



Received: 2026/05/03
Revised: 2026/05/15
Accepted: 2026/06/04
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

Abstract

본 논문에서는 레이더의 순차 탐색 운용에서 빔 조사 순서가 다표적 탐지 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 동일한 탐색 영역과 시간 자원 조건에서 탐색 시작 위치와 진행 방향만을 달리하는 네 가지 탐색 순서를 정의하고, 이를 기반으로 단일 시나리오 및 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. 분석 결과, 단일 시나리오에서는 탐색 순서에 따라 표적별 최초 탐지 지연시간에 차이가 발생함을 확인하였다. 그러나 다양한 표적 배치를 고려한 Monte Carlo 분석에서는 탐색 순서 간 평균 탐지 지연시간 차이가 매우 제한적으로 나타났으며, 성능 순위 또한 반복에 따라 변동하는 경향을 보였다. 또한 탐지 지연시간의 분포 특성 역시 탐색 순서에 관계없이 유사하게 나타나, 순차 탐색 시작 위치의 영향이 평균적으로 상쇄됨을 확인하였다.

This study quantitatively analyzed the influence of scan order on multitarget detection performance in sequential radar scanning operations. Four scan orders were defined by varying the starting position and scanning direction under identical search region and time resource conditions, and both a representative scenario and Monte Carlo simulations were conducted. The results from a single scenario showed that the detection delay of individual targets varied depending on the scan order. However, Monte Carlo simulations with randomly distributed targets indicated that the differences in mean detection delay among the scan orders were marginal, and the performance ranking varied across trials. In addition, the distribution of detection delay exhibited similar characteristics regardless of the scan order, suggesting that the effect of scan starting position was averaged out.

Keywords

순차 탐색(Sequential Scanning),
레이더 탐색 순서(Radar Scan Order),
탐색 성능 분석(Search Performance Analysis),
탐지 지연시간(Detection Delay),
다표적 탐지(Multitarget Detection),
레이더 M&S(Radar Modeling and Simulation)

다표적 불확실 환경에서 레이더 탐색 순서가 탐지 성능에 미치는 영향 분석

Analysis of the Influence of Scan Order on Detection Performance in Multitarget Uncertain Environments

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

1. 서론

지상 및 함정에 배치되는 레이더는 제한된 시간 자원을 기반으로 설정된 방위각 및 고각 영역을 주기적으로 탐색함으로써 접근하는 표적을 탐지한다[1,2]. 이러한 탐색 운용은 일반적으로 일정한 빔폭을 가지는 빔들을 순차적으로 조사하는 방식으로 수행되며, 동일한 탐색 영역과 동일한 자원 조건 하에서도 빔이 조사되는 순서에 따라 개별 표적의 최초 탐지 시점이 달라질 수 있다. 특히 탐색이 시작되는 위치에 따라 특정 공간 영역이 먼저 관측되거나 지연되어 관측되기 때문에, 탐색 순서의 선택은 초기 탐지 성능에 영향을 줄 수 있는 잠재적인 운용 요소로 고려될 수 있다.

기존의 레이더 탐지 성능 분석은 주로 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR), 표적 레이더 단면적(radar cross section, RCS), 탐지 확률(probability of detection, Pd)과 같은 신호 처리 관점의 변수나, 펄스 반복 주기(pulse repetition interval, PRI), 빔 체류 시간(dwell time)과 같은 시간 자원 관리 변수에 초점을 맞추어 수행되어 왔다[3,4]. 이러한 접근은 레이더의 물리적 성능 및 신호 처리 능력을 평가하는 데에는 효과적이지만, 동일한 자원 조건 하에서 단순히 탐색 순서를 변경하는 것만으로 운용 성능에 어떤 변화가 발생하는지에 대해서는 상대적으로 제한적인 분석만이 수행되어 왔다. 특히 다수 표적이 존재하고 표적의 접근 방향 및 고도가 사전에 알려져 있지 않은 환경에서는, 특정 탐색 순서가 평균적

인 성능 향상으로 이어지는지에 대한 정량적인 검증이 부족하다.

직관적으로는 탐색을 특정 방향에서 시작할 경우 해당 방향에 위치한 표적을 더 빠르게 탐지할 수 있으며, 반대 방향에 위치한 표적은 상대적으로 늦게 탐지될 것으로 예상할 수 있다. 그러나 실제 운용 환경에서는 표적이 특정 방위나 고도에 집중되지 않고 다양한 방향에서 불확실하게 접근할 가능성이 높기 때문에, 개별 시나리오에서 나타나는 성능 차이가 전체 운용 환경에서도 유의미하게 유지되는지는 별도의 검증이 필요하다. 즉, 탐색 순서에 따른 성능 차이가 특정 공간 배치에 의존하는 현상인지, 아니면 평균적인 환경에서도 일관된 경향으로 나타나는지에 대한 분석이 요구된다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여, 레이더의 전방 탐색 구역을 방위각 및 고각 영역으로 정의하고 이를 일정한 빔폭을 가지는 격자 형태로 분할한 후, 서로 다른 탐색 시작 위치에 따른 순차 탐색 운용을 모델링하였다. 탐색 순서는 방위각과 고각의 조합에 따라 좌하단에서 시작하여 우상단으로 진행하는 방식, 좌상단에서 시작하여 우하단으로 진행하는 방식, 우하단에서 시작하여 좌상단으로 진행하는 방식, 우상단에서 시작하여 좌하단으로 진행하는 방식으로 정의하였으며, 각 경우에 대해 동일한 탐색 경로를 가지되 시작점만이 달라지도록 구성하였다. 또한 표적은 탐색 영역 내 임의의 방위각 및 고각 방향에서 최대 탐지 거리 외곽에서 생성되어 일정 속도로 레이더 방향으로 접근하는 것으로 모델링하였으며, 단일 시나리오 분석과 더불어 Monte Carlo 기반 반복 시뮬레이션을 통해 다양한 표적 배치에 대한 통계적 성능을 평가하였다.

