

항공기 AESA 레이더에서 TWS를 이용한 지상 이동 표적 추적

Ground Moving Target Tracking Using TWS on Airborne AESA Radar

이 원 준

Won-Jun Lee

요 약

본 논문에서는 AESA(active electronically scanned arrays) 레이더를 통해 항공기에서 지상 이동 표적을 탐지/추적하기 위한 GMTI(ground moving target indicator) 모드의 표적 추적 알고리즘을 설계한다. GMTI 모드는 체계 설계에 따라 광역의 범위를 조사하여 표적을 추적할 수 있는데, X밴드 대역 파형을 사용하는 레이더 특성상 3 dB 빔 폭이 좁으므로 인접 빔에서 표적이 중복으로 탐지될 수 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 중복 탐지 표적 제거 기능과 더불어 실시간성을 고려한 빔 간 처리 기법을 제시했다. 또한 운용 특성을 고려하여 TWS(track while scan) 방식의 다중 표적 추적 알고리즘을 설계했다. 알고리즘 검증을 위해 GPS가 탑재된 차량을 이용하여 비행 시험을 했으며, 이 시험을 통해 실시간 처리 능력과 추적 성능이 설계 규격을 만족하는 것을 확인했다.

Abstract

A target-tracking method using the ground moving target indicator (GMTI) mode on active electronically scanned array (AESA) radar is proposed. The GMTI mode can operate in wide ground areas. However, the 3-dB beamwidth of the X-band radar is narrow, and a target is detected on multiple adjacent beams. To delete overlapping target plots, beam-to-beam processing considering a real-time system is proposed. In addition, a track while scan (TWS) multiple-target-tracking algorithm was constructed for the system. Through a flight test with true car mounted GPS, it was confirmed that the real-time processing ability and target-tracking performance of the GMTI algorithm were satisfactory.

Key words: Airborne AESA Radar, TWS Target Tracking, Multiple Target Tracking, GMTI

I. 서 론

최근 항공기 레이더는 AESA(active electronically scanned antenna)^[1] 방식을 사용하여 다양한 운용 모드를 설계할 수 있다. 지상 이동 표적을 탐지하는 모드로는 GMTI(ground moving target indicator)가 있다. GMTI의 대상 표적은 움직이는 지상 표적이므로 MPRF(medium pulse

repetition frequency) 또는 HPRF(high pulse repetition frequency) 파형을 이용하여 표적을 탐지할 수 있다. 이때 신호처리를 통해서는 표적에 대한 위치와 도플러 그리고 RCS(radar cross section) 등과 같은 정보를 알 수 있다. 탐지된 표적의 위치는 antenna, platform body, VCNE(vessel carried north east down), ECEF(earth centered earth fixed) 좌표계^[2]로 표현될 수 있으며, 레이더에서는 이러

국방과학연구소 레이더전자전센터(Radar / EW Center, Agency for Defense Development)

· Manuscript received May 23, 2022 ; Revised June 29, 2022 ; Accepted August 16, 2022. (ID No. 20220523-050)

· Corresponding Author: Won-Jun Lee (e-mail: wonjun_lee@add.re.kr)

한 탐지 정보를 측정치(plot)라고 칭한다. Plot은 SNR(signal to noise ratio)와 관련된 값으로 위치에 대한 정확성은 SNR과 비례한다. 또한 GMTI plot은 펄스 도플러 레이더 방식으로 LOS(line of sight) 기준의 도플러 속도만을 알 수 있다. 그러므로 대부분의 추적 레이더와 같이 GMTI 모드에서도 좀 더 정확한 표적에 대한 위치와 속도, 방향 정보를 산출하기 위한 추적 알고리즘을 설계해야 한다.

AESA 레이더는 전자적 빔 조향이 가능하므로 언제든지 빠르게 빔을 조향할 수 있는 장점이 있다. 그래서 AESA 레이더에서는 SWT(search while track)와 TWS(track while scan) 방식^[3]을 모두 사용하여 표적을 효과적으로 추적할 수 있다. SWT의 방식은 탐색하는 도중에 추적하는 방식으로 추적 빔과 탐색 빔 운용 주기를 다양하게 설계할 수 있다. 예를 들어 세 개의 표적을 추적한다고 가정할 때, 세 표적 추적 주기를 모두 다르게 설정하여 운용할 수 있다. 그러므로 SWT 모드는 기동이 빠르고 SNR 세기가 낮은 표적을 대상으로 하기에 적합하다. 그러나 모든 표적에 대해 추적 빔을 운용해야 하므로 수십 개 이상의 많은 표적을 탐지 추적하기에는 부적절하다.

