

BFTMA를 위한 측정데이터 전처리 기법 연구

Measurements Preprocessing for Bearing and Frequency Target Motion Analysis

김인수*
Kim, In-Soo

ABSTRACT

In this paper, the measurements preprocessing algorithm for the fading of bearing and frequency measurements is proposed, which can improve the performance of BFTMA(Bearing and Frequency Target Motion Analysis). The fading and detection relation between bearing and frequency are rigorously established for measurements preprocessing, and BFTMA can be carried out the estimation of target motion by using measurements preprocessing. Batch estimation with bearing and frequency using the proposed algorithm can be applied to estimate the initial target states despite of the fading of frequency measurement. Simulation results show that BFTMA using the proposed measurements preprocessing has superior estimation performance, compared with batch estimation using only bearing measurements.

주요기술용어(주제어) : BFTMA(방위와 주파수를 이용한 표적기동분석), Measurements Preprocessing(측정데이터 전처리), Batch Estimation(일괄추정), MGEKF(수정이득 확장칼만필터), IMM(상호작용 다중모델)

1. 서론

예인형 선배열 소나는 장거리 탐지가 가능하며 운용심도를 자유롭게 조절하여 음영 구역에서 활동하는 잠수함을 탐지할 수 있어 대잠전에서 필수적인 소나 체계이다. 예인형 선배열 소나는 능동소나와는 달리 표적에서 발생한 방사소음에만 의존하는 탐지 수단이므로 대잠 작전 수행에 있어서 절대적으로 필요한 표적의 기동정보는 알 수 없기 때문에 이러한 정보를 추정 및 분석하기 위한 표적기동분석(TMA : Target

Motion Analysis) 기술이 필수적으로 요구된다^[1,2].

BFTMA(Bearing and Frequency TMA)^[3,4]는 선배열 소나로부터 탐지된 표적의 방위와 주파수 정보를 이용하여 표적의 기동정보인 상대거리, 속도, 침로를 분석하는 기술이다. 이는 도플러 효과가 포함된 표적의 주파수 정보를 활용한다는 점에서 일반적으로 잘 알려진 BOTMA(Bearings-Only TMA)^[5-8]에 비해 필터의 수렴특성이 향상된 기술이다.

선배열 소나에서의 BFTMA는 전적으로 표적이 방사하는 방위와 주파수 측정치에만 의존하여 표적기동을 추정하는데, 실제 해양환경에서는 표적정보가 지속적으로 탐지되지 않는 경우가 자주 발생한다. 표적 정보가 소실(fading)되면 필터의 수렴성과 안정성에 영향을 미치게 되며 지속적인 표적기동분석을 수행할 수가 없다. 따라서 BFTMA 기술의 실용화를 위해서

† 2004년 4월 29일 접수 ~ 2004년 6월 15일 심사완료

* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)
2본부

주저자 이메일 : kis171@hanmir.com

는 소실된 표적정보를 복원하여 필터의 지속적인 표적 추정을 가능하게 하는 데이터 처리 기술이 반드시 필요하게 된다.

이를 위해 본 논문에서는 표적 측정치의 특성을 분석하고, 방위와 주파수간의 탐지 및 소실 관계를 정립하여 소실된 방위와 주파수를 복원하는 측정데이터 전처리 알고리즘을 개발하였다. 소실된 구간은 소실 전후의 탐지된 표적정보와 함께 데이터 보간 기법을 이용하여 복원하게 된다. 선배열 소나를 이용한 BFTMA에 있어서 표적주파수는 방위와는 독립적으로 자주 소실되며, 이 경우 방위만을 이용한 표적 기동분석을 수행해야만 한다. 그러나 방위와 주파수를 이용하는 BFTMA에 비해 추정 성능이 매우 낮은 실정이다. 따라서 본 논문에서 제안한 측정데이터 전처리 알고리즘을 적용함으로써 주파수가 소실되더라도 BFTMA를 구현 가능하게 하였다.

BFTMA를 위한 필터링 기법으로 본 논문에서는 MGEKF(Modified Gain EKF)를 이용한 IMM(Interacting Multiple Model) 필터 구조를 도입하였다^[9,10]. 필터 초기치 추정 방법으로는 표적의 방위와 주파수를 이용한 일괄추정(batch estimation)으로 표적의 초기정보를 추정하는 기법을 적용하였다.

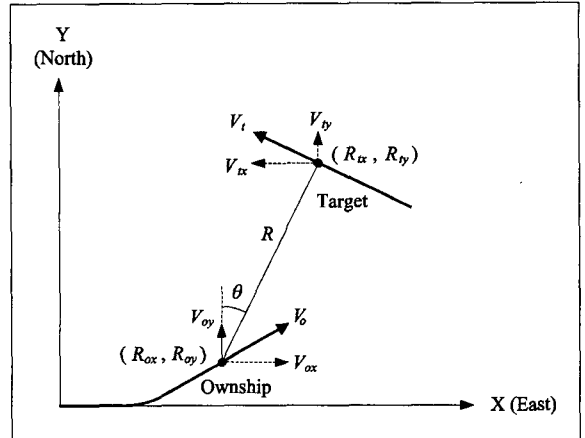
제안된 측정데이터 전처리 알고리즘을 적용한 BFTMA는 시뮬레이션을 통해 소실 표적정보에 대한 표적추정의 성능을 분석하고 알고리즘의 실용가능성을 확인하였다.