분석을 위한 성능 지표로는 각 표적이 최대 탐지 거리 이내로 진입한 시점 이후 실제로 탐지되기까지의 지연시간을 정의하였으며, 이를 기반으로 평균 탐지 지연시간, 분산 및 최악 지연시간을 산출하였다. 이러한 지표는 탐색 순서 변화가 조기 탐지 성능에 미치는 영향을 직접적으로 반영할 수 있으며, 특히 다표적 환경에서의 시간 지연 특성을 정량적으로 비교하는데 유용하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 탐색 구역 모델, 빔 구성 방식, 탐색 순서 정의 및 표적 생성 모델을 포함한 전체 시뮬레이션 구조를 설명한다. 3

장에서는 대표 시나리오 및 Monte Carlo 기반 분석 결과를 제시하고, 탐색 순서에 따른 성능 차이의 원인과 특성을 분석한다. 마지막으로 4장에서는 본 연구의 주요 결과를 정리하고, 단순 순차 탐색 방식의 한계와 향후 적응형 탐색 정책으로의 확장 가능성에 대해 논의한다.

2. 모델 구성

본 장에서는 레이더의 순차 탐색 운용이 표적 최초 탐지 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 구성한 시뮬레이션 모델을 설명한다. 본 연구에서는 신호 처리 과정이나 탐지 확률 모델을 포함하는 상세 레이더 모델 대신, 동일한 탐색 자원 조건 하에서 탐색 순서 변화에 따른 시간 지연 특성만을 분리하여 분석할 수 있도록 기하학적 탐색 모델과 시간 기반 탐지 모델을 구성하였다. 이를 통해 탐색 순서라는 단일 변수의 영향만을 명확하게 해석할 수 있도록 하였다.

모델은 크게 레이더 탐색 구역 및 빔 구성, 탐색 순서 정의, 표적 생성 및 운동 모델, 그리고 성능 지표 계산으로 구성되며, 각 구성 요소는 실제 운용 개념을 반영하되 불필요한 복잡성을 배제하는 방향으로 설계하였다. 특히 탐색 과정은 개별 빔 단위의 순차적 조사로 표현되며, 각 빔이 조사되는 시간 간격을 기준으로 표적의 위치가 갱신되는 이산 시간 모델로 구현하였다.

2.1 레이더 탐색 및 빔 모델

레이더의 탐색 영역은 레이더를 기준으로 정의되는 방위각과 고각 범위로 표현되며, 본 연구에서는 전방 탐색 구역을 방위각 -45° 에서 $+45^\circ$, 고각 5° 에서 30° 로 설정하였다. 이와 같은 탐색 구역은 실제 레이더가 운용 시 설정하지 않는 섹터 기반 탐색 영역을 단순화하여 표현한 것으로, 모든 표적은 해당 영역을 통해 레이더 방향으로 접근하는 것으로 가정한다.

탐색 구역은 일정한 빔폭을 가지는 빔 단위로 분할되며, 각 빔은 특정 방위각과 고각 범위를 대표하는 공간 셀로 정의된다. 빔폭은 방위각 및 고각 방향 모두 동일한 크기를 갖는 것으로 가정하였으며, 이를 통해 전체 탐색 구역은 2차원 격자 형태로 구성된다. 각

격자 셀은 하나의 빔에 대응되며, 레이더는 이들 빔을 순차적으로 조사함으로써 전체 영역을 주기적으로 스캔한다.

빔 단위 탐색에서 중요한 요소는 각 빔이 조사되는 시간 간격이며, 이는 최대 탐지 거리에서의 전파 왕복 시간을 기반으로 정의된다. 전파는 광속으로 전달되며, 표적까지 도달한 후 반사되어 다시 레이더로 수신되기 때문에, 특정 거리까지의 탐지에 필요한 최소 시간은 식 (1)과 같이 표현된다[5].

$$\Delta t = \frac{2R_{\max}}{c} \quad (1)$$

여기서, $R_{\max}$: 최대 탐지 거리(m),
 c : 전파 속도(m/s).

식 (1)은 전파가 최대 탐지 거리까지 왕복하는 데 필요한 시간을 의미하며, 본 연구에서는 이를 각 빔 조사에 필요한 최소 시간 단위로 사용하였다. 즉, 레이더는 Δt 간격으로 다음 빔으로 이동하며 탐색을 수행하는 것으로 모델링하였다.

이와 같은 정의는 실제 레이더에서의 dwell time, 신호 적분 시간, 처리 지연 등을 모두 포함하지 않는 단순화된 모델이지만, 모든 탐색 순서에 대해 동일한 시간 조건을 적용함으로써 순서 변화에 따른 상대적인 성능 차이를 공정하게 비교할 수 있도록 한다. 또한 시간 축을 빔 단위로 이산화함으로써, 각 시간 스텝마다 레이더가 조사하는 빔과 표적의 위치를 명확하게 대응시킬 수 있다.

