

수동 소나 시스템의 IMM 알고리즘을 이용한 효과적인 표적기동분석 향상 연구

김국민*, 송택렬

한양대학교 전자전기제어계측공학과

Improvement of Effective Target Motion Analysis for a Passive sonar system using IMM algorithm

Kook Min Kim*, Taek Lyul Song

Department of Electronic, Electrical, Control and Instrumentation Engineering, Hanyang Univ.

Abstract - Batch estimation 알고리즘은 수집된 표적에 대한 모든 정보들을 사용하여 상태변수의 초기값을 추정하게 되며 그 구간동안 표적이 일정한 속도로 움직이고 표적 음원의 주파수는 그 값이 항상 일정하다는 가정을 했다. 본 논문에서는 이러한 가정을 위배하는 표적 음원의 주파수 변화에 대해 대처하기 위한 각도와 주파수 정보를 이용하는 Batch estimation 알고리즘과 각도정보만을 사용하는 Batch estimation 알고리즘의 경우를 표적 음원의 주파수 변화를 감지하여 스위칭 할 수 있는 방법에 대해 알아본다.

이때 f_0 는 표적 음원의 신호주파수이고 시스템 행렬 A와 행렬 B는 다음 식 3.으로 표현 할 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

1. 서 론

각도와 주파수 정보를 사용하는 수동소나시스템에서 추적 필터의 상태변수 초기값을 추정하기 위하여 본 논문에서는 표적기동분석에 쓰일 순차적 추정자의 상태변수 초기값을 위한 $t=0$ 일때의 표적 상태변수의 위치와 속도 그리고 주파수를 추정하는 비선형 Batch estimation 알고리즘을 사용하였다. 초기 2~3개의 표적 측정치를 사용하여 표적 상태변수 초기값을 추정하는 것은 해양환경에서의 수동소나 시스템에서는 가관측성이 결여되어 불가능하다. 표적각도 $\theta(t)$ 의 변화가 존재해야 시스템의 가관측성이 확보(1,2,3,4,5)되지만 수동 소나 시스템의 특성과 예인함의 변침에 대한 제약성 그리고 충분한 데이터를 수집하는데 많은 시간이 걸리는 등 표적기동분석의 성능을 저해하는 요소가 많다. 본 논문에서는 Batch estimation 구간에서 표적 음원의 신호 주파수가 변하는 경우 Batch estimation의 가정을 위배하는 경우에 대해 그 변화를 감지하여 각도와 주파수를 사용하는 경우와 각도정보만을 사용하는 Batch estimation 알고리즘을 스위칭 할 수 있는 방법에 대해서 알아본다. 그리고 표적의 변침 등에 대해서 단일필터의 경우 실시간 추정이 불가능하므로 표적의 기동을 표현하는 공정잡음의 공분산의 크기에 가설을 둔 IMM(Interacting Multiple Model)[7] 알고리즘을 사용하였다. 그리고 순차적 추정자로 수정이득확장칼만필터(MGEKF : Modified Gain Extended Kalman Filter)[6]를 사용하였다.

그리고 표적 추적을 위한 잡음을 섞지 않은 순수한 측정치는 각도정보와 도플러효과가 포함된 주파수 측정치 정보로서

$$\begin{bmatrix} Z_o \\ Z_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \frac{Y}{X} \\ f_0 \left(1 - \frac{f_0 \cos \theta + f_0 \sin \theta}{c} \right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

로 표현되고 c 는 수중에서의 음파의 속도이다.

2. 본 론

2.1 시스템 모델

표적의 상태변수 초기값을 추정하는 표적기동분석을 위해서 표적추적 시스템의 동력학을 2차원 평면상에서 기술하는 시스템 모델이 필요하다[8]. 즉 표적추적 시스템의 동력학 모델은 X축과 Y축으로 분리된 상대위치, 상대속도, 표적주파수 그리고 표적의 가속도를 상태변수로 가지며 시스템 모델은 다음 수식으로 표현된다.

