

# 재밍 환경에서 전자전 수신기를 이용한 다중 표적 추적 기법 연구

## Multi-Target Tracking Using Electronic Warfare Receiver in Jamming Operating Environment

김 민 · 최인오 · 이원진\* · 김종덕\* · 김두환\* · 김경태\*\*

Min Kim · In-O Choi · Won-Jin Lee\* · Jong-Deog Kim\* · Doohwan Kim\* · Kyung-Tae Kim\*\*

### 요 약

아군의 입장에서 재밍(jamming)을 통해 항공기 및 미사일과 같은 다수의 위협표적들에 탑재된 레이더들을 방해 및 기만하기 위해서는, 재밍 운용환경에 따른 위협표적 추적의 고유 특성들을 고려한 추적 알고리즘이 반드시 필요하다. 이를 위하여, 본 논문에서는, 재밍 운용환경에서 다수의 위협 표적들에 대한 새로운 추적 알고리즘을 제시한다. 이때, 제안된 알고리즘은 크게 IMM(Interactive Multiple Model) 필터, JPDA(Joint Probabilistic Data Association) 필터를 사용한 방위각 및 고각 추적 단계와 재밍 수행 구간에 따른 추적 불가능 문제를 해결하기 위한 잡음 공분산 적응 조정 단계로 구성된다. 시뮬레이션은 재밍 운용환경에 나타나는 위협표적들의 특성을 고려하여 모델링된 시뮬레이터를 통해 수행되었으며, 실험 결과를 통해 제안된 추적 알고리즘의 성능 및 연구의 타당성을 검증하였다.

### Abstract

A tracking algorithm considering the characteristics of threat target tracking in a jamming operating environment is required to interfere and deceive the onboard radars of multiple threat targets(e.g., aircraft and missiles) during the jamming of army communications. This paper proposes a new algorithm for tracking multiple threat targets in a jamming operating environment. The proposed algorithm consists of two stages: 1) tracking of azimuth direction and elevation using an interactive multiple model and a joint probabilistic data association filter; and 2) adaptive adjustment of the noise covariance to solve the untraceable scenario problem for the threat targets. The performance of the proposed tracking algorithm is validated by the results obtained by modeling the simulator considering the threat target characteristics in a jamming operating environment.

Key words: Tracking, IMM Filter, JPDA Filter, Jamming

### I. 서 론

전시 상황에서 아군은 최신 항공기 및 미사일 등 다중

위협표적의 레이더로부터 아군의 위치가 탐지되지 않거나, 부정확한 위치 정보가 추출되도록 재밍(jamming)과 같은 전자 공격(Electronic Attack: EA)을 수행한다<sup>[1]</sup>. EA

「이 연구는 LIG 넥스원 연구비의 지원으로 연구되었음.」

포항공과대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Pohang University of Science and Technology)

\*LIG넥스원(LIG Nex1)

\*\*포항공과대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Pohang University of Science and Technology)

· Manuscript received December 9, 2019 ; Revised January 6, 2020 ; Accepted February 24, 2020. (ID No. 20191209-131)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

기법 운용 시 일반적으로 아군은 아군의 위치를 숨기기 위하여, 송/수신이 가능한 레이더가 아닌 수신만 가능한 전자전 수신기를 이용한다. 특히, EA 운용 환경에서 전자전 수신기만을 이용하여 추적을 수행하는 것은 기존 레이더를 이용하여 추적을 수행하는 것보다 더 어렵다. 따라서, 전자전 수신기를 이용하여 적군의 레이더를 추적한 후, 해당 방향으로 EA 기법을 운용하는 효과적인 EA 운용 시나리오에 대한 연구는 매우 중요하다. 하지만 많은 연구들은 EA 기법 자체에 대하여 수행하였다<sup>[2][3]</sup>. 본 연구에서는 효과적인 EA 운용 시나리오 설계를 위한 EA 운용 환경에서 동작할 수 있는 새로운 위협 표적 추적 알고리즘을 제시한다.

EA 기법들의 효과적인 제밍 운용 시나리오를 설계하기 위해서, 전자전 수신기를 이용하여 수신 레이더 신호 분석 및 방위 정보 예측이 반드시 선행되어야 한다. 이때, 전자전 수신기를 이용한 위협 표적의 방위 정보 예측은 제밍 기법 운용 환경에서 위협 표적 추적을 통하여 수행되며, 다음과 같은 특성을 갖는다.

**특성 1.** 수신기만을 이용한 표적 추적 특성상 위협 표적의 송신신호가 전자전 수신기에 수신되어야 표적 탐지가 가능하다. 따라서 추적을 위해 위협 표적의 송신 빔 내에 전자전 수신기가, 전자전 수신기의 수신 빔 내에 위협 표적이 동시에 위치하여야 한다.

**특성 2.** 위협 표적 추적은 전자전 수신기에 수신된 위협 표적의 레이더 신호를 이용하여 수행되므로, 기존 거리(range) 및 방위각(azimuth angle), 고각(elevation angle) 정보를 이용한 3차원 추적이 아닌 방위각 및 고각 정보만을 이용하여 수행된다.

