

높은 지표각에서 해상 클러터 환경을 고려한 해상 표적 영상 생성 및 탐지

Maritime Target Image Generation and Detection in a Sea Clutter Environment at High Grazing Angle

진승현 · 이경민 · 우선결* · 김윤진* · 권준범* · 김홍락* · 김경태

Seung-Hyeon Jin · Kyung-Min Lee · Seon-Keol Woo* · Yoon-Jin Kim* ·
Jun-Beom Kwon* · Hong-Rak Kim* · Kyung-Tae Kim

요 약

탄도 미사일은 상공에서 자유 낙하하며 표적을 요격하기 때문에 탄도 미사일에 부착되는 탐색기는 높은 지표각에서 해상 클러터 영향을 받게 되며, 그 결과 탐색기의 탐지 성능이 급격히 낮아지게 된다. 이를 해결하기 위해서는 다양한 시나리오 기반의 시뮬레이션들을 통한 해상 표적 탐지 성능 분석이 반드시 필요하다. 따라서 본 논문에서는 실제와 유사한 높은 지표각의 해상 클러터 수신 신호를 모델링한 후, 이를 신호 대 클러터 비에 따라 해상 표적 수신 신호와 합성하여 2차원 레이더 영상을 생성한다. 이후, 레이더 영상에 2차원 CA-CFAR 탐지기를 적용하여 다양한 시나리오에서 해상 표적 탐지 성능을 분석하였다. CAD 모델과 전자기 수치해석 도구를 사용한 시뮬레이션 결과, 지표각과 방위각에 따라 해상 표적의 탐지 여부가 다르게 나타남을 확인할 수 있었다.

Abstract

When a free-falling ballistic missile intercepts a maritime target in a sea clutter environment at high grazing angle, detection performance of the ballistic missile's seeker can be rapidly degraded by the effect of sea clutter. To solve this problem, it is necessary to verify the performance of maritime target detection via simulations based on various scenarios. We accomplish this by applying a two-dimensional cell-averaging constant false alarm rate detector to a two-dimensional radar image, which is generated by merging a sea clutter signal at high grazing angle with a maritime target signal corresponding to the signal-to-clutter ratio. Simulation results using a computer-aided design model and commercial numerical electromagnetic solver in various scenarios show that the performance of maritime target detection significantly depends on the grazing and azimuth angles.

Key words: High Grazing Angle, Sea Clutter, Radar Imaging, Target Detection

I. 서 론

레이더는 멀리 떨어진 표적을 탐지하기 위해 전자기파

「본 연구는 (주)LIG넥스원의 지원(계약번호: LIGNEX1-2019-0065(00))을 받아 수행하였습니다.」

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

*(주)LIG넥스원(LIG Nex1)

· Manuscript received March 25, 2019 ; Revised April 22, 2019 ; Accepted April 23, 2019. (ID No. 20190325-028)

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

를 안테나로 방사시킨 다음 표적에 맞고 반사된 신호를 수신하여 표적의 위치와 속도를 판별할 수 있다. 레이다는 광학 센서와 다르게 기상 상황의 영향을 받지 않고 표적의 정보를 알 수 있다는 점에서 가치를 높게 평가받고 있다. 이러한 장점으로 인해 국방 분야의 무기 체계에 탑재되어 핵심적인 역할을 하고 있다.

최신의 미사일들은 탐색기에 장착되는 레이다를 이용해 해상 표적의 거리 및 각도 정보를 획득하고, 해상 표적을 향해 날아간다. 이때, 순항 미사일(cruise missile)은 해수면에 근접해 낮게 비행하는 씨 스킴밍(sea skimming)을 통해 표적에 접근한다. 이로 인해 낮은 지표각(grazing angle)에서 해상 클러스터가 표적 신호와 함께 탐색기에 수신된다. 낮은 지표각에서 해상 클러스터 신호는 주로 다중 경로(multi-path)에 의한 신호와 해상 스파이크(spike)에 의한 신호로 구성되어 있다. 이러한 낮은 지표각에서 다중 경로 신호와 해상 스파이크 신호는 탐색기가 표적을 탐지하는데 있어 중요한 방해 요소이다. 이러한 문제의 해결을 위해 낮은 지표각에서 해상 클러스터가 탐색기에 미치는 영향에 관한 연구는 오랫동안 많이 진행되어 왔다^[1].

반면에, 탄도 미사일(ballistic missile)은 상공으로 높이 비행한 뒤 자유 낙하하며 표적을 타격한다. 최근 탄도 미사일에 탐색기를 장착하여 해상 표적을 탐지, 추적하기 위한 연구가 수행되고 있다. 이러한 탄도 미사일이 해상 표적을 탐지할 때, 탐색기는 높은 지표각에서 해상 클러스터의 영향을 받게 된다. 높은 지표각에서 해상 클러스터 신호에는 다중 경로 및 해상 스파이크에 의한 성분들은 거의 포함되어 있지 않다. 일반적으로 높은 지표각에서는 낮은 지표각에서의 경우와 비교할 때, 해상 클러스터의 후방 산란 계수 값이 매우 큰 특징을 가진다. 이 때문에 탄도 미사일에 장착된 탐색기 입장에서 보면, 표적 신호보다 해상 클러스터에 의한 수신 신호가 훨씬 커지는 경우가 많이 발생하며, 이로 인해 표적을 탐지하지 못하는 경우가 발생한다.

