



Received: 2026/03/04
Revised: 2026/03/13
Accepted: 2026/03/20
Published: 2026/03/31

***Corresponding Author:**

Myunghoon Park
333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea
Tel: +82-31-5179-7267
Fax: +82-31-5179-7086
E-mail: pmh604god@gmail.com

전구급 레이더 성능 분석을 위한 레이더 모델링 및 시뮬레이션 기법 연구

Radar Modeling and Simulation for Theater-Level Radar Performance Analysis

박명훈*, 김정, 이성균, 고진용, 장재덕

LIG넥스원 M&S팀 수석연구원

Myunghoon Park*, Jeong Kim, Sungkyun Lee, Jinyong Go, Jaedeok Jang

Chief research engineer, M&S Team, LIG Nex1

Abstract

본 연구에서는 전구급 수준의 레이더 성능 분석을 위한 단순화된 통합 모의 모델을 제시하였다. 제안한 모델은 탐지 커버리지 기반 탐색 영역 정의와 SNR 스케일링을 이용하여 거리와 표적 RCS 변화에 따른 수신 신호 특성을 계산하며, 이를 기반으로 탐지확률과 거리 및 각도 측정 오차를 생성한다. 또한 강우 환경에 의한 전파 감쇠를 ITU-R 권고 기반 특정 감쇠 모델을 이용하여 SNR 계산에 반영하였다. 시뮬레이션 결과 거리 증가에 따른 SNR 감소와 탐지확률 저하, 그리고 측정 오차 증가 특성이 일관되게 나타났으며 강우 환경에서는 이러한 성능 저하가 뚜렷하게 나타남을 확인하였다. 제안한 모델은 제한된 시스템 제한 환경에서도 전구급 수준의 레이더 성능 민감도 분석을 수행할 수 있는 모의 프레임워크를 제공한다.

This paper presents a simplified integrated simulation model for analyzing radar performance at the theater level. The proposed framework defines the surveillance region using a detection coverage model and evaluates received signal characteristics through ratio-based signal-to-noise ratio (SNR) scaling with respect to range and target radar cross section (RCS). Detection probability as well as range and angular measurement errors are estimated based on the calculated SNR. Rain attenuation is incorporated using the specific attenuation model recommended by ITU-R and is directly reflected in the SNR calculation. Simulation results show that the SNR decreases with range, resulting in the degradation of detection probability and an increase in measurement errors, while rain conditions further intensify this performance degradation. The proposed model provides an efficient framework for theater-level radar performance sensitivity analysis when system parameters are limited.

Keywords

레이더 성능 분석(Radar Performance Analysis), 전구급 모의(Theater-Level Simulation), 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR), 탐지확률(Probability of Detection, Pd), 강우 감쇠(Rain Attenuation), 레이더 M&S(Radar Modeling and Simulation)

1. 서론

레이더 기반 감시 및 조기경보 체계의 성능 평가는 운용 개념 수립과 체계 설계 초기 단계에서 매우 중요한 요소로 간주된다. 특히 전구급(theater-level) 감시 환경에서는 넓은 공간 범위와 다양한 표적 조건, 그리고 변화하는 환경 요인을 고려하여 레이더 운용 성능을 사전에 분석할 필요가 있다[1,2]. 이러한 분석은 실제 체계 개발 이전 단계에서 다양한 시나리오를 검토하고 운용 개념을 검증하는 데 활용되며, 레이더의 탐지 성능과 측정 정확도가 거리, 표적 특성, 환경 요인 등에 따라 어떻게 변화하는지를 정량적으로 파악하는 데 목적이 있다.

일반적으로 레이더 성능 분석을 위해서는 송신 전력, 안테나 이득, 수신기 잡음지수, 신호 처리 이득 등 다양한 공학적 제원을 포함하는 상세 레이더 방정식 기반 모델이 활용된다[3]. 이러한 접근은 실제 레이더 성능을 정밀하게 모의할 수 있다는 장점이 있으나, 시스템 제원이 제한적으로 공개되는 환경이나 운용 개념 중심의 시나리오 분석에서는 적용에 어려움이 존재한다. 또한 전구급 분석에서는 수많은 시나리오 조합을 반복적으로 수행해야 하므로, 모든 분석에서 공학적 상세 모델을 적용하는 것은 계산 비용과 모델 구성 측면에서 비효율적일 수 있다. 이러한 이유로 레이더 성능의 절대적인 수치 정확도보다는 거리, 표적 RCS, 환경 조건 변화에 따른 성능 변화 경향을 일관된 방식으로 반영할 수 있는 단순화된 모의 모델이 요구된다.

전구급 수준의 레이더 모의에서는 탐지 성능과 측정 정확도를 결정하는 주요 물리적 요인을 유지하면서도 모델 구조를 단순화하는 접근이 유용하다. 레이더 탐지 과정에서 가장 핵심적인 변수는 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)이며, 탐지확률과 측정 정확도는 일반적으로 SNR에 의존하는 형태로 표현된다. 따라서 기준 조건에서 정의된 SNR을 기반으로 거리 및 표적 RCS 변화에 따른 상대적인 SNR 스케일링을 구성하고, 이를 탐지확률 및 측정오차 모델과 연동하는 방식은 전구급 분석에서 필요한 최소 물리성을 유지하면서도 효율적인 모의를 가능하게 한다. 이러한 구조는 레이더 방정식의 거리 감쇠 특성을 반영하면서도 복잡한 시스템 제원을 요구하지 않는다는 장점이 있다.

