

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(6), 507-515(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.6.507

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

적응형 칼만 필터를 이용한 확장 표적의 상태벡터 추정 기법

조두현*, 최한림*, 이진익**, 정기환***, 고일석***

Extended Target State Vector Estimation using AKF

Doo-Hyun Cho*, Han-Lim Choi*, Jin-Ik Lee**, Ki-Hwan Jeong*** and Il-Seok Go***

Division of Aerospace Engineering - Korea Advanced Institute of Science and Technology*,

Agency for Defense Development**,

College of Information Technology & Engineering - Inha University***

ABSTRACT

This paper proposes a filtering method for effective state vector estimation of highly maneuvering target. It is needed to hit the point called 'sweet spot' to increase the kill probability in missile interception. In paper, a filtering method estimates the length of a moving target tracked by a frequency modulated continuous wave (FMCW) radar. High resolution range profiles (HRRPs) is generated from the radar echo signal and then it's integrated into proposed filtering method. To simulate the radar measurement which is close to real, the study on the properties of scattering point of the missile-like target has been conducted with ISAR image for different angle. Also, it is hard to track the target efficiently with existing Kalman filters which has fixed measurement noise covariance matrix R . Therefore the proposed method continuously updates the covariance matrix R with sensor measurements and tracks the target. Numerical simulations on the proposed method shows reliable results under reasonable assumptions on the missile interception scenario.

초 록

본 논문에서는 빠르게 기동하는 표적의 상태벡터를 효과적으로 추정하는 필터링 기법을 제안한다. 적 미사일을 높은 확률로 요격하기 위해서는 스위트 스팟이라고 불리는 지점을 타격해야 하며, 이를 위해서는 표적의 길이와 위치를 정확히 추정해야 한다. 논문에서는 FMCW 레이더에 기반하여 고분해능 거리 프로파일(HRRPs)을 생성한 후 제안된 필터링 기법을 통해 표적의 길이와 움직임을 추정하고 있다. 실제에 가까운 레이더 측정치를 모사하기 위해 ISAR 이미지를 통해 각도에 따른 표적의 산란점 특성에 대한 연구가 진행되었다. 또한 측정 잡음 공분산 행렬 R 이 고정되어 있는 기존의 칼만 필터의 경우 SNR 값이 급격히 변화하는 상황에서는 표적의 효과적인 추적이 어려우며, 제안된 기법에서는 공분산 행렬 R 을 측정값을 이용해 지속적으로 개선하며 표적을 추적하게 된다. 기법의 성능 확인을 위해 요격 미사일이 목표물을 추적하는 상황에 대하여 시뮬레이션이 수행되었으며, 시뮬레이션 결과는 제안된 필터링 기법이 실제 데이터에 효과적으로 수렴함을 보인다.

† Received : November 26, 2014 Revised : April 27, 2015 Accepted : May 29, 2015

* Corresponding author, E-mail : dhcho@lics.kaist.ac.kr

Key Words : Kalman Filter(칼만 필터), Sweet Spot(스윗 스팟), Missile Defense(미사일 방어), HRRPs(고해상도 거리 프로파일), Target Recognition(표적 인식), Adaptive Kalman Filter(적응형 칼만 필터)

I. 서 론

탄도미사일은 자체 추진으로 발사 지점부터 목표 지점까지 대기권 내·외에서 포물선을 그리며 날아가는 미사일이다. 제 2차 세계대전 중에 독일에서 발명되었으며, 이 당시의 탄도미사일 명중률은 극히 낮았으나 미국과 소비에트 연방의 지속적인 기술개발을 통해 오늘날 전장양상은 물론 군사력 건설 및 운용전략에 큰 변화를 가져오고 있다[1]. 앞으로는 이러한 전략 탄도 미사일 등의 공중 공격으로부터 주요 시설을 보호하는 것에 초점이 맞추어질 것으로 예측된다. 탄도미사일의 요격은 크게 세 영역 - 부스트 단계, 중간궤도 단계, 종말 단계 - 에서 이루어질 수 있으며, 이 중 난이도가 가장 쉬운 영역이 부스트 단계인 탄도미사일을 요격하는 것이다. 탐지만 제대로 된다면 가장 속도가 느린 영역이기 때문에 요격도 가장 쉽게 이루어질 수 있다. 나머지 두 단계에서의 요격은 표적에 큰 가속이 더해져 속도가 빠르고 요격 대비 시간도 짧아 부스트 단계에서의 요격보다 기술적으로 훨씬 어렵다. 하지만 부스트 단계 요격은 적진 근처에서의 요격을 전제로 하기 때문에 이보다 안전한 중간궤도 단계 혹은 종말 단계에서의 요격체계 시스템 개발에 대한 필요성이 제기된다.

