

2 차원 탐색 레이더를 위한 국부 항법 좌표계에서의 운동보상을 포함한 추적필터

A Tracking Filter with Motion Compensation in Local Navigation Frame for Ship-borne 2D Surveillance Radar

김 병 두*, 이 자 성
(Byung-Doo Kim and Ja-Sung Lee)

Abstract : This paper presents a tracking filter with ship's motion compensation for a ship-borne radar tracking system. The ship's maneuver is described by displacement and rotational motions in the ship-centered east-north frame. The first order Taylor series approximation of the measurement error covariance of the converted measurement is derived in the ship-centered east-north frame. The ship's maneuver is compensated by incorporating the measurement error covariance of the converted measurement and displacement of the position state in the tracking filter. The simulation results via 500 Monte-Carlo runs show that the proposed method follows the target successfully and provides consistent tracking performance during ship's maneuvers while the conventional tracking filter without ship motion compensation fails to track during such periods.

Keywords : tracking filter, ship motion compensation, ship-borne radar

I. 서론

이동 가능한 플랫폼에 탑재된 레이더의 측정값은 플랫폼의 기동에 상관되므로 추적필터 설계시, 이를 보상하기 위한 기법이 필요하다.

일반적으로 이동하는 플랫폼 좌표계에서 표적의 운동을 정확히 표현하기 어려우므로 동체 좌표계 대신 지구중심 지구고정(ECEF: Earth Centered Earth Fixed) 좌표계와 같은 기준 좌표계에서 표적의 운동을 묘사하고 추적필터를 설계한다[1].

ECEF 좌표계에서 추적필터를 설계할 경우, 플랫폼의 기동을 고려하지 않아도 되는 장점이 있으나, 표적에 대한 레이더 측정값을 ECEF 좌표계로 변환하는 과정에서 레이더의 측정오차와 플랫폼에 탑재된 항법센서의 오차가 서로 상관성을 갖게 되어 변환 측정값(converted measurements)의 오차 특성을 정확히 고려하기 어렵다는 단점이 있다.

현재, 국부 좌표계에서 추적필터를 설계하고 플랫폼의 항법센서로부터 얻어지는 항법정보를 이용하여 단순하게 차분하여 보정함으로써 플랫폼의 기동을 보상하는 방법이 일반적으로 사용되고 있으나, 레이더 및 항법센서의 오차특성을 추적필터에 고려할 수 없으므로 추적필터의 일관성(consistency)의 저하를 가져올 수 있으며, 결과적으로 추적시스템의 성능저하 요인으로 작용할 수 있다.

본 논문에서는 이동하는 함정에 탑재된 2차원 탐색 레이더의 추적필터 설계 및 운동보상 기법을 개발하기 위하여 함정중심 함수(SSH: Ship-centered Ship-Heading) 좌표계와 함정중심 동북(SEN: Ship-centered East-North) 좌표계를 정의한다.

함정의 운동보상을 위하여 함정의 기동을 침로 변화와 같은 선회운동과 위치 변화와 같은 이동운동으로 구분하고, 침로 성분은 레이더 측정값을 SEN 좌표계에서의 측정값으로

좌표 변환하는 과정에서 고려하였으며, 이동 성분은 칼만 필터를 이용하여 설계된 추적필터의 예측식을 수정함으로써 고려하였다. 또한, SEN 좌표계로 변환된 레이더 측정값의 오차를 1차 Taylor 급수로 근사화 하여 측정오차 공분산 방정식을 유도하였다.

제안된 함정 운동보상을 갖는 추적필터의 성능 분석 및 검증은 위하여 이동하는 함정과 정지한 표적, 등속운동 표적 및 선회 표적에 대한 레이더 측정값을 생성하고 500회의 Monte Carlo 모의실험을 수행하였다.

모의실험 결과로부터 제안된 함정 운동보상 기법을 포함한 추적필터가 함정의 기동에 관계없이 일관된 추적성능을 제공함을 확인하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서는 레이더 측정값과 함정의 운동을 표현하기 위해 정의한 좌표계, 좌표계 사이의 변환 관계 및 레이더와 항법센서의 측정오차 특성에 대하여 기술하고, 3절에서는 좌표변환에 의한 측정오차 공분산을 Taylor 급수 1차 근사법을 이용하여 해석하고, 4절에서 함정의 이동성분을 보상하기 위하여 칼만 필터의 예측식을 수정하여 추적필터를 설계한다.