$$\dot{X} = AX + BA_m \quad (1)$$

여기서 상태벡터

$$X = (x, y, \dot{x}, \dot{y}, f_0, A_x, A_y)^T \quad (2)$$

2.2 표적 음원의 주파수 변화의 탐지

각도와 주파수 정보를 사용하는 Batch estimation 알고리즘을 이용한 표적 상태변수의 초기값 추정에서 표적 음원의 주파수가 변화하는 경우 위의 알고리즘을 이용하여 표적상태변수의 초기값을 추정하게 되면 그 Batch estimation의 가정을 어긋나기 때문에 표적의 상태변수 초기값을 제대로 추정하지 못하고 발산하게 되므로 표적기동분석을 수행할 수 없다. 이러한 표적 음원 주파수 변화에 대한 초기 추정치를 발산시키지 않고 추정하기 위해 위의 음원의 주파수가 변하는 경우 각도정보만을 이용한 Batch estimation 알고리즘이 필요하다. 그래서 음원의 주파수 변화를 감지하는 방법이 필요하며 표적 음원의 주파수 변화는 측정치 데이터를 저장하는 과정에서 감지할 수 있다. 우선 주파수의 변화량을 k 순간에서의 표적에 대한 주파수 측정치와 $k-1$ 순간에서의 표적에 대한 주파수 측정치 사이의 차로 정의하고 주파수의 공분산을 이용하여 오경보(false alarm)가 발생할 확률을 정해놓고 이 조건을 만족하게 되는 Boundary(γ)를 정한다. 즉 다음과 같이

$$P_{fa} = 2 \int_{\gamma}^{\infty} N(\tau, 0, 1) d\tau \quad (5)$$

$$\left| \frac{z_{fk} - z_{fk-1}}{\sqrt{2\sigma}} \right| < \gamma \quad (6)$$

여기서 식 6.의 z_{fk} 는 k 순간에서의 주파수 측정치를 z_{fk-1} 는 $k-1$ 순간에서의 주파수 측정치를 나타낸다. 식 5. 처럼 오경보 확률을 정해놓고 그 조건을 만족하게 되

는 Boundary를 정하여 주파수 전후값의 차이의 관계가 식 6.의 Boundary 내에 존재하면 주파수가 변하지 않았다고 가정하고 이 때는 각도와 주파수를 모두 사용하는 Batch estimation 알고리즘을 사용하여 표적추적필터의 표적에 대한 초기값을 추정한다. 이와 반대로 정의된 주파수 변화량이 다음 식 6.의 Boundary 밖에 존재하면 음원의 주파수가 변했다고 가정하여 각도 정보만을 이용한 Batch estimation 알고리즘을 이용하여 초기값을 추정하였다. 위와 같은 이러한 과정은 Batch estimation 시간동안 표적에 대한 각도와 주파수 정보가 측정되는 순간마다 반복하여 그 변화를 감지한다. 전자와 같은 경우는 추정되는 표적상태변수는 표적의 X축 위치, Y축 위치, X축 속도, Y축 속도, 표적 음원의 주파수, 그리고 표적의 X축 가속도, Y축 가속도의 초기값을 추정하며 후자의 경우 위의 추정된 상태변수 중에서 표적 음원의 주파수를 포함하지 않는다. 그러므로 후자의 경우를 이용하는 경우 초기 주파수 추정치를 필요로 하는데 그 주파수 초기 추정치는 초기에 입수된 표적 측정치의 주파수 정보중 3개의 합을 평균으로 하여 그 주파수의 초기 추정치로 설정을 해준다.

2.3 Batch estimation에서 추정된 초기치를 이용한 표적기동분석 알고리즘

Batch estimation으로 구한 표적 상태변수는 $t=0$ 일때의 추정치이기 때문에 현재시간까지 그 추정치를 쇠신하는 과정이 필요하다. 추정치를 쇠신하는 필터 알고리즘으로는 해양환경에서 추정치의 수렴성과 안정성이 우수한 수정이득확장칼만필터(MGEKF : Modified Gain Extended Kalman Filter)(6)를 사용하여 현재시간까지의 추정치 쇠신 및 순차적 추정을 위한 추정자로서 사용하였다. 그 MGEKF의 알고리즘의 이론적 설명은 (6)에서 설명되어있고 여기서는 그 알고리즘만 요약한다.

