

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(7), 577-587(2013)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.7.577

항공기용 다기능 레이더 자원 관리자 및 환경 통합 시뮬레이터

박정우*, 장대성*, 최한림*, 탁민제*, 노지은**, 김선주**

Integrated Simulator of Airborne Multi-function Radar Resource Manager and Environment Model

Jung-Woo Park*, Dae-Sung Jang*, Han-Lim Choi*, Min-Jea Tahk*,

Ji-Eun Roh** and Seon-Joo Kim**

Dept. of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology(KAIST)*,
Agency for Defense Development(ADD)**

ABSTRACT

In this paper, an integrated radar resource manager for an airborne multi-function radar and a radar-environment simulator are presented. The radar-environment simulator includes target detection/measurement models, a nonlinear tracking filter for the airborne radar and an effective target generation algorithm. The structures and functions of modules in the radar resource manager are established and validated by the radar-environment simulator.

초 록

본 논문은 항공기용 다기능 레이더의 통합적 자원관리를 수행하는 자원관리자와 레이더/환경 시뮬레이터 구축에 대한 연구 결과를 설명한다. 레이더/환경 시뮬레이터는 항공기 레이더의 표적 탐지/측정 모델, 탑재된 레이더의 좌표변환을 고려한 추적 필터 및 효율적인 표적 생성 알고리즘을 포함한다. 항공기 레이더 자원관리 알고리즘의 각 모듈별 구조와 기능을 도출하고, 구축된 레이더/환경 시뮬레이터를 통해 시험·검증하였다.

Key Words : Radar Resource Management(항공기용 레이더 자원 관리), Multi Function Radar (다기능 레이더), Radar/environment simulator(레이더/환경 시뮬레이터)

1. 서 론

항공기용 다기능 레이더는 이전에 각각의 레이더에서 수행되던 영역 탐색, 표적 추적, 화기 통제 등의 기능을 많은 수의 임무를 빠르게 변경하면서 수행해야 한다. 레이더 빔의 방향을 빠르게 변경할 수 있는 전자주사식 능동위상배열 레이더의 등장으로 이러한 임무의 전환을 보다 신속하고 유동적으로 처리할 수 있게 되었으며, 임

무를 어떠한 순서와 빈도로 처리하고, 레이더의 자원을 어떻게 효율적으로 분배할 것인가 하는 문제가 대두되었다. 다기능 능동위상배열 레이더에서 관리해야 할 자원은 시간, 에너지, 연산처리 능력 등이 있으며, 레이더의 운용 환경과 성능에 따라 한정되어 있다. 한정된 레이더의 자원을 여러 기능과 임무에 분배하는 것을 레이더 자원관리라고 하며 레이더의 각 기능별 성능을 향상시키는 것을 목적으로 한다[1,2].

† Received: September 19, 2012 Accepted: June 24, 2013

* Corresponding author, E-mail : jwpark12@add.re.kr

http://journal.ksas.or.kr/

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

자원 관리를 실행하는 알고리즘은 레이더 자원 관리자(RRM: Radar Resource Manager) 라고 하며, 우선순위 선정(task prioritization)과 임무 스케줄링(task scheduling)으로 구분할 수 있다 [3]. 우선순위 선정은 사용자/설계자 입장에서의 임무의 기능적/전술적 중요도를 반영하여 각 임무에 정량적인 우선순위 값을 할당하는 것이다. 임무 스케줄링은 우선순위와 전술적 요구조건 및 성능 지표에 입각하여 각 임무들을 수행할 시점과 순서를 결정하는 것이다. 이외에도 탐색 성능을 결정하는 탐색 빔 특성치를 최적화 하거나[4], 탐색과 추적 기능의 자원 분배를 조정하고 추적 표적 임무들 간의 자원 할당을 결정하는 알고리즘을 통해 다기능 레이더의 운용 성능을 향상시킬 수 있다.

레이더 자원관리를 해결하는 많은 알고리즘들이 다양한 기법을 통하여 제시되었으나[3,5-10], 레이더 측정/탐지 모델, 추적 필터 등을 포함하는 통일적이고 일관된 구조를 가지는 시뮬레이션 환경 하에서, 전체 자원 관리 알고리즘을 비교·분석하려는 시도가 부족하였다. 따라서 본 논문에서는 레이더 자원관리 알고리즘을 평가하기 위한 환경 시뮬레이터를 개발하고 이를 검증하고자 한다. 환경 시뮬레이터는 표적 생성과 레이더 신호 강도에 따른 표적 탐지를 모델링하고 표적의 측정치를 계산하는 과정을 포함한다. 측정치 정보는 추적 필터를 통해 표적의 상태변수 및 공분산 정보로 변환되어 레이더 자원 관리자에게 전달된다.

본 논문에서는 항공기용 다기능 레이더 자원 관리 알고리즘의 구조와 기능에 대해 서술하고, 자원관리 알고리즘을 평가·분석하기 위해 개발된 레이더/환경 시뮬레이터에 대해 설명한다. 레이더/환경 시뮬레이터에서는 표적 탐지, 측정치 생성, 추적 필터링에 대한 유효한 모델을 사용하였고, 시나리오 평가를 위한 표적 생성 기법을 제안하였다. 이를 통해 통일성 있는 시뮬레이션 환경을 구축하고, 평가 시나리오로 자원관리 알고리즘 및 레이더/환경 시뮬레이터를 검증하였다.

II. 본 론

2.1 항공기용 레이더 자원 관리 알고리즘

2.1.1 레이더 기능 구분 및 기능 순환

본 논문에서 다기능 레이더의 기능은 탐색, 추적, 플롯 확인 등과 같이 레이더의 데이터 획득 과정들을 미리 정의된 특정한 목적에 따라 분류

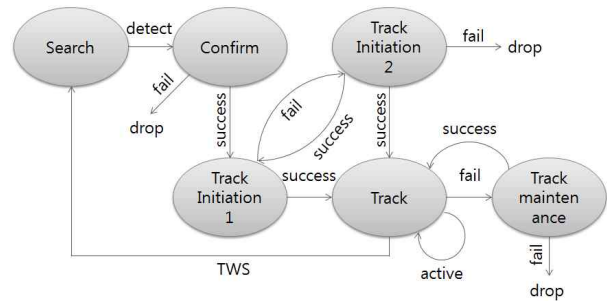


Fig. 1. Radar function cycle

한 것을 의미한다. 여기에는 이외에도 추적 초기화, 재탐색/추적관리가 포함된다.

