



Received: 2026/05/06
Revised: 2026/05/16
Accepted: 2026/06/10
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

다표적 환경에서 레이더 Cue 정확도가 EO/IR 식별 성능에 미치는 영향 분석

Impact of Radar Cue Accuracy on EO/IR Identification Performance in Multi-Target Environments

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 레이더와 전자광학/적외선 (electro-optical/infrared, EO/IR) 센서의 협동 운용 환경에서 레이더 cue 정확도가 EO/IR 식별 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 레이더의 각도 오차를 확률적으로 모델링하고, EO/IR 센서의 지향, 탐색 및 식별 과정을 시간 기반으로 구성하였다. 또한 EO/IR 센서가 단일 표적만을 순차적으로 처리하는 구조를 반영하여 다표적 환경에서 발생하는 대기 및 누적 지연 효과를 모델에 포함하였다. 시뮬레이션 결과, 레이더 cue 오차 증가는 EO/IR의 탐색 시간 증가를 유발하며, 이러한 지연은 다표적 환경에서 누적되어 전체 식별 성능 저하로 이어지는 것으로 나타났다. 특히 단일 표적 환경에서는 제한적으로 나타나는 영향이 다표적 환경에서는 임무 완료 시간 증가 및 제한 시간 내 식별 확률 감소로 확대됨을 확인하였다.

In this paper, we analyze the impact of radar cue accuracy on the identification performance of electro-optical/ infrared (EO/IR) sensors in a multi-target environment. The radar angular error is modeled probabilistically, and the EO/IR identification process is formulated based on time components including slewing, searching, and processing. In addition, a sequential processing structure is considered in which the EO/IR sensor can handle only one target at a time, thereby incorporating queueing and accumulated delay effects. Simulation results show that an increase in radar cue error leads to longer EO/IR search time, which accumulates in a multi-target scenario and degrades overall mission performance. While the impact is limited in a single-target case, it becomes significant in a multi-target environment, resulting in increased mission completion time and reduced probability of identification within a given time constraint.

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 Trade-off)

1. 서론

현대 감시 및 표적 식별 체계에서는 서로 다른 특성을 가지는 센서를 통합적으로 운용함으로써 전체 임무 성능을 향상시키는 방식이 널리 활용되고 있다[1]. 특히 레이더(radar)와 전자광학/적외선(electro-optical/infrared, EO/IR) 센서는 상호 보완적인 대표적인 센서 조합으로, 레이더는 넓은 영역을 대상으로 표적을 탐지하고 EO/IR 센서는 레이더로부터 제공된 cue 정보를 기반으로 표적을 정밀하게 식별하는 구조를 가진다[2-4]. 이러한 협동 운용 구조에서 레이더가 제공하는 cue 정보의 정확도는 EO/IR 센서의 탐색 영역을 결정짓는 중요한 요소로 작용하며, 이는 곧 EO/IR의 식별 시간 및 성능에 직접적인 영향을 미친다.

기존 연구에서는 레이더 측정 오차가 EO/IR 센서의 탐색 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해, 레이더 각도 오차에 따른 탐색 영역의 증가 또는 EO/IR의 raster scan 기반 탐색 시간 증가를 중심으로 다양한 모델이 제안된 바 있다[3,4]. 이러한 연구들은 레이더 cue 오차가 커질수록 EO/IR 센서가 탐색해야 하는 공간적 불확실성이 증가하고, 이에 따라 탐색 시간이 증가한다는 점을 정량적으로 보여주었다는 점에서 의미를 가진다. 그러나 대부분의 연구는 단일 표적을 대상으로 수행되었으며, EO/IR 센서가 동시에 하나의 표적만을 식별할 수 있다는 운용적 제약과 다수 표적이 존재하는 환경에서의 순차 처리 구조는 충분히 고려되지 않았다. 실제 운

용 환경에서는 다수의 표적이 시간적으로 밀집되어 탐지되며, EO/IR 센서는 제한된 자원을 기반으로 이들을 순차적으로 처리해야 하므로, 개별 표적에서 발생하는 소규모 지연이 전체 임무 성능에 누적되어 영향을 미칠 가능성이 존재한다.

이와 같은 관점에서 본 연구에서는 레이더 cue 정확도가 EO/IR 센서의 식별 성능에 미치는 영향을 다표적 환경에서 재해석하고자 한다. 특히 EO/IR 센서가 하나의 표적을 처리하는 동안 다른 표적은 대기 상태에 놓이게 되는 순차 처리 구조를 모델에 반영하고, 레이더 cue 오차로 인해 증가한 탐색 시간이 이러한 대기 시간을 통해 어떻게 누적되는지를 분석한다. 이를 위해 레이더의 각도 오차를 확률적으로 모델링하고, EO/IR의 지향(slew), 탐색, 식별 과정으로 구성된 시간 모델을 기반으로 다표적 시나리오에서의 식별 과정을 모의하였다. 또한 단순한 식별 성공 여부가 아닌, 평균 식별 시간, 대기 시간, 임무 완료 시간 및 제한 시간 내 식별 확률과 같은 시간 기반 성능 지표를 정의하여 레이더 cue 품질이 전체 임무 성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다.

