



Received: 2026/05/18
Revised: 2026/05/30
Accepted: 2026/06/15
Published: 2026/06/30

***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

레이다 성능 변수의 민감도 차수 기반 탐지거리 변화 분석

Detection Range Variation Analysis Based on Sensitivity Orders of Radar Performance Parameters

박명훈*, 김정, 이성균, 고진용, 장재덕

LIG 디펜스&에어로스페이스 M&S팀 수석연구원

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

Chief research engineer, M&S Team, LIG Defense&Aerospace

Abstract

본 논문에서는 레이다 방정식을 기반으로 주요 성능 변수 변화에 따른 탐지거리 민감도 특성을 분석하였다. 탐지거리 변화 특성은 민감도 차수(sensitivity order) 관점에서 $n=1/2$ 차수 계열과 $n=\pm 1/4$ 차수 계열로 구분하여 분석하였다. 또한 선형 변화율 및 dB 기반 조건에서 탐지거리 감소 특성을 비교하고, 기준 탐지거리별 실제 감소 거리 특성을 분석하였다. 분석 결과 안테나 이득과 같은 $n=1/2$ 차수 계열은 $n=\pm 1/4$ 차수 계열 대비 상대적으로 높은 탐지거리 민감도를 나타냈다. 본 연구 결과는 레이다 체계 개발, 시험평가 및 M&S(modeling and simulation) 기반 성능 분석을 위한 정량적 reference 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

In this paper, the sensitivity characteristics of radar detection range variations were analyzed based on the radar equation. The detection range variation characteristics were classified into the $n=1/2$ and $n=\pm 1/4$ sensitivity-order groups. In addition, detection range reduction characteristics were comparatively analyzed under linear-ratio and dB-based degradation conditions, and actual range reduction characteristics for different reference detection ranges were investigated. The analysis results showed that the $n=1/2$ sensitivity-order group, such as antenna gain, exhibits relatively higher detection-range sensitivity than the $n=\pm 1/4$ sensitivity-order group. The proposed results are expected to be utilized as quantitative reference data for radar system development, test and evaluation, and M&S (modeling and simulation)-based performance analysis.

Keywords

레이다 방정식(Radar Equation),
탐지거리(Detection Range),
민감도 분석(Sensitivity Analysis),
신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio),
M&S(Modeling and Simulation),
성능 변수(Performance Parameter)

1. 서론

레이다(radar)는 항공기, 함정, 탄도탄 및 다양한 표적을 탐지하고 추적하기 위한 핵심 감시 자산으로 활용되고 있으며, 탐지거리는 레이다 성능을 대표하는 주요 지표 중 하나이다. 특히 장거리 감시 및 조기경보 임무에서는 탐지거리 변화가 표적 탐지 가능 시간, 대응 시간 및 감시 범위에 직접적인 영향을 미치므로 레이다 성능 변화에 따른 탐지거리 특성을 정량적으로 분석하는 과정이 중요하다. 또한 최근에는 다기능레이다(multi-function radar, MFR) 운용 환경이 확대됨에 따라 다양한 운용 조건 및 시스템 열화 상황에서 탐지 성능 분석 필요성이 증가하고 있다[1-4].

실제 레이다 체계 개발 및 운용 과정에서는 송신출력 감소, 안테나 성능 저하, 시스템 손실 증가 및 요구 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR) 변화와 같은 다양한 성능 변화 요소가 발생할 수 있다. 이러한 변화 요소는 탐지거리에 직접적인 영향을 미치며, 사업 및 시험 과정에서는 출력이 일정 수준 감소할 경우 탐지거리가 얼마나 감소하는지 또는 안테나 이득 변화가 탐지 성능에 얼마나 민감하게 반영되는지에 대한 분석이 지속적으로 필요하다. 그러나 대부분의 경우 개별 변수에 대한 단편적인 계산 또는 경험적 판단 수준에서 분석이 수행되며, 주요 변수 변화가 탐지거리 감소로 어떻게 전이되는지를 동일 기준에서 비교·분석한 정량적 자료는 상대적으로 부족하다.

기존 레이더 방정식 기반 연구들은 주로 최대 탐지 거리 산출, 표적 탐지 성능 분석 및 신호대잡음비 계산에 초점을 두고 있으며, 탐지거리 변화 특성을 민감도 차수(sensitivity order) 관점에서 체계적으로 비교한 연구는 제한적이다. 또한 실제 사업 및 운용 환경에서는 선형 변화율보다 dB 단위의 성능 열화 표현이 일반적으로 사용됨에도 불구하고, 변수별 dB 변화가 탐지거리 감소율에 미치는 영향을 직관적으로 비교·분석한 연구 사례는 많지 않다.

