침로를 따라 일정 속도로 기동하거나, 파도로 인해 6자유도 요동(Roll, pitch, yaw)을 겪게 되면, 안테나에서 방사된 3차원 레이더 빔이 지면이나 해면에 투영되는 조사 체적의 기하학적 위치가 지속적으로 이탈하게 된다[11]. 이로 인해 과거 시점(t_0)에 획득하여 메모리에 저장해둔 클러터 맵 데이터의 지리적 위치 좌표와, 현재 시점(t_1)에 실제로 수신되고 있는 클러터 환경 사이에 공간적 불일치 현상이 발생한다. 만약, 이 위치 오차를 실시간으로 보상하지 않을 경우 클러터 맵의 특정 셀에서는 과거의 데이터가 현재의 잘못된 위치에 적용되어 오경보가 증가하거나 반대로 표적 탐지가 누락되는 시스템 성능 저하가 일어난다[5][9].

따라서, 이동형 플랫폼에서는 자함의 기동에 따른 공간적 위치 변화를 정확하게 추적하고, 클러터 맵을 적절한 주기로 재초기화하거나 갱신하는 갱신 전략 수립이 필수적이다. 그러나 갱신 주기를 무분별하게 짧게 설정할 경우, 레이더의 신호처리 체계가 감당해야 하는 연산 부하와 메모리 접근 빈도가 기하급수적으로 증가하며, 적절한 샘플 누적이 이루어지지 않아 클러터 전력 추정의 통계적 신뢰도가 하락하게 된다[8]. 반대로 시스템 과부하를 우려하여 갱신 주기를 길게 설정할 경우, 플랫폼 이동에 의한 데이터의 기하학적 유효성이 상실되어 클러터 억제 능력 자체가 저하되는 딜레마에 직면하게 된다.

이에 본 연구에서는 함정의 정속 및 직교 기동에 따른 3차원 탐지 영역의 공간적 겹침 비율을 계산 기하학적으로 정밀하게 산출하고, 이를 바탕으로 클러터 맵의 갱신 전략을 도출하기 위한 블록겹질 기반의 새로운 3차원 공간 해석 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 함정용 레이더의 3차원 조향 빔 영역을 구면 좌표계 기반의 고밀도 이산 점군으로 모델링한 후, 함정의 이동 속도, 침로 방향, 그리고 시간 변화율에 따른 3차원 직교 좌표 회전 및 이동 변환을 순차적으로 수행한다. 이후 초기 시점(t_0)의 탐지 체적 점군과 기동 후 시점(t_1)의 탐지 체적 점군 간의 교집합 구역을 추출하고, 다차원 블록겹질 알고리즘을 적용하여 순수한 겹침 체적의 잔존 비율을 정량적으로 산출 및 평가한다.

본 논문에서는 제안된 기법을 활용하여 합정용 레이더의 실제 작전 환경을 대변하는 3가지 핵심 시나리오 그룹, 즉 근거리/저고각 교전 환경, 고각 변동을 수반하는 대공 감시 환경, 그리고 원거리 광역 감시 환경을 수립하였다. 그리고, 각 시나리오별로 기동 방향(전진, 측면, 대각 기동)과 기동 속도가 겹침 비율 감쇠에 미치는 기하학적 민감도를 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 관련 연구에 대해 기술하고, 제 3장에서는 3차원 레이더 탐지 영역의 수학적 모델링 및 볼록껍질 알고리즘을 이용한 부피산출과 겹침 비율 산출의 계산 기하학적 이론을 상세히 기술한다. 제 4장에서는 합정의 기동 변수에 따른 시나리오별 시뮬레이션 결과를 제시하고, 겹침률 데이터의 유효성 변화 추이를 비교 분석한다. 마지막으로 제 5장에서는 본 연구의 결론을 요약하고, 실제 체계 적용을 위한 향후 연구 과제를 제시한다.

II. 관련 연구

기존의 클러스터 맵 갱신 주기 산출 및 유효성 평가 기법들은 주로 2차원 평면(방위각-거리) 상의 투영 면적을 기반으로 하거나, 단순히 플랫폼의 선형 이동 거리만을 기준으로 갱신 임계치를 일괄 적용하는 다소 제한적인 방식을 취해왔다. 하지만 실제 레이더 빔은 방위각과 고각의 유한한 빔폭을 가지며, 거리에 따라 3차원 공간으로 넓게 확산되는 원뿔대 형태의 입체적 체적을 지닌다[11]. 특히, 레이더가 매우 가까운 거리에 위치한 표적을 탐지하는 상황이나, 고각을 가파르게 상향 조정하여 대공 감시를 수행하는 상황에서는 빔의 기하학적 형상과 3차원 입체 기하 구조가 매우 비선형적으로 왜곡된다[6]. 이러한 복잡한 3차원 탐지 영역의 연속적인 변화를 기존의 2차원 이산 그리드나 단순 선형 보간 방식(Linear interpolation)으로 해석할 경우, 그리드 경계면에서 오차가 발생하여 실제 공간이 얼마나 겹쳐 있는지 나타내는 체적 겹침 비율을 정확하게 산출하는 데 구조적 한계가 있다.

최근 레이더 신호처리 및 공간 데이터 융합 분야

에서는 이러한 다차원 비정형 공간 데이터를 고정 밀도로 분석하기 위해 계산 기하학의 핵심 알고리즘을 신호처리에 적극적으로 도입하는 융합 연구가 활발히 진행되고 있다[12][13]. 그 중에서도 주어진 N차원 점군 데이터로부터 점들을 모두 포함하는 최소 부피의 팽팽한 다면체(Convex polyhedron)를 구성하는 볼록껍질(Convex hull) 알고리즘은 3차원 공간상의 객체 체적을 가장 정밀하게 추출할 수 있는 수학적 도구로 각광 받고 있다[12]. 볼록껍질 기반의 체적 산출 기법은 이산화된 3차원 격자 공간에서 단순히 점의 개수를 세는 체적소 적분 방식(Voxel counting)과 달리, 최외곽 점들 기하학적으로 연결하여 연속적인 다면체를 구성하고 이를 중첩되지 않는 사면체 심플렉스로 분할하여 부피를 합산한다[13]. 이 방식은 분할 정복(Divide-and-conquer) 전략을 바탕으로 한 Quickhull 기법 등을 활용하여 연산 복잡도가 평균적으로 $O(n \log n)$ 수준으로 매우 효율적일 뿐만 아니라, 비정형적인 레이더 빔 패턴의 왜곡된 경계면과 플랫폼 이동 전후의 기하학적 중첩 체적을 수학적으로 도출할 수 있다는 강력한 장점을 제공한다[12].

