

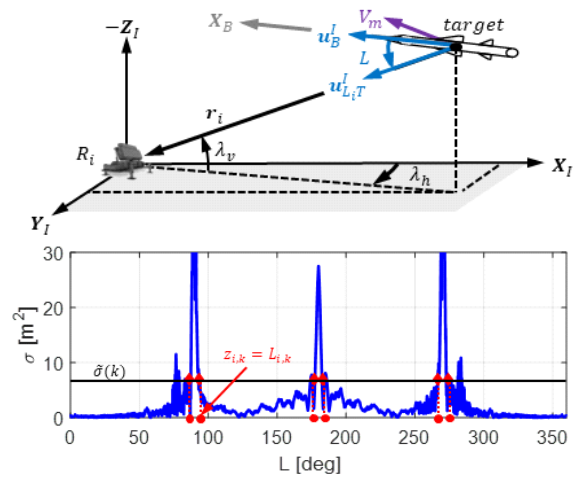
레이더 반사면적 측정치를 이용한 외기권 표적의 측각 추정

이찬석, 나원상
 한동대학교 기계제어공학과

Aspect Angle Estimation of Exo-atmospheric Target Using RCS Measurement

Chan-Seok Lee and Won-Sang Ra
 Handong Global University

Abstract - This paper addresses an aspect angle estimation problem using RCS(radar cross section) measured by multiple radars. Existing methods make use of the HMM(hidden markov model) and template matching techniques for aspect angle estimation. However, their performance is restrictive as it is difficult to consider both the temporal correlation and uncertainty of template in designing an algorithm. As a viable resolution to this issue, the target angular motion is estimated using the converted measurements which correspond to the cosine of a radar aspect angle. The problem of one-to-many mapping relation between the aspect angle and the converted measurement is tackled by a data association filtering scheme. Simulation results for a typical exo-atmospheric target trajectory show that the proposed method provides satisfactory and reliable aspect angle estimation performance even under low signal-to-noise ratio conditions.



<그림 1> 상대기하 정의 및 변환 측정치 생성개념

1. 서 론

동시 다발적인 탄도탄 위협이 고조됨에 따라 탄도탄 방어체계를 구성하고 있는 레이더 추적자원 관리가 중요한 이슈로 부각되고 있다. 레이더 추적자원 낭비를 막기 위해서는 탄도탄 표적의 탄두부와 부스터, 기만체, 잔해물 등 비위협 물체들을 조기에 걸러내야 한다. 이를 위해, 최근 표적 형상에 따라 그 특성이 달라지는 HRRP (high resolution range profile), RCS (radar cross section) 등 레이더 신호정보를 적극적으로 활용한 표적 식별 알고리즘이 활발히 연구되고 있다. 불행하게도 이들 신호정보는 측각에 따라 매우 크게 변화하여, 측각 추정은 표적 식별 알고리즘의 구현과 적용을 위해 반드시 해결해야 할 과제다.

레이더에서 제공되는 표적 반사신호 측정치의 측각 민감도 문제를 해결하기 위한 통상적인 해법 중 하나는 시퀀스 측정치의 주파수 혹은 패턴을 사전에 학습된 신호모델과 매칭하는 것이다 [1]. 하지만, 이 기법은 패턴 매칭을 위해 넓은 시구간에 걸친 신호 측정치 데이터가 필요하여 신속한 식별이 요구되는 탄도탄 방어에 적합하지 않다. 그 보완책으로 HMM (Hidden Markov Model)을 활용하여 실시간으로 탄도탄 표적의 측각 구간을 예측하는 방법이 제안되었다 [2]. 이 기법에 의해 산출된 측각 추정치의 해상도는 HMM에 사용된 이산화 된 상태개수로 제한된다. 더욱이 이들 방법은 SNR(signal-to-noise ratio)가 낮은 상황에서는 측각 추정 성능이 떨어져 표적 식별 알고리즘의 신뢰도 확보 측면에서 그 효용성이 떨어지는 한계가 있다.

진술한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 측각 산출에 필요한 표적자세를 직접 추정하는 방법을 제안한다. 이를 위해 표적 동특성을 비선형 확률동적 시스템으로 모델링한다. 레이더 시선벡터와 표적 동체축 방향의 단위벡터의 내적이 측각의 함수로 기술된다는 점에 착안하여, 사전에 주어진 RCS 템플릿의 역함수를 이용하여 RCS 측정치로부터 표적 자세각의 함수로 기술되는 변환측정치를 산출한다. 이때, 동일한 RCS에 대해 여러 개의 변환측정치가 생성될 수 있으므로 자료연관 개념을 적용하여 손쉽게 표적 자세 추정기를 설계할 수 있다. 제안된 기법을 사

용할 경우 표적 동특성을 적극적으로 활용할 수 있어 기존 기법과 달리 안정적이고 빠른 측각 산출이 가능하다. 뿐만 아니라, 낮은 SNR 상황에서도 측각 추정오차 증가를 억제할 수 있어 표적식별 알고리즘 구현에 큰 도움을 줄 수 있다. 외기권 표적 추적에 대한 모의실험을 통해, 제안 기법의 성능을 확인한다.

