

# 확장칼만필터 주파수-진폭 추적기 설계

## Design of the Extended Kalman Filter for Frequency-amplitude Tracker

노 용 주\*, 윤 종 략\*, 전 재 진\*\*  
(Ro Yong-Ju\*, Yoon Jong-Rak\*, Jeon Jae-Jin\*\*)

\*부경대학교 정보통신공학과, \*\*국방과학연구소

(접수일자: 2001년 10월 11일; 수정일자: 2002년 1월 14일; 채택일자: 2002년 1월 23일)

본 연구에서는 백색 가우시안 잡음이 부가되는 환경 (AWGN)에서 측정 신호로부터 주파수와 진폭의 시간적 변동 특성을 추적하는 문제를 고려한다. 확장 칼만 필터는 여러 가지 응용분야에서 이용되고 있으며, 특히 시간적으로 변동하는 주파수를 추적하는 문제에도 응용되어 왔다. 기존의 확장 칼만 필터 주파수 추적기는 시간에 대한 신호 진폭의 변화폭이 적은 경우에 대해 유도되었거나 진폭의 시간적 변화폭이 큰 경우에는 부가적인 진폭 추적기가 요구된다. 본 연구에서는 시간에 따른 진폭의 변화폭이 상대적으로 큰 경우에 시변 주파수의 추적 성능을 높이기 위해 주파수와 진폭을 동시에 추적하는 확장 칼만 필터 주파수-진폭 추적기를 제안하고 수치모의 실험과 실제 실험을 통하여 그 성능을 확인한다.

**핵심용어:** 확장칼만필터, 주파수 측정, 진폭 추정, 주파수-진폭 추적기

**투고분야:** 음향 신호처리 분야 (1.4), 수중음향 분야 (5.4)

In this study, the tracking of the temporal variation of the frequency and the amplitude in the presence of additive white Gaussian noise is considered using the Extended Kalman filter (EKF). The EKF has many applications and it has been applied to the problem of tracking the time-variable frequency. However the existing EKF frequency trackers could not be driven in the small time-variable amplitude or required the additional amplitude tracker in the large time-variable amplitude. In this study, the EKF frequency-amplitude tracker, which could track both frequency and amplitude simultaneously from the measured signal in the relatively large time-variable amplitude environment, is proposed for improving the performance of the time-variable frequency tracking and its performance is verified by the simulation and the experimental work.

**Keywords:** Extended Kalman filter, EKF, Frequency estimate, Amplitude estimate, Frequency-amplitude tracker

**ASK subject classification:** Acoustic signal processing (1.4), Underwater acoustics (5.4)

## I. 서론

측정 신호로부터 시간적으로 변화하는 주파수 특성을 추적하는 문제는 여러 응용분야에서 요구되며 이것을 다루는 여러 가지 기법들이 연구되어 왔다[1-7]. 특히 확장

칼만 필터는 높은 시간 분해능이 요구되는 실시간 주파수 추적 분제에 많이 이용되고 있다. 1996년 Bitmead 등은 확장 칼만 필터 주파수 추적기를 유도·설계하였고, 설계된 추적기의 안정성 평가와 높은 부가 잡음 준위 환경에서의 성능 개선, 그리고 필터 입력 파라미터에 대한 연구가 진행되어 왔다[1-3]. 제안된 시간 영역 주파수 추적기[1]는 측정 신호 진폭의 시간에 대한 변화폭이 상대적으로 크면 주파수 추적 성능이 저하된다. 따라서 시간

책임저자: 윤종락 (jyoon@pknu.ac.kr)  
608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1  
부경대학교 정보통신공학과  
(전화: 051-620-6473; 팩스: 051-620-6470)

에 따른 진폭 변화폭이 큰 환경에서는 진폭의 시변 변화 특성을 추적·보상하면 주파수의 추적 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 일반적으로 이동 선박 방사소음의 진폭 변화폭은 20 dB 이상으로 높게 나타나므로, 주파수의 추적 성능을 보장하기 위하여 시변 진폭 정보가 요구된다. 이동 선박 방사소음으로부터 확장 칼만 필터를 이용한 불안정 주파수선 추적 기법이 Jauffret 등에 의해 제안되었으나 이 기법은 주파수선의 추적을 위해 확장 칼만 필터의 전처리 과정으로 신호 진폭의 시간적 변동을 추적하여야 하며 이를 위한 부가적인 알고리즘이 요구되고 주파수선의 추적 성능도 또한 신호 진폭 추정을 위한 전처리의 성능에 의존된다[4].