또한, 기계학습 기반의 신경망을 활용하여 복잡한 해면 클러스터 특성을 학습하고 억제하는 연구[14]와 자율 주행 및 드론 탐지를 위한 3차원 점군 레이더 신호처리 기법 연구가 활발히 진행되고 있다[15][16]. 그러나 이러한 데이터 기반 인공지능 방식은 방대한 학습 데이터가 요구되며, 실시간으로 급변하는 해상 환경과 플랫폼의 동적 기동 상황에 즉각적으로 대응하여 연산하기 어렵다는 단점이 있다.

III. 연구 방법

본 연구는 이동하는 레이더 플랫폼의 기동 특성에 따라 변형되는 3차원 탐지 영역의 기하학적 겹침 비율을 정량적으로 산출하고, 이를 기반으로 효율적인 클러스터맵 갱신 전략을 수립하는 것을 목적으로 한다. 알고리즘의 전체 절차는 격자 생성, 초기 영역 정의, 기동 모델링 및 좌표 변환, 교집합 추출, 부피 산출의 5단계로 구성되며 본 절에서는 각 단계의 수학적 원리를 설명한다.

2.1 적응형(Adaptive) 격자 생성

레이더 탐지 영역인 구면 부채꼴은 구면 좌표계 (r, θ, ϕ) 상에서 3차원 격자(Grid)를 이용하여 모델링하였다. 여기서, r 은 탐지 거리, θ 는 방위각, ϕ 는 고각을 의미한다. 탐지 거리에 비례하여 탐지 영역이 넓어지는 기하학적 특성을 고려하여, 거리 축 r 에 대해 식 (1)과 같이 적응형 샘플링을 수행하였고, 구간별로 밀도를 다르게 설정하여 연산 효율성을 최적화하였다.

$$r \in R = \{r_1, r_2, \dots, r_{N_r}\} \quad (1)$$

여기서, r 은 레이더로부터의 거리, R 은 시뮬레이션에서 사용할 모든 거리 격자 점들의 집합, N_r 은 생성된 거리 격자 점의 총 개수를 의미한다. 즉, r_1 은 첫 번째 거리 지점, r_2 는 두 번째 거리 지점, r_{N_r} 은 마지막 거리 지점(최대 탐지 거리)를 의미한다. 일반적인 샘플링에서는 점 간격이 일정하지만, 본 연구에서는 점들 사이의 간격(Δr)이 일정하지 않고, 근거리일수록 간격을 좁게, 원거리일수록 간격을 넓게 설정하였다. 또한, 방위각(θ)과 고각(ϕ) 방향의 격자 분할 수 (N_θ, N_ϕ)를 설정하여, 빔의 곡면 형상을 표현하기 위한 충분한 각도 해상도를 확보하였다. 이후, 설정된 레이더 방위각 범위($\theta_{\min}, \theta_{\max}$)와 고각 범위($\phi_{\min}, \phi_{\max}$) 내에서 등간격으로 좌표를 생성하고, 이를 조합하여 3차원 격자 텐서를 구성하였다. 마지막으로, 3차원 격자 텐서를 1차원 벡터로 변환하여 전체 시뮬레이션 공간을 구성하는 모집단 점군(P_{base})을 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$P_{base} = \{p_i = (r_i, \theta_i, \phi_i) | i = 1, \dots, N_{total}\} \quad (2)$$

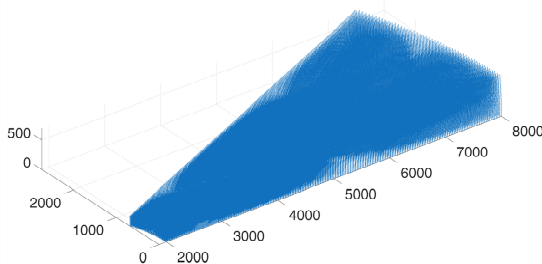


그림 1. 탐지 영역 내 격자 및 모집단 점군 생성
Fig. 1. Generate grid and population point clouds within the detection area

여기서, P_{base} 는 전체 격자 점들의 집합, p_i 는 i 번째 격자 점의 구면 좌표, N_{total} 은 생성된 총 격자 점의 개수를 의미한다. 그림 1은 방위각 $0 \sim 20^\circ$ ($N_\theta = 50$), 고각 $0 \sim 5^\circ$ ($N_\phi = 50$), 거리 $2 \sim 8\text{km}$ ($N_r = 200$)에 대한 탐지 영역의 격자 및 모집단 점군을 생성한 예시이다.

2.2 초기 탐지 영역 정의

초기 모집단 점군(P_{base}) 중에서 초기 시점(t_0)의 탐지 영역을 만족하는 점들을 식별하기 위해 초기 유효 집합(S_{t_0})을 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$S_{t_0} = \left\{ p \in P_{base} \mid \begin{array}{l} \theta_{\min} \leq \theta_p \leq \theta_{\max}, \\ \phi_{\min} \leq \phi_p \leq \phi_{\max}, r_p \in R_{valid} \end{array} \right\} \quad (3)$$

여기서, p 는 초기 모집단 점군(P_{base})에 속해 있는 검사 대상이 되는 개별 격자 점, r_p, θ_p, ϕ_p 는 현재 검사하고 있는 점 p 의 거리, 방위각, 고각 성분, R_{valid} 는 유효 탐지 거리 구간을 의미한다.

