

실시간 시뮬레이터를 이용한 고밀도 클러터 환경에서 방공 레이다 표적 탐지 및 추적 시뮬레이션

Target Detection and Tracking Simulation of Air Defense Radar in High-Density Clutter Environments Using a Real-time Simulator

남정훈 · 고일석 · 박승효* · 이종민**

Jeong-Hun Nam · Il-Suek Koh · Seung Hyo Park* · Jong Min Lee**

요 약

실시간 시뮬레이터인 vsTasker를 이용하여 방공망 레이다의 표적 탐지 및 추적 시뮬레이션 알고리즘을 제안한다. 레이다 안테나 빔, 펄스 반복 시간, 분당 회전수 등 실 레이다 스펙을 고려하여 탐색 공간을 분할하고, 비행체의 움직임에 따른 위치의 시계열 데이터를 생성한다. 위치의 부정확성을 신호 대 잡음비 기반으로 생성하고, 고밀도클러터 환경에서의 반사 신호 분포는 와이블 분포로 가정한다. 시뮬레이션 된 비행체 움직임은 LM-IPDA 기법을 이용하여 항적을 생성한다.

Abstract

This paper proposes a target detection and tracking simulation algorithm for an air defense radar compatible with the real-time simulator of vsTasker. Searching spaces are divided based on practical radar specifications such as the radar antenna beam, pulse repetition time, and revolutions per minute. Time-series data of the position corresponding to the movement of the airborne target are generated. A detection error is randomly generated depending on the signal-to-noise ratio and in a high-density clutter environment; the distribution of reflected signals by the clutter is assumed to be a Weibull distribution. The simulated radar position of targets is processed using a LM-IPDA technique to generate the target track.

Key words: vsTasker, High-Density Clutter Environment, Target Tracking, LM-IPDA

I. 서 론

국방 M&S(modeling & simulation)는 무기 시스템 및 시스템 운용 연구에 핵심적인 역할을 하고 있고, 이의 중요성이 컴퓨터 발전으로 지속적으로 증대되고 있다^[1]. 국방 M&S는 해상도에 따라 전구급, 임무급, 교전급, 공학급으

로 분류된다^[2]. 대한민국 공군 및 JCS(joint chiefs of staff)는 저해상도 모델인 전구급 및 임무급을, 국방과학연구소(ADD)는 고해상도 모델인 교전급과 공학급을 개발/사용한다^{[3][4]}. 미래 전장 상황을 고려할 때, 고해상도의 합동 및 연합 전장을 고려한 시뮬레이션 방법 개발은 매우 중요하다^[5]. 본 논문에서 고려하는 자동화 방공체계 항적

인하대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Inha University)

*한양대학교 전자시스템 공학부(Department of Electronic Systems Engineering, Hanyang University)

**LIG 시스템(LIG System)

· Manuscript received July 14, 2020 ; Revised July 30, 2020 ; Accepted August 24, 2020. (ID No. 20200714-059)

· Corresponding Author: Il-Suek Koh (e-mail: ikoh@inha.ac.kr)

추적 M&S 시나리오는 다중 비행체를 고려한 실제 항적 중앙방공통제소(master control and report center: MCRC)의 운용이다. MCRC에서 사용하는 탐지/추적 알고리즘의 성능을 평가하기 위해서는 레이더에 탐지된 비행체 데이터가 필요하다. 즉, 여러 대의 대공 레이더로부터 다중 표적을 탐지하여 획득한 데이터를 MCRC에서 취합한 후, 각 표적의 항적 분리/추적 및 항로 통제 등에 대한 데이터가 필요하다. 그러나 실 데이터의 획득은 매우 어려워 M&S 방법은 대안이 될 수 있다. 시뮬레이션 시 레이더로 수백 km의 영역에 분포되어 있는 천대 이상의 표적의 위치를 매우 효율적으로 탐지해야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 상업용 tool인 vsTasker을 사용한다^[6]. vsTasker는 실시간 시뮬레이션 개발 도구로써 타격체계 및 탐지체계 성능, 전자전 성능 등의 효과도 분석에 사용되어 왔다^{[6][7]}.