본 논문에서는 레이더 방정식을 기반으로 주요 성능 변수 변화에 따른 탐지거리 민감도를 정규화된 형태로 분석하였다. 이를 위해 탐지거리 변화 특성을 민감도 차수 관점에서 재구성하였으며, 안테나 이득과 같이 $n=1/2$ 차수 특성을 가지는 변수와 송신출력, 표적 radar cross section(RCS), 시스템 손실 및 요구 SNR과 같이 $n=\pm 1/4$ 차수 특성을 가지는 변수들을 구분하여 분석하였다. 또한 선형 변화율 기반 분석, dB 열화 기반 분석 및 기준 탐지거리별 실제 감소 거리 분석을 수행함으로써 변수 변화가 탐지거리 감소로 전이되는 특성을 정량적으로 비교하였다. 본 연구 결과는 M&S(modeling and simulation), 레이더 체계 개발 및 시험평가 기반 성능 분석 과정에서 활용 가능한 정량적 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 이론 배경 및 민감도 모델

레이더 탐지거리는 송신출력, 안테나 이득, 표적 radar cross section(RCS), 시스템 손실 및 요구 신호 대잡음비와 같은 다양한 변수의 영향을 동시에 받는다. 특히 레이더 체계 개발 및 운용 환경에서는 특정 변수의 성능 변화가 실제 탐지 성능에 얼마나 민감하게 반영되는지를 정량적으로 분석하는 과정이 중요하다. 그러나 레이더 방정식에 포함된 변수들은 서로 다른 형태로 탐지거리에 반영되므로 단순 변수 변화량만으로는 실제 탐지거리 감소 특성을 직관적으로 판단하기 어렵다.

일반적으로 송신출력 감소와 안테나 이득 감소는 모두 탐지거리 감소를 유발하지만, 탐지거리에 반영되는 민감도 수준은 동일하지 않다. 또한 시스템 손실 증가 및 요구 SNR 증가와 같은 성능 저하 요소 역시 탐지거리 감소를 유발하지만, 그 영향 특성은 레이더

방정식 내 변수의 위치 및 지수 관계에 따라 달라진다. 따라서 탐지거리 변화 특성을 분석하기 위해서는 단순 변수 변화량이 아니라 탐지거리로 전이되는 민감도 차수를 기반으로 접근할 필요가 있다.

본 장에서는 레이더 방정식을 기반으로 탐지거리 산출 모델을 정리하고, 주요 변수 변화가 탐지거리 변화로 전이되는 관계를 민감도 차수 관점에서 분석하였다. 또한 변수별 탐지거리 변화 특성을 정규화된 형태로 재구성함으로써 서로 다른 변수 변화 조건에서도 탐지거리 민감도를 동일 기준에서 비교할 수 있도록 하였다.

2.1 레이더 방정식 기반 탐지거리 모델

레이더의 최대 탐지거리는 송신 신호가 표적에 반사되어 수신기에 도달할 때의 신호대잡음비가 요구 탐지 임계값 이상이 되는 조건을 기준으로 결정된다. 일반적인 단일 정지 표적 기반 모노스태틱 레이더 환경에서 수신 신호의 신호대잡음비는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[4,5].

$$SNR \propto \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{R^4 L} \quad (1)$$

여기서, P_t : 송신출력(W),

G : 안테나 이득(W/W),

λ : 파장(m),

σ : 표적 RCS(m^2),

R : 표적 거리(m),

L : 시스템 및 전파 손실(W/W).

식 (1)에서 탐지거리는 송신 신호가 표적까지 전파되는 과정과 반사되어 다시 수신기로 복귀하는 왕복 경로(two-way propagation)에 의해 거리의 4제곱에 반비례하는 특성을 가진다. 또한 안테나 이득은 송신 및 수신 과정에 동시에 반영되므로 제곱 형태로 포함된다. 반면 시스템 손실은 전파 손실, 시스템 내부 손실 및 기타 비이상적 요소를 포함하는 성능 저하 항으로 작용한다.

레이더가 표적을 탐지하기 위해서는 수신 신호의 SNR이 최소 요구 탐지 임계값 이상이어야 하며, 이를 기준으로 최대 탐지거리 $R_{\max}$ 를 정리하면 식 (2)와

같은 형태로 표현할 수 있다.

$$R_{\max} \propto \left(\frac{P_t G^2 \sigma}{L \cdot \text{SNR}_{\text{req}}} \right)^{1/4} \quad (2)$$

여기서, SNR_{req} : 요구 탐지 SNR(W/W).

식 (2)에서 확인할 수 있듯이 탐지거리는 대부분의 변수에 대해 4제곱근 형태로 반응하며, 이는 특정 변수의 변화가 탐지거리 변화로 전이되는 과정에서 민감도가 감소함을 의미한다. 예를 들어 송신출력이 50% 감소하더라도 탐지거리는 단순 선형적으로 감소하지 않으며, 4제곱근 관계에 따라 상대적으로 완만한 감소 특성을 나타낸다. 반면 안테나 이득은 레이더 방정식 내에서 송신 및 수신 경로에 동시에 반영되므로 다음과 같이 탐지거리와 제곱근 관계를 가진다.