2. BFTMA 수학적 모델

표적의 방위와 주파수를 이용하여 표적의 거리, 속도, 침로를 추정하는 BFTMA를 위해서 표적과 자함은 그림 1과 같이 동일한 2차원 평면상에서 기동한다고 가정한다. BFTMA는 표적이 일정한 속도로 기동한다고 가정할 때 표적기동 정보의 추정을 위한 상태 벡터를 자함과 표적의 상대위치, 상대속도, 표적주파수로 정의하면 식 (1)과 같다.

$$x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t) \ x_5(t)]^T \quad (1)$$

$$= [R_x(t) \ R_y(t) \ V_x(t) \ V_y(t) \ f_0]^T$$



[그림 1] Geometric configuration of ownship and target for BFTMA

여기서, $R_x(t)$ 및 $R_y(t)$, $V_x(t)$ 및 $V_y(t)$ 는 각각 X축과 Y축 방향의 상대 거리와 상대 속도이며 f_0 는 표적에서 일정하게 방사되는 표적주파수이다. 표적의 위치와 속도를 추정하는 모델을 유도하기 위하여 식 (1)의 상태변수를 시간에 대하여 미분하면 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\dot{x}(t) = [\dot{x}_1(t) \ \dot{x}_2(t) \ \dot{x}_3(t) \ \dot{x}_4(t) \ \dot{x}_5(t)]^T \quad (2)$$

$$= [x_3(t) \ x_4(t) \ A_x(t) \ A_y(t) \ 0]^T$$

여기서, $A_x(t)$ 와 $A_y(t)$ 는 X축과 Y축 방향의 상대 가속도를 의미한다.

표적의 속도가 일정하다고 가정하였으므로 $A_x(t)$ 와 $A_y(t)$ 는 자함의 가속도 성분 $A_{ox}(t)$ 와 $A_{oy}(t)$ 로 표현되며, 공정잡음 $w(t)$ 을 평균이 0이고 분산이 $\sigma_w(t)$ 인 백색 가우시안 잡음(white gaussian noise)으로 가정하면 식 (2)로부터 BFTMA 시스템의 상태 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Ba(t) + Bw(t) \quad (3)$$

여기서, A , B , $a(t)$ 는 아래와 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$a(t) = [A_{ox}(t) \ A_{oy}(t)]^T \quad (5)$$

BFTMA의 측정정보인 표적방위 $\theta(t)$ 와 도플러 효과가 포함된 표적주파수 $f(t)$ 는 상대 거리(R_x, R_y)와 상대 속도(V_x, V_y)의 비선형 함수로 표현되며 이는 식 (6)과 같다.

$$z(t) = \begin{bmatrix} \theta(t) \\ f(t) \end{bmatrix} + v(t) = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \frac{R_x(t)}{R_y(t)} \\ f_0 \left(1 - \frac{V_x(t) \sin \theta(t) + V_y(t) \cos \theta(t)}{c} \right) \\ v_\theta(t) \\ v_f(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, c 는 음속을 나타내며, $v_\theta(t)$ 와 $v_f(t)$ 는 각각 평균이 0이고, 분산이 각각 $\sigma_\theta^2(t)$ 와 $\sigma_f^2(t)$ 인 백색 가우시안 잡음으로 정의된 방위와 주파수의 측정잡음이다.

3. BFTMA 필터 설계

가. BFTMA 필터

본 논문에서는 BFTMA에서의 표적추정을 위하여 다중모델 필터에 기반한 IMM 구조를 도입하였으며, 필터 알고리즘으로 BFTMA와 같은 비선형 시스템에 적합한 MGEKF 알고리즘^[9]을 적용하였다.

BFTMA 시스템에 적용된 MGEKF의 상태 추정치와 오차 공분산의 전파식은 각각 다음과 같다.

$$\bar{x}_k = \Phi(t_k, t_{k-1}) \bar{x}_{k-1} + \int_{t_{k-1}}^{t_k} \Phi(t_k, \tau) Ba(\tau) d\tau \quad (7)$$

$$\bar{P}_k = \Phi(t_k, t_{k-1}) \bar{P}_{k-1} \Phi^T(t_k, t_{k-1}) + Q(t_k) \quad (8)$$

상태 추정치와 오차 공분산의 쇄신치는 측정치 z_k 그리고 필터 이득 K_k 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{x}_k = \bar{x}_k + K_k(z_k - h(\bar{x}_k)) \quad (9)$$