2.3 기동 모델링 및 좌표 변환

플랫폼의 이동에 따른 탐지 영역의 위치 변화는 고정된 공간 점들에 대해 역방향 좌표 변환을 통해 계산하였다. 플랫폼의 이동 속도(v)와 이동 방위각(ψ)을 기반으로 시간 Δt 동안의 변위 벡터(Δd)를 직교 좌표계에서 식 (4)와 같이 산출하였다.

$$\Delta d = (\Delta x, \Delta y, \Delta z) = (v \Delta t \cos \psi, v \Delta t \sin \psi, 0) \quad (4)$$

초기 모집단 점군(P_{base})을 구면 좌표계에서 직교 좌표계로 변환한 후, 변위 벡터(Δd)를 차감하여 이동된 시점(t_1) 기준의 상대좌표(P')를 계산하였다.

$$P'_{xyz} = P_{xyz} - \Delta d \quad (5)$$

여기서, P_{xyz} 는 초기 시점(t_0)에서의 공간 상의 고정된 점의 위치 벡터(x, y, z), Δd 는 시간 Δt 동안

이동한 변위 벡터, P'_{xyz} 는 이동한 플랫폼(t_1) 기준으로 재설정된 해당 점의 상대 위치 벡터를 의미한다. 이후, 변환된 상대 좌표(P'_{xyz})를 다시 구면 좌표계($P'_{r\theta\phi}$)로 변환하여 이동된 플랫폼 중심에서 바라본 각 점의 새로운 좌표를 갱신하였다.

그림 2는 진북(N) 기준 이동방향 45° , 이동속도 $20m/s$, 이동시간 $10s$ 에 대한 기동 모델링 적용시, 탐지 영역의 변화를 위에서 바라본 그림이다.

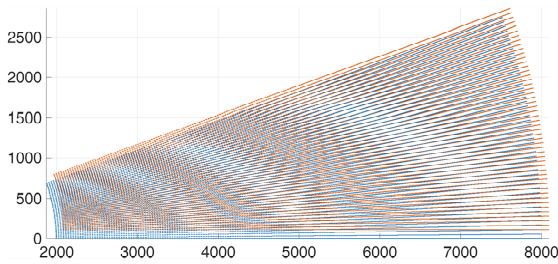


그림 2. 플랫폼 기동에 따른 탐지 영역의 변화
Fig. 2. Changes in detection area due to platform movement

2.4 교집합 영역 추출

이동된 시점(t_1) 기준의 점군(P')에 대해 초기와 동일한 탐지 영역을 적용하여, 이동 후 시점(t_1)에서도 탐지 영역 내에 존재하는 점(S_{t1})들을 식별하였다. 이후, 식 (6)과 같이 초기 시점(t_0)의 유효 조건($p \in S_{t0}$)과 이동 후 시점(t_1)의 유효 조건($p' \in S_{t1}$)을 논리곱 연산하여, 두 시점(t_0, t_1)에서 모두 탐지 영역 내에 존재하는 교집합을 생성하였고, 직교 좌표계로 변환하여 최종 중첩 점군($S_{overlap}$)을 추출하였다.

$$S_{overlap} = S_{t0} \cap S_{t1} = \{p \in P_{base} | (p \in S_{t0}) \wedge (p' \in S_{t1})\} \quad (6)$$

그림 3은 이동 후 시점(t_1)에서 초기 탐지 영역 내에 존재하는 점(S_{t1})들을 식별하여 나타낸 그림이다.

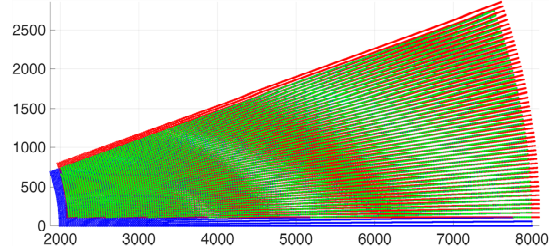


그림 3. 탐지 영역의 교집합 영역 추출
Fig. 3. Extract the intersection area of the detection area

2.5 볼록 껍질 기반 부피 및 겹침 비율 산출

추출된 점군 데이터로부터 기하학적 부피를 계산하기 위해 MATLAB의 Convhulln 알고리즘을 적용하였다. 일반적으로 격자 점 개수를 기반으로 부피를 추정하는 수치적 적분 방식(Voxel counting)은 격자 해상도에 따라 경계면에서 오차가 발생할 수밖에 없다. 반면, Convhulln 알고리즘은 N차원 점 집합의 볼록 껍질을 계산하는 표준 알고리즘이며, 2차원 Quickhull 알고리즘을 다차원으로 확장한 형태로, 주어진 점 집합을 모두 포함하는 최소 부피의 볼록 다면체를 구성하는 면(Facet)의 집합을 반환한다. 수학적 원리는 다음과 같다. n 차원 유클리드 공간 R^n 상의 점 집합에 대하여, 볼록 껍질 $conv(P)$ 는 식 (7)과 같이 집합 P 내의 점들의 모든 볼록 결합으로 이루어진 집합으로 정의할 수 있다. 이 정의에 따라 볼록 껍질 내부의 임의의 두 점을 잇는 선분은 반드시 껍질 내부에 포함되며, 이는 레이다 탐지 영역과 같이 물리적으로 연속된 공간 체적을 기하학적으로 모델링하는데 적합하다[17].

$$conv(P) = \left\{ \sum_{i=1}^k \lambda_i p_i \mid \lambda_i \geq 0, \sum_{i=1}^k \lambda_i = 1 \right\} \quad (7)$$

여기서, $conv(P)$ 은 집합 P 의 볼록 껍질을 의미하며, 주어진 점들을 모두 포함하면서 그 점들을 둘러싸는 가장 작은 ‘볼록한 다면체’ 영역 자체를 말한다. λ_i 는 각 점에 부여된 가중치, p_i 는 집합 P 에 속한 각각의 점들을 의미하며, 점들에 각각 가중치를 곱해서 모두 더하게 되면 새로운 좌표들이 볼록 껍질 내부와 경계면을 채우게 된다. 모든 가중치(λ_i)

는 0보다 크거나 같아야 하며, 가중치가 음수가 되면 점들의 바깥쪽으로 영역이 발산할 수 있기 때문에 점들 안쪽 영역만 정의하기 위해 반드시 필요한 조건이다. 또한, 모든 가중치의 합은 1이 되어야만, 계산된 점들이 원래 점들 사이의 공간에 위치하게 된다.