본 연구에서는 백색 잡음  $v(k)$ 가 부가된 측정 신호  $z(k) = s(k) + v(k)$ 로부터 주파수와 진폭이 시간에 따라 변화하는 신호  $s(k) = a(k) \cos[\omega(k)kT_s + \phi]$ 의 주파수  $f(k) = \omega(k)/2\pi$ 와 진폭  $a(k)$ 를 동시에 추적 가능한 확장 칼만 필터 주파수-진폭 추적기를 구성한다. 이때, 측정 신호의 주파수와 진폭은 서로 독립적으로 시간에 따라 변동하는 특성이며 주파수와 진폭은 시간에 대해 천천히 변한다고 가정한다. 제안하는 확장 칼만 필터 주파수-진폭 추적기는 부가적인 신호 진폭 추적기 없이 측정 신호로부터 주파수와 진폭의 시간적 변동 특성을 동시에 추적한다. 시간에 따른 진폭의 변화폭이 상대적으로 큰 경우 (평균진폭의 약 0.5배)에 대해 제안된 기법의 신호대잡음비에 따른 성능을 수치모의실험으로 분석하여 Bitmead 등이 제안한 방법과 그 성능을 비교하고, 또한 AWGN 환경에서 진폭과 주파수 추정의 CRB (Cramer-Rao Bound)를 계산하여 제안된 기법의 추정치와 비교하였다. 그리고 실제 선박 방사소음 측정신호로부터 관측되는 특정 토널의 주파수와 진폭의 시간 변동 특성 추적 결과를 제시한다.

## II. 추적기 설계

측정 신호로부터 주파수와 진폭의 시간적 변동 특성을 동시에 추적하기 위한 확장 칼만 필터 주파수-진폭 추적기를 설계한다. 주파수와 진폭이 시간에 따라 독립적으로 변화하는 이산 신호 모델과 측정신호 모델은 다음 식들로 정의된다.

$$s(k) = a(k) \cos[2\pi f(k)kT_s + \phi] \quad (1)$$

$$z(k) = s(k) + v(k) \quad (2)$$

여기서  $a(k)$ 는 진폭,  $f(k)$ 는 주파수,  $T_s$ 는 샘플링 주기,  $k$ 는 이산 시간,  $\phi$ 는 위상, 그리고  $v(k)$ 는 부가 백색잡음이다.

확장 칼만 필터 주파수-진폭 추적기를 구성하기 위하여 식 (1), (2)를 적절한 상태 변수로 대체하고 상태 변수와 측정 신호와의 관계를 정의하여 상태 방정식과 측정 방정식을 유도한다. 먼저 시스템의 상태 방정식은 4차 상태 벡터로 식 (1)의 이산 신호 모델로부터 아래와 같이 정의된다[1].

$$x(k+1) = f[x(k), k] + Gw(k), \quad w(k) \sim N(0, Q_k) \quad (3)$$

$$x(k) = [x_1(k), x_2(k), x_3(k), x_4(k)]^T \\ = [\cos(2\pi f(k)kT_s + \phi), \sin(2\pi f(k)kT_s + \phi), \\ T_s \omega(k), a(k)]^T \quad (4)$$

