

VTS를 위한 기동 표적 추적 알고리즘 설계

† 김병두 · 김도형 · 이병길

† 한국전자통신연구원 융합보안연구실

요 약 : 해상감시레이더는 관제지역의 해상교통정보를 수집하는 해상교통관제시스템의 주요 센서로, 다양한 운동 특성을 갖는 선박의 안정적인 추적과 위치, 속도, 침로 등의 정확한 정보를 제공하는 것은 VTS 성능 개선 및 서비스 고도화에 매우 중요한 요소 기술이다. 본 논문에서는 해상교통관제시스템에서 다양한 기동 특성을 갖는 선박의 정확한 추적을 위하여 상호작용 다중필터(IMM) 추정기를 이용한 추적 알고리즘을 설계하고, 모의실험을 통하여 필터뱅크의 구성에 따른 성능 비교 및 분석을 수행한다.

핵심용어 : 해상교통관제시스템, 기동 표적, 상호작용 다중필터(IMM)

1. 서 론

해상교통관제시스템(VTS)은 체계적이고 안전한 선박의 입출항 관리를 통하여 해양사고 예방 및 항만 운영의 효율성 증대를 위한 시스템으로 관제지역의 레이더 영상 및 선박의 위치, 속도 정보를 얻기 위하여 해상감시레이더를 주요 센서로 사용하고 있다.

일반적으로, 해상감시레이더의 추적시스템은 레이더 영상으로부터 추출된 표적의 위치로부터 표적의 위치, 속도 등을 추정하여야 하며, 동시에 다중 표적을 추적하여야 하므로 연산량을 최소화할 수 있는 α - β 와 같은 고정이득 필터나 단일 칼만 필터 등이 현재에도 광범위하게 사용되고 있다(Kim, 2007).

그러나, 기술의 발달과 더불어 레이더 추적시스템은 기동표적에 대한 정밀한 추적뿐만 아니라, 표적에 대한 다양한 정보를 제공할 것을 요구받고 있다. 기동표적을 추적하기 알고리즘으로는 Blom(Blom, 1988)에 의해 제안된 상호작용 다중모형(IMM) 추정방법이 가장 적합한 방법으로 받아들여지고 있으며, 항공관제를 비롯한 다양한 추적시스템에 성공적으로 적용되고 있다(Ycddanapudi, 1997).

본 논문에서는 해상교통관제시스템에서 기동표적을 추적하기 위하여 IMM 추정기를 이용한 추적 알고리즘을 설계하고, 모의실험을 통하여 설계 검증을 수행한다.

2. 레이더 추적 알고리즘 설계

2.1 운동 방정식

본 논문에서는 등속 운동 모델, 등가속 운동 모델을 이용하여 필터뱅크를 설계한다.

1) 등속 운동 모델

등속 운동 모델에 대한 2차원 추적필터의 상태 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_{cv,k+1} = \Phi_{cv} \mathbf{x}_{cv,k} + G_{cv} v_k \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{x}_{cv,k}$ 는 k번째 스캔에서 표적의 위치, 속도에 대한 상태 벡터이며, v_k 는 공정잡음으로 평균이 0인 백색잡음으로 가정한다. 상태벡터로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_{cv,k} = [x_k \ y_k \ \dot{x}_k \ \dot{y}_k] \quad (2)$$

또한, 상태전이 행렬 Φ_{cv} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_{cv} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, T 는 이산화 시간이다.

2) 등가속 운동 모델

등가속 운동 모델에 대한 2차원 추적필터의 상태벡터와 상태 방정식은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_{ca,k} = [x_k \ y_k \ \dot{x}_k \ \dot{y}_k \ \ddot{x}_k \ \ddot{y}_k] \quad (4)$$

$$\mathbf{x}_{ca,k+1} = \Phi_{ca} \mathbf{x}_{ca,k} + G_{ca} w_k \quad (5)$$

또한, 상태전이 행렬 Φ_{ca} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_{ca} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 & T^2/2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T & 0 & T^2/2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2 측정 방정식

극 좌표계에서 측정된 2차원 레이더의 측정값 거리(r_m) 및 방위각(θ_m)은 다음과 같이 직교 좌표계로 변환된 측정값으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_m &= r_m \cos \theta_m \\ y_m &= r_m \sin \theta_m \end{aligned} \quad (7)$$

직교 좌표계로 변환된 측정값에 대한 측정오차 공분산 행렬

은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = DR_p D^T \quad (8)$$

여기서,

$$D = \begin{bmatrix} \cos\theta_m & -\sin\theta_m \\ \sin\theta_m & \cos\theta_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R_p = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & r_m^2 \sigma_\theta^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

σ_r , σ_θ 는 각각 거리 및 방위각 측정오차에 대한 표준편차이다.

2.3 IMM 추정기

기동표적을 추적하기 위하여 제안된 IMM 알고리즘은 현재 기동표적 추적에 가장 적합한 방법으로 받아들여지고 있으며 처리 과정은 다음과 같다.