반면 TWS 모드는 탐색 빔만을 운용한 뒤, 탐지된 모든 plot을 이용하여 추적을 수행하므로 추적 수행 주기 즉 탐색 빔 주기(scan 주기)는 모두 동일하지만 수십 개 이상의 표적을 동시 추적하기에는 적합하다. 그러므로 GMTI 모드에서는 TWS 방식으로 추적하게 된다. TWS 방식의 추적을 위해서는 탐색 빔에 따른 중복 plot 제거 설계, 실시간성과 추적 정확성을 위한 데이터 처리 및 추적 필터 설계가 필요하다.

본 논문에서는 GMTI 모드에 적합한 TWS 추적 설계 방안을 제시하고, 최종적으로는 실제 환경에서 추적한 결과를 보여준다. 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 빔 간 처리를 이용한 중복 plot 제거 설계, III장에서는 GMTI에 적합한 표적 추적 필터와 데이터 처리 설계를 보여주고 마지막 IV장에서는 실제 환경에서의 GMTI 추적 결과와 그 성능을 보여준다.

II. 빔 간 처리를 이용한 중복 Plot 제거

2-1 GMTI TWS 빔 조향 설계

GMTI 모드는 광역모드와 집중모드로 나눌 수 있으며,

광역모드에서는 $\pm 10^\circ$ 부터 $\pm 60^\circ$ 까지 다양하게 설정할 수 있다. 그러므로 광역 모드에서는 탐색 범위에 따라 여러 개의 탐색 빔을 방사하여 표적을 탐지해야 한다. 이때 탐색 빔 폭의 크기는 식 (1)과 같다^[4].

$$\theta_{Beam\ Width} = \frac{k\lambda}{L\cos(\theta_0)} \quad (1)$$

여기서 λ 는 파형 길이이고, L 은 안테나 크기를 뜻하며, k 는 빔 폭 계수 그리고 θ_0 는 빔 조향각이다. 이에 따라 정면을 바라보고 있는 상태에서 k 가 1이고, 가로 3 m 세로 1 m 안테나 크기에서의 9 GHz의 X밴드 레이더 3 dB 방위각 빔 폭 크기는 약 3도이다. 그러므로 TWS 광역 모드에서 관심 거리 및 방위 영역을 모두 탐지하기 위해서는 3 dB 빔을 여러 번 방사해야 한다. 빔을 한 번 방사할 때 단위를 dwell이라고 하고 모든 영역을 탐색하는 단위를 scan이라고 한다. 그러므로 1 scan은 n 번의 dwell 빔으로 이루어져 있으며 빔 조향은 그림 1과 같은 방식으로 진행될 수 있다.

2-2 GNN을 이용한 중복 Plot 제거

TWS 광역모드를 수행할 때는 빔 겹침이 생겨 동일 표적에 대한 중복 plot이 생성된다. 중복 plot은 추적 단계에서 해결하는 방식이 있고, 탐지 단계에서 해결할 수 있는 방식이 있다. 중복 plot을 추적 단계에서 해결하기 위해서는 참고문헌 [5]와 같은 방법을 사용할 수 있으나 수백 개

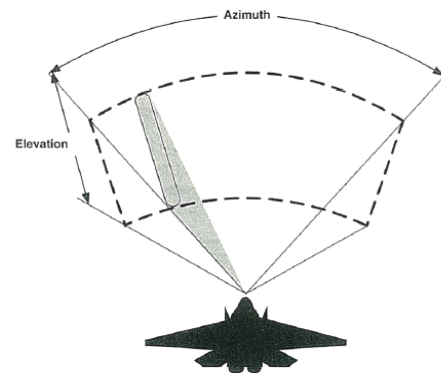


그림 1. TWS 빔 운용 방식

Fig. 1. TWS beam management.

의 표적을 처리하기에는 실시간성 문제점이 생길 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 1 dwell에서는 중복 plot이 생성되지 않는다는 가정 아래에서 탐지된 dwell plot 끼리 중복성 검사를 통해 제거하는 방식으로 설계했다.

Dwell plot의 상태벡터는 VCNED 좌표계를 기준으로 하는 구좌표계 형태로 나타낼 수 있으며, 그 형상은 식 (2)와 같다.

$$z = [r, \theta, \psi, f]' \quad (2)$$

r 은 slant range, θ 는 azimuth, ψ 는 elevation 그리고 f 는 Doppler값을 의미한다. 그리고 k 번째 빔에서 탐지된 plot의 집합을 Z^k 이라고 하면 Z^k 은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z^k = (z_1^k, z_2^k, z_3^k, \dots, z_i^k) \quad (3)$$

k 번째 빔에서 탐지된 plot Z^k 과 $k+1$ 번째 탐지된 plot Z^{k+1} 간의 중복성을 제거하기 위해서는 표 1과 같이 두 집합에 대해 일대일 매칭 검사를 수행해야 한다.

