

항공기 탑재 레이더의 해상 및 지상 고도 클러터 모델링과 비행시험 기반 검증

김소연*¹, 정태희*², 조병래*³

Modeling and Flight-Test-based Validation of Sea and Land Altitude Return in Airborne Radar

So-Yeon Kim*¹, Taehee Jeong*², and Byunglae Cho*³

This work was supported by the Agency for Defense Development grant funded by the Korean government

요 약

본 연구에서는 개조한 시험 항공기 노즈(Nose)에 능동 위상배열 레이더(AESA, Active Electronically Scanned Array)를 탑재하여 비행시험을 수행하고, 이를 통해 레이더의 실데이터를 획득하였다. 해당 데이터를 기반으로 최초로 해상 및 지상 환경에서의 고도 클러터(ALT, Altitude Return)를 분석하고, 기존 수학적 모델과 비교 및 검증하였다. 그 결과 해상 환경에서의 ALT 상대 오차율은 평균 0.58%로써 이론적 예측치와 전반적으로 유사한 경향이 있는 반면에 지상 환경에서의 고도 클러터 상대 오차율은 1.11%로써 오차가 상대적으로 크게 발생하였다. 이러한 차이는 지상 환경의 복잡성이 모델에 충분히 반영되지 못한 결과로써 지상 환경의 멀티패스(Multipath) 등으로 인한 영향으로 해석된다.

Abstract

In this study, we integrated an Active Electronically Scanned Array (AESA) radar into the nose of a flying test bed and conducted flight tests. The resulting air-to-sea and air-to-ground radar data were analyzed, for the first time, and the measured Altitude Return (ALT) was compared with theoretical predictions for validation. As a result, the mean relative error rate of ALT in the maritime environment was 0.58%, showing an overall trend similar to the theoretical prediction. In contrast, the mean relative error rate of ALT in the terrestrial environment was 1.11%, indicating relatively larger errors. This difference is mainly due to the model's inability to fully capture the complexity of the ground environment, including multipath effects.

Keywords

altitude return, air-to-sea radar, air-to-ground radar, airborne radar

* 국방과학연구소 3기술연구원 4부(*² 교신저자)
- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0003-2424-0095>
- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0002-6427-8410>
- ORCID³: <https://orcid.org/0000-0002-9160-3362>

• Received: Jan. 09, 2026, Revised: Apr. 17, 2026, Accepted: Apr. 20, 2026
• Corresponding Author: Taehee Jeong
4th Directorate, 3rd R&D Institute, Agency for Defense Development (ADD), Daejeon, Republic of Korea
Tel.: +82-42-821-2363, Email: taehee@add.re.kr

I. 서 론

고도 클러터(ALT, Altitude Return)는 항공기 탐제 레이더에서 발생하는 클러터 구성요소 중 하나로써 플랫폼 수직 방향 아래쪽에서 반사되어 돌아오는 클러터이다. 이 클러터 성분은 플랫폼의 고도 등에 의해 특정 형태를 형성한다. 클러터 신호는 표적 탐지를 방해하는 요소로서, 클러터 신호와 표적 신호를 구별하고 다양한 클러터 환경에서 발생하는 레이더 반사 신호를 정밀하게 분석하는 것은 레이더 탐지 성능을 최적화하고 운용 환경에 적합한 성능을 확보하기 위한 필수적인 과정이다[1]-[4]. 최근 레이더 시스템은 해상 및 지상 환경에서의 표적 탐지 성능 향상을 위해 점차 고도화되고 있으며, 특히 다양한 운용 환경에서 발생하는 클러터 특성을 정확히 이해하고 이를 설계와 운용에 반영하는 것이 중요해지고 있다. 클러터는 지형, 해면 상태 등 주변 환경에 따라 통계적 특성이 달라지며, 이러한 변화는 레이더 탐지 성능과 오경보 특성에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 실제 운용 환경을 반영한 클러터 분석과 모델 검증은 신뢰도 높은 레이더 성능 예측을 위해 필수적인 요소이다. 그럼에도 불구하고 기존의 많은 연구는 시뮬레이션이나 제한적인 가정에 기반한 이론적 모델에 의존하는 경우가 많으며, 실제 비행시험을 통해 획득한 실데이터를 활용한 검증 연구는 부족한 실정이다[5][6]. 특히 해상 및 지상 환경에서의 고도 클러터 실측 데이터를 기반으로 한 분석과 기존 모델의 타당성 검증은 충분히 이루어지지 않았다. 이로 인해 현실적인 운용 조건을 반영한 성능 예측과 설계 최적화에 필요한 기초 데이터가 제한될 수 밖에 없다. 따라서 클러터를 정확히 모델링하고 그 특성을 이해하는 일은, 성공적인 레이더 설계와 신뢰도 높은 성능 예측을 가능하게 하는 중요한 연구 주제이다[7].

