

불연속적인 다중 주파수 측정치에 강인한 표적기동분석 알고리즘

A Robust Target Motion Analysis Algorithm for Discontinuous Frequency Measurements

정 명 준*

Myoung Jun Cheong

Abstract

Estimating underwater target state variables(position, velocity, course, etc) is necessary to counteract threatening targets. In passive sonar systems, conventional target motion analysis(TMA) techniques using bearing and frequency measurements of an underwater target are widely introduced. However, it is not clear how conventional TMA techniques can be used if some of frequency measurements are unavailable during parts of the scenario, partially unavailable frequency measurements are common in the ocean with complicated acoustic conditions where frequency measurements often come and go. This paper proposes a new TMA algorithm, which is robust to partially unavailable frequency measurements, using the frequency measurements fusion method.

Keywords : Target Motion Analysis(표적기동분석), Discontinuous Frequency Measurements(불연속적인 다중 주파수 측정치), Frequency Measurements Fusion(다중 주파수 측정치 융합)

1. 서론

표적기동분석(TMA : Target Motion Analysis)은 수동 소나에서 획득한 표적의 방위와 주파수정보를 이용해 표적의 위치 정보를 추출하는 기법이다. 이는 표적의 방위정보만을 사용하는 BOTMA(Bearing Only TMA)와 방위/주파수 정보를 모두 사용하는 BFTMA(Bearing and Frequency TMA)로 구분된다^[1,2]. 특히 가관측성이

자함의 변칙 없이 보장되고^[3,4], 단일 표적으로부터 기인된 다중 주파수 정보를 모두 사용하는 MFBTMA(Multi Frequencies and Bearing TMA)가 최근까지 많이 연구되고 있다^[6~13]. 다중 주파수 정보를 이용한 TMA 기법은 다중 주파수 측정치를 사용하는 방법에 따라 다음과 같이 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 BFTMA 기법에 다중 주파수 정보를 다차원 벡터로 그대로 더해서 사용하는 기법이다^[6,7,11]. 두 번째는 다중 주파수 정보를 하나의 주파수로 융합하여 TMA를 수행하는 것이다^[8~10,13]. 그러나 이러한 기존의 TMA 기법은 다중 주파수 측정치가 지속적으로 획득되지 못할 경우 알고리즘에 사용되는 벡터의 차원이 변화

† 2011년 2월 18일 접수~2011년 4월 15일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 정명준(mjjeong@add.re.kr)

거나 주파수 융합이 모든 주파수에 대하여 수행할 수 없는 문제점이 있다^[14]. 공교롭게도 수동소나에서는 주파수 측정치가 표적 방사소음의 세기 변화와 수중환경에서의 음파 전달 특성 등으로 인하여 나타났다가 없어졌다가 다시 나타나는 현상이 빈번하다^[10,14].

따라서 본 논문에서는 다중 주파수선 정보 융합을 이용하여 주파수선의 불연속성에도 필터 차원의 변화가 없이 불연속적인 주파수 측정치에도 강인한 주파수 융합 표적기동분석 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 가상의 기준 주파수로 개별 주파수 정보를 선형 변환 후 융합한다. 또한 새롭게 추가되는 주파수 측정치의 경우 융합 주파수와의 주파수 비율 계산을 통해 주파수 변환을 수행할 수 있도록 처리한다. 따라서 주파수 측정치가 끊기거나 추가되는 경우에도 전체 알고리즘 수식의 벡터 차원 변화 없이 다중 주파수 측정치를 모두 이용하는 표적기동분석을 수행할 수 있게 된다. 이는 batch estimator와 recursive estimator를 이용한 TMA 기법 모두 제안한 주파수 융합을 이용해 간단한 구조로 수행할 수 있음을 의미한다^[13].

본 논문은 1장 서론 부분에 이어 2장은 기존의 표적기동분석 알고리즘의 동적 시스템 모델링과 주파수 측정치 불연속성으로 인한 문제점을 기술하였으며, 3장에서는 주파수 융합 기법을 사용한 표적기동분석 알고리즘을 새롭게 제안하였고, 4장에서는 모의실험 결과 분석을 하였으며 5장에서 결론을 맺는다.