표 1에서 p_{ij} 는 유사성에 대한 점수를 의미한다. 유사성을 구하는 방식에는 여러 가지 방법이 존재할 수 있으나 본 논문에서는 측정 정확도 분포를 고려하여 서로 다른 plot 간의 확률적 거리인 Mahalanobis 거리를 구하는 방식을 선택했다. p_{ij} 를 구하는 수식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{ij} = (z_i^k - z_j^{k+1})' (R_i^k + R_j^{k+1})^{-1} (z_i^k - z_j^{k+1}) \quad (4)$$

여기서 R 은 측정 잡음 공분산을 의미하며, 식 (5)와 같이 표현된다.

$$R_{spherical} = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\psi^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_f^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

표 1. 중복 plot 유사성 score 표
Table 1. Plot correlation score table.

	z_1^{k+1}	z_2^{k+1}	z_3^{k+1}	z_4^{k+1}
z_1^k	p_{11}	p_{12}	p_{13}	...
z_2^k	p_{21}	p_{22}	NaN	...
z_3^k	NaN	p_{34}

계산된 p_{ij} 는 문턱치 검사를 수행한 뒤, 표 1과 같이 score table을 작성할 수 있으며, 통과 검사는 식 (6)과 같다.

$$p_{ij} \leq NDS_{Thd} \quad (6)$$

식 (6)에서 문턱치 NDS_{Thd} 는 chi-square 분포표를 통해 얻을 수 있으며, 본 논문에서는 4차원 벡터의 99.9 %를 이루는 13.82로 값을 설정했다. 만약 통과되지 못한 경우에는 NaN으로 표시하였다.

유사성 점수를 모두 산출한 다음에는 중복을 허용하지 않고 유사한 두 개의 plot을 찾아내야 한다. 위 표에서 z_2^k 는 z_1^{k+1} , z_2^{k+1} 모두와 연관이 있음을 알 수 있다. 하지만 중복으로 처리할 수 있는 dwell plot은 오직 한 개이므로 두 개의 plot 중 하나만을 선택하여 병합 혹은 제거해주어야 한다. 또한 z_1^k 도 z_1^{k+1} , z_2^{k+1} 와 연관성이 있으므로 z_2^k 의 선택 중복을 피하면서 최상의 연관 조합을 찾아내는 방법이 필요하다.

만약 두 plot 집합의 개수가 작으면 모든 조합을 찾는 것은 큰 무리가 아니다. 위의 예시에서는 총 64번의 계산을 통해 최적의 조합을 찾을 수 있다. 하지만 계산 횟수는 집단 A의 원소 개수가 m 개, 집단 B의 원소 개수가 n 개 이고 $m \leq n$ 일 때, $\left(\frac{n!}{(n-1)!}\right)^m$ 의 형태로 나타낼 수 있으므로 비교 집단의 개수가 커질수록 계산 횟수가 기하급수적으로 증가함을 할 수 있다. 따라서 빠르게 최적 조합을 찾아낼 수 있는 할당 알고리즘이 필요하다. 대표적인 할당 기법으로는 Hungarian^[6], Munkres^[7], JVC^{[8][9]}, GNN^[10] 등이 있다. 여기서 GNN Auction 알고리즘은 다른 알고리즘에 비해서 계산이 빠르면서도 상대적으로 정확하게 할당하는 알고리즘으로 널리 사용되고 있다. 그러므로 본 논문에서도 GNN 알고리즘을 이용하여 두 개의 plot을 선택한 뒤, 서로 합병하여 중복성을 제거해준다. 새롭게 산출되는 plot은 cluster plot으로 칭하게 되며 합병 방식은 신호 세기에 따른 탐지 정확성을 따르고자 plot에 대한 SNR 비례 방식으로 계산한다.

$$\hat{z} = \frac{\sum_{i=1}^m (SNR_i \times z_i)}{\sum_{i=1}^m SNR_i} \quad (7)$$

III. 추적 알고리즘 설계

본 장에서는 추적 필터와 GMTI 환경에 적합한 다중 표적 데이터 처리 기법을 소개한다.

3-1 GMTI 추적 필터

추적에서 사용하는 필터에는 대표적으로 칼만필터(Kalman filter)가 있다. 칼만필터는 확률 모델을 이용하여 표적의 상태를 추정하며, 표적에 대한 구조체를 트랙(track)이라고 표현한다. 칼만필터에서는 시간 예측(prediction)과 측정치 결합(update) 두 단계로 나뉘며 이때 그림 2는 칼만필터의 구조를 시간 흐름에 따라 나타낸 것이다.