따라서 동일한 dB 수준의 성능 변화가 발생하더라도 안테나 이득 변화는 송신출력 또는 RCS 변화 대비 탐지거리에 더 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 특성은 레이더 탐지거리 변화가 단순 변수 변화량이 아니라 변수별 민감도 차수에 의해 결정됨을 의미하며, 본 논문에서는 이를 기반으로 탐지거리 민감도 특성을 정량적으로 분석하였다.

2.2 민감도 차수 기반 탐지거리 모델

레이더 탐지거리 변화 특성을 직관적으로 분석하기 위해서는 개별 변수 자체보다 변수 변화가 탐지거리로 전이되는 관계를 정규화된 형태로 표현할 필요가 있다. 특히 레이더 방정식에 포함되는 변수들은 서로 다른 지수 형태로 탐지거리에 반영되므로 동일한 비율 변화가 발생하더라도 탐지거리 감소 수준은 변수 종류에 따라 달라질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 변수 변화와 탐지거리 변화 간의 관계를 민감도 차수 관점에서 재정의하였다.

기준 상태의 변수 및 탐지거리를 각각 x_{ref} 및 R_{ref} 라 정의하고, 변화된 상태를 x 및 R 로 정의하면 탐지거리 변화 관계는 식 (3)과 같은 정규화 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{R}{R_{\text{ref}}} = \left(\frac{x}{x_{\text{ref}}} \right)^n \quad (3)$$

여기서, n : 민감도 차수.

레이더 방정식 기반 탐지거리 모델을 기준으로 주요 변수의 민감도 차수를 정리하면 안테나 이득은 $n=1/2$ 차수 특성을 가지며, 송신출력 및 RCS는 $n=1/4$ 차수 특성을 가진다. 반면 시스템 손실 및 요구 SNR은 성능 저하 항으로 작용하므로 $-1/4$ 차수 특성을 가진다.

안테나 이득의 경우 레이더 방정식 내에서 송신 및 수신 과정에 동시에 반영되므로 탐지거리와 다음 관계를 가진다.

$$\frac{R}{R_{\text{ref}}} = \left(\frac{G}{G_{\text{ref}}} \right)^{1/2} \quad (4)$$

식 (4)에서 확인할 수 있듯이 안테나 이득은 탐지거리와 제곱근 관계를 가지므로 동일한 변수 변화 조건에서도 상대적으로 높은 탐지거리 민감도를 나타낸다. 예를 들어 안테나 이득이 50% 감소할 경우 탐지거리 비율은 약 0.707 수준으로 감소하게 된다.

반면 송신출력 및 표적 RCS는 탐지거리와 4제곱근 관계를 가지며 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{R}{R_{\text{ref}}} = \left(\frac{P_t}{P_{t,\text{ref}}} \right)^{1/4} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\text{ref}}} \right)^{1/4} \quad (5)$$

이러한 변수들은 탐지거리와 4제곱근 관계를 가지므로 비교적 큰 변수 변화에도 탐지거리 변화는 상대적으로 완만하게 나타난다. 예를 들어 송신출력이 50% 감소할 경우 탐지거리 비율은 약 0.841 수준으로 감소하게 된다.

시스템 손실 및 요구 SNR은 성능 저하 항으로 작용하므로 탐지거리와 역의 4제곱근 관계를 가진다.

$$\frac{R}{R_{\text{ref}}} = \left(\frac{L}{L_{\text{ref}}} \right)^{-1/4} = \left(\frac{\text{SNR}_{\text{req}}}{\text{SNR}_{\text{req,ref}}} \right)^{-1/4} \quad (6)$$

식 (6)에서 알 수 있듯이 시스템 손실 및 요구 SNR 증가 역시 탐지거리 감소를 유발하지만, 변화 특성 자체는 $1/4$ 차수 계열과 동일한 크기의 민감도를 가진다. 즉 $1/4$ 및 $-1/4$ 차수는 탐지거리 변화 방향만 다를 뿐 민감도 크기 자체는 동일하다.

결과적으로 레이더 탐지거리 변화 특성은 크게 $n=1/2$ 차수 계열과 $n=\pm 1/4$ 차수 계열로 구분할 수 있

으며, 본 논문에서는 이를 기반으로 변수 변화에 따른 탐지거리 민감도 특성을 정량적으로 분석하였다.

