

방위각 정보만을 이용한 표적추적 필터의 특성연구

○ 허 남 수* 김 인 환* 황 창 선** 이 만 형***

○ 부산대학교 대학원 기계공학과* 부산대학교 공과대학 전기과**
부산대학교 공과대학 정밀기계과***

Properties of a Bearing-Only Target Tracking Filter

○ Nam-Soo Hur* In-Hwan Kim* Chang-Seon Hwang** Man-Hyung Lee*

○ Graduate School* Dept. of Electric Eng.** Dept. of Precision Eng.***
Pusan National University

ABSTRACT

Preprocessing technique of the measurement bearing data is presented to improve the target estimation accuracy for the bearing-only target motion analysis (TMA).

Computer simulation is performed to compare with respect to the extended Kalman filter.

By computer simulation, the target filter estimator with preprocessing is both stable and robust to the measurement bearing noise.

1. 개요

능동소나(Active Sonar)를 이용한 표적추적기법은 정확한 표적정보를 획득할 수 있으나 적으로부터 탐지될 위험이 높으므로 자함의 위치를 은폐해야 하는 경우에는 수동소나(Passive Sonar)로부터 획득한 표적의 방위각 정보와 관측기의 운동 정보만을 이용하여 표적의 상태를 추적하는 수동추적기법^[1]이 사용되고 있다.

방위각 정보만을 이용한 TMA(Target Motion Analysis)의 측정방정식은 비선형이므로 선형필터에 적용하기 위해서는 선형화 작업이 선행되어야 한다.

선형화 방법은 첫째, 필터의 예측된 각 상태에 대하여 섭동법(Perturbation Method)을 적용하는 직접 선형화 방법과 둘째, 예측된 상대거리와 표적방위각 오차에 비례하는 오차거리 개념을 도입함으로써 측정방정식을 선형화하는 간접 선형화 방법^[2]이 있다.

전자를 선형필터에 적용시킨것이 확장칼만필터링이고 후자를 선형필터에 적용시킨것이 Pseudolinear 필터링이다. 확장칼만필터링은 초기값 선정이 적절하지 못할 경우 필터가 불안정하게 되는 단점을 갖고있으나 Aidala^[3]는 변형극좌표(Modified Polar Coordinate)상에서 확장칼만필터링을 적용함으로써 표적상태를 추정가능한 부분과 추정불가능한 부분을 분리시켜 표적

추적성능의 변화없이 안정한 필터설계방법을 제시하였다.

Pseudolinear 필터링은 초기값선정에 관계없이 안정한 장점은 있으나 표적방위각 정보의 잡음이 많을 경우 필터의 안정성이 파괴되는 경우가 발생한다.

본 논문에서는 다수의 획득된 표적방위각 정보를 표적추적필터에 공급하기전에 사전처리함으로써 잡음이 많이 포함된 측정방위각 정보의 잡음을 1 차 필터링한 후 Pseudolinear 필터링기법을 사용하여 표적추적필터를 구성하였고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 본 논문에서 제시한 표적추적기의 특성을 분석한 후 현재 많이 사용되고 있는 확장칼만필터와 추적성능을 비교 검토하여 본 논문에서 제시된 추적기의 우수성을 증명하였다.

2. 표적 및 관측기의 다이내믹 모델

표적 및 관측기는 2 차원 평면상에서 표적은 일정속도, 일정침로로 움직이고 관측기는 기동에 구속이 없다고 가정한다.

그림 1은 표적과 관측기의 기하학적 형상을 나타낸다.

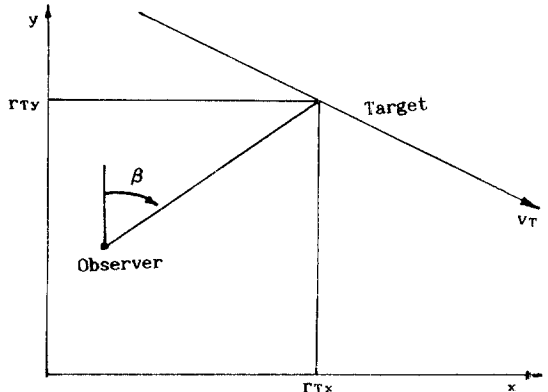


Fig.1. Target and Observer System Geometry.