이러한 배경에서 최근 클러터 특성에 관한 연구로는 SAR 영상에서 품질을 저하시키는 천저(Nadir) 수신 신호를 제거하는 연구[8]가 있었고, 천저 영역의 클러터 파워가 강하여 표적 탐지 성능이 저하되는 문제를 이용하여 위성 탐제(Spaceborne) 레이더에서 표적의 고도가 충분히 높은 공중 표적에 대해

탐지 성능을 분석하는 연구[9]를 수행하였다. 최근에는 머신러닝을 이용하여 기상 레이더에서 입사각이 커질수록 지표 클러터의 영향이 증가하여 강수 신호를 오염시키는 문제를 해결하기 위해 클러터 완화를 위한 방법론을 제시하는 연구가 있었다[10].

이러한 고도 클러터의 특성을 분석하기 위해 수학적 모델이 사용되며, 실제 환경에서의 모델 특성을 확인하기 위해 실측 데이터와의 비교가 필요하다. 본 연구에서는 최초로 비행시험을 통해 획득한 실데이터를 이용하여 고도 클러터 모델과 실제 고도 클러터를 비교하고, 해상 및 지상 환경에서의 고도 클러터를 분석하여 모델과 실측값 간의 오차 특성을 비교하고자 한다.

본 논문에서 전개될 구성은 다음과 같다. II장에서는 고도 클러터를 모델링하고, III장에서는 실제 항공기에 탑재한 레이더의 비행시험을 통해 획득한 데이터로부터 고도 클러터를 분석하고, 앞서 정의한 수학적 모델과 비교/검증한다. IV장에서는 결론 및 향후 과제를 제시한다.

II. 고도 클러터(ALT) 모델

고도 클러터는 레이더의 고도 변화 등에 따라 수신되는 레이더 신호 응답의 크기 및 통계적 특성이 달라지는 현상을 의미하며 레이더 시스템 파라미터에 의해 결정된다. 그림 1은 수신된 클러터의 거리 프로파일을 개념적으로 나타낸 그림이다.

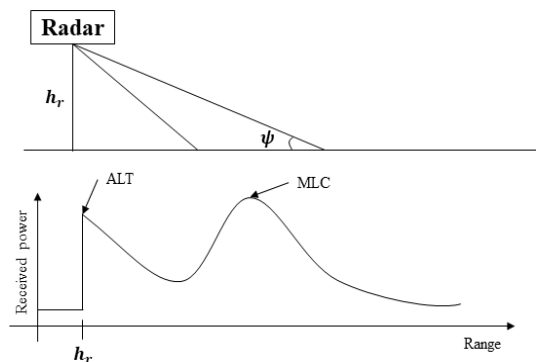


그림 1. 수신된 클러터의 거리 프로파일
Fig. 1. Notional range profile of received clutter

고도 클러터는 레이더 높이에 해당하는 h_r 만큼 떨어진 거리에 생성되는 사이드로브 클러터의 일종이며, MLC(Mainlobe Clutter)는 메인로브 클러터를 의미한다[2]. 수신된 고도 클러터의 진폭은 스파이크 형태로 나타나며 고도 클러터는 이론적으로 제로 도플러에 발생하지만 현실적으로 항공기 진동이나 자세, 지면/해상 상태에 따라 도플러 편이(Doppler shift)가 발생한다.

본 연구에서는 비행시험으로 획득한 실험데이터와의 비교를 위해 식 (1)과 같은 고도 클러터 모델을 검증 대상으로 설정하였다. 고도 클러터를 계산하기 위해서 클러터 반사 신호에 대한 레이더 방정식으로부터 식을 유도하였다. 식 (1)은 지표각(Grazing angle) ψ 에 대해 수신되는 클러터 반사 신호를 나타낸다[11].

$$C = \frac{\pi P_t A_e \sigma^0}{128 h_r^2 \sin \psi} \quad (1)$$

여기서, P_t 는 송신전력(Transmitter power) [W], A_e 는 안테나 유효 개구면적(Antenna effective aperture) [m^2], h_r 은 레이더 고도 [m]이다.