여기서 시간 예측 단계는 과거 상태의 track을 표적 운동 모델을 이용하여 현재 또는 미래 시간으로 예측하는 과정이고, 측정치 결합은 예측 track과 plot을 결합하여 표적의 상태를 추정하는 단계이다. 칼만필터의 두 단계는 가우시안 확률 분포를 이용하여 표현된다.

$$p(x_k | z_{k-1}) = N(x_k; \bar{X}_{k|k-1}, \bar{P}_{k|k-1})$$

$$p(x_k | z_k) = N(x_k; \hat{X}_{k|k}, \hat{P}_{k|k}) \quad (8)$$

x_k 는 k 시간에서의 표적 상태변수를 의미하며, VCNEO 좌표계에서의 직각좌표계인 x, y, z 축 위치(p), 속도(v) 성분으로 나타내며, P_k 는 상태 오차 공분산을 의미한다.

$$x_{k, VCNEO} = [px, vx, py, vy, pz, vz]^T \quad (9)$$

z_k 는 측정치 plot으로 위 식 (2)의 형태를 따르며, 도플러 성분은 제외하고 사용한다. 이때 측정치와 표적 상태 벡터는 서로 다른 좌표계에서 표현되므로 직접적으로 결합이 불가하다. 그러므로 본 논문에서는 트랙의 상태 벡터와 비선형적 관계에 있는 측정치를 이용하여 표적의

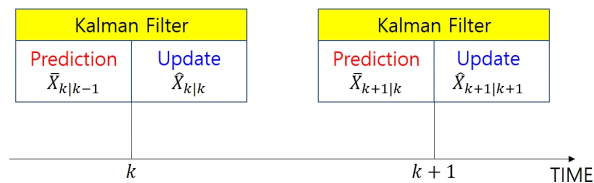


그림 2. 시간에 따른 칼만필터 구조

Fig. 2. Kalman filter on time.

상태를 추정하기 위해 비선형 칼만필터 EKF(extended kalman filter)를 사용한다^[11].

3-1-1 시간 예측 단계(Prediction)

시간 예측 단계에서는 과거의 표적의 상태변수를 운동 모델을 이용하여 다음 시간으로 예측하는 과정이다. 식 (10)은 시간 예측에 관한 상태 벡터와 상태 오차 공분산 계산 수식이다.

$$\bar{X}_k = F(dt) \hat{X}_{k-1} + U(dt)$$

$$\bar{P}_k = F \hat{P}_{k-1} F' + Q(dt) \quad (10)$$

보통 상태벡터 좌표계 원점은 변하지 않기 때문에 운동 모델(F)만을 이용하여 예측만 하지만 본 논문에서는 VCNEO 좌표계를 사용하므로 항공기 이동에 따라 상대적인 위치도 변하게 된다. 그러므로 예측 단계에서 항공기 위치 보상(U)이 필요하며, 이때 dt 는 시간 차이(주기)이다^[11].

운동 모델은 대상 표적이 지상 이동 차량임을 고려하여 CV(constant velocity) 모델을 사용한다. 그러므로 시스템 오차 공분산 Q 는 가속도 성분에 대한 불확실성이 추가되어 산출된다.

$$F(dt) = \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} p \\ v \end{pmatrix}$$

$$Q(dt) = \sigma_q^2 \begin{bmatrix} \frac{dt^4}{4} & \frac{dt^3}{2} \\ \frac{dt^3}{2} & dt^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3-1-2 측정치 결합 단계(Update)

측정치 결합 단계는 표적으로부터 기인된 plot과 예측 표적치를 결합하여 표적을 추정하는 단계로 상태 벡터와 상태 오차 공분산은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{X}_k = \bar{X}_k + K_k(z_k - h(\bar{X}_k))$$

$$\hat{P}_k = (I - K_k H_k) \bar{P}_k \quad (12)$$

K_k , S_k 는 Kalman gain, innovation 행렬로 Kalman gain은 innovation 행렬과 상태 오차 공분산을 이용하여 계산

할 수 있다.

$$\begin{aligned} S_k &= \bar{H}P_kH' + R_k \\ K_k &= \bar{P}_kH'S_k^{-1} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 R_k 측정치 잡음 공분산 행렬로 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_k = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\psi^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

H_k 는 상태 벡터 x_k 와 plot z_k 를 이어주는 관측행렬로 1차 선형화 과정을 통해 두 좌표계를 연결해 줄 수 있다.

$$H_k = \nabla_{x_k} h(x_k) \quad (15)$$

여기서, ∇_{x_k} 는 자코비안 형태로 식 (16)과 같이 표현된다.

