



Received: 2026/05/03
Revised: 2026/05/15
Accepted: 2026/06/07
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

레이더 손실 상황에서 펜스 운용의 시간 자원 제약에 따른 탐지 성능 변화 분석

Influence of Time Resource Constraints on Radar Fence Operation Under Radar Loss Conditions

박명훈*, 김정, 이성균, 전우중, 장재덕

LIG 디펜스&에어로스페이스 M&S팀 수석연구원

Myunghoon Park*, Jeong Kim, Sungkyun Lee, Woojoong Jeon, Jaedeok Jang

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

Abstract

본 연구에서는 다수 레이더가 협동하여 펜스 형태로 운용되는 감시 환경에서, 레이더 손실 상황이 운용 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 전체 감시 구간과 리비짓 타임 요구 조건을 유지하는 상황을 가정하고, 레이더 손실 이후 담당 방위 증가에 따른 빔 개수 및 스캔 시간 변화를 모델링하였다. 이를 기반으로 스캔 시간 증가를 보상하기 위한 운용 전략으로 펄스 수 감소, 펄스 반복 간격 감소 및 혼합 전략을 정의하고, 각 전략이 탐지확률 및 최대탐지거리 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과, 레이더 손실 이후 성능 저하는 레이더 수 감소 자체보다 담당 방위 증가에 따른 시간 자원 제약에서 기인함을 확인하였다. 또한 펄스 수 감소는 탐지확률 저하를, 펄스 반복 간격 감소는 최대탐지거리 감소를 유발하며, 혼합 전략은 두 성능 저하를 완화하는 절충 효과를 나타냄을 확인하였다.

This paper presents a quantitative analysis of operational performance degradation in a cooperative fence-based radar surveillance system under radar loss conditions. A scenario was considered in which the total surveillance sectors and required revisit time were maintained while reducing the number of available radars. The increase in assigned sectors per radar was modeled to evaluate the resulting changes in beam count and scan time. Pulse reduction, pulse repetition interval reduction, and mixed strategies were defined and compared to compensate for the increased scan time. The results showed that performance degradation was primarily caused by the increased time resource constraint owing to sector expansion rather than the reduction in the number of radars itself.

Keywords

레이더 펜스 운용(Radar Fence Operation), 레이더 손실(Radar Loss), 재방문 시간(Revisit Time), 시간 자원 관리(Time Resource Management), 탐지확률(Probability of Detection), 성능 상충 관계(Performance Tradeoff)

1. 서론

현대 해상 및 공중 감시 환경에서는 광역 영역에 대한 지속적인 감시 능력을 확보하기 위해 다수의 레이더를 활용한 협동 감시 체계가 널리 운용되고 있다. 특히 일정 방위 구간을 연속적으로 감시하는 펜스(fence) 형태의 운용에서는 복수의 레이더가 각기 다른 방위 영역을 분담함으로써 넓은 감시 범위를 효율적으로 커버할 수 있으며, 이를 통해 단일 레이더 대비 향상된 탐지 연속성과 운용 안정성을 확보할 수 있다[1-3]. 이러한 협동 운용 구조는 탄도탄, 고속 항공기 등 빠르게 접근하는 표적에 대한 조기 탐지 및 지속 추적을 위해 필수적인 요소로 인식되고 있다.

그러나 실제 운용 환경에서는 적의 공격, 장비 고장 등 다양한 요인에 의해 일부 레이더가 손실되는 상황이 발생할 수 있으며, 이러한 손실은 전체 감시 체계의 성능에 직접적인 영향을 미친다. 특히 펜스 운용 구조에서는 레이더 수 감소로 인해 각 레이더가 담당해야 하는 방위 영역이 확대되며, 이는 단순한 공간적 커버리지 변화에 그치지 않고 시간 자원 운용 측면에서 중요한 제약을 유발한다. 레이더는 일정한 갱신 주기, 즉 리비짓 타임(revisit time)을 만족하도록 설계 및 운용되며, 이는 동일 표적에 대한 주기적인 탐지 및 추적 성능을 보장하기 위한 핵심 조건이다. 따라서 레이더 손실 이후에도 동일한 리비짓 타임 요구 조건을 유지하기 위해서는 운용 파라미터의 조정이 필수적으로 요구된다.