2. 기존 MFBTMA 기법

수동 소나 시스템에서의 표적과 자함의 관계는 다음 Fig. 1과 같이 설정할 수 있다.

MFBTMA 알고리즘은 방위와 주파수 정보만으로 표적의 거리, 방위, 침로, 속도를 추정하는 비선형 문제이므로 다음과 같은 상태 방정식과 측정치 방정식으로 표현한다^[1,7].

$$X_k = F_k(X_{k-1}) + w_k \quad (1)$$

$$z_k = h_k(X_k) + v_k \quad k = 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

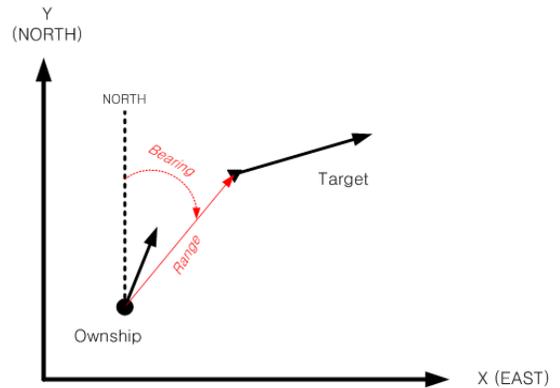


Fig. 1. 표적과 자함의 기하학적 관계

여기서 X_k 는 k 시간의 표적의 상태 벡터를 말한다. $F_k(\cdot)$ 는 k 시간의 시스템 천이 함수이고, w_k 는 프로세스 잡음으로 평균이 0이고 공분산 행렬이 Q_k 인 정규분포 특성을 가진다고 가정한다. 또한 z_k 는 k 시간의 측정치로서 표적의 방위 정보와 다중 주파수 정보로 이루어진 벡터이고, $h_k(\cdot)$ 는 측정치와 표적의 상태벡터의 관계를 나타내는 시변 함수이다. v_k 는 측정치 즉 방위와 주파수의 측정 잡음으로 평균이 0이고 공분산 행렬이 R_k 인 정규분포 특성을 가진다고 가정한다.

서론에 언급한 바와 같이 MFBTMA 알고리즘은 다중 주파수 측정치를 고차원 벡터로 그대로 사용하는 방법과 다중 주파수 측정치를 융합하여 고정된 상태 벡터로 TMA를 수행하는 방법으로 구분할 수 있다. 먼저 다중 주파수 측정치를 고차원 벡터로 그대로 사용하는 경우 상태방정식과 측정치 방정식은 아래와 같이 표현할 수 있다^[7,15,16].

$$X_k = [x(k) \ y(k) \ \dot{x}(k) \ \dot{y}(k) \ f_S^{(1)} \ f_S^{(2)} \ \dots \ f_S^{(m)}]^T \quad (3)$$

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$z_k = [\theta(k) \ f^{(1)}(k) \ f^{(2)}(k) \ \dots \ f^{(m)}(k)]^T \quad (5)$$

$$h_k(\mathbf{X}_k) = \begin{bmatrix} \tan^{-1}\left(\frac{x^{rel}(k)}{y^{rel}(k)}\right) \\ f_S^{(1)}\left(1 - \frac{\dot{r}(k)}{c}\right) \\ f_S^{(2)}\left(1 - \frac{\dot{r}(k)}{c}\right) \\ \dots \\ f_S^{(m)}\left(1 - \frac{\dot{r}(k)}{c}\right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\dot{r}(k) = \frac{x^{rel}(k)\dot{x}^{rel}(k) + y^{rel}(k)\dot{y}^{rel}(k)}{\sqrt{x(k)^2 + y(k)^2}} \quad (7)$$