**특성 3.** 추적 중 EA 수행 구간이 존재하며, 해당 구간에서 제밍 신호가 전자전 수신기에 간섭하므로 위협 표적의 방위 정보 측정이 불가능하다. 따라서 추적 중 EA 수행 구간에서는 이전 추적 정보만을 이용하여 위협 표적 추적이 수행된다.

본 논문에서는 상기 특성의 추적 환경에서 다중 위협 표적 추적 알고리즘을 제안한다. 기존 특성 2만 만족하는

각도 추적 기법<sup>[4]~[6]</sup>과 비교하여 본 논문에서는 1) 특성 1을 고려한 시뮬레이터 모델링, 2) 특성 2 및 3을 고려한 방위 추적 알고리즘을 제안한다.

시뮬레이터는 위협 표적 레이더 신호 모델링 및 송신 빔 형성, 전자전 장비 수신 빔 형성, 스펙트럼 추정 기법 및 OS-CFAR(ordered statistic constant false alarm rate)을 이용한 도래각(Direction Of Arrival: DOA) 추정 기법, 새로운 추적 알고리즘 설계를 통하여 모델링되었다.

## II. 본 론

### 2-1 특성 1을 고려한 수신 시뮬레이터 모델링

전자전 수신기를 이용한 다중 위협 표적 추적 알고리즘은 그림 1과 같다. 먼저 전자전 수신기가 레스터 주사(raster scan)를 진행하는 도중 특성 1에 해당되는 경우 표적이 탐지되며,  $N_d$ 회 이상 탐지된 방위 정보는 위협 표적으로 간주하여 해당 표적을 지속적으로 추적한다. 추적의 횟수가  $N_j$ 회 누적되면 추적 중 EA 기법을 일정시간 수행하며, 이 구간에서는 미리 추정된 방위정보만을 이용하여 위협 표적의 방위 추적이 수행된다(특성 3). 표적의 방위 추적은 위협 표적이 기만되는 시점, 즉 위협 표적의 레이더 신호가 전자전 수신기에 수신되지 않는 시점까지 반복된다.

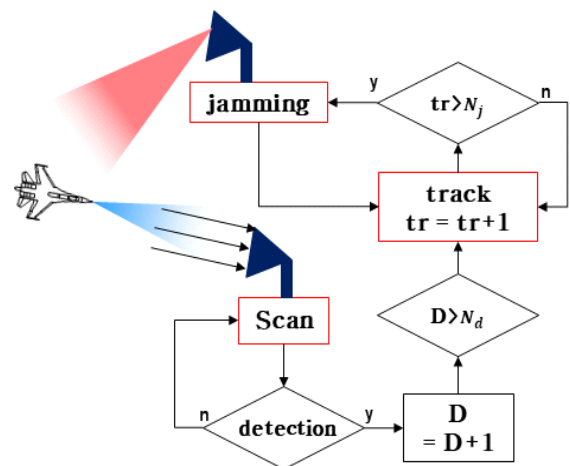


그림 1. 전자전 수신기를 이용한 표적 추적 알고리즘  
Fig. 1. Tracking algorithm using electronic warfare.

### 2-1-1 위협표적 레이더 신호 모델링

위협 표적의 레이더 신호는 펄스 압축 과정을 통하여 뛰어난 거리 분해능 및 보다 우수한 SNR(Signal to Noise Ratio)을 보장하는 선형 주파수 변조(Linear Frequency Modulation, LFM) 파형<sup>[7]</sup>으로 가정하였으며, 다음과 같이 나타낸다.

$$s(t) = A_0 \exp \left\{ j2\pi \left[ (f_0 - BW/2)t + \frac{K}{2}t^2 \right] \right\} \quad (1)$$

여기서  $A_0$ 는 송신 레이더 신호의 진폭을 나타내며,  $f_0$ 는 중심주파수,  $BW$ 는 대역폭,  $K$ 는 주파수 변조 비를 나타낸다.

### 2-1-2 디지털 빔 형성

시뮬레이터에서 사용된 위협 표적 및 전자전 수신기의 안테나는 평면 배열 안테나로 가정하였다<sup>[8]</sup>. 시뮬레이터에서 위협 표적 및 전자전 수신기의 안테나 소자들은 수직 및 수평축에 대해 각각  $4 \times 4$ ,  $8 \times 16$ 으로 배치하였으며, 생성된 송, 수신빔은 그림 2와 같다. 위협 표적 레이더의 방위각 및 고각 방향 3 dB 송신빔 폭은 약  $26^\circ$  및  $26^\circ$ 이며, 전자전 수신기의 방위각 및 고각방향 3 dB 수신빔 폭은 약  $3^\circ$  및  $13^\circ$ 이다.