본 연구를 통해 단일 표적 환경에서는 레이더 cue 오차의 영향이 제한적으로 나타날 수 있으나, 다표적 환경에서는 EO/IR 센서의 순차 처리 구조로 인해 개별 표적의 탐색 지연이 누적되어 전체 식별 성능 저하로 이어질 수 있음을 확인하고자 한다. 이는 레이더와 EO/IR의 협동 운용 성능을 평가함에 있어 단일 표적 기반 분석을 넘어 다표적 환경과 자원 제약을 동시에 고려해야 함을 시사하며, 향후 다센서 통합 운용 및 자원 관리 기법 설계에 있어 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다.

2. 모델 구성

본 장에서는 레이더와 EO/IR 센서 간 협동 운용 환경에서 레이더 cue 정확도가 EO/IR 식별 성능에 미치는 영향을 분석하기 위한 통합 모델을 구성한다. 전체 모델은 레이더가 제공하는 각도 정보의 오차 특성을 반영한 cue 모델과, 해당 cue 정보를 기반으로 EO/IR 센서가 수행하는 지향 및 탐색 과정을 포함하는 식별 모델, 그리고 다수의 표적이 존재하는 환경에서 EO/IR 센서가 순차적으로 표적을 처리하는 구조를 반영한 처리 모델로 구성된다. 이러한 모델 구성은

개별 센서의 성능 특성뿐 아니라 센서 간 정보 연계 및 자원 제약에 따른 누적 효과를 동시에 반영할 수 있도록 설계되었다.

2.1 레이더 cue 모델

레이더는 광역 탐색을 통해 표적의 존재를 탐지하고, EO/IR 센서가 표적을 정밀 식별할 수 있도록 표적의 방향 정보를 cue 형태로 제공한다. 이때 레이더가 제공하는 방향 정보에는 측정 오차가 포함되며, 이러한 오차는 EO/IR 센서가 탐색해야 하는 공간적 불확실성을 결정하는 주요 요인으로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 레이더 cue의 정확도를 각도 오차 형태로 모델링하고, 이를 확률적으로 표현한다.

레이더가 제공하는 cue 각도는 실제 표적 방향에 오차가 더해진 형태로 식 (1)과 같이 정의된다[5].

$$\theta_{cue} = \theta_{true} + \epsilon \quad (1)$$

여기서, ϵ : 각도 측정 오차.

레이더의 각도 측정 오차는 일반적으로 다수의 잡음 요인 및 시스템 오차의 합으로 나타나므로 중심극한정리에 따라 정규분포로 근사할 수 있다. 이에 따라 각도 오차는 식 (2)와 같이 모델링한다.

$$\epsilon \sim N(0, \epsilon_{\theta}^2) \quad (2)$$

레이더 cue 오차는 EO/IR 센서의 탐색 영역 크기를 결정하는 핵심 변수로 작용한다. EO/IR 센서는 레이더가 제공한 θ_{cue} 를 중심으로 탐색을 수행하므로, 실제 표적 방향과 cue 방향 간의 차이가 클수록 EO/IR 센서가 탐색해야 하는 영역이 증가하게 된다. 즉, $|\theta_{true} - \theta_{cue}|$ 가 증가할수록 EO/IR의 탐색 부담이 증가하며, 이는 식별 시간 증가로 이어진다.

본 연구에서는 레이더 cue 정확도에 따른 성능 변화를 분석하기 위해 서로 다른 수준의 각도 오차를 가지는 세 가지 시나리오를 정의하였다. 첫 번째는 오차가 매우 작은 이상적인 상황을 나타내는 경우로, EO/IR 센서가 거의 정확한 방향으로 지향될 수 있는 조건을 의미한다. 두 번째는 일반적인 운용 환경에서

발생할 수 있는 중간 수준의 오차를 가지는 경우로, 일정 수준의 탐색 과정이 필요한 조건을 나타낸다. 세 번째는 신호대잡음비 저하, 다중경로(multipath), 환경 영향 등으로 인해 오차가 증가한 열화된 조건을 의미하며, EO/IR 센서가 비교적 넓은 영역을 탐색해야 하는 상황을 반영한다. 이러한 세 가지 cue 정확도 조건을 통해 레이더 정보 품질 변화가 EO/IR 식별 과정에 미치는 영향을 체계적으로 분석할 수 있도록 하였다.

이와 같이 정의된 레이더 cue 모델은 EO/IR 센서의 탐색 시간 모델과 결합되어, 각도 오차가 실제 식별 시간으로 어떻게 전이되는지를 분석하는 기반이 된다.

2.2 EO/IR 탐색 및 식별 모델

EO/IR 센서는 레이더로부터 제공된 cue 정보를 기반으로 표적 방향으로 지향한 후, 제한된 시야(field of view, FOV) 내에서 탐색을 수행하여 표적을 식별한다. EO/IR 센서의 식별 과정은 크게 지향(slew), 탐색(search), 식별(processing)의 세 단계로 구성되며, 각 단계에서 소요되는 시간의 합이 최종 식별 시간으로 정의된다[6]. 본 연구에서는 이러한 과정을 시간 기반 모델로 구성하여 레이더 cue 오차가 EO/IR 식별 시간에 미치는 영향을 정량적으로 분석한다.