일반적인 표적 추적 기법은 표적의 중심 위치를 측정에 활용하며, 표적의 모델 식별에 필수적인 기하 정보는 무시한다. 확장 표적(Extended Target) 추적은 레이더를 이용한 표적 추적시에 표적을 질점이 아닌 기하학적인 크기를 가진 물체로 인식하고 추적하는 것을 의미한다[2][3]. 하지만 최근의 추적 센서-대역폭이 넓은 고해상도 레이더는 신호대 잡음 비(SNR)이 충분히 큰 경우 표적의 질점 위치 뿐만 아니라 기하 정보까지 측정할 수 있게 되었다. 이러한 센서의 성능 개선에 힘입어 다양한 종류의 확장 표적에 대한 위치 추적 기법[4]-[7]이 나온 상태이지만 큰 계산 부하를 요구하거나 표적의 속도가 빠르지 않은 경우에 대한 연구가 대부분이다. 본 논문에서는 빠르게 기동하는 확장 표적에 대한 상태 추정 기법을 제시한다. 제시된 기법은 일반적인 미사일 위치 추적 필터에 표적의 기하학적 정보를 같이 추정할 수 있도록 설계되었다.

표적 상태 추정 중 필터의 발산이 일어날 가능성은 언제나 존재한다. 발산에 영향을 끼치는 원인은 다양하며, i) 상태벡터 혹은 측정 모델이 실제 시스템과 다르거나 적절하지 못한 경우, ii) 오차 특성이 잘못 예측된 경우, iii) 초기 추정치와 실제값 간에 큰 차이가 있을 경우, iv) 강한 비선형성 등의 예가 있다. 시스템 모델이 선형적이며 프로세스 잡음이 분산의 크기가 알려져 있는 가우시안 분포를 따른다고 가정했을 때, 칼만 필터가 초기 조건에 관계없이 정상상태에 수렴하는 것은 증명된 사실이다. 하지만 잡음 공분산 행렬 Q 와 R 이 실제 시스템과 동떨어진 값을 가지고 있으면 수렴 속도는 Q 와 R 이 실제 시스템과 비슷한 값을 가진 필터에 비해 확연한 차이를 보인다. 따라서 Q 와 R 값에 대한 적절한 추정에 대한 필요성이 제기되었으며, 이와 관련된 기법은 적응형 칼만 필터 (Adaptive Kalman Filter)[8]라는 이름으로 알려져 있다. 요격 미사일과 표적 미사일의 상대속도가 매우 크기 때문에 레이더 측정치의 SNR이 빠르게 변하게 되는데, 이와 함께 측정 잡음의 분산도 같이 변한다. 이에 따라 본 논문에서 제시된 추적 기법에 필터의 잡음 공분산 행렬 R 을 지속적으로 갱신하는 적응형 칼만 필터 기법을 적용하였다.

II. 본 론

2.1 문제 설정

2.1.1 스윗 스팟

요격미사일을 이용하여 탄도미사일을 요격하는 경우에 대하여 살펴보자. 표적의 탄두에 단일화된 폭약이 탑재된 경우, 요격미사일이 표적에 직격하는 경우에는 물리적 에너지가 충분할 때 (상대속도가 높을 때)는 무력화 확률이 100%에 수렴한다. 그러나 표적 탄두에 다수의 소형 폭탄이나 부 탄약이 탑재된 경우에는 요격미사일이 표적에 직격해도 일부분만 파괴되고 나머지가 생존하여 본래의 목적을 수행할 수 있다. 이러한 경우 표적에 탑재된 모든 탄약을 제거하기 위해 '스윗 스팟'이라 불리는 지점을 타격해야 한다.

Figure 1은 탄도 미사일 탄두의 스윗 스팟 부근을 직격했을 때의 무력화 확률을 도시하고

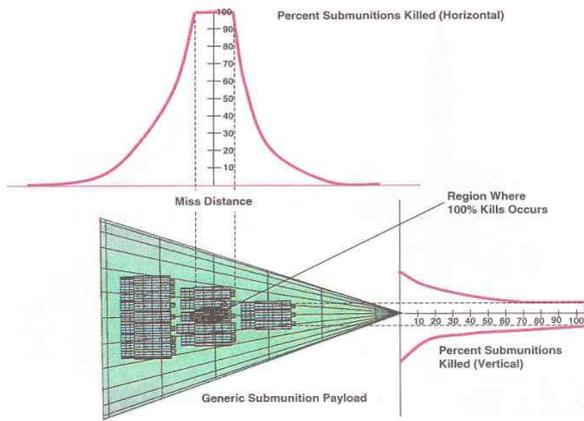


Fig. 1. Kill prob. around sweet spot [9]

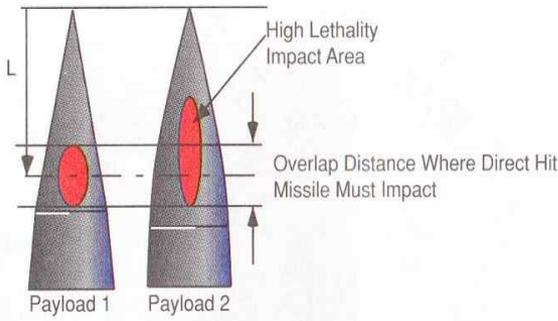


Fig. 2. Estimation of reference length [9]

있으며, 직격 위치가 스위트 스팟과 가까워지는 경우 확률이 급격히 높아짐을 확인할 수 있다. 따라서 직격을 통해 표적을 요격하는 시스템의 경우에는 스위트 스팟을 조준하는 것이 매우 중요하다.

표적 미사일의 스위트 스팟 위치는 표적의 모델마다 모두 다르다. 또한 요격미사일 입장에서 어떠한 탄도 미사일 표적을 요격해야 하는지에 대한 사전 정보가 없기 때문에, 최근의 접근 방법은 탄도 미사일 표적의 스위트 스팟의 위치를 분석한 후, 많은 탄도 미사일의 스위트 스팟을 다룰 수 있도록 기준 위치를 산출한다(Fig. 2).

