

# 레이다 추적을 위한 참조필터 기반의 기만재밍 대응 알고리즘

## Reference Filter-Based Algorithm Against Deceptive Jamming for Radar Tracking

서 정 직 · 최 성 희 · 박 성 영

Jeongjik Seo · Seonghee Choi · SungYeong Park

### 요 약

전자공격(EA, electronic attack) 중 하나인 기만재밍은 허위 표적을 생성하여 레이다가 실제 표적을 정상적으로 추적하지 못하도록 방해하는 기술이다. 이러한 기만재밍에 효과적으로 대응하기 위해서 적절한 전자보호(EP, electronic protection) 기술이 필요하다. 본 논문에서는 레이다 추적 중 발생하는 기만재밍 공격에 대응하기 위한 전자보호 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 재밍 탐지를 통해 기만재밍의 존재를 식별하고, 이에 따라 참조필터를 운용함으로써 다양한 유형의 기만재밍(RGPO, range gate pull-off; RGPI, range gate pull-in) 상황에 유연하게 대응할 수 있도록 설계되었다. 시뮬레이션 결과, 제안한 알고리즘이 재밍 신호를 효과적으로 회피하고 실제 표적을 안정적으로 추적함을 확인하였다.

### Abstract

Deceptive jamming, a type of electronic attack, generates false targets and prevents radar systems from properly tracking real targets. Appropriate electronic protection (EP) techniques are required to effectively counter these threats. This study proposed an EP algorithm designed to respond to deceptive jamming during radar tracking. The proposed algorithm detected the presence of deceptive jammers and operated reference filters accordingly, thereby enabling effective responses to various types of deceptive jamming scenarios including range gate pull-off (RGPO) and range gate pull-in (RGPI). The simulation results demonstrated that the proposed method effectively avoided deceptive jamming signals and maintained the stable tracking of actual targets.

Key words: Deceptive Jamming, Electronic Protection, Radar Tracking

### I. 서 론

전자공격(EA, electronic attack)은 적의 레이다 및 통신 시스템 등을 전자적인 방법으로 교란하거나 무력화하는 행위를 의미한다. 이 중 기만재밍(deceptive jamming)은 레

이다 신호를 수신한 후, 시간 지연, 신호크기, 주파수 등의 특성을 변경하여 이를 다시 레이다로 송신함으로써 허위 표적을 생성하는 방식이다. 기만재밍 공격을 받은 레이다는 허위 표적을 추적하게 되어 실제 표적에 대한 추적이 소실될 수 있다<sup>[1]</sup>. 따라서 레이다의 신뢰성과 생

「이 연구는 2025년 정부의 재원으로 수행된 연구 결과임(274190001).」

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received October 13, 2025 ; Revised December 10, 2025 ; Accepted December 11, 2025. (ID No. 20251013-119)

· Corresponding Author: Jeongjik Seo (e-mail: jjseo@add.re.kr)

존성을 확보하기 위해서는 기만재밍에 대응 가능한 전자보호(EP, electronic protection) 기술이 필수적이다.

대표적인 기만재밍 기법으로는 RGPO(range gate pull-off)가 있다<sup>[2]</sup>. RGPO는 레이더 신호에 시간 지연을 주어 실제보다 먼 거리에 허위 표적이 존재하는 것처럼 보이게 허위 표적을 생성한다. 이와 유사한 방식으로 거리를 감소시키는 RGPI(range gate pull-in) 기술이 존재한다.

이러한 기만재밍 공격을 회피하기 위해 다양한 전자보호 기술이 연구되었다. 예를 들어 참고문헌 [3]에서는 기만재밍과 클러터가 혼재된 환경에 적합한 DF(decomposition and fusion) 알고리즘을 제안하였다. 이 방법은 RGPO와 RGPI 재밍에 대해 효과적이나, 알고리즘 복잡성으로 인해 계산량이 많다는 단점이 있다. 또한, 참고문헌 [1]에서는 측정값 중 특정 SNR 이상인 두 개의 신호가 존재하면 RGPO 상황으로 판단하고, 거리가 먼 측정값에 낮은 가중치를 부여하는 anti-RGPO discriminating function을 적용하여 RGPO에 대응하였다. 그러나 SNR이 높은 오답지가 발생하면 RGPO 상황으로 잘못 판단할 가능성이 있으며, RGPI에 대응이 불가하다는 한계가 있다. 또한, 참고문헌 [4]에서는 새로운 PDA(probabilistic data association) 알고리즘을 제안하였다. 이 방법은 표적 신호에 더 큰 PDA 가중치를 부여하는 방식으로, 기만재밍에 대응할 수 있는 장점이 있으나 추적 주기가 빠르거나, pull-off의 변화량이 작은 경우에 효과가 떨어지는 문제점이 있다. 또한 최근에는 궤적의 물리적 특성을 분석하여 재밍을 탐지하는 기법이 제안되었다<sup>[5]</sup>. 이 방식은 도플러 속도를 통해 예측한 거리와 실제 측정 거리 간의 오차가 특정 임계값을 초과할 경우, 해당 신호를 재밍으로 간주하여 제거한다. 하지만 참고문헌 [4]와 참고문헌 [5]의 방식은 공통적으로 직전 스캔(k-1)의 정보를 기반으로 현재 스캔(k)의 측정값을 검증하는 방식에 의존한다는 한계를 갖는다. 실제 재밍 환경에서는 재밍 개시 초기에 강한 재밍 신호가 표적 신호를 가려, 추적필터가 유일하게 탐지되는 재머를 추적하는 상황이 필연적으로 발생할 수 있다. 일단 추적 필터가 재머 궤적을 추적하기 시작하면, 이러한 직전 정보 의존형 방식들은 이미 재머에 의해 오염된 정보를 기준으로 새로운 측정값을 판단하게 된다. 그 결과, 이후 실제 표적 신호가 재머와 분리되어 다시 탐지되지라