2.3 dB 기반 탐지거리 변화 모델

실제 레이다 체계 개발 및 운용 환경에서는 성능 변화가 대부분 dB 단위로 표현된다. 특히 송신출력, 안테나 이득 및 시스템 손실과 같은 주요 성능 변수들은 dB 기준으로 관리되며, 시험평가 및 성능 분석 과정에서도 특정 dB 수준의 성능 변화가 탐지거리에 얼마나 영향을 미치는지가 중요한 분석 요소로 활용된다. 따라서 변수 변화에 따른 탐지거리 민감도를 실제 운용 관점에서 분석하기 위해서는 dB 기반 변화 특성을 함께 고려할 필요가 있다.

2.2절에서 정의한 민감도 차수 기반 탐지거리 모델을 dB 형태로 표현하면 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{R}{R_{ref}} = 10^{\frac{n x_{dB}}{10}} \quad (7)$$

여기서, x_{dB} : 변수 변화량(dB).

식 (7)은 변수의 dB 변화량이 탐지거리 변화로 전이되는 관계를 민감도 차수 기반으로 표현한다. 즉 동일한 dB 수준의 성능 변화가 발생하더라도 민감도 차수 n 의 크기에 따라 실제 탐지거리 감소 수준은 달라진다.

안테나 이득과 같은 $n=1/2$ 차수 계열은 동일한 dB 변화 조건에서도 상대적으로 큰 탐지거리 변화를 유발한다. 반면 송신출력, RCS, 시스템 손실 및 요구 SNR과 같은 $n=\pm 1/4$ 차수 계열은 상대적으로 완만한 탐지거리 변화 특성을 나타낸다. 또한 $n=1/4$ 및 $n=-1/4$ 차수 계열은 탐지거리 변화 방향만 다를 뿐 동일한 민감도 크기를 가진다. 즉 출력 증가와 손실 감소는 동일한 수준의 탐지거리 증가 효과를 가지며, 출력 감소와 손실 증가는 동일한 수준의 탐지거리 감소 효과를 가진다.

또한 동일한 탐지거리 비율 감소가 발생하더라도 기준 탐지거리가 증가할수록 실제 감소 거리는 크게 증가한다. 따라서 장거리 감시 및 조기경보 레이다 환경에서는 상대적으로 작은 수준의 성능 열화도 실제 운용 범위 측면에서는 큰 탐지거리 감소로 이어질 수 있다. 본 논문에서는 이러한 dB 기반 탐지거리 변화

특성을 바탕으로 민감도 차수별 탐지거리 감소 특성을 정량적으로 분석하였다.

2.4 시뮬레이션 및 분석 조건

본 논문에서는 레이다 주요 성능 변수 변화에 따른 탐지거리 민감도 특성을 분석하기 위해 정규화 기반 시뮬레이션 환경을 구성하였다. 분석은 특정 레이다 체계의 절대 성능을 평가하기 위한 목적이 아니라, 변수 변화가 탐지거리 변화로 전이되는 상대적 민감도 특성을 비교·분석하기 위한 목적에서 수행되었다. 따라서 모든 분석 결과는 기준 탐지거리 대비 변화 비율 형태로 정규화하여 표현하였다.

민감도 분석은 크게 선형 변화율 기반 분석과 dB 열화 기반 분석으로 구분하였다. 선형 변화율 기반 분석에서는 기준 변수 대비 변화 비율을 적용하여 탐지거리 변화 특성을 분석하였으며, dB 기반 분석에서는 실제 레이다 체계 성능 분석 환경을 고려하여 dB 단위 열화량에 따른 탐지거리 감소 특성을 분석하였다.

분석 변수는 민감도 차수에 따라 $n=1/2$ 차수 계열과 $n=\pm 1/4$ 차수 계열로 구분하였다. $n=1/2$ 차수 계열은 안테나 이득 변화 특성을 의미하며, $n=\pm 1/4$ 차수 계열은 송신출력, RCS, 시스템 손실 및 요구 SNR 변화 특성을 대표하도록 구성하였다. 또한 $n=1/4$ 및 $n=-1/4$ 차수 계열은 탐지거리 변화 방향만 다를 뿐 동일한 민감도 크기를 가지므로 동일 계열로 분류하여 분석하였다.

선형 변화율 기반 분석에서는 변수 변화 비율을 0.1~1.5 범위로 설정하였다. 이는 기준 변수 대비 90% 감소부터 50% 증가까지의 변화 조건을 포함하며, 다양한 성능 변화 상황에서의 탐지거리 민감도 특성을 비교하기 위한 목적이다. dB 기반 분석에서는 실제 레이다 체계 열화 상황을 고려하여 0~12 dB 범위의 성능 변화 조건을 적용하였다. 특히 3 dB, 6 dB 및 10 dB 수준의 변화는 실제 레이다 성능 분석 및 시험평가 과정에서 자주 활용되는 대표적인 성능 변화 기준으로 적용하였다.