항적중앙방공통제소 시뮬레이션에 현 공군에서 사용 중인 록히드 마틴에서 제작한 3차원 장거리 능동형 전자주사식 위상배열(active electronically scanned array: AESA) 대공 레이더 FPS-117을 기본 레이더로 고려한다. FPS-117은 일정 속도로 회전하며 표적의 위치 및 정보를 식별한다. 또한 서로 다른 펄스 폭을 갖는 두 개의 빔을 사용하여 장거리와 단거리 내 표적을 효율적으로 탐지한다. 알려진 분당 회전수(revolution per minute: RPM), 동작 주파수, 안테나 이득, 반전력빔폭(half power beam width: HPBW)과 같은 실 레이더 사양을 사용하여 vsTasker용 레이더 모델을 구축한다. 비행체의 항공궤적과 각 비행체 위치의 시계열 데이터는 vsTasker를 이용하여 생성할 수 있다. 또한 와이불(Weibull) 분포를 갖는 클러터(clutter)를 고려하여 고밀도 클러터 환경을 모사한다. 제안된 방법으로 생성된 데이터를 비행체 항적 탐지/추적 알고리즘에 적용하여 제안된 방법의 유용성을 검증한다. II절에서는 FPS-117 레이더 모델의 물리적 구현과 고밀도 클러터 환경과 탐지 표적으로부터의 수신 신호 및 추적 알고리즘을 기술한다. III절에서는 운영 제원을 고려한 시나리오에 대한 성능 시뮬레이션을 제시한다.

II. 본 론

2-1 레이더 표적 탐지 알고리즘

그림 1은 장거리 레이더의 동작 알고리즘을 보여준다.

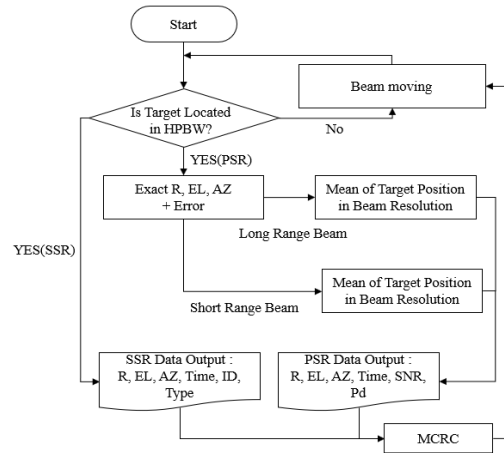


그림 1. FPS-117 레이더 구현 알고리즘.
Fig. 1. FPS-117 radar simulation algorithm.

장거리 레이더는 두 개의 서로 다른 펄스폭을 갖는 장/단거리 탐지 빔(long/short range beam)을 사용하며, PSR(primary surveillance radar)과 SSR(secondary surveillance radar)로 구성되어 있다. PSR과 SSR의 단일탐색 빔은 주변의 탐색 빔과 반전력빔폭의 20 % 겹치게 설정하여 표적이 탐지되는 공간과 인접한 빔에 의해 중복 탐지되는 것을 최소화하도록 차별화한다^{[5],[8]}. 반전력빔폭 내에 표적이 위치할 경우, PSR을 통해 탐지된 표적의 위치는 레이더의 잡음 특성으로 인해 오차가 발생하며^[9], SSR은 표적과 위치 정보를 교신함으로 상대적으로 정확한 위치를 알 수 있다^[10]. 레이더 거리 해상도에 따라 표적의 위치를 계산하고, 최종적으로 PSR은 표적의 위치와 탐지 시간, 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR), 탐지 확률율, SSR은 표적의 위치와 탐지 시간, 표적 식별자(ID)와 유형(type)을 MCRC로 송신하여 항적을 추적한다. ID는 각 항공기마다 부여되며, 본 연구에서는 아군기, 민항기, 적군기로 분류된다. R, EL, AZ는 각각 레이더로부터 탐지된 표적의 거리, 고각, 방위각을 나타낸다.

2-2 표적 탐지 모델링

표적 탐지 모델링을 위해 레이더 방정식을 이용하여 표적의 신호대 잡음비를 계산한다^[9].

$$SNR = \frac{P_r}{N} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T B W} \quad (1)$$

P_r 은 표적의 레이더 수신전력이며, P_t 는 송신 전력, G 는 안테나 이득, λ 는 레이더 주파수의 파장, σ 는 표적의 RCS(radar cross section) 값, R 은 레이더로부터 표적까지의 거리이다. N 은 레이더의 잡음이며, k 는 볼츠만 상수, T 는 레이더의 온도, $BW=c/(2res)$ 에서 c 는 빛의 속도, res 는 레이더의 거리 해상도를 나타낸다. 탐지된 표적은 식 (2)를 이용하여 거리에 따른 탐지 확률(P_d)을 계산하며^[11], 난수를 생성해 P_d 와 비교하여 탐지/미 탐지를 결정한다. 여기서 P_{faT} 는 표적의 오경보율(false alarm rate)이며, $erfc(\cdot)$ 는 상보 오차 함수이다^{[12],[13]}.