EO/IR 센서가 표적을 식별하는 데 소요되는 전체 시간은 식 (3)과 같이 표현된다. 여기서 T_{slew} 는 EO/IR 센서가 cue 방향으로 지향하는 데 소요되는 시간, T_{search} 는 FOV 내에서 표적을 탐색하는 데 소요되는 시간, T_{proc} 는 표적 식별을 위한 영상 처리 및 판독 시간을 의미한다.

$$T_{ID} = T_{slew} + T_{search} + T_{proc} \quad (3)$$

먼저 EO/IR 센서의 지향 시간은 현재 EO/IR이 바라보고 있는 방향과 레이더 cue 방향 간의 각도 차이에 비례하며, EO/IR의 기구적 회전 속도에 의해 결정된다. 이를 수식으로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$T_{slew} = \frac{|\theta_{cue} - \theta_{EOIR}|}{\omega} \quad (4)$$

여기서, ω : 센서의 지향 속도(deg/s).

식 (4)는 EO/IR 센서가 cue 방향으로 이동하기 위해 필요한 각도 변위를 일정한 각속도로 나누어 시간으로 환산한 것이다. 레이더 cue 오차가 증가할 경우 EO/IR이 실제 표적 방향과 다른 위치로 지향될 가능성이 있으나, 지향 시간 자체는 주로 cue 방향으로의 이동량에 의해 결정되므로 오차의 영향은 상대적으로 제한적으로 나타난다.

반면 EO/IR 탐색 시간은 레이더 cue 오차에 직접적으로 영향을 받는다. EO/IR 센서는 제한된 FOV를 가지므로, cue 방향과 실제 표적 방향 간 차이가 존재할 경우 FOV를 이동시키며 탐색을 수행해야 한다. 본 연구에서는 이러한 탐색 과정을 등가적인 탐색 단계의 개념으로 모델링하고, 탐색 시간은 탐색 단계 수와 단계당 소요 시간의 곱으로 정의한다.

$$T_{search} = N_{step} \cdot T_{step} \quad (5)$$

여기서, N_{step} : 탐색에 필요한 단계 수,

T_{step} : 한 번의 탐색에 소요되는 시간(s).

탐색 단계 수 N_{step} 은 레이더 cue 오차에 비례하여 증가하며, EO/IR의 FOV 크기에 반비례하는 관계를 가진다. 즉, cue 방향과 실제 표적 방향 간 차이가 클수록 더 많은 탐색 단계가 필요하다. 이를 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$N_{step} \propto \frac{|\theta_{true} - \theta_{cue}|}{FOV} \quad (6)$$

위 관계식은 EO/IR 센서가 실제 표적 방향에 도달하기 위해 필요한 FOV 이동 횟수가 cue 오차에 의해 결정된다는 점을 나타낸다. 따라서 레이더 cue 오차가 증가할수록 EO/IR의 탐색 시간은 선형적으로 증가하는 경향을 가지며, 이는 전체 식별 시간 증가의 주요 원인이 된다.

마지막으로 식별 처리 시간 T_{proc} 은 EO/IR 센서가 표적을 시야 내에 확보한 이후 영상 처리 및 판독을 수행하는 데 필요한 시간으로 정의되며, 본 연구에서는 일정한 상수로 가정하였다. 이는 본 연구의 초점이 레이더 cue 오차에 따른 탐색 시간 변화에 있으므로, 식별 알고리즘의 상세 특성은 모델에서 제외하고 시간 지연 효과만 반영하기 위함이다.

이와 같이 구성된 EO/IR 탐색 및 식별 모델은 레이더 cue 오차가 EO/IR의 탐색 시간 증가로 이어지고, 궁극적으로 표적 식별 시간에 영향을 미치는 과정을 물리적으로 일관되게 표현한다. 이러한 시간 모델은 다음 절에서 설명하는 다표적 순차 처리 구조와 결합되어, 개별 표적에서 발생한 시간 지연이 전체 임무 성능에 어떻게 누적되는지를 분석하는 기반으로 활용된다.

2.3 다표적 순차 처리 모델

실제 운용 환경에서는 EO/IR 센서가 동시에 여러 표적을 식별하는 것이 아니라, 하나의 표적을 처리하는 동안 다른 표적은 대기 상태에 놓이게 된다. 따라서 레이더에 의해 다수의 표적이 탐지되더라도 EO/IR 센서는 이들을 순차적으로 처리하게 되며, 이러한 처리 구조는 개별 표적에서 발생하는 식별 지연이 후속 표적의 처리 시간에 영향을 미치는 원인이 된다. 본 연구에서는 이러한 운용 특성을 반영하기 위해 EO/IR 센서의 표적 처리 과정을 단일 서버 기반의 순차 처리 모델로 구성하였다.

각 표적의 EO/IR 처리 과정은 표적이 EO/IR에 의해 처리되기 시작하는 시점과 처리 완료 시점으로 구분되며, 이는 식 (7)과 같이 정의된다. 여기서 $T_{arrival,i}$ 는 i 번째 표적이 EO/IR 처리 대상으로 도착하는 시간, $T_{start,i}$ 는 식별이 시작되는 시간, $T_{finish,i}$ 는 식별이 완료되는 시간, TID는 표적의 식별 시간을 의미한다.

$$\begin{aligned} T_{start,i} &= \max(T_{arrival,i}, T_{finish,i-1}) \\ T_{finish,i} &= T_{start,i} + T_{ID,i} \end{aligned} \quad (7)$$

첫 번째 식은 EO/IR 센서가 새로운 표적을 처리하기 시작하는 시점이 해당 표적의 도착 시각과 이전 표적의 처리 완료 시각 중 더 늦은 시점으로 결정됨을 의미한다. 이는 EO/IR 센서가 이미 다른 표적을 처리 중인 경우에는 새로운 표적이 도착하더라도 즉시 처리할 수 없으며, 기존 작업이 완료될 때까지 대기해야 함을 반영한다. 두 번째 식은 각 표적의 처리 완료 시각이 식별 시작 시각에 식별 시간을 더한 값으로 정의됨을 나타낸다.