Conv hull 알고리즘의 결과는 다면체의 외곽 면 정보이므로, 전체 부피 V 를 구하기 위해서 다면체 내부를 중첩되지 않는 사면체들로 분할하여 합산하는 과정이 필요하다. 임의의 기준점(v_{ref})을 설정하고, 다면체의 각 삼각형 면의 세 꼭짓점을 v_1, v_2, v_3 라고 할 때, 하나의 사면체 부피(V_{tetra})는 식 (8)과 같은 행렬식으로 산출된다.

$$V_{tetra} = \frac{1}{6} \left| \det \begin{pmatrix} x_1 - x_{ref} & x_2 - x_{ref} & x_3 - x_{ref} \\ y_1 - y_{ref} & y_2 - y_{ref} & y_3 - y_{ref} \\ z_1 - z_{ref} & z_2 - z_{ref} & z_3 - z_{ref} \end{pmatrix} \right| \quad (8)$$

이를 벡터 연산으로 간소화하면 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_{tetra} = \frac{1}{6} |(v_1 - v_{ref}) \cdot ((v_2 - v_{ref}) \times (v_3 - v_{ref}))| \quad (9)$$

여기서, 본 논문에서는 점군의 무게중심을 임의의 기준점(v_{ref})으로 사용하였다. 최종적인 전체 탐지 부피(V_{total})는 식 (10)과 같이, 다면체를 구성하는 모든 면 M 개에 대해 각 사면체 부피의 총합으로 결정된다.

$$V_{total} = \sum_{j=1}^M V_{tetra,j} \quad (10)$$

이 방식은 다수의 점으로 구성된 비정형 탐지 영역의 체적을 수치적으로 적분하는 것보다 기하학적으로 정밀하며, 특히 플랫폼 이동에 의해 형태가 왜곡된 중첩 영역의 부피를 산출하는 데 있어 높은 정확도를 제공한다. 식 (8) ~ (10)을 이용하여, 초기 유효 점군(S_{i0})과 이동 후 점군(S_{i1})의 외곽 경계를 감싸는 최소 블록 다면체 K 를 생성하고, 각 점 집

합의 분포를 통해 물리적 탐지 체적($V_{initial}$)을 산출하였다.

이후, 두 탐지 영역의 교집합 점군($S_{overlap}$)에 대해 블록 겹질을 구성하고, 그 내부를 M 개의 사면체로 분할 및 합산하여 겹치는 탐지 영역의 부피($V_{overlap}$)를 산출하였다. 그림 4는 초기 유효 점군(S_{i0}), 이동 후 점군(S_{i1}), 교집합 점군($S_{overlap}$)의 블록 겹질을 구성한 그림이다.

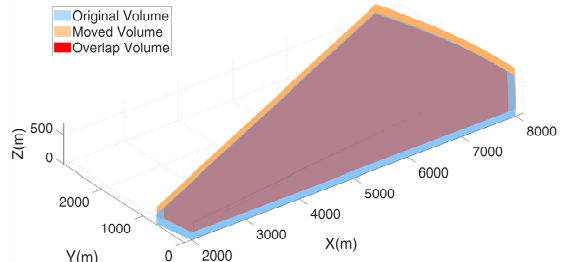


그림 4. 탐지 영역의 블록 겹질 구성

Fig. 4. Convex hull configuration of the detection area

최종적으로 초기 탐지 부피 대비 중첩 부피의 비율을 백분율로 환산하여 겹침 비율(Overlap ratio, η)을 도출하였다.

$$\eta = \frac{V_{overlap}}{V_{total}} \times 100(\%) \quad (11)$$

산출된 η 값은 레이다 플랫폼의 이동 속도와 시간에 따른 클러터맵의 데이터 신뢰도를 평가하는 정량적 지표로 활용되며, 이를 통해 최적의 갱신 주기를 결정할 수 있다.

IV. 실험 및 결과 분석

3.1 시나리오 정의

레이다 플랫폼의 시나리오는 표 1과 같이 3가지 섹터 그룹과 3가지 기동 케이스를 조합하여 시나리오를 구성하였다. 섹터별 플랫폼의 이동 방향과 좌표계 정의는 그림 5와 같다.

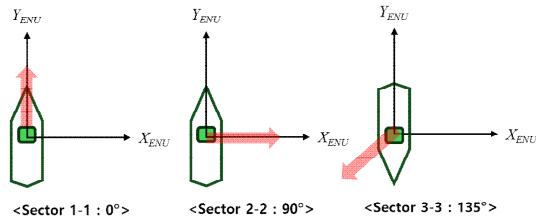


그림 5. 섹터별 플랫폼 이동 방향 및 좌표계 정의
Fig. 5. Defining the platform movement direction and coordinate system by sector

표 1. 레이더 플랫폼 기동 시나리오

Table 1. Radar platform maneuvering scenario

		Direction	Heading	Sector parameter		
				Az	EI	R
Sector 1	1-1	0°	+0°	5 ~	0 ~	1.5 ~
	1-2	90°	+0°	10°	3°	3.5km
	1-3	135°	-0°			
Sector 2	2-1	0°	+0°	5 ~	6 ~	1.5 ~
	2-2	90°	+0°	10°	10°	3.5km
	2-3	135°	-0°			
Sector 3	3-1	0°	+0°	5 ~	0 ~	10 ~
	3-2	90°	+0°	10°	3°	15km
	3-3	135°	-0°			

3.2 실험 결과 및 분석

3.2.1 [Sector 1] 분석 결과

근거리(1.5 ~ 3.5km) 환경인 Sector 1에서의 실험 결과, 함정의 기동 방향과 탐지 영역 방향 간의 기하학적 관계가 겹침 비율 유지에 결정적인 역할을 하는 것을 확인하였다.

첫째, 그림 6과 같이 이동 속도에 따른 겹침 비율의 감소 가속화를 확인하였다. 모든 기동 방향 조건에서 함정 속도가 10m/s에서 20m/s로 증가함에 따라, 겹침 비율의 시간당 감소 기울기가 가파르게 증가하는 경향을 보였다. 특히, 가장 취약한 전진 기동(1-1, 0°), 10m/s 속도의 경우 20초 경과 시점까지 29.98% 수준의 겹침률을 유지하며 완만한 감소세를 보였다. 그러나, 속도가 20m/s로 증가하자 동일 시점에서의 겹침 잔존율이 0%로 급락하여, 사실상 탐지 영역 간의 중첩이 완전히 소멸되는 현상이 관측되었다. 이는 고속 기동 상황에서는 클러터 맵의 데이터 유효 수명이 저속 기동 대비 현저히

단축됨을 시사한다. 본 논문에서는 갱신 주기 기준을 겹침률 80% 이하로 설정하였고, 아래 그림을 예시로 했을 때 10m/s로 기동 시 갱신 주기를 약 5s, 20m/s로 기동시 약 2.5s로 설정할 수 있다.