$$\nabla = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial (px)} & \frac{\partial r}{\partial (vx)} & \frac{\partial r}{\partial (py)} & \frac{\partial r}{\partial (vy)} & \frac{\partial r}{\partial (pz)} & \frac{\partial r}{\partial (vz)} \\ \frac{\partial \theta}{\partial (px)} & \frac{\partial \theta}{\partial (vx)} & \frac{\partial \theta}{\partial (py)} & \frac{\partial \theta}{\partial (vy)} & \frac{\partial \theta}{\partial (pz)} & \frac{\partial \theta}{\partial (vz)} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial (px)} & \frac{\partial \varphi}{\partial (vx)} & \frac{\partial \varphi}{\partial (py)} & \frac{\partial \varphi}{\partial (vy)} & \frac{\partial \varphi}{\partial (pz)} & \frac{\partial \varphi}{\partial (vz)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

이때 직각좌표계와 원통좌표계의 관계는 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \theta &= \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \\ \psi &= \tan^{-1}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \end{aligned} \quad (17)$$

3-2 다수 표적 추적을 위한 Plot 할당 기법

표적 추적에서는 여러 개의 plot이 탐지될 수 있으므로 강인한 추적을 위해서는 추적 중인 표적으로부터 기인한 plot 데이터 선택이 필요하다. 특히, 그림 3과 같이 다수 표적을 추적하는 상황에서는 트랙의 예측 위치 공분산 내에 들어오는 측정치가 서로 중복되는 상황이 빈번하게 발생한다.

다수 표적을 추적하기 위한 대표적인 기법은 NN(nearest neighbor) 방식과 PDA(probabilistic data association)^[12] 방식이 있다. NN과 PDA 기법은 단일 표적 추적에 적합

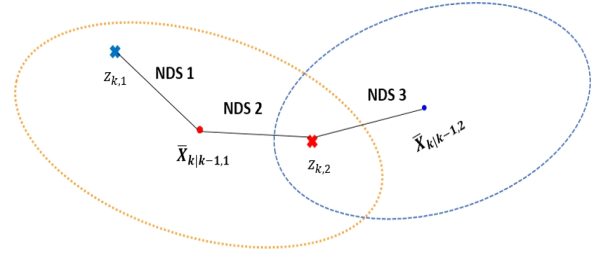


그림 3. 다수 표적 추적 상황

Fig. 3. Multiple target tracking situation.

한 방식이고 다수 표적 추적에 대해서는 NN 계열에 GNN(global NN), MHT(multiple hypothesis tracking)^[13] 알고리즘이 있으며, PDA 기법에는 JPDA(joint PDA)^[14], LMIPDA(linear multitarget integrated PDA)^[15] 등의 알고리즘이 있다. NN 계열은 적합한 plot을 선택하여 표적을 추정하는 기법이고 PDA 계열은 plot과의 연관 확률을 산출하여 Gaussian mixture를 통한 추적 기법이다. PDA 계열의 알고리즘은 고밀도 클러스터 상황에서 안정적이다. 그러나 연산량이 많다는 단점이 있다. 또한, 참고문헌 [13]에서와 같이 표적이 가깝게 붙어 있는 환경에서는 각 track마다 plot의 연관 확률이 비슷하게 산출되어 track이 한곳으로 뭉치게 되는 단점이 있다. 그러므로 PDA 계열은 GMTI 모드에 적합하지 않다는 결론을 내렸다.

NN 계열 중, GNN 기법은 track과 plot 연계를 한 번만 진행하지만, MHT 기법은 연계를 다차원으로 진행하기 때문에 클러스터 혹은 탐지 확률이 낮은 상황에서도 좀 더 정확하게 추적할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 다중 가설을 기반으로 하는 알고리즘으로서, 연산량의 급격한 증가를 막기 위한 track 삭제 및 합병 기법과 중복 할당을 방지하기 위한 다차원 할당 기법이 필요하므로, GNN 기법에 비해 소프트웨어 코드가 훨씬 복잡하고 정교한 설계가 요구된다. 그러므로 이번 시스템에서는 GNN 기법을 이용하고 향후 MHT 기법으로 업그레이드하고자 한다.

본 장에서 사용하는 GNN 기법과 앞서 II장에서 사용한 GNN 기법과의 차이는 할당을 위한 score 산출 방식에 있다.

$$p_{ij} = (\bar{X}_i^k - z_j^k)' S_k^{-1} (\bar{X}_i^k - z_j^k) + \ln |S_k| \quad (18)$$

II 장에서는 score 산출 시 innovation 공분산 S_k 의

determinant값을 계산하여 더해주지 않았다. 그러나 트랙에 측정치를 할당할 때는 따로 계산하여 score를 산출하는 데 사용된다. 그 이유는 트랙마다 크기가 서로 다른 상태 오차 공분산을 가지고 있기 때문이다. 칼만필터 특성상 트랙이 수렴되면 상태 오차 공분산의 크기는 작아진다. 그렇게 될 경우 S_k 의 크기도 작아지게 되므로 동일한 물리적 거리에 놓여 있는 측정치의 확률적 거리는 커지게 되어 불합리한 할당이 생길 수 있다. 그러므로 이를 방지하기 위해 보상 항목으로 S_k 의 determinant에 자연로그를 취해 더해주어 score 산출 방식의 형평성을 높인다.