5절에서는 제안된 함정 운동보상 기법의 성능검증을 위하여 Monte Carlo 모의실험을 수행하고 6절에서 결론을 맺는다.

II. 좌표계 정의

2차원 레이더의 측정값을 나타내기 위하여 극 좌표계와 직교 좌표계를 사용하며, 함정 운동보상 기법 개발을 위하여 동체 좌표계로 SSH 좌표계와 항법 좌표계로 SEN 좌표계를 정의한다.

2차원 레이더로부터 관측된 표적의 위치는 극 좌표계에서 표적의 거리(r), 방위각(θ)으로 얻어지며, 이를 레이더 RA (Range-Azimuth) 좌표계라 한다[2]. RA 좌표계에서 관측된 표적의 위치벡터는 레이더 직교 좌표계로 변환하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 8. 3., 채택확정 : 2007. 3. 7.

김병두 : 한국전자통신연구원 측위시스템연구팀(bdkim@etri.re.kr)

이자성 : 아주대학교 전자공학부(jsung@ajou.ac.kr)

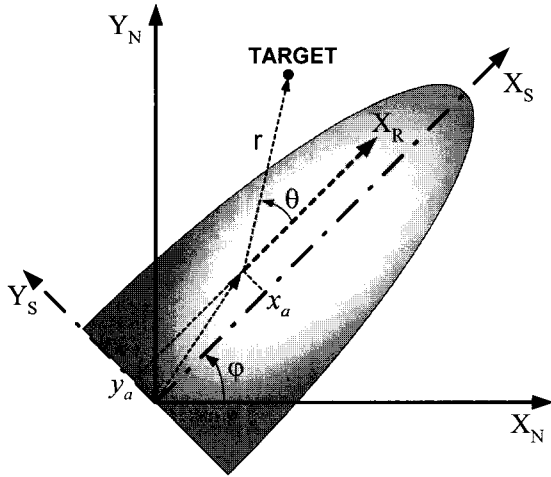


그림 1. 좌표계 정의.
Fig. 1. Frame definition.

$$\mathbf{x}_r = \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos \theta \\ r \sin \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

레이다의 측정잡음을 고려한 거리 측정값, r_m 과 방위 측정값, θ_m 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_m &= r + w_r \\ \theta_m &= \theta + w_\theta \end{aligned} \quad (2)$$

일반적으로, w_r 과 w_θ 는 거리와 방위각에 대한 측정잡음으로 가우시안 분포를 갖는 백색잡음으로 가정한다[3].

SSH 좌표계는 원점을 함정의 중심에 두고, 선수 방향을 X_S 축으로, 선측을 Y_S 축으로 정의하는 좌표계이다.

또한, 레이다 직교 좌표계의 X_R 축과 SSH 좌표계의 X_S 축이 일치한다고 가정하면, 레이다에 의해 관측된 표적의 위치는 SSH 좌표계에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_s = \mathbf{x}_a + \mathbf{x}_r \quad (3)$$

여기서, \mathbf{x}_s 는 SSH 좌표계에서 표적의 위치벡터이며, \mathbf{x}_a 는 레이다 직교 좌표계와 SSH 좌표계의 중심간의 변위벡터이다.

SEN 좌표계는 원점을 함정의 중심에 두고, 동쪽을 X_N 축으로, 북쪽을 Y_N 축으로 정의하는 좌표계이다.

SEN 좌표계에서 변환 측정값, \mathbf{x}_n 은 함정의 침로에 대한 회전행렬과 SSH 좌표계에서 변환 측정값의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_n = D_\varphi \mathbf{x}_s \quad (4)$$

여기서,

$$D_\varphi = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (5)$$

(4)와 (5)로부터 SEN 좌표계에서 변환 측정값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_n &= x_s \cos \varphi - y_s \sin \varphi \\ y_n &= x_s \sin \varphi + y_s \cos \varphi \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, φ 은 지자계 센서와 같은 함정의 항법센서로부터 제공되는 침로이며, 측정값, φ_m 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varphi_m = \varphi + w_\varphi \quad (7)$$

w_φ 는 측정잡음으로 가우시안 분포를 갖는 백색잡음으로 가정한다.