각 시간 스텝에서 레이더는 하나의 빔을 선택하여 해당 빔이 커버하는 방위각 및 고각 범위 내에 표적이 존재하는지를 판단하며, 표적이 해당 빔 범위에 포함되는 최초 시점을 탐지 시점으로 정의한다. 이때 탐지는 확률적인 과정이 아닌 결정론적 판단으로 구성되며, 이는 탐색 순서에 따른 시간 지연 특성을 명확히 분석하기 위한 목적에 따른 것이다.

이와 같이 구성된 레이더 탐색 및 빔 모델은 탐색 순서 변화에 따른 최초 탐지 시간의 변화를 직접적으로 반영할 수 있으며, 이후 절에서 설명하는 탐색 순서 정의 및 표적 모델과 결합되어 전체 시뮬레이션 프레임워크를 구성한다.

2.2 탐색 순서 모델

레이더의 탐색 성능은 동일한 탐색 영역과 동일한 시간 자원을 사용하더라도, 빔이 조사되는 순서에 따라 달라질 수 있다. 특히 다수 표적이 서로 다른 방위각 및 고각에서 접근하는 환경에서는, 특정 영역이 먼저 탐색되는지 또는 후순위로 탐색되는지에 따라 개별 표적의 최초 탐지 시점이 달라진다. 이러한 특성을 정량적으로 분석하기 위하여 본 연구에서는 탐색 순서를 명확하게 정의하고, 동일한 탐색 경로를 유지하되 시작 위치만을 변경하는 방식으로 네 가지 탐색 운용을 구성하였다.

탐색 구역은 방위각과 고각 방향으로 분할된 2차원 격자 형태로 구성되며, 각 격자 셀은 하나의 빔에 대응된다. 레이더는 각 시간 스텝마다 하나의 빔을 선택하여 순차적으로 조사하며, 모든 빔을 한 번씩 조사하면 하나의 탐색 주기가 완료된다. 이후 동일한 순서를 반복함으로써 지속적인 감시가 이루어진다. 이때 탐색 순서는 격자의 순회 방식에 의해 정의되며, 본 연구에서는 raster scan 기반의 순차 탐색 방식을 적용하였다.

Raster scan 방식은 한 방향으로 연속적인 빔 조사를 수행한 후, 다음 행 또는 열로 이동하여 동일한 과정을 반복하는 구조를 가지며, 실제 레이더의 기계적 또는 전자적 스캔 방식과 유사한 특성을 갖는다. 본 연구에서는 방위각 방향을 수평 축, 고각 방향을 수직 축으로 정의하고, 각 축의 증가 또는 감소 방향을 조합하여 총 네 가지 탐색 순서를 구성하였다.

첫 번째 탐색 순서는 방위각이 작은 영역에서 큰 영역으로 진행하면서, 각 방위각 위치에서 고각이 낮은 영역부터 높은 영역으로 순차적으로 조사하는 방식이다. 이 경우 탐색은 좌측 하단 영역에서 시작하여 우측 상단 방향으로 진행되는 경로를 가진다. 두 번째 탐색 순서는 방위각은 동일하게 좌측에서 우측으로 진행하되, 각 방위각 위치에서 고각이 높은 영역부터 낮은 영역으로 조사하는 방식으로, 좌측 상단에서 시작하여 우측 하단으로 진행되는 경로를 가진다. 세 번째 탐색 순서는 방위각이 큰 영역에서 작은 영역으로 진행하면서, 각 방위각 위치에서 고각이 낮은 영역부터 높은 영역으로 조사하는 방식으로, 우측 하단에서 시작하여 좌측 상단으로 진행된다. 네 번째 탐색 순서는 방위각이 큰 영역에서 작은 영역으로 진행하고, 각

방위각 위치에서 고각이 높은 영역부터 낮은 영역으로 조사하는 방식으로, 우측 상단에서 시작하여 좌측 하단으로 진행된다.

이와 같이 정의된 네 가지 탐색 순서는 동일한 빔 집합과 동일한 탐색 경로를 공유하며, 단지 탐색이 시작되는 위치와 진행 방향만이 서로 다르다. 따라서 특정 표적이 탐색 구역 내에 존재할 경우, 해당 표적이 포함된 빔이 탐색 순서 상에서 어느 위치에 배치되는지에 따라 탐지 시점이 결정된다. 즉, 탐색 순서는 공간적으로 동일한 영역을 커버하지만 시간 축 상에서 각 영역이 관측되는 순서를 변화시키는 역할을 한다.

각 탐색 순서에 대해 표적의 최초 탐지 시점은 표적이 탐색 구역 내로 진입한 이후, 해당 표적이 포함된 빔이 처음으로 조사되는 시간으로 정의된다. 이를 수식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$T_{\text{det},i} = T_{\text{enter},i} + k_i \Delta t \quad (2)$$

식 (2)에서 $T_{\text{enter},i}$ 는 i 번째 표적이 최대 탐지 거리 이내로 진입한 시간(sec)이며, k_i 는 표적이 포함된 빔이 탐색 순서에서 위치한 인덱스를 의미한다.