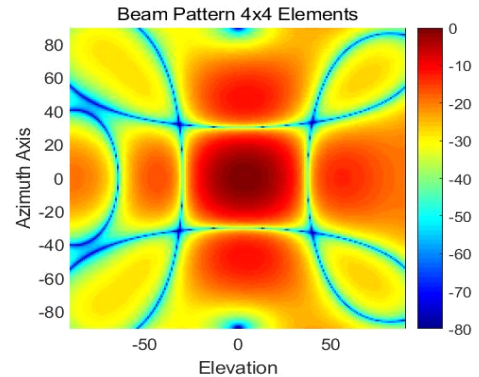
### 2-1-3 방위(각도) 탐지

$N$ 개의 다중 위협 표적의 송신 신호들을  $M$ 개의 소자로 구성된 1차원 배열 안테나로 수신하였을 경우 탐지 신호는 다음과 같이 모델링할 수 있다.

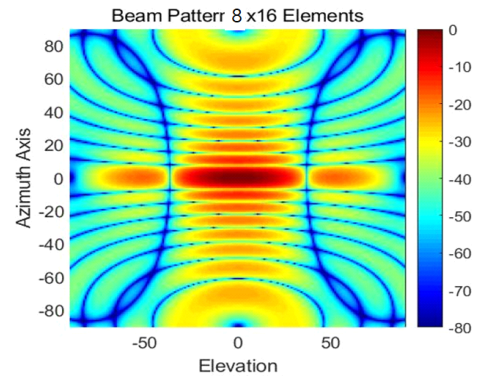
$$\hat{x} = \underline{A}(\hat{\theta}) \hat{s} + \hat{v} \quad (2)$$

여기서  $\hat{x} = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$ ,  $\hat{s} = [s_1, s_2, \dots, s_N]^T$ ,  $\hat{v}$ 는 1차원 배열 안테나 신호 벡터, 위협 표적의 레이더 신호 벡터, 안테나 잡음 신호 벡터를 나타낸다. 또한,  $\hat{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T$ 는 표적의 방향 벡터,  $\underline{A}(\hat{\theta}) = [\hat{a}(\theta_1), \hat{a}(\theta_2), \dots, \hat{a}(\theta_N)]$ 는 배열 방향 행렬(array direction matrix)을 나타낸다.  $\underline{A}(\hat{\theta})$ 의  $n$ 번째 열벡터  $\hat{a}(\theta_n)$ 는  $n$ 번째 표적의 방향 벡터를 나타내며, 다음과 같다.

$$\hat{a}(\theta_n) = [1, \exp(j\alpha_n), \dots, \exp(j(N-1)\alpha_n)]^T \quad (3)$$



(a) 위협 표적 레이더 송신빔  
(a) Tx beam pattern of threat target



(b) 전자전 수신기의 수신빔  
(b) Rx beam pattern of EA receiver generated

그림 2. 평면 배열 안테나를 이용하여 생성된 위협 표적의 송신빔 및 전자전 수신기의 수신빔  
Fig. 2. Tx beam of threat target and Rx beam of EA receiver generated using planar array antenna.

여기서  $\alpha_n = 2\pi d/\lambda \cdot \sin\theta_n$ ,  $d$ 는 배열 안테나 소자간 거리를 나타낸다.

시뮬레이터의 DOA 알고리즘은 그림 3과 같다. 먼저, 탐지 신호로부터 높은 해상도로 표적의 각도 정보를 검출하기 위하여 본 논문에서는 스펙트럼 추정 기법 중 MUSIC, unitary ESPRIT, OMP(Orthogonal Matching Pursuit)

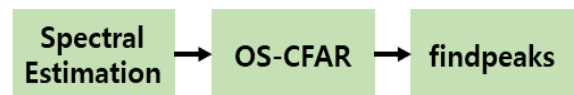


그림 3. DOA 알고리즘  
Fig. 3. DOA algorithm.

기법을 적용한다<sup>[9]~[11]</sup>.

상기 형성된 각도 영역 스펙트럼에 OS-CFAR 탐지기를 적용한다<sup>[12]</sup>. OS-CFAR 탐지기로 탐지된 정보 중 극대점이 표적의 방위 정보를 나타내므로 극대점에 해당하는 각도 정보를 추출하여 위협 표적의 방위 정보를 탐지한다. 그림 4는 고각 7° 및 10°에 표적이 위치할 경우 제안된 DOA 알고리즘을 통한 방위 정보 탐지 결과이다.

## 2-2 특성 2 및 3을 고려한 방위 추적 알고리즘

본 논문에서는 전자전 수신기를 이용한 다중 위협 표적 추적을 위하여 특성 2에 따라서 상호적 다중 모델(Interactive Multiple Model, IMM)<sup>[4]</sup> 필터 및 JPDA(Joint Probabilistic Data Association)<sup>[13]</sup> 기법을 이용하여 방위 추적 필터를 설계하였으며, 특성 3에 따른 문제를 해결하기 위하여 프로세스 잡음 공분산  $Q$  및 측정 잡음 공분산  $R$ 을 매 시점마다 적응 조정(adaptive adjustment)<sup>[14]</sup>하였다. 전체적인 방위 추적 알고리즘은 그림 5와 같다.