III. 변환 측정값의 공분산 해석

(3)으로부터 레이다에 의해 관측된 표적의 위치는 SSH 좌표계에서 레이다 측정오차 및 장착 위치오차를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{x}_s &= \tilde{x}_a + r_m \cos \theta_m \\ \tilde{y}_s &= \tilde{y}_a + r_m \sin \theta_m \end{aligned} \quad (8)$$

함정에 탑재된 레이다의 장착 위치오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{x}_a &= x_a + b_a^x \\ \tilde{y}_a &= y_a + b_a^y \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, x_a, y_a 는 장착 위치 참값 이고, b_a^x, b_a^y 는 장착 위치오차를 나타낸다.

SSH 좌표계로 변환된 표적위치에 대한 변환 측정값은 좌표변환 오차를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{x}_s &= x_s + \delta x_s \\ \tilde{y}_s &= y_s + \delta y_s \end{aligned} \quad (10)$$

(10)에서 δx_s 와 δy_s 는 1차 Taylor 급수를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta x_s = \tilde{x}_a + r_m \cos \theta_m - (x_a + r \cos \theta) \approx b_a^x + w_r \cos \theta - w_\theta r \sin \theta \quad (11)$$

$$\delta y_s = \tilde{y}_a + r_m \sin \theta_m - (y_a + r \sin \theta) \approx b_a^y + w_r \sin \theta + w_\theta r \cos \theta \quad (12)$$

(11)과 (12)에 대한 평균을 구하면 다음과 같다.

$$\mu_s^x = E\{\delta x_s\} \approx b_a^x \quad (13)$$

$$\mu_s^y = E\{\delta y_s\} \approx b_a^y \quad (14)$$

SSH 좌표계로 변환된 측정값의 변환오차 공분산 행렬은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_s = \begin{bmatrix} R_s^{11} & R_s^{12} \\ R_s^{21} & R_s^{22} \end{bmatrix} \quad (15)$$

(15)에서, 공분산 행렬의 각각의 구성요소는 다음과 같이

유도할 수 있다. (11)로부터 X_S 축에 대한 변환오차의 분산, R_S^{11} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_S^{11} \cong \sigma_r^2 \cos^2 \theta + \sigma_{\hat{\theta}}^2 r^2 \sin^2 \theta \quad (16)$$

여기서, σ_r^2 은 거리 측정오차에 대한 분산이고, $\sigma_{\hat{\theta}}^2$ 는 방위각 측정오차에 대한 분산이다.

(12)를 이용하여 Y_S 축에 대한 변환오차의 분산, R_S^{22} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_S^{22} \cong \sigma_r^2 \sin^2 \theta + \sigma_{\hat{\theta}}^2 r^2 \cos^2 \theta \quad (17)$$

X_S, Y_S 축에 대한 변환오차의 상호공분산, R_S^{12} 은 다음과 같이 구할 수 있으며, R_S^{21} 은 R_S^{12} 과 동일한 값을 갖는다.

$$R_S^{12} \cong (\sigma_r^2 - \sigma_{\hat{\theta}}^2 r^2) \sin \theta \cos \theta \quad (18)$$

(16)-(18)에서 SSH 좌표계에서 변환 측정값의 오차 공분산은 레이다 직교 좌표계에서의 측정오차 공분산[4,5]과 같음을 알 수 있다.

(6)과 (7)로부터 SEN 좌표계에서 표적의 위치는 SSH 좌표계에서 위치오차와 침로오차를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{x}_n &= \tilde{x}_s \cos \varphi_m - \tilde{y}_s \sin \varphi_m \\ \tilde{y}_n &= \tilde{x}_s \sin \varphi_m + \tilde{y}_s \cos \varphi_m \end{aligned} \quad (19)$$

(19)의 좌표변환 오차를 1차 Taylor 급수를 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta x_n &= \tilde{x}_n - x_n \\ &\cong -w_{\varphi} x_s \sin \varphi + \delta x_s \cos \varphi - w_{\varphi} y_s \cos \varphi - \delta y_s \sin \varphi \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \delta y_n &= \tilde{y}_n - y_n \\ &\cong w_{\varphi} x_s \cos \varphi + \delta x_s \sin \varphi - w_{\varphi} y_s \sin \varphi + \delta y_s \cos \varphi \end{aligned} \quad (21)$$