상태방정식은 표적을 등속 운동으로 모델링하였고, T 는 주기이다. 측정치 방정식에서 c 는 신호의 전달 속도이고, $f_S^{(1)}, f_S^{(2)}, \dots, f_S^{(m)}$ 은 m 개의 표적의 도플러 변이가 없는 주파수 값이다. $f^{(1)}(k), f^{(2)}(k), \dots, f^{(m)}(k)$ 은 도플러 변이와 잡음이 포함된 k 시간의 다중 주파수 측정치이다. $\dot{r}(k)$ 는 k 시간의 거리 변화율로 자함과 표적의 상태벡터를 상대좌표계상에서 정의한 $[x^{rel}(k), y^{rel}(k), \dot{x}^{rel}(k), \dot{y}^{rel}(k)]$ 을 이용해 계산된다. 이와 같이 다중 주파수 측정치를 고차원 벡터로 이용하는 기법은 TMA 수식이 시변 행렬로 정의되고, 주파수가 추가될수록 행렬의 차원이 계속해서 커지게 된다. 이렇게 고차원 벡터가 되면 전체 알고리즘 수식이 복잡해지고, 고차원 행렬 연산에 따른 많은 연산 시간이 소요되며, TMA 성능이 불안정해지는 문제점을 가진다^[10]. 또한 다중 주파수 측정치가 불연속적으로 획득되는 경우에는 불연속 시점마다 알고리즘이 초기화해야 하는 단점이 있다^[9]. 이는 측정된 측정치 정보를 연속적으로 사용하지 못하기 때문이다.

주파수를 융합하여 고정된 상태벡터로 TMA를 수행하는 기법은 다음과 같이 상태방정식과 측정치 방정식을 정의한다^[10,13,14].

$$\mathbf{X}_k = F \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{w}_k \quad (8)$$

$$\mathbf{X}_k = [x(k) \ y(k) \ \dot{x}(k) \ \dot{y}(k) \ f_S]^T \quad (9)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{z}_k = h(\mathbf{X}_k) + \mathbf{v}_k \quad (11)$$

$$\mathbf{z}_k = [\theta(k) \ f(k)]^T \quad (12)$$

$$h(\mathbf{X}_k) = \begin{bmatrix} \tan^{-1}\left(\frac{x^{rel}(k)}{y^{rel}(k)}\right) \\ f_S\left(1 - \frac{\dot{r}(k)}{c}\right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서 $f(k)$ 와 f_S 는 주파수 융합에 대해 아래 수식에서 정의한 값이다^[13,14].

$$\sum_{i=1}^m f^{(i)}(k) = \left[\sum_{i=1}^m f_S^{(i)} \right] \times \left(1 - \frac{\dot{r}(k)}{c} \right) \quad (14)$$

$$f(k) = \sum_{i=1}^m \{f^{(i)}(k)\} \quad (15)$$

$$f_S = \sum_{i=1}^m \{f_S^{(i)}\} \quad (16)$$

이렇게 다중 주파수 측정치를 더하여서 하나의 주파수로 사용할 수 있는 것은 동일한 표적이 발생시키는 주파수 신호는 동일한 주파수 변이를 경험하기 때문에 가능하다^[8,10]. 이렇게 주파수 측정치를 융합하여 TMA를 수행하면 기존의 고차원 벡터를 사용하는 알고리즘보다 수식이 간단해 지고 연산시간도 줄어들게 된다. 그러나 이러한 주파수 융합 기법은 수동 소나의 특성상 주파수 정보가 있다가 없어졌다가 다시 나타날 때에는 모든 주파수를 이용할 수 없으며^[9], 다시 융합을 시작해야 하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 P. Johannesson은 주파수 정보의 불연속 시점마다 TMA 모드를 바꿔가면서 다중 주파수 측정치를 모두 이용하는 기법을 제안하였으나 이는 근본적인 해결책이 되지 못한다.