### 2-2-1 다중 표적 방위 추적 필터

위협 표적의 송신 레이더 신호를 이용한 방위각 및 고각 정보 추적은 IMM 추적 기법을 기반으로 수행하였다. IMM 추적 기법은 운동 모델이 자주 변하는 표적에 대해 효과적인 추적 기법으로 알려져 있으며, 표적의 방위 정보 추적에 적용할 경우 서로 다른 차수의 표준 칼만 필터(standard Kalman filter)만으로 구성하여 비교적 작은 계산

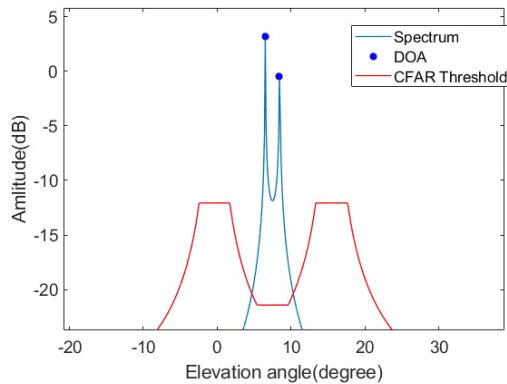


그림 4. DOA 탐지 결과

Fig. 4. Result of DOA estimation.

량으로 효과적인 추적이 가능하다. 본 논문에서는 참고문헌 [4]를 참고하여 IMM 필터를 설계하였다. 방위각의 경우 1, 2, 3차 표준 칼만 필터로 구성된 IMM 필터를 이용하여 추적을 수행하였으며, 비교적 변화폭이 작은 고각의 경우, 2차 표준 칼만 필터만을 이용하여 추적을 수행하였다. 방위각 추적을 위해 모델링된  $k$ 시점의 1, 2, 3차 상태 벡터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\hat{x}_{k|k}^{(1)} &= [\phi] \\ \hat{x}_{k|k}^{(2)} &= [\phi \ \dot{\phi}]^T \\ \hat{x}_{k|k}^{(3)} &= [\phi \ \dot{\phi} \ \ddot{\phi}]^T\end{aligned}\quad (4)$$

여기서  $\phi$ 는 위협 표적의 방위각,  $\dot{\phi}$ 는 방위각 속도,  $\ddot{\phi}$ 는 방위각 가속도,  $T$ 는 전치연산을 나타낸다. 고각 추적을 위해 모델링된 2차 표준 칼만 필터의 상태 벡터는 다음과 같다.

$$\hat{x}_{k|k}^{(2)} = [\theta \ \dot{\theta}]^T \quad (5)$$

$\theta$  및  $\dot{\theta}$ 는 고각 및 고각 속도를 나타낸다. 또한 그림 5에서  $z_k$  및  $P_{k|k}$ 는  $k$ 시점에서 측정값 및 공분산 행렬,  $F$  및  $H$ 는 동적 모델(dynamic model) 및 측정 모델(measurement model)을 나타낸다. 방위각의 상태 벡터는 그림 5의 알고리즘과 같이 3가지 칼만 필터를 통해 추정(estimation)되며, 모델 확률(model probability)  $p_k$ 에 따라서 합성된다.  $p_k$ 는 이노베이션(innovation) 벡터  $v_k$  및 공분산  $S_k$ , 마르코프 모델(Markov model) 천이 행렬  $P_{ij}$ 에 의하여 갱신된다. 다음 시점의 입력값이 되는 혼합 모델 상태 벡터 및 공분산은 천이 확률  $P_k^{ij}$ 을 통해 계산된다<sup>[4]</sup>.

해당 추적 환경에서는 위협표적이 두 개 이상인 경우, 자료 연관 기법을 적용하여 표적 추적을 수행하여야 한다. 특히, 특성 2에 따라서 방위각 및 고각정보는 각각 트랙을 형성하여 추적이 수행되어야 하기 때문에 기존의 거리 및 방위 정보를 모두 이용한 3차원 탐지 환경보다 더 많은 횡수의 자료 연관 기법의 적용이 필요하다. 특히 수신빔 폭 내에 두 개 이상의 표적이 위치하는 상황에서 방위각 및 고각 중 하나 또는 모든 트랙 게이트 내에 두 개 이상의 표적 각도 정보가 클러스터링(clustering) 되는 경우, 트랙에 측정값을 할당하는 경우의 수가 매우 많아