또한 레이더 운용 환경에서는 기상 조건이 탐지 성능에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 특히 강우에 의한 전파 감쇠는 특정 주파수 대역에서 레이더 신호의 전파 손실을 증가시키며, 결과적으로 탐지 확률 감소와 측정 불확실성 증가로 이어질 수 있다. 강우 감쇠는 국제전기통신연합(ITU-R) 권고에서 제시된 특정 감쇠 모델을 통해 강우율과 주파수의 함수로 표현될 수 있으며, 이러한 모델을 레이더 SNR 계산 과정에 반영함으로써 기상 환경 변화에 따른 성능 변화를 정량적으로 분석할 수 있다. 전구급 시나리오 분석에서는 이러한 환경 요인을 단순하면서도 물리적으로 일관된 방식으로 통합하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 전구급 수준의 레이더 성능 분석을 위한 단순화된 통합 모의 프레임워크를 제시한다. 제안하는 모델은 기준 성능점에서 정의된 SNR을 출발점으로 거리와 표적 RCS에 따른 SNR 스케일링을 수행하고, 이를 기반으로 탐지확률을 산출하며, SNR에 의존하는 거리 및 각도 측정오차 모델을 통해 레이더 측정 정확도를 표현한다. 또한 ITU-R 권고에 기반한 강우 감쇠 모델을 SNR 계산 과정에 직접 반영함으로써 건조 환경과 강우 환경에서의 탐지 성능 및 측정 불확실성 변화를 동일한 프레임에서 분석할 수 있도록 구성하였다. 이러한 구조는 상세 시스템 제원이 제한된 상황에서도 레이더 운용 범위 내에서 발생하는 주요 성능 변화 요인을 일관된 방식으로 반영할 수 있도록 하며, 다양한 시나리오 조건에서 레이더 성능의 상대적 변화를 효율적으로 평가할 수 있는 장점을 제공한다.

본 논문은 다음과 같은 구성으로 이루어진다. 2장

에서는 레이더 성능 모의를 위한 모델 구조를 설명하고, 탐지 커버리지 영역 정의, SNR 기반 탐지확률 모델, SNR 기반 측정오차 생성 모델, 그리고 강우 감쇠 모델을 순차적으로 제시한다. 3장에서는 제안한 모델을 이용하여 거리, 표적 RCS, 강우 조건에 따른 탐지 성능과 측정 오차의 변화를 시뮬레이션을 통해 분석한다. 마지막으로 4장에서는 연구 결과를 정리하고 전구급 레이더 성능 분석에서 제안 모델의 활용 가능성에 대해 논의한다.

2. 레이더 성능 모의 모델

본 장에서는 전구급 수준의 레이더 성능 분석을 위해 구성된 모의 모델을 설명한다. 제안하는 모델은 레이더 탐색 영역을 정의하는 탐지 커버리지(detection coverage) 모델과, 신호 대 잡음비를 기반으로 탐지 성능과 측정 오차를 계산하는 모델, 그리고 기상 환경에 따른 전파 감쇠를 반영하기 위한 강우 영향 모델로 구성된다. 이러한 구조는 복잡한 시스템 제원을 포함하지 않더라도 거리, 표적 특성, 환경 조건에 따른 레이더 성능 변화를 일관된 방식으로 분석할 수 있도록 설계되었다.

이후 절에서는 먼저 레이더 탐색 영역을 정의하기 위한 탐지 커버리지 모델을 설명하고, 다음으로 SNR 기반 탐지확률 및 측정 오차 생성 모델을 기술한다. 마지막으로 강우에 의한 전파 감쇠 모델을 제시하고, 이를 레이더 성능 계산 과정에 반영하는 방법을 설명한다.

2.1 탐지 커버리지(Detection Coverage) 모델

레이더 성능 모의에서 가장 기본적인 단계는 레이더가 탐지 가능한 공간 영역을 정의하는 것이다. 실제 레이더는 모든 방향을 동시에 탐지하는 것이 아니라, 탐색 가능한 거리 범위와 방위각 및 고각 범위가 제한된 상태에서 운용된다. 따라서 표적이 이러한 탐색 영역 내에 존재하는 경우에만 탐지 성능 계산을 수행하는 것이 합리적이다. 본 연구에서는 이러한 탐색 가능 영역을 탐지 커버리지 영역으로 정의한다.

레이더의 위치를 p_r 로 정의하고, 표적의 위치를 p_t 로 정의하면 두 위치 간의 상대 위치 벡터는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$r = p_t - p_r \quad (1)$$

상대 위치 벡터 $r=[x \ y \ z]^T$ 가 정의되면 레이더와 표적 사이의 슬랜트 거리(slanted range)는 벡터의 크기를 통해 계산된다.

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2)$$

여기서 R [km]은 레이더와 표적 사이의 실제 거리이다. 또한 레이더 좌표계에서의 방위각과 고각은 수평 거리와 높이 정보를 이용하여 계산된다. 먼저 수평 평면에서의 거리는 다음과 같이 정의된다.

$$R_h = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

방위각과 고각은 각각 다음과 같이 계산된다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right), \theta = \tan^{-1}\left(\frac{z}{R_h}\right) \quad (4)$$

여기서, ϕ : 방위각(rad),
 θ : 고각(rad).