먼저 탐색(search) 기능은 미리 지정된 영역으로 다수의 빔을 조사하여 미지의 표적을 발견하는 것이다. 플롯 확인(confirmation)은 탐색 과정에서 탐지된 표적을 다시 한 번 조사하여 ghost나 false alarm 여부를 확인하는 것이다. 추적 초기화(track initiation)는 편의상 두 기능으로 나뉜다. 먼저 추적 초기화1은 플롯 확인을 거친 표적을 정해진 짧은 주기로 추적하면서, 이후의 지속적인 추적을 위해 추적 필터에 충분한 데이터를 확보하는 기능이다. 추적 초기화2는 추적 초기화1과정에서 표적 탐지에 실패할 경우, 표적 예상 위치 주변에 복수의 빔을 조사하여 추적 초기화를 재개하는 기능이다.

추적(track) 기능은 지속적으로 표적의 데이터를 획득하는 과정으로, 이 주기는 미리 지정된 값이거나 임무 관리자(task manager)에 의해 표적의 추적 상황에 따라 적응적으로 결정된다. 마지막으로 재탐색/추적관리(track maintenance)는 추적 기능을 통해 지속 추적하던 표적을 놓치게 되었을 때, 추적 초기화2와 마찬가지로 표적 예상 위치와 그 주변으로 복수의 빔을 조사하여 표적을 다시 획득하려는 기능이다. 전체 레이더 기능의 전환 과정을 나타내는 순환도는 Fig. 1에 나타내었다.

본 논문에서는 기능적으로 독립되어 있으며, 개별적으로 취급할 수 있는 가장 상위의 작업 단위로써 임무(task)를 사용한다. 임무는 한 방향에 대한 하나의 탐색 빔, 혹은 하나의 표적에 대한 하나 또는 복수의 추적형 빔(beam)으로 구성되어 있으며, 레이더의 기능별 구분인 탐색, 추적, 플롯 확인 등은 각 임무의 기능적 특성이 된다. 빔은 한 방향으로 조사되는 복수의 look의 집합이며, look은 하나의 탐지/측정에 대응하는 하나 혹은 복수의 CPI(Coherent Processing Interval)로 이루어진 집합이다.

치 변화는 신호의 세기와 탐지 확률, 측정 정밀도에 미치는 영향이 상당히 크다. 또한 빔 특성과 look의 파형 역시 SNR과 측정 정밀도를 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 자원 관리자와 스케줄러에서 이러한 요인들을 직간접적으로 변경하게 되면, 표적 탐지 성능과 획득한 데이터 품질의 차이가 현저히 나타날 수 있다. 또한 탐지 확률 및 SNR의 크기는 표적의 망실을 결정하는 것이므로 가능한 정확히 표현할 필요가 있다.

도플러 펄스방식의 AESA(Active Electronically Scanned Array) 레이더에서 정보를 얻기 위해서는 일정한 PRF(Pulse Repetition Frequency)를 가지는 빔을 특정 방향으로 조사(照射)해야 하고, 반송된 신호의 세기는 클러터를 고려하지 않았을 때, SNR을 통해 효과적으로 표현할 수 있다. SNR은 통상의 레이더 방정식(radar equation)을 통해 아래와 같이 나타낸다[12].

$$SNR = \frac{t_p n_p \hat{P} G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_s L_s R^4} \quad (1)$$

여기서 t_p 는 단일 펄스 폭, n_p 는 단일 CPI내의 펄스 개수, \hat{P} 는 peak power, G_t 는 송신 이득, G_r 는 수신 이득, λ 는 레이더 전파의 파장, σ 는 표적의 RCS(Radar Cross Section), k 는 Boltzmann 상수, T_s 는 system effective temperature, L_s 는 system loss, R 은 표적과의 거리이다.

AESA에서는 빔 방향의 전환을 각 array element의 위상차 등을 변경하여 수행한다. 위상차이에 의한 간섭과 element간의 비등방성으로 far-field에서 배열 수직축(레이더 배열 평면에 대한 수직축)에 대한 각도에 따라 전기장의 세기가 변하게 된다. 이 효과를 element pattern과 array factor로 구분할 수 있고, element pattern의 경우, 송수신 이득 G_e 는 빔 중심의 각도 즉, 스캔 각도(scan angle) ψ 에 대해서 다음과 같이 계산된다[6,12,13].

$$G_e = (\cos^{1+\alpha}\psi)^2 \quad (2)$$

여기서 α 는 배열의 특성에 따른 손실계수이다. 한편, Array factor는 임의의 각도 ϕ 에서의 전기장의 세기를 element들의 상쇄/보강 간섭의 이론적 전개를 통해 식 (3)과 같이 구할 수 있다. 여기서 N 은 element 개수, s 는 배열 간격이며, effective aperture $a = Ns$ 에 대해 마지막 행과 같이 근사할 수 있다[12].

$$\begin{aligned} E_a(\phi) &= \frac{\sin(N\pi(s/\lambda)(\sin\phi - \sin\psi))}{N\sin(\pi(s/\lambda)(\sin\phi - \sin\psi))} \quad (3) \\ &= \frac{\sin(N\pi(s/\lambda)\Delta\phi_{uv})}{N\sin(\pi(s/\lambda)\Delta\phi_{uv})} \\ &\simeq \frac{\sin(\pi(a/\lambda)\Delta\phi_{uv})}{\pi(a/\lambda)\Delta\phi_{uv}} \end{aligned}$$