레이더의 스캔 시간은 일반적으로 섹터를 구성하는 빔 개수, 각 빔에 할당되는 펄스 수, 그리고 펄스 반복 간격(pulse repetition interval, PRI)에 의해 결정된다. 이때 담당 방위가 증가하면 동일한 빔폭 조건에서 필요한 빔 개수가 증가하게 되고, 이는 전체 스캔 시간 증가로 이어진다. 스캔 시간이 증가할 경우 요구 리비짓 타임을 만족하기 어려워지므로, 이를 보상하기 위해 펄스 수를 감소시키거나 PRI를 감소시키는 방식의 운용 조정이 고려될 수 있다. 그러나 펄스 수 감소는 적분 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)의 감소를 유발하여 탐지확률(probability of detection, Pd)을 저하시킬 수 있으며, PRI 감소는 최대 비모호 거리 및 유효 탐지 거리 감소로 이어질 수 있다[4]. 즉, 레이더 손실 상황에서는 시간 자원 제약을 만족하기 위해 탐지 성능의 일부를 희생해야 하는 본질적인 trade-off가 발생한다.

기존 연구에서는 레이더의 탐지 성능 분석이나 단일 레이더의 자원 관리에 대한 연구가 주로 수행되어 왔으며, 다수 레이더 협동 운용에 대해서도 정상 상태에서의 효율적인 자원 분배에 초점을 맞춘 연구가 대부분이다. 반면, 레이더 손실과 같은 비정상 상황에서 시간 자원 제약과 탐지 성능 간의 상호 관계를 정량적으로 분석하고, 운용 변수 조정에 따른 성능 저하 특성을 체계적으로 평가한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 특히 담당 방위 증가에 따른 빔 수 변화, 스캔 시간 증가, 그리고 이를 보상하기 위한 운용 변수 조정이 탐지 성능에 미치는 영향을 통합적으로 분석한 접근은 제한적으로 다루어져 왔다.

본 연구에서는 다수 레이더가 협동하여 펜스 형태로 운용되는 감시 환경을 대상으로, 레이더 손실 상황에서 발생하는 시간 자원 제약과 탐지 성능 저하 간의 관계를 정량적으로 분석하는 모델을 제안한다. 정상 상태에서 복수의 레이더가 분담하던 방위 영역이 손실 이후 잔존 레이더에 의해 재분배되는 상황을 설정하고, 이에 따른 빔 수 증가 및 스캔 시간 변화를 모델링한다. 또한 요구 리비짓 타임을 유지하기 위한 운용 전략으로서 펄스 수 감소, PRI 감소, 그리고 이들의 혼합 전략을 정의하고, 각 전략이 탐지확률 및 최대탐지거리 유지율에 미치는 영향을 비교 분석한다. 이를 통해 레이더 손실 이후 운용 변수 조정에 따른 성능 저하 특성을 정량적으로 제시하고, 운용 목적에 따라 적절한 대응 전략을 선택할 수 있는 기준을 제공하고자 한다.

2. 연합 펜스 운용 손실 상황 모델

본 장에서는 다수 레이더가 협동하여 특정 방위 구간을 지속적으로 감시하는 펜스 운용 환경을 대상으로, 정상 상태와 레이더 손실 상태에서의 운용 구조를 정의하고 성능 저하가 발생하는 메커니즘을 정립한다. 펜스 운용은 전체 감시 구간을 여러 레이더가 분담하여 연속적인 탐지 성능을 확보하는 방식으로 구성되며, 각 레이더는 할당된 방위 영역에 대해 일정한 리비짓 타임을 만족하도록 스캔을 수행한다. 그러나 일부 레이더가 손실될 경우 잔존 레이더가 담당해야 하는 방위 영역이 증가하게 되고, 이는 시간 자원 측면에서 직접적인 부담으로 작용한다. 본 장에서는 이러한 운용 구조의 변화를 체계적으로 정의하고, 이후 장에서 수행될 정량 분석을 위한 기초 모델을 구성한다[4,5].

2.1 정상 상태의 연합 펜스 운용 개념

정상 상태에서의 연합 펜스 운용은 전체 감시 방위 구간을 복수의 레이더가 분할하여 동시에 감시하는 구조로 정의된다. 전체 펜스 각도를 θ_{total} [deg]라 할 때, 레이더가 동일한 성능을 가진다고 가정하면 각 레이더가 담당하는 방위 구간은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\theta_{sect} = \frac{\theta_{total}}{N_{radar}} \quad (1)$$

여기서, θ_{total} : 전체 감시 방위 구간(deg),

N_{radar} : 운용 중인 레이더 수.