2. 탄도탄 표적 측각 추정 필터 설계

2.1 측각 동특성 모델링

측각의 동특성을 모델링하기 위해서는 우선 측각을 표적 자세와 표적 시선벡터의 함수로 표현할 필요가 있다. 먼저, 레이더 R_i 에서 표적까지의 단위 시선벡터 $\mathbf{u}_{R_i,T}^I$ 와 표적의 단위 자세벡터 \mathbf{u}_B^I 를 다음과 같이 정의하자.

$$\mathbf{u}_{R_i,T}^I = C_L^I [1, 0, 0]^T, \quad \mathbf{u}_B^I = C_B^I [1, 0, 0]^T. \quad (1)$$

여기서 C_L^I 는 레이더 시선좌표계에서 관성좌표계로의 좌표변환 행렬을, C_B^I 는 표적 동체 좌표계에서 관성좌표계로의 좌표변환 행렬을 의미한다. 이 때, 레이더 R_i 와 표적 사이의 측각 L 은 다음과 같이 계산된다.

$$\cos L = \langle \mathbf{u}_B^I, \mathbf{u}_{R_i,T}^I \rangle \quad (2)$$

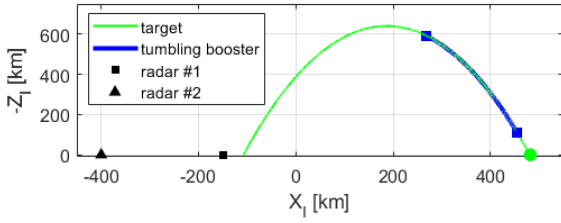
표적이 외기권에 진입하면 외란 혹은 편심 등에 의해 발생된 초기 각속도로 회전하며 탄도궤적을 따라 비행하게 된다 [3]. 따라서, 외기권에서는 측각을 $L \cong \omega t + \phi_0$ 로 근사해도 무방하다. 여기서 ω 는 표적의 회전운동 주파수를 의미한다. 따라서, 표적 각운동을 기술하기 위한 상태변수 \mathbf{x}_k 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{x}_k \equiv [x_k \dot{x}_k \omega]^T, \quad x_k \equiv A \cos(\omega t + \phi_0) \quad (3)$$

이 경우 표적 자세각 추정을 위한 이산 시스템 모델은 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k) + G\mathbf{w}_k \quad (4)$$

여기서



<그림 3> 2차원 모의실험 궤적 및 표적형상 CAD모델

$$f(\mathbf{x}_k) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ -\omega^2 & 1 & -2\omega x_k T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, Q_k = \tilde{q} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4}{3}\omega^2 x_k^2 T^3 & -\omega x_k T^2 \\ 0 & -\omega x_k T^2 & T \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{w}_k \sim N(0, Q_k), G = [0, 0, 1]^T.$$

2.2 변환 측정치를 활용한 측각 추정필터 설계

k 시점에서 표적 RCS 측정치 $\tilde{\sigma}(k)$ 가 획득되면 표적 RCS 템플릿으로부터 그림 2와 같이 변환측정치 집합 Z_k 가 획득된다.

$$Z_k = \{z_{i,k}\}_{i=1}^{N_k}, z_{i,k} = L_{i,k} \quad (5)$$

편상 변환측정치의 측정잡음을 정규분포로 근사하면, 다음 측정방정식을 정의할 수 있다.

$$z_{i,k} = H\mathbf{x}_k + v_k, H = [1 \ 0 \ 0]^T, v_k \sim N(0, R_k) \quad (6)$$

따라서, 표적 각운동 추정필터 순환식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

측정치 갱신 식

$$K_{f,k} = P_{k|k-1} H^T (R_k + H P_{k|k-1} H^T)^{-1},$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + K_{f,k} (z_{i,k} - H \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}), \quad (7)$$

$$P_{k|k} = (I - K_{f,k} H) P_{k|k-1}.$$

시스템 전파 식

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = f(\hat{\mathbf{x}}_{k|k}), P_{k+1|k} = F_k P_{k|k} F_k^T + Q_k. \quad (8)$$

여기서 $F_k = [\partial f / \partial \mathbf{x}]_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k|k}}$ 는 시스템 자코비안 행렬이다.

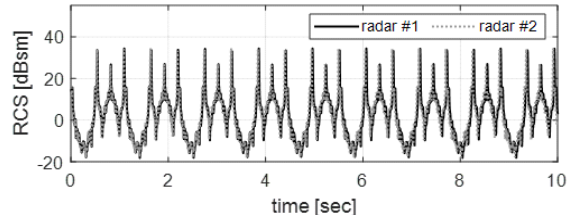
한편, 매 시점 하나의 RCS 측정치에 대해 다수의 변환측정치가 생성될 수 있으므로, 이중 어떤 것이 실제 측각으로부터 유래된 것인지 판별해야 한다. 특히, 탄도탄 표적의 경우 측각 180° 를 기준으로 RCS가 대칭이 되므로 자료연관 개념을 적용하더라도 단일 레이더로는 필연적으로 2개의 표적자세 트랙이 생성된다. 따라서, 표적 측각 추정을 위해서는 2개 이상의 레이더에서 획득된 RCS 측정치의 활용이 필요하다.