또한 실제 운용 환경에서의 탐지거리 감소 특성을 분석하기 위해 기준 탐지거리를 100 km, 150 km, 200 km, 250 km 및 300 km로 설정하였다. 이를 통해 동일한 민감도 차수 및 dB 변화 조건에서도 기준 탐지거리에 따라 실제 감소 거리(km)가 어떻게 변화

하는지를 비교하였다. 특히 장거리 감시 및 조기경보 레이다 환경에서는 작은 수준의 성능 열화도 실제 탐지거리 측면에서는 수십 km 수준의 감소로 이어질 수 있으므로, 기준 탐지거리별 실제 감소 거리 분석을 수행하였다. 본 논문에서 사용한 주요 분석 조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Simulation parameters

Parameters	Value	Unit
Linear ratio range	0.1~1.5	-
dB degradation range	0~12	dB
Sensitivity orders	1/2, $\pm 1/4$	-
Reference detection ranges	100, 150, 200, 250, 300	km
Representative degradation levels	3, 6, 10	dB

분석 결과는 선형 변화율 기반 탐지거리 변화 특성, dB 기반 탐지거리 감소 특성, 민감도 차수 간 복합 열화 특성 및 기준 탐지거리별 실제 감소 거리 관점에서 비교·분석하였다. 이를 통해 민감도 차수에 따른 탐지거리 변화 특성을 정량적으로 분석하고, 실제 레이다 체계 운용 및 성능 분석 환경에서 활용 가능한 reference 형태의 결과를 제시하고자 하였다.

3. 탐지거리 민감도 분석 결과

본 장에서는 2장에서 정의한 민감도 차수 기반 탐지거리 모델을 바탕으로 변수 변화에 따른 탐지거리 민감도 특성을 분석하였다. 분석은 선형 변화율 기반 탐지거리 변화 특성, dB 기반 열화 특성, 민감도 차수 간 복합 열화 특성 및 기준 탐지거리별 실제 감소 거리 관점에서 수행하였다. 특히 변수 자체의 종류보다는 변수 변화가 탐지거리로 전이되는 민감도 차수에 초점을 두어 $n=1/2$ 차수 계열과 $n=\pm 1/4$ 차수 계열의 차이를 비교·분석하였다.

Fig. 1은 변수 변화 비율에 따른 탐지거리 비율 변화를 나타낸다. $n=1/2$ 차수 계열은 안테나 이득 변화 특성을 의미하며, $n=\pm 1/4$ 차수 계열은 송신출력, RCS, 시스템 손실 및 요구 SNR 변화 특성을 대표한다.

Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 $n=1/2$ 차수 계열은 변수 변화에 따라 탐지거리 변화가 상대적으로 급격하게 발생하는 특성을 나타낸다. 반면 $n=\pm 1/4$ 차수 계열은 동일한 변수 변화 조건에서도 탐지거리 변화가

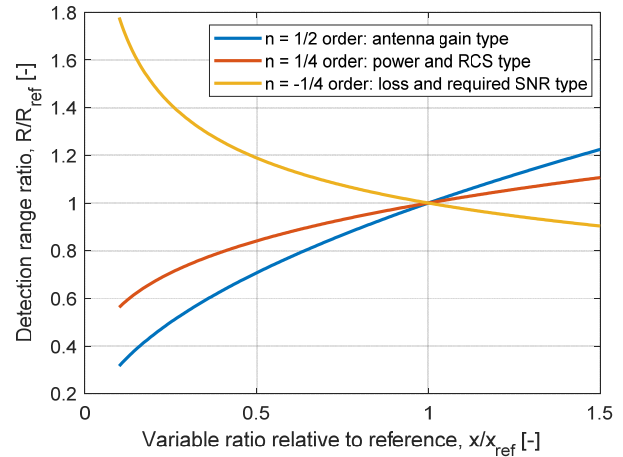


Fig. 1. Detection range sensitivity according to linear variable ratio for different sensitivity orders

상대적으로 완만하게 나타난다. 이는 레이다 방정식에서 안테나 이득이 송신 및 수신 과정에 동시에 반영되어 제곱 형태로 포함되는 반면, 송신출력 및 RCS는 단일 항으로 반영되기 때문이다. 예를 들어 변수 비율이 0.5 수준으로 감소할 경우 $n=1/2$ 차수 계열의 탐지거리 비율은 약 0.707 수준까지 감소하지만, $n=1/4$ 차수 계열은 약 0.841 수준으로 감소한다. 따라서 동일한 비율 변화 조건에서도 안테나 이득 계열이 상대적으로 높은 탐지거리 민감도를 가지는 것을 확인할 수 있다.

또한 $n=1/4$ 및 $n=-1/4$ 차수 계열은 탐지거리 변화 방향만 상이할 뿐 동일한 변화 특성을 나타낸다. 즉 출력 증가와 손실 감소는 동일한 수준의 탐지거리 증가 효과를 가지며, 출력 감소와 손실 증가는 동일한 수준의 탐지거리 감소 효과를 가진다. 이러한 결과는 레이다 탐지거리 변화 특성이 개별 변수 자체보다는 민감도 차수에 의해 결정됨을 의미한다.