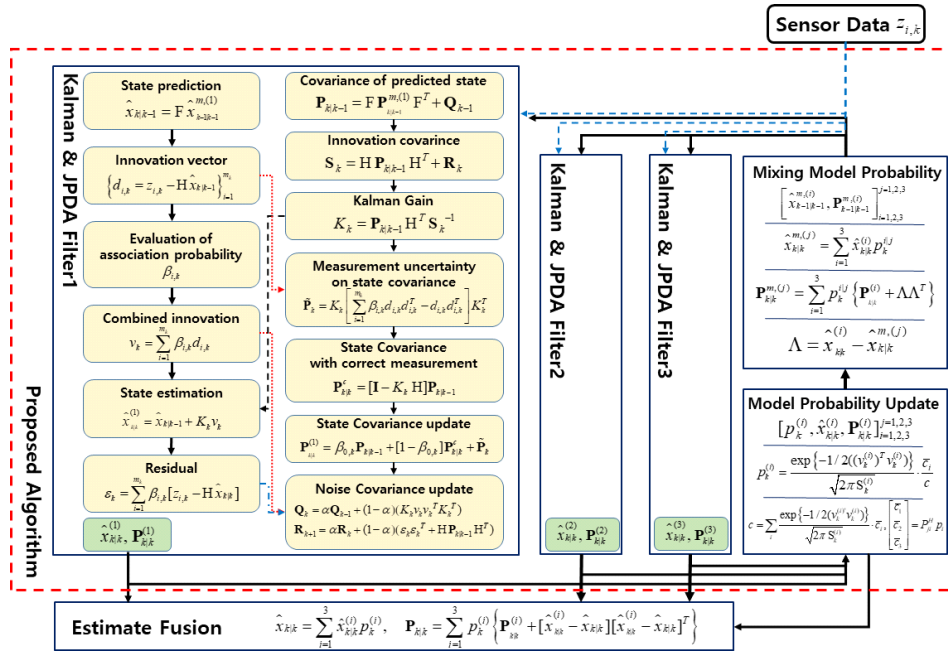


그림 5. 제안된 방위 추적 알고리즘  
Fig. 5. Proposed angle tracking algorithm.

진다. 따라서 상기의 경우 또한 자료 연관 기법의 적용이 필요하다. 이와 같은 추적 환경에서 하나의 가설만 트랙 갱신에 적용하여 오 연관 발생 확률이 높은 GNN(Global Nearest Neighbor) 및 매우 많은 계산시간을 요구하는 MHT (Multiple Hypothesis Tracking) 기법 대신 불확정성을 오차 원으로 고려하여 상태공분산(state covariance) 계산에 반영하는 JPDA 필터<sup>[13]</sup>가 적합하다. 본 논문에서는 그림 5와 같이 JPDA 기법을 통해 계산된 연관 확률 (association probability)  $\beta_{i,k}$ 를 계산한 후, 모든 가설을 연관 확률에 따라서 트랙 갱신에 적용하였으며, IMM 필터의 상태 공분산에 불확정성( $\tilde{P}_k$ )을 반영하였다. 연관 확률은 측정값이 표적으로부터 발생되었을 확률을 나타내는 우도(likelihood)를 이용하여 계산되며, 다음과 같다<sup>[13]</sup>.

$$\beta_{i,k} = \begin{cases} \frac{\mathcal{L}_{i,k}}{1 - P_D P_G + \sum_{j=1}^{m_k} \mathcal{L}_{j,k}}, & i = 1, \dots, m(k), \\ \frac{1 - P_D P_G}{1 - P_D P_G + \sum_{j=1}^{m_k} \mathcal{L}_{j,k}}, & i = 0, \end{cases} \quad (6)$$

여기서  $i=0$ 은 트랙에 어떤 측정값도 할당되지 않는 경우를 나타내며,  $P_D$  및  $P_G$ 는 탐지 확률 및 게이트 확률,  $m_k$ 는 트랙에 할당된 측정값의 개수를 나타낸다. 또한  $\mathcal{L}_{i,k}$ 는 측정값과 트랙 사이의 우도를 나타내며, 다음과 같다.

$$\mathcal{L}_{i,k} = \frac{N[z_{i,k}; H\hat{x}_{klk-1}, S_k] P_D m_k}{V_k} \quad (7)$$

위 식에서  $N$ 은 가우시안 분포의 형태로 나타낸 충분통계량(sufficient statistic)을 나타내며,  $V_k$ 는  $k$ 시점에서 게이트 유효 영역의 크기를 나타낸다.

## 2-2-2 추적 필터의 잡음 공분산 설정

그림 6은 실제 위협 표적의 방위각 및 위협 표적의 추정 방위각 사이의 오차를 나타낸다. EA는 추적 시작 후 4.2~5.2초 구간 및 7.5~8.5초 구간에서 수행되었다. 해당 구간에서는 특성 3에 따라서 전자전 수신기를 통해 표적의 레이다 신호를 수신하는 것이 불가능하다. 따라서 본



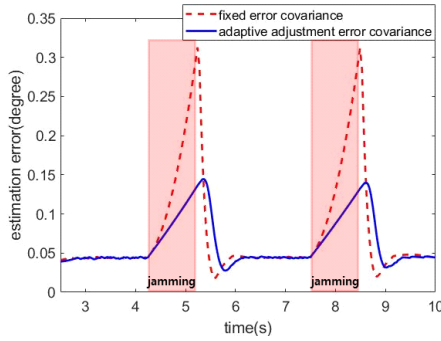


그림 6. 트랙 추정 오차

Fig. 6. Track estimation error.

시뮬레이터에서는 측정값을 이전 시점 추정값으로 대체하여 트랙을 갱신하였다. 따라서 그림 6의 점선(-)과 같이 해당 구간에서 추정 오차가 증가함을 확인할 수 있다.