$\Delta\phi_{uv}$ 는 uv평면상에서 빔의 중심과 ϕ 가 떨어진 정도로, 표적과 빔 중심과의 uv평면상의 거리에 해당한다. 단방향 손실로 이득 에너지가 절반으로 떨어지는 지점까지를 기준으로 빔 폭 $\theta_{bw} = \theta_{3dB}$ 을 잡으면, E_a 를 아래와 같이 표현할 수 있다[12].

$$E_{a,1} \simeq \frac{\sin(0.8859\pi\Delta\phi_{uv}/\theta_{bw})}{0.8859\pi\Delta\phi_{uv}/\theta_{bw}} \quad (4)$$

여기서 에너지는 전기장 세기의 제곱이므로, $E_{a,1}$ 은 표적이 빔 폭 경계에 있을 때 ($\Delta\phi_{uv}/\theta_{bw} = 0.5$), $\sqrt{0.5}$ 의 값을 가진다. 위 식은 부엽(sidelobe)을 가지고 있는데, 이를 무시하고, 취급의 편의를 위하여 지수함수를 통해 근사할 수도 있다.

$$E_{a,2} \simeq e^{-2\ln 2(\Delta\phi_{uv}/\theta_{bw})^2} \quad (5)$$

최종적으로 SNR은 element pattern과 array factor 및 빔 폭의 변화를 고려하여 식 (6)으로 나타낼 수 있다. 여기서 $\theta_{0,bw}$ 는 송수신 이득을 결정하는 기준 빔 폭이다.

$$\begin{aligned} SNR &= \frac{t_p n_p \hat{P} G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_s L_s R^4} \left(\frac{\theta_{0,bw}}{\theta_{bw}} \right)^4 \quad (6) \\ &\quad \times (\cos^{1+\alpha}\psi)^2 e^{-8\ln 2(\Delta\phi_{uv}/\theta_{bw})^2} \end{aligned}$$

2.2.2 표적 탐지 확률 계산

SNR S 에 대한 표적의 탐지 확률 P_d 는 표적의 RCS에 대한 모델링에 따라 Marcum형과 Swerling I~IV 형으로 나눌 수 있다. CFAR(constant false alarm rate)을 이용하여 고정된 false alarm probability P_{fa} 를 사용한다고 하였을 때, Marcum형의 경우 look의 CPI의 개수 n_{CPI} 에 대하여 n_{CPI} 가 40보다 작을 때와 클 때를 나누어 각각 더 유효한 근사식이 존재한다.

>> If $n_{CPI} < 40$ (Sankaran [14,15])

$$\begin{aligned} P_d &= 0.5 \operatorname{erfc} \left(\sqrt{-0.8 \ln(4P_{fa}(1-P_{fa}))} \right) \quad (7) \\ &\quad + \sqrt{\frac{n_{CPI}}{2} - \frac{1}{4}} - \sqrt{n_{CPI} S + \frac{n_{CPI}}{2} - \frac{1}{4}} \end{aligned}$$

>> If $n_{CPI} \geq 40$ (North,Shnidman [15,16])

$$P_d = 0.5 \operatorname{erfc} \left(\sqrt{-0.8 \ln(4P_{fa}(1-P_{fa}))} \right) + \sqrt{\frac{n_{CPI}}{2} - \sqrt{n_{CPI}S + \frac{n_{CPI}}{2}}} \quad (8)$$

한편, Swerling 형의 경우 네 가지 형을 모두 표현할 수 있는 근사식을 이용할 수 있으며[17], 대부분의 구간에서 정확한 값을 잘 따르는 것을 보였다. 여기서 n_e 는 관측된 독립적인 Rayleigh-distributed signal sample들의 개수이다.

$$P_d(S, P_{fa}, n_{CPI}, n_e) = K_m \left(\frac{K_m^{-1}(P_{fa}, 2n_{CPI}) - 2(n_{CPI} - n_e)}{(n_{CPI}/n_e)S + 1}, 2n_e \right) \quad (9)$$

where

$$K_m(x, d) = 1 - \frac{1}{2\Gamma(d/2)} \int_0^x (t/2)^{d/2-1} e^{-t/2} dt \quad (10)$$

$$n_e = \begin{cases} 1 & \text{Swerling I} \\ n_{CPI} & \text{Swerling II} \\ 2 & \text{Swerling III} \\ 2n_{CPI} & \text{Swerling IV} \end{cases}$$

2.2.3 표적 측정치 생성

표적 탐지 확률을 통해 표적의 탐지 여부를 결정하고 나면, 표적의 수집 가능한 측정치 정보를 생성해야 한다. 일반적으로 레이더에서 얻을 수 있는 표적의 정보로는 레이더와 표적 사이의 거리 R , 거리 벡터 \hat{R} 방향의 상대속도 $V_R (= V \cdot \hat{R}/\|\hat{R}\|)$, 그리고 레이더 좌표계에서의 표적의 위치각 정보 (ϕ_r, θ_r) 이다. 일반적인 위상배열 레이더를 고려할 경우, 표적의 위치각 정보는 Fig. 3과 같은 레이더 좌표계 내에서 정의된다. ϕ_r, θ_r 와 uv평면 좌표계와의 관계는 다음과 같다.

$$u = \frac{\sin \phi_r}{\sqrt{1 + \cos^2 \phi_r \tan^2 \theta_r}} \quad (11)$$

$$v = \frac{\sin \theta_r}{\sqrt{1 + \cos^2 \theta_r \tan^2 \phi_r}}$$

시뮬레이터에 사용되는 측정치를 생성하기 위해서, 각 측정치 별 잡음 신호의 분산을 계산하고, 표적의 실제 R, V_R, ϕ_r, θ_r 에 정의된 분산 값에 해당하는 잡음을 생성하여 더한다. 각도 측정치 신호의 분산 값을 σ_B^2 , 상대거리 신호의 분산 값을 σ_R^2 , 상대속도 신호의 분산 값을 σ_V^2 라고