여기서 V_T : 표적속도벡터
 β : 표적 방위각
 r_{Tx} : 표적의 x 위치
 r_{Ty} : 표적의 y 위치
 v_{Tx} : 표적의 x 속도
 v_{Ty} : 표적의 y 속도를 나타낸다.

표적상태벡터(X_T), 관측기상태벡터(X_0) 및 표적과 관측기사이의 상대 상태벡터($X_R = X_T - X_0$)는 직교좌표계에서 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} X_T &= [r_{Tx} \ r_{Ty} \ v_{Tx} \ v_{Ty}]^T \\ X_0 &= [r_{0x} \ r_{0y} \ v_{0x} \ v_{0y}]^T \\ X_R &= [r_{Rx} \ r_{Ry} \ v_{Rx} \ v_{Ry}]^T \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $r_{Rx} = r_{Tx} - r_{0x}$
 $r_{Ry} = r_{Ty} - r_{0y}$
 $v_{Rx} = v_{Tx} - v_{0x}$
 $v_{Ry} = v_{Ty} - v_{0y}$ 를 나타낸다.

일정속도, 일정침로로 운동하는 표적의 수학적모델을 이산시간으로 표시하면 식 (2) 와 같다.

$$\begin{aligned} X_T(K+1) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} X_T(K) \\ &= \Phi(K+1, K) X_T(K) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 ΔT 는 표적정보의 샘플링시간을 $\Phi(K+1, K)$ 는 상태전이 행렬을 나타낸다. 기동을 갖는 관측기의 수학적모델은 식 (3)과 같다.

$$X_0(K+1) = \Phi(K+1, K) X_0(K) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{0x}(K) \\ \Delta V_{0y}(K) \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $\Delta V_0(K) = V_0(K+1) - V_0(K)$ 로써 관측기의 속도증분을 나타낸다.

표적과 관측기의 수학적모델로부터 상대운동에 대한 운동방정식을 구할 수 있다.

$$X_R(K+1) = \Phi(K+1, K) X_R(K) - \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{0x}(K) \\ \Delta V_{0y}(K) \end{bmatrix} \quad (4)$$

그림 1로부터 표적의 방위각을 구할 수 있다.

$$\beta(K) = \tan^{-1} \frac{r_{Tx}(K) - r_{0x}(K)}{r_{Ty}(K) - r_{0y}(K)} \quad (5)$$

식 (5)에 측정잡음을 고려하면 표적의 측정방위각은 다음과 같다.

$$\beta_m(K) = \beta(K) + \eta(K) \quad (6)$$

여기서 $\eta(K)$ 는 평균이 0 이고 분산이 $\sigma^2(K)$ 인 백색잡음을 나타낸다.

식(5)를 변형하면 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} [r_{Tx}(K) - r_{0x}(K)] \cos \beta(K) \\ - [r_{Ty}(K) - r_{0y}(K)] \sin \beta(K) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

식(6)을 식 (7)에 대입하고 정리하면

$$\begin{aligned} r_{0x}(K) \cos \beta_m(K) - r_{0y}(K) \sin \beta_m(K) \\ = r_{Tx}(K) \cos \beta_m(K) - r_{Ty}(K) \sin \beta_m(K) \\ + r_n(K) \sin \eta(K) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $r_n(K)$ 는 표적과 관측기사이의 상대거리를 나타낸다.

식(8)로부터 $H(K)$ 를 식(9)와 같이 정의하면, 식(10)은 표적방위각 정보로부터 이노베이션에 해당되는 오차성분을 간접적으로 측정함으로써 비선형측정방정식을 선형화시킨 Pseudolinear 측정방정식이다.

$$\begin{aligned} H(K) &= H [\beta_m(K)] \\ &= [\cos \beta_m(K) \ -\sin \beta_m(K) \ 0 \ 0] \end{aligned} \quad (9)$$

$$Z_R(K) = H [\beta_m(K)] X_R(K) \quad (10)$$

3. 표적추적 알고리즘

Pseudolinear 측정방정식은 오차거리 개념이므로 최적필터를 설계하기 위하여 목적함수를 식 (11)과 같이 설정할 수 있다.

$$J = E [Z_R^T(K) Z_R(K)] \quad (11)$$

선형필터링은 주어진 정보로부터 식 (11)을 최소화하는 최적상태벡터를 구하는 것이다.

$$\hat{X}_R(K) = E [X_R(K) | Z_R(K)] \quad (12)$$

식(4)의 시스템방정식, 식(10)의 Pseudolinear 측정방정식 그리고 식(11)과 식(12)로부터 Pseudolinear 필터링 알고리즘을 구할 수 있다.