각 레이더는 자신에게 할당된 방위 구간을 일정한 빔폭으로 분할하여 순차적으로 스캔을 수행하며, 이를 통해 해당 영역 내 표적을 주기적으로 탐지하게 된다. 이때 방위 방향 빔폭을 θ_{beam} [deg], 빔 간 중첩 비율을 η 라 하면, 실제 스캔에 사용되는 유효 빔 간격은 $\theta_{beam}(1-\eta)$ 로 정의할 수 있으며, 해당 방위 구간을 커버하기 위해 필요한 총 빔 개수는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$N_{beam} = \left\lceil \frac{\theta_{sect}}{\theta_{beam}(1-\eta)} \right\rceil \quad (2)$$

각 빔에 대해 M 개의 펄스를 송신하고, 펄스 반복 간격을 PRI [s]로 정의하면, 하나의 빔을 탐색하는 데

소요되는 시간은 $M \cdot PRI$ 로 표현된다. 따라서 전체 섹터를 한 번 스캔하는 데 필요한 총 시간, 즉 스캔 시간 T_{scan} [s]는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$T_{scan} = N_{beam} \cdot M \cdot PRI \quad (3)$$

레이더는 동일 표적을 일정 주기로 재탐지하기 위해 요구되는 리비짓 타임 T_{req} [s]를 만족하도록 운용되어야 하며, 정상 상태에서는 다음 조건이 만족되도록 설계된다.

$$T_{scan} \leq T_{req} \quad (4)$$

여기서, T_{req} : 최대 허용 리비짓 타임(s).

이 조건이 만족될 경우, 레이더는 담당 방위 구간 내 표적을 요구 주기 내에서 안정적으로 재탐지할 수 있으며, 추적 성능 유지가 가능하다. 정상 상태에서는 레이더 수에 따라 방위 구간이 분산되므로 각 레이더가 담당하는 섹터 폭이 상대적으로 작고, 이에 따라 필요한 빔 개수 및 스캔 시간이 제한된다. 결과적으로 동일한 펄스 수와 PRI를 유지하면서도 요구 리비짓 타임을 만족하는 운용이 가능하며, 탐지확률과 최대 탐지거리 측면에서도 설계된 성능을 안정적으로 확보할 수 있다.

2.2 레이더 손실 상황 정의

레이더 손실 상황은 정상 상태에서 운용되던 복수의 레이더 중 일부가 비가용 상태가 되어, 잔존 레이더가 전체 감시 구간을 재분담해야 하는 상태로 정의된다. 본 연구에서는 전체 팬스 각도는 유지된 상태에서 레이더 수만 감소하는 상황을 고려하며, 이에 따라 개별 레이더가 담당해야 하는 방위 구간이 증가하는 구조를 가정한다. 이는 실제 운용 환경에서 특정 레이더가 손실되더라도 감시 공백을 최소화하기 위해 잔존 레이더가 기존 감시 영역을 유지하도록 재배치되는 상황을 반영한 것이다.

레이더 수가 감소할 경우, 동일한 전체 감시 구간을 유지하기 위해 개별 레이더가 담당하는 방위 폭은 식 (5)와 같이 증가하게 된다.

$$\theta'_{sect} = \frac{\theta_{total}}{N'_{radar}} \quad (5)$$

여기서, θ_{total} : 전체 감시 방위 구간(deg),
 N_{radar} : 운용 중인 레이더 수.

이때 레이더 손실 이후에는 식 (6)과 같은 관계가 형성된다.

$$N'_{radar} < N_{radar}, \quad \theta'_{sect} > \theta_{sect} \quad (6)$$

즉, 각 레이더는 정상 상태 대비 더 넓은 방위 구간을 동일한 방식으로 스캔해야 하며, 이는 곧 스캔에 필요한 빔 개수 증가로 이어진다. 방위 구간 증가에 따른 빔 개수는 동일한 빔폭 및 중첩 조건을 유지할 경우 식 (7)과 같이 증가한다.

$$N'_{beam} = \left\lceil \frac{\theta'_{sect}}{\theta_{beam}(1-\eta)} \right\rceil \quad (7)$$

식 (7)은 빔 간격이 일정하게 유지된다는 가정 하에서, 단순히 커버해야 할 방위 구간이 증가함에 따라 필요한 빔 개수가 선형적으로 증가함을 의미한다. 결과적으로 동일한 운용 파라미터를 유지할 경우 전체 스캔 시간 또한 증가하게 된다. 스캔 시간은 빔 개수 증가에 따라 식 (8)과 같이 변화한다.

$$T'_{scan} = N'_{beam} \cdot M \cdot PRI \quad (8)$$

이때 중요한 점은 펄스 수와 PRI를 변경하지 않는다면, 스캔 시간 증가의 직접적인 원인은 빔 개수 증가에 있다는 것이다. 즉, 레이더 손실 상황에서 발생하는 시간 자원 부담은 본질적으로 공간적 커버리지 증가가 시간 영역으로 전이된 결과로 해석할 수 있다.