클러터의 수신 신호는 조사된 면적에 비례하므로 조사된 면적과 무관하게 클러터 신호의 척도를 알기 위해 단위 면적당 클러터 단면적(Clutter cross section per unit area)을 의미하는 σ^0 가 사용되었고, 이는 조사된 영역 내에 존재하는 산란체들의 총 레이더 단면적(σ , Radar cross section)을 해당 영역의 면적(A_c)으로 정규화한 값으로 정의된다. 클러터 반사 계수 σ^0 는 일반적으로 지표각, 지면 또는 해상 상태, 편파 특성 등의 다양한 레이더 파라미터와 환경 조건에 의해 결정된다. 그러나 직하 방향에 대한 σ^0 는 이러한 레이더 파라미터나 표면 반사 특성만으로 결정되지 않고, 식 (2)와 같은 관계식을 가지며 안테나 패턴 및 이득에 의한 영향을 받게 된다.

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A_c} \approx G \quad (2)$$

여기서, G 는 안테나 이득이다.

완전히 매끄러운 반사면을 가정했을 때 레이더 빔

이 지표면에 수직으로 도달하면 정반사 성분이 지배적이므로 안테나 이득 G 의 영향을 받게 된다. 따라서 고도 클러터는 수직 입사에 대한 직하 방향 클러터 수신 신호와 동일하다고 가정할 수 있으므로 식 (1)로부터 식 (3)과 같은 형태로 고도 클러터 모델을 정리할 수 있다. 본 연구에서 검증할 모델의 정의는 최종적으로 식 (3)과 같은 형태로 정리할 수 있다.

$$C = \frac{\pi P_t A_e G}{128 h_r^2} \quad (3)$$

식 (3)의 고도 클러터 모델을 이용하여 서로 다른 5개의 고도(h_r) 조건에서의 안테나 이득 대비 고도 클러터 결과를 분석하였고, 결과는 그림 2와 같다. 식 (3)에서 변수 A_e 에 해당하는 안테나 유효 개구면적은 안테나 이득(G)에 따라 변화하므로, 변수 P_t 인 송신전력은 1kW로 고정한 상태에서 안테나 이득 변화에 따른 고도 클러터 특성을 분석하였다. 이를 위해 서로 다른 5가지 고도를 설정하고, 각 고도에 대해 고도 클러터를 예시적으로 계산하였다. 그림 2에서 검정색 선이 고도 2km일 때 안테나 이득에 따른 고도 클러터 결과이고, 실선-점선으로 나타낸 연두색 선이 고도 10km일 때 안테나 이득에 따른 고도 클러터 결과이다. 동일한 안테나 이득에서 낮은 고도 조건일수록 더 높은 고도 클러터가 관측되었고, 안테나 이득이 증가할수록 고도 클러터도 증가하는 결과를 보이는 특성이 있었다.

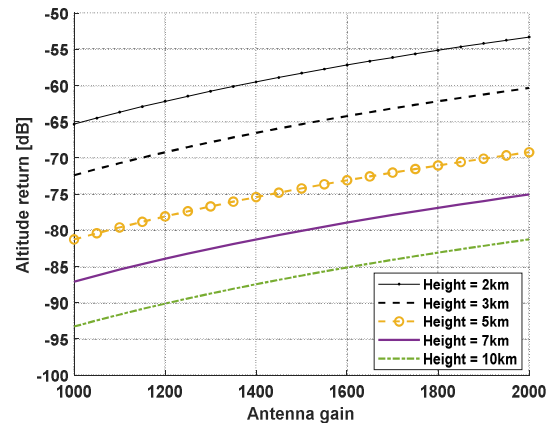


그림 2. 고도별 안테나 이득 대비 고도 클러터
Fig. 2. ALT versus antenna gain for five different height values

본 연구에서는 상기 고도 클러터 모델을 검증 대상으로 설정하고, 이를 기반으로 계산된 고도 클러터 파워를 비행시험을 통해 획득한 실험데이터와 비교함으로써 모델의 타당성을 분석하고자 한다.