통상적으로  $Q$ 는 동적 모델의 신뢰성 및 프로세스 잡음에 따라서 값을 설정하며,  $R$ 은 측정 환경에 따라서 설정한다. 따라서 잡음 공분산  $Q$  및  $R$ 을 추적 상황에 따라 최적화함으로써 추정 오차를 최소화할 수 있다. 먼저, EA 수행 구간에서는 EA 수행 구간 이전 시점까지의 표적 추적 정보만을 이용하여 트랙을 갱신하여야 하므로  $Q$  및  $R$ 이 작을수록 유리하다. 하지만 EA 구간 직후에는 추정 오차가 크게 발생하며, 보다 빠르게 추정 오차가 작은 방향으로 방위정보를 추정하기 위하여  $Q$  및  $R$ 을 크게 설정하는 것이 좋다. 이와 같은 이유로, 본 논문의 추적기는 그림 5와 같이 이노베이션 벡터(innovation vector) 및 잔여(residual) 오차, 망각 요소(forgetting factor),  $\alpha$ ,를 이용하여  $Q$  및  $R$ 을 추적 구간에 따라서 적응 조정한다<sup>[4]</sup>. 잡음 공분산을 적응 조정하여 추정오차가 감소된 것은 그림 6의 실선(—)에서 확인할 수 있다.

### III. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안된 전자전 수신기를 이용한 위협 표적 추적 시뮬레이터의 성능 및 재밍 수행 시간, 재밍 수행의 빈번도에 따른 추적 성능을 검증하기 위하여  $N_j$  및 재밍 수행 시간  $t_j$ , SNR에 따른 100회의 몬테카를로 시뮬레이션을 실시하였다. 설계된 필터의 초기값은 참고문헌 [4]를 참고하여 설정하였으며, 시뮬레이션에 사용된 시나리오는 표 1과 같다.

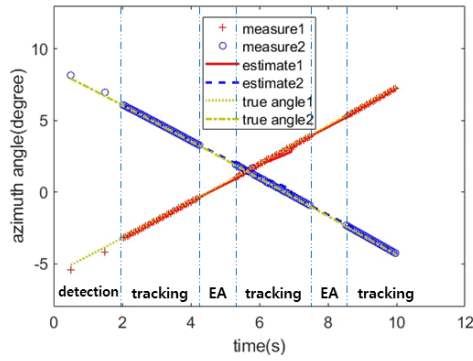
표 1. 시뮬레이션 시나리오

Table 1. Simulation scenario.

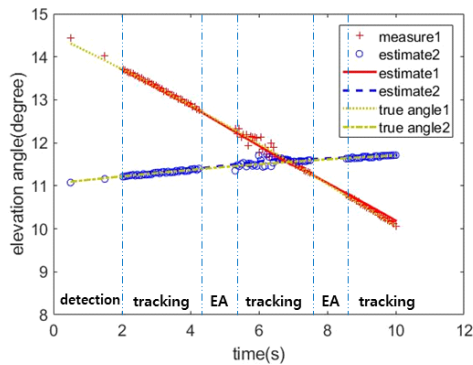
The number of target	2	Initial position of target 1	(20, 3, 4) km
Position of receive	(0, 0, 50) m	Initial position of target 2	(20, -2, 5.3) km
Tracking duration	30 m/s	Velocity of target 1	(-100, -345, 0) m/s
$N_d$	4	Velocity of target 2	(-100, 345, 180) m/s
$f_0$ (target 1, 2)	3 GHz	BW (target 1, 2)	3 MHz
$K$	600 GHz/s		

$N_d$ 는 표적 외에 클러터 등 탐지가 되지 않는 상황을 가정하여 낮은 값으로 설정하였으며, 추적 수행 시간(tracking duration)은 1회의 추적(탐지 및 추정)에 소요되는 수행 시간을 의미한다. 또한, 위협 표적이 아군의 수신기를 탐지한 후의 상황을 가정하여 위협 표적의 송신 빔이 아군 수신기 방향으로 지속적으로 조향하고 있다. 그림 7은  $N_j = 75$ ,  $t_j = 1s$ , SNR= 15 dB인 환경에서 방위각 및 고각에 대한 추적 결과로 측정값 및 추정값을 도시한다. 해당 시나리오에서는 그림 7과 같이 각기 다른 시점에서 표적들의 방위각 및 고각이 교차되며, 고각의 경우, 측정값의 오차가 보다 큰 것을 확인할 수 있다. 이것은 방위각보다 고각 방향의 안테나 소자의 개수가 작기 때문에 MUSIC으로 형성된 각도 스펙트럼의 분해능이 방위각의 경우보다 좋지 못하기 때문이다<sup>[9]</sup>.