요격 미사일의 탐색기 정보를 기반으로 한 스위트 스팟 산출 방법은 대략적으로 다음과 같다. 1) 탐색기로 들어온 신호를 신호처리하여 표적의 길이 L 을 추정한다. 2) 표적 추적 필터를 통해 표적의 위치와 속도를 추정한다. 3) 표적의 속도 정보를 통해 표적의 앞부분을 추정하고, 이를 탄두 부분이라 가정한다. 스위트 스팟은 표적 탄두의 앞부분을 기점으로 하여 $0 \sim 0.5L$ 사이에 위치해 있으나 일반적으로 $0.2 \sim 0.25L$ 로 가정한다[9].

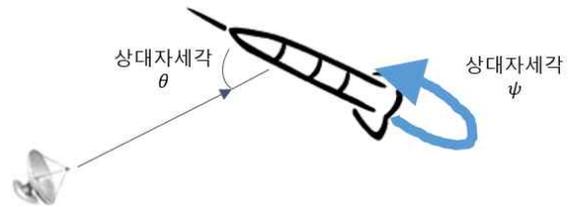


Fig. 3. Relative Attitude Angle of target

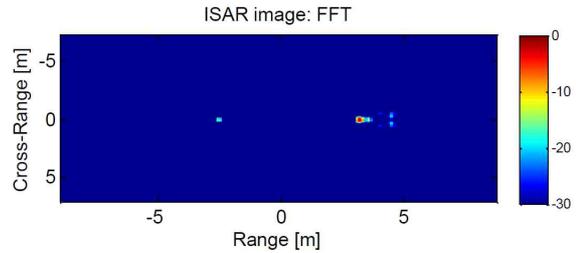


Fig. 4. ISAR Image of ballistic missile

2.1.2 ISAR 영상을 이용한 산란점 예측

레이더는 전자기파를 표적에 방사한 뒤 되돌아오는 신호를 이용하여 표적의 고도, 거리, 방향 등을 탐지한다. 산란점은 레이더에서 방사한 전자기파가 표적을 맞고 되돌아오는 위치를 의미한다. 탄도탄의 경우 송신신호가 탄두, 동체, 꼬리 날개 등에서 산란되어 다시 레이더로 돌아온다. 이 때, 세기의 차이에 의해서 보이지 않는 점들이 생기게 되는데, 보통 탄두의 경우에는 레이더 유효면적이 꼬리날개 부분보다 작기 때문에 꼬리날개 부분보다 낮은 세기의 전자기파가 반사된다. 탐색기의 산란점 감지 확률은 수신신호의 세기가 상대적으로 약한 부분에 대해서는 세기가 큰 부분보다 작은 것이 자명하며, 이러한 탄도 미사일에 대한 산란점의 특성을 알아보기 위하여 서로 다른 상대자세각에 대하여 ISAR 영상을 생성하였다 (Fig. 3, 4). 생성된 ISAR 영상은 2.1.3절의 HRRPs 생성을 위한 기초자료로 활용된다.

2.1.3 HRRPs 생성)

표적의 산란점으로부터 산란된 전자기파를 수신한 후, 수신한 데이터를 기반으로 푸리에 역변환을 통해 고분해능 거리 프로파일(HRRPs, High Resolution Range Profile)을 생성할 수 있다.

FMCW 레이더의 1차원 거리 프로파일 생성 방법은 다음과 같다. 단순화를 위해 레이더가 생성하는 신호는 주파수가 시간에 따라 선형으로 증가하는 처프 신호로 가정하고, 반송 주파수를 f_c , 대역폭 β , 처프 신호폭 τ , k 번째 산란점에 대

1) 본 절의 수식은 [10]을 참고함

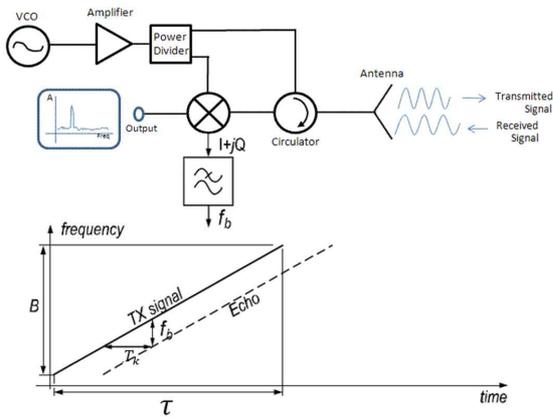


Fig. 5. FMCW Radar Diagram

한 지연시간 T_k , 그리고 송신 신호와 수신 신호의 진폭을 A, B 라고 하자. 이 때 송신 신호 x 와 수신신호 x_r 은 다음과 같이 표현된다.

$$x(t) = \begin{cases} A \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi\beta}{\tau} t^2\right) & \text{if } 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$x_r(t) = \begin{cases} B \cos\left(2\pi f_c (t - T_k) + \frac{\pi\beta}{\tau} (t - T_k)^2\right) & \text{if } T_k \leq t \leq T_k + \tau \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