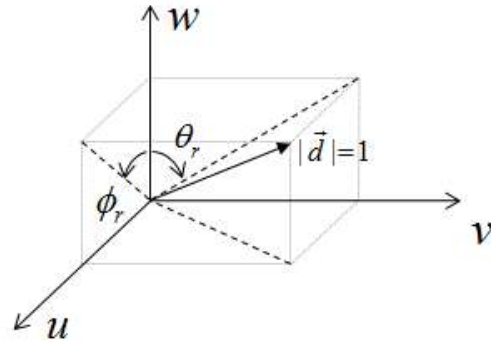


Fig. 3. Angular measurement definition in antenna coordinate

할 때, SNR과 빔 폭 및 파형 파라미터에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다[18].

$$\sigma_B \approx \frac{\theta_{bw}/\cos \psi}{k_M \sqrt{2S}} \quad (12)$$

$$\sigma_R \approx \frac{c\tau_R}{2\sqrt{2S}}$$

$$\sigma_V \approx \frac{\lambda f_D}{2\sqrt{2S}}$$

여기서 k_M 는 monopulse pattern difference slope, τ_R 는 레이더 시간 분해능, f_D 는 도플러 편이 분해능이다.

2.3 표적 운동 추적 필터 설계

본 절에서는 비행체에 탑재된 항공기 레이더의 표적 추적 필터를 설계하였다. 레이더 좌표계와 동체 좌표계 사이의 관계를 도출하고, 이를 이용한 필터 설계과정을 보이고자 한다.

2.3.1 항공기 레이더 좌표계와 동체 좌표계

레이더로부터의 표적 정보는 레이더 좌표계 상에서 측정된 것이므로, 필터를 적용하기에 앞서 항공기 레이더의 탑재 방향에 따른 레이더 좌표계와 항공기 동체 좌표계간의 변환이 필요하다.

안테나 좌표계의 방향 코사인인 $[u, v, w]$ 와 동체 좌표계 요소 $[x_B, y_B, z_B]$ 간의 기하학적 관계는 Fig. 4로 표현할 수 있다. α_{tilt} 는 레이더 평면이 항공기 기수축(nose) 방향에 대해 위로 기울어진 각도이다.

동체 좌표계에서 x_B 는 비행체 기수 방향, y_B 는 비행체 오른쪽 날개 방향, z_B 는 비행체 배면 방향을 의미한다. 위의 기하학적 관계를 이용하여 식 (13)와 같은 변환식을 유도할 수 있다.

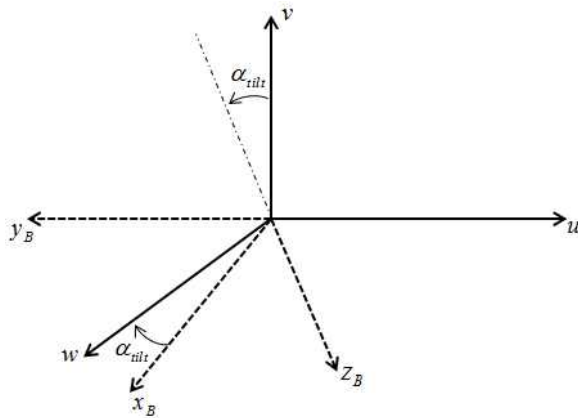


Fig. 4. Geometric relation between antenna and aircraft body axes

$$\begin{aligned} u &= -y_B/R \\ v &= -(x_B \sin \alpha_{tilt} + z_B \cos \alpha_{tilt})/R \\ w &= (x_B \cos \alpha_{tilt} - z_B \sin \alpha_{tilt})/R \end{aligned} \quad (13)$$

최종적으로, 레이더 측정치들과 동체 좌표계 변수들과의 관계를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$R = \sqrt{x_B^2 + y_B^2 + z_B^2} \quad (14)$$

$$V_R = (\dot{x}_B x_B + \dot{y}_B y_B + \dot{z}_B z_B) / \sqrt{x_B^2 + y_B^2 + z_B^2}$$

$$\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{-(x_B \sin \alpha_{tilt} + z_B \cos \alpha_{tilt})}{x_B \cos \alpha_{tilt} - z_B \sin \alpha_{tilt}} \right)$$

$$\phi_r = \tan^{-1} \left(\frac{-y_B}{x_B \cos \alpha_{tilt} - z_B \sin \alpha_{tilt}} \right)$$

2.3.2 표적 운동 모델

본 연구에서는 표적의 운동을 예측하고 모사하기 위해, Singer 모델[19], 정속(Constant-velocity) 모델 및 선회비행(Coordinated-turn) 모델을 고려한다.

유인 기동 표적 운동을 모사함에 있어 Singer 모델은 가장 일반적으로 알려져 있는 표적 운동 모델로써, 이를 이용한 많은 응용연구들이 수행되어 왔다. 일반적으로 표적의 기동을 미리 예측할 수 없기 때문에, Singer 모델에서는 표적의 기동을 Markov Process로 모델링한 표적 모형을 사용한다. 이 모델은 표적의 특정 순간의 표적 가속도가 시간이 조금 경과된 후의 표적의 가속도와 상관되어 있다고 가정하고, 가속도의 상관 함수를 다음과 같이 설정한다[19].

$$r(\Delta t) = E[a(t)a(t + \Delta t)] = \sigma_m^2 e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}, \quad \tau \geq 0 \quad (15)$$

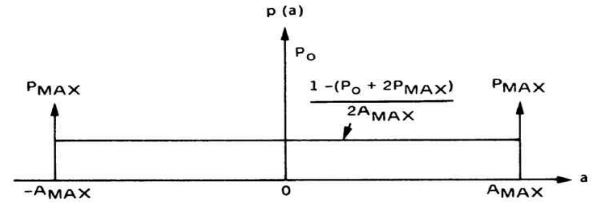


Fig. 5. Target acceleration probability density [19]

Wiener-Kolmogorov whitening procedure를 이용하여 위 상관함수를 Laplace 변환 후, 이다 다시 백색잡음(White noise)이 포함된 시간함수 형태로 바꾸면, 다음과 같이 표적의 기동모델을 표현할 수 있다.

$$\dot{A}(t) = -\frac{1}{\tau} A(t) + w(t) \quad (16)$$

여기서, τ 는 상관시간으로 본 논문에서는 10 sec으로 가정하였고, $w(t)$ 는 평균이 0인 백색잡음으로 분산은 다음과 같다.

$$\sigma_w^2(\Delta t) = \frac{2}{\tau} \sigma_m^2 \delta(\Delta t) \quad (17)$$

한편, 표적 가속도 분산은 표적의 최대 가속도 a_{max} , 표적이 최대 기동 가속도로 기동할 확률 P_{max} , 표적이 기동하지 않을 확률 P_0 를 이용하여 식 (18)과 같이 구할 수 있다(Fig. 5).

$$\sigma_m^2 = \frac{a_{max}^2}{3} [1 + 4P_{max} - P_0] \quad (18)$$

그 외, 정속 모델[20] 및 선회비행 모델[20]은 고정된 속도 및 고정된 가속도를 가정한 운동 모델로 손쉽게 정의될 수 있다.