도, 이 신호를 오히려 오차가 큰 비정상 신호로 오판하여 표적으로의 궤적 회복에 실패하게 된다. 따라서 본 논문은 이러한 궤적 회복 문제를 극복하기 위해, 메인 추적 필터의 상태와 독립적으로 운용되는 참조필터를 활용한 새로운 전자보호 기법을 제안한다. 제안하는 참조필터는 재머의 거리 기만과 무관하게 실제 표적의 궤적을 예측하며, GNN(global nearest neighbor)<sup>[6]</sup> 기반 데이터 연관 과정을 통해 추적 필터가 재머에 오염된 상태에서도 실제 표적 궤도로 신속히 복귀할 수 있도록 유도한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 기만재밍의 동작 원리에 대해 설명하고, III장에서는 추적필터에 대해서, IV장에서는 제안하는 전자보호 알고리즘의 구성과 원리에 대해 기술한다. V장에서는 시뮬레이션을 통해 제안 기법의 성능을 검증하며, VI장에서 결론을 맺는다.

## II. 기만재머

기만재머는 레이더 신호를 조작하여, 레이더가 허위 거리를 갖는 표적을 추적하도록 유도한 후, 재밍 신호 송신을 중단함으로써 레이더가 실제 표적을 소실하도록 만든다. 이러한 기만재밍은 일반적으로 다음의 세 단계로 수행된다<sup>[7]</sup>. 첫 번째는 재밍 개시 단계이다. 이 단계에서 재머는 레이더 신호와 동일한 형태를 갖는 강한 재밍 신호를 생성하여 송신한다. 두 번째 단계는 거리 조작 단계이다. 이 단계에서는 재밍 신호에 점진적으로 거리 변화를 적용한다. 이에 따라 표적 신호와 재밍 신호 사이의 거리 차이가 점차 벌어지며, 결국 두 신호가 레이더 처리 과정에서 분리된다. 사전에 설정된 최대 거리 차이에 도달하면, 더 이상의 변화 없이 해당 상태를 일정 시간 동안 유지한다. 마지막 단계는 재밍 종료 단계이다. 이 단계에서 재머는 재밍 신호의 송신을 중단한다. 재밍 신호를 표적 신호로 오인하여 추적 중이던 레이더는 거리 게이트 내에서 더는 유효한 신호를 수신하지 못하게 되고, 결국 실제 표적을 소실하게 된다.

## III. 추적 필터

이 장에서는 본 논문에서 사용하는 추적필터에 대해 기술한다. 본 논문에서는 항공기에 탑재된 레이더가 적

항공기를 탐지/추적하는 상황을 가정한다. 상태 벡터를 안테나를 중심으로 하는 3차원 직교좌표계에서 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{X}_k = [x_k \dot{x}_k \ddot{x}_k y_k \dot{y}_k \ddot{y}_k z_k \dot{z}_k \ddot{z}_k]^T \quad (1)$$

여기서  $x_k, y_k, z_k$ 는 위치,  $\dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k$ 는 속도,  $\ddot{x}_k, \ddot{y}_k, \ddot{z}_k$ 는 가속도를,  $k$ 는 스캔 번호를 의미한다. 표적의 동역학은 식 (2)와 같이 표현된다<sup>[6]</sup>.

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{w}_k \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{F}_k$ 는 상태전이행렬(State transition matrix),  $\mathbf{w}_k$ 는 공정잡음(process noise)으로 평균이 0인 가우시안 백색잡음이다. 등가속도(constant acceleration) 동역학 모델로  $\mathbf{F}_k$ 를 설정한다<sup>[6]</sup>.

추적 필터에서 활용하는 레이더 측정값은 거리,  $\mathbf{u}, \mathbf{v}$ 로 구성된다. 측정값과 상태벡터  $\mathbf{X}_k$ 와의 비선형 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 측정값을 상태벡터의 차원으로 변환한 뒤 선형 칼만필터를 활용하는 CMKF(converted measurement Kalman filter)<sup>[6]</sup> 방식을 사용한다. 측정 모델은 식 (3)과 같다.

$$z_k = h(\mathbf{X}_k) + v_k = \begin{bmatrix} \sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2} \\ \text{atan}\left(\frac{y_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2}}\right) \\ \text{atan}\left(\frac{z_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2}}\right) \end{bmatrix} + v_k \quad (3)$$

여기서  $z_k$ 는 측정값,  $v_k$ 는 측정오차로 공분산  $\mathbf{R}$ 을 가지는 평균이 0인 가우시안 백색잡음이며,  $h$ 는 상태벡터와 측정값 사이의 관계를 표현하는 함수이다. 측정값을 상태벡터의 차원으로 변환한 변환측정값  $z'_k$ 는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$z'_k = \mathbf{H}_p \mathbf{X}_k + v'_k \quad (4)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

여기서  $v'_k$ 는 변환 측정잡음으로 공분산  $\mathbf{R}'_k$ 을 가진다.  $\mathbf{R}'_k$ 는 편미분을 통해 식 (5)와 같이 계산된다<sup>[6]</sup>.

$$\mathbf{R}'_k = \mathbf{J}_k \mathbf{R} \mathbf{J}_k^T, \quad \mathbf{J}_k = \frac{\partial z'_k}{\partial z_k} \quad (5)$$