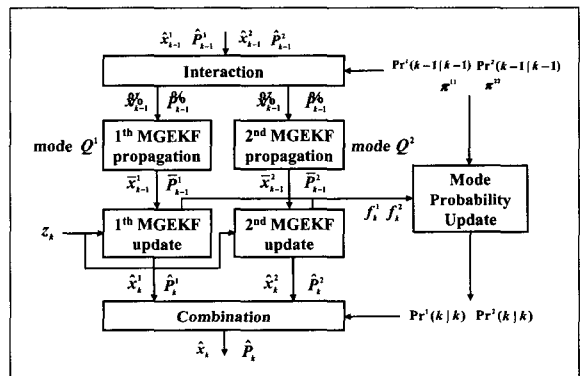
$$P_k = K_k R_k K_k^T + (I - K_k M(z_k, \bar{x}_k)) \bar{P}_k (I - K_k M(z_k, \bar{x}_k))^T \quad (10)$$

$$K_k = \bar{P}_k C^T(\bar{x}_k) (C(\bar{x}_k) \bar{P}_k C^T(\bar{x}_k) + R_k)^{-1} \quad (11)$$

$$C(\bar{x}_k) = \left. \frac{\partial h(x_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k = \bar{x}_k} \quad (12)$$

여기서, R_k 는 σ_θ^2 과 σ_f^2 을 대각요소로 가지는 측정잡음의 공분산 행렬이다.

BFTMA를 위한 IMM 필터를 설계하기 위하여 본 논문에서는 표적 기동에 따른 공정잡음의 공분산값을 모드(mode)로 설정하였다. 표적의 불확실한 기동에 대한 공분산 상한값 Q^1 과 일정한 속력과 침로를 가지는 표적 기동에 대한 공분산 하한값 Q^2 를 설정하여 설계된 2개의 MGEKF 필터 모델을 가지는 IMM을 구현하였다. BFTMA를 위한 필터 설계시 표적의 기동 형태에 대한 공정잡음의 공분산값은 필터의 추정 성능 향상에 중요한 변수로 작용한다. 필터 성능을 위해 최적한 공분산값 설정이 필요하지만 이론화된 최적값은 존재하지 않으며 적용 시스템에 따라 달라



[그림 2] IMM algorithm with MGEKF filter

진다. 이에 따라 본 논문에서는 다양한 기동 시나리오와 비 연속된 주파수 변화량에 대한 시뮬레이션을 수행하여 표적기동 특성이 충분히 반영된 공분산값을 설정하였다.

그림 2에서는 본 논문에서 설계한 BFTMA를 위한 IMM 알고리즘^[10]을 나타낸다. 각 필터의 상태 추정치와 오차 공분산 추정치를 \hat{x}_{k-1}^j 와 P_{k-1}^j 그리고 모드전이확률(mode transition probability) π_{ij} 라 두고, 필터간의 상호작용(interaction)을 통해 수정된 상태 추정치를 \bar{x}_{k-1}^i , 오차 공분산을 P_{k-1}^i 라 하면 식 (13)~식 (15)와 같이 주어진다.

$$\hat{x}_{k-1}^i = \frac{\sum_{j=1}^2 \hat{x}_{k-1}^j \pi_{ij} \Pr(M_{k-1}^j | z_{k-1})}{\sum_{j=1}^2 \pi_{ij} \Pr(M_{k-1}^j | z_{k-1})} \quad (13)$$

$$P_{k-1}^i = \frac{\sum_{j=1}^2 (P_{k-1}^j + \hat{x}_{k-1}^j \hat{x}_{k-1}^{jT}) \pi_{ij} \Pr(M_{k-1}^j | z_{k-1})}{\sum_{j=1}^2 \pi_{ij} \Pr(M_{k-1}^j | z_{k-1}) - \bar{x}_{k-1}^i \bar{x}_{k-1}^{iT}} \quad (14)$$

$$\pi_{ij} = \Pr(M_{k-1}^i | M_{k-1}^j) \quad (15)$$

여기서, M_k^j 는 j 번째 필터 모델이며, $\Pr(M_{k-1}^j | z_{k-1})$ 는 시간 t_{k-1} 까지의 모든 측정치를 이용한 관점에서 모델 j 가 맞을 모드확률(mode probability), π_{ij} 는 모드전이확률(mode transition probability)을 각각 의미한다.

$\Pr(M_k^i | z_k)$ 는 시간 t_k 까지의 측정치 z_k 를 이용하여 식 (16)과 같이 쇠신된다.

$$\Pr(M_k^i | z_k) = \frac{f(z_k | M_k^i, Z_{k-1}) \sum_{j=1}^2 \pi_{ij} \Pr(M_{k-1}^j | z_{k-1})}{\sum_{j=1}^2 f(z_k | M_k^j, Z_{k-1}) \sum_{j=1}^2 \pi_{ij} \Pr(M_{k-1}^j | z_{k-1})} \quad (16)$$

$f(z_k | M_k^i, Z_{k-1})$ 는 \bar{x}_{k-1}^i 와 필터의 전파방정식을 이용하여 시간 t_k 에서의 상태변수 추정치를 예측한 값이고, S_k^i 는 i 번째 필터의 이노베이션 공정

(innovation process)의 공분산이다.