2.3.3 필터 상태변수 정의 및 시스템 수식

레이더와 표적간의 상대위치, 속도 및 표적의 기동 가속도를 추정하는 표적 운동 방정식을 구성할 수 있다. 필터 상태변수는 다음과 같이 정의한다.

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} \vec{x}_{1:3} \\ \vec{x}_{4:6} \\ \vec{x}_{7:9} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{r}^n \\ \vec{v}^n \\ \vec{a}^n \end{bmatrix} \quad (19)$$

where

$$\begin{aligned} \vec{r}^n &= [x_N, y_N, z_N]^T, \\ \vec{v}^n &= [u_N, v_N, w_N]^T, \\ \vec{a}_T^n &= [a_{Tx}, a_{Ty}, a_{Tz}]^T \end{aligned}$$

여기서 \vec{r}^n 과 \vec{v}^n 은 레이더에 대한 표적의 상대적인 위치 및 속도를 의미하며, \vec{a}_T^n 는 표적의 가속도이다. 모든 변수는 관성좌표계 혹은 항법 좌표계 값으로 표현된다. 최종적으로, 다음과 같은 선형화된 시스템 수식을 얻을 수 있다. \vec{a}_O^n 는 레이더를 탑재한 아군 항공기의 가속도이다.

$$\begin{aligned} \vec{x} &= \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & -\alpha I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \vec{x} + \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ -I_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \vec{a}_O^n + \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} \\ I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \vec{n}_T^n \\ &= \vec{F}\vec{x} + \vec{B}\vec{u} + \vec{G}\vec{w} \end{aligned} \quad (20)$$

식 (20)과 같은 연속시간 선형화 시스템은 이산화[19]를 거쳐 차분방정식(식 (21))으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \Phi_k x_k + B_k u_k + w_k, \quad w_k \sim N(0, Q_k) \\ z_k &= h_k(x_k) + \nu_k, \quad \nu_k \sim N(0, R_k) \end{aligned} \quad (21)$$

본 연구에서 고려하는 Singer 모델, 정속 모델 및 선회비행 모델은 그 유형에 따라 운동 방정식이 유도될 수 있으며, 세부 유도과정 및 시스템 행렬 구성은 참고문헌[19]에서 확인할 수 있다.

2.3.4 표적 추적 필터 구현

다양한 표적 운동 모델을 고려하는 이유는 정의된 좌표계 내에서의 임의의 표적 운동에 대한 신뢰도 높은 필터를 설계하기 위해서이다. 본 연구의 대상은 항공기용 레이더이며 고성능/다기능 프로세서를 탑재하므로 이를 활용한 다양한 IMM(Interacting Multiple Model) 필터 설계가 가능하다[21]. 본 논문에서는 측정치와 상태변수간의 비선형성을 고려하여 UKF(Unscented Kalman Filter)[22] 기반의 IMM 표적 추적 필터를 설계하였다. 필터 설계를 위해 앞서 소개된 표적 운동 모델인 Singer 모델, 정속 모델 및 선회비행 모델을 고려하였다.

2.4 표적 생성 알고리즘

본 절에서는 레이더/환경 시뮬레이터에서 가상의 표적을 생성하는 방법을 제시하고, 이를 기반으로 다양한 표적 데이터 풀(pool)을 마련하고자 한다. 이를 통해 레이더를 탑재한 아군 비행체 전방에 전개되는 표적들의 다양한 시나리오를 구성하고, 레이더 자원관리자와 표적 탐지/추정 모델 및 추적필터를 시험/평가할 수 있다.

2.4.1 표적의 분류

먼저 표적은 총 세 가지로 분류를 하였는데,

Table 1. Classification of targets

Type	Target Intention	Relative Velocity
1	NI	Mach 1.0 ~ -3.0
2	NI	Mach 1.0 ~ 0.6 Mach -0.6 ~ -1.0
3	I	Mach -1.0 ~ -3.0

먼저 의도를 가지고 아군 비행체에게 지속적으로 다가오는 것과 아닌 것을 intentional(I)과 non-intentional(NI)으로 구분하였다. 즉 적기나 유도탄과 같이 아군 비행체를 요격하기 위해 아군 비행체에게 지속적으로 다가오는 표적들과, 아군 비행체와는 관계없이 임의의 기동을 하는 비행체들을 모델링하였다. 또한 임의의 기동을 하는 비행체를 빠른 속도를 가진 비행체와 그렇지 않은 비행체로 나누어 분류하였다. 빠른 표적의 경우 속도가 최대 마하 -3에서 1(멀어지는 방향)까지 변하며(Table 1: type 1), 이는 적 전투기와 유도탄에 해당한다. 민간항공기와 같이 속도가 빠르지 않은 비행체의 경우에는 마하 0.6~1.0 사이의 속도를 갖도록 설정하였다(type 2). 표적의 기동 궤적을 생성하기 위해서, Non-intentional 표적의 경우, Singer 모델을 이용하여 임의의 가속도 변화를 가지도록 설정하였다. 반면, 아군 비행체로 다가오는 intentional 표적의 경우(type 3), 아군 비행체와 표적의 상대 거리 및 속도를 이용하여 이에 준하는 2차 함수 형태의 궤적을 가지도록 설정하였다.