문제는 이러한 스캔 시간 증가가 요구 리비짓 타임 조건을 만족하지 못하게 만드는 데 있다. 정상 상태에서는 $T_{scan} \leq T_{req}$ 조건이 만족되도록 설계되지만, 손실 이후에는 식 (9)와 같은 관계가 형성될 수 있다.

$$T'_{scan} > T_{req} \quad (9)$$

이 관계는 동일한 운용 조건을 유지할 경우, 표적을 요구 주기 내에 재탐지할 수 없음을 의미하며, 이는 추적 성능 저하 또는 탐지 공백 발생으로 이어질 수 있다. 따라서 레이더 손실 이후에도 동일한 리비짓 타임 요구 조건을 유지하기 위해서는 스캔 시간 자체를 감소시키는 운용 조정이 필요하다.

스캔 시간을 감소시키기 위한 대표적인 방법은 빔당 소요 시간을 줄이는 것이며, 이는 펄스 수 감소 또는 PRI 감소를 통해 구현할 수 있다. 펄스 수를 감소시키는 경우 빔당 적분 시간이 줄어들어 수신 신호의 적분 효과가 감소하고, 이는 신호대잡음비 감소로 이어져 탐지확률 저하를 유발한다. 반면 PRI를 감소시키는 경우 단위 시간당 펄스 반복 횟수는 증가하지만, 시스템 설계 및 거리 모호성 측면에서 제한이 발생하며, 본 연구에서는 이를 최대탐지거리 감소 효과로 반영한다.

이와 같이 레이더 손실 상황에서는 담당 방위 증가로 인해 스캔 시간이 증가하고, 이를 보상하기 위해 운용 파라미터를 조정하는 과정에서 탐지 성능 저하가 필연적으로 발생한다. 즉, 시간 자원 제약과 탐지 성능 간에는 상호 상충 관계가 존재하며, 이는 손실 상황에서의 운용 전략 선택에 있어 핵심적인 고려 요소로 작용한다.

2.3 성능 저하 발생 메커니즘

레이더 손실 이후 발생하는 성능 저하는 단순히 감시 영역이 확대되는 기하학적 변화에 기인하는 것이 아니라, 시간 자원 제약과 탐지 성능 간의 상호 의존 관계에 의해 발생한다. 본 절에서는 레이더 손실 상황에서 스캔 시간 증가가 어떻게 운용 파라미터 조정으로 이어지고, 그 결과 탐지 성능 저하가 발생하는지를 설명한다.

레이더 손실로 인해 증가한 N_{beam} 을 그대로 유지할 경우, 위 조건이 더 이상 만족되지 않을 수 있으며, 이는 동일 표적에 대한 재탐지 주기가 증가함을 의미한다. 이러한 상황을 보상하기 위해서는 스캔 시간을 감소시킬 필요가 있으며, 이는 식의 구조상 M 또는 PRI를 감소시키는 방식으로만 달성될 수 있다.

먼저 펄스 수 감소의 영향을 살펴보면, 레이더 수신 신호의 적분 신호대잡음비는 펄스 수에 비례하여 증가하는 특성을 가진다. 이를 단순화하여 표현하면

식 (10)과 같다.

$$SNR_{int} \propto M \cdot SNR_{single} \quad (10)$$

여기서, SNR_{single} : 단일 펄스 기준 SNR.

이 관계는 다중 펄스 적분을 통해 잡음 평균화 효과가 발생하고, 그 결과 유효 신호대잡음비가 향상된다는 원리에 기반한다. 따라서 펄스 수를 감소시키면 적분 이득이 감소하고, 이는 탐지확률 저하로 이어진다. 즉, 시간 자원을 확보하기 위해 M 을 감소시키는 경우, 탐지 성능 측면에서는 직접적인 손실이 발생한다.

다음으로 PRI 감소의 영향을 살펴보면, PRI는 펄스 간 시간 간격을 의미하며, 이는 레이더의 최대 비모호 거리와 밀접한 관계를 가진다. 일반적으로 최대 비모호 거리는 식 (11)과 같이 표현된다.

$$R_{max} = \frac{c \cdot PRI}{2} \quad (11)$$

여기서, c : 전파 속도(m/s).

식 (11)은 송신된 펄스가 반사되어 돌아오기 전에 다음 펄스가 송신될 경우 거리 모호성이 발생한다는 원리에 기반한다. 따라서 PRI를 감소시키면 단위 시간당 펄스 송신 횟수는 증가하지만, 동시에 최대 비모호 거리는 감소하게 된다. 본 연구에서는 이러한 효과를 운용 관점에서 해석하여, PRI 감소가 실질적인 최대 탐지 가능 거리의 감소로 이어지는 것으로 모델링한다.