본 논문에서는 위와 같은 높은 지표각 상황에서 탄도 미사일에 장착된 탐색기가 해상 표적을 탐지하는 시나리오를 모델링하여 시나리오별로 탐지 성능을 계산하고 분석한다. 이를 위하여 높은 지표각에서 바라보는 클러스터의 통계적 특성을 모델링하고, 실제 해상 클러스터와 유사한 클러스터 신호를 생성하는 연구를 수행하였다. 또한, 수치

해석 기법을 기반으로 해상 표적의 전자기 산란파를 계산하였다. 그리고 앞서 모델링된 해상 클러스터 신호와 해상 표적 신호를 합성하여 신호처리 한 후 레이다 영상을 제작하였다. 마지막으로 해상 표적의 탐지 여부를 셀 평균 균일 오경보율(cell averaging constant false alarm rate: CA CFAR) 탐지 기법을 사용하여 판단하였다.

II. 해상 클러스터 모델링

실제와 유사한 해상 클러스터를 모델링하기 위하여 1) 평균 후방 산란 계수(mean backscatter), 2) 클러스터 크기 분포(amplitude distribution), 그리고 3) 도플러 스펙트럼(Doppler spectrum)을 고려한다^[2]. 이때, 평균 후방 산란 계수는 해상 표적과 클러스터간의 신호 대 클러스터 비율(Signal to Clutter Ratio: SCR)을 정의하기 위해 사용되며, 클러스터 크기 분포와 도플러 스펙트럼은 거리 및 도플러 주파수에 따른 해상 클러스터 신호의 변화를 각각 모델링하기 위해 사용된다.

2-1 평균 후방 산란 계수 σ_0

평균 후방 산란 계수 σ_0 는 해수면의 단위 면적 당 레이다 반사 단면적(Radar Cross Section: RCS)을 의미한다. 이때 σ_0 는 지표각이나 해수면의 거칠기 등 여러 요인에 의해 영향을 받는다. 해수면이 잔잔한 상태에서는 정반사(specular return)가 발생하여 클러스터 수신 파워가 낮아지고, 해수면이 거친 상태에서는 전방향 산란(diffuse scattering)이 발생함으로 인해 상대적으로 높은 클러스터 파워 수신 신호가 생긴다^[2]. 해수면의 거친 정도를 표현하기 위해서 해상 상태(sea state)^[3]를 정의하고, 그에 따른 파도 높이, 풍속 등을 결정하였다(표 1).

일반적으로 평균 후방 산란 계수 σ_0 을 계산하기 위한

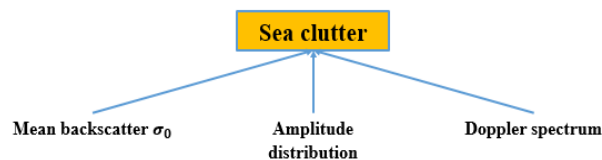


그림 1. 해상 클러스터 모델링을 위한 구성 요소

Fig. 1. Sea clutter components.

표 1. 해상 상태에 의한 파도 높이 및 풍속
Table 1. Wave height and wind speed by sea state.

Sea state	Description	Wave height [m]	Wind speed [m/s]
1	Smooth	0~0.3	0~3.1
2	Slight	0.3~0.9	3.1~6.2
3	Moderate	0.9~1.5	6.2~7.7
4	Rough	1.5~2.4	7.7~10.3
5	Very rough	2.4~3.7	10.3~12.9
6	High	3.7~6.1	12.9~15.4
7	Very high	6.1~12.2	15.4~25.7
8	Precipitous	12.2 ~	25.7 ~

기법으로는 나단슨(Nathanson) 기법^[4]과 올라비(Ulaby) 기법^[2]이 존재한다. 나단슨 실측 데이터를 이용하여 만든 나단슨 기법의 경우, 낮은 지표각에서는 σ_0 가 잘 추정되지만, 높은 지표각에서는 과소추측(underestimated)하게 되어 실제 클러터 데이터의 후방 산란 값과 달라진다. 반면에, 올라비 기법은 풍속 U , 지표각 θ , 방위각 ϕ 모두를 고려하여 평균 후방 산란 계수 σ_0 를 계산하게 된다. 그중에서 호주의 국방과학기술그룹(DSTO)에서 제시한 이미징 레이다 시스템 그룹(IRSG) 모델^[5]은 360도 전방위에 대해 σ_0 를 계산할 수 있으며, 30° 이상의 높은 지표각에 대해서도 정확한 결과를 제공한다.

IRSG 모델을 이용한 평균 후방 산란 값 $\sigma_0(\theta, \phi, U)$ 을 구하기 위해서는 다음과 같은 과정을 진행한다. 우선, 현재 레이다 송신 전파의 편파(polarization)를 정한 뒤에 그에 맞는 계수 값 b_0, b_1, b_2 를 선택한다^[5]. 선택된 b_0, b_1, b_2 를 대입하여 맞바람, 횡바람, 순바람에 맞는 $\sigma_u^0, \sigma_c^0, \sigma_d^0$ 값을 구한다. 계산 식은 식 (1)과 같다.

$$\sigma_0(\theta, U)_{dB} = b_0 + b_1\theta + b_2\log_{10} U \quad (1)$$

계산된 $\sigma_u^0, \sigma_c^0, \sigma_d^0$ 를 식 (2)~식 (4)에 대입하여 a_0, a_1, a_2 를 구하고, 최종적으로 식 (5)를 이용해 평균 후방 산란 계수 σ_0 를 구하게 된다.