식 (2)에서 k_i 는 탐색 순서에 의해 결정되는 값으로, 동일한 표적이라 하더라도 탐색 순서가 달라지면 서로 다른 값을 가지게 된다. 따라서 탐색 순서는 탐지 지연시간을 결정하는 직접적인 변수로 작용하며, 본 연구에서는 이 k_i 의 분포가 탐색 순서에 따라 어떻게 달라지는지를 분석 대상으로 설정하였다.

또한 하나의 탐색 주기 내에서 모든 빔이 한 번씩 조사되므로, 탐색 순서에 따른 최대 지연시간은 식 (3)과 같이 정의된다.

$$T_{\text{cycle}} = N_{\text{beam}} \Delta t \quad (3)$$

여기서, N_{beam} : 전체 빔 개수.

식 (3)은 특정 표적이 최악의 경우 하나의 탐색 주기 전체를 기다린 후에 탐지될 수 있음을 의미하며, 탐색 순서는 이 지연이 발생하는 위치를 공간적으로 이동시키는 역할을 한다.

결과적으로 본 연구에서 정의한 탐색 순서 모델은 동일한 탐색 자원 조건 하에서 시간 축 상의 관측 순

서만을 변화시키는 구조를 가지며, 이를 통해 탐색 시작 위치 및 진행 방향이 최초 탐지 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있다.

2.3 표적 생성 및 운동 모델

탐색 순서에 따른 탐지 성능 차이를 분석하기 위해서는 표적의 공간적 분포와 시간에 따른 위치 변화를 모델링할 필요가 있다. 본 연구에서는 특정 방향이나 고도에 편향되지 않은 일반적인 운용 환경을 가정하기 위하여, 표적이 탐색 구역 내에서 균일한 확률로 생성되는 무작위 분포 모델을 적용하였다. 이를 통해 탐색 순서 자체의 영향만을 분리하여 분석할 수 있도록 하였다.

표적은 레이더로부터 최대 탐지 거리 바깥 영역에서 생성되며, 이후 일정한 속도로 레이더 방향으로 직선 운동하는 것으로 가정한다. 생성 시점에서 각 표적은 서로 다른 방위각과 고각을 가지며, 이 값은 정의된 탐색 구역 범위 내에서 균일 분포로 샘플링된다. 따라서 표적은 탐색 구역 전체에 걸쳐 고르게 분포된 상태로 접근하게 되며, 특정 방향에 대한 사전 정보가 없는 상황을 반영한다.

표적의 초기 위치는 방위각과 고각 방향에 따른 단위 벡터와 초기 거리 값을 기반으로 정의되며, 시간에 따라 식 (4)와 같이 갱신된다.

$$R_i(t) = R_{\text{st},i} - v_i t \quad (4)$$

여기서, $R_{\text{st},i}$: i 번째 표적의 초기 거리(m),

v_i : i 번째 표적의 접근 속도(m/s),

t : 시간(s).

식 (4)는 표적이 레이더를 향해 일정한 속도로 접근하는 1차원 거리 변화를 나타내며, 본 연구에서는 표적의 방위각 및 고각 방향은 시간에 따라 변하지 않는 것으로 가정하였다. 이는 표적이 레이더를 향해 직선 경로로 접근하는 상황을 단순화하여 표현한 것으로, 탐색 순서 분석에 필요한 최소한의 운동 특성을 반영한 모델이다.

표적의 탐색 구역 진입 시점은 표적의 거리가 최대 탐지 거리 이하로 감소하는 시점으로 정의되며, 이는

식 (5)와 같이 표현된다.

$$T_{enter,i} = \frac{R_{st,i} - R_{max}}{v_i} \quad (5)$$

식 (5)는 표적이 최대 탐지 거리 외곽에서 생성된 이후, 일정 시간이 경과하면 탐색 가능 영역 내로 진입하게 됨을 의미한다. 본 연구에서는 이 시점을 기준으로 탐지 지연시간을 정의하며, 탐색 순서에 따라 동일한 표적이라도 실제 탐지 시점이 달라질 수 있다.

각 시간 스텝에서 표적의 위치는 앞서 정의한 빔 조사 시간 간격 Δt 를 기준으로 이산적으로 갱신되며, 해당 시점에서 표적이 포함되는 방위각 및 고각 범위에 따라 특정 빔에 할당된다. 이때 표적이 포함된 빔이 레이더의 현재 탐색 대상 빔과 일치할 경우 탐지된 것으로 판단한다. 탐지는 확률적 과정이 아닌 결정론적 포함 여부로 정의되며, 이는 탐색 순서에 따른 시간 지연 특성을 명확히 분석하기 위한 목적이다.

또한 본 연구에서는 다표적 환경을 고려하여 하나의 시나리오에서 복수의 표적이 동시에 존재하도록 구성하였다. 각 표적은 서로 독립적으로 생성되며, 초기 거리, 방위각, 고각 및 속도 또한 독립적으로 샘플링된다. 이를 통해 특정 표적의 위치에 의해 결과가 편향되는 것을 방지하고, 다양한 공간적 배치에 대한 평균적인 성능을 평가할 수 있도록 하였다.

이와 같이 구성된 표적 생성 및 운동 모델은 탐색 순서에 따른 최초 탐지 시간의 변화를 시간 축에서 직접적으로 반영할 수 있으며, 이후 절에서 정의하는 성능 지표를 통해 각 탐색 순서의 통계적 특성을 정량적으로 비교할 수 있다.