위 두 신호는 믹싱 과정을 거치게 되며, 이는 수학적으로 같은 시간대에서의 두 신호의 곱과 같다(식 (3)).

$$v_{out} = \frac{AB}{2} \begin{bmatrix} \cos\left[\left(4\pi f_c - \frac{2\pi\beta T_k}{\tau}\right)t + \left(\frac{2\pi\beta}{\tau}\right)t^2 + \left(\frac{\pi\beta T_k^2}{\tau} - 2\pi f_c T_k\right)\right] \\ + \cos\left[\left(\frac{2\pi\beta}{\tau}\right)t + \left(2\pi f_c T_k - \frac{\pi\beta T_k^2}{\tau}\right)\right] \end{bmatrix} \quad (3)$$

첫 번째 코사인 항은 반송 주파수의 2배 대역에서 선형적으로 증가하는 처프 신호를 나타낸다. 이 항은 레이더의 믹서와 수신 구성 요소가 수용 가능한 최대 주파수를 넘어서기 때문에 일반적으로 걸러지게 되거나, 혹은 저주파 통과 필터를 통해 제거할 수 있다. 식 (3)의 두 번째 항은 k번째 산란점에 대한 진동 주파수 정보를 가지고 있으며, v_{out} 을 시간에 대해 미분해서 얻을 수 있다. k번째 산란점에 대한 진동 주파수는 다음과 같다.

$$f_{b_k} = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left[\left(\frac{2\pi\beta}{\tau}\right)t + \left(2\pi f_c T_k - \frac{\pi\beta T_k^2}{\tau}\right) \right] = \frac{\beta T_k}{\tau} \quad (4)$$

진동 주파수와 표적-레이더 간의 상대거리에 대한 관계식은 식 (5)와 같다.

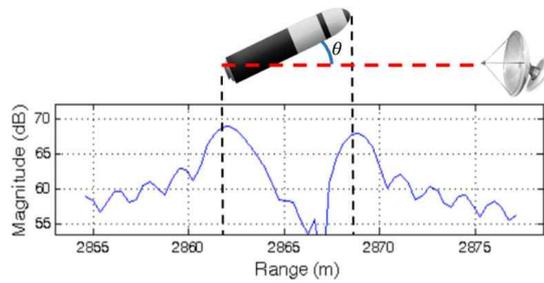


Fig. 6. Example of HRRPs

$$R_k = \frac{T_k c}{2\beta} f_{b_k} \quad (5)$$

2.1.4 표적 길이 추정

수신 신호를 기반으로 2.1.3절의 과정을 통해 HRRPs를 얻은 후, 표적의 거리와 탐색기 축으로 사영된 길이가 Fig. (6)과 같이 얻어진다. 그림을 통해 표적의 앞부분과 뒷부분 근방에 각각 피크가 존재함을 확인할 수 있다, 탐색기와 표적 간의 거리가 표적의 길이에 비해 훨씬 크기 때문에 표적의 앞부분과 뒷부분 각각에 대하여 탐색기의 시선축과 표적의 자세가 이루는 각도의 차이는 미미하다. 따라서 문제의 단순화를 위해 탐색기의 시선축과 표적의 자세가 이루는 각도는 θ 라 가정한다. 거리와 길이 정보는 본 논문에서 제시된 표적 추적 필터의 입력값으로 사용된다.

2.2 EKF 기반 표적 상태 추정

추정하고자 하는 시스템의 역학이나 측정 시스템이 비선형적일 경우 일반적으로 확장 칼만 필터(EKF, Extended Kalman Filter)가 많이 사용된다. 본 논문에서 다루는 문제의 경우, 요격 미사일에 탑재된 탐색기의 측정 시스템(거리 및 각도)이 비선형이기 때문에 표적의 위치와 속도, 그리고 길이 등을 추정하기 위해 확장 칼만 필터를 이용하여 필터를 구성하였다.

확장 칼만 필터는 표적의 상태를 추정하기 위한 두 가지 모델 - 플랜트 모델, 측정 모델 - 로 이루어진다. 플랜트 모델은 표적 모델의 사전 정보 (a priori information)와 불확실도의 추정을 위해, 측정 모델은 탐색기로부터 얻어진 정보와 플랜트 모델에서 계산된 정보를 이용하여 표적의 상태를 정확하게 추정하기 위해 존재한다. 두 모델은 각각 2.2.1절과 2.2.2절에서 논의된다.

2.2.1 플랜트 모델

본 논문에서 다루고 있는 시스템 방정식은 일반적인 탄도미사일 추적을 위한 시스템 방정식과

2) 본 절의 수식은 [5][11]을 참고함

같다. 이 때 \mathbf{x}_k 는 표적의 상태 벡터, \mathbf{F}_k 는 선형 상태 천이행렬, \mathbf{G} 는 중력행렬이다 (g 는 중력 상수, $g = 9.8m/s^2$).