Fig. 2는 dB 기반 성능 열화에 따른 탐지거리 변화 특성을 나타낸다. 실제 레이다 체계 운용 환경에서는 성능 변화가 대부분 dB 단위로 표현되므로, 본 분석에서는 dB 기반 민감도 특성을 추가적으로 분석하였다.

Fig. 2에서 $n=\pm 1/4$ 차수 계열은 거의 동일한 곡선 형태를 나타내며, 동일한 dB 변화 조건에서 동일한 크기의 탐지거리 감소 특성을 보인다. 반면 $n=1/2$ 차수 계열은 동일한 dB 열화 조건에서도 상대적으로 급격한 탐지거리 감소를 나타낸다. 예를 들어 6 dB 수준의 성능 열화가 발생할 경우 $n=1/2$ 차수 계열의 탐지거리 비율은 약 0.5 수준까지 감소하는 반면, $n=\pm 1/4$ 차수 계열은 약 0.71 수준으로 감소한다. 이는 안테나

이득이 송신 및 수신 경로에 동시에 반영되기 때문이며, 동일한 dB 수준의 성능 변화가 발생하더라도 탐지거리 변화에는 더 크게 반영됨을 의미한다.

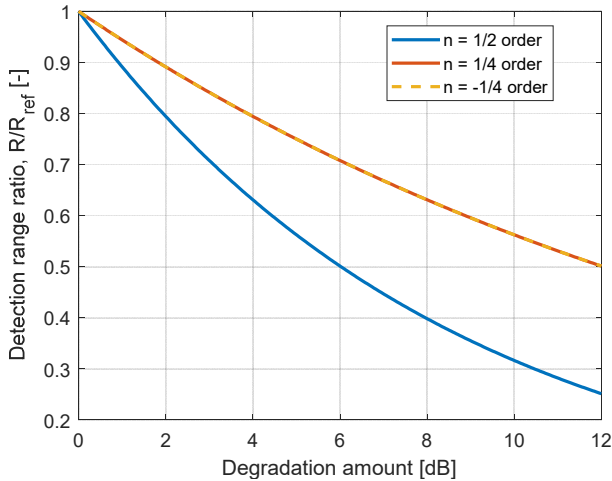


Fig. 2. Detection range sensitivity to dB degradation for different sensitivity orders

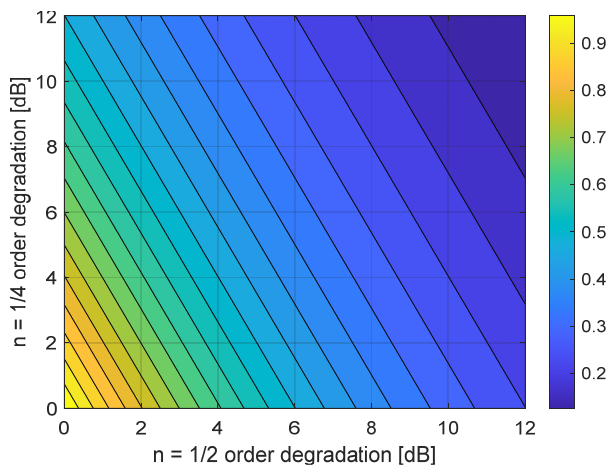


Fig. 3. Detection range ratio contour for combined sensitivity-order degradation

특히 dB 기반 분석 결과는 실제 레이더 체계 성능 분석 및 시험평가 관점에서 중요한 의미를 가진다. 일반적으로 송신출력, 손실 및 요구 SNR 변화는 4 dB 수준의 변화가 발생할 때 탐지거리에는 약 1 dB 수준의 변화로 반영된다. 반면 안테나 이득은 약 2 dB 수준의 변화만으로도 탐지거리에는 약 1 dB 수준의 변화가 발생한다. 따라서 안테나 계열 변수는 상대적으로 작은 수준의 성능 열화에도 탐지거리에 민감하게 반영될 수 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 3는 $n=1/2$ 차수 계열과 $n=\pm 1/4$ 차수 계열이 동시에 열화되는 경우의 탐지거리 비율 변화를 contour 형태로 나타낸 결과이다.

Fig. 3에서 contour 변화는 $n=1/2$ 차수 방향에서 상대적으로 급격하게 변화하는 특성을 나타낸다. 이는 동일한 dB 수준의 열화가 발생하더라도 $n=1/2$ 차수 계열이 탐지거리 감소에 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 반면 $n=\pm 1/4$ 차수 계열은 상대적으로 완만한 contour 변화를 나타낸다. 예를 들어 $n=\pm 1/4$ 차수 계열에서 6 dB 수준의 열화가 발생하더라도 탐지거리 감소는 제한적으로 나타나지만, 동일 조건에서 $n=1/2$ 차수 계열의 열화가 추가될 경우 탐지거리 비율은 급격히 감소하는 특성을 보인다. 이러한 결과는 실제 레이다 체계에서 복합적인 성능 열화가 발생할 경우 안테나 계열 성능 변화가 전체 탐지 성능 감소를 지배할 수 있음을 의미한다.