$$P_d = 0.5 \cdot erfc(\sqrt{-\ln(P_{faT})} - \sqrt{SNR+0.5}) \quad (2)$$

표적의 RCS는 모든 비행체에 대해 일정하다고 가정한다. 장거리 레이더는 최대 탐지 거리(R_{max})에서의 최소 탐지 확률(P_{dmin})이 정의되며^[13], 식 (1)과 (2)를 이용하여 최대 탐지 거리에서 표적의 신호대 잡음비(SNR_{min})를 계산하고, 이를 이용하여 주어진 최소탐지확률에 부합하는 표적의 RCS를 다음과 같이 역으로 추정할 수 있다.

$$SNR_{min} = [\sqrt{-\ln(P_{faT})} - erfc^{-1}\left(\frac{P_{dmin}}{0.5}\right)]^2 - 0.5$$

$$\sigma = \frac{SNR_{min}(4\pi)^3 R_{max}^4 kTBW}{P_T G^2 \lambda^2} \quad (3)$$

$erfc^{-1}(\cdot)$ 는 역 상보 오차 함수이며, 식 (3)으로 계산된 표적의 RCS는 식 (1)의 σ 에 대입함으로써 각 표적 거리에 따른 SNR 을 계산한다.

탐지 위치의 오류는 표적의 실제 위치에 SNR 을 이용해 계산된 Gaussian 랜덤 값을 더함으로써 생성한다. 식 (4)는 거리, 고각, 방위각의 분산(variance)을 보여준다^[9].

$$\Delta R = \frac{c}{2f_c \sqrt{2(SNR)}}$$

$$\Delta EL = \frac{HPBW_{EL}}{k_M \sqrt{2(SNR)}}$$

$$\Delta AZ = \frac{HPBW_{AZ}}{k_M \sqrt{2(SNR)}} \quad (4)$$

$\Delta R, \Delta EL, \Delta AZ$ 는 각각 거리, 고각, 방위각 오차의 분산 값이며, f_c 는 변조 주파수, k_M 은 모노펄스 기울기, $HPBW_{EL}, HPBW_{AZ}$ 는 고각, 방위각의 반전력빔폭을 나타낸다.

2.3 고밀도 클러터 환경

레이더는 균일한 잡음 환경에서는 설계된 오경보율을 유지할 수 있으나, 클러터가 존재하는 환경에서는 탐지확률이 저하된다^{[14],[15]}. 클러터 신호를 정확하게 계산하는 것은 수치적으로 매우 비효율적이므로 본 논문에서는 고밀도 클러터 환경에서는 오경보율을 높여 표적 탐지 확률을 감소시킨다. 그림 2은 오경보율과 SNR 에 따른 표적 탐지 확률 그래프를 나타낸다^[11]. SNR_T 는 클러터 환경이 고려되지 않을 경우로 식 (1)로 계산할 수 있다. 이때, 오경보율(P_{faT})은 10^{-9} , 최소 탐지확률은 80 %로 가정한다. 고밀도 클러터 환경에서는 오경보율(P_{faC})이 10^{-6} 로 줄어든다. 이때 표적의 SNR 은 클러터 반사신호가 잡음으로 모델링되어, α 만큼 감소한 SNR_C 가 된다. 이는 와이블 분포 클러터의 근사적 모델링 기법을 통해 식 (5)와 같이 계산된다^[16].

$$\frac{P_r}{N_C} = \frac{P_r}{N} + \alpha$$

$$\sigma_0 = \frac{N_C}{N} = \frac{1}{1 + \alpha/SNR_T}$$

$$\sigma_C = \frac{\sigma_0}{\Gamma(1+s)} \cdot (-\ln(rand))^s$$

$$SNR_C = \frac{P_r}{N \cdot (1 + \sigma_C)} \quad (5)$$

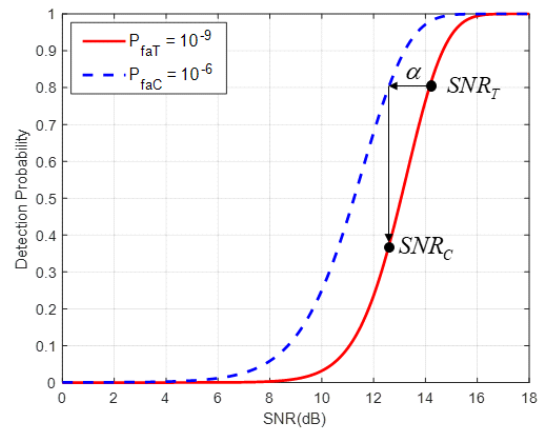


그림 2. 고밀도 클러터 환경 내 표적의 SNR 에 따른 탐지 확률

Fig. 2. Detection probability for high-density clutter environment.