SEN 좌표계로 변환된 측정값의 오차에 대한 평균은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_n^x = \mu_s^x \cos \varphi - \mu_s^y \sin \varphi \quad (22)$$

$$\mu_n^y = \mu_s^x \sin \varphi + \mu_s^y \cos \varphi \quad (23)$$

SEN 좌표계로 변환된 측정값의 변환오차 공분산 행렬은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_n = \begin{bmatrix} R_n^{11} & R_n^{12} \\ R_n^{21} & R_n^{22} \end{bmatrix} \quad (24)$$

(24)에서, 공분산 행렬의 각각의 구성요소는 다음과 같이 유도할 수 있다. (20)으로부터 X_N 축에 대한 변환오차에 대한 분산, R_n^{11} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_n^{11} \cong \sin^2 \varphi \{ \sigma_{\varphi}^2 (x_s)^2 - (\mu_s^y)^2 + R_s^{22} \} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} &+ \cos^2 \varphi \{ \sigma_{\varphi}^2 (y_s)^2 - (\mu_s^x)^2 + R_s^{11} \} \\ &+ 2 \cos \varphi \sin \varphi \{ \sigma_{\varphi}^2 x_s y_s + \mu_s^x \mu_s^y - R_s^{12} \} \end{aligned}$$

여기서, σ_{φ}^2 은 함정의 항법센서에서 제공되는 침로의 측정오차에 대한 분산이다.

Y_N 축에 대한 변환오차의 분산, R_n^{22} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_n^{22} &\cong \sin^2 \varphi \{ \sigma_{\varphi}^2 (y_s)^2 - (\mu_s^x)^2 + R_s^{11} \} \\ &+ \cos^2 \varphi \{ \sigma_{\varphi}^2 (x_s)^2 - (\mu_s^y)^2 + R_s^{22} \} \\ &- 2 \cos \varphi \sin \varphi \{ \sigma_{\varphi}^2 x_s y_s + \mu_s^x \mu_s^y - R_s^{12} \} \end{aligned} \quad (26)$$

X_N, Y_N 축에 대한 변환오차의 상호공분산, R_n^{12} 은 다음과 같이 구할 수 있으며, R_n^{21} 은 R_n^{12} 과 동일한 값을 갖는다.

$$\begin{aligned} R_n^{12} &\cong \sin^2 \varphi \{ \sigma_{\varphi}^2 x_s y_s + \mu_s^x \mu_s^y - R_s^{12} \} \\ &- \cos^2 \varphi \{ \sigma_{\varphi}^2 x_s y_s + \mu_s^x \mu_s^y - R_s^{12} \} \\ &- \sin \varphi \cos \varphi \left\{ \begin{aligned} &\sigma_{\varphi}^2 (x_s)^2 - \sigma_{\varphi}^2 (y_s)^2 \\ &+ (\mu_s^x)^2 - (\mu_s^y)^2 - R_s^{11} + R_s^{22} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

(25)-(27)의 결과를 행렬로 나타내면 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$R_n = D_{\varphi} [R_s + R_{\varphi} - R_a] D_{\varphi}^T \quad (28)$$

여기서,

$$R_{\varphi} = \sigma_{\varphi}^2 \begin{bmatrix} (y_s)^2 & -x_s y_s \\ -x_s y_s & (x_s)^2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$R_a = \begin{bmatrix} (\mu_s^x)^2 & \mu_s^x \mu_s^y \\ \mu_s^x \mu_s^y & (\mu_s^y)^2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

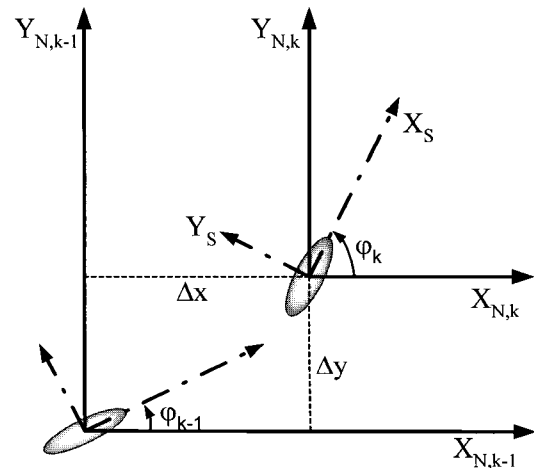


그림 2. 함정의 이동에 의한 변위.
Fig. 2. Displacement of ship's locomotion.