두 개의 필터의 표적상태변수 추정치에 가중치인 모드확률을 곱해서 상태변수 추정치를 산출하는 융합(combination) 과정은 각 필터가 출력한 \hat{x}_k^i 와 P_k^i 를 이용하면 식 (17)~식 (18)과 같다.

$$\hat{x}_k = \sum_{i=1}^2 \hat{x}_k^i \Pr(M_k^i | z_k) \quad (17)$$

$$P_k = \sum_{i=1}^2 (P_k^i + \hat{x}_k^i \hat{x}_k^{iT}) \Pr(M_k^i | z_k) - \hat{x}_k \hat{x}_k^T \quad (18)$$

나. 일괄추정

BFTMA에서 필터를 이용하여 표적기동 정보를 추정하기 위해서는 필터의 초기치 설정이 필요하게 된다. 표적기동분석 성능은 적용되는 필터 기법에 직접적으로 좌우되며 필터의 성능 및 수렴성은 필터의 초기조건에 영향을 받으므로 표적의 초기 기동정보 추정은 BFTMA에 있어 중요한 문제이다.

본 논문에서는 표적의 초기기동 추정을 위하여 MLE(Maximum Likelihood Estimator)^[11] 개념을 도입하여 표적의 방위와 주파수 측정치로부터 표적의 위치, 속도, 주파수의 초기 기동정보를 추정하는 일괄 추정 알고리즘을 도입하였다. 초기치 추정을 위한 MLE 전개과정에서 표적의 방위와 주파수 측정치가 비선형방정식으로 표현되므로 일반적으로 잘 알려진 Newton 방법^[12]을 적용하여 수치적인 반복 계산을 통해 MLE를 통한 초기 추정치를 산출하였다.

일괄추정을 수행하기 위하여 표적 측정치를 획득하는 과정에서 표적은 일정한 속도로 기동하며 표적주파수 측정치는 도플러 효과에 의해 표적의 음원주파수가 변화되었다고 가정하였다. 이러한 가정 하에서 BFTMA 시스템의 이산 시간 k 에서의 BFTMA 시스템의 측정방정식은 식 (19)와 같다.

$$\bar{z}_k = \begin{bmatrix} \theta_k \\ f_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \frac{R_x}{R_y} + n_\theta \\ f_0 \left(1 - \frac{R_x V_x + R_y V_y}{c \sqrt{R_x^2 + R_y^2}} \right) + n_f \end{bmatrix}_k \quad (19)$$

$$= \begin{bmatrix} G_1(x) \\ G_2(x) \end{bmatrix}_k + \bar{n}_k$$

BFTMA의 상태변수 초기치를 식 (20)으로 표현하면 MLE는 식 (21)과 같은 성능지수 함수를 최소화하는 상태변수 초기치를 구하는 문제로 귀결된다.

$$x(t_0) = [R_x \ R_y \ V_x \ V_y \ f]^T |_{t_0} \quad (20)$$

$$J = \sum_{i=1}^N n_i \quad (21)$$

$$n_i = \frac{1}{2} (\bar{z}_i - \bar{G}(x_i(x(t_0))))^T \cdot \Gamma (\bar{z}_i - \bar{G}(x_i(x(t_0)))) \quad (22)$$

$$\bar{G}(\cdot) = [G_1(\cdot) \ G_2(\cdot)]^T \quad (23)$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \sigma_0^{-2} & 0 \\ 0 & \sigma_f^{-2} \end{bmatrix} \quad (24)$$

측정방정식 $\bar{G}(\cdot)$ 는 비선형방정식으로 표현되므로 식 (21)의 성능지수 함수 J 를 최소화하는 $x(t_0)$ 를 계산하기 위하여 Newton 방법을 적용하였으며 k 번째 반복 계산에 의해 산출된 해 $\bar{x}^k(t_0)$ 는 식 (25)와 같다.

$$\begin{aligned} \bar{x}^k(t_0) &= \bar{x}^{k-1}(t_0) \\ &+ \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \bar{G}(x_i(t))}{\partial x_i(t)} \frac{\partial x_i(t)}{\partial x(t_0)} \right)^T \right. \\ &\quad \left. \Lambda \left(\frac{\partial \bar{G}(x_i(t))}{\partial x_i(t)} \frac{\partial x_i(t)}{\partial x(t_0)} \right) \right]^{-1} \\ &\cdot \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \bar{G}(x_i(t))}{\partial x_i(t)} \frac{\partial x_i(t)}{\partial x(t_0)} \right)^T \right. \\ &\quad \left. \Lambda (\bar{z}_i(t) - \bar{G}(x_i(t))) \right]_{x(t_0) = \bar{x}^{k-1}(t_0)} \end{aligned} \quad (25)$$

4. 측정데이터 전처리 기법

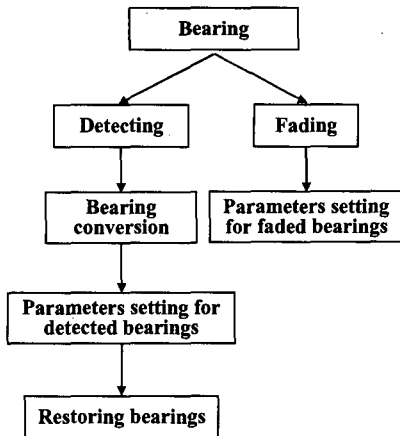
BFTMA에 적용된 필터는 기본적으로 표적의 방위와 주파수 측정치를 이용하여 표적의 기동을 추정하는 개념이므로 센서로부터 측정되는 표적정보의 활용 가능 정도에 따라 BFTMA의 성능이 좌우된다. 그러

나 실제 해상에서는 선배열 센서로 방위와 주파수가 지속적으로 측정되지 않아 자주 소실되며 표적 정보가 소실될 경우 필터를 이용한 지속적인 표적기동분석이 불가능하게 된다. 따라서 BFTMA 시스템의 운용성을 고려한다면 소실된 표적정보를 복원하여 표적정보를 이용한 지속적인 필터 수행이 가능하게 하는 데이터 처리에 대한 기술적인 연구가 필수적이다.