2.4 성능 지표 정의

본 연구에서는 탐색 순서에 따른 성능 차이를 정량적으로 평가하기 위하여, 표적이 탐색 구역에 진입한 이후 실제로 탐지되기까지 소요되는 시간 지연을 기반으로 성능 지표를 정의하였다. 이러한 지표는 탐색 순서에 의해 직접적으로 영향을 받는 변수이며, 동일한 탐색 자원 조건 하에서 순서 변화의 효과를 비교하는 데 적합하다.

표적 i 에 대한 탐지 지연시간은 표적이 최대 탐지 거리 이내로 진입한 시점과 실제 탐지 시점의 차이로

정의되며, 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\Delta T_i = T_{det,i} - T_{enter,i} \quad (6)$$

이 지표는 특정 표적이 탐색 순서 상에서 얼마나 늦게 관측되었는지를 직접적으로 나타내며, 탐색 순서의 시간적 효율성을 평가하는 기본 척도로 사용된다.

다표적 환경에서 전체 성능을 평가하기 위하여, 개별 표적의 탐지 지연시간을 기반으로 평균 및 분산 지표를 정의하였다. 평균 탐지 지연시간은 모든 표적에 대한 지연시간의 산술 평균으로 정의되며, 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\Delta T_{mean} = \frac{1}{N_{tgt}} \sum_{i=1}^{N_{tgt}} \Delta T_i \quad (7)$$

여기서, N_{tgt} : 표적 수.

평균 탐지 지연시간은 전체 표적에 대한 전반적인 탐색 성능을 나타내며, 탐색 순서에 따른 평균적인 효율성을 비교하는 데 사용된다. 그러나 평균값만으로는 일부 표적이 매우 늦게 탐지되는 상황을 충분히 반영하기 어렵기 때문에, 지연시간의 분산 특성 또한 함께 고려할 필요가 있다. 이를 위해 탐지 지연시간의 표준편차를 식 (8)과 같이 정의하였다.

$$\sigma_{\Delta T} = \sqrt{\frac{1}{N_{tgt}} \sum_{i=1}^{N_{tgt}} (\Delta T_i - \Delta T_{mean})^2} \quad (8)$$

표준편차는 탐지 지연시간의 분포 폭을 나타내며, 특정 탐색 순서가 일부 표적에 대해 극단적으로 불리한 결과를 초래하는지를 판단하는 지표로 활용된다. 또한 최악의 탐지 성능을 평가하기 위하여, 모든 표적 중 가장 큰 지연시간을 식 (9)와 같이 정의하였다.

$$\Delta T_{max} = \max_i(\Delta T_i) \quad (9)$$

이 지표는 특정 표적이 탐색 순서로 인해 얼마나 오래 탐지되지 않을 수 있는지를 나타내며, 운용 관점에서 worst-case 성능을 평가하는 데 중요한 의미를 가진다.

본 연구에서는 단일 시나리오 분석과 Monte Carlo

반복 시뮬레이션을 통해 위 세 가지 지표를 산출하고, 탐색 순서에 따른 평균 성능, 분포 특성 및 최악 성능을 종합적으로 비교하였다. 특히 Monte Carlo 분석에서는 반복 수행을 통해 얻어진 평균 탐지 지연시간의 분포를 기반으로, 탐색 순서 간 성능 차이가 통계적으로 유의한지 여부를 함께 분석하였다.

3. 시뮬레이션 및 결과분석

본 장에서는 2장에서 정의한 레이더 탐색 모델, 탐색 순서, 표적 생성 및 성능 지표를 기반으로 시뮬레이션을 수행하고, 탐색 순서에 따른 탐지 성능 차이를 분석한다. 분석은 단일 시나리오 기반의 직관적 비교와 Monte Carlo 반복 시뮬레이션 기반의 통계적 비교로 구분하여 수행하였으며, 이를 통해 특정 상황에서의 특성과 평균적인 환경에서의 경향을 동시에 평가하였다.

특히 단일 시나리오 분석을 통해 탐색 순서가 개별 표적 탐지 시점에 미치는 영향을 직관적으로 확인하고, Monte Carlo 분석을 통해 다양한 표적 배치에 대한 평균 성능 및 분포 특성을 도출하였다. 이를 기반으로 탐색 순서 변화가 실제 운용 환경에서 유의미한 성능 차이로 이어지는지를 종합적으로 평가하였다.

3.1 시나리오 구성

본 연구에서 사용한 시나리오는 레이더 탐색 구역 내에서 다수 표적이 서로 다른 방위각 및 고각 방향에서 접근하는 상황을 가정하여 구성하였다. 레이더는 원점에 위치하며, 전방 탐색 구역은 방위각 -45° 에서 $+45^\circ$, 고각 5° 에서 30° 범위로 설정하였다. 표적은 해당 탐색 구역 내 임의의 방향에서 최대 탐지 거리 외곽에서 생성되어 레이더 방향으로 접근하는 것으로 모델링하였다.