결과적으로 레이더 손실 상황에서 발생하는 성능 저하는 다음과 같은 구조로 정리할 수 있다. 담당 방위 증가로 인해 빔 개수가 증가하고, 이는 스캔 시간 증가로 이어진다. 증가된 스캔 시간은 요구 리비짓 타임을 만족하지 못하게 만들며, 이를 보상하기 위해 펄스 수 또는 PRI를 감소시켜야 한다. 그러나 펄스 수 감소는 탐지확률 저하를 유발하고, PRI 감소는 최대탐지거리 감소를 유발한다.

이와 같은 관계는 시간 자원과 탐지 성능 간의 상호 상충 관계를 의미하며, 레이더 손실 상황에서는 어떠한 운용 전략을 선택하더라도 일정 수준의 성능 저하는 불가피함을 보여준다. 따라서 손실 이후의 운용은

단순히 리비짓 타임을 유지하는 것을 목표로 하는 것이 아니라, 탐지확률과 탐지거리 중 어떠한 성능 요소를 우선적으로 유지할 것인지에 대한 전략적 선택의 문제로 해석될 수 있다.

2.4 운용 파라미터 재조정 모델

레이더 손실 이후 증가한 스캔 시간을 요구 리비짓 타임 내로 제한하기 위해서는 운용 파라미터의 재조정이 필수적으로 요구된다. 앞 절에서 정의한 바와 같이, 스캔 시간은 빔 개수, 빔당 펄스 수, 그리고 펄스 반복 간격에 의해 결정되므로, 손실 이후 증가한 빔 개수를 고려할 때 스캔 시간을 감소시키기 위한 조정 변수는 펄스 수와 PRI로 제한된다. 레이더 손실 이후의 스캔 시간은 식 (12)와 같이 표현된다.

$$T_{scan,loss} = N_{beam,loss} \cdot M' \cdot PRI' \quad (12)$$

여기서, $N_{beam,loss}$: 손실 이후 빔 개수,

M' : 조정된 빔당 펄스 수,

PRI' : 조정된 펄스 반복 간격(s).

요구 리비짓 타임을 만족하기 위해서는 식 (13)과 같은 조건이 성립해야 한다.

$$T_{scan,loss} \leq T_{req} \quad (13)$$

식 (13)은 손실 이후 증가한 빔 개수에 대해 펄스 수와 PRI를 조정함으로써 스캔 시간을 제한해야 함을 의미하며, 두 변수는 상호 보완적인 관계를 가진다. 즉, 펄스 수를 크게 감소시키면 PRI 감소량을 줄일 수 있으며, 반대로 PRI를 크게 감소시키면 펄스 수 감소를 완화할 수 있다.

이와 같은 관계를 기반으로 본 연구에서는 다음과 같은 세 가지 대표적인 운용 전략을 고려한다. 첫째, 펄스 수를 감소시키고 PRI는 유지하는 전략은 시간 자원 확보 측면에서는 효과적이나, 신호 적분 이득 감소로 인해 탐지확률 저하를 유발한다. 둘째, PRI를 감소시키고 펄스 수를 유지하는 전략은 스캔 시간을 효과적으로 줄일 수 있으나, 최대 탐지 거리 감소로 인해 탐지 거리 범위가 축소된다. 셋째, 펄스 수와 PRI를

동시에 조정하는 전략은 두 변수의 감소를 분산시켜 탐지확률 저하와 탐지거리 감소를 동시에 완화하는 절충형 운용 방식이다. 따라서 레이더 손실 상황에서의 운용은 단일 변수 조정 문제가 아니라, 펄스 수와 PRI 간의 상호 관계를 고려한 다변수 조정 문제로 정의할 수 있으며, 이는 시간 자원 제약과 탐지 성능 간의 trade-off를 형성하는 구조로 작용된다.

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 장에서는 앞서 정의한 감시 시간 자원 및 탐지 성능 모델을 기반으로, 레이더 손실 상황에서의 운용 성능 변화를 정량적으로 분석한다. 특히 정상 상태와 레이더 손실 이후 상태를 동일 조건 하에서 비교함으로써, 담당 방위 증가에 따른 스캔 시간 변화와 이를 보상하기 위한 운용 파라미터 조정이 탐지 성능에 미치는 영향을 분석한다.