$$a_0 = \frac{\sigma_u^0 + 2\sigma_c^0 + \sigma_d^0}{4} \quad (2)$$

$$a_1 = \frac{\sigma_u^0 - \sigma_d^0}{2} \quad (3)$$

$$a_2 = \frac{\sigma_u^0 - 2\sigma_c^0 + \sigma_d^0}{4} \quad (4)$$

$$\sigma_0 = a_0 + a_1\cos\phi + a_2\cos(2\phi) \quad (5)$$

2.2 클러터 크기 분포

클러터 크기 분포는 거리에 따른 해상 클러터 신호의 크기변화를 모델링하기 위한 통계적 모델이며, 주로 K 확률분포를 사용하여 추정된다^[6]. K 분포는 느리게 변화하는 요소와 빠르게 변화되는 요소로 구성이 되는데, 느리게 변화하는 요소는 국부 평균 레벨(local mean level)이라 불리며, 전체적인 해상 클러터 크기를 결정한다. 빠르게 변화하는 요소는 스펙클(speckle)이라 불리며, 거친 표면의 반사로 인해 발생하는 산재된 점의 형태를 의미한다. K 분포는 느리게 변화하는 요소를 루트 감마 분포(root gamma distribution)로 식 (6)과 같이 표현한 후, 발생한 국부 평균 레벨에 의해 스펙클이 나타날 확률로 레일레이 분포(Rayleigh distribution)를 식 (7)과 같이 정의한다.

$$p(y) = \frac{2b}{\Gamma(\nu)} (by)^{2\nu-1} \exp(-b^2y^2) \quad (6)$$

$$p(x|y) = \frac{\pi x}{2y^2} \exp\left(-\frac{\pi x^2}{4y^2}\right) \quad (7)$$

식 (6)에서 ν 는 형상 파라미터(shape parameter)이며, b 는 중간 스케일 파라미터(intermediate scale parameter), $\Gamma(\cdot)$ 는 감마 함수이다. K 분포는 식 (7)을 y 에 대해서 적분한 식으로 최종적으로 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} p(x) &= \int_0^\infty p(x|y)p(y)dy \\ &= \frac{2c}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{cx}{2}\right)^\nu K_{\nu-1}(cx) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 $K_{\nu-1}$ 는 베셀 함수이며, c 는 스케일 파라미터이다. K 분포를 사용한 클러터 크기 추정은 낮은 지표각에서는 정확하지만 높은 지표각에서는 이산적인 스파이크로 인해 실측 데이터와 맞지 않으며, 이를 개선시키

기 위해 KK 분포를 사용한다^[7]. KK 분포는 해수면 산란 성분을 K 분포로 표현한 식과 이산 스파이크 성분을 K 분포로 표현한 식을 혼합시킨 확률분포 함수로 식 (9)와 같이 나타낸다.

$$p(x) = (1 - k)p_1(x; \nu, \sigma) + kp_2(x; \nu_{sp}, \sigma_{sp}) \quad (9)$$

p_1, p_2 는 해수면 산란, 이산적인 스파이크의 K 분포를 나타내며, ν 는 형상 파라미터, σ 는 평균 세기, k 는 클러스터 반사에 대해 스파이크의 비중을 나타내는 가중치이다. 각 파라미터 값에 따라 KK 확률분포 함수의 모양도 바뀌게 된다(그림 2~그림 4).

스케일 파라미터 c , 형상 파라미터 ν , 스파이크 K 분포의 가중치 k , 스파이크와 해수면 모델의 세기 비율 ρ 을 입력으로 넣어 KK 확률분포 함수를 만든 뒤, 각 클러스터 세기가 가지는 확률값만큼 클러스터 신호를 거리 축으로 생성한다. 이를 통해 통계적인 확률분포를 기반으로 높은 지표각에서 수신된 클러스터 신호를 표현하였다(그림 5).

2-3 도플러 스펙트럼

도플러 스펙트럼은 도플러 주파수에 따른 해상 클러스터 신호의 변화를 모델링하기 위한 방법이다. 일반적으로 해상 클러스터의 도플러 천이는 지표각이 증가할수록 작게 나타난다^[8]. 또한, 도플러 대역폭은 레이다 동작 주파수가

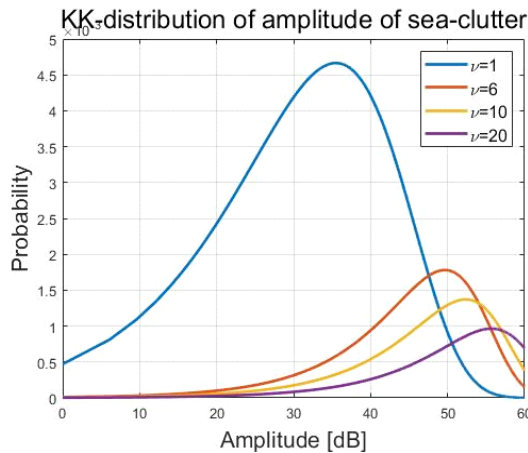


그림 2. 형상 파라미터에 따른 KK 분포의 변화
Fig. 2. Variation of KK distribution according to shape parameter.

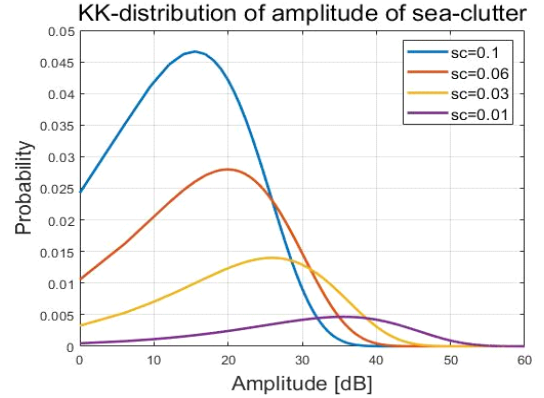


그림 3. 스케일 파라미터에 따른 KK 분포의 변화
Fig. 3. Variation of KK distribution according to scale parameter.