P_r/N_C 와 P_r/N 은 각각 SNR_C 와 SNR_T 이며, N_C 는 고밀도 클러터 환경에서의 레이더 잡음이다. N 과 N_C 의 비를 통해 평균 클러터 후방 산란, σ_0 를 고려한다. $I(\cdot)$ 는 감마 함수이며, 클러터 종류에 따른 와이블 분포 함수 형상 변수 s 를 고려하여 와이블 클러터의 σ_C 를 계산한다^[16]. $rand$ 는 0과 구간에서의 균일난수(uniform random variable)이다. 최종적으로 σ_C 는 고밀도 클러터 환경 내에 위치한 표적의 SNR_C 의 잡음이 된다. 고밀도 클러터 환경에 존재하는 표적의 항적의 추적에는 LM-IPDA(linear multi-target integrated probabilistic data association)기법과 같은 높은 정확도의 알고리즘이 요구된다^[17].

2.4 항적 추적 알고리즘

잡음이 포함된 측정치를 이용하여 추적하고자 하는 표적의 상태정보(위치, 속도, 가속도)를 추정하는 기법 중 대표적인 방법이 칼만 필터이다^[18]. 칼만 필터의 수행은 측정치를 받기 전 운용자가 설계한 동역학 모델에 대해 예측과정과 측정치를 획득 받은 후 이 측정치를 사용하여 표적의 상태 정보를 쇄신하는 쇄신과정으로 나뉜다. 실제 레이더 감시시스템에서 획득되는 측정치들에는 추적 시스템에서의 관심대상인 표적 이외에 클러터들도 다수 포함되어 있다. 이 경우, 칼만 필터만 사용하면 표적 추적이 제대로 이루어지지 않을 수 있다. 따라서 이러한 클러터 환경에서 효율적으로 표적을 추적하기 위해서는 표적에 대한 정보를 효과적으로 추출하는 과정이 요구된다. 추적을 수행 중인 각 트랙마다 표적존재확률이라는 평가수단을 부여하고, 이 값을 기반으로 트랙의 개수를 제어하는 트랙관리 기법이 적용된 IPDA(integrated probabilistic data association) 알고리즘이 있다^[19]. 트랙관리기법은 표적존재확률이 설정된 확정 문턱값(confirmation threshold)보다 높을 경우, 확정트랙(confirmed track)으로 분류되고, 제거 문턱값(termination threshold)보다 낮게 되면 표적이 아닌 클러터를 추적 중이라고 판단하여 추적을 더 이상 수행하지 않고 제거된다. 이 방법은 매 스캔 자동적으로 수행한다. 추적영역 안에 다수의 표적이 존재할 수 있으며, 각 표적은 서로 편대 또는 교차하는 환경이 발생할 수 있다. 이는 트랙의 유효추적영역 안에 들어온 측정치를 ‘표적’ 또는 ‘클러터’로만 분류하게 되면 인접표적들에

대한 추적성능이 감소할 수 있다. 따라서 이 측정치를 ‘다른 표적에서 기인된 측정치’라는 카테고리를 추가하고, 이 측정치의 연관확률을 클러터의 밀도에 반영하여 새로운 클러터 밀도(modulated clutter density)를 산출하는 LM-IPDA 알고리즘이 제안되었다^[17]. LM-IPDA는 각 트랙마다 부여된 표적존재확률을 기반으로 추적을 수행하는 알고리즘으로서, 이 표적존재확률이 modulated clutter density를 산출하는데 사용되며, 이 새로 산출된 클러터 밀도는 다시 자료연관 확률 및 표적존재확률을 산출하는데 사용된다. LM-IPDA는 트랙과 측정치간의 할당 없이 modulated clutter density를 이용하여 다수의 표적들에 대한 트랙들 간의 뭉침 및 서로 바뀌는 현상 없이 견실한 추적성능을 보인다. 또한 각 트랙들의 유효측정치마다 클러터 밀도를 수정하기 때문에 표적의 수에 따라 연산량이 선형적으로 증가하여 실용성이 높다는 장점을 지닌다.