변환 측정값과 변환 측정잡음공분산을 활용하여 칼만 필터의 예측과 갱신단계는 다음 식 (6)과 같다<sup>[6]</sup>.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{X}}_{k+1} &= \mathbf{F}_k \mathbf{X}_k \\ \bar{\mathbf{P}}_{k+1} &= \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{P}}_k \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k \\ \mathbf{K}_k &= \bar{\mathbf{P}}_k \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \bar{\mathbf{P}}_k \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \\ \hat{\mathbf{X}}_k &= \bar{\mathbf{X}}_k + \mathbf{K}_k (z'_k - \mathbf{H} \bar{\mathbf{X}}_k) \\ \hat{\mathbf{P}}_k &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \bar{\mathbf{P}}_k \end{aligned} \quad (6)$$

#### IV. 전자보호 알고리즘

그림 1은 제안하는 기만재밍 대응 전자보호 알고리즘의 전체 구조를 나타낸다. 알고리즘은 레이더가 기만재밍

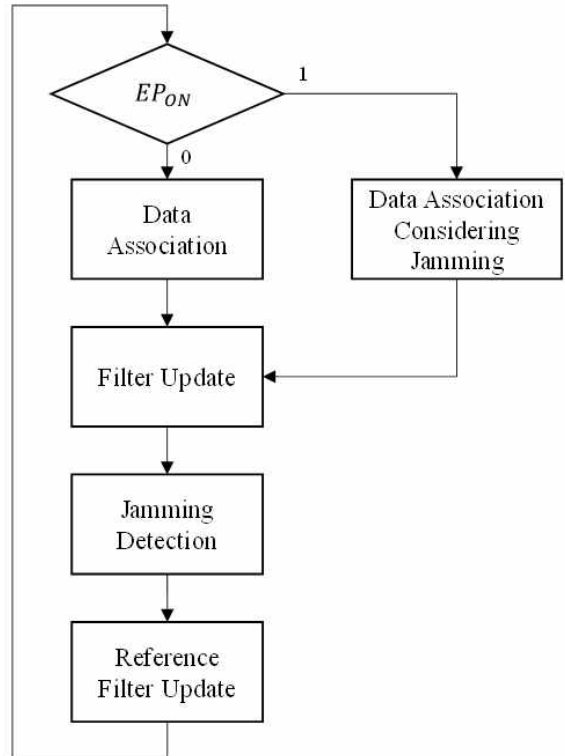


그림 1. 기만재밍 대응 알고리즘 구조  
Fig. 1. Structure of anti-deceptive jamming algorithm.

공격을 받고 있는 상황인지 여부에 따라 수행 방식이 달라진다. 기만재밍 상황 여부는 재밍 탐지 결과에 의해 결정되며 상세한 내용은 4.2절에 기술한다. 기만 재밍 공격을 받고 있지 않다고 판단한 경우( $EP_{ON}=0$ ) 일반적인 데이터 연관 알고리즘을 수행하며, 기만재밍을 고려하지 않는다(그림 1의 data association). 반면, 기만재밍 공격을 받고 있는 상황으로 판단한 경우( $EP_{ON}=1$ )에는 기만재밍을 고려한 데이터 연관을 수행한다(그림 1의 data association considering jamming). 이후 추적 필터 갱신 단계(그림 1의 filter update)를 거치며, 이때 사용되는 추적 필터는 표적을 추적하기 위해 설계된 칼만 필터<sup>[8]</sup>이다. 이후, 재밍 신호를 탐지하는 단계(그림 1의 jamming detection)를 통해  $EP_{ON}$  값을 결정한다. 다음으로 참조 필터를 갱신한다(그림 1의 reference filter update). 참조 필터는 기만재밍 상황을 가정하여 사용하는 추가적인 추적 필터로, RGPO 상황을 가정하는 필터로 구성된다. 이러한 일련의 과정을 스캔 주기마다 반복 수행함으로써, 제안하는 알고리즘은 기만재밍 공격에 효과적으로 대응할 수 있다.

각 알고리즘 단계에 대한 상세 설명은 다음 장에서 다룬다. 4.1절은 데이터 연관 알고리즘(그림 1의 data association 및 data association considering jamming)에 대해 기술하며, 4.2절에서는 재밍 탐지 단계(그림 1의 jamming detection)에 대해 다루고, 마지막으로 4.3절에서는 참조필터의 갱신 단계(그림 1의 reference filter update)에 대해 설명한다.

#### 4-1 Data Association Considering Jamming

데이터 연관을 위해 본 논문에서는 GNN<sup>[6]</sup> 연관을 활용한다. GNN은 전체 연관 조합 중에서 총 비용(cost)를 최소화하는 방식으로 측정값과 트랙 간의 연관을 수행한다. 본 연구에서는 새로운 비용함수를 정의함으로써, 간단하면서도 효과적으로 기만재밍을 회피하는 방법을 제안한다.

일반적으로 GNN 연관에 사용되는 비용은 NDS(normalized distance squared)이며, 식 (7)과 같이 정의된다<sup>[6]</sup>.

$$d_o^2 = y^T S^{-1} y \tag{7}$$

여기서  $y$ 는 칼만 필터의 잔차(residual)이고,  $S$ 는 잔차 공

분산(innovation covariance)을 의미한다<sup>[6]</sup>. 기만재밍 대응을 위해 본 논문에서는 식 (8)과 같은 비용 함수  $d_j^2$ 를 정의한다.

$$d_j^2 = \frac{(r_m - \bar{r})^2}{\sigma_r^2} \tag{8}$$

여기서  $r_m$ 은 거리 측정값,  $\bar{r}$ 는 참조필터에서 예측한 거리값,  $\sigma_r^2$ 은 참조필터의 거리 예측 오차 분산을 각각 의미한다. 기만재밍 상황 여부는  $EP_{ON}$  값에 따라 결정되며, 이에 따라 데이터 연관 방식도 달라진다.