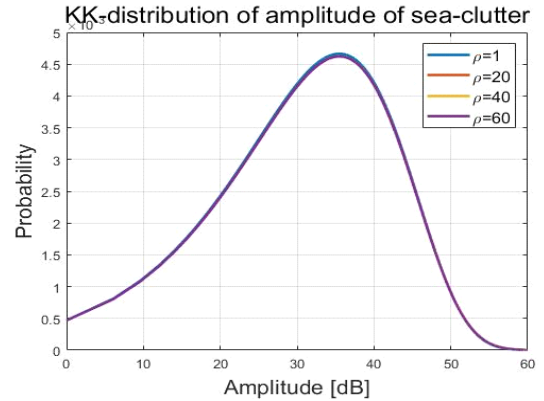


그림 4. K분포의 세기 비율에 따른 KK 분포의 변화
Fig. 4. Variation of KK distribution according to mean intensity ratio.

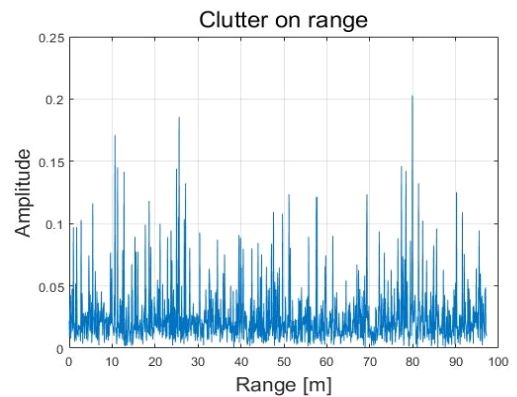


그림 5. 거리 축에 따른 해상 클러스터 신호
Fig. 5. Sea clutter signal along range axis.

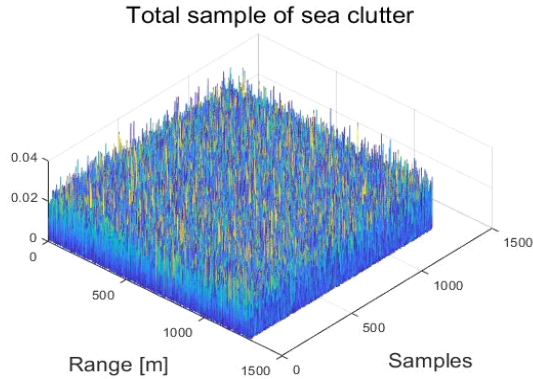


그림 6. 해상 클러터의 레이더 영상
Fig. 6. Radar image of sea clutter.

올라가면서 작아지며, 맞바람에서 가장 넓은 대역폭을 가지게 된다^[9]. 하지만 탄도 미사일의 경우, 고도가 높고 속도가 빠르므로 해상 클러터로 인한 도플러 스펙트럼이 거의 나타나지 않게 된다. 따라서 본 논문에서는 클러터 세기에 $-\pi$ 부터 π 까지의 균일 분포 위상을 부여하여 최종적으로 클러터의 레이더 영상을 만든다(그림 6).

III. 해상 표적 레이더 영상 형성

본 절에서는 앞서 언급한 해상 클러터의 레이더 영상에 해상 표적의 레이더 영상을 합성하기 위하여, 수치해석 계산을 통해 해상 표적 신호를 획득한 후, SCR에 따라 해상 표적 신호 세기를 조절하고 합성한다.

먼저 해상 표적 신호를 획득하기 위해 특정 지표각에서 관측 각도 별로 레이더 신호가 수신됨을 가정한다(그림 7). 이때 특정 지표각의 관측 각도 ϕ 에서 표적이 가지는

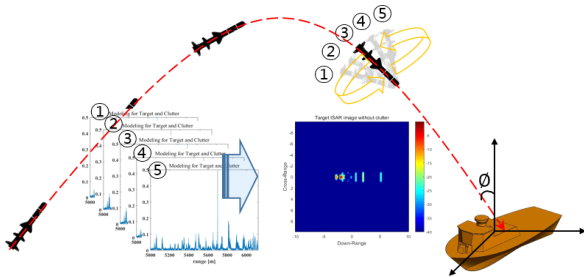


그림 7. 표적 레이더 영상 형성을 위한 기하학적 개념도
Fig. 7. Geometric concept for target radar imaging.

전자파 산란 값이 필요하며, 이는 여러 변수가 고려되는 복합적인 값이다. 표적의 전자파 산란 값을 실제 환경과 유사한 값으로 분석하기 위해 해상 표적의 캐드(computer aided design: CAD) 파일을 메싱(meshing)하여 수치해석 기법으로 계산한다.

다음으로 클러터 환경을 고려한 해상 표적의 레이더 영상을 만들기 위해서는 표적 신호와 클러터 신호의 합성이 필요하다. 하지만 수치해석을 통해 얻은 표적의 전자파 산란 신호 $E_s(f, \Omega)$ 는 주파수와 관측 각도에 따른 복소수 값으로 이루어져 있으며, 해상 클러터의 레이더 영상은 그림 6과 같이 거리별 복소수를 가지는 신호들로 구성되어 있다. 두 신호의 도메인이 서로 맞지 않으므로 표적 신호 데이터에 1차원 역 푸리에 변환을 시행하여 주파수 축을 거리 축으로 변환한다(그림 8).

1차원 역 푸리에 변환을 시행하고 나면 관측 각도별로 거리에 대한 신호가 만들어지고, 이는 생성된 클러터의 도메인과 일치하므로 합성할 수 있다. 하지만 클러터 신호와 표적 신호 간에 SCR이 맞춰지지 않았기 때문에 신호 세기를 조절하는 과정을 거쳐야 한다.