3. 제안한 알고리즘

본 장에서는 불연속적인 주파수 측정치를 융합하여 표적기동분석을 수행하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘의 상태 방정식과 측정치 방정식은 기존의 단일 주파수 측정치를 이용하는 BFTMA의

수식과 같이 고정된 벡터 차원을 가진다. 따라서 주파수 정보가 시간의 흐름에 따라 추가되더라도 상태벡터의 차원이 더 커지지 않고 TMA 수행이 가능하다. 이러한 구조는 새로운 주파수 융합 알고리즘이 있기 때문에 가능하다.

제안한 주파수 융합 알고리즘은 동일한 표적의 다중 주파수 신호가 경험하는 도플러 변이는 같기 때문에 다중 주파수 측정치는 도플러 변이가 없는 표적의 근본 주파수 신호와 상관없이 시간에 따른 도플러 변이는 같다는 특성을 이용한다. 이는 i 번째 주파수와 j 번째 주파수 측정치가 있을 때 아래 수식과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{f^{(i)}(k)}{f^{(i)}(k-1)} = \frac{f^{(j)}(k)}{f^{(j)}(k-1)}, \quad i \neq j \quad (17)$$

위의 수식과 같이 동일한 시간의 주파수 측정치의 비율 정보를 이용하면 새로운 주파수 신호를 생성할 수 있다. 이를 개별 주파수 측정치의 확률적 특성을 이용한 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$f_A^{(i)}(k) = \frac{f^{(i)}(k) f_A}{f^{(i)}(T_f)}, \quad T_f \leq k \quad (18)$$

$$f(k) = \frac{\sum_{i=1}^{m_k} \sigma_{f^{(i)}}^{-1} f_A^{(i)}(k)}{\sum_{i=1}^{m_k} \sigma_{f^{(i)}}^{-1}}, \quad i = 1, 2, \dots, m_k \quad (19)$$

여기서 $f(k)$ 는 융합한 주파수 측정치이고, $f^{(i)}(k)$ 는 표준편차가 $\sigma_{f^{(i)}}$ 인 i 번째 주파수 측정치이다. T_f 는 주파수 융합을 시작한 기준 시간이며, f_A 는 알고리즘에서 임의로 설정하는 가상의 주파수 측정치로서 제안한 알고리즘에서는 T_f 시간에 SNR이 가장 큰 주파수 값으로 선정한다. 이는 TMA를 수행하는 대상 표적의 주파수 대역으로 주파수를 크기 변환하기 위함이다. m_k 는 k 시간의 주파수 측정치 개수로서 특정 시간에 몇몇 주파수 측정치가 사라지면 존재하는 주파수 측정치로만 융합하도록 시변 값으로 설정한다. 따라서 제안한 알고리즘은 단 하나의 주파수만이라도 끊어지지 않을 경우 주파수 융합 정보를 이용해 고정된 벡터 차원을 유지하며 연속적인 표적기동분석을

수행할 수 있다.

이러한 주파수 융합 알고리즘은 T_f 시간의 주파수 값으로 정규화가 가능한 주파수 측정치로만 수행 가능하다. 만약 다중 주파수의 불연속성장 T_f 시간에 존재하지 않았던 다중 주파수로만 주파수 측정치가 표적기동분석의 입력으로 사용된다면, TMA 필터를 새롭게 초기화하는 형태이므로 기존의 알고리즘의 문제점을 극복하지 못하게 된다. 따라서 제안한 알고리즘은 T_f 시간에 존재하지 않았던 새로운 주파수 측정치에 대해 주파수 측정치를 예측한 후 주파수 융합을 수행한다. 이렇게 주파수 예측 과정을 거치면 수식 (18)에서의 주파수 정규화 과정을 수행할 수 있게 된다. 이는 수식적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{f^{(j)}(k')}{f^{(j)}(T_f)} = \frac{f(k')}{f_A}, \quad T_f \leq k' \quad (20)$$

$$f^{(j)}(T_f) = \frac{f^{(j)}(k') f_A}{f(k')} \quad (21)$$

$$f_A^{(j)}(k'+1) = \frac{f^{(j)}(k'+1) f_A}{f^{(j)}(T_f)} \quad (22)$$

여기서 k' 은 먼저 T_f 시간에 존재하지 않았던 주파수가 측정치로 입력된 시간이고, $f^{(j)}$ 는 T_f 시간부터 k' 시간이전까지 존재하지 않았던 주파수 측정치이다. $f(k')$ 는 k' 시간에서의 융합한 주파수 측정치로서, $f^{(j)}$ 없이 융합한 주파수 측정치이다. 따라서 시점부터는 수식 (22)를 수식 (19)에 적용하여 주파수 융합을 수행할 수 있게 된다.