$EP_{ON}=0$ 인 경우 일반적인 상황으로 간주하므로, 기존 방식대로  $d_o^2$ 을 사용하여 GNN 비용을 계산하여 연관을 수행한다(그림 1의 data association 단계).

반면  $EP_{ON}=1$ 인 경우에는 GNN 비용을 새롭게 정의한  $d_j^2$ 로 계산하여 연관을 수행한다(그림 1의 data association considering jamming 단계). 이처럼  $d_j^2$ 을 사용함으로써, GNN 연관 시 재밍 신호에 의한 측정값(재밍 측정값)이 아닌, 실제 표적 신호로부터 생성된 측정값(표적 측정값)과 연관되도록 유도하여 기만재밍을 회피한다.

$d_j^2$ 가 이러한 연관을 가능하게 하는 이유는 다음과 같다. RGPO/RGPI 기만 재밍은 레이다 수신 신호를 저장한 후 시간 지연을 조작하여 재송신하는 방식으로 수행된다. 이때 재밍 신호의 거리 정보인 시간 지연은 변경되지만, 도플러 주파수(속도)는 원본 표적 신호의 특성을 그대로 유지하여 거리와 속도의 변화가 물리적으로 일치하지 않게 된다. 본 논문에서 제안하는 참조필터는 이러한 기만 재밍의 운동학적 불일치 특성에 착안하여 오염되지 않은 도플러 속도 측정값만을 활용하여 표적의 거리를 예측한다. 따라서 실제 표적의 경우, 속도 기반으로 예측된 거리( $\bar{r}$ )와 실제 측정된 거리( $r_m$ )가 물리적으로 일치하여 비용함수  $d_j^2$ 가 작게 계산된다. 반면, 기만재밍 신호의 경우, 조작된 거리 정보는 실제 속도 정보를 기반으로 예측된 참조필터의 거리값과 물리적으로 괴리가 발생하게 된다. 결과적으로 재밍 신호에 대한 잔차(residual)가 증가하여  $d_j^2$ 가 크게 산출되므로, GNN 연관과정에서 자연스럽게 배제된다.

## 4-2 재밍 탐지

기만재머가 작동 중인지를 확인하는 단계를 재밍 탐지 (jamming detection)라고 한다. 기만재머는 레이다를 속이기 위해 높은 출력의 기만재밍 신호를 송신하므로 레이다는 추적 중인 표적의 신호 강도가 갑자기 증가하는 현상을 통해 이를 감지할 수 있다. 파형 변화에 따른 영향을 제외하고, 신호 강도의 변화를 확인하기 위해서 RCS(radar cross-section)를 활용하여 그림 2와 같이 간단한 기준을 통해 기만재밍을 탐지한다.

현재 시점에서 획득한 측정값 중 최대 RCS를  $s_k$ 라 하고, 그 직전  $N_{win}$  개의 RCS 값의 평균을  $\bar{s}_k$ 라 정의한다. 이때 평균 RCS  $\bar{s}_k$ 는 다음 식 (9)로 계산된다.

$$\bar{s}_k = \frac{1}{N_{win}} \sum_{i=1}^{N_{win}} s_{k-i} \quad (9)$$

$s_k$ 와  $\bar{s}_k$ 의 상대적 크기를 비교하여 기만재밍 여부를 식 (10)과 같이 판단한다.

$$EP_{ON} = \begin{cases} 1, & \text{if } s_k > C\bar{s}_k, \\ 0, & \text{if } s_k < \frac{1}{C}\bar{s}_k, \\ \text{no change, otherwise,} \end{cases} \quad (10)$$

여기서  $EP_{ON}$ 은 기만 재밍 공격을 받고 있는 상황을 의미하는 값으로, 1인 경우 공격을 받고 있음을 0인 경우 공격을 받고 있지 않음을 의미한다. C는 임계값 비교를 위한 파라미터이다. 이처럼 RCS 비교 기반의 알고리즘을 사용하면, 기만재밍 발생 여부를 빠르게 감지할 수 있으

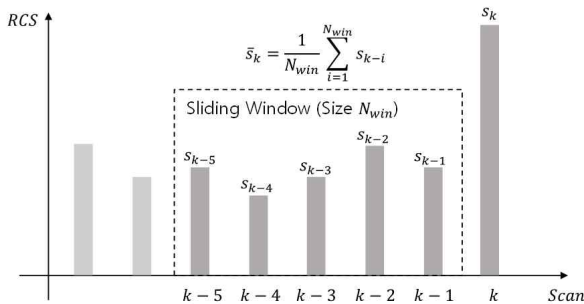


그림 2. 재밍 탐지 방법( $N_{win}=5$ )

Fig. 2. Jamming detection method ( $N_{win}=5$ ).

며, 계산량이 적어 실시간 적용에도 적합하다.

## 4-3 Reference Filter

기만재밍 대응을 위해 운용되는 참조필터는 RGPO 또는 RGPI 상황을 가정하여 속도 측정값만을 이용해 필터를 갱신한다. 참조필터는 칼만 필터<sup>[8]</sup>를 기반으로 하며, 상태벡터는 식 (11)과 같이 정의된다.

$$X = [r, d, a]^T \quad (11)$$

여기서  $r$ 은 거리,  $d$ 는 도플러 속도,  $a$ 는 가속도를 의미한다. 동역학 모델로는 등가속도 모델<sup>[6]</sup>을 적용하였다.

참조필터 초기화는 처음  $EP_{ON}=1$ 이 될 때 추적 필터의 상태벡터값을 활용하여 상태벡터를 초기화한다. 공분산 행렬은 거리 및 속도 측정 오차의 분산을 활용하여 초기화된다<sup>[6]</sup>.