III. 시뮬레이션 결과

자동화 방공체계 항적 추적 알고리즘의 성능 분석을 위해 고려하는 FPS-117 레이더 파라미터는 표 1과 같으며, 표적 탐지를 위한 시뮬레이션 파라미터는 표 2와 같다^[13]. 레이더는 약 5 RPM로 빔을 스캔하며, 스캔 방법은 참고문헌 [5]에서 자세히 언급된다. 그림 3과 같이 장/단거리 빔 영역에 표적들이 존재할 때 표적의 탐지/미 탐지를 보여주며, 원으로 표시된 표적은 탐지된 경우를 나타낸다. 레이더로부터 거리가 멀어질수록 미탐지되는 표적들이 증가하며, 빔 스캔마다 그림 3(a)와 그림 3(b)에서 보듯이 탐지/미 탐지 표적이 다르다. 그림 4은 1개의 레이더와 1개의 표적이 존재할 때 좌표, SNR과 탐지 확률을 보여주고, 이때, 항공기는 180 m/s의 속력으로 등속직선운동을 가정한다. 시뮬레이션 시간은 10분이며, 그 중 고밀도 클러터 환경이 위치한 부분을 확대하여 나타냈다. 그림 4(a)에서 보듯이 거리가 약 440 km인 표적은 고밀도 클러터 환경을 통과하여 비행하며, 고밀도 클러터 환경의 중심 좌표는 $[-442.2, 12.6, 8.96]$ km이다. SSR은 정확한 위치를 표적으로부터 수신하므로 정확한 좌표값을 얻을 수 있지만, PSR은 좌표 값에 오차가 발생하게 된다. 그림 4(b)에서 표적의 SNR 및 탐지 확률을 보여준다. 약 74초

표 1. 레이더 파라미터^[13]Table 1. Radar parameters^[13].

Parameter	Value
Frequency	L-band
RPM	5 RPM
Maximum detection range	470 km
Maximum detection altitude	30.5 km
Transmit power	24.5 kW
Elevation beam width(PSR)	2 deg
Elevation beam width(SSR)	21.6 deg
Azimuth beam width	2.2 deg
Detection elevation range	-1.6~+20 deg
PRT	Long: 3.5 ms Short: 0.6 ms
Pulse width	Long: 51.2 μ s Short: 409.6 μ s
Antenna gain	Long: 50,000 Short: 10,000
Range resolution	Long: 80 m Short: 100 m

표 2. 시뮬레이션 파라미터

Table 2. Simulation parameters.

Parameter	Value
Radar temperature (T)	270
Mono-pulse slope (k_M)	1.2
Shape parameter (s)	1.8 ^[16]
P_{faT}	10^{-9}
P_{faC}	10^{-7}
Minimum detection probability	80 %

에서 표적은 고밀도 클러터 환경을 통과하게 되며, 따라서 신호 대 잡음비는 14.2 dB에서 11.22 dB로, 탐지 확률은 80.3 %에서 55 %까지 저하된다.

합동/연합 훈련 시나리오와 같이 다중 표적이 존재할 경우 항적 추적은 매우 어려우므로 그림 5와 같이 다양한 시나리오에서의 분석이 필요하다. 항적 추적을 하지 않을 경우, 오차로 인해 항적 추적 및 분리가 매우 어렵다. 하지만 LM-IPDA 알고리즘을 통해 항적을 추정할 경우, 각

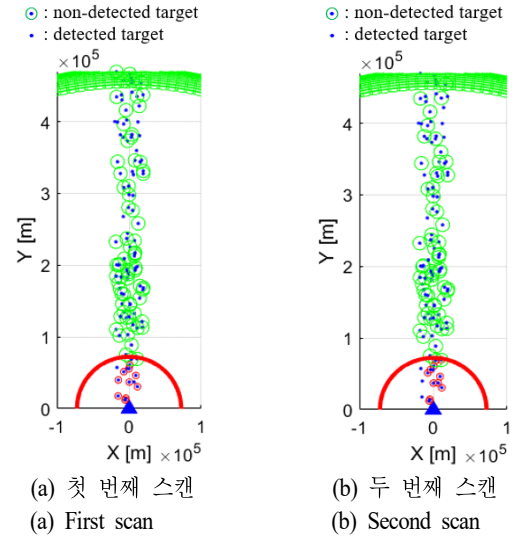
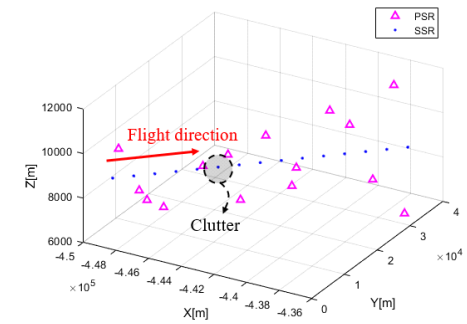