III. 비행시험을 통한 고도 클러터 분석 및 검증

본 연구에서는 2장에서 정의한 고도 클러터 모델의 타당성을 검증하기 위해, 비행시험으로 획득한 실험데이터를 활용하여 고도 클러터 모델 결과와의 비교 분석 및 검증을 수행하고자 한다. 원시데이터는 그림 3[12][13] 형상의 Boeing 737-500 기종을 개조한 시험 항공기를 통해 획득하였다. 전자주사를 통한 표적 탐지 및 추적을 수행하는 능동 위상배열 레이더(AESA, Active Electronically Scanned Array)를 시험 항공기 노즈(Nose) 부분에 탑재하여 시험을 수행하였다.



그림 3. 시험 항공기 및 레이더 형상
Fig. 3. Flying test bed and radar configuration

데이터 획득에 사용한 항공기탑재 레이더의 주요 파라미터는 아래 표 1과 같다. 레이더의 운용 주파수는 X 대역이며, 펄스 반복 주파수(Pulse Repetition Frequency, PRF)는 HPRF(High-PRF)를 사용하였다. 시험 항공기를 대한민국 서해와 동해상에서 각각 운용하며 데이터를 획득하였고, 세부적인 시험 항공기의 위치와 안테나 빔 조향 영역을 그림 4 및 그림 5의 위성지도[14] 상에 나타내었다.

표 1. 시험 레이더 관련 파라미터

Table 1. Parameters of the experimental radar

Parameter	Value
Frequency band	X-band
PRF	HPRF (> 10kHz)
Data collection date	Mar. ~ Apr. 2023

해상 환경의 데이터는 그림 4에서처럼 서해상에 서 획득하였고, 지상 환경의 데이터는 그림 5에서처럼 영덕 인근 상공에서 지상을 지향하여 각각 획득하였으며 같은 고도 조건을 유지하여 데이터를 획득하였다.



그림 4. 해상 데이터에 대한 시험 항공기의 위치와 안테나 빔 조향 영역

Fig. 4. Position of the FTB and antenna beam steering area for sea environment

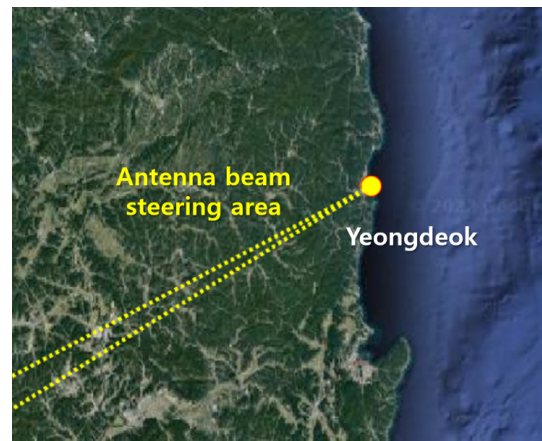


그림 5. 지상 데이터에 대한 시험 항공기의 위치와 안테나 빔 조향 영역

Fig. 5. Position of the FTB and antenna beam steering area for ground environment

비행시험으로부터 획득한 원시데이터에서 고도 클러스터를 분석하기 위해 신호처리를 수행하고, RD(Range-Doppler) map을 획득하였다. 먼저, 정합 필터(Matched filtering)를 이용한 펄스압축을 통해 거리 해상도를 향상시키고, RCMC(Range Cell Migration Correction)를 적용하여 플랫폼 이동에 따른 거리 왜곡을 보정하였다. 이후 표적 등의 움직임으로 인해 발생하는 RDC(Range Doppler Coupling)를 보정하였고, FFT(Fast Fourier Transform)를 이용한 도플러 처리를 수행하여 RD map을 획득하였다. RD map은 레이더 신호처리에서 거리(Range)와 속도(Radial velocity)를 동시에 표현하는 2차원 스펙트럼이다. RD map의 각 셀 값은 해당 거리-속도 조합에서의 반사 신호 세기를 나타내고, 도플러가 0인 위치에서는 정지 물체이고, 도플러가 0이 아닐 때는 이동 물체라고 할 수 있다. 고도 클러스터는 레이더 고도와 동일한 거리에 해당하는 위치에 발생하고, 도플러 방향으로 퍼져서 나타나는 특징이 있다. 플랫폼이 수평으로 비행한다면 고도 클러스터의 중앙은 제로 도플러에 위치하게 된다. 그림 6은 신호처리 후 획득한 RD map의 예시로서 3.7km 위치에 도플러 방향으로 퍼져서 나타나는 고도 클러스터를 확인할 수 있다. 속도 -33m/s 지점에서 전 거리에 나타나는 강한 신호는 메인로브 클러스터이다. 항공기 탑재 레이더는 플랫폼 속도 성분이 도플러로 그대로 투영되므로 정지된 클러스터라도 레이더 기준에서는 상대속도를 갖게 된다.