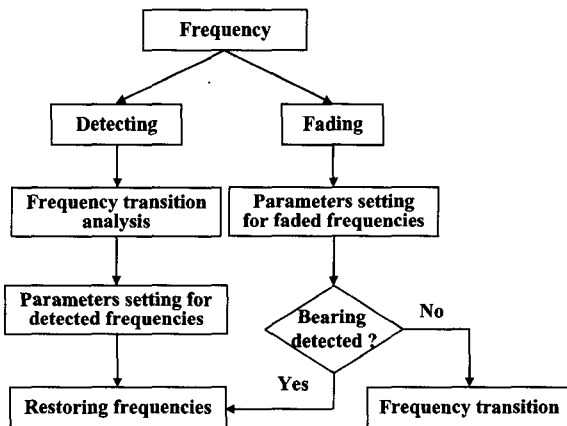
표적 측정치가 소실되면 필터는 전과 과정만을 수행하여 상태를 예측할 수밖에 없으며 표적정보가 새롭게 측정된 이후부터 측정치 쇄신을 통해 상태 추정치를 쇄신하게 된다. 이 경우 필터의 성능이 낮아져 BFTMA 시스템의 무기체계 적용시 운용성을 저하시키는 주요 원인이 된다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 표적정보의 소실 여부를 판단하여 표적 측정치가 소실될 경우 정상적으로 측정된 표적정보와 함께 데이터 보간 기법을 이용하여 소실된 표적정보를 사전에 복원하는 측정데이터 전처리에 관한 연구를 수행하였다. 측정데이터 전처리의 기본적인 개념은 소실 전/후의 정상 탐지된 표적정보를 이용하여 소실된 표적정보를 복원하는 것으로 데이터 보간 기법으로 잘 알려진 curve fitting 방법을 적용하였다. 여기서 선배열 센서의 BFTMA 시스템에서 활용되는 표적정보인 방위와 주파수의 탐지 상황과 운용 현황을 고려하여 실제 시스템 구현에 적합한 데이터 전처리 알고리즘 개발에 연구가 요구된다.

선배열 센서로부터 표적이 탐지되면 표적으로부터 측정되는 정보는 표적방위와 함께 표적으로부터 방사되는 다수의 표적주파수이다. BFTMA에서는 방위 및 하나의 주파수를 이용하여 표적기동분석을 수행하므로 BFTMA에서 이용하던 주파수 측정치가 소실되더라도 다른 주파수 측정치를 이용한다면 표적기동분석을 지속적으로 수행할 수 있게 된다. 주파수가 모두 소실되는 경우에만 방위가 소실되며 표적으로부터 탐지되는 주파수가 하나 이상이기만 하면 표적방위가 센서로부터 측정되기 때문에 각 주파수간 독립적인 관계 및 방위와 주파수의 상호 의존적인 탐지 관계를 고려한 데이터 전처리 기법이 요구된다.

선배열 센서의 BFTMA 시스템에서 획득되는 표적정보 활용 방안과 이에 대한 전처리 기본 개념은 다음과 같이 서술되며 개략도를 그림 3과 그림 4에서



[그림 3] Preprocessing for bearing fading



[그림 4] Preprocessing for frequency fading

나타내었다.

BFTMA의 표적정보

- 1) 선배열 센서로부터 탐지되는 표적에 대하여 BFTMA에서 활용 가능한 표적정보 측정치는 표적방위와 다수의 표적주파수이다.
- 2) 표적주파수가 모두 소실되면 선배열 센서로부터 표적이 탐지되지 않는 상황으로서 표적방위 역시 소실된다. 즉, 표적주파수가 모두 소실되면 BFTMA는 수행할 수 없게 된다.
- 3) BFTMA에서 이용하는 표적주파수가 소실될 경우 탐지되고 있는 다른 주파수를 표적기동분석에 활용이 가능하다.