위와 같이 융합한 주파수 측정치를 이용해 표적기동분석을 수행할 때 표적상태벡터의 5번째 정보인 f_s 값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_s = \frac{f_A}{1 - \frac{\dot{r}(T_f)}{c}} \quad (23)$$

4. 모의실험

제안한 알고리즘이 주파수 측정치가 불연속적일 때

기존의 알고리즘보다 우수한 성능을 보임을 증명하기 위해 몬테칼로 모의실험을 수행하였다.

가. 모의실험 조건

모의실험 시나리오에서의 표적과 자함의 궤적은 다음과 같다.

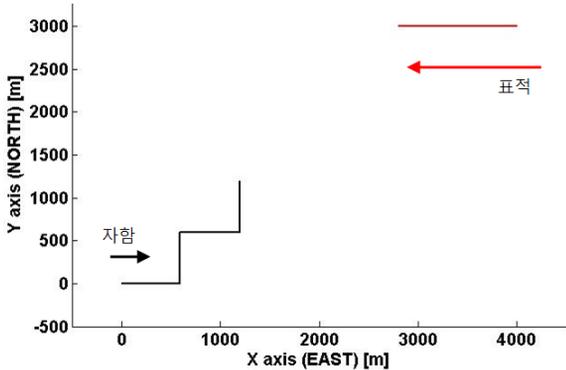


Fig. 2. 표적과 자함의 궤적

모의실험 표적과 자함의 기동 시나리오는 진북기준 시계방향으로 방위가 커지는 좌표계로 정의하였고, 위치 및 속도 조건은 다음과 같다.

Table 1. 모의 실험 기동 시나리오

구분	초기 위치 [m]	침로 [deg]	속력 [m/s]
표적	(4000, 3000)	270	3
자함	(0, 0)	90 (< 100th frame) 0 (100 ~ 200th frame) 90 (200 ~ 300th frame) 0 (300 ~ 400th frame)	6

Table 2. 모의 실험 잡음 오차 조건

파라미터	값
프로세스 잡음의 표준편차	0.01m/s ²
측정 잡음의 표준편차 σ_{θ}	0.5deg
표적 주파수 값 $f_S^{(1 \sim 6)}$	[200, 210, 220, 300, 350, 400]Hz
주파수 잡음 표준편차 $\sigma_{f^{(1 \sim 6)}}$	1Hz

Fig. 3은 주파수 측정치 궤적으로 실선은 표적이 내보내는 주파수 신호이고 잡음이 있는 선은 도플러 변이가 포함된 주파수 측정치 값이다. 프로세스잡음과 측정치 오차는 Table 2와 같이 정의 하였다.