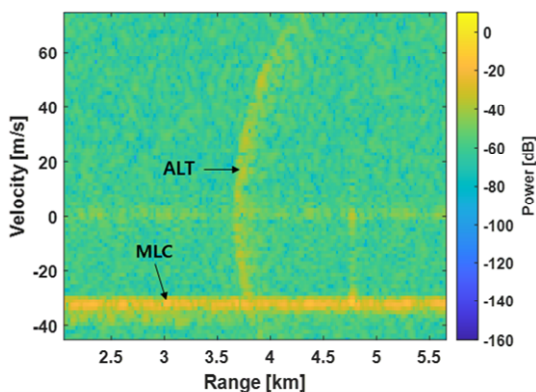


그림 6. RD map에서의 고도 클러스터 및 메인로브 클러스터
Fig. 6. ALT and MLC in the RD map acquired under maritime conditions

따라서 일반적으로 메인로브 클러스터 성분을 제로 도플러에 위치하도록 신호처리를 수행하지만 본 연구에서는 고도 클러스터 성분과 메인로브 클러스터 성분을 분리하기 위해 그 과정을 수행하지 않아 클러스터가 속도를 갖는 것처럼 나타났다.

먼저, 방위각 0.06도, 고도 2.99km 조건에서 해상 환경에 대한 데이터를 획득하였고, 신호처리 후 RD map 결과는 그림 7과 같다. 표시한 화살표 부분에서 고도 클러스터(ALT)를 확인할 수 있고, 분석 결과 실데이터에서 고도 클러스터는 -32.8209dB이다. 수식 (3)을 기반으로 한 고도 클러스터 모델 이론치는 -32.99dB로써 각각을 비교한 결과, 약 0.17dB의 근소한 차이가 있었다. 고도, 방위각 환경이 다른 조건에서 획득한 해상 데이터(표 2, #1-2)에 대해 고도 클러스터를 비교한 결과는 표 2와 같다. 방위각 44.84도, 고도 3.68km로써 이전 데이터와는 조건이 다른 해상 환경에서 데이터를 획득하였고, 고도 클러스터를 비교한 결과, 각각 -42.85dB, -42.58dB로 오차가 0.27dB로써 이전 케이스(#1-1)의 해상 고도 클러스터 오차와 비슷한 수준이었다. 반면 #1-2의 해상 데이터의 방위각과 고도가 비슷한 지상 환경 데이터에 대해 고도 클러스터를 분석한 결과는 그림 8과 같다. 수식 기반의 이론치는 -47.74dB로 계산된 반면, 실데이터에서 분석한 측정치는 -48.27dB로 실데이터에서의 고도 클러스터가 약 0.53dB 더 낮아 해상 환경에 비해 오차가 크게 발생하였다. 식 (4)와 같이 상대 오차율을 계산했을 때 약 1.11%로 계산되었다.

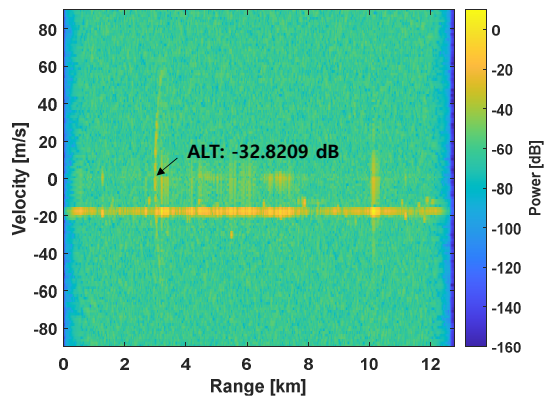


그림 7. 해상 환경에서 획득한 RD map에서의 고도 클러스터

Fig. 7. ALT in the RD map acquired under maritime conditions

표 2. 고도 클러터 비교 결과

Table 2. Results of ALT comparison

Item	#1-1	#1-2	#2
Environment	Sea	Sea	Land
Azimuth (deg)	0.06	44.84	43.96
Altitude (km)	2.99	3.68	3.69
Calculated value (dB), x_0	-32.99	-42.85	-47.74
Measured value (dB), x_1	-32.82	-42.58	-48.27
Error (dB)	0.17	0.27	-0.53
Relative error (%)	0.52	0.63	1.11