레이더 운용에서는 최대 탐지 거리와 탐색 가능한 방위각 및 고각 범위가 설정되어 있으며, 이러한 조건을 만족하는 경우에만 표적이 레이더 탐색 영역 내에 존재한다고 판단한다. 따라서 탐지 커버리지 조건은 식 (5)와 같이 정의할 수 있다.

$$R \leq R_{\max}, \phi_{\min} \leq \phi \leq \phi_{\max}, \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max} \quad (5)$$

여기서, R_{\max} : 최대 탐지 거리(km),
 $\phi_{\min, \max}$: 탐색 방위각 최소, 최대 범위(rad),
 $\theta_{\min, \max}$: 탐색 고각 최소, 최대 범위(rad).

표적이 위 조건을 모두 만족하는 경우 해당 표적은 레이더의 탐지 커버리지 영역에 존재한다고 판단하며, 이후 단계에서 SNR 계산과 탐지확률 및 측정오차 생성 과정이 수행된다. 반대로 이러한 조건을 만족하지 않는 경우에는 레이더가 해당 표적을 탐지할 수 없

는 것으로 간주한다.

이와 같은 탐지 커버리지 모델은 실제 레이더의 빔 운용 범위와 감시 영역을 단순한 기하학적 조건으로 표현한 것으로, 전구급 수준의 시나리오 분석에서 레이더 탐지 가능 영역을 정의하는 기본적인 기준으로 활용될 수 있다. 또한 이러한 구조는 이후 절에서 설명하는 SNR 기반 탐지 성능 모델과 자연스럽게 연결되며, 레이더 탐색 영역 내에서의 성능 변화를 분석하는 기반을 제공한다.

2.2 SNR 및 탐지확률, 측정 오차 생성 모델

레이더 탐지 성능은 일반적으로 수신 신호의 신호 대 잡음비에 의해 결정된다. SNR은 레이더에서 송신된 전파가 표적에서 반사되어 수신기에 도달했을 때 신호 전력과 잡음 전력의 비를 의미하며, 탐지 여부뿐 아니라 거리 및 각도 측정 정확도에도 직접적인 영향을 미친다. 실제 레이더 성능 분석에서는 송신 전력, 안테나 이득, 시스템 손실, 잡음지수 등을 포함하는 레이더 방정식을 이용하여 수신 신호 전력을 계산한다. 그러나 전구급 수준의 운용 분석에서는 모든 시스템 제원을 상세하게 모델링하기보다 기준 성능 조건에서 정의된 SNR을 기준으로 거리 및 표적 특성에 따른 상대적인 변화를 반영하는 방식이 효율적이다.

본 연구에서는 기준 거리와 기준 표적 RCS에서 정의된 SNR을 기준점으로 설정하고, 거리와 RCS 변화에 따른 상대적인 SNR 변화를 계산하는 비율 기반 모델을 사용한다[3]. 기준 거리 R_{ref} 에서 기준 표적 RCS σ_{ref} 에 대해 정의된 기준 SNR을 SNR_{ref} 라고 할 때, 임의의 거리 R 와 표적 RCS σ 에 대한 SNR은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$SNR_{lin}(R, \sigma) = SNR_{ref, lin} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{ref}} \right) \left(\frac{R_{ref}}{R} \right)^4 \quad (6)$$

여기서, σ_{ref} : 기준 RCS(m²),
 R_{ref} : 기준 거리(km).

위 식은 레이더 방정식에서 나타나는 거리 감쇠 특성을 단순화하여 반영한 것으로, 수신 신호 전력이 거리의 네제곱에 반비례하는 특성을 이용한 표현이다. 이와 같은 구조를 사용하면 레이더의 상세 공학 제원을 포함

하지 않더라도 거리와 표적 특성 변화에 따른 상대적인 SNR 변화를 일관된 방식으로 계산할 수 있다.

계산된 SNR을 기반으로 레이더의 탐지 성능을 표현하기 위해 탐지확률(probability of detection, P_d)을 정의한다. 일반적으로 탐지확률은 오경보 확률(false alarm probability, P_f)과 수신 SNR의 함수로 표현되며, 본 연구에서는 단순 검파 모델을 이용하여 식 (7)과 같이 정의하였다[4].

$$P_d = P_f^{\frac{1}{1+SNR_{lim}}} \quad (7)$$

식 (10)은 SNR이 증가할수록 탐지확률이 증가하는 단조 관계를 갖는 함수 형태로, SNR 변화에 따른 탐지 성능의 변화를 간단한 구조로 표현할 수 있다. 이러한 방식은 복잡한 검파 알고리즘을 포함하지 않으면서도 SNR과 탐지 성능 간의 기본적인 관계를 반영할 수 있다는 장점이 있다.

레이더는 표적을 탐지하는 것뿐만 아니라 표적의 위치 정보를 측정하기 때문에 측정 정확도 또한 중요한 성능 요소가 된다. 일반적으로 레이더 측정 오차의 크기는 수신 SNR과 밀접한 관계를 가지며, SNR이 높을수록 측정 오차의 표준편차가 감소하는 특성을 보인다. 이러한 특성을 반영하기 위해 본 연구에서는 SNR을 기반으로 거리 및 각도 측정 오차를 생성하는 모델을 사용하였다.