추적 기법의 목표는 위협 표적을 추적한 뒤, 재밍 신호를 송신하여 기만하는 것이므로 추적 성공은 추적 종료 시점에서 추정된 표적 방위 정보 및 실제 표적 방위 정보를 비교하여 오차가  $1^\circ$  이내(재밍 신호의 빔폭)인 경우로 설정하였다. 표 2는  $t_j = 1s$ 일 때, SNR 및  $N_j$ 에 따른 추적 결과를 나타낸다. SNR= 10 dB 및  $N_j = 150$  이상일 경우에만 70 % 이상의 확률로 표적 추적에 성공하였다. 이와 같은 결과를 통하여  $N_j$ 가 증가할수록 측정값이 존재하지 않는 구간이 줄어들어 추적에 성공할 확률이 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만, 추적 중 재밍 수행 횟수가 줄어들기 때문에 전자전 환경에 따라서 적절한  $N_j$ 를 설정하



(a) 방위각 추적 결과  
(a) Tracking result of azimuth angle



(b) 고각 추적 결과  
(b) Tracking result of elevation angle

그림 7. 방위각 및 고각의 추적 결과

Fig. 7. Tracking result of azimuth angle and elevation angle.

표 2. 시뮬레이션 결과( $t_j = 1s$ )

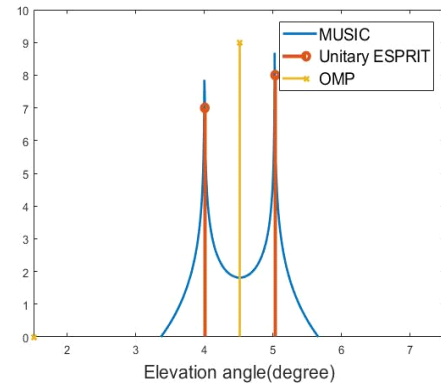
Table 2. Simulation result.

SNR(dB)	Tracking success rate(%)			
	$N_j = 50$	$N_j = 75$	$N_j = 100$	$N_j = 150$
5	0	7	11	17
10	33	41	67	75
15	100	99	100	100
20	100	100	100	100
25	100	100	100	100
30	100	100	100	100

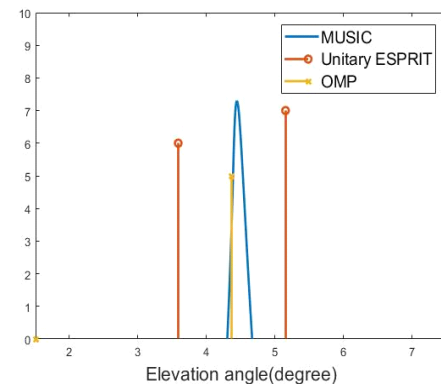
여야 한다.

표 3은  $N_j = 75$ 일 때, SNR 및  $t_j$ 에 따른 추적 결과를 나타낸다.  $N_j = 75$  및 SNR= 15 dB의 시나리오의 경우 90

% 이상의 성공 확률로 표적을 탐지하기 위하여  $t_j$ 는 1.5 s 이하여야 한다. 실험결과와 같이,  $t_j$ 가 증가할수록 위협 표적에 대한 재밍의 효과는 증가하지만, 측정값 없이 표적을 추적하는 구간이 증가하여 추적 성공확률에 악영향을 미친다. 그림 8은 SNR=0, 15 dB의 환경에서 고각이 4°, 5°의 표적에 대하여 MUSIC, Unitary ESPRIT, OMP기법을 적용하여 각도 스펙트럼을 추정한 결과이다. SNR= 15 dB의 경우, MUSIC 및 Unitary ESPRIT을 이용한 DOA 추정은 정확하게 수행되지만, OMP 기법의 추정오차는 비교적 크다. SNR= 0 dB의 경우 3가지 추정기법의 DOA 추정 오차가 모두 커지며, 이것은 추적 성공 확률 감소의 원인이 된다.



(a) 각도 스펙트럼(SNR=15 dB)  
(a) Angular spectrum



(b) 각도 스펙트럼(SNR=0 dB)  
(b) Angular spectrum

그림 8. 각도 스펙트럼(SNR=0, 15 dB, 고각=4, 5°)

Fig. 8. Angular spectrum(SNR=0, 30 dB, elevation angle = 4,5°).

표 3. 시뮬레이션 결과( $N_j = 75$ )

Table 3. Simulation result.

SNR (dB)	Tracking success rate(%)			
	$t_j = 0.5s$	$t_j = 1s$	$t_j = 1.5s$	$t_j = 2s$
5	11	7	0	0
10	94	41	30	33
15	100	99	94	87
20	100	100	100	100
25	100	100	100	100
30	100	100	100	100

#### IV. 결 론

본 논문에서는 효과적인 EA 기법 수행을 위하여 전자전 수신기를 이용한 다중 위협 표적 탐지 및 추적 시뮬레이터 모델링 및 추적 알고리즘을 제안하였다. 시나리오에 따른 몬테카를로 실험 결과, 표적 측정값 없이 추적을 수행하는 재밍 수행 구간이 포함되었음에도 SNR 20 dB 이상의 경우, 100 % 확률로 표적 추적에 성공하였으며, SNR 15 dB의 경우에서도 90 % 이상의 확률로 표적 추적에 성공하였다. 실험 결과를 통하여 재밍 환경의 다중 위협 표적 추적에 본 논문이 제안한 기법이 매우 적합하다는 것을 확인할 수 있었다.