또한 GMTI 모드에서는 표적의 도플러를 탐지할 수 있다. 일반적으로 차량은 도로 위에서 운동하기 때문에 양방향 통행에 대한 도플러값의 부호는 반대가 된다. 트랙에 대한 측정치 할당 시 위치 성분만을 고려하게 된다면 서로 마주 보고 운동하는 표적에 대해서는 할당 오류가 생길 수 있다. 그러므로 도플러 성분을 사용하여 측정치를 할당하는 것이 유리하다. 그러나 트랙의 상태 벡터에는 도플러 성분이 없으므로 주어진 상태 벡터 값을 이용하여 도플러를 계산한다. 도플러는 거리 변화율과 같으므로 식 (19)로 나타낸다.

$$f = \dot{r} = \frac{\dot{x}\dot{x} + \dot{y}\dot{y} + \dot{z}\dot{z}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (19)$$

위 식 (19)를 통해 트랙에서의 도플러를 계산할 수 있다. 산출된 도플러는 측정치 도플러와 비교하여 연관성을 검사하게 되는데 서로의 값이 큰 차이가 없으면 식 (18)과 같은 score를 계산하는 단계로 넘어가고 만약 경향성 차이가 크면 score를 계산하지 않는다. 이렇게 하면 방향이 서로 다른 표적에 대해 연관하는 오류를 줄일 수 있으며, 또한 score를 계산하지 않으므로 처리장치의 연산량을 감소시킬 수 있다.

IV. 시험 결과

4.1 시험 환경

GMTI 알고리즘 설계에 대한 기능 및 성능 검증 시험은 테스트 비행기(FTB, flight test bed) 전방에 AESA 레이더를 장착하여 수행했다. 표적 정확성 평가를 위해 GPS

를 탑재한 표적 차량을 운행했으며, 이때 표적은 약 3.6 km 직선도로를 40 km/h(13 m/s)로 운동했고, FTB의 기축선으로부터 표적은 10도 이내에 위치한다. 또한 표적 운용성과 안전한 시험을 위해 비교적 차량이 적은 곳에서 두 대의 GPS 탑재 표적을 운용했다. 그리고 FTB는 180 m/s 속력으로 level flight한다.

4.2 추적 정확성

시험 결과는 추적 정확성으로 확인할 수 있다. 표적 track에 저장된 시간은 성능 확인을 위해 표적이 탐지된 시간과 track이 처리된 시간이 있는데, 추적 정확성을 위해 탐지된 시간을 기준으로 한다. 또한 좀 더 정확하게 정확성을 산출하기 위해 표적 GPS를 interpolation하여(위치, 속도, 시간) track 시간과 동기화하여 비교한다.

추적 정확성 분석 항목은 크게 위치와 속도를 볼 수 있다. 위치 요소로는 VCNED 좌표계 기준에서의 거리, 방위각 그리고 고각 성분과 속도 성분을 비교할 수 있다.

그림 4는 표적 GPS 탑재 차량과 표적 track 및 탐지된 clustering plot 및 dwell plot을 위성지도 위에 전시한 것이다. 전시된 성분에 대한 특징은 다음과 같다. TWS track(marker: square, color: green), Clustering plot(marker: circle, color: blue), Dwell plot(marker: circle, color: red), GPS



그림 4. 위성지도 위에서의 추적 위치 (전 구간)
Fig. 4. Target position on satellite map (total time).



그림 5. 위성지도 위에서의 추적 위치(부분 구간)
Fig. 5. Target position on satellite map (partial time).

target(marker: circle, color: magenta, cyan).

그림 5는 시험의 부분 구간만을 보여준 그림이다. 본 시험에서는 표적 운용지에서 한 대의 기회표적 (GPS 탑재 표적 차량이 아닌 것)과 마주 보고 달리고 있는 두 대의 GPS 탑재 표적이 추적되는 것을 확인할 수 있다.

다음은 거리, 방위각, 고각 그리고 속도에 대한 오차 그래프이다. 분석 대상은 cyan색으로 표현되는 GPS 표적이다. 이때 그래프의 가로축은 빔의 scan index 정보이고, 세로축은 각 성분에 대한 오차이다.