먼저 거리 측정 오차의 표준편차는 레이더 신호의 대역폭과 SNR에 의해 결정되며 식 (8)과 같이 표현할 수 있다[5]. 레이더 거리 분해능과 수신 신호 품질 사이의 관계를 반영한 표현으로, 대역폭이 증가할수록 거리 측정 정확도가 향상되고 SNR이 증가할수록 측정 오차가 감소하는 특성을 나타낸다.

$$\sigma_R = \frac{c}{2B\sqrt{2SNR_{lim}}} \quad (8)$$

여기서, c : 광속(m/s),

B : 신호 대역폭(Hz).

방위각 및 고각과 같은 각도 측정 오차 또한 SNR에 의해 영향을 받으며, 일반적으로 레이더 안테나의 빔폭과 모노펄스 패턴 특성에 의해 결정된다. 본 연구에서는 각도 측정 오차의 표준편차를 식 (9)와 같이 표

현하였다[6]. SNR이 증가할수록 각도 측정 정확도가 향상되는 레이더 측정의 기본적인 특성을 반영한다. 또한 안테나 빔폭이 좁을수록 각도 분해능이 향상된다는 물리적 특성도 함께 고려된다.

$$\sigma_A = \frac{\theta_{3dB}}{k_M\sqrt{2SNR_{lim}}} \quad (9)$$

여기서, θ_{3dB} : 안테나 3dB 빔폭(deg),

k_M : 모노펄스 패턴 상수.

여기서 모노펄스 패턴 계수는 안테나 패턴과 합·차 채널 특성 등 모노펄스 레이더 구조의 영향을 반영하는 경험적 계수이다. 레이더 성능 분석에서는 일반적으로 $k_M \approx 1.6$ 의 값을 사용하며, 이는 다양한 모노펄스 레이더 시스템에서의 평균적인 성능 특성을 근사적으로 반영하기 위한 값이다.

본 연구에서는 식 (8)과 식 (9)를 이용하여 거리 및 각도 측정 오차의 표준편차를 계산하고, 이를 평균이 0인 가우시안 분포를 따르는 난수로 생성하여 레이더 측정값에 반영하였다. 이러한 방식은 SNR 변화에 따라 탐지 성능과 측정 정확도가 동시에 변화하는 레이더 측정 특성을 일관된 구조로 표현할 수 있도록 한다. 또한 동일한 SNR 값을 기반으로 탐지확률과 측정 오차가 함께 결정되기 때문에 전구급 수준의 레이더 모의에서 성능 변화의 물리적 경향을 안정적으로 반영할 수 있다.

2.3 강우 영향 모델

레이더 신호는 대기를 통과하여 전파되기 때문에 기상 조건에 따라 추가적인 감쇠가 발생할 수 있다. 특히 강우 환경에서는 빗방울에 의한 산란과 흡수 효과로 인해 전파의 전력 손실이 증가하며, 이러한 감쇠는 레이더 수신 신호의 SNR을 감소시키는 주요 요인으로 작용한다. 강우에 의한 전파 감쇠는 주파수와 강우율(rain rate)에 따라 달라지며, 특정 주파수 대역에서는 레이더 탐지 성능에 유의미한 영향을 줄 수 있다. 따라서 전구급 수준의 레이더 성능 모의에서도 강우 환경을 고려하는 것은 탐지 성능 변화의 현실적인 평가를 위해 필요하다.

강우 감쇠는 국제전기통신연합(ITU-R)에서 제시

한 권고 모델을 이용하여 표현할 수 있다. 해당 모델에서는 강우에 의한 특정 감쇠를 강우율의 함수로 정의하며 식 (10)과 같이 표현된다[7].

$$\gamma_R = kR_r^\alpha \quad (10)$$

여기서, k : 주파수 및 편파에 따른 계수,

α : 강우 감쇠 지수,

R_r : 강우율(mm/h).

위 식에서 계수 k 와 지수 α 는 레이더 운용 주파수와 편파 특성에 따라 달라지며, ITU-R 권고에서 제시된 테이블 값을 기반으로 결정된다. 특정 주파수에서의 값은 인접 주파수에 대한 계수를 이용하여 보간(interpolation)을 통해 계산할 수 있다.

강우 감쇠는 전파가 강우 영역을 통과하는 경로 길이에 비례하여 증가한다. 레이더 신호는 송신 후 표적까지 전파되고 다시 수신기로 돌아오는 왕복 경로를 가지므로, 총 감쇠량은 왕복 경로에 대해 적용된다. 강우 영역을 통과하는 전파 경로 길이를 L 이라고 할 때, 강우에 의한 총 감쇠량은 식 (11)과 같이 표현된다[7].

$$L_{rain} = 2\gamma_R L \quad (11)$$

여기서 계수 2는 레이더 신호의 왕복 전파 경로를 반영하기 위한 것이다. 즉, 송신 신호가 표적까지 전파되는 경로와 표적에서 반사되어 수신기로 돌아오는 경로 모두에서 동일한 감쇠가 발생한다고 가정한다.