## V. 시뮬레이션

### 5-1 시뮬레이션 설정

제안하는 기만재밍 대응 알고리즘을 검증하기 위해 RGPO, RGPI의 두 가지 시나리오에 대해 항공기 탐재 모노펄스 레이다 시스템이 점 표적을 탐지 및 추적하는 상황을 가정하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 환경은 다음과 같다. 신호 처리 단계를 생략하고 측정값을 생성한 시뮬레이션을 수행하였으며, 측정값은 실제 표적 및 재머 정보에 가우시안 잡음을 추가하여 생성하였다. 이때 거리,  $u$ ,  $v$ , 도플러 속도에 대한 측정오차는 잡음에 의한 영향만 고려하였으며, 신호 대 잡음비(SNR)에 대한 식으로 표준편차를 구하고 이를 기반으로 오차를 생성하였으며, 탐지확률은 SNR에 기반하여 계산하였다<sup>[6],[9]</sup>. 클러터 환경을 모사하기 위해 빔폭 내 임의의 위치와 도플러 속도를 가지는 5개의 오탐(false alarm)이 발생한다고 가정하였다. 레이다의 추적 스캔 주기는 0.5초, 안테나 3 dB 빔폭은 3°로 설정하였다. 파형에 의한 거리 해상도와 도플러 속도 해상도는 각각 30 m, 0.29 m/s이다. 레이다 신호 처리 과정에서의 해상도 제한을 반영하기 위해 거리해상도의 2배인 60 m 이내에 근접한 탐지 신호

들은 전력 가중 합을 통해 하나의 거리 측정값으로 병합하였다. 임계값 C는 10.98로 설정하였다.

기만재밍 신호는 다음과 같은 방식으로 모의하였다. 시나리오 시작 후 15초 시점부터 재머가 신호를 송신하며 최초 5초간은 거리 차이를 발생시키지 않는다. 이후 10초 동안 거리 차이를 선형적으로 증가시키며, 그다음 5초간은 해당 차이를 유지한 뒤 재밍 신호 송신을 종료한다. 거리 차이는 15 m/s의 비율로 증가시킨다. 재머 신호의 유효 RCS(effective RCS)<sup>[10]</sup>는 100 m<sup>2</sup>로 설정한다.

표적과 레이더가 서로를 향해 접근하는 상황을 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 레이더는 300 m/s의 등속도로 표적을 향해 이동하며, 표적도 동일한 속도로 레이더를 향해 접근한다. 표적의 초기 위치는 레이더로부터 80 km 떨어져 있으며, 표적과 레이더 모두 고도는 5 km로 같다. 표적의 RCS는 5 m<sup>2</sup>로 설정하였으며, RCS 요동 모델로는 Swerling case 1을 적용하였다.

5-2 기만 재밍 대응 및 추적 성능

그림 3은 RGPO 상황에서 제안한 전자보호 알고리즘을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 추적 결과를 비교한 것이다. 전자보호를 적용하지 않은 경우, 추적 필터는 재밍 신호를 따라가다가 재밍이 종료된 이후 표적 추적에 실패하였다. 반면 전자보호를 적용한 경우, 추적 필터는 재밍 신호를 일시적으로 따라가다가 방향을 전환하여 실제 표적을 다시 추적하여, 추적이 중단되지 않고 지속해서 유지되었음을 확인할 수 있었다. 이는 제안하는 알고리즘이 RGPO 기만재

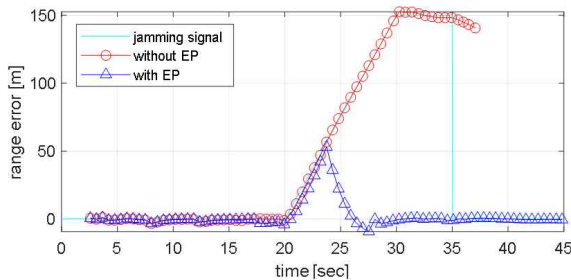


그림 3. RGPO 상황에서 전자보호 적용과 미적용 시 차이  
Fig. 3. Difference between with and without EP in the case of RGPO.

밍 상황에서 효과적으로 대응할 수 있음을 보여준다.

그림 4는 RGPO 상황에서의 재밍 신호, 추적 필터, 참조 필터, 측정값의 거리오차를 나타낸다. 시뮬레이션 15초 시점에 재밍 신호가 송신되면서 참조 필터가 초기화되었고, 20초부터는 재밍 신호가 점차 표적으로부터 멀어지는 방향으로 이동함에 따라 거리 오차가 증가하였다. 이 시점에서 추적 필터가 재밍 신호를 따라가는 것을 확인할 수 있다. 약 24초 이후에는 표적 신호와 재밍 신호가 분리되어 탐지되었고, 이에 따라 추적 필터의 거리 오차가 점차 줄어들었다. 이는 표적의 측정값이 필터에 연관되기 시작했기 때문이다.

참조 필터의 거리오차는 재밍 신호가 수신되는 동안에도 거의 0에 가까운 값을 유지하였다. 이는 참조 필터가 속도 측정값을 활용하여 실제 표적의 거리를 정확히 추적할 수 있었음을 보여준다. 재밍 신호와 표적 신호가 분리되어 탐지되었을 때, 필터가 정상적으로 표적의 측정값과 연관되어 RGPO 재밍 상황을 회피할 수 있었던 것은 참조 필터의 거리값이 정확하여  $d_j^2$ 가 표적 측정값에 대해 작게 계산되었기 때문이다.