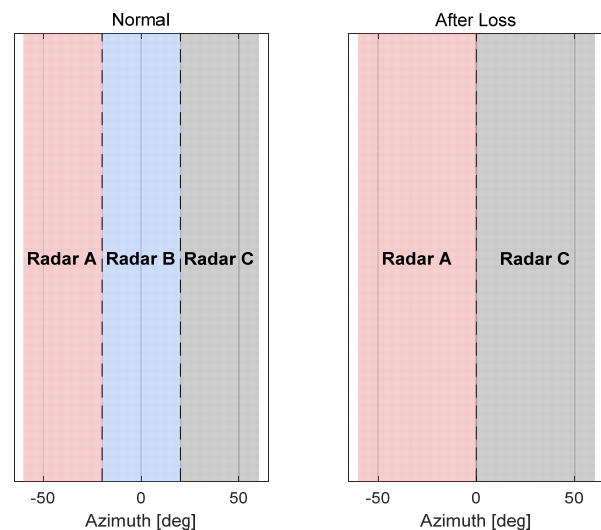


Fig. 1. Sector allocation in normal and loss conditions

본 시뮬레이션에서는 전체 감시 방위 구간을 120° 로 설정하고, 정상 상태에서는 3대 레이더가 각각 40° 를 분담하며, 손실 상태에서는 1대 레이더가 비가용 상태가 되어 잔존 2대 레이더가 각각 60° 를 담당하도록 설정하였다. 각 레이더는 동일한 빔폭, 펄스 수, PRI 조건에서 운용되며, 정상 상태에서는 이러한 조건이 요구 리비짓 타임을 만족하도록 설정된다.

Fig. 1과 같이 정상 상태에서는 각 레이더가 상대적으로 좁은 방위 구간을 담당하므로 제한된 빔 개수로 전체 섹터를 스캔할 수 있다. 반면 레이더 손실 이후

에는 동일한 감시 구간을 유지하기 위해 개별 레이더의 담당 방위가 증가하며, 이는 스캔 구조의 근본적인 변화를 유발한다.

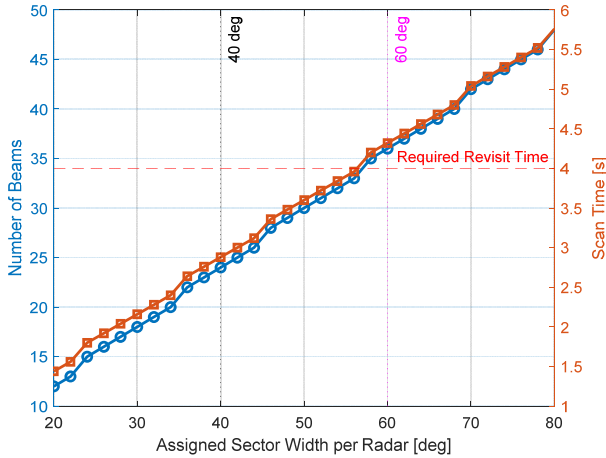


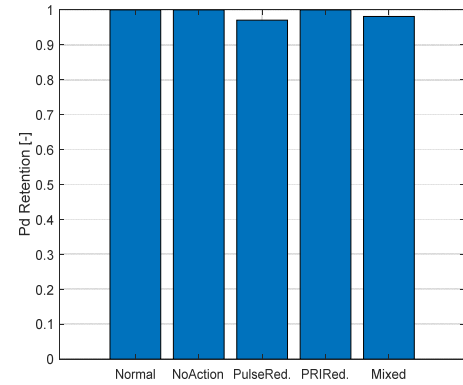
Fig. 2. Scan time increase due to sector expansion

Table 1. Simulation parameters

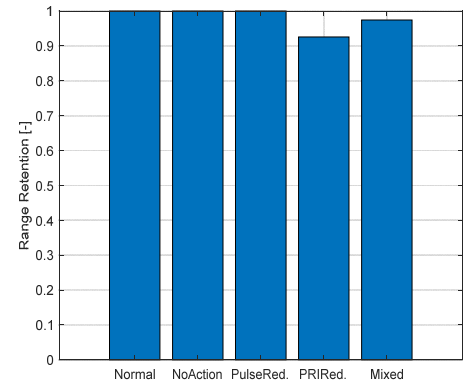
Parameters	Value	Unit
Total fence coverage	120°	deg
Number of radars (normal)	3	–
Number of radars (damage)	2	–
Sector per radar (normal)	40	deg
Sector per radar (damage)	60	deg
Beam overlap ratio	0.15	–
Pulse per beam	80	–
PRI	1.5e-3	s
Required revisit time	4	s
Max detection range	225	km

Fig. 2는 개별 레이더가 담당하는 방위 구간이 증가함에 따라 빔 개수와 스캔 시간이 어떻게 변화하는지를 나타낸다. 방위 구간이 40도에서 60도로 증가할 경우 동일한 빔폭 조건에서 필요한 빔 개수가 증가하며, 이에 따라 스캔 시간 역시 선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 특히 동일한 펄스 수와 PRI를 유지할 경우 스캔 시간이 요구 리비짓 타임을 초과하게 되며, 이는 손실 이후 기존 운용 조건을 그대로 유지하는 것이 불가능함을 의미한다.