1) Propagation

$$\begin{aligned} X_k &= \Phi(t_k - t_{k-1}) \hat{X}_{k-1} - (X_{m,1} - \Phi(t_k - t_{k-1}) X_{m,1}) \\ P_k &= \Phi P_{k-1} \Phi^T + Q \end{aligned} \quad (5)$$

2) Measurement update

$$\begin{aligned} \hat{X}_k &= \bar{X}_k + K_k(z_k - h(\bar{X}_k)) \\ K_k &= \bar{P}_k C_k^T (C_k \bar{P}_k C_k^T + \sigma_k^2)^{-1}, \quad C_k = \frac{\partial h}{\partial X} \Big|_{\bar{X}_k} \\ \bar{P}_k &= (I - K_k g(z_k, \bar{X}_k)) \bar{P}_{k-1} (I - K_k g(z_k, \bar{X}_k))^T + K_k \sigma_k^2 K_k^T \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 상태변수는 X와 Y의 위치와 속도, 표적의 주파수 그리고 표적의 X, Y의 가속도를 가지며 전이행렬 Φ 는 다음과 같다

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & T & 0 & 0 & \frac{1}{2}T^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T & 0 & 0 & \frac{1}{2}T^2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

시스템 상태변수 벡터는 다음과 같다.

$$X = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7)^T \quad (8)$$

그 밖에 필터에 관련된 변수들은 다음의 식들로부터 계산된다.

$$h(\bar{X}_k) = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan^{-1} \frac{x_2}{x_1} \\ cx_3 - x_4 \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} - x_5 \frac{x_2}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\frac{\partial h}{\partial X} = \begin{pmatrix} \frac{x_2}{x_1^2 + x_2^2} & \frac{x_1}{x_1^2 + x_2^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{cx_3 + x_4 \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} - x_5 \frac{x_2}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}}}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} & \frac{cx_3 + x_4 \frac{x_2}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} - x_5 \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}}}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} & \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} & \frac{x_2}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}} & c & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$g(z_k, \bar{X}_k)(X - \bar{X}) = h(X_k) - h(\bar{X}_k) = \begin{pmatrix} -K_1 \sin \alpha & K_1 \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta K_1 \sin \alpha & -\beta K_1 \cos \alpha & -\cos \alpha & -\sin \alpha & c & 0 & 0 \end{pmatrix} (X - \bar{X}) \quad (11)$$

$$K_1 = \frac{\begin{pmatrix} \tan^{-1} \alpha \\ \alpha \end{pmatrix}}{\cos \alpha z \cdot \bar{x}_1 + \sin \alpha z \cdot \bar{x}_2} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{H(z_k) \bar{X}}{\cos \alpha z \cdot \bar{x}_1 + \sin \alpha z \cdot \bar{x}_2} = \frac{\sin \alpha z \cdot \bar{x}_1 - \cos \alpha z \cdot \bar{x}_2}{\cos \alpha z \cdot \bar{x}_1 + \sin \alpha z \cdot \bar{x}_2} \quad (13)$$

$$H(z_k) = (\sin \alpha z \quad -\cos \alpha z \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0) \quad (14)$$

$$\beta = \frac{1}{az - az} \{ \bar{x}_1 (\cos \alpha z - \cos \alpha z) + \bar{x}_2 (\sin \alpha z - \sin \alpha z) \} \quad (15)$$

$$\bar{az} = \tan^{-1} \frac{\bar{x}_2}{\bar{x}_1}, \quad az = \tan^{-1} \frac{y}{x} + \nu \quad (16)$$

또한 표적의 기동에 대해 본 논문에서는 표적의 기동을 표현하는 공정잡음의 공분산의 크기에 가설을 둔 IMM 알고리즘을 이용하여 표적의 변침등에 대응하여 실시간적인 시뮬레이션이 되도록 하였다. IMM (Interacting Multiple Model)의 알고리즘과 이론적 설명은 (7)에 자세히 나와 있으므로 본 논문에서는 생략한다.