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{G} + \omega_k \quad (6)$$

$$\mathbf{x}_k = [x \ v_x \ a_x \ y \ v_y \ a_y \ z \ v_z \ a_z \ L] \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_k = \text{diag}(\mathbf{F}_{sub}, \mathbf{F}_{sub}, \mathbf{F}_{sub}, 1) \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_{sub} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta & \Delta^2 / 2 \\ 0 & 1 & \Delta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{G} = -g [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \Delta^2 / 2 \ 0] \quad (10)$$

ω_k 는 공분산이 \mathbf{Q}_k 인 플랜트 잡음이며, \mathbf{Q}_k 는 다음과 같다.

$$\mathbf{Q}_k = q^2 \times \text{diag}(\mathbf{Q}_{sub}, \mathbf{Q}_{sub}, \mathbf{Q}_{sub}, \Delta) \quad (11)$$

$$\mathbf{Q}_{sub} = \begin{bmatrix} \Delta^5 / 20 & \Delta^4 / 8 & \Delta^3 / 6 \\ \Delta^4 / 8 & \Delta^3 / 3 & \Delta^2 / 2 \\ \Delta^3 / 6 & \Delta^2 / 2 & \Delta \end{bmatrix} \quad (12)$$

위 식에서 Δ 는 필터 업데이트 간격, 그리고 q 는 비모형화 표적 기동 가속 환산계수 (unmodeled target maneuver acceleration scaling factor)이다.

2.2.2 측정 모델³⁾

측정 모델의 시스템 방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (13)$$

\mathbf{v}_k 는 공분산이 \mathbf{R}_k 인 측정 잡음이며, \mathbf{R}_k 는 식 (14)와 같다.

$$\mathbf{R}_k = \text{diag}(\sigma_{range}^2, \sigma_{bearing}^2, \sigma_{elevation}^2, \sigma_{length}^2) \quad (14)$$

식 (14)에서 \mathbf{R}_k 를 이루고 있는 구성 요소는 각 측정치의 분산값이다. 일반적으로 \mathbf{R}_k 를 고정값으로 두어 필터를 구성하지만 본 논문에서는 표적을 추적하면서 \mathbf{R}_k 를 변화시키는 기법에 대해 2.3에서 제안하고 있다.

논문에서 다루는 표적의 역학은 선형적이거나, 측정 프로세스는 비선형적이다. 레이더의 측정치는 요격 미사일에 탑재된 탐색기와 표적의 거리, 레이더 빔 각도, 그리고 탐색기의 시선축에 투영된 표적의 길이이며, 식 (15)와 같다 ($length_{proj}$:

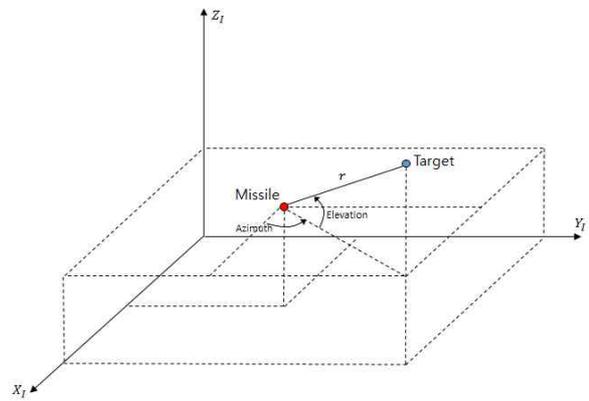


Fig. 7. Missile Seeker Geometry

투영된 표적의 길이).

$$\mathbf{h}_k = \begin{bmatrix} range \\ azimuth \\ elevation \\ length_{proj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \tan^{-1}(y/x) \\ \tan^{-1}(z / \sqrt{x^2 + y^2}) \\ length \cdot |\cos\theta| \end{bmatrix} \quad (15)$$

일반적으로 레이더로부터 측정된 빔의 각도 (방위각-azimuth angle, 고각-elevation angle)는 레이더의 기체 고정 좌표계를 기준하여 측정되지만, 본 논문에서는 문제의 단순화를 위하여 레이더의 자세각이 알려져 있고 이를 통해 레이더로 측정되는 빔의 각도가 관성좌표계를 기준으로 한다고 가정한다(Fig. 7).

식 (15)의 $\cos\theta$ 를 구하기 위해 아래와 같이 α, β, γ 를 정의한다(θ 는 Fig. 6을 참고).

$$\alpha = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (16)$$

$$\beta = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (17)$$

$$\gamma = xv_x + yv_y + zv_z \quad (18)$$

표적이 매우 빠른 속도로 움직일 때, 반응각의 크기는 0에 수렴하므로, 모델의 단순화를 위해 표적이 이루는 자세축과 속도 벡터가 같다고 가정할 수 있다. 이와 같은 가정을 통해 벡터의 내적을 이용하여 $\cos\theta$ 를 식 (19)와 같이 계산할 수 있다.

$$\cos\theta = \frac{xv_x + yv_y + zv_z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} = \frac{\gamma}{\alpha\beta} \quad (19)$$

식 (15-19)에서 확인할 수 있듯이 측정 프로세스는 상당히 비선형적이며, 따라서 위 모델을 확장 칼만 필터에 적용하기 위해서는 식 (15)를 급수 전개를 이용하여 선형화할 필요가 있다. 자코비안 행렬 \mathbf{H}_k 의 정의를 적용하여 표적에 대한 가장 최근의 상태벡터 $\hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)}$ 를 이용한 식 (15)

3) 본 절의 수식은 [11]을 참고함

의 \mathbf{h}_k 에 대한 편미분 값을 구할 수 있다. \mathbf{H}_k 의 정의는 다음과 같다.

$$\mathbf{H}_k \equiv \left. \frac{\partial \mathbf{h}_k(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)}} \quad (20)$$