이와 같은 구조에서 EO/IR 센서 앞에는 자연스럽게 대기열(queue)이 형성되며, 각 표적의 대기 시간

은 식 (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$T_{wait,i} = T_{start,i} - T_{arrival,i} \quad (8)$$

여기서 $T_{wait,i}$ 는 i 번째 표적이 EO/IR 처리 시작 전까지 대기하는 시간을 의미한다. 레이더 cue 오차가 증가할 경우, 앞선 절에서 정의된 바와 같이 EO/IR의 탐색 시간이 증가하여 $T_{ID,i}$ 가 커지게 된다. 이로 인해 $T_{finish,i-1}$ 이 지연되고, 결과적으로 후속 표적의 $T_{start,i}$ 또한 지연된다. 이러한 과정이 반복되면서 개별 표적에서 발생한 소규모 지연이 전체 표적 집합에 걸쳐 누적되는 현상이 발생한다.

특히 다수의 표적이 짧은 시간 간격으로 도착하는 경우, EO/IR 센서는 지속적으로 포화 상태에 가까운 운용을 수행하게 되며, 이때 레이더 cue 오차로 인한 탐색 시간 증가가 전체 시스템 성능 저하로 확대되는 경향이 나타난다. 반면 표적 간 도착 간격이 충분히 큰 경우에는 EO/IR 센서가 각 표적을 독립적으로 처리할 수 있으므로, 개별 표적 수준에서의 지연이 전체 성능에 미치는 영향은 상대적으로 제한적이다.

이와 같이 정의된 다표적 순차 처리 모델은 레이더 cue 오차가 EO/IR 탐색 시간 증가를 통해 개별 표적의 식별 시간에 영향을 미치고, 이러한 지연이 대기 시간 형태로 누적되어 전체 임무 성능을 저하시키는 메커니즘을 설명한다. 따라서 본 모델은 단일 표적 기반 분석에서는 나타나지 않는 누적 효과를 정량적으로 분석할 수 있는 기반을 제공한다.

2.4 성능 지표 정의

본 연구에서는 레이더 cue 오차가 EO/IR 센서의 식별 성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해, 개별 표적 수준의 성능뿐 아니라 다표적 환경에서의 누적 효과를 반영할 수 있는 시간 기반 성능 지표를 정의하였다. 단일 표적 환경에서는 식별 성공 여부만으로도 성능 평가가 가능하나, 다표적 환경에서는 EO/IR 센서의 순차 처리 구조로 인해 대기 시간과 누적 지연이 발생하므로, 시간 기반 지표를 통해 전체 시스템 성능을 평가하는 것이 필요하다. 전체 임무 수준에서의 성능을 평가하기 위해 임무 완료 시간을 정의한다. 이는 모든 표적의 식별이 완료되는 시점을 의

미하며, 식 (9)와 같이 표현된다.

$$T_{mission} = \max_i(T_{finish,i}) \quad (9)$$

여기서 $T_{mission}$ 은 전체 표적 집합에 대한 EO/IR 식별 완료 시간 [s]을 의미한다. 임무 완료 시간은 개별 표적의 식별 지연이 누적된 결과를 나타내며, 레이더 cue 오차가 전체 임무 수행 시간에 미치는 영향을 직관적으로 보여준다.

또한 실제 운용 환경에서는 제한된 시간 내에 표적을 식별하는 능력이 중요하므로, 시간 제한 조건을 고려한 성능 지표를 정의한다. 이는 주어진 시간 T_{lim} 이내에 표적이 식별될 확률로 정의되며 식 (10)과 같이 표현된다.

$$P_{success} = P(T_{ID,i} \leq T_{lim}) \quad (10)$$

이 지표는 레이더 cue 오차 증가로 인해 식별 시간이 증가할 경우, 일정 시간 내 식별 가능한 표적의 비율이 감소하는 현상을 정량적으로 평가하는 데 활용된다.

마지막으로 EO/IR 센서의 처리 효율을 나타내기 위해 단위 시간당 처리 가능한 표적 수를 의미하는 처리율(throughput)을 정의할 수 있으며, 이는 임무 완료 시간과 표적 수를 이용하여 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\eta = \frac{N_{target}}{T_{mission}} \quad (11)$$

이와 같이 정의된 성능 지표들은 서로 보완적인 관계를 가지며, 개별 표적 수준의 성능과 전체 임무 수준의 성능을 동시에 평가할 수 있도록 한다. 특히 식별 시간과 대기 시간은 레이더 cue 오차의 직접적인 영향을 나타내며, 임무 완료 시간과 제한 시간 내 식별 확률은 이러한 영향이 전체 시스템 성능으로 어떻게 확장되는지를 보여준다.