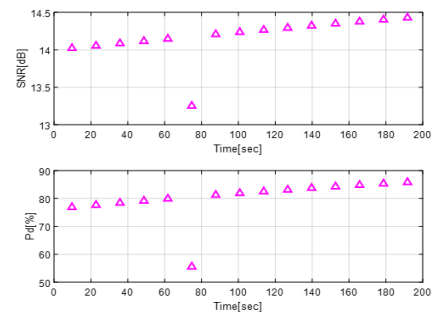
그림 3. 표적 거리에 따른 표적 탐지/미탐지

Fig. 3. Target detection/non-detection vs range.



(a) 레이더에서 탐지된 표적의 x, y, z 좌표

(a) x, y, z coordinates of target detected by radar

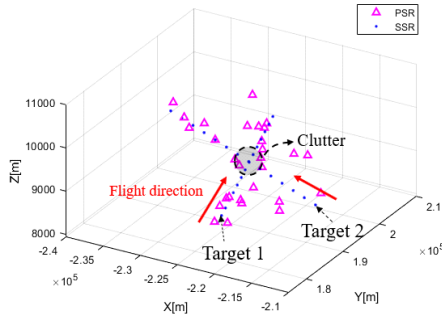


(b) 시간에 따른 SNR 및 탐지 확률

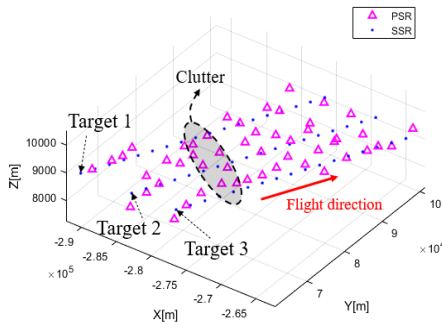
(b) SNR & detection probability

그림 4. 고밀도 클러터 환경이 있는 경우

Fig. 4. High-density clutter environment.



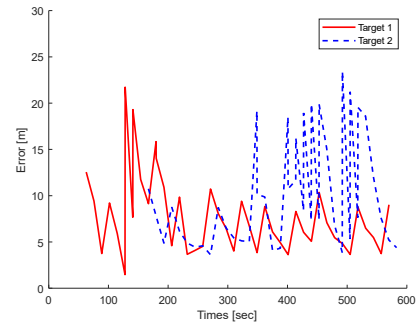
(a) 교차비행 시뮬레이션
(a) Cross flight simulation



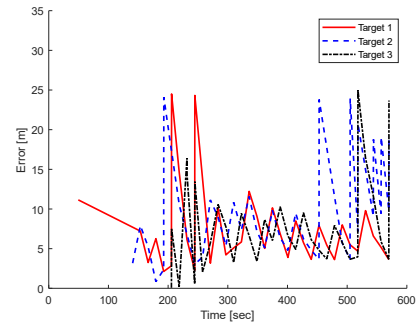
(b) 편대비행 시뮬레이션
(b) Flight formation simulation

그림 5. 복잡한 시나리오의 항적 추적
Fig. 5. Flight tracking for two complicated scenarios.

표적에 대한 항적의 구별이 가능해지게 된다. 그림 5(a)는 2개의 표적이 동시에 고밀도 클러터 환경에서 100 m 높이차로 교차 비행하며, 180 m/s로 등속직선운동 시나리오이다. 그림 5(b)는 3대의 표적이 약 2 km 간격을 유지하며, 180 m/s로 편대 비행을 하며, 고밀도 클러터 환경을 통과하는 등속직선운동 시나리오이다. 그림 6(a)와 그림 6(b)에서 각각 교차비행 및 편대비행 표적들의 실제 궤적과 추정치와의 오차를 시간에 따라 표현하였다. 추정치의 경우, 트랙의 표적존재 확률이 운용자가 설정한 문턱값(0.99)보다 높은 확정트랙에 대해서 산출하였기 때문에 시뮬레이션 초기 구간에서는 아직 확정트랙으로 분류되지 않아서 오차가 산출되지 않았다. 두 시나리오 모두 모든 표적에서 트랙의 뭉침과 같은 트랙 손실 없이 건실한 표적추적 성능을 보인다. 그림 7는 5개 레이더에서 1,000개의 표적을 탐지하는 시나리오에서 특정 표적의 항적