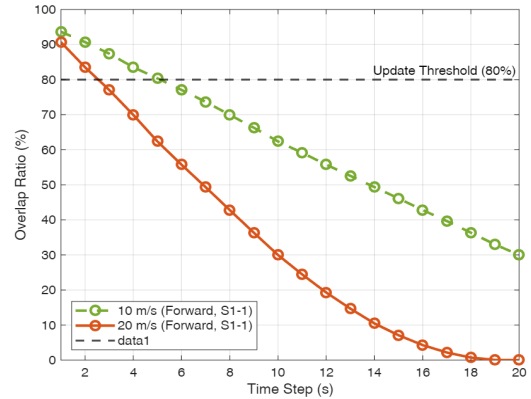


그림 6. 이동 속도에 따른 겹침 비율 감소율 비교 결과
Fig. 6. Comparison results of overlap ratio reduction rates according to movement speed

둘째, 이동 방향에 따른 안정성을 비교 분석한 결과, 함정 기동 방향과 탐지 영역 방향의 일치 여부가 핵심 변수임을 확인하였다. 속도 20m/s, 20초 경과 시점을 기준으로 겹침률 잔존량은 표 2와 같다. 기동 방향에 따른 탐지 영역의 겹침률을 그림 7~9에 나타내었다.

표 2. 기동 방향에 따른 섹터 1의 겹침률 결과

Table 2. Results of Sector 1 overlap rate according to operation direction

	Direction	Overlap ratio
Scenario 1-2	90°	55.61%
Scenario 1-3	135°	0.58%
Scenario 1-1	0°	0.05%

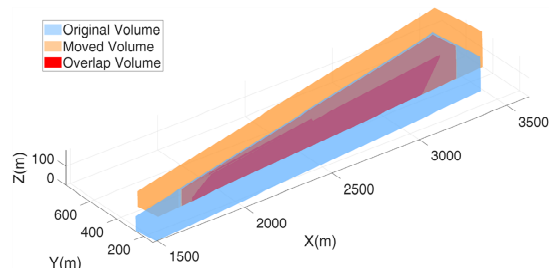


그림 7. (1-1) 전진기동(0°) 시 탐지 영역의 겹침 부피
Fig. 7. (1-1) Overlap volume of detection area after forward maneuver(0°)

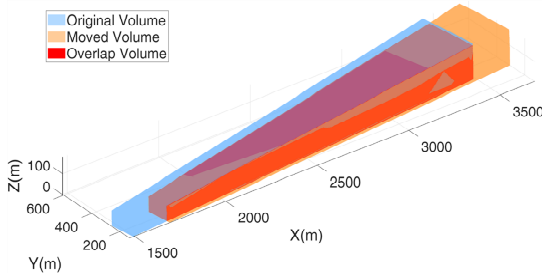


그림 8. (1-2) 측면기동(90°) 시 탐지 영역의 겹침 부피
Fig. 8. (1-2) Overlap volume of detection area after starboard maneuver(90°)

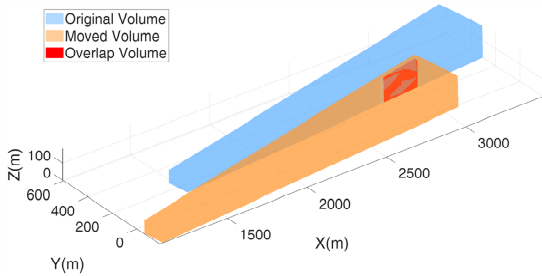


그림 9. (1-3) 대각기동(135°) 시 탐지 영역의 겹침 부피
Fig. 9. (1-3) Overlap volume of detection area after diagonal maneuver(135°)

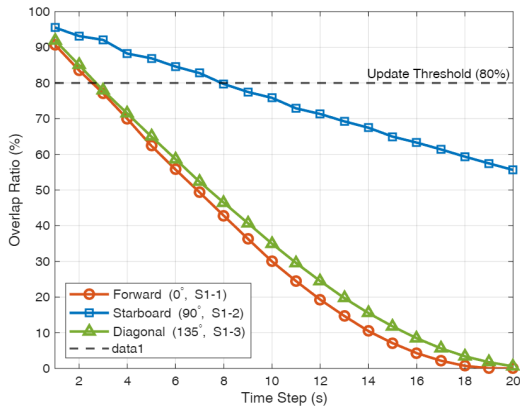


그림 10. 기동 방향에 따른 섹터 1의 겹침 비율 감소율 비교 결과
Fig. 10. Comparison results of the reduction rate in the overlap ratio of Sector 1 according to the operation direction

그림 10과 같이, 탐지 영역이 우현에 위치하는 상황에서 함정이 90° 방향으로 기동할 때 가장 높은 안정성을 보였다. 이는 함정의 이동 벡터가 탐지 영역의 거리 방향과 평행하게 작용하여, 이동 시에도 3차원 부피가 탐지 영역의 긴 축을 따라 중첩되

기 때문이다. 반면, 함정이 0° 방향으로 기동할 때는 겹침률이 가장 빠르게 소멸하여 0%에 수렴하였다. 이는 전진 기동이 우현을 향한 탐지 영역을 방위각 방향으로 가로지르는 형태가 되기 때문이다.

결론적으로, 측면 감시 중인 함정 레이더는 함정이 고속으로 전진 향해할 때 클러터맵의 데이터 유효성이 가장 취약해지므로, 이 구간에서의 갱신 주기를 최우선적으로 단축해야 한다.

3.2.2 [Sector 2] 분석 결과

동일한 근거리($1.5 \sim 3.5\text{km}$) 조건에서 고각을 기존 $0 \sim 3^\circ$ 에서 $6 \sim 10^\circ$ 로 상향 설정하여 실험한 결과, 고각의 변화가 3차원 겹침 비율의 감소율을 더욱 가속화시키는 것으로 분석되었다.