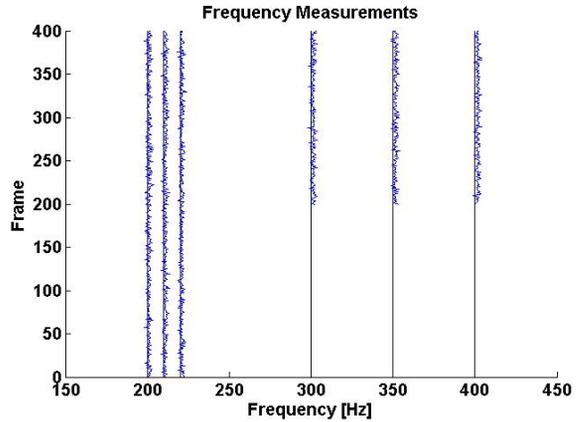


Fig. 3. 주파수 측정치

기존의 알고리즘과 제안한 알고리즘을 동일한 조건에서 비교하기 위해 recursive estimator로 추정을 하였다. 이는 서론에서 언급한 바와 같이 기존의 batch estimator를 이용한 방법은 불연속적인 주파수 측정치를 사용할 경우 TMA 알고리즘이 복잡해지기 때문이다^[14]. Recursive estimator로는 EKF(Extended Kalman Filter)를 사용하였고, 표적의 초기 상태벡터와 예측오차 공분산은 Y. T. Chan과 Neil Gordon의 초기화 방법을 사용하여 다음과 같이 정의하였다^[14,16].

$$\mathbf{X}(0|0) = \left[x_{obs}(0) + \frac{\bar{r}}{2} \sin(\tilde{b}_0), y_{obs}(0) + \frac{\bar{r}}{2} \cos(\tilde{b}_0), 0, 0 \right]^T \quad (24)$$

$$\mathbf{P}(0|0) = \text{diag} \left[\frac{(\bar{r} \sin(\tilde{b}_0))^2}{3}, \frac{(\bar{r} \cos(\tilde{b}_0))^2}{3}, \frac{(\bar{v})^2}{3}, \frac{(\bar{v})^2}{3} \right] \quad (25)$$

여기서 \bar{r} 은 표적이 존재할 만한 최대 거리로서 20 km로 설정하였으며, \bar{v} 은 표적의 가능한 최대 속도로 20m/s로 설정하였다. \tilde{b}_0 은 잡음이 있는 초기 표적의 방위 측정치이며 $x_{obs}(0), y_{obs}(0)$ 은 자함의 x축, y축

초기 위치이다.

나. 시뮬레이션 결과

기존의 알고리즘과 제안한 알고리즘을 100번의 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 RMS(Root Mean Square) 오차로 비교하였다. 비교하는 기존의 알고리즘은 Y. T. Chan 논문의 주파수 조합 기법을 사용한 EKF 알고리즘과 C. Jauffret의 논문처럼 다중 주파수를 상태 벡터에 그대로 사용한 EKF 알고리즘이다. 동일 조건에서 비교하기 위해 각 논문의 주파수 측정치를 다루는 방식만을 사용하였고, 상태벡터를 추정하는 기법은 각 논문의 기법과 다르게 EKF 알고리즘을 적용하였다.

총 400frame에 대하여 거리, 방위, 침로, 속도에 대한 RMS 에러는 다음 그림과 같다. 비교의 편의를 위해 데이터를 20frame 마다 전시하였다.