강우에 의한 전파 감쇠는 레이더 수신 신호의 SNR을 감소시키는 형태로 반영된다. 건조 환경에서 계산된 SNR을 SNR_{dry} 라고 할 때, 강우 환경에서의 SNR은 식 (12)와 같이 표현된다.

$$SNR_{rain} = SNR_{dry} \cdot 10^{-\frac{L_{rain}}{10}} \quad (12)$$

이 식은 강우 감쇠가 증가할수록 수신 SNR이 감소하는 특성을 나타내며, 이러한 SNR 감소는 앞 절에서 정의한 탐지확률 계산과 측정 오차 모델에 직접적으로 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 건조 환경에서 계산된 SNR에 대해 식 (10)~(12)를 이용하여 강우 감쇠를 반영한 SNR을

계산하고, 이를 기반으로 탐지확률과 측정 오차를 재계산하였다. 이와 같은 구조를 사용하면 동일한 레이더 운용 조건에서 강우 환경에 따른 탐지 성능 저하와 측정 불확실성 증가를 정량적으로 비교할 수 있으며, 전구급 수준의 시나리오 분석에서 환경 요인이 레이더 성능에 미치는 영향을 효율적으로 평가할 수 있다.

2.4 모델 입력 및 출력 구성

앞 절에서는 레이더 탐색 영역을 정의하는 탐지 커버리지 모델, SNR 기반 탐지확률 및 측정 오차 생성 모델, 그리고 강우 감쇠 모델을 각각 설명하였다. 본 절에서는 앞서 정의한 모델들을 통합하여 전구급 수준의 레이더 성능 분석을 수행하기 위해 필요한 주요 입력 변수와 모델을 통해 산출되는 출력 변수의 구성을 정리한다.

제안하는 레이더 성능 모의 프레임은 크게 레이더 운용 조건, 표적 특성, 환경 조건의 세 가지 입력 요소를 기반으로 구성된다. 레이더 운용 조건은 탐색 거리 범위와 방위각 및 고각 범위, 기준 SNR 조건 등을 포함하며, 표적 특성은 표적의 RCS와 거리 조건으로 정의된다. 또한 환경 조건으로는 강우율과 주파수에 따른 전파 감쇠 효과가 고려된다. 이러한 입력 변수들은 앞 절에서 제시한 모델을 통해 SNR, 탐지확률, 그리고 거리 및 각도 측정 오차로 변환되며, 이를 통해 레이더 탐지 성능의 변화를 분석할 수 있다. Table 1은

Table 1. Input and output variables of the proposed theater-level radar performance simulation mode

Type	Parameters	Unit
input	Maximum radar detection range	km
	Radar search azimuth coverage	rad
	Radar search elevation coverage	rad
	Reference detection range	km
	SNR under reference conditions	dB
	Target radar cross section (RCS)	m ²
	Radar signal bandwidth	Hz
	Antenna 3 dB beamwidth	deg
	Rain rate	mm/h
	Radar operating frequency	GHz
output	Received SNR	dB
	Probability of detection	-
	Range measurement error standard deviation	m
	Angle measurement error standard deviation	deg

본 연구에서 사용된 레이더 성능 모의 모델의 주요 입력 변수와 출력 변수를 정리한 것이다.

이와 같은 입력-출력 구조를 이용하면 레이더 시스템의 상세 공학 제원을 포함하지 않더라도 거리, 표적 RCS, 그리고 강우 환경 변화에 따른 탐지 성능과 측정 불확실성의 변화를 정량적으로 분석할 수 있다. 또한 입력 변수의 조합을 변경함으로써 다양한 운용 시나리오에 대한 레이더 성능 변화를 비교할 수 있으며, 전구급 수준의 감시 및 조기경보 체계 분석에서 활용 가능한 레이더 성능 모의 프레임워크를 제공한다.

3. 시뮬레이션 및 결과 분석

본 장에서는 2장에서 제시한 전구급 수준 레이더 성능 모의 모델을 이용하여 거리, 표적 RCS, 그리고 강우 조건에 따른 SNR, 탐지확률, 측정 오차의 변화를 분석한다. 시뮬레이션은 레이더 운용 주파수를 $f=5$ [GHz]로 설정한 조건에서 수행하였으며, 건조 환경(dry)과 강우 환경(rain)을 동일한 기준 조건에서 비교함으로써 강우 감쇠가 레이더 성능에 미치는 영향을 정량적으로 확인하였다. 본 연구에서는 레이더 방정식의 상대 스케일을 유지하는 비율 기반 SNR 모델을 사용하므로, 결과는 특정 장비의 절대 성능을 재현하기보다 거리 및 환경 변화에 따른 성능 변화 경향을 일관된 방식으로 제시하는 데 목적이 있다.

3.1 SNR 변화 특성 분석

Fig. 1은 거리 R [km]에 따른 SNR [dB] 변화를 건조 및 강우 조건에서 비교한 결과이다. 비율 기반 SNR 모델에 의해 SNR은 거리 증가에 따라 R^4 스케일로 감소하는 형태를 보이며, 이는 레이더 방정식에서 수신 전력이 거리의 네제곱에 반비례하는 특성이 반영된 결과이다. 따라서 동일한 표적 RCS 조건에서 거리 증가에 따른 SNR 감소는 급격하게 나타나며, 특정 거리 이후에는 탐지 및 측정 정확도 관점에서 의미 있는 성능 저하가 발생하는 구간이 형성된다.