그림 6은 운용 표적에 대한 거리 오차로 TWS track 및 연관된 clustering plot(추정치) 그리고 clustering plot을 이루는 dwell plot(추정치) 성분을 모두 나타냈다. 시험 결과,

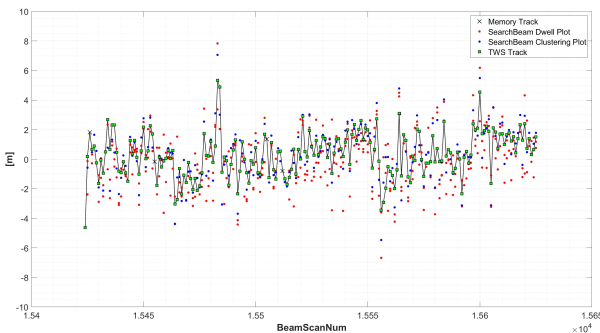


그림 6. 운용 표적 거리 오차
Fig. 6. Error of target range.

전반적으로 트랙이 측정치보다 오차가 작은 것으로 보인다. 또한 clustering plot은 중복으로 여겨지는 dwell plot들을 묶어 중복을 제거했기 때문에 오차 편차가 좀 더 작은 것을 확인할 수 있다.

그림 7과 그림 8은 운용 표적에 대한 방위각과 고각 오차를 나타낸 것으로 그림 6과 같이 TWS track, clustering plot, dwell plot에 대한 오차를 보여준다. 방위각, 고각 또한 거리와 유사하게 트랙이 측정치를 이용하여 표적 상태를 잘 추정하고 있으며, clustering plot이 dwell plot 보다 편차가 작은 것을 볼 수 있다. 이것을 통해 TWS 방식에서는 중복되는 측정치를 해결하기 위해 유사한 측정치를 clustering하는 방법이 적절한 것을 알 수 있다.

그러나 시간이 지날수록 방위각, 고각에 대한 세 성분 모두 오차가 커지는 것을 볼 수 있다. 현재 이 부분은 모노펄스 추정, 레이돔 보정 그리고 안테나 정렬 문제로 인해 오차가 있는 것으로 보인다.

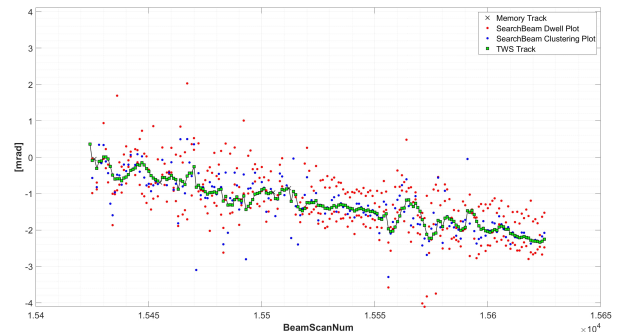


그림 7. 운용 표적 방위각 오차
Fig. 7. Error of target azimuth.

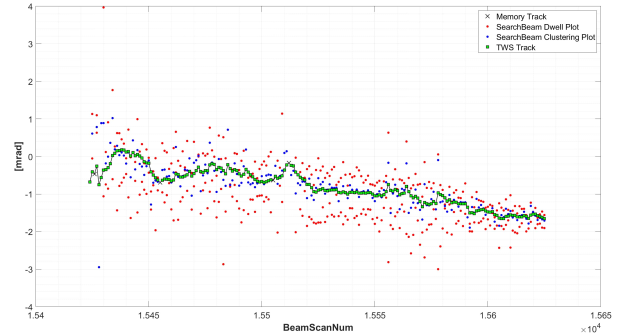


그림 8. 운용 표적 고각 오차
Fig. 8. Error of target elevation.

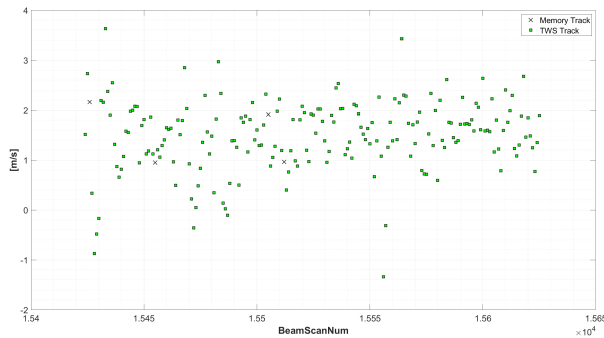


그림 9. 운용 표적 속도 오차

Fig. 9. Error of target speed.

마지막으로 그림 9는 표적 속도 성분에 대한 오차 그래프이다. 측정치는 도플러 성분밖에 없으므로 트랙의 속도만을 비교했다. 속도는 표적 상태 벡터의 각 축 속도 성분에 norm을 취해 획득했다.