Fig. 4는 $n=1/2$ 차수 계열에 대해 기준 탐지거리별 실제 감소 거리 특성을 분석한 결과이다. 기준 탐지거리는 100 km, 150 km, 200 km, 250 km 및 300 km로 설정하였다.

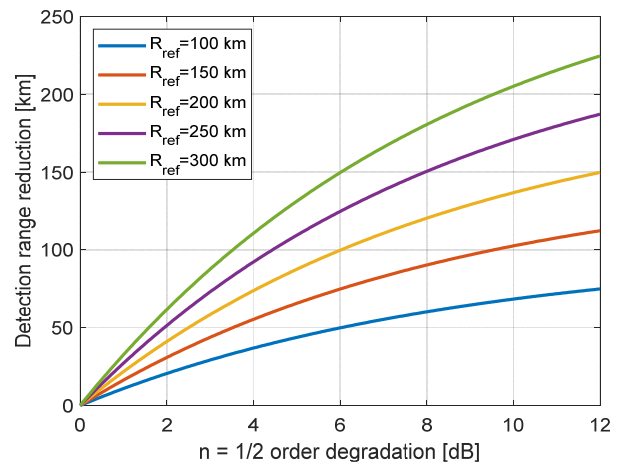


Fig. 4. Actual detection range reduction for the $n=1/2$ sensitivity order

Fig. 4에서 동일한 dB 수준의 열화가 발생하더라도 기준 탐지거리가 증가할수록 실제 감소 거리는 크게 증가하는 특성을 확인할 수 있다. 특히 $n=1/2$ 차수 계열은 높은 탐지거리 민감도를 가지므로 장거리 감시 레이다 환경에서 실제 감소 거리가 크게 나타난다. 예를 들어 기준 탐지거리가 300 km인 경우 6 dB 수준의 열화만으로도 약 150 km 수준의 탐지거리 감

소가 발생한다. 반면 기준 탐지거리가 100 km인 경우 동일한 조건에서 감소 거리는 약 50 km 수준으로 제한된다. 이러한 결과는 장거리 조기경보 레이더 환경에서 상대적으로 작은 안테나 성능 열화도 실제 운용 범위 측면에서는 매우 큰 성능 감소로 이어질 수 있음을 의미한다.

Fig. 5는 $n=\pm 1/4$ 차수 계열에 대한 기준 탐지거리별 실제 감소 거리 결과를 나타낸다.

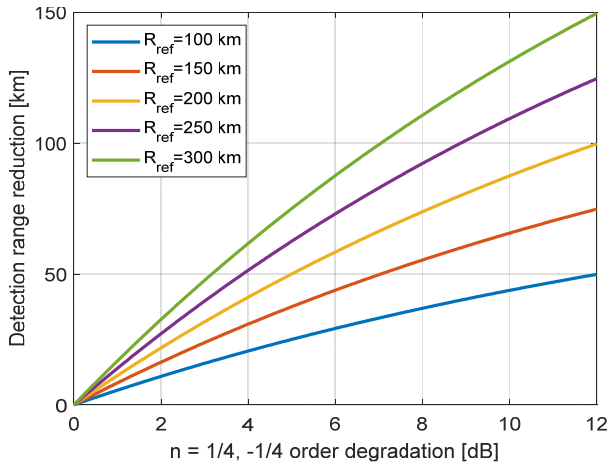


Fig. 5. Actual detection range reduction for the $n=\pm 1/4$ sensitivity order

Fig. 5에서 $n=\pm 1/4$ 차수 계열은 Fig. 4 대비 상대적으로 완만한 감소 특성을 나타낸다. 예를 들어 기준 탐지거리 300 km 조건에서 6 dB 수준의 열화가 발생하더라도 실제 감소 거리는 약 90 km 수준으로 나타나며, 이는 동일 조건의 $n=1/2$ 차수 계열 대비 상대적으로 작은 감소 수준이다. 또한 $n=1/4$ 및 $n=-1/4$ 차수 계열은 탐지거리 변화 방향만 다를 뿐 동일한 감소 특성을 가지므로 동일 결과로 표현할 수 있다.