R_ϕ 는 SSH 좌표계에서 SEN좌표계로 좌표 변환할 때, 침로 측정잡음에 기인하는 공분산이고, R_a 는 레이다 장착 위치오차에 의한 효과이다.

ENU(East-North-Up) 좌표계와 같은 항법 좌표계에서 이산 시간 $k-1$ 과 k 사이의 함정의 이동에 의한 변위는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

항법센서로부터 얻어지는 이산시간 $k-1$ 과 k 시점의 함정의 위치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{x}}_{L,k-1} = \mathbf{x}_{L,k-1} + \boldsymbol{\eta}_{L,k-1} \quad (31)$$

$$\tilde{\mathbf{x}}_{L,k} = \mathbf{x}_{L,k} + \boldsymbol{\eta}_{L,k} \quad (32)$$

SEN 좌표계에서 이산시간 $k-1$ 과 k 사이의 함정의 이동에 의한 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}_{N,k} &= \tilde{\mathbf{x}}_{L,k} - \tilde{\mathbf{x}}_{L,k-1} \\ &= \Delta \mathbf{x}_L + \Delta \boldsymbol{\eta}_L \end{aligned} \quad (33)$$

여기서,

$$\Delta \mathbf{x}_L = \mathbf{x}_{L,k} - \mathbf{x}_{L,k-1} \quad (34)$$

$$\Delta \boldsymbol{\eta}_L = \boldsymbol{\eta}_{L,k} - \boldsymbol{\eta}_{L,k-1} \quad (35)$$

$\boldsymbol{\eta}_{L,k}$ 와 $\boldsymbol{\eta}_{L,k-1}$ 은 서로 상관되어 있지 않다고 가정하고, 공분산을 R_L 이라 하면, 항법센서로부터 얻어지는 위치 오차의 평균과 공분산은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E\{\boldsymbol{\eta}_{L,k} - \boldsymbol{\eta}_{L,k-1}\} = 0 \quad (36)$$

$$E\{\Delta \boldsymbol{\eta}_L \Delta \boldsymbol{\eta}_L^T\} = 2R_L \quad (37)$$

(28)은 추적필터에서 SEN 좌표계로 변환된 측정값의 측정오차 공분산 행렬로 이용되고 (33)와 (37)은 추적필터의 수정된 예측 방정식에서 사용된다.

IV. 추적필터 설계

SEN 좌표계에서 2차원 레이다의 추적필터를 설계할 때, 위치, 속도를 상태변수로 하면, 상태벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x} = [x \quad y \quad \dot{x} \quad \dot{y}]^T \quad (38)$$

등속운동 모델에 대한 칼만 필터의 상태 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \Phi \mathbf{x}_k + G \mathbf{v}_k \quad (39)$$

여기서,

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$G = \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 \\ 0 & T^2/2 \\ T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} Q &= GE\{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}^T\}G^T \\ &= q^2 GG^T \end{aligned} \quad (42)$$

여기서, Φ 는 상태전이 행렬이고, Q 는 공정잡음의 공분산 행렬이다.

SEN 좌표계로 변환된 레이다 측정값에 대한 측정 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 측정오차에 대한 공분산 행렬은 (28)과 같다.

$$\mathbf{z}_k = H \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \quad (43)$$

여기서,

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (44)$$

추적필터의 상태 및 상태오차 공분산 행렬에 대한 예측식은 함정의 기동에 따른 이동 성분을 고려하여 다음과 같이 수정하여 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_k^- = \Phi(\mathbf{x}_{k-1}^+ - \tilde{\mathbf{x}}_{N,k}) \quad (45)$$

$$P_k^- = \Phi(P_{k-1}^+ + 2R_L)\Phi^T + Q \quad (46)$$

추적필터의 상태 및 상태오차 공분산 행렬에 대한 개선식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_k^+ = \mathbf{x}_k^- + K_k(\mathbf{z}_k - H\mathbf{x}_k^-) \quad (47)$$

$$P_k^+ = (I - K_k H)P_k^- \quad (48)$$

여기서,

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (49)$$

V. 모의실험

여기서는 제안된 함정 운동보상을 갖는 추적필터의 성능 분석 및 검증을 위하여 기동하는 함정과 3개의 서로 다른 운동특성을 갖는 표적에 대한 레이다 측정값을 생성하고 500회의 Monte Carlo 모의실험을 수행하였다.