(a) 교차비행 표적들에 대한 추정 오차
(a) Estimation error for cross targets



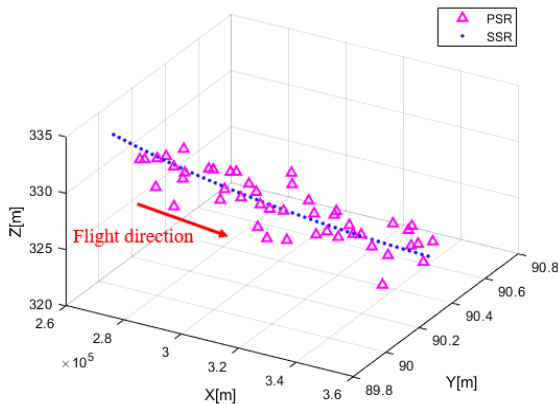
(b) 편대비행 표적들에 대한 추정 오차
(b) Estimation error for formation targets

그림 6. 두 시나리오에 대한 추정 오차
Fig. 6. Estimation error for target.

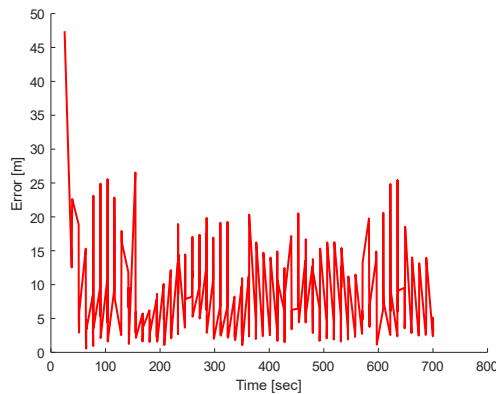
추적 시뮬레이션과 추정 오차를 보여주며, 표적 식별자는 9,168이다. 다수의 레이더로부터 측정치가 입수될 때마다 추적 알고리즘이 수행되기 때문에 하나의 레이더를 쓰는 경우, 그림 7보다 쇄신 주기가 짧다. 다수의 레이더로부터 획득된 측정치들을 한 곳으로 모아 추적을 수행하더라도 트랙 손실 없이 추적이 가능함을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 고밀도 클러터 환경을 고려한 방공 레이더의 표적 탐지 및 추적하는 효율적인 알고리즘을 제안하였다. FPS-117 레이더의 빔 특성에 따라 빔 투영 영역을 차별화하고, 빔 탐지 시간을 분당 회전수에 따라 결정하였다. 레이더 방정식을 이용하여 탐지된 표적의 거리에 따른 추정 오차를 계산한다. 와이블 분포 클러터를 가



(a) 특정 표적의 항적
(a) Tracking of specific target



(b) 특정 표적의 추정 오차
(b) Estimation error of specific target

그림 7. 다중 표적 시나리오

Fig. 7. Multi-target scenario.

정하고 고밀도 클러스터 환경 내에 표적이 위치할 경우, 표적의 잡음에 클러스터의 영향을 고려하여 신호 대 잡음비를 높여 표적 탐지 확률을 저하시켰다. 항적추적 알고리즘인 LM-IPDA를 이용하여 추정된 항적과 SSR의 항적과 비교함으로써 다양한 시나리오에서의 항적의 정확도를 보였다. 또한 합동/연합 훈련 시나리오를 고려하여 다중 표적이 존재할 경우에서 레이더를 통해 탐지된 표적의 항적을 추적한 결과를 비교하였으며, 매우 적은 오차를 보임으로써 알고리즘의 정확도를 입증하였다. 그러므로 개발된 레이더 시뮬레이션 알고리즘은 실 MCRC 시나리오에 적합함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청, 방위산업기술지원센터의 지원 (사업명: 자동화방공체계 항적추적기술 개발, 과제번호 UC180001D) 하에 수행되었습니다.