그림 5는 그림 4와 같은 상황에서의  $EP_{ON}$ 의 값을 나타낸다. 15초에 재머가 활성화되면서  $EP_{ON}$ 가 1로 설정

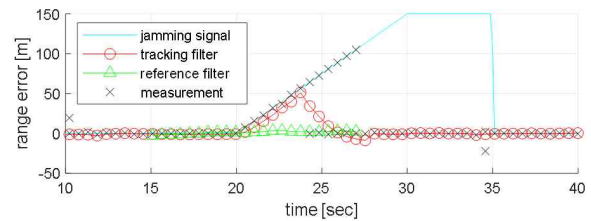


그림 4. RGPO 상황에서 거리오차  
Fig. 4. Range error in the case of RGPO.

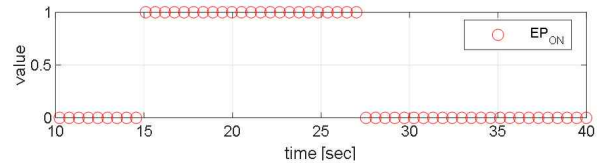


그림 5. RGPO 상황에서  $EP_{ON}$   
Fig. 5.  $EP_{ON}$  in the case of RGPO.

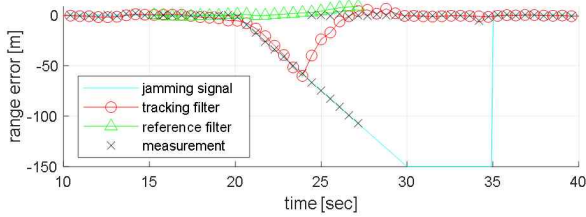


그림 6. RGPI 상황에서 거리오차

Fig. 6. Range error in the case of RGPI.

되어, 재밍 신호가 정상적으로 탐지되었음을 알 수 있다. 이후 약 27초부터는 재밍 신호가 거리 게이트를 벗어나 탐지되지 않고, 표적 신호만 탐지됨에 따라  $EP_{ON}$ 이 0으로 정상적으로 전환되었다.

그림 6은 RGPI 재밍 상황에서의 거리 오차를 나타낸다. RGPO의 결과와 비교했을 때 오차가 반대 방향으로 발생함을 확인할 수 있다. 이는 RGPI가 표적의 거리가 작아지는 방향으로 기만을 수행하기 때문이다. 제안하는 알고리즘은 RGPI 상황에서도 RGPO 상황과 유사한 형태로 재밍 신호를 회피하고 정상적으로 표적을 추적하였다. 따라서 제안한 알고리즘이 RGPO, RGPI 기만재밍 시나리오 모두에 대해 효과적으로 대응할 수 있음을 확인하였다.

### 5-3 추적 유지율 비교 분석

기만재밍의 궁극적인 목적은 레이다가 허위 표적을 추적하도록 유도하여 실제 표적을 소실시키는 것이다. 따라서 본 절에서는 제안하는 알고리즘이 기만재밍 환경 하에서도 실제 표적에 대한 추적을 안정적으로 유지하는지 검증하기 위해 추적 유지율(track maintenance rate)을 성능 지표로 도입하였다. 추적 유지율은 전체 시뮬레이션 시행 횟수 대비 추적 성공 횟수의 비율로 정의되며<sup>[11]</sup>, 본 실험에서는 5회 연속으로 연관된 측정값이 없을 경우 소실된 것으로 간주하였다. 신뢰성 있는 결과 도출을 위해 RGPO, RGPI 시나리오에서 각각 100회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

표 1은 시뮬레이션 수행 결과를 요약한 것이다. 분석 결과, 제안 기법은 RGPO와 RGPI 상황 모두에서 99.5%의 안정적인 추적 유지 성능을 보인 반면, 비교 기법 참고 문헌 [4] 및 참고문헌 [5]는 100회 시뮬레이션에서 단 한

표 1. 알고리즘별 추적유지율(%)

Table 1. Track maintenance rate of each algorithm (%).

Jamming type	[1]	[4]	[5]	Proposed method
RGPO	85	0	0	99
RGPI	0	0	0	100
total	42.5	0	0	99.5

번도 재밍을 회피하지 못하였다. 이러한 실패의 주된 원인은 서론에서 지적한 바와 같이, 해당 기법들이 직전 스캔( $k-1$ )의 정보에 의존하여 현재( $k$ )의 유효성을 판단하는 구조적 한계를 갖기 때문이다.

시뮬레이션 초기 재밍 신호만 탐지되는 구간에서 추적 필터는 재머를 추적하게 된다. 이후 약 24초 시점에 실제 표적 신호가 재머와 분리되어 재탐지되었을 때, 제안 기법은 독립적으로 운용되는 참조필터의 예측 정보를 활용하여 즉시 실제 표적 궤도로 복귀하였다. 그러나 참고문헌 [4] 및 참고문헌 [5]의 기법은 이미 재머를 추적하며 오염된 정보를 기준으로 판단을 수행하므로, 실제 표적 신호를 오차가 매우 큰 비정상 신호로 간주한다. 결과적으로 두 비교 기법은 표적 궤도로의 복귀에 실패하고 표적을 소실하였으며, 이는 해당 기법들이 궤도 회복 관점에서 실질적인 한계가 있음을 보여준다.

한편, 참고문헌 [1]의 기법은 RGPO 시나리오에서는 85%의 추적 유지율을 보였으나, RGPI 시나리오에서는 추적을 전혀 유지하지 못하였다. 이는 해당 알고리즘이 RGPO 대응을 위해, 두 신호 중 거리가 더 먼 측정값에 낮은 가중치를 부여하도록 설계되었기 때문이다. 표적보다 더 가까운 거리로 허위 표적을 생성하는 RGPI 상황에서는 알고리즘이 오히려 실제 표적을 재밍으로 오판하여 가중치를 낮추고 가까운 재밍 신호를 신뢰하게 되므로 추적 실패로 이어졌다.