2.4.2 표적 생성 과정

모든 표적들은 아군 비행체의 전진 속도 방향을 기준으로 좌우 45도, 상하 45도 탐색 범위 내, 거리 20km~80km 사이에서 최초 생성된다(Fig. 6). 한편, 표적을 모의함에 있어 표적의 기동에 따른 궤적을 실시간으로 생성하는 시뮬레이션은 표적의 개수가 늘어남에 따라 계산 시간이 길어지는 등 시뮬레이션의 비효율성을 초래할 수 있

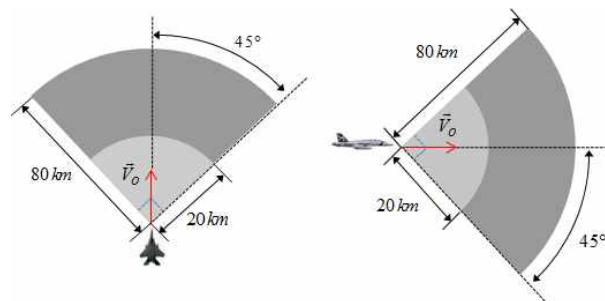


Fig. 6. Region of target generation

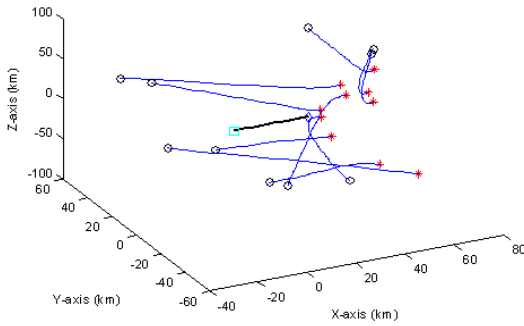


Fig. 7. Type 1 target generation

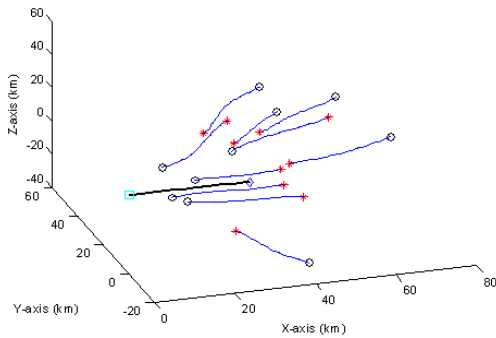


Fig. 8. Type 2 target generation

다. 보다 효율적인 표적 모의 시뮬레이션을 위해, 본 연구에서는 모든 표적의 궤적정보를 시간 입력에 대한 다항함수 형태로 직접적으로 출력되도록 하는 표적 생성로직을 고려하였다.

1) Type 1과 2 표적 생성 로직

Type 1과 2에 해당하는 표적은 시간에 따른 표적의 상대 위치에 대한 데이터베이스를 만들어 이를 활용하였다. 표적의 운동을 Singer 모델로 가정하고, Table 1에서 정의한 type별 상대 속도 범위 내의 표적 궤적을 임의로 생성한 뒤, 이를 시간에 따른 함수로 fitting 하고 그 계수를 저장하여 데이터베이스화 시킨다. 여기서 시간에 대한 함수로 표현되는 표적 운동은 아군 비행체에 대한 상대 운동이므로, 표적의 절대 운동은 아군 비행체의 위치 및 속도를 고려하여 구할 수 있다. Fig. 7과 8은 type 1과 2의 생성 예시를 보여 준다. 표적들의 경우 표식 *지점에서 생성되어 표식 o까지 비행하는 궤적을 확인할 수 있고, 아군 비행체는 표식 □ 지점에서 시작하여 표식 ◇ 지점까지 진행하였다.

2) Type 3 표적 생성 로직

Type 3에 해당하는 표적은 아군 비행체를 향하여 점진적으로 접근하는 표적이다. 이를 위해 먼저, 각 x,y,z축 방향 상대 궤적이 시간에 따른 2차 함수 형태를 가지도록 설정하였다.

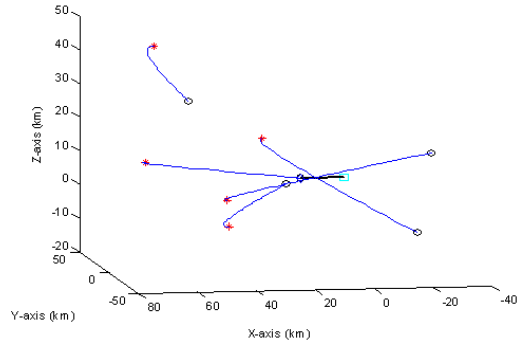


Fig. 9. Type 3 target generation

$$\vec{r}^n(t) = C_a t^2 + C_b \tag{22}$$

표적과 아군 비행체 사이의 초기 상대 거리를 $\vec{r}^n(0)$ 라 할 때, $C_b = \vec{r}^n(0)$ 이고, 초기 상대 속도를 $\vec{v}^n(0)$ 라고 할 때, 표적이 아군 비행체를 스쳐 지나가는 시간 t_f 는 다음과 같다.

$$t_f = |\vec{r}^n(0)| / |\vec{v}^n(0)| \tag{23}$$

$t = t_f$ 에서 $\vec{r}^n(t_f) = 0$ 가 만족해야 하므로, C_a 는 식 (24)과 같이 구할 수 있다.

$$C_a = -\vec{r}^n(0) / t_f^2 = -\vec{r}^n(0) |\vec{v}^n(0)|^2 / \|\vec{r}^n(0)\|^2 \tag{24}$$

따라서 type 3 표적의 궤적 X_T 는 식 (25)와 같이 표현할 수 있다.

$$X_T = \vec{r}^n(0) \left(1 - \frac{|\vec{v}^n(0)|^2}{|\vec{r}^n(0)|^2} t^2 \right) + V_{O_i} t + X_{O_i} \tag{25}$$

여기서 X_{O_i} 는 아군 비행체 초기 위치, V_{O_i} 는 초기 속도이다. Type 3 표적 생성 결과는 Fig. 9에 나타내었다.