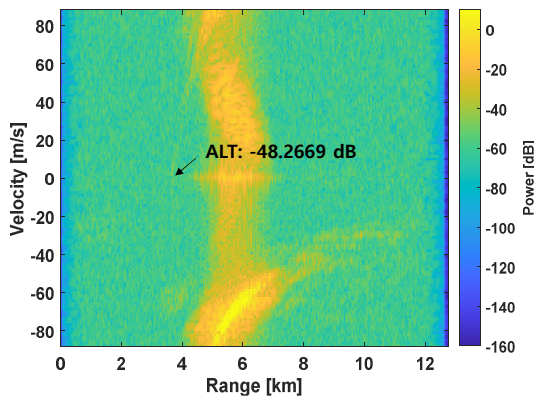


그림 8. 지상 환경에서 획득한 RD map에서의 고도 클러터

Fig. 8. ALT in the RD map acquired under ground conditions

$$r_e = \left| \frac{x_0 - x_1}{x_0} \right| \times 100 \quad (4)$$

고도 클러터는 수직 입사 조건에서 관측되므로, 일반적으로 해상 및 지상 환경과 관계없이 단위 면적당 클러터 단면적이 안테나 이득에 의해 지배되는 것으로 알려져 있다[11]. 그러나 본 연구에서 실험 데이터를 기반으로 고도 클러터를 분석한 결과, 해상 환경에 비해 지상 환경에서 상대적으로 큰 오차가 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 실제 클러터 특성이 환경의 영향을 받음을 의미한다. 이러한 차이는 표면 특성의 차이에 기인하는 것으로 해석할 수 있다. 표면이 파장 대비 충분히 평탄(Flat)하고 균질한 경우, σ^0 는 안테나 이득 패턴의 영향을 직접적으로 반영하게 된다. 반면, 표면이 불균질하거나 거칠고 다양한 산란체가 존재할 때는 다중 산란

및 비정상적인 반사 경로가 발생하여, 이상적인 반사 패턴과의 차이가 증가하게 된다.

해상 환경은 단일 재질의 산란체로 근사될 수 있으며, 표면 특성이 비교적 균질하고 공간적 변동성이 작기 때문에 σ^0 의 변화가 제한적이다. 또한 스펙클 잡음이 통계적으로 안정적인 특성을 보이므로, 고도 클러터 모델의 기본 가정은 비교적 잘 성립한다. 반면 지상 환경은 토지 피복의 비균질성, 지형 경사, 구조물에 의한 이중 반사 등 복합적인 산란 메커니즘이 존재하며, 이로 인해 산란체 간 위상 간섭에 따른 파워 변동이 발생한다. 그 결과, 빔 조사 영역 내 반사계수가 공간적으로 크게 변동하는 특성을 가지게 된다. 이러한 환경적 특성으로 인해 지상에서는 반사계수의 공간적 변동이 안테나 이득 패턴보다 지배적인 요인으로 작용하게 되며, 이는 모델과 실측값 간의 오차 증가로 이어진다. 특히 본 연구에서 사용한 모델은 다수 산란체 간의 위상 간섭 및 다중 산란 효과를 명시적으로 고려하지 않기 때문에, 이러한 환경에서는 오차가 더욱 크게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 사용한 데이터의 해상도를 고려할 때, 비교적 평탄한 해상 환경에서는 모델과의 일치도가 높은 반면, 지상 환경에서는 멀티패스 및 비균질 산란 특성으로 인해 직하 방향 클러터 파워의 오차가 증가하는 경향을 확인하였다. 이는 지상 환경에서 σ^0 의 공간적 변동성이 안테나 이득 패턴보다 더 큰 영향을 미친다는 점을 시사한다.

결론적으로 고도 클러터 모델은 σ^0 가 공간적으로 균질하고 지표면이 파장 대비 평탄한 환경에서 유효하며, 지상과 같이 복합적인 산란 특성을 가지는 환경에서는 추가적인 보정 또는 모델 확장이 필요함을 확인할 수 있다.