2.4 시뮬레이션

Batch estimation 구간에서의 표적 음원의 주파수 변화에 대한 표적기동분석 성능을 수행하기 위하여 다음과 같은 시나리오를 두었다. 우선 표적의 초기 속도는 3m/s로 하였고 초기위치는 (3000m, 7000m)가 되게 하였으며 7초의 sampling 주기를 가지도록 하였다. 음원의 주파수 변화 시나리오는 음원의 주파수가 변하지 않을 경우 시뮬레이션 전 구간동안 100Hz로 일정한 값을 가진다고 가정했으며 음원의 주파수가 변하는 경우 전체 Batch estimation 시간 1050초 사이에서 600초까지는 100Hz로 일정한 값을 가지다가 600초~800초 사이에서 130Hz로 변한 다음 다시 800초 이후에는 100Hz로 바뀐다는 가정을 했다. 음원의 주파수 변화를 감지하는 방법은 2.2 절에서 설명한 바와 같이 표적의 측정치 정보를 수집하는 과정에서 주파수 측정치 전후 값의 차를 비교하는 방법으로서 그 값의 차이값의 관계가 정해진 Boundary 내에 존재하면 음원의 주파수가 변하지 않았다고 판단하고 만약 그 차이 값의 관계가 Boundary를 넘어서는 경우에는 음원의 주파수 변화가 있다고 판단한다. 이때 Boundary(γ)를 4.81123으로 하고 오경보 확률 P_{fa} 를 1.5×10^{-6} 으로 하였다. 각도정보만을 이용하는 Batch estimation을 한 경우 상태변수의 주파수 초기값은 추정이 불가능하므로 식 8.의 경우처럼 측정치를 수집하는 과정에서 주파수 측정치의 초기 3개 값의 평균을 내어 초기 주파수 추정치로 하였다. 각도 정보만을 이용한 Batch estimation으로 표적 상태변수 초기값을 추정한 이후 현재시간까지 추정치를 쇠신하기 위해 MGEKF를 이용하여 추정치를 쇠신하였다. 이때 Batch

estimation 구간에서 수집된 변화된 주파수 측정치를 그대로 이용하였는데 이것은 공정잡음의 공분산값의 주파수 부분이 항상 일정하다는 기존의 가정에서 음원의 주파수 변화에 대한 불확실성을 부여하기 위하여 0이 아닌 어떤 상수 값을 주어 음원의 주파수 변화에 대한 보정을 하였다. 위 방법을 이용하여 수동 소나 시스템의 표적기동분석을 수행하였으며 표적 추정 성능과 그때의 주파수 추정 성능 그리고 표적 속도의 추정 성능에 대해서 표적 음원의 주파수가 일정한 경우와 변화하는 경우에 대해서 비교 분석하였다.