SCR을 구하기 위해서는 각 관측 각도별 표적 신호의 RCS σ_t 와 클러터의 평균 후방 산란 계수 σ_0 , 레이더가 바라보는 영역의 넓이 A 가 필요하다. 세 가지의 변수를 이용해 식 (10)과 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$SCR = \frac{\sigma_t}{\sigma_0 A} = \frac{P_t}{P_c} \quad (10)$$

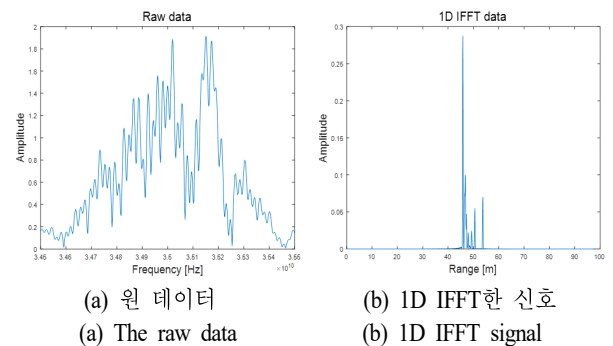


그림 8. 원 데이터에서 주파수 축으로 1D IFFT한 신호
Fig. 8. 1D IFFT signal from the raw data on the frequency axis.

식 (10)에 의해 생성된 클러터 신호의 파워 P_c 와 표적 신호의 파워 P_t 도 SCR의 비율을 따르기 때문에 모델링된 클러터 신호에 맞춰 표적 신호 세기를 조절하는 것이 가능하다.

마지막으로 해상 표적의 레이더 영상을 생성하기 위하여, 신호 세기가 조절된 표적 신호를 관측 각도에 대해 1차원 역 푸리에 변환을 한다. 그리하여 표적 신호의 도메인은 거리 및 관측 각도 영역에서 거리와 횡 거리(cross range) 영역으로 변환되며, 모델링된 클러터 신호와 합쳐 클러터 신호가 고려된 레이더 영상을 만들 수 있다^[10]. 영상의 동적 영역(dynamic range)을 조절한 후, 클러터 영향을 배제한 영상과 해상 클러터를 추가한 영상은 각각 그림 9 및 그림 10과 같다.

IV. 해상 표적 탐지

클러터 신호 영향이 고려된 해상 표적의 레이더 영상이 만들어지고 나면 영상에서 해상 표적의 탐지 여부에 대해 판별하여야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 2차원 CA-CFAR 알고리즘을 사용하였다^[11].

표적 신호의 탐지는 레이더 신호가 임계값(threshold)으로 판별하게 되는데, 해상 클러터가 존재하는 환경에서 올바른 표적 신호를 탐지하기 위해서는 적절한 임계값을

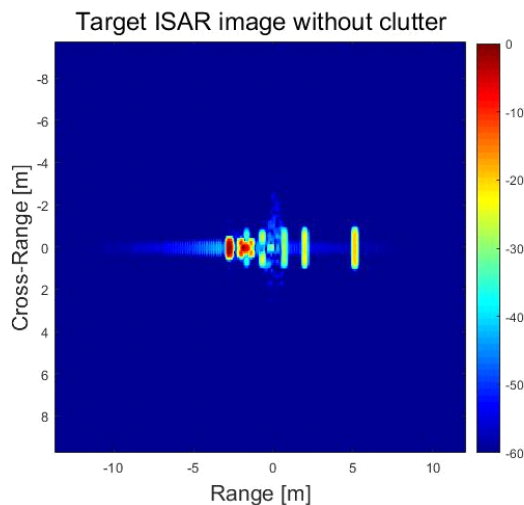


그림 9. 클러터 영향이 배제된 표적 레이더 영상
Fig. 9. Target radar image without clutter.

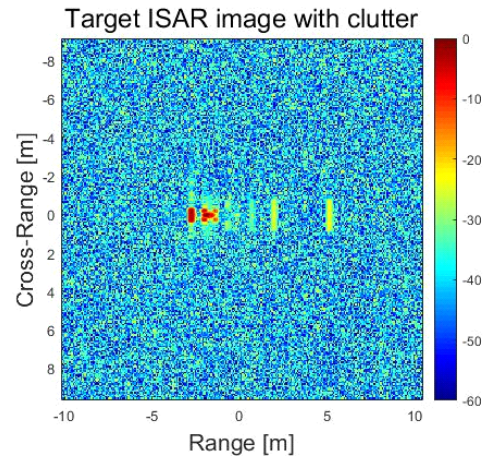


그림 10. 클러터 영향이 고려된 표적 레이더 영상
Fig. 10. Target radar image with clutter.

결정하는 것이 필요하다. 이때 탐지 임계값은 탐지 확률(detection probability)을 최대화하는 값일 뿐만 아니라, 오경보 확률(false alarm probability)을 최소화해야 한다. 이를 위한 대표적인 기법인 CA-CFAR 알고리즘은 표적이 존재하는지 판단하는 테스트 셀(cell under test: CUT)과 잡음 전력을 측정하여 임계값 T 를 결정하는 학습 셀(training cell), 표적 신호가 학습 셀에 누출되는 것을 막아 잡음 전력 추정에 미치는 악영향을 방지하는 가드 셀(guard cell)로 구성된다(그림 11).