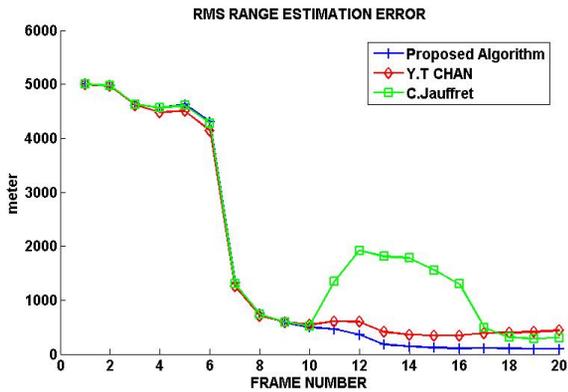


Fig. 4. 거리 추정 RMS 오차

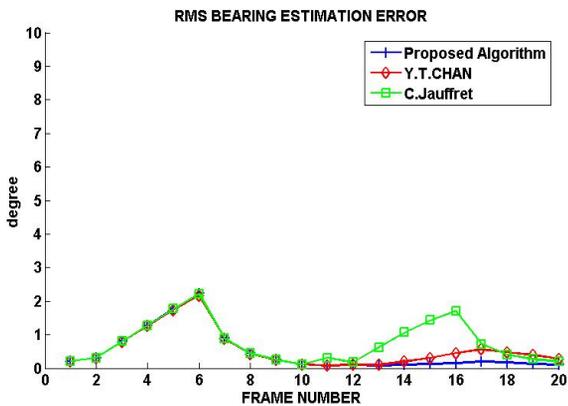


Fig. 5. 방위 추정 RMS 오차

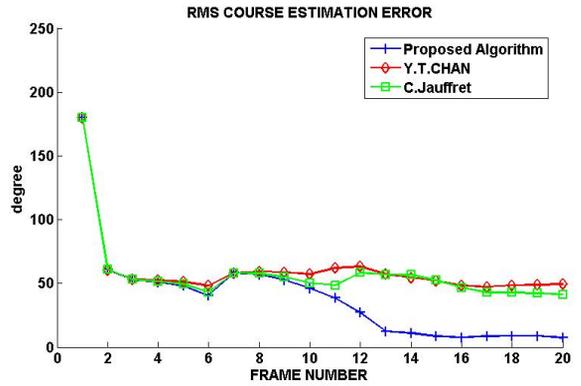


Fig. 6. 침로 추정 RMS 오차

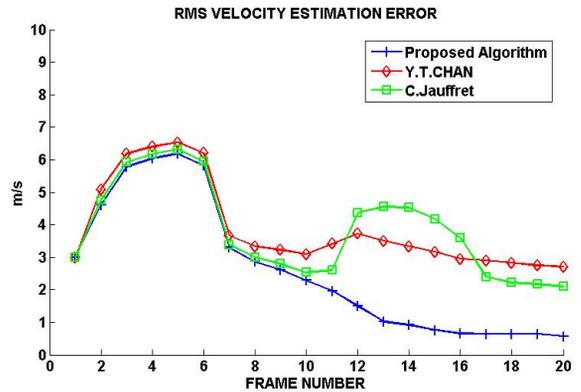


Fig. 7. 속도 추정 RMS 오차

Table 3. 모의 실험 결과 RMS 오차 비교

구분	거리 [m]	방위 [deg]	침로 [deg]	속도 [m/s]
제안한 알고리즘	102	0.07	7.3	0.5
Y. T. Chan 알고리즘	481	0.17	49.3	2.7
C. Jauffret 알고리즘	330	0.13	40.1	2.0

위의 결과에서 보는바와 같이 다중 주파수 측정치가 불연속적인 경우 제안한 TMA 기법이 기존의 융합 TMA 기법이나 고차원 벡터를 사용하는 TMA 기법 보다 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. 특히 고차원 벡터를 사용하면 주파수 측정치가 불연속적인 시점에 오차가 커지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 상태 벡터와 측정치 벡터의 차원이 변하므로 필터의 오차 공분산 등의 행렬이 초기화되기 때문이다.

5. 결론

본 논문에서는 수동 소나의 불연속적인 다중 주파수 측정치를 이용하여 필터 행렬의 차원 변화 없이 표적기동분석을 지속적으로 수행할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 기존의 알고리즘은 다중 주파수 측정치를 이용하기 위해 고차원 벡터를 이용하거나 주파수 융합기법을 사용하였다. 그러나 수동 소나에서는 주파수 측정치가 시간에 따라 나타났다가 사라졌다가 다시 나타나는 불연속적인 특성이 있기 때문에 기존의 알고리즘은 실제 수중 환경에 그대로 적용하기에는 문제점이 있었다. 특히 기존의 알고리즘은 주파수 측정치의 불연속 시점 마다 벡터차원을 변화시키거나 주파수 융합을 새로 수행하기 때문에 필터를 초기화하는 문제가 있어 주파수 측정치가 연속적인 경우보다 오차가 커지는 단점이 있다. 제안한 알고리즘은 새로운 주파수 융합 기법을 이용하기 때문에 주파수 측정치가 불연속적인 특성을 보이더라도 필터의 차원이 변한다거나 융합을 초기화하는 문제가 없어 recursive estimator나 batch estimator를 모두 이용해 견실한 TMA를 수행할 수 있다. 제안한 알고리즘과 기존의 알고리즘의 성능을 모의실험을 통해 비교하였고, 그 결과 주파수 측정치가 불연속적인 경우 제안한 알고리즘이 기존 알고리즘보다 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