표 1에 표시된 것과 같이 함정의 기동을 고려하여 함정의 궤적은 등속, 등가속, 선회 운동 구간을 갖도록 하였으며, 정지한 표적(T1), 등속운동 표적(T2), 36.0 deg/h의 선회율을 갖는 선회운동 표적(T3)에 대하여 레이다 측정값을 생성하였다. 각각의 표적에 대하여 스캔시간 5.0초의 간격으로 300스캔

표 1. 함정 및 표적의 모의 모델.

Table 1. Simulation models for the ship and targets.

	운동모델	속도[knots]	기동구간[scan]
함정	등속 등가속 선회	10~48	등가속 : 90-100, 선 회 : 200-240 등 속 : 그외구간
T1	정지	0	-
T2	등속	24	-
T3	선회	30	-

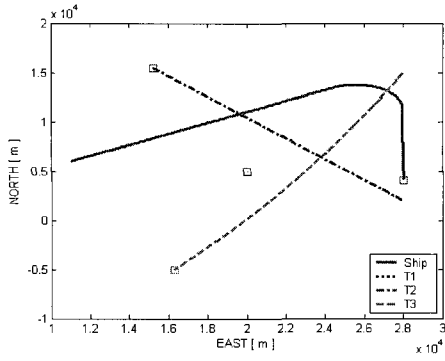


그림 3. 기준 좌표계에서 함정과 표적의 운동.
Fig. 3. Ship and targets motion in the reference frame.

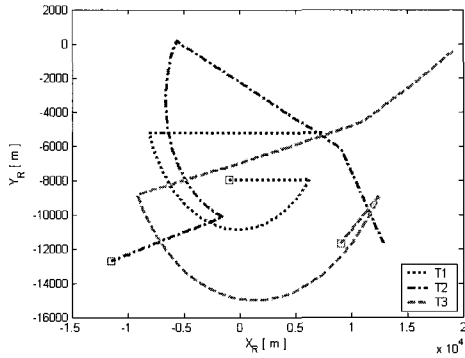


그림 4. 레이더 직교 좌표계에서 표적의 운동.
Fig. 4. Targets motion in the radar cartesian coordinate.

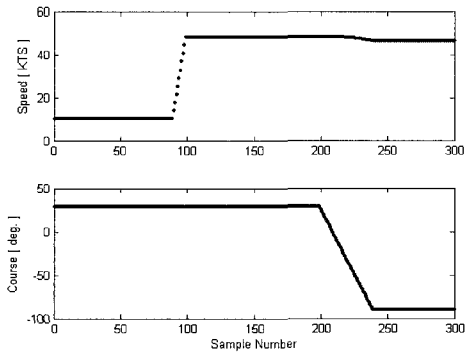


그림 5. 함정의 속도와 침로.
Fig. 5. Ship's speed and course.

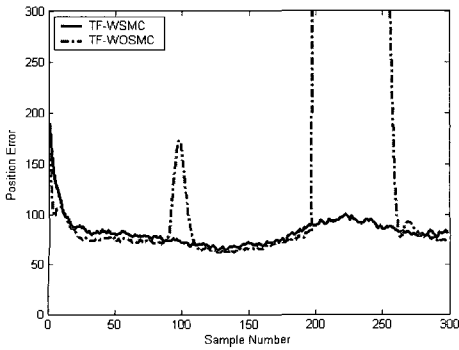


그림 6. T1의 위치 추정 오차.
Fig. 6. Position estimate error of T1.

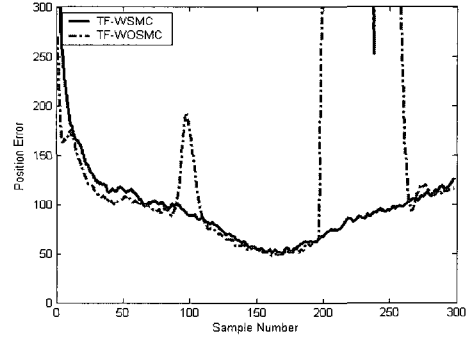


그림 7. T2의 위치 추정 오차.
Fig. 7. Position estimate error of T2.