이때 임계값 T 를 결정하기 위하여 학습 셀들이 갖는 신호 값들을 모두 더하여 평균을 낸 값을 통해 잡음 전력 P_n 를 먼저 추정한 후, 추정된 잡음 전력에 α 값을 곱해서 다음과 같이 계산된다.

$$P_n = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N x_m \quad (11)$$

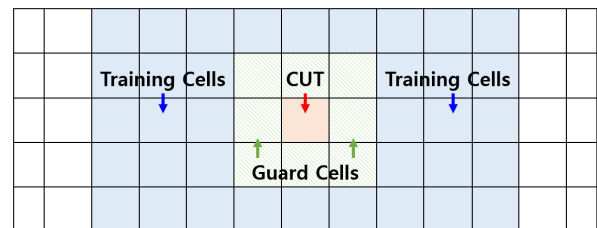


그림 11. 2D CA-CFAR 구조
Fig. 11. Framework of 2D CA-CFAR.

$$\alpha = N(P_{fa}^{-1/N} - 1) \quad (12)$$

$$T = \alpha P_n \quad (13)$$

여기서 N 는 학습 셀의 개수이다.

V. 시뮬레이션 결과

다음과 같은 해상 표적 CAD 모델에 대해 시뮬레이션을 시행하였다(그림 12). 표적의 가로 크기는 15 m이며, 세로 크기는 6 m, 높이는 6 m이다. 시뮬레이션 시에 결정되는 레이더 성능 및 레이더 영상 파라미터는 표 2와 같다.

해상 표적을 수치해석 기법으로 계산한 뒤, SCR 값에 맞추어 관측 각도 별로 표적 신호의 세기를 조절할 경우, 각 지표각에서 클러터가 고려된 해상 표적 레이더 영상은 그림 13에 도시하였다. 이후, 클러터가 고려된 레이더

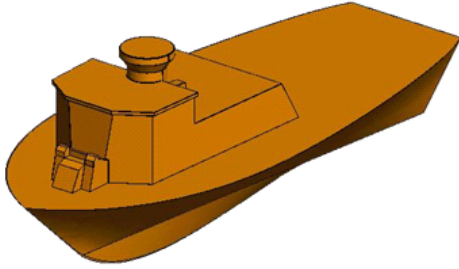


그림 12. 해상 표적의 CAD 모델
Fig. 12. CAD model of maritime target.

표 2. 시뮬레이션 변수들
Table 2. Simulation parameters.

Carrier frequency(f_c)	35 GHz
Frequency bandwidth	1 GHz
Observation angle(Ω)	$-0.8^\circ \sim 0.8^\circ$
Polarization	H-H
Wavelength(λ)	0.0086 m
Grazing angle	$30^\circ \sim 60^\circ$
Azimuth angle	0°
Sea state	3
Unambiguous range(X_{\max})	100 m
Unambiguous cross range(Y_{\max})	100 m

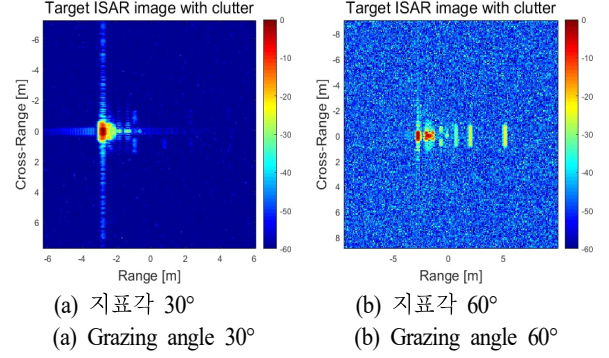


그림 13. 지표각 30°; SCR=29.46 dB, 지표각 60°의 레이더 영상; SCR=12.09 dB

Fig. 13. Radar images at grazing angle 30°, 60° for sea state 3.

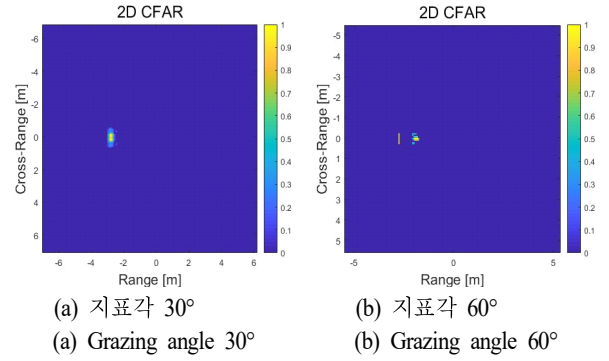


그림 14. 지표각 30°, 지표각 60°의 2D CA-CFAR 적용 결과
Fig. 14. Example of maritime target detection using 2D CA-CFAR at grazing angle 30°, 60° for sea state 3.

영상을 토대로 0.1 %의 오탐지 확률 및 14개의 학습 셀과 가드 셀을 사용한 2D CA-CFAR를 적용하였다(그림 14). 클러터가 포함된 영상을 분석해 보면 지표각 30°보다 지표각 60°에서 클러터의 세기가 상대적으로 강함을 볼 수 있다. 클러터 세기가 다름에도 불구하고, 2D CA-CFAR 결과 지표각 30°, 60° 모두 표적이 존재하는 구역 안에서 해상 표적이 탐지되고 있다.

해상 클러터와 표적 신호는 지표각에 의해서만 아니라, 방위각, 해상 상태에 따라 변화한다. 본 논문에서는 해상 표적의 탐지 여부를 살펴보기 위해 여러 가지 시나리오를 표 3과 같이 가정하였다.

표 3에서 지표각 30도, 방위각 0도의 결과와 지표각 60

도, 방위각 0도의 결과를 보면 방위각이 같음에도 불구하고, 결과가 달라지는 것을 볼 수 있다. 그림 15를 통해 지표각이 낮아지면서 클러터의 RCS 값이 낮아져 상대적으로 낮은 지표각에서 SCR이 높아졌음을 추측할 수 있다. 그로 인해 지표각 30도에서는 지표각 60도에서와 다르게 모든 해상 상태에서 표적이 탐지되고 있음을 확인할 수 있었다(표 3).