3. 시뮬레이션 및 분석 결과

본 장에서는 2장에서 정의한 레이더 cue 모델과 EO/IR 탐색 및 식별 모델, 그리고 다표적 순차 처리 모델을 기반으로 시뮬레이션을 수행하고, 레이더

cue 정확도가 EO/IR 식별 성능에 미치는 영향을 분석한다. 특히 단일 표적 환경에서는 제한적으로 나타나는 cue 오차의 영향이 다표적 환경에서 어떻게 누적되어 전체 임무 성능에 영향을 미치는지를 중점적으로 확인한다. 이를 위해 서로 다른 수준의 레이더 각도 오차를 가지는 조건을 설정하고, 동일한 표적 환경에서 EO/IR 센서의 식별 과정을 모의함으로써 각 조건 간 성능 차이를 비교하였다.

3.1 시나리오 구성

시뮬레이션은 다수의 표적이 짧은 시간 간격으로 탐지되는 환경을 가정하여 구성하였으며, EO/IR 센서가 순차적으로 표적을 처리하는 과정에서 발생하는 대기 및 지연 효과를 명확히 확인할 수 있도록 설계하였다. 표적은 일정 시간 구간 내에서 랜덤하게 도착하도록 설정하였으며, EO/IR 센서는 단일 표적만을 동시에 처리할 수 있는 구조를 가지도록 모델링하였다.

레이더 cue 정확도에 따른 성능 변화를 분석하기 위해 세 가지 조건을 설정하였다. 이상적인 조건에서는 레이더 각도 오차가 매우 작아 EO/IR 센서가 거의 정확한 방향으로 지향될 수 있도록 하였으며, 일반적인 운용 조건에서는 중간 수준의 오차를 적용하여 일정 수준의 탐색이 필요하도록 설정하였다. 열화된 조건에서는 각도 오차를 증가시켜 EO/IR 센서가 보다 넓은 영역을 탐색하도록 하였으며, 이를 통해 탐색 시간 증가와 그에 따른 누적 지연 효과를 강조하였다.

EO/IR 센서의 시야각은 실제 운용 가능한 범위를 고려하여 제한된 값으로 설정하였으며, 지향 속도 또한 기구적 특성을 반영하여 일정한 각속도로 가정하였다. 탐색 과정은 FOV 단위로 이동하며 표적을 탐색하는 방식으로 모델링하였고, 각 탐색 단계에서 일정 시간이 소요되도록 설정하였다. 또한 표적 식별 이후 영상 처리 및 판독 과정에서 발생하는 처리 시간은 일정한 상수로 가정하여 모델에 반영하였다. 이러한 설정은 레이더 cue 오차가 탐색 시간 증가로 직접적으로 연결되도록 하기 위함이다.

다표적 환경에서 EO/IR 센서의 자원 경쟁 효과를 명확히 하기 위해 표적 수는 EO/IR 센서가 단기간에 모두 처리하기 어려운 수준으로 설정하였으며, 표적 도착 시각은 일정 시간 구간 내에 집중되도록 하여 대기열이 형성되도록 하였다. 이를 통해 개별 표적에서

발생한 식별 지연이 후속 표적에 누적되는 현상을 관찰할 수 있도록 하였다.

Table 1. Simulation parameters

	Parameters	Value	Unit
Target	Number of targets	10	-
	Arrival time	0~20	s
	Range	12~35	km
	Azimuth	-30~+30	deg
EO/IR	Initial azimuth	0	deg
	Slew rate	12	deg/s
	FOV (zoomed)	0.7	deg
	Step time	0.28	s
	Processing time	1.1	s
	Search pattern factor	1.35	-
	Ideal	0.12	deg
	Cue error	Moderate	0.35 deg
	Degraded	0.80 deg	deg
	Time limit (evaluation)	6~50	s
	Monte Carlo runs	600	-

시뮬레이션은 확률적 특성을 고려하기 위해 Monte Carlo 방법을 적용하여 반복 수행하였으며, 이를 정리하면 Table 1과 같다. 각 반복 결과를 기반으로 평균 식별 시간, 평균 대기 시간, 임무 완료 시간 및 제한 시간 내 식별 확률 등의 성능 지표를 산출하였다. 이를 통해 레이더 cue 정확도 변화에 따른 EO/IR 센서의 성능 변화를 통계적으로 비교할 수 있도록 하였다.

3.2 분석 결과

본 절에서는 3.1절에서 정의한 시나리오를 기반으로 레이더 cue 정확도에 따른 EO/IR 센서의 식별 성능 변화를 분석한다. 특히 레이더 cue 오차로 인해 증가한 EO/IR 탐색 시간이 다표적 환경에서 어떻게 누적되어 전체 임무 성능에 영향을 미치는지를 중심으로 결과를 해석한다. 먼저 EO/IR 센서의 다표적 처리 과정을 시간 축 상에서 나타낸 결과를 분석하였다.

Fig. 1은 동일한 표적 도착 조건에서 레이더 cue 정확도에 따라 EO/IR 센서의 처리 시간이 어떻게 변화하는지를 보여준다. 이상적인 cue 조건에서는 EO/IR 센서가 각 표적을 비교적 짧은 시간 내에 식별할 수

있으므로, 표적 간 처리 간격이 크게 증가하지 않는다. 반면 cue 오차가 증가한 조건에서는 각 표적의 탐색 시간이 증가함에 따라 식별 완료 시점이 점진적으로 지연되며, 특히 후속 표적일수록 지연이 누적되는 경향이 나타난다. 이는 EO/IR 센서의 순차 처리 구조에서 개별 표적의 식별 시간이 다음 표적의 시작 시점을 직접적으로 결정하기 때문이며, 결과적으로 작은 탐색 시간 증가가 전체 처리 흐름에 걸쳐 확대되는 특성을 보인다.