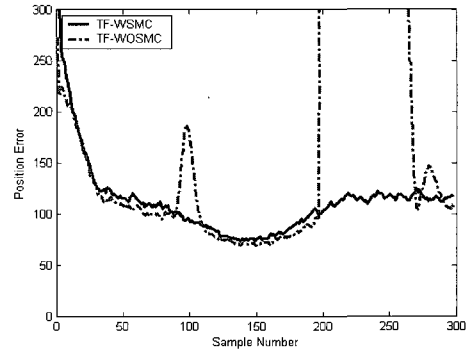


그림 8. T3의 위치 추정 오차.
Fig. 8. Position estimate error of T3.

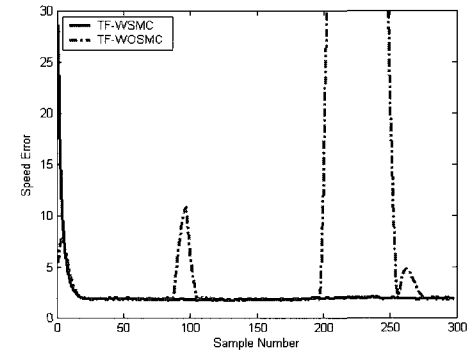


그림 9. T1의 속도 추정 오차.
Fig. 9. Velocity estimate error of T1.

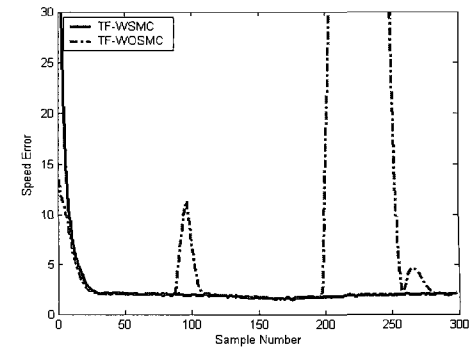


그림 10. T2의 속도 추정 오차.
Fig. 10. Velocity estimate error of T2.

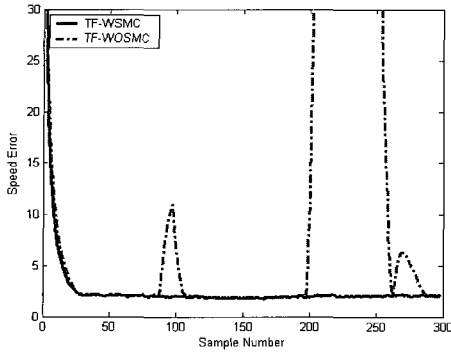


그림 11. T3의 속도 추정 오차.
Fig. 11. Velocity estimate error of T3.

에 대한 레이더 측정값을 생성하였다. 거리 측정오차는 100 m, 방위각 측정오차는 1.0deg.의 표준편차를 갖도록 설정하였다. 함정의 항법센서로부터 제공되는 위치오차는 5m, 침로 오차는 0.5deg.의 표준편차를 갖도록 설정하였으며, 함정에 탑재된 레이더의 장착 위치오차는 x, y축에 대하여 각각 1m의 바이어스 오차를 갖는 것으로 고려하였다.

추적필터의 공정오차 공분산은 $0.04m^2/s^4$ 으로 설정하였다.

그림 3과 4는 고정된 동서(East-North) 좌표계에서 함정 및 표적의 궤적과 레이더 직교 좌표계에서 표적의 궤적을 나타낸다. 그림 4에서 보듯이 레이더 직교 좌표계에서의 표적의 궤적은 함정의 기동과 상관되어 운동 특성을 표현하기가 매우 어려움을 알 수 있다.

그림 5는 기동하는 함정의 속도와 침로를 나타낸 것으로 함정은 초기속도 10knots로 이동하다가 90~100 스캔 구간에서 약 48knots까지 가속하며 200~240 스캔 구간에서 선회한 후, 300 스캔까지 약 46knots의 속도로 등속 운동한다.