BFTMA를 위한 데이터 전처리 기본 개념

- 1) 표적방위와 모든 표적주파수가 소실되면 표적정보가 정상 탐지될 때까지 표적기동분석이 일시 중단된다.
- 2) 표적방위와 주파수가 정상 탐지되면 표적정보 소실 개수를 산출하고, 정상 탐지된 표적정보를 이용하여 소실 정보를 복원한다.
- 3) Curve fitting에 사용되는 정상 탐지된 표적정보는 측정된 표적정보 상황에 따라 사용되는 데이터 개수는 가변적으로 설정된다.
- 4) BFTMA에 사용하는 주파수가 소실되면 주파수의 전처리 방법은 표적방위의 정상 탐지 여부에 의존한다.
- 5) 일괄추정과 함께 소실된 표적 방위와 주파수는 서로 독립적으로 복원하거나 방위에 의존하여 주파수 복원이 결정된다.
- 6) BFTMA에 사용하는 주파수가 소실되어 더 이상 탐지되지 않을 경우, 정상 탐지된 주파수 특성 분석을 통해 소실 주파수를 복원하며, 방위와 주파수를 이용한 일괄추정을 가능하도록 하였다. 일괄추정을 위한 표적주파수가 정상 탐지되다가 소실되어 더 이상 탐지되지 않으면 방위만을 이용한 일괄추정을 수행해야만 하며 이 경우 표적 초기 추정 성능이 현저히 저하된다. 따라서 정상 탐지된 주파수 정보를 충분히 이용함으로써 소실된 구간의 주파수를 예측하여 방위와 주파수를 이용한 일괄추정을 수행할 수 있도록 구현하였다.

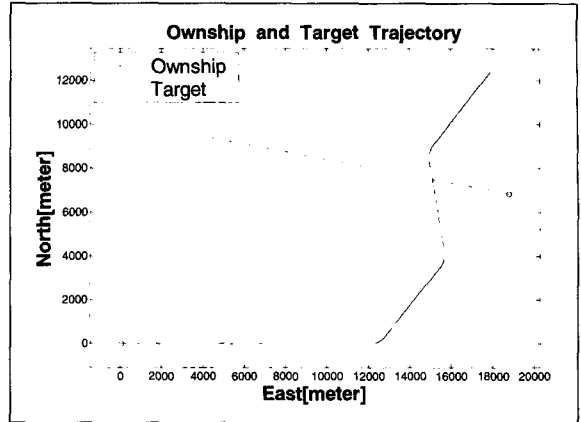
5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

BFTMA를 위하여 IMM 필터 모델에 사용된 공정 잡음의 공분산 Q^1 과 Q^2 는 대각요소에 값을 가지는 행렬로 설정하였으며, 방위 측정잡음의 공분산 R_θ 는 1도~5도로 고려하였다.

방위와 주파수 입력 조건은 서로 독립적으로 소실되는 일반적인 경우와 일괄추정을 수행하기 위하여 방위와 주파수를 획득하는 과정에서 주파수가 소실되어 더 이상 측정되지 않는 경우에 대하여 측정데이터 전처리를 통한 시뮬레이션을 수행하였다. 표적은 초

기 거리 및 방위 20km와 70도에서 속력 및 침로를 4Kts와 280도로 기동한다고 가정하였으며 이는 그림 5와 같다. 그림 5에서 자함은 5Kts와 90도의 초기 속력 및 침로로 기동을 시작하며 이후 변침과 변속 기동을 통해 BFTMA를 수행한다. 자함과 표적 기동 시나리오에 대하여 표적 방위와 주파수 정보가 표 1과 같이 일괄추정 수행 전과 수행 후에 각각 방위와 주파수가 소실되는 경우를 고려하였다.

표적주파수는 음원주파수 500Hz와 600Hz가 도플러효과가 포함되어 선배열 센서로부터 탐지된다고 가정하였으며, BFTMA에 적용되는 주파수는 500Hz로 선택하였다. 일괄추정이 종료되기 전과 후에서 방위



[그림 5] Ownship and target trajectory

[표 1] Bearing and frequency condition

표적방위 (도)	표적주파수 (Hz)		조건
	1	2	
65.0	500.6	600.6	
-	-	600.1	방위/주파수1 소실
-	-	601.9	방위/주파수1 소실
-	-	600.7	방위/주파수1 소실
-	-	600.5	방위/주파수1 소실
-	-	600.3	방위/주파수1 소실
66.1	500.7	601.8	
66.8	500.7	601.2	
-	-	600.9	방위/주파수1 소실
-	-	601.0	방위/주파수1 소실
62.7	-	600.8	주파수1 소실
65.1	-	601.0	주파수1 소실
64.0	500.6	600.9	
18.5	500.2	600.3	
18.2	-	600.2	주파수1 소실
18.6	-	600.4	주파수1 소실
18.1	-	600.3	주파수1 소실
18.5	500.3	600.4	
17.2	500.2	-	주파수2 소실
17.3	500.2	-	주파수2 소실
14.9	500.0	600.0	

[표 2] Target initial estimates result

구분	진값	일괄추정	
		추정값	오차
거리(m)	20000	19610	390
속력(Kts)	4	3.6	0.4
침로(도)	280	283.4	-3.4

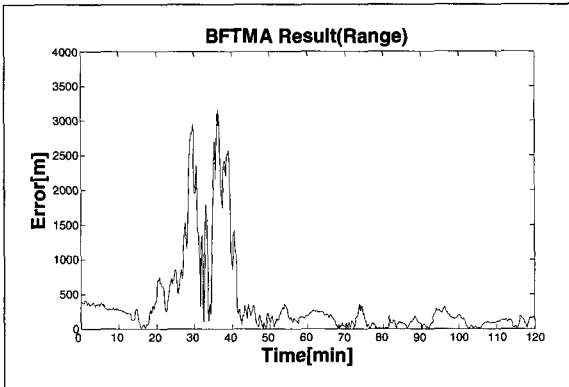
와 주파수가 소실되었으며 특히 일괄추정 종료 이후 주파수 500Hz와 600Hz가 각각 한 차례 소실되는 상황을 고려하였다.