IV. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 최초로 비행시험으로 획득한 실험 데이터를 기반으로 지상 및 해상 환경에서의 고도 클러터를 분석하고, 기존 수학적 모델의 타당성을 검증하였다. 수학적 모델의 계산 결과를 비교 및 검증한 결과, 해상에서의 고도 클러터 상대 오차율은 평균 0.58%로써 정확도가 높은 반면에 지상에서의 고

도 클러터 상대 오차율은 1.11%로써 상대적으로 높게 발생함을 확인하였다. 이러한 차이는 직하 방향에서의 안테나 패턴 영향이 클러터 파워에 직접적으로 반영된 결과로 볼 수 있다. 표면이 파장에 비해 충분히 평탄한 경우에는 기대한 반사 패턴이 유지되어 이론적 모델과의 일치도가 높게 나타난다. 반면, 지상 환경에서는 다중 산란, 비균질 산란, 산란체 간 위상 간섭과 같은 다양한 효과가 존재하며, 표면 또한 평탄하지 않는 특성을 갖게 된다. 이러한 요인들로 인해 실제 반사 패턴은 기대한 반사 패턴과 달라져 오차가 발생한다. 이는 기존 모델이 다수 산란체 간의 위상 간섭이나 다중 산란 효과를 명시적으로 고려하지 않기 때문으로 해석할 수 있다. 따라서 해상과 같이 상대적으로 균질하고 평탄한 표면에서는 이론적 고도 클러터 모델의 적용성이 높지만 고해상도 레이더 환경에서는 기존 모델을 적용하는 데 한계가 있음을 알 수 있다. 이러한 한계를 개선하기 위한 방안으로, 기존 레이더 방정식에 의존적 보정 계수를 도입하여 비균질 지상 환경에서의 산란 특성을 반영하는 모델을 고려하거나 데이터 기반 기계학습 또는 딥러닝을 활용하여 입력 변수와 실제 측정된 클러터 파워 간의 관계를 학습함으로써 모델 오차를 보정하는 방법을 고려할 수 있다. 특히 이러한 접근은 복잡한 지상 환경에서 발생하는 비선형적 및 비모델링 효과를 효과적으로 반영할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 레이더 운용 환경에 따라 고도 클러터가 어떻게 변화하는지를 정량적으로 분석함으로써, 기존 고도 클러터 모델이 내포하고 있는 이론적 가정과 그 한계를 명확히 규명하였다. 특히 해상과 지상 환경에서 관측된 고도 클러터 특성을 비교 및 분석한 결과, 기존 문헌에서 제시된 안테나 이득 기반 고도 클러터 모델이 특정 환경에서는 유효하나, 지상과 같이 산란 특성이 비균질한 환경에서는 그대로 적용하기 어렵다는 점을 실증적으로 확인하였다. 이를 통해 고도 클러터 모델의 적용 가능 조건을 보다 명확히 구분할 수 있었다. 이는 고도 클러터 모델이 가정해 온 지표면 산란의 균질성 가정이 실제 운용 환경에 대해 포편적으로 성립하지 않음을 시사한다는 점에서 의미가 있다. 또한 본 연구

에서는 비행시험을 통해 획득한 실데이터를 기반으로 고도 클러터 모델을 검증한 사례를 최초로 제시함으로써, 시뮬레이션이나 이론 모델 중심의 기존 연구들과 차별화할 수 있다.

본 연구 결과를 통해 레이더 운용 시 탐지 성능 최적화를 위한 기초 자료를 제공함으로써 향후 다양한 운용 고도, 관측 각도 등에 대한 추가적인 비행시험 데이터를 확보하여, 환경 및 운용 조건 변화에 따른 고도 클러터 특성을 보다 정밀하게 분석할 필요가 있다. 또한 지상 환경의 비균질성을 반영할 수 있는 고해상도 레이더에 적합한 고도 클러터 모델을 새롭게 개발함으로써 실제 운용 환경에서의 적용성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] A. Melebari, M. Y. A. Gaffar, and J. J. Strydom, "Analysis of High Resolution Land Clutter Using an X-Band Radar", 2015 IEEE Radar Conference, Johannesburg, South Africa, pp. 139-144, Oct. 2015. <http://doi.org/10.1109/RadarConf.2015.7411869>.
- [2] R. K. Moore and C. S. Williams, "Radar Terrain Return at Near-Vertical Incidence", Proc. of the IRE, Vol. 45, No. 2, pp. 228-238, Feb. 1957. <http://doi.org/10.1109/JRPROC.1957.278394>.
- [3] F. Nougier, et al., "Sea Surface Kinematics From Near-Nadir Radar Measurements", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 56, No. 10, pp. 6169-6179, Oct. 2018. <http://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2833200>.
- [4] D. A. Shnidman, "Radar detection in clutter", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 41, No. 3, pp. 1056-1067, Jul. 2005. <http://doi.org/10.1109/TAES.2005.1541450>.
- [5] T. Kim and S. Kim, "Characteristics of Land Clutter Signals and Their Synthesis Methods", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 34, No. 2, pp. 79-87, Feb. 2023. <http://doi.org/10.5515/KJKIEES.2023.34.2.79>.