RCS 변화에 따른 SNR 차이는 σ/σ_{ref} 비율로 반영되므로, RCS가 증가할수록 동일 거리에서 SNR이 상승하는 경향이 나타난다. Fig. 1에서 세 가지 RCS 곡선은 거리 축에 대해 유사한 형태를 유지하면서 dB 축 방향으로 평행 이동하는 형태로 나타나며, 이는

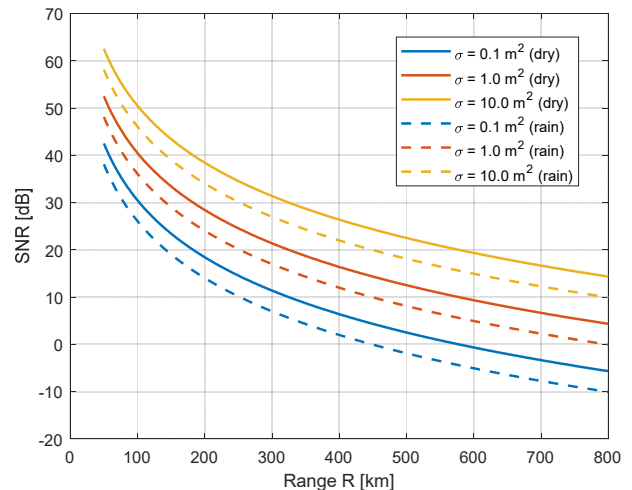


Fig. 1. Comparison of SNR versus range under dry and rain conditions for different target RCS values

RCS가 SNR에 선형으로 작용하는 모델 구조의 결과이다. 이러한 특성은 전구급 분석에서 표적 크기 또는 반사 특성 변화가 탐지 성능에 미치는 영향을 직관적으로 비교할 수 있게 한다.

강우 환경에서는 ITU-R 특정 감쇠 모델에 의해 추가적인 전파 손실이 발생하므로, 동일 거리 및 RCS 조건에서 SNR이 건조 환경 대비 감소한다. 강우 감쇠는 경로 길이에 비례하여 누적되는 특성을 가지므로, 강우 조건에서의 SNR 감소량은 거리 증가에 따라 점진적으로 커지는 경향을 보인다. 결과적으로 Fig. 1에서 강우 조건 곡선은 건조 조건 곡선에 비해 낮은 SNR을 나타내며, 장거리 구간에서 두 조건 간 차이가 더 명확하게 관찰된다. 이와 같은 SNR 감소는 단순히 탐지 가능 여부에만 영향을 주는 것이 아니라, 이후 단계에서 탐지확률과 측정 오차에 연쇄적으로 영향을 미치는 원인 변수로 작용한다.

3.2 탐지확률 변화 특성 분석

Fig. 2는 Fig. 1에서 계산된 SNR을 기반으로 탐지확률 P_d 를 산출한 결과를 건조 및 강우 환경에서 비교한 것이다. 탐지확률은 SNR의 단조 증가 함수로 정의되므로, SNR이 높은 근거리 구간에서는 P_d 가 1에 근접하고, SNR이 감소하는 장거리 구간에서는 P_d 가 급격히 저하되는 형태를 보인다. 이때 탐지확률 곡선이 급격히 꺾이는 구간은 모델 관점에서 탐지 성능이 실질적으로 제한되는 전이 구간으로 해석할 수 있으며, 전구급 시나리오 분석에서 운용 가능 거리의 실질적인

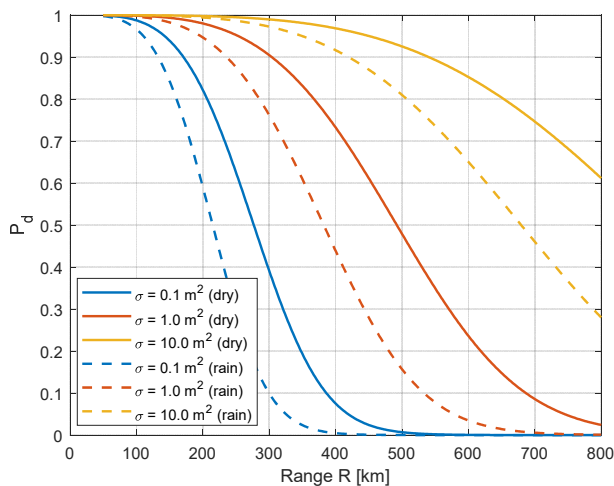


Fig. 2. Detection probability versus range under dry and rain conditions for different target RCS values

한계를 설정하는 데 활용될 수 있다.

RCS 조건에 따른 탐지확률 차이는 SNR 곡선의 평행 이동 특성과 동일한 방식으로 나타난다. RCS가 큰 표적은 장거리에서도 상대적으로 높은 SNR을 유지하므로 탐지확률 저하 구간이 더 먼 거리로 이동하는 경향을 보이며, RCS가 작은 표적은 상대적으로 빠른 거리에서 탐지확률이 저하된다. 이러한 차이는 전구급 분석에서 다양한 표적 유형에 대한 탐지 성능 민감도를 비교하는 데 직접적으로 활용 가능하다.