측정데이터 전처리 결과 일괄추정 수행 전의 방위와 주파수 소실구간에 대해서는 소실 전/후의 정상 탐지된 방위와 주파수를 이용하여 정상적으로 복원되었다. BFTMA에 사용되는 500Hz의 소실구간은 일괄추정이 종료되고 방위는 정상 탐지된 상황이므로 500Hz를 복원하지 않고 BFTMA가 지속적으로 수행될 수 있도록 600Hz로 천이되었다.

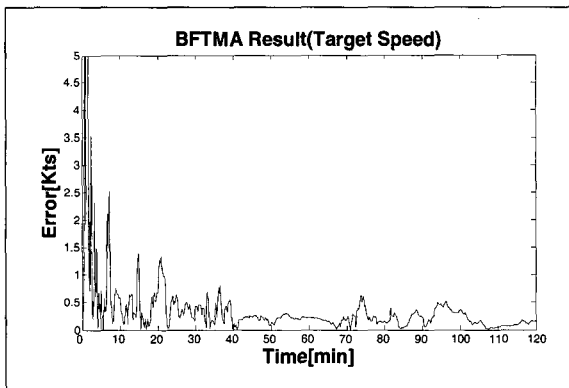
BFTMA에 사용되는 600Hz가 소실된 구간에서는 정상 탐지되고 있는 500Hz로 천이되었다. 복원된 표적 방위와 주파수를 이용하여 일괄추정을 적용하여 표적의 초기치를 추정된 결과는 표 2와 같다. 일괄추정 결과는 거리, 속력, 침로 각각 진값에 가까운 범위로 예측되어 있음을 알 수 있었고 일괄추정을 통한 표적 초기치 추정결과가 매우 양호함을 확인하였다. 추정된 표적 초기치를 이용한 BFTMA 결과는 그림 6~그림 8에서와 같이 표적의 거리, 속력 침로 추정

성능 모두 양호하였다.

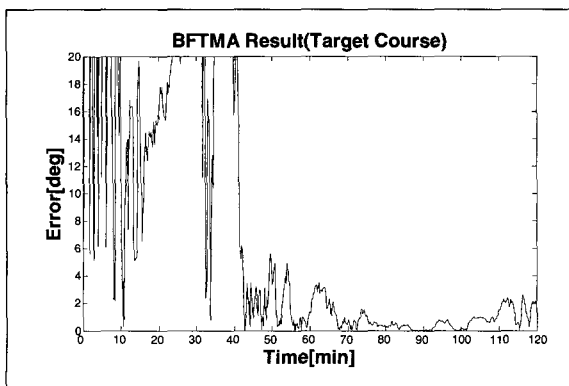
다음은 일괄추정과정에서 BFTMA에 사용되는 주파수가 소실되어 더 이상 측정되지 않는 경우에 대한



[그림 6] BFTMA result(range estimate error)



[그림 7] BFTMA result(speed estimate error)



[그림 8] BFTMA result(course estimate error)

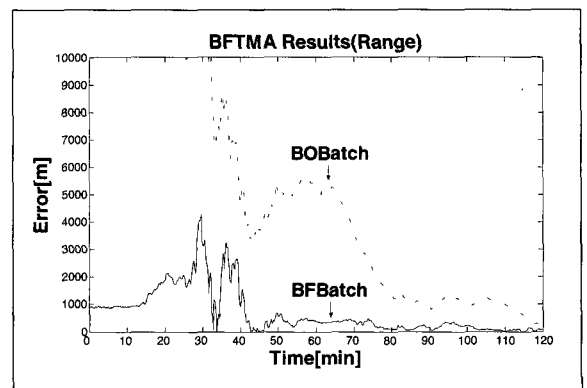
여 데이터 전처리 결과와 BFTMA 성능을 고찰하였다. 음원주파수는 500Hz와 600Hz가 탐지된다고 가정하였으며, BFTMA에 사용되는 주파수는 500Hz로 설정하였다.

일괄추정 도중 500Hz가 소실되고 600Hz는 정상 탐지되고 있는 상황을 가정하였으며, 이러한 상황에서 방위만을 이용한 일괄추정(BOBatch)과 본 논문에서 제안한 측정데이터 전처리를 통해 복원된 500Hz를 이용한 일괄추정(BFBatch)을 비교하였다.