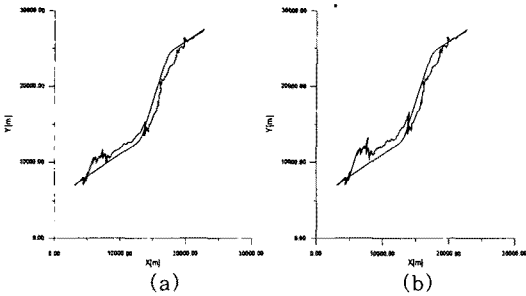


그림2. 표적 추정 성능

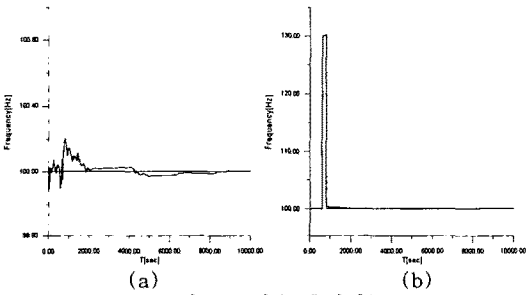


그림3. 주파수 추정 성능

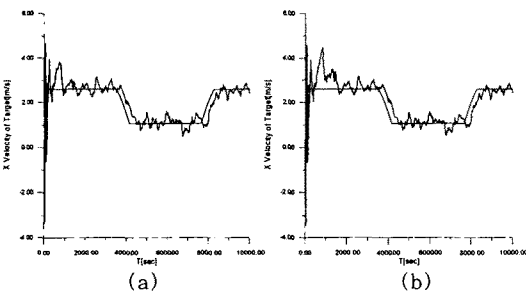


그림4. 표적의 X축 속도 추정 성능

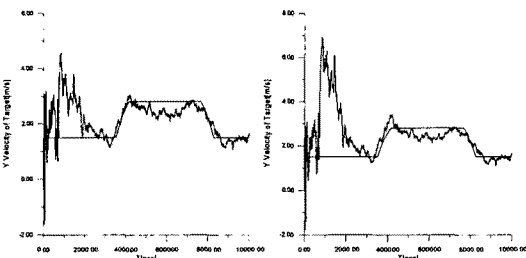


그림5. 표적의 Y축 속도 추정 성능

그림 2~5에서 (a)의 경우는 음원의 주파수가 Batch estimation에서 일정하게 100Hz로 유지되는 경우에 대한 표적의 추정 성능과 주파수 추정 성능 그리고 각각의 X축과 Y축에 대한 속도 추정 성능을 나타내고 (b)의 경우 음원의 주파수가 시나리오에 의해서 130Hz로 변하는 경우에 대한 각각의 추정 성능을 나타내고 있다. 그림 2에서 보면 음원의 주파수가 일정하거나 변하는 경우 표적 추정 성능은 거의 유사한 성능을 보이고 있으며 그림 3의 주파수 추정 성능에 대해서도 각각 우수한 추정 성능을 보이고 있다. 그림 4와 그림 5에서 음원의 주파수가 변하는 경우가 음원의 주파수가 일정한 경우보다 추정 초기에 조금 더 추정 오차가 크게 나왔지만 MGEKF의 순차적 추정이 이루어지면서 이후의 실제 표적의 속도를 각각의 축에 대해서 잘 추정함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 Batch estimation 구간에서 음원의 주파수가 일정한 경우와 음원의 주파수가 변하는 경우에 대해서 표적 음원의 주파수가 변하는 것을 감지하여 각각의 Batch estimation 알고리즘을 스위칭 할수 있는 방법을 이용하여 그 표적기동분석 성능을 비교하였다. Batch estimation 구간에서 음원의 주파수가 변할 경우 각도정보만을 이용한 Batch estimation 으로 표적 상태변수의 초기값을 추정할 경우에도 표적 추정 성능과 주파수, 속도 추정 성능이 우수한 결과를 보임을 확인하였다. 실제 해양 환경에서는 음원의 주파수 정보가 변할 가능성이 더 많다고 할 수 있기 때문에 실제의 환경에서 표적기동분석을 수행하는데 실용적인 방안이라 할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. C. Nardon and V. J. Aidala, "Observability criteria for bearings-only target motion analysis," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 17, no. 2, pp. 162-166, Mar., 1981.
- [2] T. L. Song, "Observability of target tracking with bearings-only measurements," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 32, no. 4 pp. 1468-1472, Oct., 1996.
- [3] E. Fogel and M. Gavish, "Nth order dynamics target observability from angle measurements," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 23, no. 3, pp. 305-308, May., 1988.
- [4] C. Jauffret and D. Pillon, "Observability of passive target motion analysis," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 32, no. 4, pp. 1290-1300, Oct., 1996.
- [5] T. L. Song and T. Y. Um, "Practical guidance for homing missiles with bearings-only measurements," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 31, no. 1, pp. 434-443, Jan., 1996.
- [6] T. L. Song and J. L. Speyer, "A stochastic analysis of a modified gain extended Kalman filter with applications to estimation with bearings only measurements," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 30, no. 10, pp. 940-949, Oct., 1985.
- [7] Y. Bar-Shalom and X.R. Li, Multitarget-multisensor Tracking, Principles and Techniques, Storrs, CT: YBS Publishing, 1995.
- [8] 한태곤, 송택렬, "수동센서를 이용한 자동표적기동분석 제13차 한국자동제어학술회의 논문집 제1권 pp.573-576, 10, 1998