강우 조건에서는 SNR이 추가로 감소하므로 탐지확률 곡선 또한 전반적으로 낮아지며, 특히 탐지 성능 전이 구간이 근거리 방향으로 이동하는 특성이 나타난다. 이는 강우 감쇠가 장거리 탐지 성능에 더 큰 영향을 줄 수 있음을 의미하며, 전구급 운용에서 기상 조건 변화가 탐지 가능한 거리 범위를 축소시키는 방식으로 작용함을 보여준다. 또한 동일한 RCS 조건에서도 강우 환경에서는 탐지확률이 일정 수준 이하로 떨어지는 구간이 더 넓게 형성될 수 있으며, 이는 체계 수준에서 탐색 자원 운용 및 경보 시간 확보 관점에 영향을 줄 수 있다.

3.3 측정 오차 변화 특성 분석

Fig. 3와 Fig. 4는 SNR 기반 오차 모델을 이용하여 계산된 거리 오차 표준편차 σ_R [m]와 각도 오차 표준편차 σ_A [deg]의 거리 변화 특성을 건조 및 강우 환경에서 비교한 결과이다. 오차 모델은 $\sigma_{R,A} \propto 1/\sqrt{SNR_{lim}}$ 형태이므로, 거리 증가로 인해 SNR이 감소할수록 측

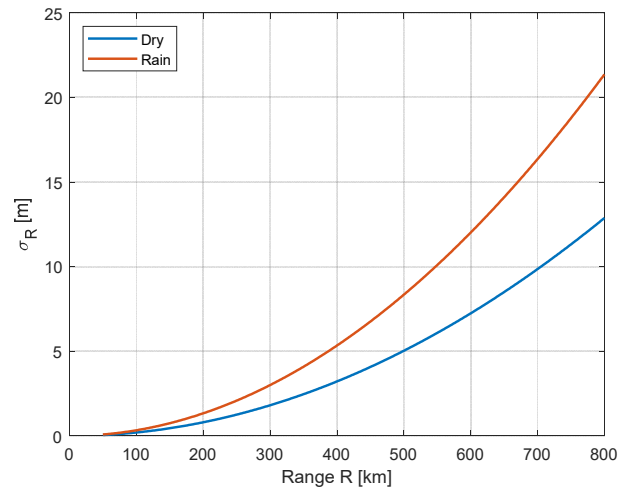


Fig. 3. Comparison of range measurement error standard deviation versus range under dry and rain conditions

정 오차가 증가하는 경향이 나타난다. 즉, 탐지확률 저하가 본격화되기 이전의 구간에서도 SNR 감소는 측정 오차의 증가로 먼저 나타날 수 있으며, 이는 탐지 성능뿐 아니라 측정 기반 후속 처리 단계의 불확실성을 증가시키는 요인으로 작용한다.

Fig. 3에서 거리 오차 표준편차는 거리 증가에 따라 점진적으로 증가하며, 특정 거리 이후에는 증가율이 커지는 형태를 보인다. 이는 SNR이 로그 스케일에서는 완만하게 감소하는 것처럼 보이더라도 선형 스케일에서의 감소가 누적될 때 $1/SNR$ 형태로 오차가 증가하기 때문이다. 또한 대역폭 B [Hz]가 고정된 조건에서는 거리 오차의 변화는 SNR 변화에 의해 지배되므로, 결과적으로 Fig. 1의 SNR 감소 특성이 Fig. 3의 오차 증가 특성으로 직접 전달된다.

Fig. 4의 각도 오차 표준편차 또한 거리 증가에 따라 증가하는 경향을 보이며, 이는 안테나 빔폭 θ_{3dB} [deg]와 모노펄스 상수 k_M 가 고정된 조건에서 SNR 변화가 각도 오차를 결정하는 주요 요인으로 작용하기 때문이다. 각도 오차는 방위각 및 고각 측정의 불확실성을 의미하며, 장거리 구간에서 각도 오차가 증가하면 동일 표적에 대한 위치 추정의 횡방향 오차가 크게 확대될 수 있다. 전구급 수준의 탐지·경보 체계에서는 이러한 각도 오차 증가가 표적 위치 불확실성의 확대로 이어질 수 있으며, 이는 추적 유지 및 교전 자원 배분 관점에서 추가적인 부담 요인이 된다.

강우 조건에서는 SNR 감소로 인해 거리 오차와 각도 오차가 모두 증가하며, 이 증가량은 SNR 감소량에 의해 결정된다. 결과적으로 Fig. 3와 Fig. 4에서 강우

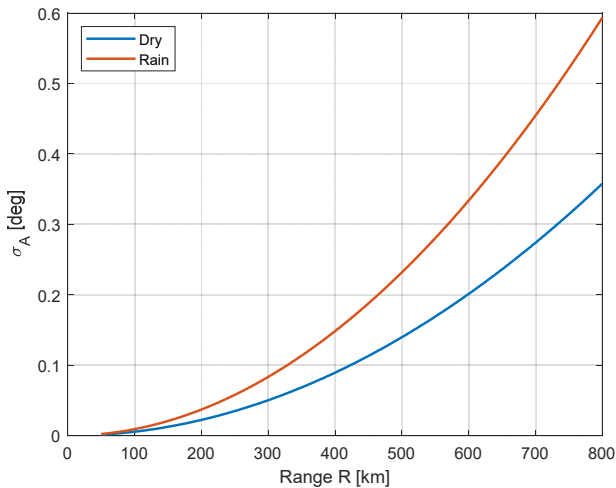


Fig. 4. Comparison of angular measurement error standard deviation versus range under dry and rain conditions