따라서 잠수함이나 수상함 수동 소나 시스템에서 불연속적으로 획득되는 다중 주파수 측정치를 이용한 표적기동분석을 수행할 때 본 논문에서 제안한 주파수 융합 표적기동분석 기법을 사용한다면 단순한 시스템 구현이 가능해지고, 연산시간이 단축되며, 기존의 알고리즘보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Vincent J. Aidala, "Kalman Filter Behavior in Bearing-Only Tracking Applications", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. AES-15, No. 1, Jan. 1976.
- [2] K. Becker, "Three-Dimensional Target Motion Analysis using Angle and Frequency Measurements", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 41, No.1, Jan. 2005.
- [3] Klaus Becker, "A General Approach to TMA Observability from Angle and Frequency Measurements", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol., 32, No. 1, Jan., 1996.
- [4] C. Jauffret and Y. Bar-Shalom, "Track Formation With Bearing and Frequency Measurements in Clutter", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 26, No. 6, pp. 999~1010, Nov. 1990, pp. 458~462, Nov. 1988.
- [5] Van Cappel, D., "An Automatic Simultaneous Data Fusion and Tracking System for Passive Narrowband Sonar", pp. 328~332, UDT '96 2~4 July 1996.
- [6] J. M. Passerieux, D. Pillon, P. Blanc-Benon, C. Jauffret, "Target Motion Analysis with Bearing and Frequencies Measurements", in Proc. of the 22nd Asilomar Conference, Pacific Grove, CA, pp. 458~462, Nov. 1988.
- [7] J. M. Passerieux, D. Pillon, P. Blanc-Benon, C. Jauffret, "Target Motion Analysis with Bearing and Frequency Measurements via Instrumental Variables", in Proc. of IEEE ICASSP, Glasgow, pp. 2645~2648, May 1989.
- [8] P. Johannesson and N. Carlheim-Müller, A. Rosenqvist, and J. Holst, "On Kalman Filtering in Doppler-bearing Tracking", in Proc. 6th Conf. Undersea-Defence Technol., pp. 433~440, July 5~7, 1994.
- [9] P. Anders Rosenqvist, "Passive Doppler-Bearing Tracking Using a Pseudo-Linear Estimator", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 114~118, Apr. 1995.
- [10] Ulrich Steimel, "Some Advantages of Non-Recursive TMA Filters", RTO SET Symposium on Target Tracking and Sensor Data Fusion for Military Observation Systems, Hungary, 15~17 Oct., 2003.
- [11] Claude Jauffret, Pierre Blanc-Benon, Denis Pillon, "Multi Frequency And Bearing Target Motion Analysis : Properties and Sonar Applications", 2008 11th International Conference on Information Fusion, June 30~July 3, 2008.
- [12] 정명준, 이철목, 황수복, "다중 주파수선을 이용한 표적기동분석 알고리즘", 2009년 한국군사과학기술학회 종합학술대회 논문집, pp. 775~778,

- 2009.
- [13] S. Koteswara Rao, "Doppler-bearing Passive Target Tracking Using a Parameterized Unscented Kalman Filter", IEEE Journal of Research, Vol. 56, Issue 1, pp. 69~75, Jan~Feb. 2010.
- [14] Y. T. Chan, S. W. Rudnicki, "Bearing-Only and Doppler-Bearing Tracking Using Instrumental Variables", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 28, No, 4, pp. 1076~1082, Oct. 1992.
- [15] Yaakov Bar-Shalom, Xiao-Rong Li, "Multitarget - Multisensor Tracking : Principles and Techniques", YBS Publishing, 1995.
- [16] B. Ristic, S. Arulampalam, and N Gordon, "Beyond the Kalman Filter : Particle Filter for Tracking Applications", Artech House, 2004.