표 3에서 지표각 60도에서 방위각 0도, 45도의 결과도 다름을 알 수 있는데, 해상 클러터 RCS는 두 가지 경우

표 3. 해상 표적 탐지 여부

Table 3. Example of maritime target detection.

Grazing angle [deg]	Azimuth angle [deg]	Mean backscatter σ_0	Sea state	Detection
30	0	0.0001	1	O
		0.0005	2	O
		0.0014	3	O
		0.0027	4	O
		0.0043	5	O
		0.0068	6	O
		0.0156	7	O
		0.0443	8	O
60	0	0.0007	1	O
		0.0084	2	O
		0.0229	3	O
		0.0458	4	O
		0.0720	5	O
		0.1138	6	O
		0.2615	7	X
		0.7427	8	X
	45	0.0003	1	O
		0.0044	2	X
		0.0124	3	X
		0.0255	4	X
		0.0407	5	X
		0.0656	6	X
		0.1557	7	X
		0.4610	8	X

비슷하지만, 표적의 기하학적 구조상 수신되는 표적의 파워가 방위각 0도에서가 방위각 45도인 경우보다 크기 때문에 탐지가 잘 된다는 것을 확인할 수 있었다(그림 16).

표 3의 지표각 60도, 방위각 45도의 시나리오에서는 해상 클러터 RCS가 높고, 표적의 RCS가 낮아짐에 따라 SCR이 현저히 낮아지고, 이로 인해 모든 해상 상태에서 표적 신호가 클러터 신호에 가려 표적 탐지가 어려움을 알 수 있었다(그림 17 및 그림 18, 표 3).

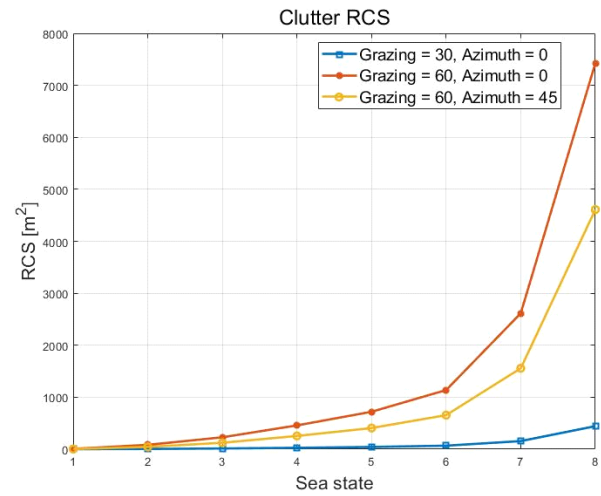


그림 15. 해상 상태에 따른 클러터의 RCS 변화

Fig. 15. RCS variation of sea clutter for sea states.

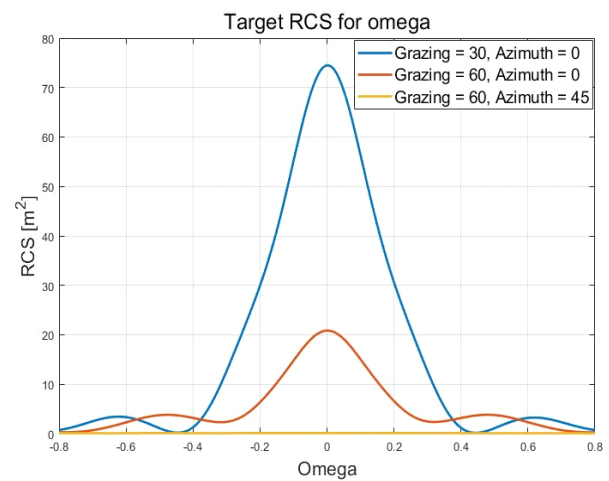


그림 16. 관측 각도별 표적 RCS 값

Fig. 16. RCS vs. observation angles.

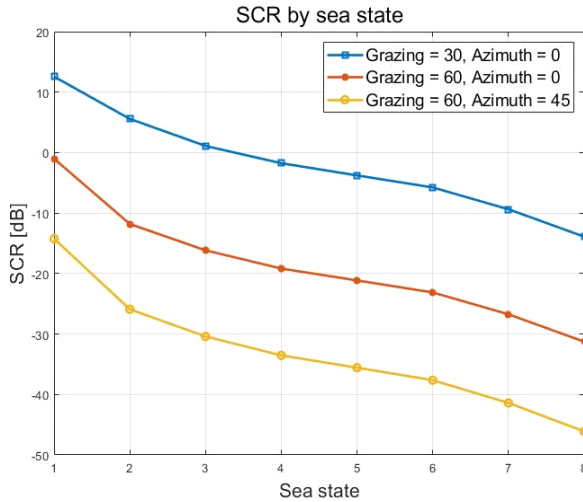
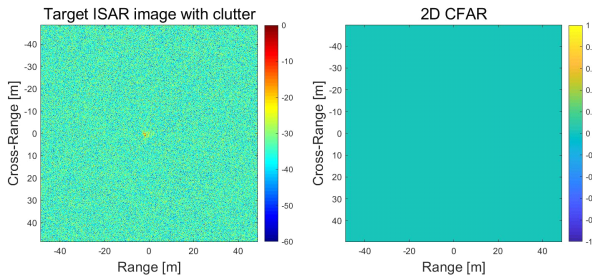


그림 17. 해상 상태에 따른 SCR

Fig. 17. SCR vs. sea states.