Pseudolinear 필터링 알고리즘

$$\hat{X}_R(K+1|K) = \Phi(K+1, K) \hat{X}_R(K|K) - \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{0x}(K) \\ \Delta V_{0y}(K) \end{bmatrix} \quad (13-1)$$

$$P(K+1|K) = \Phi(K+1, K) P(K|K) \Phi^T(K+1, K) \quad (13-2)$$

$$\begin{aligned} G(K+1) &= P(K+1|K) H(K+1) \\ &= [H(K+1) P(K+1|K) H^T(K+1) + \sigma^2]^{-1} \end{aligned} \quad (13-3)$$

$$\begin{aligned} \hat{X}_R(K+1|K+1) &= \hat{X}_R(K+1|K) - G(K+1) H(K+1) \\ &= \hat{X}_R(K+1|K) \end{aligned} \quad (13-4)$$

$$P(K+1|K+1) = [I - G(K+1) H(K+1)] P(K+1|K) \quad (13-5)$$

식(13)에서 P는 공분산(Covariance), G는 칼만게인 그리고 I는 단위매트릭스를 나타낸다.

Pseudolinear 필터링 알고리즘이 칼만필터링 알고리즘과 차이점은 식(13-4)에서 $-H(K+1)X_R(K+1|K)$ 가 칼만 필터링 알고리즘에서 이노베이션과 동일함을 알 수 있다.

4. 표적방위각 정보의 사전처리(Preprocessing)기법

표적방위각 정보는 일반적으로 잡음을 많이 포함하고 있다. 방위각 정보만을 이용한 TMA에서 표적방위각 정보의 잡음을 감소시키면 추적필터의 성능을 향상시킬 수 있으나 이것은 수동소나의 특성이므로 임의로 감소시킬 수 없다.

Pseudolinear 필터의 성능은 표적방위각 정보의 잡음, 필터의 샘플링시간 및 관측기의 기동조건에 영향을 받는다. Pseudolinear 필터는 식(8), (10)으로부터 측정잡음의 영향을 많이 받음을 알 수 있다. 표적방위각 정보의 사전처리(Preprocessing)는 필터의 샘플링시간과 표적방위각 정보의 샘플링시간을 다르게 설정하여 필터의 샘플링시간동안 획득된 다수의 표적방위각 정보의 평균값을 사용함으로써 표적방위각 정보의 잡음을 감소시키는 기법이다.

그림2는 표적방위각 정보의 사전처리(Preprocessing) 기법을 이용한 표적추적 구성도를 나타낸다.

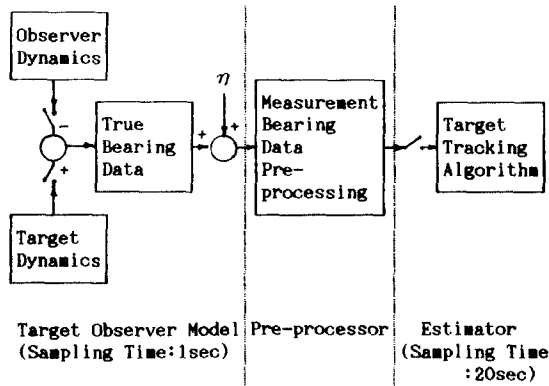


Fig. 2. Blockdiagram of Pseudolinear Filter using Preprocessor.

5. 시뮬레이션 및 그철

가. 시뮬레이션 조건

1) Pseudolinear 필터링

- 표적방위각 정보 샘플링 시간 : 1 초

- 필터 샘플링 시간 : 20 초
- 초기상태 : $X_R(0|0) = [0 \ 0]$
- 초기 공분산 : $P(0|0) = I$
- 표적방위각 정보의 잡음 분산 : 2°

2) 확장칼만필터링

- 표적방위각 정보 샘플링 시간 : 1 초
- 필터 샘플링 시간 : 1 초
- 초기상태

$$X_R(0|0) = [r_s(0) \ \sin\beta_m(0) \ r_s(0) \ \cos\beta_m(0) \ 2V_{RX} \ 2V_{RY}]$$

$$r_s(0) = 10000 \text{ Yards}$$
- 표적방위각 정보의 잡음 분산: 2°

3) 표적 및 관측기의 시나리오(Scenario)

표적과 관측기의 시나리오는 그림 3과 같으며 표적은 일정속도, 일정침로를 유지하고, 관측기는 기동에 가속이 없다고 가정하였다.