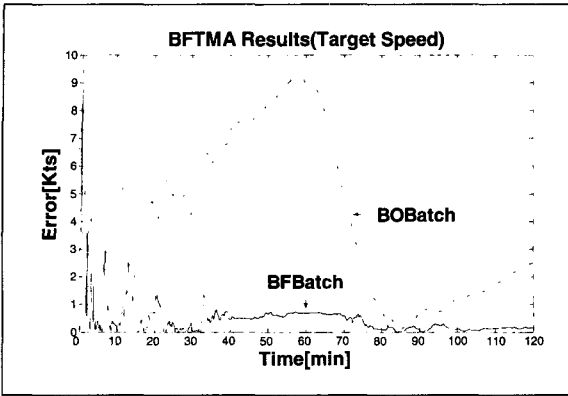
표 3은 표적 초기치 추정 결과를 나타내며 BOBatch시 표적의 초기거리, 속력, 침로 추정 성능이 현저하게 저하되었음을 알 수 있었다. BFBatch의 경우 거리, 속력, 침로 추정 결과가 모두 양호하였다. 방위 및 주파수 500Hz를 이용한 일괄추정 후 수행된 BFTMA 결과와 방위만을 이용한 일괄추정 수행 후 BFTMA 결과는 그림 9~그림 10에서 각각 비교하였다. BFBatch를 이용하여 수행된 BFTMA의 경우 거리, 속력, 침로 추정 결과 모두 주어진 수렴조건을 만족하였으며, 추정 성능도 주파수 소실구간에

[표 3] Target initial estimates result

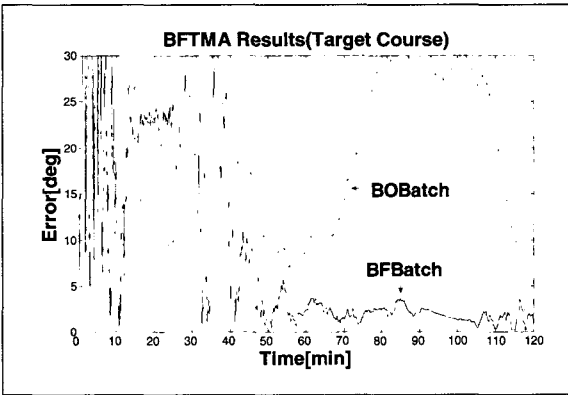
구분	진값	BFBatch		BOBatch	
		추정값	오차	추정값	오차
거리(m)	20000	20896	-896	32503	-12503
속력(Kts)	4	4.1	-0.1	9.6	-5.6
침로(도)	280	284.8	-4.8	278.6	1.4



[그림 9] BFTMA result(range estimate error)



[그림 10] BFTMA result(speed estimate error)



[그림 11] BFTMA result(course estimate error)

서 다소 불안정하였으나 이내 안정화되었음을 알 수 있었다. BOBatch의 표적 초기치 추정 결과가 불량하여 BFTMA 성능 저하에 큰 요인이 되었고, 추정 성능의 안정화에 이르는 시간이 상당히 요구되어 거리, 속력, 침로 모두 주어진 수렴성능을 만족하지 못하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 일괄추정 및 BFTMA 추정 성능 향상을 위하여 소실된 표적의 방위와 주파수 정보에 대한 전처리 알고리즘을 개발하였다. 방위와 주파수 정보의 상호 의존적인 소실관계를 정립하여 소실 표적 정보에 대하여 제안된 데이터 전처리 알고리즘을 통

해 지속적인 표적기동분석을 가능하게 하였다. 주파수가 소실되더라도 방위와 주파수를 이용한 일괄추정을 적용할 수 있게 함으로써 표적의 초기치 추정 성능의 향상시킬 수 있었다. 모의 시뮬레이션을 통해 소실된 표적정보 조건하에서 방위만을 이용한 일괄추정 적용결과와의 비교 분석을 하였고, 제안된 데이터 전처리 알고리즘을 통한 BFTMA의 우수성과 실용성을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] L. Gerken, *ASW versus Submarine Technology Battle*, American Scientific Corp., 1986.
- [2] D. H. Wagner, W. C. Mylander and T. J. Sanders, *Naval Operations Analysis*, Naval Institute Press, 1999.
- [3] C. Jauffret and D. Pillon, "Observability in Passive Target Motion Analysis," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 32, No. 4, pp.1290~1300, October, 1996.
- [4] C. Jauffret and D. Pillon, "New Observability Criterion in Target Motion Analysis," *Underwater Acoustic Data Processing*, pp. 479~484, 1989.
- [5] A. G. Lindgren and K. F. Gong, "Position and Velocity Estimation via Bearing Observations," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 14, pp.564~577, July, 1978.
- [6] V. J. Aidala, "Kalman Filter Behavior in Bearings-Only Tracking Applications," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 15, No. 2, pp.29~39, January, 1979.
- [7] S. C. Nardone 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, March, 1981.
- [8] V. J. Aidala and S. C. Nardone, "Biased Estimation Properties of the Pseudolinear Tracking Filter," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 18, No. 4, pp.432~441, July, 1982.
- [9] 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, October, 1985.
- [10] Y. Bar-Shalom and X. R. Li, *Estimation and Tracking Principles, Techniques, and Software*, Artech House, 1993.
- [11] P. S. Maybeck, *Stochastic Models, Estimation, and Control*, Vol. 1, Academic Press, 1979.
- [12] M. J. Maron, *Numerical Analysis, A Practical Approach*, Macmillan Publishing, 1982.