2.3 성능분석

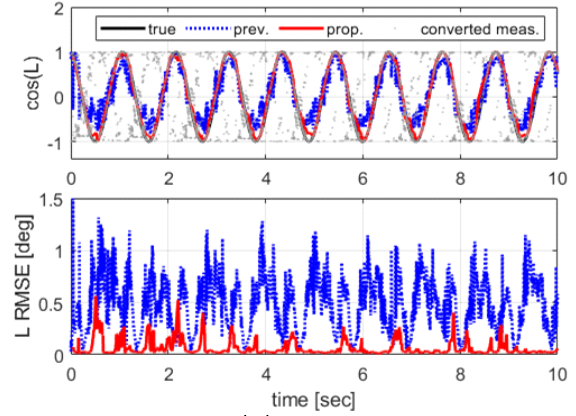
HMM을 활용한 기존기법과 제안기법의 측각 추정 성능 비교를 위해 그림 3의 시나리오에 대한 모의실험을 수행한다. 해석의 편의상 2차원 수직면 상에서 표적이 회전 운동하는 상황을 가정하였다. 표 1의 조건을 적용하여 2대의 레이더에 대한 RCS 측정치를 생성하였다. 그림 3의 표적 형상에 대해 ANSYS HFSS RF 해석 도구를 활용하여 측각에 대한 표적 RCS 템플릿을 획득하였다. 기존 HMM 기법을 설계 시 측각 전 구간을 0.5° 단위로 일정하게 나누어 잠재상태를 정의했으며 출력확률로 표 1의 분포 모델을 활용하였다. 제안기법의 자료연관 필터로는 GNN (Global Nearest Neighborhood) 기법을 적용하였으며, Wald 검정을 통해 트랙 삭제 및 초기화를 수행하였다.

<표 1> 모의실험 조건

샘플링 시간	$T = 0.05 [\text{sec}]$
측정잡음 특성	$p(\sigma) = \frac{\sigma}{r^2} \exp\left(\frac{-(\sigma^2 + \nu^2)}{2r^2}\right) I_0\left(\frac{\nu\sigma}{r^2}\right),$ $r \propto 1/R^4, r \in [-40, -20] [\text{dBsm}], \gamma = \sigma(L)$



<그림 4> 시간에 따른 RCS 참값



<그림 6> $\cos(L)$ 추정치 평균 및 RMSE

그림 5는 각 레이더에서의 시간에 대한 RCS 참값을, 그림 6은 100회 몬테칼로 시뮬레이션을 통해 산출된 $\cos(L)$ 추정치의 평균과 L의 RMSE를 나타낸다. 모의실험 결과 기존기법의 RMSE 전체 구간 평균은 0.509° 였으며, 특히 RCS 값이 감소하여 SNR이 줄어드는 구간에서 증가하는 경향을 보였다. 반면, 제안기법의 RMSE는 전체 구간 평균 0.056° 로 기존기법에 비해 9.09배가량 낮게 나타났으며, RCS가 작은 구간에서도 비교적 일정하게 유지된다. 이러한 성능차는 동특성의 활용 여부에 기인한다. 제안기법의 경우 동특성과 측정치를 동시에 활용하여 측각을 추정하지만, 기존기법의 경우 측정된 RCS의 측각 구간 가설에 대한 우도만을 활용하므로 측정치의 품질에 따라 추정 성능이 급격히 저하될 수 있다. 또한, 측각 $\pm 90^\circ, 180^\circ$ 부근에서 RMSE가 주기적으로 증가하는 패턴을 보이는데, 이는 그림 2에서 볼 수 있듯 해당 구간에서 허위 변환 측정치가 참값과 매우 인접한 곳에서 나타나 자료연관 성능이 저하되기 때문이다.

3. 결 론

다수 레이더에서 획득된 RCS 정보와 자료연관 개념을 활용한 외기권 표적의 측각 추정 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 표적의 각운동 동특성을 활용할 수 있어 기존 HMM 기법과 달리 낮은 SNR 상황에서도 측각 추정의 안정성과 성능을 보장할 수 있다. 모의실험을 통해 기존기법 대비 제안기법이 약 9.09배 향상된 측각 추정 성능을 보임을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 광역방어 특화연구센터 프로그램 (UD200043CD)의 일환으로 국방과학연구소와 방위사업청의 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] B. Jia, et al., Space object classification using deep neural networks, In *2018 IEEE Aero. Conf.*, pp. 1-8, 2018.
- [2] D.C. Moody, *Aspect angle estimation of roll symmetric ballistic missile objects using low-range resolution radar returns*, UAH Electronic Theses and Dissertations, 2015.
- [3] X.R. Li, et al., "Survey of maneuvering target tracking. Part II: Motion models of ballistic and space targets", *IEEE Trans. Aero. Elect. Sys.*, pp. 96-119, 2010