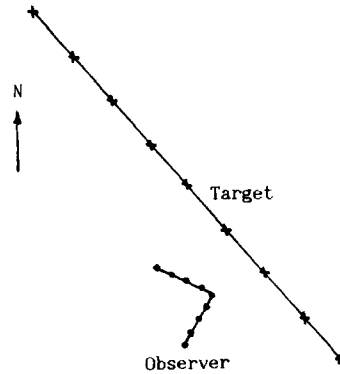


Fig. 3. Target and Observer Scenario.

- 표적 데이터
 - 속도: 25 노트/시간
 - 방위각: 320°
- 관측기 데이터
 - 속도: 6.5 노트/시간
 - 방위각
 - 첫째 레그(Leg): 30°
 - 둘째 레그(Leg): 295°
 - 첫째 레그 기동시간: 5분
 - 측정 방위각 분산: 2°
- 표적 초기 상대거리: 4400 Yards
- 표적 초기 방위각: 95°

나. 결과 및 고찰

1) 관측기의 첫째 레그 기동시간의 영향

그림 3의 표적 및 관측기의 시나리오에서 관측기 첫째 레그 기동시간을 60, 180, 300, 420 초로 변화시키고, 관측기의 측정 잡음본산이 2°인 경우에 대하여 시뮬레이션한 결과는 그림 4와 같다.

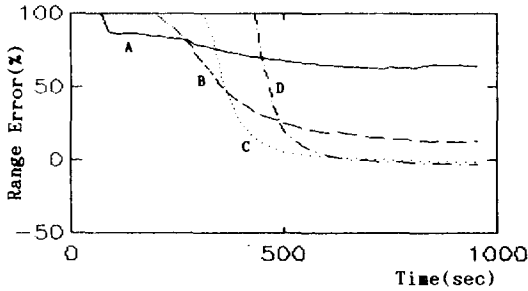


Fig. 4. Effects of Observer First Leg Run Time.
(A: 60, B: 180, C: 300, D: 420)

시뮬레이션 결과 관측기의 첫째 레그 기동시간이 일정시간 이상이 되어야 필터가 안정하게 되고 첫째 레그 기동시간이 일정시간 이하이면 필터가 불안정하게 된다.

이것은 관측기의 첫째 레그에서 필터의 가관측성이 존재하지 않으므로 표적의 상태벡터를 예측 할 수 없으나, 상태벡터의 상호분산행렬(P)은 예측 가능하므로 상태벡터의 상호분산행렬을 충분히 예측후 기동해야함을 알 수 있으며 첫째 기동시간을 더욱 증가시키면 필터는 안정하나 추적성능이 저하됨을 알 수 있다.

2) 관측기의 둘째 레그 기동방향의 영향

그림 3의 표적 및 관측기의 시나리오에서 관측기 둘째 레그 기동방향을 275°, 295°, 315°로 변화시키고 관측기의 측정잡음 본산이 2°인 경우에 대하여 시뮬레이션한 결과는 그림 5와 같다.

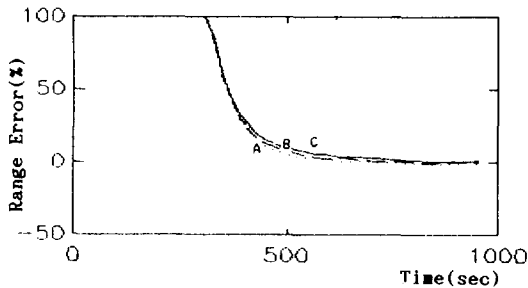


Fig.5. Effects of Observer Second Leg Turn Angle.
(A: 275°, B: 295°, C: 315°)

시뮬레이션 결과 관측기의 기동특성은 필터의 성능에 관계됨을 알 수 있으며 관측기의 둘째 레그 기동방향이 크면 식(3)에서 관측기의 속도증분이 커지므로 추적성능이 향상 될 것을 예측 할 수 있다.

3) 관측기 측정잡음의 영향

그림 3의 표적 및 관측기의 시나리오에서 관측기의 측정잡음 본산이 1° 2° 3°에 대하여 시뮬레이션한 결과는 그림 6과 같다.