표적에 대한 속도 추정 오차는 $[-1.5 \text{ m/s}, 4 \text{ m/s}]$ 에서 $N(x_k - \hat{X}_k^{velocity}; 1.5 \text{ m/s}, 0.5 \text{ m/s})$ 의 가우시안 분포를 나타내고 있다. 이것을 통해 약한 오차 bias가 생기는 것을 알 수 있고, 편차가 작아 속도를 안정적으로 추정하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 속도 또한 각 축의 위치 성분을 통해 추정되므로 방위각, 고각 오차가 증가됨에 따라 미세하게 오차가 커지는 부분이 확인되었다.

위 네 가지 항목을 통해 전반적인 성능은 시스템 규격을 만족하는 것으로 확인된다. 그리고 추적 필터가 안정적으로 표적을 추적한 점과 두 대의 표적 GPS 차량과 같은 도로를 달리던 기뢰표적을 혼동하지 않고 추적을 유지한 점에 있어서 GMTI 추적 설계가 잘된 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 항공기 레이더에서의 지상 이동 표적 추적 설계 기법을 제시했다. 특히 수많은 표적을 추적하기 위해 TWS 기반의 레이더 운용 방안을 제시했고, 그에 따라 요구되는 중복 plot 제거 방법과 다수 표적 추적 기법을 소개했다. 그리고 실제 환경에서의 GMTI 모드 기능 및 성능 확인을 위해 FTB에 AESA 레이더를 탑재하여 운용했고, 표적 차량에는 GPS를 장착하여 시험했다. 비행 시험 결과, 지상 이동 표적을 안정적으로 추적하는 것을

확인했다. 또한 표적 차량과의 GPS 위치를 통해 추적 정확성을 분석하여 GMTI 모드의 추적 성능을 검증했다.

References

- [1] G. W. Stimson, *Introduction to Airborne Radar*, Mendham, NJ, SciTech, pp. 32-35, 2014.
- [2] G. Cai, B. M. Chen, and T. H. Lee, *Unmanned Rotorcraft Systems*, London, Springer, pp. 23-34, 2011.
- [3] I. Moir, A. Seabridge, *Military Avionics Systems*, Chichester, John Wiley & Sons, pp. 107-111, 2006.
- [4] A. D. Brown, *Electronically Scanned Arrays: MATLAB Modeling and Simulation*, Boca Raton, FL, CRC Press, pp. 6-8, 2012.
- [5] D. H. Ham, B. Y. Jeong, U. S. Seo, B. H. Yun, and W. S. Na "Multiple-detection data association for airborne AESA radars in the TWS mode," in *The 51th KIEE Summer Conference 2020*, Busan, Jul. 2020. pp. 1928-1929.
- [6] H. W. Kuhn, "The Hungarian method for the assignment problem," *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 2, no. 1-2, pp. 83-97, Mar. 1955.
- [7] F. Bourgeois, J. C. Lassalle, "An extension of the Munkres algorithm for the assignment problem to rectangular matrices," *Communications of the ACM*, vol. 14, no. 12, pp. 802-804, Dec. 1971.
- [8] D. B. Malkoff, "Evaluation of the Jonker-Volgenant-Castanon(JVC) assignment algorithm for track association," *SPIE Proceedings*, vol. 3068, pp. 228-239, Jul. 1997.
- [9] D. F. Crouse, "On implementing 2D rectangular assignment algorithms," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 52, no. 4, pp. 1679-1696, Aug. 2016.
- [10] S. Blackman, R. Propoli, *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*, Norwood, MA, Artech House, 1999.
- [11] B. Ristic, S. Arulampalam, and N. Gordon, *Beyond the*

- Kalman Filter: Particle Filters for Tracking Applications*, Norwood, MA, Artech House, pp. 103-106, 2004.
- [12] B. S. Yaakov, P. K. Willett, and X. Tian, *Tracking and Data Fusion: A Handbook of Algorithms*, Storrs, CT, YBS, pp. 70-78, 2011.
- [13] S. S. Blackman, "Multiple hypothesis tracking for multiple target tracking," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 19, no. 1, pp. 5-18, Jan. 2004.
- [14] J. A. Roecker, "A class of near optimal JPDA algorithms," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, no. 2, pp. 504-510, Apr. 1994.
- [15] D. Musicki, S. Suvorova, and S. Challa, "Multi target tracking of ground targets in clutter with LMIPDA-IMM," in *Proceedings of the Seventh International Conference on Information Fusion*, Stockholm, pp. 1104-1110, Jun.-Jul. 2004.

이 원 준 [국방과학연구소/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7546-0947>



2015년 2월: 한양대학교 전자시스템공학과 (공학사)

2017년 2월: 한양대학교 전자시스템공학과 (공학석사)

2017년 2월~현재: 국방과학연구소 연구원

[주 관심분야] 레이더 시스템 추적 설계