### 5-4 윈도우 크기( $N_{win}$ )에 따른 영향성 분석

본 절에서는 슬라이딩 윈도우 크기  $N_{win}$ 이 재밍 탐지 알고리즘의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 성능 지표로는 오탐 확률(false alarm probability)과 탐지 안정성 비율(detection stability ratio)을 선정하였다. 여기서 오탐 확

률은 재밍 신호가 부재한 상황에서 이를 재밍으로 오판할 확률을 의미하며, 탐지 안정성 비율은 재밍 신호 인가 직후부터 회피가 완료될 때까지의 유효 구간 내에서  $EP_{ON}$ 가 1을 유지한 비율로 정의하였다. 실험을 위해 5-1절의 시나리오를 기반으로 재밍 신호를 제거한 ‘오탐 분석용 시나리오’를 구성하여 오탐 확률을 분석하였고, 기존 시나리오에서 탐지 안정성 비율을 분석하였다. 두 경우 모두  $N_{win}$ 을 1부터 20까지 가변하며 각각 100회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 평균 성능을 도출하였다.

그림 7은  $N_{win}$  변화에 따른 두 성능 지표의 추이를 나타낸다.  $N_{win}$ 이 증가함에 따라 표적의 RCS 요동이 평활화되어 오탐 확률은 급격히 감소하고, 탐지 안정성은 크게 향상되는 경향을 보였다. 특히  $N_{win}$ 이 4 이상인 구간에서 오탐 확률은 0.01 이하로 수렴하고, 탐지 안정성은 1에 도달하여 안정화됨을 확인할 수 있었다.

한편  $N_{win}$  크기에 따른 평균 RCS( $\bar{s}_k$ ) 변화 특성을 분석하기 위해 반복적 재밍 시나리오를 구성하였다. 재밍 신호는 10~20초 구간과 25~35초 구간에서 반복적으로 인가된다고 가정하였으며,  $N_{win}$ 이 1, 5, 10, 20인 4가지 경우에 대해  $\bar{s}_k$ 를 계산하였다. 그 결과는 그림 8과 같이

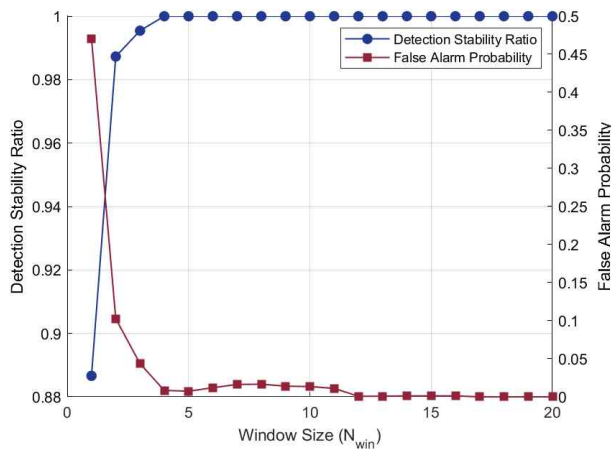


그림 7. 윈도우 크기( $N_{win}$ )에 따른 오탐 확률 및 탐지 안정성 비율 변화

Fig. 7. Variations of false alarm probability and detection stability ratio according to window size ( $N_{win}$ ).

나타난다. x축은 시간, y축은 RCS를 나타내며, 직관적인 비교를 위해 dBsm 단위를 사용하였다. 붉은색 음영 영역은 재밍 신호가 수신되는 구간을 의미한다.  $N_{win}=1$ 인 경우 측정값의 RCS( $s_k$ )와 평균 RCS( $\bar{s}_k$ )가 동일하여  $\bar{s}_k$ 가 시간에 따라 불안정하게 변동하는 것을 확인할 수 있다. 반면  $N_{win}$ 이 5 이상으로 증가할수록 평균화 효과에 의해  $\bar{s}_k$ 가 비교적 안정적으로 유지되었다. 그러나  $N_{win}=20$ 과 같이 윈도우 크기가 과도하게 큰 경우,  $\bar{s}_k$  변화가 지연되는 현상이 관찰되었다. 특히 20초 시점에 첫 번째 재밍이 종료되어 표적 신호만 남았음에도 불구하고, 윈도우 내에 잔존하는 과거 재밍 신호의 영향으로 인해  $\bar{s}_k$ 가 신속하게 낮아지지 않았다. 이로 인해 25초에 두 번째 재밍 신호가 유입되는 시점까지도  $\bar{s}_k$ 가 재밍 신호 레벨과 유사한 수준으로 높게 유지되어, 후속 재밍에 대한 탐지 민감도가 저하될 위험이 있음을 확인하였다. 종합하면, 윈도우 크기( $N_{win}$ )가 작을수록 평균 RCS( $\bar{s}_k$ )가 불안정하여 오탐 확률이 높아지는 단점이 있으나, 신호 레벨의 변화를 즉각적으로 추종할 수 있다. 반대로  $N_{win}$ 이 클수록 평균 RCS( $\bar{s}_k$ )가 안정화되어 오탐 확률은 낮아지나, 신호 레벨 변화에 대한 추종 속도가 느려져 반복적인 재밍 상황에