2.5 시뮬레이션

2.4에서 설명한 바와 같이 표적을 생성하고, 표적 추적 필터와 레이더 자원 관리자를 포함하는 구조에서 간단한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통해, 표적 탐지/추정 모델, 표적 추적 필터, 표적 생성 알고리즘 및 레이더 자원 관리자의 주요 구조를 포함하는 소프트웨어 코드의 정상적 작동을 검증하였다.

본 절의 시뮬레이션을 위해 사용된 레이더 자원 관리자의 스케줄러는 modified MESAR 알고리즘[6]이다. 이 알고리즘은 처리 요청 시간보다 지연된 임무들 중에서 우선순위가 높은 임무 집

Table 2. Renewal period and priority for Simulation

Task	Renewal period	Priority
Track maintenance	0.2s	High
Confirmation	0.1s	
Track initiation2	0.3s	↑
Track initiation1	0.5s	↓
Track	1s	
Search	10s	Low

탐색 bar를 가지고 좌우 각 30°의 탐색범위를 가지는 빔 패턴을 생성하도록 하였다. 각 임무의 갱신 주기와 우선순위는 기능별로 고정된 값을 가지도록 하였다(Table 2).

Figure 10은 일정 시간 간격으로 레이더의 탐색 패턴(작은 원 배열)과 추적 주사 한계 영역(큰 원), 추적 필터로부터의 추정치(별표)와 실제 표적(실선)의 궤적을 레이더 uv평면상에 나타낸 것이다. Fig. 3과 4에서 정의한 uvw 좌표계의 정의에 따라 표시된 것이므로, 레이더 밖에서 레이더 평면을 바라보는 시점으로 간주할 수 있다. 표적은 type 1/2/3 각각 10개씩 총 30개를 20~40km 사이에서 생성하였으며, 그림에서 확인할 수 있듯이 8개의 표적만 주어진 탐색 범위 내에서 발견되었다.

레이더는 탐색범위 안에서 trianglur lattice 형태로 생성된 탐색 빔을 순차적으로 수행하다가 표적이 발견되면, 추적 초기화 등을 거쳐 복수의 표적을 정상적으로 추적함을 알 수 있다.

Figure 10 e)~f)에서 표적 궤적의 끝에 적힌 수가 표적의 번호인데, 1번, 4번, 26번 표적이 type 3이며 레이더를 향하여 다가오는 표적들이다. 1번과 4번 표적은 레이더의 주사 한계 영역으로 다가갈수록 uv평면상의 기동이 점점 빨라져서 추적에 실패하고, 연이은 재탐색에도 실패하여 표적 추적이 종료되고, 표적 정보가 사라진 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 11에서 상대거리가 짧아짐에 따라 SNR이 증가하다가 주사 한계 영역에 다다른 시점에서 SNR이 급격하게 감소한 것으로 나타난다. 26번 표적은 레이더 정면을 향하여 계속 다가오고 있으므로, SNR의 증가폭이 크며, 레이더를 거의 정면에서 스쳐 지나가서 40s 전후로 표적을 상실하게 된다.

이외의 표적들은 type 2 혹은 3이며, uv평면상

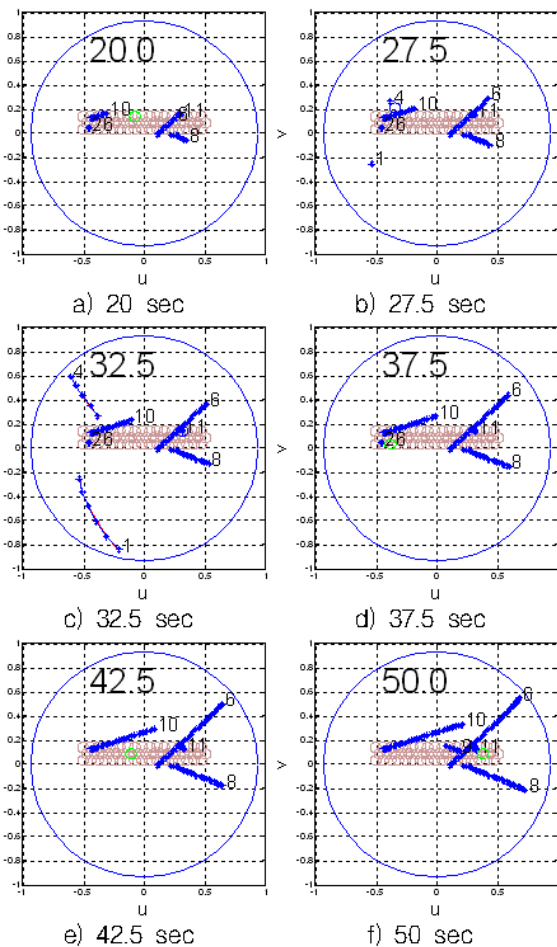


Fig. 10. Simulation for target generation and tracking

합 내의 가장 늦어진 임무부터 차례로 스케줄링하는 방식이다.

Pilot 모듈에서 입력된 레이더 운용모드는 AAST(All Aspect Search and Track)이며, 3개의

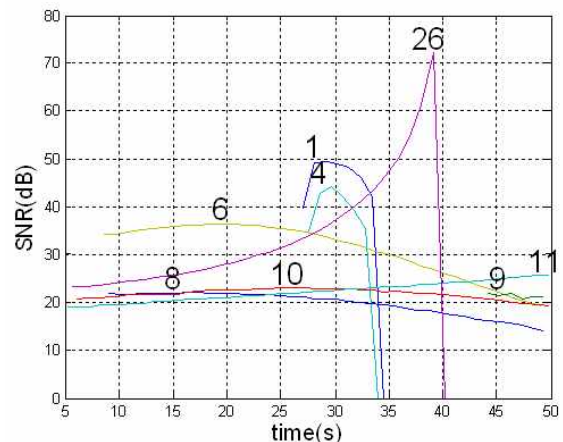


Fig. 11. SNR of tracking targets vs. time

에서 상대적인 속도와 기동의 크기가 작아 시물레이션 종료 시점까지 지속적으로 추적이 수행되는 것을 확인할 수 있다.