- [6] T. D. Conley, J. S. Draper, and P. O. Jarvinen, "Analysis of Radar Return from Turbulent High-Altitude Rocket Exhaust Plumes", AIAA Journal, Vol. 8, No. 9, pp. 1568-1573, Sep. 1970. <https://doi.org/10.2514/3.5948>.
- [7] G. Zhu, Y. Chen, and H. Yin, "Analysis of Typical Ground Clutter Statistical Characteristics", 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, Suzhou, China, pp. 1-2, Aug. 2017.
- [8] M. N. Peixoto and M. Villano, "Processing Techniques for Nadir Echo Suppression in Staggered Synthetic Aperture Radar", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 19, pp. 1-5, Mar. 2022. <http://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3157445>.
- [9] Z. Zou, P. Huang, X. Lin, X. Xia, P. Xi, Y. Sun, and X. Liu, "Air Moving Target Indication in Nadir Region for Spaceborne Surveillance Radar Systems", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 20, Jun. 2023. <http://doi.org/10.1109/LGRS.2023.3282411>.
- [10] M. Grecu, G. M. Heymsfield, S. Nicholls, S. Lang, and W. S. Olson, "A Machine Learning Approach to Mitigate Ground Clutter Effects in the GPM Combined Radar-Radiometer Algorithm (CORRA) Precipitation Estimates", Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 42, No. 1, pp. 17-31, Jan. 2024. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-24-0048.1>.
- [11] M. I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems (3rd ed.)", McGraw-Hill, pp. 403-481, 2001.
- [12] T. Jeong, S. Y. Kim, and B. Cho, "A Noise Power Estimation Technique Using Received Signals from a Pulse-Doppler Radar", Journal of KIIT, Vol. 24, No. 3, pp. 127-135, Mar. 2026. <https://doi.org/10.14801/JKIIT.2026.24.3.127>.
- [13] S. Y. Kim, T. Jeong, and B. Cho, "A Study on a Monopulse-based Detection Method for the Separation of Range-Adjacent Targets in Airborne

Surveillance Radar", Journal of KIIT, Vol. 24, No. 1, pp. 173-180, Jan. 2026. <https://doi.org/10.14801/JKIIT.2026.24.1.173>.

- [14] Google Earth Pro V7.3.3.7786. (Date of Original Imagery: Dec. 14, 2015), <https://www.google.com/intl/ko/earth/about/>. [accessed: May 23, 2025]

저자소개

김 소 연 (So-Yeon Kim)



2012년 2월 : 세종대학교
지구정보공학과(공학사)
2014년 8월 : 세종대학교
지구정보공학과(공학석사)
2015년 9월 ~ 현재 :
국방과학연구소 선임연구원
관심분야 : 레이더 신호처리,

레이더 시스템

정 태 희 (Taehee Jeong)



2009년 2월 : 한양대학교
전자통신컴퓨터공학부(공학사)
2011년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학석사)
2024년 2월 : 한국과학기술원
전기및전자공학부(공학박사)
2011년 1월 ~ 현재 :

국방과학연구소 선임연구원

관심분야 : 레이더 신호처리, 표적 탐지, 레이더 시스템

조 병 래 (Byunglae Cho)



1999년 2월 : 경북대학교
전자전기공학부(공학사)
2001년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학석사)
2005년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학박사)
2005년 3월 ~ 2006년 1월 :

포항공과대학교 전자전기공학과 연구원

2006년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원

관심분야 : 레이더 신호처리, 영상레이더