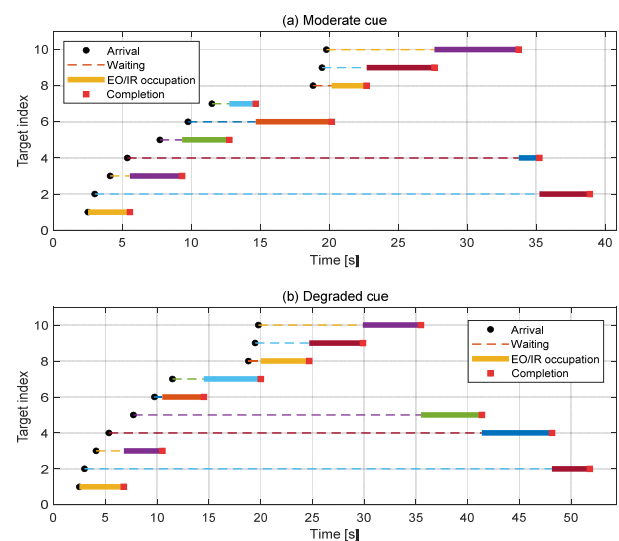


Fig. 1. Time history of EO/IR sequential processing

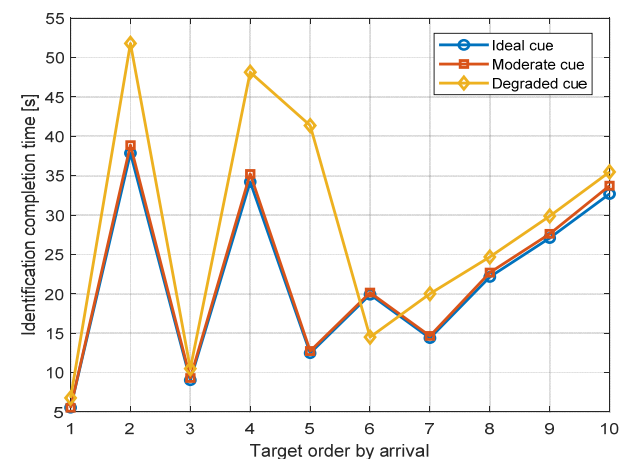


Fig. 2. Identification completion time versus target index

Fig. 2에서 초기 표적 구간에서는 세 가지 cue 조건 간 식별 완료 시간 차이가 비교적 작게 나타나지만, 표적 인덱스가 증가할수록 조건 간 격차가 점차 확대되는 것을 확인할 수 있다. 이는 각 표적에서 발생한

탐색 시간 증가가 후속 표적에 누적되어 전달되기 때문이며, 이러한 누적 효과는 선형이 아닌 점진적으로 증가하는 형태를 보인다. 즉, 레이더 cue 오차는 개별 표적 수준에서는 제한적인 영향을 미칠 수 있으나, 다 표적 환경에서는 순차 처리 구조를 통해 전체 성능 저하로 확대됨을 확인할 수 있다.

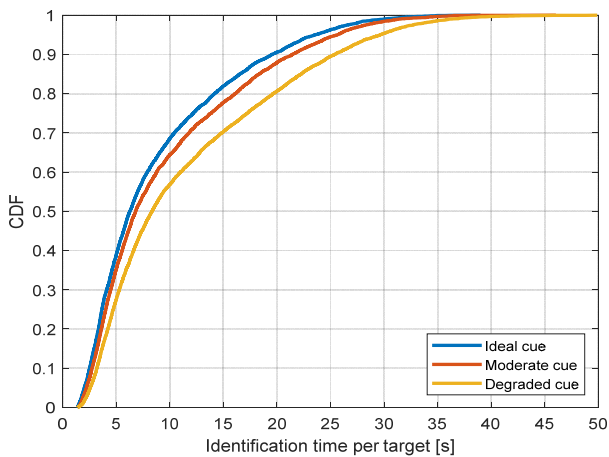


Fig. 3. Distribution of EO/IR identification time

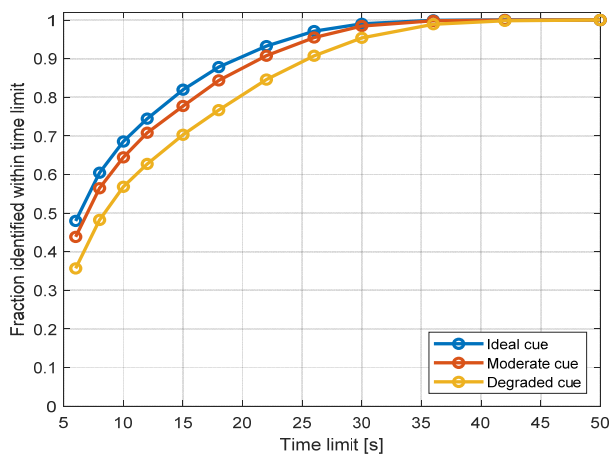
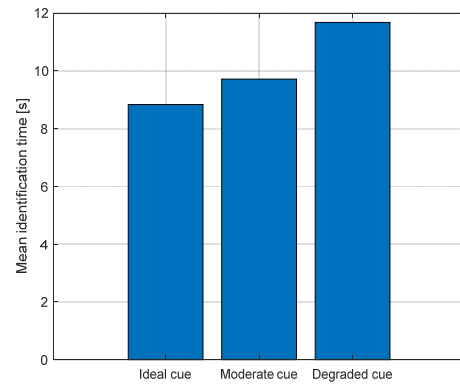
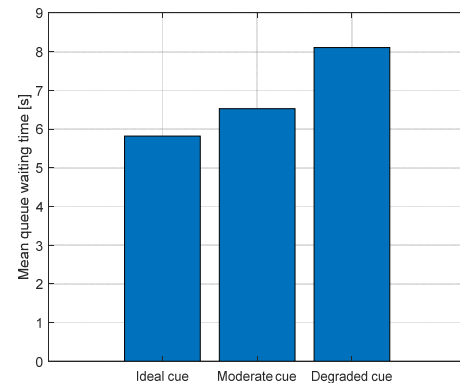