Table 2. Representative detection range reduction results according to sensitivity order

Sensitive order	Degradation [dB]	Range ratio	Range reduction at 300 km [km]
$n = 1/2$	3	0.708	87.6
$n = 1/2$	6	0.501	149.7
$n = \pm 1/4$	3	0.841	47.7
$n = \pm 1/4$	6	0.708	87.6

Table 2는 대표적인 dB 열화 조건에 대한 탐지거리 감소 특성을 정리한 결과이다. $n=1/2$ 차수 계열은

동일한 dB 수준의 성능 열화 조건에서도 $n=\pm 1/4$ 차수 계열 대비 상대적으로 큰 탐지거리 감소를 나타냈다. 특히 기준 탐지거리가 300 km인 경우 6 dB 수준의 열화만으로도 $n=1/2$ 차수 계열은 약 150 km 수준의 탐지거리 감소가 발생하는 반면, $n=\pm 1/4$ 차수 계열은 약 88 km 수준의 감소가 발생하였다. 이러한 결과는 동일한 dB 수준의 성능 변화가 발생하더라도 민감도 차수에 따라 실제 운용 범위 감소 수준이 크게 달라질 수 있음을 의미한다.

4. 결론

본 논문에서는 레이더 방정식을 기반으로 주요 성능 변수 변화에 따른 탐지거리 민감도 특성을 분석하였다. 이를 위해 탐지거리 변화를 민감도 차수 관점에서 정규화하여 표현하였으며, 변수 변화가 탐지거리 감소로 전이되는 특성을 선형 변화율 및 dB 기반 관점에서 비교·분석하였다. 또한 기준 탐지거리별 실제 감소 거리 분석을 수행함으로써 변수 변화가 실제 운용 범위 측면에서 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

분석 결과 레이더 탐지거리 변화 특성은 개별 변수 종류 자체보다 민감도 차수에 의해 지배되는 경향이 크게 나타났다. 송신출력, RCS, 시스템 손실 및 요구 SNR과 같은 대부분의 변수는 $n=\pm 1/4$ 차수 특성을 가지며, 비교적 큰 수준의 변수 변화가 발생하더라도 탐지거리 변화는 상대적으로 완만하게 나타났다. 반면 안테나 이득은 $n=1/2$ 차수 특성을 가지므로 동일한 성능 변화 조건에서도 탐지거리에 더 민감하게 반영되는 특성을 나타냈다. 특히 dB 기반 분석 결과 안테나 이득은 약 2 dB 수준의 변화만으로도 탐지거리에는 약 1 dB 수준의 변화가 발생하는 반면, $n=\pm 1/4$ 차수 계열은 약 4 dB 수준의 변화가 발생해야 탐지거리에는 약 1 dB 수준의 변화가 발생하는 특성을 확인하였다.

또한 복합 열화 분석 결과 $n=1/2$ 차수 계열의 성능 변화가 전체 탐지거리 감소 특성을 지배하는 경향이 나타났으며, 실제 감소 거리 분석 결과 기준 탐지거리가 증가할수록 동일한 비율 감소 조건에서도 실제 감소 거리는 크게 증가하는 특성을 확인하였다. 특히 장거리 감시 및 조기경보 레이더 환경에서는 상대적으로 작은 수준의 안테나 성능 열화도 실제 운용 범위

측면에서는 매우 큰 성능 감소로 이어질 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 복잡한 레이다 성능 모델 또는 특정 체계 기반 분석이 아닌, 레이다 방정식 기반 탐지거리 변화 특성을 민감도 차수 관점에서 정규화하여 비교·분석하였다는 점에서 의미를 가진다. 또한 변수 변화에 따른 탐지거리 감소 특성을 선형 변화율, dB 변화 및 실제 감소 거리 관점에서 직관적으로 정리함으로써 레이다 체계 개발, 시험평가 및 M&S 기반 성능 분석 과정에서 활용 가능한 정량적 reference 자료를 제시하였다.

향후에는 본 연구 결과를 기반으로 다기능레이다 자원관리 환경, 전파 손실 환경 및 다중경로 환경과 같은 실제 운용 조건을 추가적으로 반영함으로써 보다 현실적인 탐지 성능 민감도 분석으로 확장할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] M. H. Park, Hyun Seung Kim, Woo-Joong Jeon, Seung-Ki Yoo, Sewoong Kwon, Hyun-wook Moon, & Ki-Won Lee, 'Development of Modeling & Simulation Tool for Long Range Radar Considering Operational Environment in Time Domain,' The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, VOL. 30, NO. 7, 2019, pp. 591-602.
- [2] In-Sung Jeon, H. S. Yoo, & Sung Taek Jung, 'Performance Analysis and Improvement of TWTAs for Surveillance Radar Using Modeling & Simulation,' Journal of Korean Institute of Information Technology, VOL. 14, NO. 4, 2016, pp. 25-35.
- [3] Mark A. Richards, Fundamentals of Radar Signal Processing, McGraw-Hill, 2014.
- [4] J. V. DiFranco & W. L. Rubin, Radar Detection, Artech House, 1994.
- [5] Merrill I. Skolnik, Radar Handbook, 3rd ed., McGraw-Hill, 2008.