조건 곡선은 건조 조건 대비 더 큰 오차 표준편차를 나타내며, 장거리 구간에서 그 차이가 더 뚜렷해진다. 이러한 결과는 강우 환경이 탐지확률을 낮추는 효과와 동시에 측정 정확도를 저하시켜 레이더 기반 표적 정보의 신뢰도를 감소시킬 수 있음을 시사한다. 특히 전구급 분석에서 탐지 범위 축소와 측정 불확실성 증가는 경보 시간 확보 및 후속 체계 운용에 복합적인 영향을 줄 수 있으므로, 강우 조건에 대한 성능 민감도를 사전에 정량화하는 것이 의미가 있다.

종합하면, Fig. 1부터 Fig. 4의 결과는 비율 기반 SNR 모델, SNR 기반 탐지확률 모델, 그리고 SNR 기반 측정오차 모델이 하나의 흐름으로 연동되며 거리, RCS, 강우 조건 변화에 따른 성능 변화 경향을 일관되게 재현함을 보여준다. 이러한 구조는 상세 제원이 제한된 환경에서도 전구급 수준에서 요구되는 레이더 성능 민감도 분석을 수행하는 데 적합하며, 다양한 운용 조건에서 성능 변화의 상대적 비고를 효율적으로 지원할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 전구급 수준의 레이더 성능 분석을 위한 단순화된 통합 모의 모델을 제시하였다. 제안한 모델은 레이더 탐색 영역을 정의하는 인-커버리지 모델을 기반으로, 기준 성능점에서 정의된 SNR을 이용하여 거리와 표적 RCS 변화에 따른 SNR 스케일을 계산하고, 이를 탐지확률과 측정 오차 모델에 연동하는 구조로 구성하였다. 또한 강우 환경에서 발생하는 전

파 감쇠 효과를 ITU-R 권고 기반 특정 감쇠 모델을 이용하여 SNR 계산 과정에 반영함으로써 기상 조건 변화에 따른 레이더 성능 변화를 동일한 프레임에서 분석할 수 있도록 하였다.

시뮬레이션 결과 거리가 증가함에 따라 SNR이 R^{-4} 특성에 의해 감소하며 이에 따라 탐지확률이 급격히 저하되는 구간이 형성됨을 확인하였다. 또한 표적 RCS 변화는 동일 거리에서 SNR 곡선을 평행 이동시키는 형태로 나타났으며, 강우 조건에서는 전파 감쇠로 인해 SNR이 추가적으로 감소하여 탐지확률 곡선이 근거리 방향으로 이동하는 특성이 나타났다. SNR 기반 오차 모델 분석 결과 거리 및 각도 측정 오차의 표준편차는 SNR 감소에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 특히 장거리 구간과 강우 환경에서 측정 오차가 더욱 증가하는 특성이 나타났다. 이러한 결과는 강우 환경이 레이더의 탐지 성능뿐 아니라 측정 정확도에도 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

본 연구에서 제시한 모델은 상세한 레이더 시스템 제원을 포함하지 않더라도 거리, 표적 특성, 그리고 환경 요인에 따른 성능 변화 경향을 일관된 방식으로 표현할 수 있다는 특징을 가진다. 이러한 구조는 다양한 운용 시나리오를 반복적으로 분석해야 하는 전구급 수준의 성능 평가 환경에서 효율적으로 활용될 수 있으며, 제한된 입력 변수만으로도 탐지 성능과 측정 불확실성의 변화를 동시에 분석할 수 있다는 장점을 제공한다.

향후 연구에서는 전구급 수준에서의 지구 곡률에 따른 시선 제한, 대기 굴절 효과, 그리고 해상 클러터와 같은 추가적인 환경 요인을 모델에 포함함으로써 레이더 성능 모의의 현실성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 연구에서 제시한 SNR 기반 탐지 및 오차 모델을 추적 및 센서 융합 단계와 연계하여 레이더 탐지 정보의 활용성을 분석하는 방향으로 연구를 확장할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] David Knox Barton, Radar System Analysis and Modeling, Artech House, 2005.
- [2] Merrill I. Skolnik, 'Radar Systems for Ballistic Missile Defense,' IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, VOL. 17, NO. 11, 2002, pp. 3-7.
- [3] Merrill I. Skolnik, Introduction to Radar Systems (3rd ed),

McGraw-Hill, 2001.

[4] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing* (2nd ed.), McGraw-Hill, 2014.

[5] Bassem R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB* (3rd ed.), CRC Press, 2013.

[6] Merrill I. Skolnik, 'Angle Measurement,' in *Introduction to*

Radar Systems (3rd ed.), McGraw-Hill, 2001, ch. 4.

[7] International Telecommunication Union, *Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods*, Recommendation ITU-R P.838-3, Geneva, Switzerland: International Telecommunication Union, 2005.