하지만 10 dB 이하의 SNR 환경에서 표적 추적을 수행하는 경우, 80 %의 이하의 낮은 표적 추적 성공 확률을 보였는데, 이것은 낮은 SNR 환경에서 정확한 각도 스펙트럼의 추정이 어렵기 때문이다(그림 8). 이에 따라서 본 논문의 저자들은 낮은 SNR 환경에서 보다 정확한 DOA 및 추적 알고리즘에 대한 연구를 수행할 예정이다.

#### References

[1] K. S. Bang, D. S. Im, "Technology status and development trend of marine electronic warfare," *Defense & Technology*, vol. 223, pp. 56-63, 1997.

[2] K. Yeo, W. Chung, "Signal-space jamming scheme for disturbing target localization of bistatic MIMO radar system," *The Journal of Korean Institute of Electro-*

*magnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 11, pp. 878-883, Nov. 2018.

[3] K. Y. Kim, Y. Shin, "Single linear chirp-based communication-like jamming in chirp spread spectrum systems," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 44, no. 4, pp. 685-692, 2019.

[4] E. N. Khoury, "Advanced ESM angle tracker: volume 1 - Theoretical foundations," *Naval Research Laboratory, NRL/FR/5741-06-10*, Washington, DC, Dec. 2006.

[5] S. Y. Hou, H. S. Hung, and T. S. Kao, "Extended Kalman particle filter angle tracking(EKPF-AT) algorithm for tracking multiple targets," in *2010 International Conference on System Science and Engineering*, Taipei, 2010, pp. 216-220.

[6] S. B. Park, C. S. Ryu, and K. K. Lee, "Multiple target angle tracking algorithm using predicted angles," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, no. 2, pp. 643-648, Apr. 1994.

[7] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, Boston, MA, McGraw-Hill, 2001.

[8] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2nd ed. New York, NY, John Wiley & Sons, 1997.

[9] P. Stoica, R. L. Moses, *Introduction to Spectral Analysis*, New York, NY, Prentice-Hall, 1997.

[10] M. Haardt, J. A. Nossek, "Unitary ESPRIT: How to obtain increased estimation accuracy with a reduced computational burden," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 43, no. 5, pp. 1232-1242, May, 1995.

[11] Y. C. Eldar, G. Kutyniok, *Compressed Sensing: Theory and Applications*, New York, NY, Cambridge University Press, 2012.

[12] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, New York, NY, McGraw-Hill, 2005.

[13] Y. Bar-Shalom, F. Daum, and J. Huang, "The probabilistic data association filter," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 29, no. 6, pp. 82-100, Dec. 2009.

[14] S. Akhlaghi, N. Zhou, and Z. Huang, "Adaptive



adjustment of noise covariance in Kalman filter for dynamic state estimation," in *The 2017 IEEE Power &*

*Energy Society General Meeting*, Chicago, IL, Feb. 2017, pp. 1-5.

김 민 [포항공과대학교/박사과정]

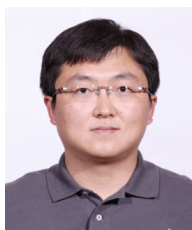
<https://orcid.org/0000-0001-7520-3513>



2015년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학사)  
2017년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학석사)  
2018년 9월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정  
[주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 신호처리, 전력발전단지 EMI/EMC 분석

김 중 덕 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5952-6504>



2005년 2월 : 경북대학교 전자전기공학과 (공학사)  
2004년 11월~현재: LIG넥스원 수석연구원  
[주 관심분야] 전자전 및 레이더 신호처리

최 인 오 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-0410-1066>



2012년 8월: 부경대학교 전자정보통신공학과 (공학사)  
2014년 8월: 부경대학교 전자공학과 (공학석사)  
2015년 9월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정  
[주 관심분야] 미세도플러 분석, 레이더 표적인식, 레이더 신호처리, 패턴인식, 스펙트럼 추정

김 두 환 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1066-2468>



2015년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공학과 (공학사)  
2017년 2월: 숭실대학원 전자공학과 (공학석사)  
2017년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원  
[주 관심분야] 디지털 하드웨어, RF 제밍 시스템, 전자전 시스템

이 원 진 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2911-6835>



1999년 2월: 고려대학교 제어계측공학과 (공학사)  
2002년 7월: LG이노텍 연구원  
2007년 4월~현재: LIG넥스원 수석연구원  
[주 관심분야] 임베디드 시스템, 광대역 디지털 신호처리, 고속데이터 통신, 이격거리 시각동기화

김 경 태 [포항공과대학교/정교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1200-5282>



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)  
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)  
2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전자

공학과 교수

2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수

2012년 9월~2017년 12월: 레이더/IR 표적식별 특화연구실실장

2018년 1월~현재: 무인감시정찰기술연구센터장

[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정