Fig. 4. Identification probability within time constraint

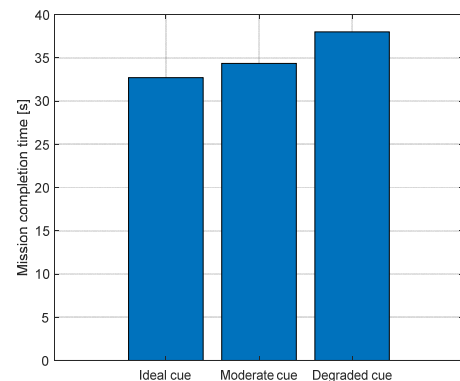
Fig. 3에서 cue 오차가 증가할수록 식별 시간 분포가 우측으로 이동하는 경향이 나타난다. 이는 EO/IR 센서의 탐색 시간이 증가함에 따라 전체 식별 시간이 증가하는 결과를 반영한다. 또한 분포의 폭이 넓어지는 경향이 관찰되는데, 이는 표적별로 발생하는 탐색 시간의 변동성과 대기 시간 누적 효과가 결합된 결과이다. 이러한 결과는 레이더 cue 품질 저하가 단순히 평균 성능 저하뿐 아니라 성능 변동성 증가로도 이어질 수 있음을 의미한다.



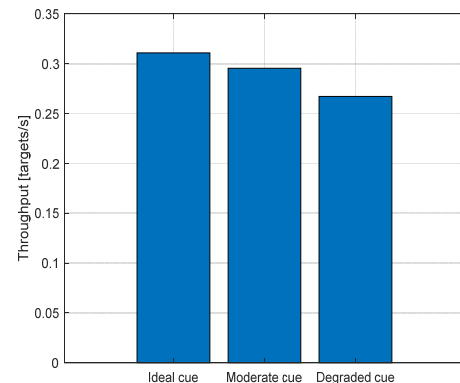
(a) Average per-target identification time



(b) Average queue waiting time



(c) Mission completion time



(d) Identification throughput

Fig. 5. Comparison of EO/IR performance metrics

실제 운용 환경에서는 제한된 시간 내에 표적을 식별하는 능력이 중요하므로, 시간제한 조건을 고려한 성능을 Fig. 4에 제시하였다.

이상적인 cue 조건은 대부분의 표적이 제한 시간 내에 식별되는 반면, cue 오차가 증가할수록 해당 확률이 감소하는 경향이 나타난다. 이는 EO/IR 센서의 탐색 시간 증가와 대기 시간 누적으로 인해 일부 표적이 제한 시간 내에 처리되지 못하는 경우가 발생하기 때문이다. 특히 열화된 cue 조건에서는 후속 표적일수록 지연이 누적되어 시간 제한을 초과하는 비율이 증가하는 특징을 보인다. 이러한 결과는 레이더 cue 품질이 EO/IR 기반 식별 임무의 성공률에 직접적인 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

Fig. 5에서는 평균 식별 시간, 평균 대기 시간, 임무 완료 시간 등 주요 성능 지표가 cue 오차 증가에 따라 모두 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 특히 평균 대기 시간의 증가가 두드러지게 나타나는데, 이는 EO/IR 센서의 순차 처리 구조에서 탐색 시간 증가가 대기열 확장을 통해 전체 시스템 성능 저하로 연결됨을 의미한다. 또한 임무 완료 시간 역시 증가하는 경향을 보이며, 이는 레이더 cue 품질이 전체 임무 수행 시간에 직접적인 영향을 미치는 요소임을 나타낸다.

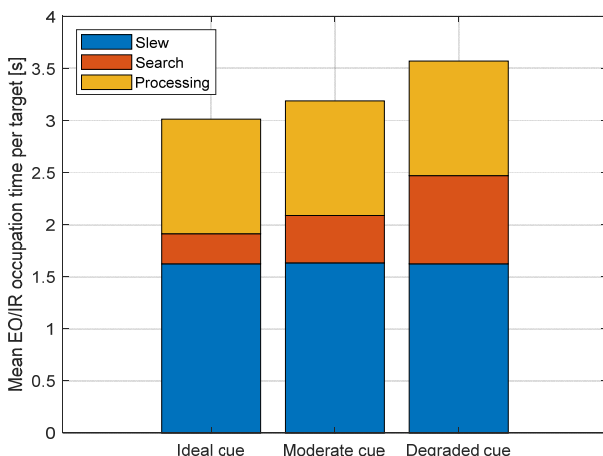


Fig. 6. Breakdown of EO/IR identification time

마지막으로 EO/IR 식별 시간의 구성 요소를 분석한 결과를 보면 Fig. 6과 같다. 지향 시간과 처리 시간은 cue 조건에 관계없이 큰 변화가 없는 반면, 탐색 시간은 cue 오차 증가에 따라 뚜렷하게 증가하는 경향을 보인다. 이는 레이더 cue 오차가 EO/IR 식별 시간 증가의 주요 원인이 탐색 과정에 있음을 명확히 보여