2.3 표적 추적을 위한 적응형 칼만 필터

2.1.2절에서 레이더를 통해 표적의 거리와 각도 측정에 대해 언급하였다. 이 때 수신 안테나로 되돌아 오는 전력 P_r 은 다음과 같다 [13].

$$P_r = \frac{P_T G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R^4} \quad (21)$$

- P_T = 송신 전력
- G_t = 송신 안테나 게인
- A_r = 수신 안테나 유효 면적
- σ = 레이더 직경 혹은 목표물 산란 계수
- F = 패턴 전파 인자
- R = 표적과 레이더 간의 거리

SNR(신호 대 잡음 비)은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \quad (22)$$

식 (21)의 P_T, G_t, A_r, F 그리고 P_{noise} 가 표적 추적 중에 상수로 가정하면 SNR은 다음과 같다.

$$\text{SNR} = k \frac{\sigma}{R^4} \quad (23)$$

레이더와 표적 사이의 각도 측정은 널 스티어링 (Null steering) 기법을 통해 다음과 같은 정확도로 값을 얻을 수 있음이 알려져 있다[13].

$$\sigma_{\theta, \phi} = \frac{\theta_{3\text{dB}}}{k' \sqrt{2(\text{SNR})}} \quad (\text{deg}) \quad (24)$$

- $\sigma_{\theta, \phi}$ = 측정 각도 오차 표준편차
- $\theta_{3\text{dB}}$ = 안테나 빔폭(deg)
- k' = 레이더 종류에 따른 상수

미사일 방어 시스템에서의 표적 추적 문제는 표적이 매우 빠른 속도로 기동하는 상황에 대해 다루게 된다(일반적으로 Mach. 3~7). 식 (23)에서의 k 와 σ 가 추적 중에 크게 변하지 않는다고 가정했을 때 SNR값이 R^4 에 반비례하며, 결과적으로 $\sigma_{\theta, \phi}$ 는 R^2 에 반비례하기 때문에 시간에 따른 오차의 폭이 매우 큼을 예상할 수 있다. 이러한 상황에 대하여 효율적으로 상태벡터를 추정할 수 있는 기법이 필요하다. 본 절에서는 2.2의 확장

칼만 필터에서 정의된 측정 잡음 공분산 \mathbf{R}_k (식 (14))를 지속적으로 갱신하는 기법을 제안한다.

2.3.1 SNR-적응형 칼만 필터

식 (15)의 측정값을 레이더와 표적 간의 3차원 관성 좌표계로 변환한 결과는 식 (25)와 같다.

$$\begin{aligned} x_r &= r \cos(\phi) \cos(\theta) \\ y_r &= r \cos(\phi) \sin(\theta) \\ z_r &= r \sin(\phi) \end{aligned} \quad (25)$$

이해를 돕기 위해 식 (14)를 다시 표기한다.

$$\mathbf{R}_k = \text{diag}(\sigma_{\text{range}}^2, \sigma_{\text{bearing}}^2, \sigma_{\text{elevation}}^2, \sigma_{\text{length}}^2) \quad (14)$$

일반적으로 거리 분산 σ_r^2 은 레이더의 성능에 의존적이며 표적 추적 중에는 잘 바뀌지 않는 특성이다. 본 논문에서 다루고 있는 문제는 각도 측정오차의 분산 $\sigma_{\text{bearing, elevation}}^2 = \sigma_{\theta, \phi}^2$ 에 대한 적절한 추정이며, 표적의 상태벡터와 $\sigma_{\theta, \phi}^2$ 의 추정은 레이더 측정값을 기본으로 한다. $\sigma_{\theta, \phi}^2$ 를 추정할 때 $\sigma_{\text{range}} = \sigma_r$ 이 충분히 작으며 레이더와 표적 간의 거리 r 이 충분히 크고, 필터를 통해 구한 표적의 위치 추정 값이 실제 값에서 크게 벗어나지 않는다고 가정하면 각도 오차는 3차원 직교좌표계에서 표현되는 거리 오차를 레이더에서 사용되는 uv 평면상에서 발생하는 각도 오차라 가정하여 식 (26)과 같이 추정할 수 있다.

$$\text{error}_{\text{angle}k} = \frac{\sqrt{(x_{r,k} - \hat{x}_k)^2 + (y_{r,k} - \hat{y}_k)^2 + (z_{r,k} - \hat{z}_k)^2}}{r_k} \quad (26)$$

\mathbf{R}_k 의 $\sigma_{\theta, \phi}^2$ 추정 과정은 다음과 같다.

1. 추적 필터에 초기값 $\hat{X}_{0|0}, P_{0|0}, Q_1, R_1$ 을 입력한다.
2. 레이더 측정값 Y_k 를 얻는다 ($k=1 \sim n$)
3. 2.2절에서 제시된 확장 칼만 필터를 통해 $\hat{X}_{k|k}, P_{k|k}$ 를 추정한다.
4. 식 (25)를 통해 $x_{r,k}, y_{r,k}, z_{r,k}$ 를 구하고, 식 (26)을 통해 각도 오차를 추정한다.
5. 지수이동평균을 사용하여 $\sigma_\theta, \sigma_\phi$ 를 개선한 후 \mathbf{R}_{k+1} 에 대입한다. 식은 아래와 같으며, α 는 0~1 사이의 임의의 상수이다.

$$\sigma_{\theta, k+1} = \sqrt{\alpha \cdot \text{error}_{\text{angle}k}^2 + (1-\alpha) \sigma_{\theta, k}^2}$$

$$\sigma_{\phi, k+1} = \sqrt{\alpha \cdot \text{error}_{\text{angle}k}^2 + (1-\alpha) \sigma_{\phi, k}^2}$$
6. 2~5를 시뮬레이션 종말까지 반복한다.