이와 같이 시물레이션을 통해 이동 표적의 탐지 및 추적 기능과 레이더 기능 순환도에 따른 전환이 정상적으로 이루어짐을 확인할 수 있었다.

III. 결 론

본 논문은 항공기용 다기능 레이더의 통합적 자원관리를 수행하는 자원관리자와 그 세부모듈의 역할에 대해 분석하고, 자원관리자의 기능과 구조를 간략히 제시하였다. 또한, 자원관리자의 성능평가를 위한 레이더-환경 시뮬레이터에서는 표적 신호 강도에 따른 탐지 확률과 측정치 생성 모델을 사용하고, 항공기에 탑재된 레이더의 좌표변환을 고려한 추적 필터의 설계를 수행하였으며, 계산시간을 줄이기 위한 표적 생성 알고리즘을 개발하였다. 또한 제안한 레이더-환경 시뮬레이터와 자원관리자를 구현하였고, 이동 표적에 대한 시물레이션을 수행하여 성능을 검증하였다.

본 논문에서 추적 필터로 사용된 UKF 기반 IMM 필터는 항공기용 다기능 레이더에 적용될 수 있는 여러 형태의 필터 중에서 계산 부하의 제한 조건보다, 추적 대상에 대한 정보가 부족하고 비선형성이 강한 조건하에서 활용하기 위해 선택된 것이다. 따라서 본 논문에서 개발한 시물레이터와 그 결과는 실제 항공기용 다기능 레이더의 운용성능을 정확히 도출하는 데에 목적을 두지 않고, 다기능 레이더의 효율적 운용을 위해 개발되는 자원관리자들의 상대적인 성능을 비교 평가 하는 도구로써 활용될 수 있다.

본 논문을 통해 다양한 레이더 자원관리 알고리즘들을 통일적이고 일관된 구조를 가지는 모델과 시물레이션 환경 하에서 비교·분석할 수 있는 틀을 마련하였고, 이를 이용한 다양한 연구 결과를 도출할 수 있을 것이라 기대한다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 연구 지원을 받아 수행 되었습니다(계약번호 UD100057FD).

References

1) Jang, D. S. and Choi, H.-L., "A task scheduling algorithm for airborne

multi-function AESA radars based on time-window chaining," KSAS Spring conference, Apr. 2011.

2) Jang, D. S., Choi, H.-L., and Roh, J. E., "A time-window-based task scheduling approach for multi-function phased array radars," International Conference on Control, Automation and Systems, Oct. 2011.

3) Ding, Z., "A survey of radar resource management algorithms," in Proc. Canadian Conf. Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2008, pp. 1559~1564.

4) Jang, D. S., Choi, H.-L., and Roh, J. E., "Optimization of surveillance beam parameters for phased array radars," International Conference on Radar Systems, Oct. 2012, to appear.

5) Shin, H.-J., Hong, S.-M., and Hong, D.-H., "Adaptive-update-rate target tracking for phased-array radar," IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation, vol. 142, no. 3, 1995, pp. 137~143.

6) Butler, J. M., "Tracking and control in multi-function radar" Ph.D. dissertation, University College London, 1998.

7) Miranda, S., Baker, C., Woodbridge, K., Griffiths, H., "Knowledge-based resource management for multifunction radar: a look at scheduling and task prioritization," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 23, no. 1, 2006, pp. 66~76.

8) Ghosh, S., Rajkumar, R. R., Hansen, J., and Lehoczky, J., "Integrated qos-aware resource management and scheduling with multi-resource constraints," Real-Time Systems, vol. 33, 2006, pp. 7~46.

9) Winter, E. and Baptiste, P., "On scheduling a multifunction radar," Aerospace Science and Technology, vol. 11, no. 4, 2007, pp. 289~294.

10) Barbaresco, F., Deltour, J. C., Desodt, G., Durand, B., Guenais, T., and Labreuche, C., "Intelligent M3R Radar Time Resources management: Advanced cognition, agility & autonomy capabilities," International Radar Conference - Surveillance for a Safer World, 2009, Oct. 2009.

- 11) Jang, D. S., An, S. T., Choi, H.-L., and Roh, J. E., "A Comparison of Graph based and Fuzzy Inference System based Task Prioritizations for Airborne Multi-function Radars," KSAS Spring conference, Apr. 2012.
- 12) Skolnik, M., *Radar handbook*, 3rd Ed., ser. Electronics electrical engineering, McGraw-Hill, 2008.
- 13) Mahafza, B. R., *Radar systems analysis and design using MATLAB*, Chapman & Hall/CRC, 2005.
- 14) Sankaran, M., "Approximations to the non-central chi-square distribution," *Biometrika*, vol. 50, 1963, pp. 199~204.
- 15) Shnidman, D. A., "Determination of required SNR values [radar detection]," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 38, no. 3, 2002, pp. 1059~1064.
- 16) North, D. O., "An analysis of the factors which determine signal/noisediscrimination in pulsed carrier systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 51, no. 7, pp. 1015~1027.
- 17) Barton, D. K., "Universal equations for radar target detection," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 41, no. 3, 2005, pp. 1049~1052.
- 18) Curry, G. R., *Radar System Performance Modeling*, 2nd Ed., Artech House, 2005.
- 19) Singer, R. A., "Estimating Optimal Tracking filter Performance for Manned Maneuvering Targets," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 6, no. 4, 1970, pp. 473~483.
- 20) McIntyre, G. A. and Hintz, K. J., "Comparison of Several Maneuvering Target Tracking Models," *Signal processing, sensor fusion, and target recognition VII*, Apr. 1998.
- 21) Bar-Shalom, Y. and Blair, W. D., *Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advances*, ARTECH HOUSE, INC, 2000.
- 22) Julier, S. J., Uhlmann, J. K., and Durrant-Whyte, H. F., "A New Approach for Filtering Nonlinear Systems," *American Control Conference*, 1995, pp. 1628~1632.