준다. 즉, 레이더 cue 정확도가 낮아질수록 EO/IR 센서는 더 많은 탐색 단계를 수행해야 하며, 이로 인해 식별 시간이 증가하고, 이러한 증가가 다표적 환경에서 누적되어 전체 성능 저하로 이어진다.

이상의 결과를 종합하면, 레이더 cue 오차는 EO/IR 센서의 탐색 시간 증가를 유발하며, 이러한 시간 증가는 다표적 순차 처리 구조에서 대기 시간 형태로 누적되어 전체 임무 성능 저하로 확대된다. 특히 단일 표적 환경에서는 제한적으로 나타날 수 있는 영향이 다표적 환경에서는 임무 완료 시간 증가 및 제한 시간 내 식별 확률 감소와 같은 형태로 명확하게 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 레이더와 EO/IR 센서의 협동 운용 성능을 평가함에 있어 cue 정확도뿐 아니라 다표적 환경과 자원 제약을 함께 고려해야 함을 시사한다.

4. 결론

본 연구에서는 레이더와 전자광학/적외선 센서의 협동 운용 환경에서 레이더 cue 정확도가 EO/IR 센서의 식별 성능에 미치는 영향을 다표적 환경에서 분석하였다. 레이더 cue 오차를 확률적으로 모델링하고, EO/IR 센서의 지향, 탐색, 식별 과정을 시간 기반으로 구성하였으며, 다수의 표적이 존재하는 상황에서 EO/IR 센서가 순차적으로 표적을 처리하는 구조를 반영하였다.

분석 결과, 레이더 cue 오차는 EO/IR 센서의 탐색 시간 증가를 유발하며, 이러한 영향은 지향 시간이나 처리 시간보다 탐색 과정에서 지배적으로 나타나는 것을 확인하였다. 특히 단일 표적 환경에서는 cue 오차에 따른 영향이 제한적으로 나타나는 반면, 다표적 환경에서는 EO/IR 센서의 순차 처리 구조로 인해 개별 표적에서 발생한 탐색 지연이 대기 시간 형태로 누적되며, 결과적으로 전체 식별 성능 저하로 이어지는 특성이 확인되었다. 이러한 누적 효과는 표적 인덱스가 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 임무 완료 시간 증가와 제한 시간 내 식별 확률 감소와 같은 형태로 구체적으로 관찰되었다.

본 연구는 레이더 cue 정확도가 EO/IR 센서의 성능에 미치는 영향을 단일 표적 수준이 아닌 다표적 환경과 자원 제약을 고려한 관점에서 분석하였다는 점에서 의의를 가진다. 특히 EO/IR 센서의 순차 처리 구

조를 통해 작은 탐색 시간 증가가 전체 임무 성능 저하로 확대되는 메커니즘을 정량적으로 제시함으로써, 센서 간 협동 운용 성능 평가 시 고려해야 할 핵심 요소를 제시하였다.

향후 연구에서는 표적의 우선순위를 고려한 큐 관리 기법, 다수 EO/IR 센서의 병렬 운용, 그리고 레이더와 EO/IR 간 정보 융합을 통한 cue 정확도 개선 기법을 포함하여 보다 실제 운용 환경에 근접한 확장 연구가 필요하다. 또한 자원 관리 및 최적화 기법과 결합하여 제한된 센서 자원 하에서 전체 임무 성능을 극대화할 수 있는 운용 전략에 대한 연구로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] Ratnasingham Thamarasa, Thiagalingam Kirubarajan, & Marcel Hernandez, 'Large-Scale Optimal Sensor Array

Management for Multitarget Tracking,' IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), VOL. 37, NO. 5, 2007, pp. 803-814.

[2] Chunshan Ding, Jiazhou He, & Chunguo Li, 'Sensor Management Method for Tracking Target Continuously and Stably,' in proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Computing and Data Analysis, 2025, pp. 540-547.

[3] Alexandre La Grappa, Emile le Flecher, & Geert de Cubber, 'Multi-Sensor Multi-Target Tracking for Maritime Surveillance with Autonomous Surface Vehicles Using Belief Propagation,' in OCEANS 2025 Brest, June 2025.

[4] Bahador Khaleghi, Alaa Khamis, Fakhreddine O. Karray, & Saiedeh N. Razavi, 'Multisensor Data Fusion: A Review of the State-of-the-Art,' Information Fusion, VOL. 14, NO. 1, 2013, pp. 28-44.

[5] Samuel S. Blackman & Robert Popoli, Design and Analysis of Modern Tracking Systems, Artech House, 1999.

[6] Ying He & K. P. Chong, 'Sensor Scheduling for Target Tracking in Sensor Networks,' in proceedings of 2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Nassau, Bahamas, December 2004.