첫째, Sector 1과 Sector 2의 20m/s 기동 시 데이터를 분석한 결과, 그림 11과 같이 전반적으로 Sector 2의 겹침률 감소 속도가 더 빠르게 나타났다.

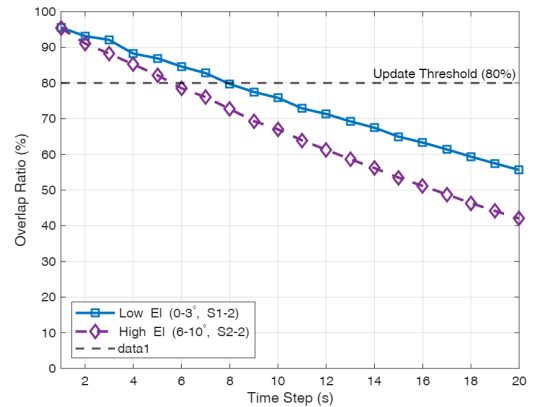


그림 11. 탐지 고각에 따른 겹침 비율 감소율 비교 결과
Fig. 11. Comparison results of overlap ratio reduction rates according to detection elevation

둘째, 기동 방향에 따른 유효성 순위는 유지되었으나, 측면 기동의 이점은 감소하였다. Sector 2에서도 Sector 1과 마찬가지로 표 3과 같이 측면 기동(90° , 2-2), 대각 기동(135° , 2-3). 전진 기동(0° , 2-1) 순의 안정성을 보였다. 하지만, 주목할 점은 가장 안정적이었던 측면 기동(2-2)이 저고각(1-2)일 때보다 겹침률 방어력이 약화되었다는 점이다. 저고각에서는 탐지 영역이 수평에 가까워 측면 이동 시

탐지 영역의 길이 방향을 따라 이동하는 효과가 컸으나, 고각이 높아지면 탐지 영역이 지면을 대각선으로 내려다보게 되므로, 함정이 수평으로 측면 이동하더라도 시선축과는 엇갈림각이 발생하게 된다. 이로 인해 겹침률이 더 빠르게 하락하는 현상이 관측되었다.

표 3. 기동 방향에 따른 섹터 2의 겹침률 결과
Table 3. Results of Sector 2 overlap rate according to operation direction

	Direction	Overlap ratio
Scenario 2-2	90°	42.02%
Scenario 2-3	135°	0.364%
Scenario 2-1	0°	0%

셋째, 전진 기동(2-1)시의 취약성은 여전히 치명적이다. 우현을 지향하는 탐지 영역에 대해 전진 기동을 수행할 때, Sector 2 역시 매우 빠른 속도로 0%에 수렴하였다. 이는 고각의 고저와 상관없이, 방위각 방향을 가로지르는 기동이 클러터맵 유지에 가장 큰 위험임을 재확인시켜 준다. 기동 방향에 따른 탐지 영역의 겹침률을 그림 12, 13, 14에 나타내었다.

결론적으로, 대공 표적 탐지 등을 위해 고각을 높여 운용할 경우, 클러터맵의 기하학적 민감도가 증가하여 데이터 유효 시간이 저고각 모드 대비 더욱 짧아진다. 따라서, 이 경우 전방위적인 갱신 주기 단축이 필요하며, 특히 측면 기동 시에도 갱신 가중치를 높이는 보수적인 운용 전략이 요구된다.

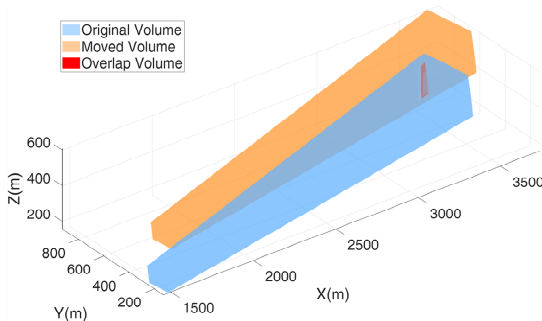


그림 12. (2-1) 전진기동(0°) 시 탐지 영역의 겹침 부피
Fig. 12. (2-1) Overlap volume of detection area after forward maneuver(0°)

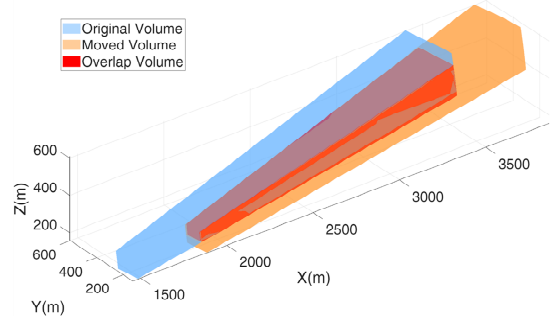


그림 13. (2-2) 측면기동(90°) 시 탐지 영역의 겹침 부피
Fig. 13. (2-2) Overlap volume of detection area after starboard maneuver(90°)

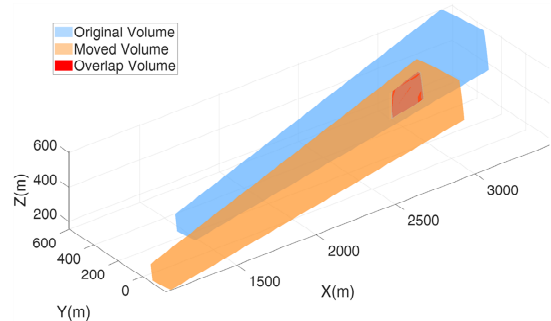


그림 14. (2-3) 대각기동(135°) 시 탐지 영역의 겹침 부피
Fig. 14. (2-3) Overlap volume of detection area after diagonal maneuver(135°)

3.2.3 [Sector 3] 분석 결과

본 시나리오에서는 탐지 고각을 저고각(0~3°)으로 고정된 상태에서, 탐지 거리를 10~15km로 확장하여 거리 변수가 3차원 겹침률에 미치는 영향을 분석하였다.