단일 시나리오 분석에서는 탐색 순서에 따른 차이를 직관적으로 확인하기 위하여 일정 개수의 표적을 고정된 개수로 생성하고, 각 표적의 위치를 서로 다른 방위각 및 고각에 분산되도록 배치하였다. 각 표적은 동일한 속도로 레이더 방향으로 접근하며, 탐색 순서에 따라 최초 탐지 시점이 어떻게 달라지는지를 비교하였다. 이와 같은 구성은 특정 탐색 순서가 어떤 공간 영역에 대해 유리하거나 불리하게 작용하는지를

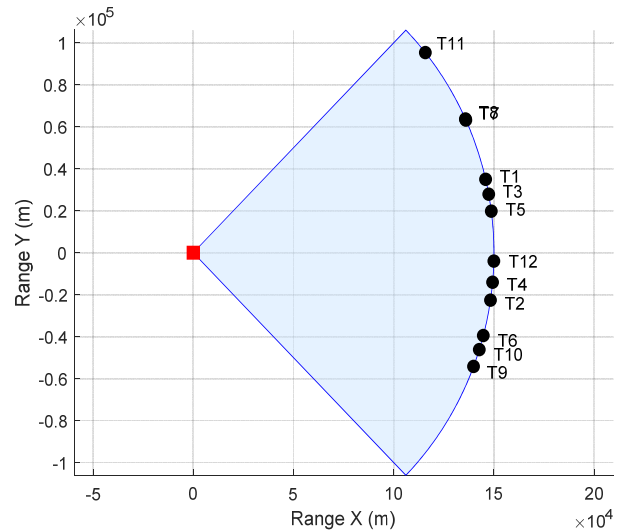


Fig. 1. Radar scanning sector and target distribution in a representative scenario

Table 1. Simulation parameters

Parameters	Value	Unit
Radar search azimuth coverage	$-45^\circ \sim +45^\circ$	deg
Radar search elevation coverage	$+5^\circ \sim +30^\circ$	deg
Radar maximum detection range	150	km
Number of targets	12	-
Target speed	constant	m/s
Monte carlo runs	30000	-

시각적으로 확인할 수 있도록 한다.

Fig. 1은 단일 시나리오에서의 레이더 탐색 구역과 표적 배치를 나타낸다. 그림에서 레이더는 원점에 위치하며, 부채꼴 형태로 표현된 영역이 탐색 구역을 의미한다. 해당 영역은 최대 탐지 거리까지 확장되며, 방위각 및 고각 범위에 따라 제한된다. 표적은 탐색 구역 내 다양한 위치에 분포하며, 각 표적은 T_0 부터 T_{12} 까지의 식별자로 표시된다. 이와 같은 배치는 특정 방향에 편향되지 않은 일반적인 접근 상황을 표현하며, 탐색 순서에 따라 표적별 탐지 시점이 달라질 수 있는 조건을 제공한다.

Monte Carlo 시뮬레이션에서는 단일 시나리오의 한계를 보완하기 위하여, 표적의 방위각, 고각, 초기 거리 및 생성 시점을 반복적으로 무작위 샘플링하였다. 각 반복에서 생성된 표적 집합에 대해 동일한 탐색 순서를 적용하고, 성능 지표를 계산한 후 통계적으로 평균 및 분포를 분석하였다. 이를 통해 특정 시나리오에 의존하지 않는 일반적인 성능 경향을 도출할

수 있도록 하였다.

Table 1은 시뮬레이션에 사용된 주요 파라미터를 정리한 것이다. 모든 탐색 순서에 대해 동일한 조건을 적용함으로써, 탐색 순서 변화에 따른 성능 차이를 공정하게 비교할 수 있도록 하였다. 특히 표적의 공간 분포를 균일하게 설정함으로써 특정 방향에 대한 편향을 제거하고, 탐색 순서 자체의 영향을 독립적으로 분석할 수 있도록 하였다.

이와 같이 구성된 시나리오는 이후 절에서 제시되는 탐색 순서별 탐지 성능 비교 결과의 기반이 되며, 단일 시나리오 분석과 Monte Carlo 분석 결과를 통해 탐색 순서의 영향 특성을 종합적으로 해석한다.

3.2 분석 결과

탐색 순서에 따른 성능 차이를 분석하기 위하여, 먼저 단일 시나리오 기반 결과를 통해 탐색 순서가 개별 표적 탐지 시점에 미치는 영향을 확인하고, 이후 Monte Carlo 기반 통계 분석을 통해 평균적인 성능 특성을 도출하였다. 이를 통해 특정 공간 배치에서 나타나는 현상과 일반적인 운용 환경에서의 경향을 구분하여 해석하였다.

Fig. 2는 동일한 표적 배치에 대해 네 가지 탐색 순서를 적용했을 때 각 표적의 탐지 지연시간을 나타낸 것이다. 막대의 길이는 표적이 탐색 구역에 진입한 이후 실제로 탐지되기까지 소요된 시간을 의미하며, 값이 클수록 탐색 순서상에서 해당 표적이 늦게 관측되었음을 의미한다.