그림 6~8은 3개의 표적에 대한 위치 추정오차를 RMS값으로 나타낸 것으로, 점선으로 나타난 TF_WOSMC는 함정 운동보상을 고려하지 않은 추적필터를 의미하며, 실선으로 나타난 TF_WSMC는 본 논문에서 제안하는 함정 운동보상 기법을 사용하는 추적필터를 의미한다. 각각의 추적필터는 함정이 등속으로 이동할 때는 유사한 추적성능을 제공하지만, 함정의 기동이 시작된 이후에는 TF_WOSMC에 의해 제공되는 추적성능은 크게 저하되며, 제안한 추적필터는 함정의 기동에 관계없이 일관된 추적성능을 제공한다.

그림 9~11은 3개의 표적에 대한 속도 추정오차를 RMS값

으로 나타낸 것으로, 위치 추정오차와 마찬가지로 함정이 가속하거나 선회하는 경우에 TF_WOSMC의 추적성능은 크게 저하되지만 본 논문에서 제안하는 함정 운동보상을 갖는 추적필터는 함정의 기동에 큰 영향을 받지 않고 안정된 추적성능을 제공한다.

그림 6~11에서 보듯이 함정이 선회운동을 할 경우, 운동보상을 하지 않는 추적필터의 추적성능은 가속운동에 비하여 매우 크게 저하되는데, 이것은 함정이 선회할 경우, 레이더에 의해 관측된 표적은 방위각 방향으로 빠르게 이동하는 것처럼 보이기 때문이다.

VI. 결론

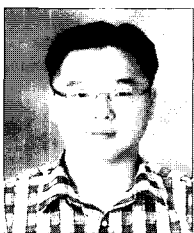
본 논문에서는 기동하는 함정에 탑재된 2차원 레이더를 위한 함정 운동보상을 갖는 추적필터를 제안하였다.

함정의 운동보상을 위하여 함정의 기동을 침로 변화와 같은 선회운동과 위치 변화와 같은 이동운동으로 분리하고, 침로 성분 레이더 측정값을 SEN 좌표계에서의 측정값으로 좌표 변환하는 과정에서 고려하였으며, 이동 성분은 칼만 필터를 이용하여 설계된 추적필터의 예측식을 수정함으로써 고려하였다. SEN 좌표계로 변환된 레이더 측정값의 오차를 1차 Taylor 급수로 근사화 하여 측정오차 공분산 방정식을 유도하고, 칼만 필터를 이용한 추적필터 설계에 적용하였다.

500회의 Monte Carlo 모의실험 결과로부터 제안된 함정 운동보상 기법을 포함한 추적필터가 함정의 기동에 관계없이 안정되고 일관된 추적성능을 제공함을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Z. Boyan and C. Qingyu, "A new method for electronic tracking beam stabilization," *Proceedings of CIE International Conference of Radar*, pp. 507-510, 1996.
- [2] B. L. Diamond, et al. *The ARIES Program : Coordinates, Transformations, Trajectories and Tracking*, ESD-TR-75-255, Lincoln Laboratory, MIT, 1975.
- [3] K. V. Ramachandra, *Kalman Filtering Techniques for Radar Tracking*, Marcel Dekker, Inc., New York, 2000.
- [4] S. S. Blackman and R. Popoli, *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*, Artech House, Norwood, MA, 1999.
- [5] D. Lerro and Y. B. Shalom, "Tracking with debiased consistent converted measurements versus EKF," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 1015-1022, July 1993.



김 병 두

1996년 아주대 제어계측공학과 졸업. 1998년 동 대학원 제어계측공학과 석사. 2000년 동 대학원 제어계측공학과 박사 수료. 2002년 9월~2004년 4월 (주) MteQ 선임연구원. 2004년 5월~현재 한국전자통신연구원 텔레매틱스·USN연구단 연구원.

관심분야는 레이더 신호처리, 추적시스템, GNSS 항법, 추정이론.



이 자 성

1975년 한양대 전기공학과 졸업. 1981년 미국 University of Southern California 대학원 박사. 1981년~1992년 미국 Rockwell International사 선임연구원. 1992년~현재 아주대학교 전자공학부 교수. 관심분야는 제어이론, 추정이론, 항법, 추적시스템.

적시스템.