1) 혼합확률

m개의 모델을 사용하는 경우에, i번째 모델에 대한 혼합 확률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\mu_{i|j,k,k} = \frac{1}{c_j} p_{ij} \mu_{i,k} \quad (11)$$

여기서, \bar{c}_j 는 정규화 상수이고, μ_i 는 모델확률이다. p_{ij} 는 시스템 모델이 Markov 체인이라고 가정할 때, 모델 i에서 모델 j로의 천이확률이다.

2) 혼합 상태변수 및 혼합 상태오차 공분산 행렬

각각의 모델에 대한 혼합된 상태변수와 상태오차 공분산 행렬은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\hat{x}_{0j,k,k} = \sum_{i=1}^m \hat{x}_{i,k,k} \mu_{i|j,k,k} \quad (12)$$

$$P_{0j,k,k} = \sum_{i=1}^m \{P_{i,k,k} + A_j A_k^T\} \mu_{i|j,k,k} \quad (13)$$

여기서, $A_j = \hat{x}_{i,k,k} - \hat{x}_{j,k,k}$ 이다.

3) 필터링

각각의 모델에 대한 칼만 필터링은 레이더 변환 측정값을 이용하여 다음과 같이 수행된다.

$$\hat{x}_{j,k+1|k} = \Phi_j \hat{x}_{0j,k,k} \quad (14)$$

$$P_{j,k+1|k} = \Phi_j P_{0j,k,k} \Phi_j^T + Q_j \quad (15)$$

$$\hat{x}_{j,k+1|k+1} = \hat{x}_{j,k+1|k} + K_{j,k+1} \tilde{z}_{k+1} \quad (16)$$

$$P_{j,k+1|k+1} = (I - K_{j,k+1} H_j) P_{j,k+1|k} \quad (17)$$

여기서, \tilde{z}_{k+1} 와 $K_{j,k+1}$ 은 다음과 같다.

$$\tilde{z}_{k+1} = (z_{k+1} - H_j \hat{x}_{j,k+1|k}) \quad (18)$$

$$K_{j,k+1} = P_{j,k+1|k} H_j^T (H_j P_{j,k+1|k} H_j^T + R_{k+1})^{-1} \quad (19)$$

4) 우도비율

모델확률을 계산하기 위하여 j번째 필터에 대한 우도비율은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$A_{j,k+1} = \frac{1}{\sqrt{2\pi|S_{j,k+1}|}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \tilde{z}_{j,k+1}^T S_{j,k+1}^{-1} \tilde{z}_{j,k+1}\right\} \quad (20)$$

여기서, $S_{j,k+1}$ 는 관측값의 잔차에 대한 공분산 행렬이다.

5) 모드확률 갱신

각각의 모드에 대한 확률은 다음과 같이 갱신된다.

$$\mu_{j,k+1} = \frac{1}{c} A_{j,k+1} \bar{c}_j \quad (21)$$

여기서, c 는 정규화 상수이며 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$c = \sum_{i=1}^m A_{i,k+1} \bar{c}_i \quad (22)$$

6) 결합 상태변수

m개의 추정값은 다음 식을 이용하여 결합되며, 이것은 IMM 추정기의 최종 출력값으로 사용된다.

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \sum_{j=1}^m \hat{x}_{j,k+1|k+1} \mu_{j,k+1} \quad (23)$$

$$P_{k+1|k+1} = \sum_{j=1}^m \{P_{j,k+1|k+1} + B_j B_j^T\} \mu_{j,k+1|k+1} \quad (24)$$

여기서, B_j 는 다음과 같이 주어진다.

$$B_j = \hat{x}_{j,k+1|k+1} - \hat{x}_{k+1|k+1} \quad (25)$$

3. 시뮬레이션

본 논문에서는 VTS용 레이더의 추적 알고리즘 설계에 대한 검증에 위하여 Table 1과 Table 2의 파라미터를 이용하여 모의 표적의 궤적과 레이더 측정값을 생성하였다.

Table 1 Target motion parameters

레이더 스캔	운동 특성	파라미터	단위
1 ~ 149	등속 운동	20.0	knots
150 ~ 159	선회 운동	5.0	degree/sec
160 ~ 239	가감속 운동	1.0	m/s ²
240 ~ 250	선회 운동	5.0	degree/sec
250 ~ 400	등속 운동	20.0	knots