Table 1. FMCW Radar Condition

조건	값
반송 주파수	Ka Band
거리 분해능	0.75m

Table 2. Intercept missile model conditions

조건	값
미사일 질량	상수
유도 항법	True Proportional Nav
발사 위치	(675, 210), (680, 210), (680, 220), (690, 210), (700, 210) km

Table 3. Ballistic missile model conditions

조건	값
발사 위치	(30, 40, 0) (km)
미사일 추력	6g
부스터 구간	60 (sec)
중력	상수 (g)
표적 길이	10m

2.4 시뮬레이션

2.4.1 시뮬레이션 조건 및 테스트베드 데이터

2.2, 2.3 절에서 제안된 표적 추적 기법이 효과적으로 본래의 목적을 달성할 수 있는지 확인하기 위하여 시뮬레이션이 수행되었다. 탐색기로부터 송신되는 신호는 FMCW으로 가정되었으며, Table 1의 조건이 시뮬레이션에 적용되었다. 제안된 표적 추적 기법의 시뮬레이션을 위해 Table 2 조건을 적용하여 요격 미사일의 궤적을, Table 3 조건을 적용하여 표적 미사일의 궤적을 생성하였다. Fig. 8에서는 두 궤적이 한 지점에서 만나는 것을 확인할 수 있으며 실선이 표적 미사일, 점선이 요격 미사일의 궤적이다. 요격 미사일의 발사 위치는 (680, 210)km이다.

탐색기의 시선축과 표적의 동체가 이루는 상대 자세각 θ , ψ 를 변경해가며 2.1.2절의 Fig. 4와 같은 ISAR 이미지를 얻은 후, Table 1의 조건을 기반으로 하여 2.1.3절에 기술된 고분해능 거리 프로파일 생성 기법을 적용한 후 요격 미사일 탐색기의 측정값을 생성하였다. 측정값을 기반으로 본 논문에서 제시한 표적 상태 추정 기법을 적용하였다.

2.4.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 약 1.2초 동안의 표적 요격 상황

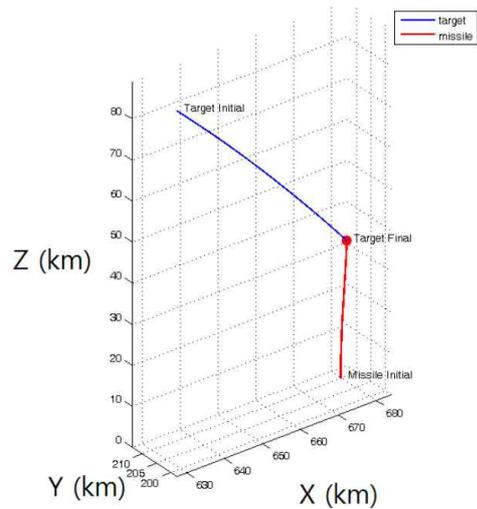


Fig. 8. Missile Trajectory

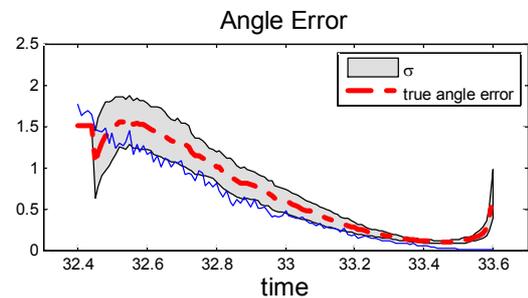


Fig. 9. True Angle Error & Noise std. vs time

에 대해 진행되었다. 본 논문의 2.3절에서 제시된 기법을 통해 갱신되는 잡음 공분산 행렬 R_k 의 값은 Fig. 9를 통해 확인할 수 있다. 몬테 카를로 시뮬레이션을 수행하였으며, 수행 횟수는 100번이다. 실선은 요격 미사일 탐색기의 시간에 따른 실제 각도 오차 평균을 나타내고 있으며, 일점쇄선은 추정된 R_k 의 표준편차 평균을 나타낸다. 빨간색 주위의 회색 영역은 1σ 영역을 나타낸다. R_k 의 추정 값이 시뮬레이션 종말 단계에서 약간 발산하는데, 이는 표적과 탐색기간의 거리가 가까워지며 생기는 현상이다.

Figure 10은 필터 결과 값의 실제 데이터와의 오차를 나타내고 있다. Fig. 10의 일점쇄선은 레이다 측정치를 식 (25)를 통해 변환한 결과를 실제 데이터와 비교하여 오차를 측정한 것이며, 점선은 Q_k 가 상수로 설정된 기존의 확장 칼만 필터 결과, 굵은 실선은 새로이 적용된 적응형 칼만 필터 결과를 나타낸다.