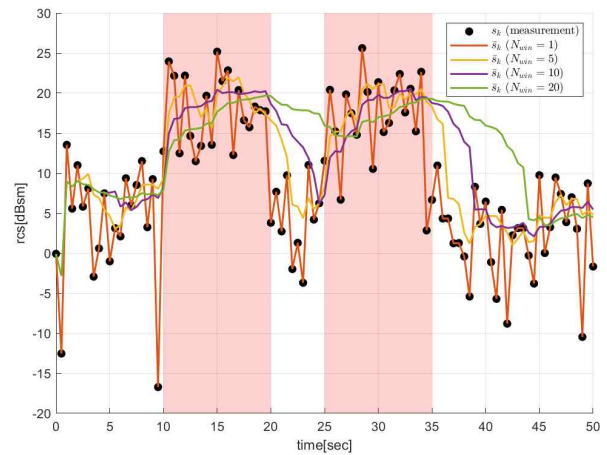


그림 8. 윈도우 크기( $N_{win}$ )에 따른 평균 RCS( $\bar{s}_k$ ) 변화 특성 비교

Fig. 8. Comparison of average RCS ( $\bar{s}_k$ ) variation characteristics according to window size ( $N_{win}$ ).

서 탐지 성능이 저하될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 상충관계(trade-off)를 고려하여, 오탐을 효과적으로 억제하면서도 적절한 반응속도를 보장하는  $N_{win}=5$ 를 최적의 값으로 선정하였다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 기만재밍 상황에서의 표적 추적 성능을 향상하기 위한 전자보호 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 기만재밍의 신호 특성을 기반으로 재밍 여부를 탐지하고 탐지 결과에 따라 참조필터를 운용함으로써 RGPO와 RGPI 기만재밍 상황에 효과적으로 대응할 수 있도록 하였다. 시뮬레이션 결과, 기존의 단기 기억 의존형 기법들이 재밍 회피 및 궤도 회복에 실패한 것과 대조적으로, 제안 기법은 재밍의 영향으로부터 신속히 벗어나 표적을 안정적으로 추적하여, 기존 기법들 대비 높은 추적 유지율을 보임을 확인하였다.

본 연구는 단일 표적 및 등속 직선 운동을 가정하여 제안기법의 핵심 성능을 검증하였다. 향후 표적이 급격한 기동을 하는 비선형 기동 시나리오에서는 참조필터의 예측 정확도가 저하될 수 있으므로 IMM(interacting multiple model) 기법 등을 결합하여 다양한 기동 모델을 반영하는 방식으로 보완할 수 있다. 또한 다중 표적 및 클러터가 혼재된 환경에서는 MHT(multiple hypothesis tracking)과 같은 다중 표적 연관 기법으로의 확장 시 성능이 개선될 것으로 예상된다. 제안하는 참조필터 기반의 기법은 향후 고도화된 추적 알고리즘과 결합하여 다양한 실질적 환경에 대응할 수 있는 기반 기술로 활용될 수 있다.

## References

[1] T. Kirubarajan, Y. Bar-Shalom, W. D. Blair, and G. A. Watson, "IMMPDAF for radar management and tracking benchmark with ECM," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 34, no. 4, pp. 1115-1134, Oct. 1998.

[2] Y. Xingyu, R. Huailin, and F. Haoran, "A recognition

algorithm of deception jamming based on image of time-frequency distribution," in *2017 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication*, Macau, Jul. 2017, pp. 275-278.

[3] X. R. Li, B. J. Slocumb, and P. D. West, "Tracking in the presence of range deception ECM and clutter by decomposition and fusion," in *Proceedings of SPIE Signal and Data Processing of Small Targets*, Denver, CO, Oct. 1999, pp. 198-210.

[4] X. Deng, J. Hu, and H. Liu, "Tracking in the presence of RGPO or VGPO using the Kalman filter with a new modified PDA," in *IET International Radar Conference*, Stevenage, Apr. 2013.

[5] Y. Li, J. Zhang, W. Wang, C. Li, C. Duan, and Y. Liu, et al., "A novel anti-deception jamming method of time-sensitive target based on trajectory characteristics," in *IET International Radar Conference*, Chongqing, Nov. 2020.

[6] S. S. Blackman, R. Popoli, *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*, Norwood, MA, Artech House, 1999.

[7] L. Wu, X. Fu, S. Liu, S. Peng, and M. Xie, "The anti-jamming method based on front-back-edge tracking of VGPO jamming," in *2016 CIE International Conference on Radar(RADAR)*, Guangzhou, Oct. 2016.

[8] G. Welch, G. Bishop, "An introduction to the Kalman filter", in *Proceedings of SIGGRAPH 2001*, Los Angeles, CA, Aug. 2001.

[9] D. K. Barton, *Radar System Analysis and Modeling*, Norwood, MA, Artech House, 2004.

[10] J. Townsend, M. A. Saville, S. Hong, R. K. Martin, S. Simpson, and O. Mayhew, "Waveform optimization for electronic countermeasure technique generation," in *2008 IEEE Radar Conference*, Rome, May 2008.

[11] J. Seo, S. Choi, and S. Park, "Maneuver detection method based on Doppler residual for maneuvering target tracking," *Journal of Korean Institute of Information Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 139-150, Jan. 2024.

서 정 직 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2907-085X>



2013년 8월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
2015년 8월: KAIST 전기및전자공학부 (공학석사)  
2016년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 레이다, 추적필터

박 성 영 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1510-2475>



2014년 2월: KAIST 전기 및 전자공학부 (공학사)  
2016년 2월: KAIST 전기 및 전자공학부 (공학석사)  
2016년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 능동위상배열레이다, 항공

기 레이다, 레이다 신호처리

최 성 희 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0009-0008-9016-1700>



2002년 2월: 한양대학교 전기전자제어계측공학과 (공학석사)  
2017년 2월: 한양대학교 전자시스템공학과 (공학박사)  
2002년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 레이다 데이터 처리, 다중 표적 추적 필터 설계