(a) 클러터가 고려된 레이더 영상 (b) 2D CA-CFAR 적용 결과
(a) Target ISAR image with clutter (b) 2D CA-CFAR

그림 18. 지표각 60°, 방위각 45°에서 클러터가 고려된 레이더 영상 및 2D CA-CFAR 적용 결과

Fig. 18. Example of radar image without 2D CA-CFAR and with that at grazing angle 60° and azimuth 45°.

VI. 결 론

본 논문에서는 탄도 미사일과 같이 높은 지표각을 가지며 낙하하는 상황에서 해상 클러터가 표적 탐지에 미치는 영향을 알아보기 위해서 여러 가지 시나리오를 가정하고 시뮬레이션을 시행하였다.

높은 지표각에서 해상 클러터는 지표각이 증가함에 따라 클러터의 평균 후방 산란 값이 커진다. 이에 해상 클러터의 RCS가 높아지고 레이더 신호의 SCR 값이 낮아져 표적 탐지가 어려움을 확인하였다. 또한, 같은 지표각 내

에서도 표적의 기하학적 구조로 인해 해상 표적의 신호 세기가 낮아지는 방위각이 발생함을 보았다. 그리하여 SCR이 낮아지고 같은 지표각이라도 방위각에 따라 표적이 탐지 안 되는 경향을 보였다. 향후 탄도 미사일에 탐색기를 부착하여 해상 표적을 탐지, 추적하는 경우, 본 논문의 결과를 고려하여 해상 표적을 탐지하는 효과적인 알고리즘이 개발되어야 한다.

References

- [1] 최상현, 송지민, 전현무, 정용식, 김종만, 홍성원, 양훈기, "Low grazing angle에서의 코히어런트 해상 클러터 시뮬레이션," 한국전자과학회논문지, 29(8), pp. 615-623, 2018년 8월.
- [2] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, "Radar remote sensing and surface scattering and emission theory," in *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, 2nd ed. Norwood, MA, Addison-WesleyArtech House, 1982.
- [3] K. D. Ward, R. J. A. Tough, and S. Watts, *Sea Clutter: Scattering, the K-Distribution and Radar Performance*, London, Institute of Engineering Technology, 2006.
- [4] F. E. Nathanson, J. P. Reilly, and M. N. Cohen, *Radar Design Principles*. 2nd ed. Mendham, NJ, McGraw-Hill, 1991.
- [5] D. J. Crisp, R. Kyprianou, L. Rosenberg, and N. J. S. Stacy, "Modelling X-band sea clutter at moderate grazing angles," in *2008 International Conference on Radar*, Adelaide, SA, 2008, pp. 569-574.
- [6] Y. Dong, "Distribution of X-band high resolution and high grazing angle sea clutter," *Research Report DSTO-RR-0316*, DSTO, 2006.
- [7] L. Rosenberg, D. J. Crisp, and N. J. Stacy, "Analysis of the KK-distribution with X-band medium grazing angle sea-clutter," in *2009 International Radar Conference, Surveillance for a Safer World(RADAR 2009)*, Bordeaux, 2009, pp. 1-6.
- [8] P. H. Y. Lee, J. D. Barter, K. L. Beach, C. L. Hindman, B. M. Lake, and H. Rungaldier, et al., "X-band microwave backscattering from ocean waves," *Journal of Geo-*

- physical Research*, vol. 100, no. C2, pp. 2591-2611, 1995.
- [9] G. R. Valenzuela, M. B. Laing, "Study of Doppler spectra of radar sea echo," *Journal of Geophysical Research*, vol. 75, no. 3, pp. 551-563, Jan. 1970.
- [10] C. Ozdemir, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging*

with MATLAB Algorithms, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2012.

- [11] 신상진, "효율적인 CFAR 알고리즘 연구," 한국전자학회논문지, 25(8), pp. 849-856, 2014년 8월.

진 승 현 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6701-7806>



2017년 2월: 부산대학교 전기공학과 (공학사)
 2019년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2019년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
 [주 관심분야] 레이더 신호처리 및 영상,

레이더 자원관리

김 윤 진 [LIG넥스원(주)/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0090-9778>



1997년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학사)
 1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학석사)
 1999년 3월~현재: LIG넥스원(주) 수석연구원
 [주 관심분야] 레이더 시스템, 송수신 및

신호처리

이 경 민 [포항공과대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-1999-5242>



2018년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 2018년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 석사과정
 [주 관심분야] 레이더 신호처리 및 영상, 전자파 수치해석

권 준 범 [LIG넥스원(주)/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9077-9641>



1997년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
 1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 1999년 2월~현재: LIG넥스원(주) 수석연구원
 [주 관심분야] 마이크로파 신호처리, 마이크로파 탐색기 등

이크로파 탐색기 등

우 선 결 [LIG넥스원(주)/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5996-8962>



2001년 2월: 광운대학교 전자공학부 (공학사)
 2003년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 2007년 7월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
 2007년 8월~현재: LIG넥스원(주) 수석연구원

원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 마이크로파 탐색기

김 홍 락 [LIG넥스원(주)/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8742-7861>



1995년 2월: 대구대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학사)
 1997년 8월: 대구대학교 전자공학과 (공학석사)
 1997년 7월~현재: LIG넥스원(주) 수석연구원

[주 관심분야] 마이크로파 신호처리, 전원공급기, 마이크로파 탐색기 등

원공급기, 마이크로파 탐색기 등

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 실장

2018년 1월~현재: 국방R/D 전략 및 기술협력 센터장

2018년 1월~현재: 무인 감시정찰기술연구 센터장

[주 관심분야] 레이더 신호처리 및 영상, 레이더 표적인식 및
패턴인식, 전자기 수치해석 및 RCS 측정 등