첫째, 그림 15와 같이 거리 증가에 따라 전반적인 안정성이 향상됨을 확인하였다. 가장 취약한 기동 조건인 전진 기동의 20m/s 실험 데이터를 비교할 때 이러한 효과가 극명하게 드러난다. 근거리(1-1)에서는 20초 만에 겹침률이 0.05%로 급락하여 탐지 영역이 완전히 소실되었으나, 원거리(3-1)에서는 동일 시간 경과 후에도 63.86%의 잔존율을 보였다. 이는 탐지 거리가 증가함에 따라, 함정의 이동 속도가 유발하는 시선각 변화율이 반비례하여 감소하기 때문이다. 즉, 원거리에서는 레이더 빔의 물리적인 폭이 이미 충분히 확장되어 있어, 함정이 빔을

가로지르더라도 탐지 영역을 이탈하는 비율이 근거리 대비 현저히 낮아짐을 수치적으로 증명한다.

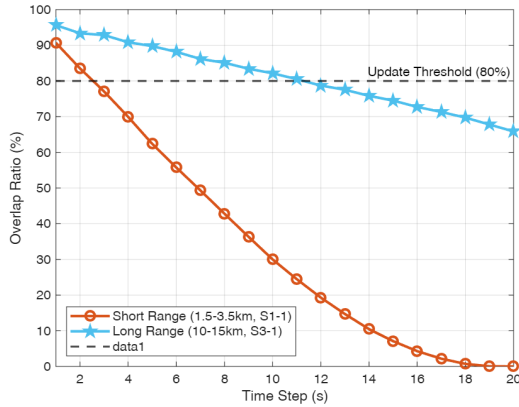


그림 15. 탐지 거리에 따른 겹침 비율 감소율 비교 결과

Fig. 15. Comparison results of overlap ratio reduction rates according to detection range

표 4. 기동 방향에 따른 섹터 3의 겹침률 결과

Table 4. Results of Sector 3 overlap rate according to operation direction

	Direction	Overlap ratio
Scenario 3-2	90 °	84.94%
Scenario 3-3	135 °	67.54%
Scenario 3-1	0 °	65.86%

둘째, 기동 방향에 따른 안정성 순위는 표 4와 같이 근거리 환경과 동일하게 일관성을 유지하였다. 이 결과를 통해 빔의 지향 방향과 기동 벡터의 직교성이 겹침률을 결정하는 가장 지배적인 기하학적 요인임을 재확인하였다. 거리가 멀어지더라도, 좁은 방위각 빔폭을 가로지르는 전진기동(3-1)이 빔의 길이 방향을 따라 이동하는 측면 기동(3-2)보다 겹침 손실이 더 크게 발생한다는 물리적 특성은 변하지 않는다. 기동 방향에 따른 탐지 영역의 겹침률을 그림 16, 17, 18에 나타내었다.

결론적으로, 탐지 거리가 10km 이상인 원거리 감시 구역에서는 클러터맵의 공간적 겹침률이 기동 방향과 무관하게 65% 이상 유지될 정도로 높은 안정성을 확보한다. 따라서 근접 방위 구역 대비 클러터맵 갱신주기를 대폭 연장하여 시스템 연산 부하를 줄이는 자원 할당 전략이 타당함을 정량적으로 입증하였다. 단, 원거리라 하더라도 전진기동을 수

행할 때는 측면기동 시보다 겹침률 하락폭이 약 20% 더 크므로, 침로에 따른 미세한 갱신 가중치 보정이 요구된다.

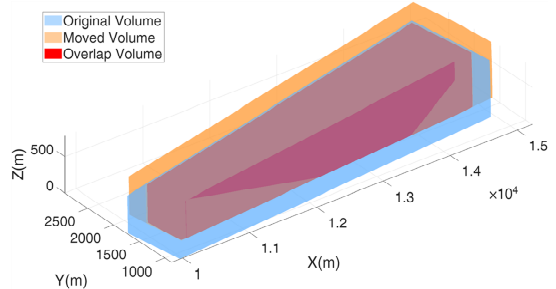


그림 16. (3-1) 전진기동(0°) 시 탐지 영역의 겹침 부피

Fig. 16. (3-1) Overlap volume of detection area after forward maneuver(0°)

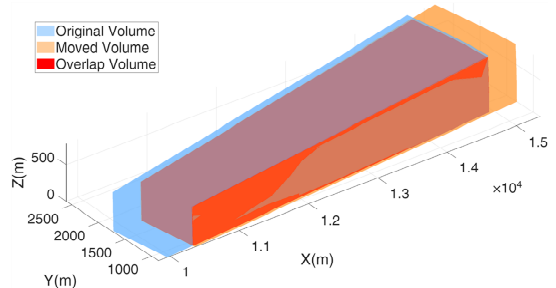


그림 17. (3-2) 측면기동(90°) 시 탐지 영역의 겹침 부피

Fig. 17. (3-2) Overlap volume of detection area after starboard maneuver(90°)

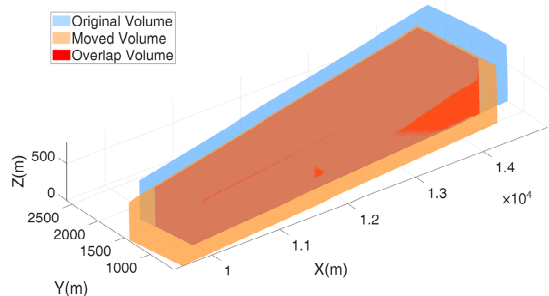


그림 18. (3-3) 대각기동(135°) 시 탐지 영역의 겹침 부피

Fig. 18. (3-3) Overlap volume of detection area after diagonal maneuver(135°)

V. 결 론

본 논문에서는 이동하는 레이더 플랫폼에서 클러

터를 효과적으로 억제하기 위한 핵심 지표로서, 3차원 탐지 영역의 기하학적 겹침 비율(Overlap ratio) 산출 기법을 제안하고 기동 시나리오별 민감도를 정량적으로 분석하였다. 제안된 기하 해석 모델은 탐지 영역을 3차원 점군으로 이산화하고 볼록 껍질(Convex hull) 알고리즘을 통해 체적을 산출함으로써, 기존 2차원 평면 기반 분석이 가진 공간적 모호성을 극복하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

첫째, 기동 벡터와 탐지 영역 각도의 상관관계가 클러터맵의 유효 수명을 결정하는 지배적 요인임을 확인하였다. 특히 우현을 지향하는 측면 감시 상황에서 함정이 전진 기동할 경우, 방위각 폭을 가로지르는 기하학적 특성으로 인해 겹침률이 가장 급격히 감소함을 입증하였다. 이는 함정의 주된 항해 방식인 전진 기동 시 클러터맵 데이터의 신뢰도가 빠르게 저하될 수 있음을 시사한다.