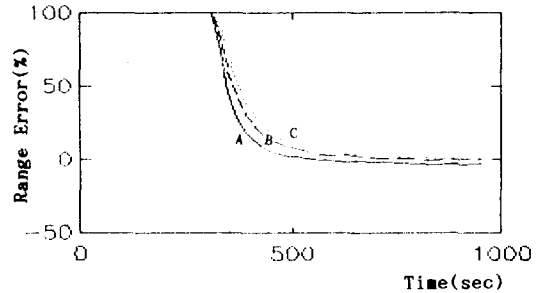


Fig. 6. Effects of Target Bearing Noise.
(A: 1°, B: 2°, C: 3°)

일반적으로 방위각 정보만을 이용한 표적추적 필터는 측정방위각의 잡음에 대하여 민감하게 반응하고 측정방위각 잡음이 크면 필터가 불안정하게 된다.[4]

본 논문에서 제시된 사전처리 기법을 이용한 표적추적 필터링은 측정잡음에 대하여 둔감함을 알 수 있다. 이것은 표적방위각의 샘플링 시간과 추적필터의 샘플링시간을 다르게 함으로써 측정잡음을 감소시켰기 때문이고, 관측기 측정잡음 본산이 2°인 경우의 필터성능이 1° 보다 양호한 것은 표적방위각 정보의 사전처리로 인한 방위각 오차와 상호작용으로 측정방위각 잡음이 감소된 것으로 판단된다.

4) 성능 비교

본 논문에서 제시된 표적추적 알고리즘을 그림 3의 표적 및 관측기의 시나리오에 대하여 확장칼만 필터와 추적성능을 비교하였다.

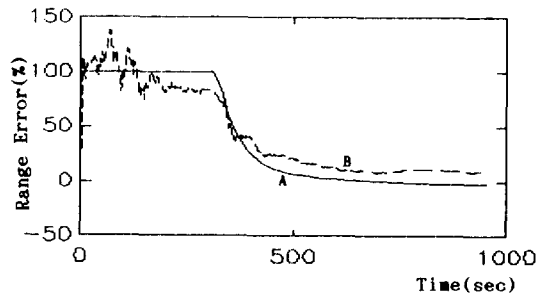


Fig. 7. Range Error. (A: New Algorithm, B: EKF)

시뮬레이션 결과 본 논문의 추적알고리즘이 표적추적 및 측정잡음에 대한 성능이 확장칼만필터 알고리즘보다 우수함을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 다수의 획득된 표적방위각 정보를 표적추적필터에 공급하기 전에 사전처리함으로써 측정방위각 정보를 1차 필터링한 후 표적의 상태를 추적 할 수 있는 개선된 표적추적필터 구성방법을 제시하였으며 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

가) 방위각 정보만을 이용한 표적추적필터는 관측기의 기동패턴과 측정잡음에 영향을 많이 받음을 확인하였다.

나) 표적방위각 정보의 사전처리기법을 이용한 개선된 표적추적필터는 기존의 확장칼만필터 보다 측정잡음에 둔감하고 추적성능이 양호하였다.

다) 본 논문에서 제시된 표적추적필터는 필터의 샘플링시간이 20초이므로 실시간 표적추적시스템을 구현할 경우 기존의 표적추적필터 보다 유리 할 것으로 판단된다.

라) 수중음향배열 센서를 사용하는 수동센서는 측정잡음을 많이 포함하므로 표적추적성능을 향상시키기 위해서는 센서잡음 및 관측기의 기동패턴에 대한 체계적인 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] Hassab, J. C., " Contact Localization and Motion Analysis in the Ocean Environment ; A Perspective," IEEE, Trans., Vol. OE-8, No. 3, pp. 136-146, 1983.
- [2] Aidala, V. J., "Kalman Filter Behavior in Bearing - Only Tracking Application," IEEE, Trans., Vol. AES-15, No.1, pp. 29-39, 1979.
- [3] Aidala, V. J., " Utilization of Modified Polar Coordinates for Bearing-Only Tracking," IEEE, Trans., Vol. AC-28, No.3, pp. 283-294, 1983.
- [4] Lindgren, A. G., Gong, K. F., " Properties of a Bearings - Only Target Motion Estimator," Naval Postgraduate School, Monterey, CA, pp. 172-194, 1977.
- [5] Spingarn, K., " Passive Position Location Estimation Using the Extended Kalman Filter," IEEE, Trans., Vol. AES-23, No. 4, 1987.