Figure 10의 아래에 있는 그래프는 위의 그래프를 확대한 것이며, 그래프를 통해 적응형 칼만 필터의 결과가 기존의 필터에 비해 수렴 속도 및

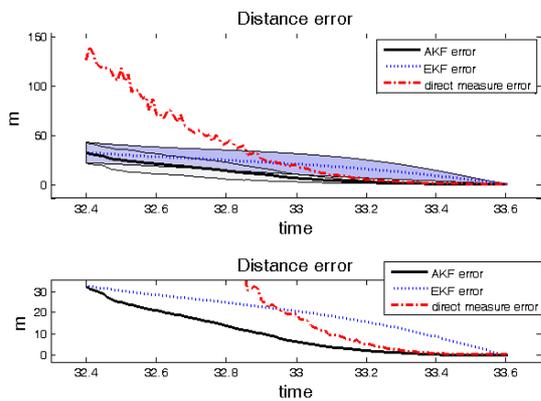


Fig. 10. Filter Estimation Error

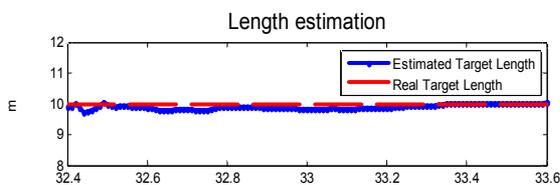


Fig. 11. Target Length Estimation

오차가 더 적음을 확인할 수 있다. Fig. 11은 필터를 통해 추정된 표적의 길이를 시간에 따라 나타내고 있으며, 추정값이 실제값에 거의 수렴함을 확인할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 레이더의 1차원 거리 프로파일을 기반으로 한 표적 추적 및 길이 추정에 관한 문제에 대하여 다루었다. 미사일 요격 상황에서 직격을 통해 표적을 무력화하는 요격 미사일은 표적의 스윛 스팟이라 불리는 위치를 타격해야 하며, 이를 위해서는 표적의 길이를 추정해야 한다. 요격 미사일에 탑재된 탐색기는 FMCW 레이더이며, 1차원 거리 프로파일을 생성할 수 있다고 가정되었다.

표적의 상태 벡터 추정을 위하여 확장 칼만 필터가 설계되었으며, 이에 더불어 확장 칼만 필터의 잡음 공분산 행렬을 레이더 측정값을 기반으로 지속적으로 갱신해 나가는 적응형 기법이 추가되었다. 탄도 미사일에 대한 요격 상황에 대하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과는 논문에서 제시된 기법이 이에 적합함을 보여준다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되

었으며, 지원에 감사드립니다(계약번호 : UD1300 02CD).

References

- 1) H. S. Kim, K. T. Kim, and G. W. Jeon, "A requirement Assessment Algorithm for Anti-Ballistic Missile Considering Ballistic Missile's Flight Characteristics, Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology", 14(6), pp. 1009~1017, Dec. 2011
- 2) Samuel S. Blackman, "Multiple-Target Tracking with Radar Applications", Artech House Radar Library, Dec. 1986
- 3) Y. Bar-Shalom and X. R. Lie, 1993, "Estimation and Tracking Principles", Techniques and Software, Artech House, Boston, London
- 4) G. G. Choi, S. K. Han, H. J. Jo, H. T. Kim, K. T. Kim, S. C. Song, and Y. J. Na, "A Study on Signal Processing of Ballistic Missile Warhead Discrimination Using ESPRIT in Millimeter-Wave (Ka-Band) Seeker", Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 23(2), pp. 266-269, Feb. 2012
- 5) Antonio P. SanJose, 1998, "Theater Ballistic Missile Defense - Multisensor Fusion, Targeting and Tracking Techniques", Master of Science in Electrical Engineering from the Naval Postgraduate School, pp. 5~7
- 6) Jean Dezert, "Tracking maneuvering and bending extended target in cluttered environment", In Proc. of SPIE, volume 3373, pp. 283~294, 1998
- 7) Branko Ristic and David J. Salmond, "A study of a nonlinear filtering problem for tracking an extended target", ISIF (International Conference on Information Fusion), volume I, pp. 503~509, June, 2004
- 8) R. K. Mehra, 1970, "On the identification of variance and adaptive Kalman filtering", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 15, No.2, pp. 175~184
- 9) R. M. Lloyd, "Physics of Direct Hit and Near Miss Warhead Technology", Progress in Astronautics and Aeronautics, 2001
- 10) Graham M. Brooker, "Understanding Millimetre Wave FMCW Radars", 1st

International Conference on Sensing Technology, pp. 152~157, Nov. 2005

11) D. H. Cho, H. L. Choi, J. I. Lee and K. R. Song, "HRRPs-Based Target Length Estimation Using a FMCW Radar", IEEE Radarcon 2014, pp329~333, May. 2014

12) D. H. Cho and H. L. Choi, Target Tracking based on SNR-Adaptive Kalman Filter, KSAS Autumn Conference, Nov. 2014

13) M. Skolnik, Introduction to Radar Systems 2nd ed, McGraw Hill, 1980

14) J. W. Park, D. S. Jang, H. L. Choi, M. J. Tahk, J. E. Roh and S. J. Kim, "Integrated Simulator of Airborne Multi-function Radar Resource Manager and Environment Model," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Science, vol. 41, No. 7, pp. 577-587, 2013.