둘째, 탐지 거리에 따른 기하학적 안정성의 효과를 확인하였다. 근거리 영역에서는 전진기동 시 20초만에 겹침률이 0%로 급락하여 데이터가 소멸했으나, 원거리 영역에서는 동일 조건에서도 최소 65.8%의 높은 잔존율을 보였다. 이는 원거리 감시 구역에서는 플랫폼이 고속 기동하더라도 클러터맵의 신뢰도가 장시간 유지됨을 정량적으로 입증하는 결과이다.

셋째, 고각 상승에 따른 겹침률 저하 현상을 확인하였다. 대공 표적 탐지를 위해 고각을 높일 경우, 저고각 탐색 시보다 클러터맵의 유효 시간이 단축됨을 확인하였다.

결론적으로, 본 연구에서 제안한 겹침률 분석 모델은 함정의 속도, 방향, 탐지 거리 및 고각을 실시간으로 반영하여 클러터맵의 최적 갱신 시점을 결정할 수 있는 정량적 근거를 제공한다. 이는 제한된 레이더 신호처리 자원을 효율적으로 분배하면서도 고속 기동 환경에서의 표적 탐지 성능을 보장하는데 기여할 것이다.

본 연구의 성과를 바탕으로 향후에는 제안된 3차원 기하학적 해석 모델을 실제 해상 환경의 복잡한 동적 특성을 포괄하도록 고도화할 계획이다. 구체적으로는 해상 상태에 따른 함정의 6자유도 요동

을 추가로 반영하여, 선형적인 병진 운동뿐만 아니라 회전 변환이 탐지 체적의 정합성에 미치는 영향을 규명할 것이다. 또한, 본 연구에서 도출된 적용형 갱신 전략을 실제 레이더의 CFAR 신호처리 과정에 적용하여, 실측 데이터 기반의 탐지 확률과 오경보율 성능 변화를 정량적으로 검증할 예정이다.

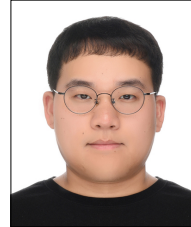
References

- [1] M. I. Skolnik, "Radar Handbook, 3rd Ed", McGraw-Hill Education, 2008.
- [2] K. Ward, R. Tough, and S. Watts, "Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance", Institution of Engineering and Technology(IET), 2013.
- [3] M. Greco, F. Bordonì, and F. Gini, "X-band sea-clutter nonstationarity: influence of long waves", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 29, No. 2, pp. 269-283, Apr. 2004. <https://doi.org/10.1109/JOE.2004.828548>.
- [4] S. Haykin, B. W. Currie, and S. B. Kesler, "Maximum-entropy spectral analysis of radar clutter", Proc. of the IEEE, Vol. 70, No. 9, pp. 953-962, Sep. 1982. <https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12426>.
- [5] S. Watts, "Radar detection prediction in sea clutter using the compound K-distribution model", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 48, No. 2, pp. 1486-1498, Jan. 2012. <https://doi.org/10.1049/ip-f-1.1985.0115>.
- [6] R. Nitzberg, "Clutter map CFAR analysis", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 22, No. 4, pp. 419-421, Jul. 1986. <https://doi.org/10.1109/TAES.1986.310777>.
- [7] A. Farina and F. A. Studer, "Radar Data Processing: Introduction and Tracking", Research Studies Press, 1985.
- [8] M. A. Richards, "Fundamentals of Radar Signal Processing, 2nd Ed", McGraw-Hill Education, 2014.

- [9] W. L. Melvin, "A STAP overview", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol. 19, No. 1, pp. 19-35, Jan. 2004. <https://doi.org/10.1109/MAES.2004.1263229>.
- [10] R. Klemm, "Principles of Space-Time Adaptive Processing, 3rd Ed", Institution of Engineering and Technology (IET), 2002.
- [11] E. Conte, A. D. Maio, and C. Gardi, "Statistical analysis of real clutter at different range resolutions", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 40, No. 3, pp. 903-918, Jul. 2004. <https://doi.org/10.1109/TAES.2004.1337463>.
- [12] C. B. Barber, D. P. Dobkin, and H. Huhdanpaa, "The quickhull algorithm for convex hulls", ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), Vol. 22, No. 4, pp. 469-483, Dec. 1996. <https://doi.org/10.1145/235815.235821>.
- [13] H. Edelsbrunner and E. P. Mucke, "Three-dimensional alpha shapes", ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 13, No. 1, pp. 43-72, Jan. 1994. <https://doi.org/10.1145/174462.156635>.
- [14] Y. Huang, Y. Luan, Y. Dong, and H. Ding, "Radar Target Detection Based on Linear Fusion of Two Features", Sensors, Vol. 25, No. 17, Art no. 5436, Sep. 2025. <https://doi.org/10.3390/s25175436>.
- [15] X. Peng, Y. Hu, T. Liu, and Y. Wu., "Stability-Enhanced Human Activity Recognition With a Compact Few-Channel mm-Wave FMCW Radar", IEEE Transactions on Radar Systems, pp. 360-378, Jan. 2025. <https://doi.org/10.1109/TRS.2025.3539289>.
- [16] S. Chen, B. Liu, C. Feng, and C. Vallespi, "3D Point Cloud Processing for Real-Time Autonomous Driving: Impacting Map Creation, Localization, and Perception", IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 38, No. 1, pp. 68-86, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1109/MSP.2020.2984780>.
- [17] S. Boyd and L. Vandenberghe, "Convex Optimization", Cambridge University Press, 2004.

저자소개

윤 주 열 (Juyeol Yun)



2019년 2월 : 세종대학교
항공우주공학과(공학사)
2021년 2월 : 세종대학교
항공우주공학과(공학석사)
2021년 9월 ~ 현재 :
국방과학연구소 연구원
관심분야 : 레이더 신호처리 및
데이터 처리, 표적 추적처리