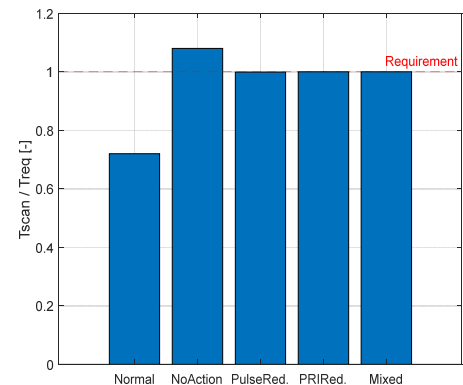
이 결과는 레이더 손실 이후 성능 저하의 근본 원인이 레이더 수 감소 자체가 아니라, 담당 방위 증가에 따른 시간 자원 부족에 있음을 보여준다.



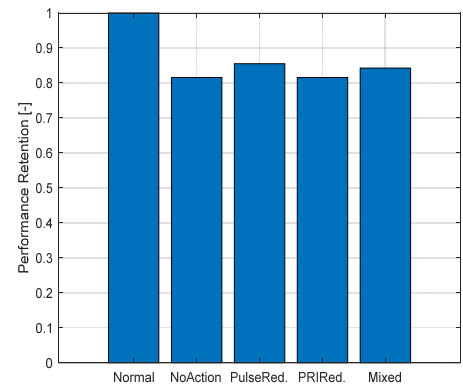
(a) Detection Probability Retention



(b) Maximum Detection Range Retention



(c) Revisit-Time Utilization



(d) Overall Performance Retention

Fig. 3. Performance comparison under different strategies

Fig. 3는 레이더 손실 이후 운용 전략에 따른 성능 변화를 비교한 결과를 나타낸다. 무대응 운용의 경우 기존 펄스 수와 PRI를 유지하므로 스캔 시간이 증가하여 요구 리비짓 타임을 만족하지 못하며, 이는 전체 성능 저하로 직결된다. 반면 펄스 수 감소 전략은 스캔 시간을 감소시켜 리비짓 타임을 만족할 수 있으나, 적분 신호대잡음비 감소로 인해 탐지확률이 저하되는 특성을 보인다.

PRI 감소 전략의 경우 스캔 시간은 효과적으로 감소하지만, 최대탐지거리가 감소하여 감시 범위가 축소되는 결과를 나타낸다. 이는 동일한 시간 자원 제약 하에서 탐지확률과 탐지거리 중 어느 성능 요소를 유지할 것인지에 따라 서로 다른 결과가 나타남을 의미한다. 혼합 전략은 펄스 수와 PRI를 동시에 조정함으로써 탐지확률과 탐지거리 저하를 동시에 완화하는 경향을 보이며, 전체적으로 가장 균형 잡힌 성능 유지 특성을 나타낸다.

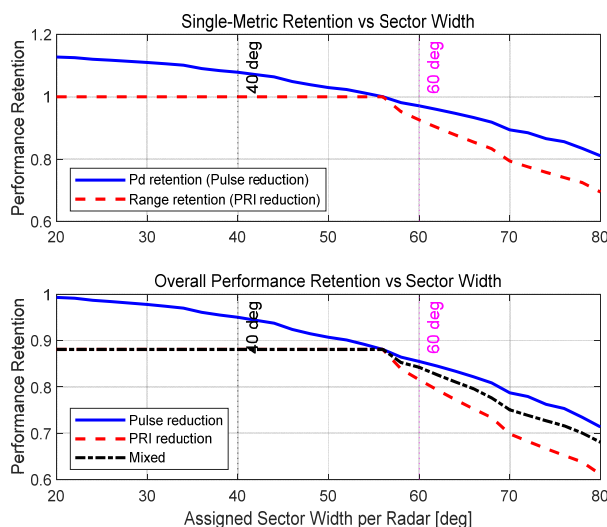


Fig. 4. Performance degradation with increasing sector width

Fig. 4는 개별 레이더가 담당하는 방위 구간이 증가할수록 성능 저하가 어떻게 변화하는지를 나타낸다. 방위 구간이 증가함에 따라 빔 개수 증가로 인한 시간 자원 부담이 지속적으로 증가하며, 이를 보상하기 위한 펄스 수 감소 또는 PRI 감소의 폭 역시 증가하게 된다. 그 결과 탐지확률 유지율과 최대탐지거리 유지율이 모두 감소하는 경향을 보인다.