Table 2 Radar measurement parameters

구분	파라미터	단위
스캔 주기	3.0	seconds
거리 측정오차	1.5	meter
방위각 측정오차	0.088	degree

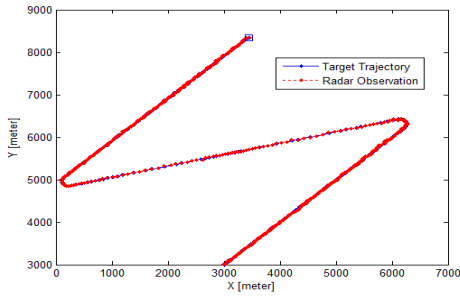


Fig. 2 Target trajectory and radar observations

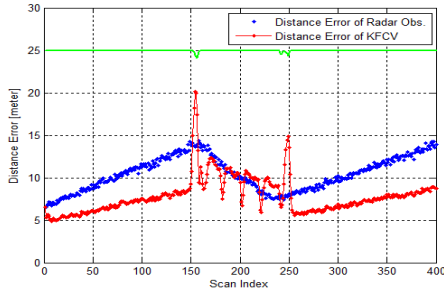


Fig. 3 RMS distance errors and gating of CVKF

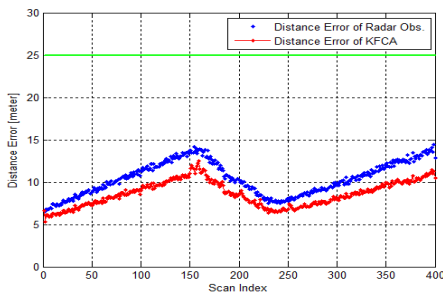


Fig. 4 RMS distance errors of CAKF

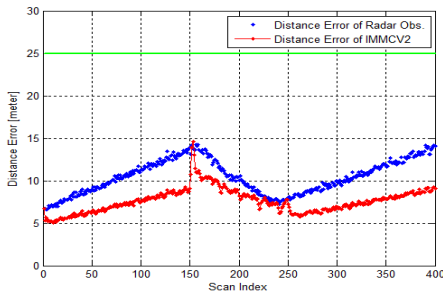


Fig. 5 RMS distance errors of IMMCV2

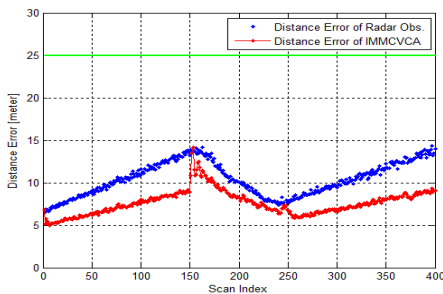


Fig. 6 RMS distance errors of IMMCVCA

Fig. 2는 Table 1과 Table 2를 이용하여 생성한 표적의 궤적과 레이더 측정값을 나타내며, Fig. 3 ~ 6은 등속운동 모델 기반 칼만필터(CVKF), 등가속운동 모델 기반 칼만필터(CAKF), 2개의 등속운동 모델을 이용한 IMM 필터(IMMCV2), 등속/등가속 운동 모델을 이용한 IMM 필터(IMMCVCA)에 대한 레이더 측정 오차, 추적필터의 rms 거리 추정오차 및 레이더 측정값이 게이트(Gate) 내에 존재하는지 여부를 도시한 것이다.

Fig. 3에서 보듯이 CVKF는 표적의 기동에 대하여 큰 추정 오차를 발생하며, 게이트 내에 레이더 측정값이 존재하지 않는 경우가 빈번하게 발생하므로 추적이 소실될 가능성이 높음을 알 수 있다. 또한, Fig. 4에서 보듯이 CAKF는 표적의 기동에도 불구하고, 게이트 내에 레이더 측정값이 항상 존재하므로 안정적인 추적을 유지하지만 등속 운동하는 구간에서 CVKF에 비하여 거리 오차가 증가된 것을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 보듯이 IMM 필터는 표적의 기동시에도 게이트 내에 레이더 측정값이 항상 존재하므로 안정적인 추적을 유지하며, 등속 구간에서 CVKF와 유사한 성능의 추적 정확도를 제공할 수 있다. 따라서, 단일 칼만필터를 이용하는 경우에 비하여 IMM 추정기를 이용하는 것이 기동 표적에 대한 안정적인 추적과 추적 정확도의 개선을 제공할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 VTS에 적용하기 위하여 IMM 추정기를 이용한 레이더 표적 추적 알고리즘 설계를 수행하고, 성능 검증을 위하여 다양한 운동특성을 갖는 표적 및 표적 추적에 대한 모의실험을 수행하였다.

모의실험으로부터 설계된 IMM 추정기를 이용한 레이더 추적 알고리즘은 표적의 기동에도 불구하고 안정적인 추적을 유지하며, 등속 운동 구간에서 단일 필터에 비하여 개선된 추적 성능을 제공할 수 있다. 향후, 실제 VTS 레이더의 운용 환경을 고려한 레이더 표적 추적 알고리즘의 구현 및 최적화, 실제 환경에서의 시험을 통한 검증을 수행하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Kim B.D.(2007), An Efficient Tracking Filter for TWS Radar System, Ajou University, Ph.D Thesis.
- [2] Blom H.A.P and Bar-Shalom Y.(1988), "The Interacting Multiple Model Algorithm for Systems with Markovian Switching Coefficients," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 33, No. 8, pp 780-783.
- [3] Ycddanapudi M., Bar-Shalom Y. and Pattipati K.R.(1997), "IMM Estimation for Multitarget Multisensor Air Traffic Surveillance," IEEE Proceedings, Vol. 85, No. 1, pp. 80-94.