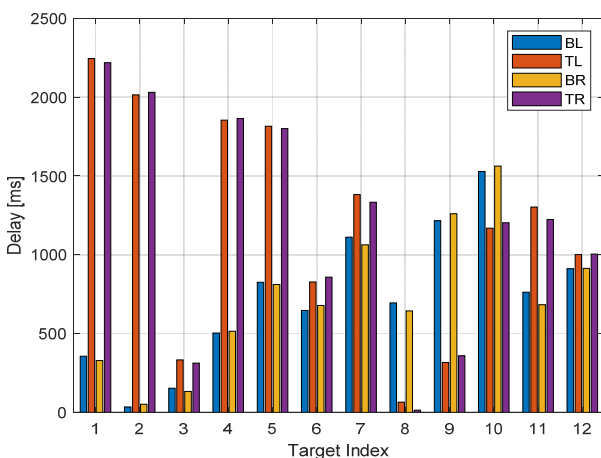


Fig. 2. Detection delay per target for different scan orders in a representative scenario

결과를 보면 특정 탐색 순서에서는 일부 표적이 매우 빠르게 탐지되는 반면, 다른 표적은 상대적으로 늦게 탐지되는 경향이 나타난다. 이는 탐색이 시작되는 위치와 표적이 위치한 공간적 위치 간의 관계에 의해 발생하는 현상이다. 예를 들어 탐색이 좌하단에서 시작되는 경우, 해당 영역에 위치한 표적은 탐색 초기 단계에서 관측되므로 탐지 지연이 작게 나타나지만, 반대편 영역에 위치한 표적은 하나의 탐색 주기 후반부에서 관측되므로 상대적으로 큰 지연이 발생한다.

이와 같은 결과는 탐색 순서가 개별 표적 수준에서는 명확한 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 그러나 이러한 차이는 특정 시나리오의 공간 배치에 강하게 의존하기 때문에, 일반적인 운용 환경에서도 동일한 경향이 유지되는지는 추가적인 검증이 필요하다.

이에 따라 Monte Carlo 기반 반복 시뮬레이션을 수행하여 다양한 표적 배치에 대한 평균 탐지 성능을 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 3와 같다.

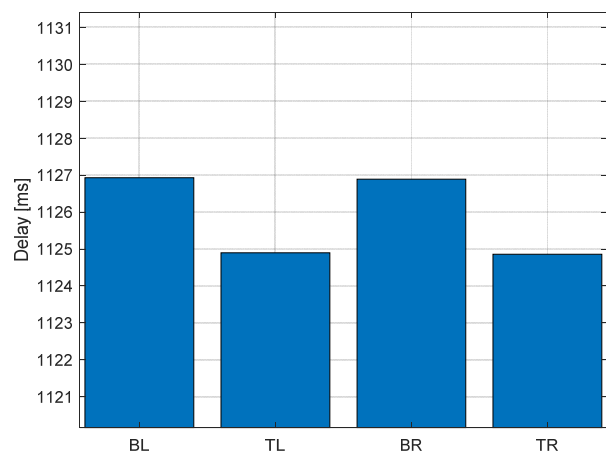


Fig. 3. Mean detection delay for different scan orders (Monte Carlo simulation)

Fig. 3는 다수의 무작위 시나리오에 대해 각 탐색 순서의 평균 탐지 지연시간을 비교한 결과를 나타낸다. 단일 시나리오에서는 탐색 순서에 따라 표적별 탐지 지연시간이 달라지는 경향이 확인되었으나, Monte Carlo 기반 평균 결과에서는 탐색 순서가 두 개의 그룹으로 구분되는 특징이 나타났다.

구체적으로 좌하단 및 우하단에서 탐색을 시작하는 경우와 좌상단 및 우상단에서 시작하는 경우가 각각 유사한 성능을 보였으며, 상단에서 시작하는 탐색 순서가 하단에서 시작하는 경우에 비해 평균 탐지 지연시간이 작게 나타났다. 반면 좌측과 우측 시작 간의

차이는 평균적으로 거의 나타나지 않았으며, 이는 반복 횟수가 증가할수록 더욱 명확하게 확인되었다.

이러한 결과는 탐색 순서의 영향이 방위 방향보다는 고각 방향에 의해 지배됨을 의미한다. 본 연구에서 설정한 탐색 구역은 고각 5°에서 30° 범위로 정의되며, 표적은 해당 범위 내에서 균일하게 생성된다. 이 경우 고각 분포는 물리적으로 상단 영역으로 확장된 구조를 가지며, 탐색 구역 내 실제 표적은 상대적으로 높은 고각 영역에 더 넓게 분포하게 된다.

따라서 상단에서 탐색을 시작하는 경우, 표적이 존재하는 영역을 탐색 초기 단계에서 관측할 수 있어 평균 탐지 지연이 감소하게 된다. 반면 하단에서 탐색을 시작하는 경우, 표적이 상대적으로 적은 영역을 먼저 조사한 후 상단 영역으로 이동하게 되므로, 다수 표적이 탐색 주기 후반부에 탐지되는 구조가 형성된다. 이로 인해 평균 탐지 지연시간이 증가하는 경향이 나타난다.

한편 방위각 방향은 탐색 구역이 대칭 구조를 가지며, 표적 또한 좌우 방향에 대해 균일하게 분포하므로 탐색 시작 위치에 따른 차이는 반복 수행 시 상쇄된다. 그 결과 좌측 시작과 우측 시작 간의 성능 차이는 평균적으로 유의미하게 나타나지 않으며, 탐색 순서는 고각 방향에 따라 두 개의 성능 그룹으로 수렴하는 특성을 보인다.

이러한 결과는 탐색 순서의 효과가 존재하더라도 그 영향은 공간적 표적 분포 특성에 의해 결정된다는 점을 보여준다. 특히 표적 분포에 대한 사전 정보가 없는 일반적인 운용 환경에서는, 단순히 좌우 방향의 탐색 순서를 변경하는 것만으로는 평균적인 성능 개선을 기대하기 어렵으며, 탐색 시작 고각과 같은 구조적 요소가 상대적으로 더 중요한 영향을 미치는 것으로 해석된다.