References

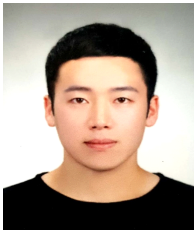
- [1] L. K. Piplani, *Systems Acquisition Manager's Guide for the use of Models and Simulations*, Defense Systems Management College Press, Fort Belvoir, VA, 1994.
- [2] H. S. Oh, S. Park, H. J. Kim, T. Lee, S. Lee, and D. Kim, et al., "addSIM: A new Korean engagement simulation environment using high resolution models," in *Proceedings of the Winter Simulation Conference 2014*, Savannah, GA, 2014, pp. 2942-2953.
- [3] M. A. Stoler, *Allies and Adversaries: The Joint Chiefs of Staff, the Grand Alliance, and US Strategy in World War II*, Chapel Hill, NC, UNC Press Books, 2003.
- [4] K. W. Condit, *History of the Joint Chiefs of Staff: The Joint Chiefs of Staff and National Policy*, Historical Division, Joint Chiefs of Staff, vol. 6, 2011.
- [5] J. W. Rim, S. Oh, and I. S. Koh, "High resolution radar model to simulate detection/tracking performance of multi-function radar in war game simulator," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 1, pp. 70-78, Jan. 2019.
- [6] N. Genito, F. Montemari, G. Corrado, D. Rispo, R. Palumbo, and P. Canzolino, "Integrated simulation facility for interoperability operation," *MESAS 2014: Modelling and Simulation for Autonomous Systems*, vol. 8906, pp. 105-120, 2014.
- [7] Virtualsim, "vsTASKER7." Available: <https://www.virtualsim.com/products/vstasker>
- [8] T. W. Jefferey, *Phased-Array Radar Design: Application of Radar Fundamentals*, Raleigh, NC, SciTech Publishing, 2009.
- [9] G. R. Curry, *Radar System Performance Modeling*, 2nd

- ed. London, Artech House, 2005.
- [10] M. C. Stevens, *Secondary Surveillance Radar*, Boston, MA, Artech House, 1998.
- [11] P. Hennen, *Radar and Electronic Warfare Principles for the Non-Specialist*, Edison, NJ, Scitech Publishing, 2014.
- [12] E. T. Whittaker, G. N. Watson, *A Course of Modern Analysis*, 4th ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1990.
- [13] Lockheed Martin, *AN/FPS-117: Long-Range Air Surveillance Radars*, Washington, DC, 2013.
- [14] H. Rohling, "Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-19, no. 4, pp. 608-621, Jul. 1983.
- [15] P. P. Gandhi, S. A. Kassam, "Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 24,

- no. 4, pp. 427-445, Jul. 1988.
- [16] C. H. Nam, S. W. Ra, "Approximated modeling technique of weibull distributed radar clutter," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 7, pp. 822-830, Jul. 2012.
- [17] D. Musicki, B. F. La Scala, and R. J. Evans, "Multi-target tracking in clutter without measurement assignment," in *43rd IEEE Conference on Decision and Control(CDC)*, Nassau, Dec. 2004, vol. 1, pp. 716-721.
- [18] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35-45, Mar. 1960.
- [19] D. Musicki, R. Evans, and S. Stanković, "Integrated probabilistic data association(IPDA)," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 39, no. 6, pp. 1237-1241, Jun. 1994.

남 정 훈 [인하대학교/석·박사 통합]

<http://orcid.org/0000-0002-9225-1338>



2017년 2월: 강릉원주대학교 전자공학과 (공학사)
2018년 9월~현재: 인하대학교 전자공학과 석박사 통합과정
[주 관심분야] Radar System Modeling & Analysis, Radar Clutter Signal Modeling

박 승 호 [한양대학교/석·박사 통합]

<http://orcid.org/0000-0002-9225-1338>



2014년 2월: 한양대학교 전자시스템공학과 (공학사)
2014년 3월~현재: 한양대학교 전자시스템공학 석박사 통합과정
[주 관심분야] Target Tracking & Information fusion

고 일 석 [인하대학교/교수]

<http://orcid.org/0000-0003-0014-2466>



1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1996년 4월: LG 전자 연구원
2002년 8월: The University of Michigan at Ann Arbor 전기 및 전산과 (공학박사)

2004년 3월~2010년 8월: 인하대학교 정보통신대학원 교수
2010년 9월~현재: 인하대학교 전자공학과 교수
[주 관심분야] Theoretical Electromagnetics, Numerical Analysis, Wave Propagation through Complex Media

이 중 민 [LIG시스템/매니저]

<http://orcid.org/0000-0002-6106-7925>



2012년 2월: 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 (공학사)
2014년 8월: 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 (공학석사)
2019년 4월~현재: LIG시스템 매니저
[주 관심분야] Target Tracking & System Integration