특히 펄스 감소 전략은 탐지확률 측면에서, PRI 감

소 전략은 탐지거리 측면에서 더 큰 성능 저하를 나타내며, 혼합 전략은 전체 구간에서 상대적으로 완만한 성능 저하 특성을 유지한다. 이는 레이더 손실 상황에서 단일 운용 변수 조정보다는 복합적인 조정이 보다 효과적인 대응 전략이 될 수 있음을 시사한다.

종합적으로, 본 시뮬레이션 결과는 레이더 손실 이후 발생하는 성능 저하가 단순한 레이더 수 감소의 문제가 아니라, 방위 구간 증가에 따른 시간 자원 제약과 이에 따른 운용 파라미터 조정에서 기인함을 보여준다. 또한 리비짓 타임을 유지하기 위해서는 필연적으로 탐지확률 또는 최대탐지거리 중 하나 이상의 성능 요소를 희생해야 하며, 운용 목적에 따라 적절한 전략 선택이 필요함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 다수 레이더가 협동하여 펜스 형태로 운용되는 감시 환경에서, 레이더 손실 상황이 전체 운용 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 특히 레이더 손실 이후에도 동일한 감시 구간과 리비짓 타임 요구 조건을 유지하는 상황을 가정하고, 담당 방위 증가에 따른 스캔 시간 변화와 이를 보상하기 위한 운용 파라미터 조정이 탐지 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다.

분석 결과, 레이더 손실 이후 발생하는 성능 저하는 단순히 레이더 수 감소에 기인하는 것이 아니라, 담당 방위 증가에 따른 빔 개수 증가와 이로 인한 스캔 시간 증가에서 비롯됨을 확인하였다. 동일한 펄스 수와 PRI를 유지할 경우 스캔 시간이 요구 리비짓 타임을 초과하게 되며, 이를 만족하기 위해서는 펄스 수 감소 또는 PRI 감소와 같은 운용 조정이 필수적으로 요구된다.

펄스 수 감소 전략은 스캔 시간을 감소시켜 리비짓 타임 조건을 만족시키는 데 효과적이나, 적분 신호대잡음비 감소로 인해 탐지확률 저하를 유발하는 특성을 보였다. 반면 PRI 감소 전략은 시간 자원 확보 측면에서 유리하지만, 최대탐지거리 감소로 인해 감시 범위가 축소되는 한계를 나타냈다. 또한 펄스 수와 PRI를 동시에 조정하는 혼합 전략은 탐지확률과 탐지거리 저하를 동시에 완화함으로써 상대적으로 균형 잡힌 성능 유지 특성을 나타냄을 확인하였다.

이러한 결과는 레이더 손실 상황에서의 운용이 단

순한 성능 유지 문제가 아니라, 시간 자원과 탐지 성능 간의 **trade-off**를 고려한 전략적 선택의 문제임을 시사한다. 즉, 운용 목적에 따라 탐지확률 유지 또는 감시 범위 유지 중 어느 요소를 우선시할 것인지에 따라 서로 다른 운용 전략이 선택될 수 있으며, 본 연구에서 제시한 분석 프레임은 이러한 의사결정을 정량적으로 지원하는 기준으로 활용될 수 있다.

향후 연구에서는 표적 위협 수준, 거리 분포, 탐지 우선순위 등 보다 다양한 운용 요소를 반영하여 가중치 기반의 최적 운용 전략 도출 및 실시간 운용 재구성 기법으로 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] S. E. Yoo & D. S. Jang, 'Analysis of Defense Effectiveness in Cooperative Engagement for Multi-layered Missile Defense

System With Differing Ballistic Missile Trajectories,' Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, VOL. 29, NO. 8, 2023, pp. 671-678.

<https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2023.23.0058>

[2] Melvin L. Stone & Gerald P. Banner, 'Radars for the Detection and Tracking of Ballistic Missiles, Satellites, and Planets,' Lincoln Laboratory Journal, VOL. 12, NO. 2, 2000, pp. 217-244.

[3] Jiwon Kim, 'An Analysis of the Ballistic Missile Detection Characteristics of a Radar Depending on RCS,' Korean Journal of Military Arts and Science, VOL. 71, NO. 2, 2015, pp. 1-17.

[4] Merrill I. Skolnik, Radar Handbook (3rd ed.), McGraw-Hill, 2008.

[5] Myung-Hoon Park, Jinyong Go, Hyun Seung Kim, Woo-Joong Jeon, Sewoong Kwon, & Ki-Won Lee, 'Resource Management Method of Multifunction Radar for Simultaneous Tracking of Ballistic Missiles in Combined Tactics,' The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, VOL. 32, NO. 5, 2021, pp. 484-493.

<https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2021.32.5.484>