Fig. 3의 결과를 보다 정량적으로 비교하기 위하여, 각 탐색 순서에 대한 평균 탐지 지연시간과 표준편차 및 최대 지연시간을 Table 2에 정리하였다.

Table 2에서 확인할 수 있듯이, 탐색 순서는 고각 방향에 따라 두 개의 그룹으로 구분되는 경향을 보인다. 좌하단 및 우하단에서 시작하는 경우는 유사한 성능을 나타내며, 좌상단 및 우상단에서 시작하는 경우 역시 유사한 성능을 보인다. 또한 상단 시작 그룹이 하단 시작 그룹에 비해 평균 탐지 지연시간이 작게 나타나, 탐색 시작 고각이 성능에 지배적인 영향을 미치

Table 2. Summary of detection delay performance for different scan orders

Scan order	Mean delay [ms]	Std [ms]	Max Delay [ms]
BL	1126.9284	187.7854	2078.2364
BR	1126.8884	187.4845	2078.0522
TL	1124.8976	187.4845	2077.6153
TR	1124.8577	187.3795	2076.9421

는 것을 확인할 수 있다.

한편 표준편차는 평균 차이와 유사하거나 더 큰 수준으로 나타나, 탐색 순서 간 차이가 시나리오 간 변동성에 비해 제한적임을 보여준다. 이는 단순한 탐색 순서 변경만으로는 일관된 성능 향상을 확보하기 어렵다는 결과와 일치한다.

4. 결론

본 연구에서는 레이더의 순차 탐색 운용에서 빔 조사 순서가 다표적 탐지 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 동일한 탐색 영역과 시간 자원 조건 하에서 탐색 시작 위치 및 진행 방향만을 변화시키는 네 가지 탐색 순서를 정의하고, 단일 시나리오 및 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 탐지 지연시간 기반 성능을 비교하였다.

단일 시나리오 분석 결과에서는 탐색 순서에 따라 개별 표적의 탐지 지연시간이 유의하게 달라지는 현상이 확인되었으며, 이는 탐색 시작 위치와 표적의 공간적 분포 간의 관계에 의해 특정 영역이 조기에 또는 지연되어 관측되기 때문으로 해석된다. 이러한 결과는 탐색 순서가 개별 상황에서는 초기 탐지 성능에 직접적인 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

그러나 Monte Carlo 기반 반복 시뮬레이션 결과에서는 탐색 순서 간 성능 차이가 단순한 우열 관계로 나타나기보다는, 고각 방향에 따라 두 개의 그룹으로 구분되는 경향이 확인되었다. 구체적으로 상단에서 탐색을 시작하는 경우와 하단에서 시작하는 경우 간에 평균 탐지 지연시간의 차이가 존재하였으며, 반면 좌우 방향에 따른 차이는 반복 수행 시 평균적으로 상쇄되는 것으로 나타났다. 이는 방위각 방향이 대칭적인 분포를 가지는 반면, 고각 방향은 탐색 구역 구조상 상단 영역에 표적이 더 넓게 분포하는 특성을 가지기 때문으로 해석된다.

또한 탐색 순서 간 평균 탐지 지연시간 차이는 수 ms 수준으로 나타났으며, 표준편차 또한 유사한 수준으로 나타나 탐색 순서에 따른 성능 차이가 시나리오 간 변동성에 비해 제한적임을 확인하였다. 이는 단순히 순차 탐색의 시작 위치를 변경하는 방식만으로는 일반적인 운용 환경에서 일관된 성능 향상을 확보하기 어렵다는 점을 의미한다.

종합하면, 탐색 순서의 영향은 존재하나 그 효과는 표적의 공간적 분포 특성에 의해 결정되며, 특히 고각 방향 분포가 탐지 성능을 지배하는 주요 요인으로 작용함을 확인하였다. 따라서 표적 접근 방향 및 고도에 대한 사전 정보가 없는 환경에서는 단순한 순차 탐색 순서 변경만으로는 실질적인 성능 개선을 기대하기 어렵다.

향후 연구에서는 표적 분포의 비균일성, 위협 우선도, 외부 cue 정보 등을 반영한 적응형 탐색 전략을 도입함으로써, 다양한 운용 환경에서의 성능 향상 가능성을 검증할 필요가 있다. 또한 다기능 레이더 환경에서 자원 관리 요소와 결합된 탐색 전략을 함께 고려하는 방향으로 연구를 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Y. H. Lee, 'Radar's Role and Development Prospects,' The Proceedings of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, VOL. 8, NO. 1, 1997, pp. 2-28.
- [2] M. Skolnik, 'Radar in the Twentieth Century,' IEEE Aero-Space and Electronic Systems Magazine, VOL. 15, NO. 10, 2000, pp. 27-46.
- [3] In-Sung Jeon, H. S. Yoo, & Sung Taek Jung, 'Performance Analysis and Improvement of TWTA for Surveillance Radar Using Modeling & Simulation,' Journal of KIIT, VOL. 14, NO. 4, 2016, pp. 25-35.
- [4] 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.
- [5] Merrill I. Skolnik, Radar Handbook (3rd ed.), McGraw-Hill, 2008.