$$w(k) = [w_1(k), w_2(k), w_3(k), w_4(k)]^T \quad (5)$$

$$f[x(k), k] = \begin{bmatrix} \cos[x_3(k)]x_1(k) - \sin[x_3(k)]x_2(k) \\ \sin[x_3(k)]x_1(k) + \cos[x_3(k)]x_2(k) \\ (1 - \epsilon_f)x_3(k) \\ (1 - \epsilon_a)x_4(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Q(k) = E[w(k)w(k)^T] = \begin{bmatrix} \sigma_{w1}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{w2}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{w3}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{w4}^2 \end{bmatrix} \\ G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$GQ(k)G^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{w3}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{w4}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_a \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서  $w(k)$ 는 평균이 0이며 공분산 행렬이  $Q(k)$ 인 무상관 백색잡음 시계열이고 상태 벡터  $x(k)$ 의 성분들은 각각 동위상 신호  $[\cos(2\pi f(k)T_s, k)]$ , 직교 위상 신호  $[\sin(2\pi f(k)T_s, k)]$ , 정규화된 각주파수  $[2\pi T_s f(k)]$  및 진폭  $[a(k)]$ 를 나타낸다. 각 이산 시간에 대한 상태벡터  $x(k)$ 를 추정하여 시간에 따라 변동되는 주파수와 진폭을 동시에 추적한다. 식 (3), (6)에서 상태 공간 모델의 상태 천이 함수  $f[x(k), k]$ 는 비 선형 함수 특성이며,  $\epsilon_f$ 와  $\epsilon_a$ 는 안정화 파라미터로 신호 주파수와 진폭의 시간 변화폭에 관계되고,  $GQ(k)G^T$ 의 성분  $q_f$ 와  $q_a$ 는 각각 정

규화된 각주파수  $2\pi T_s f(k)$ 와 진폭  $a(k)$ 에 부가되는 백색 잡음  $w_3(k)$ 와  $w_4(k)$ 의 분산값  $\sigma_{w_3}^2$ 과  $\sigma_{w_4}^2$ 를 의미하며 신호의 주파수와 진폭의 시간 변화폭에 관계되는 파라미터이다.

식 (2)의 이산 측정 신호는 상태 벡터와의 관계에 의해 다음 식으로 표현된다.

$$z(k) = s(k) + v(k) = a(k) \cos(2\pi f(k) k T_s + \phi) + v(k) = h[x(k), k] + v(k), \quad v(k) \sim N(0, \sigma_v^2) \quad (9)$$

$$h[x(k), k] = a(k) \cos(2\pi f(k) k T_s + \phi) = x_4(k) x_1(k), \quad R(k) = E[v(k)v(k)^T] = \sigma_v^2 \quad (10)$$

여기서  $v(k)$ 는 평균이 0이고 분산이  $\sigma_v^2$ 인 무상관 백색잡음 시계열이고 상태 벡터와 측정 모델 사이의 관계함수  $h[x(k), k]$ 는 비 선형 함수이며 상태 벡터의 첫 번째 요소인 동위상 신호와 네 번째 요소인 진폭의 곱으로 정의된다.

식 (3)에서 (10)까지의 상태 벡터 방정식과 측정 방정식으로부터 확장 칼만 필터 주파수-진폭 추적을 구성한다. 구성된 추적기의 성능은 다섯 개의 입력 파라미터  $\{\epsilon_f, \epsilon_a, q_f, q_a, \sigma_v^2\}$ 에 의존되며 이러한 입력 파라미터들은 응용 분야의 통계적 특성에 의한 함수로 정의될 수 있다. 예를 들어 본 연구에서 대상으로 하는 선박 방사소음의 특정 토널의 불안정 주파수와 진폭의 추적이 있어서 파라미터  $q_f$ 와  $q_a$ 는 불안정 주파수 및 진폭 변화의 발생 원인이 되는 해상 상태, 초속기 및 음원 속도 등에 관계되며,  $\sigma_v^2$ 은 배경잡음 준위 등에 의해 결정된다.

확장 칼만 필터 주파수-진폭 추적기는 식 (11)부터 (18)까지의 과정이 재귀적으로 처리, 구현되는 것으로 식 (11)에서 식 (18)까지의 관계식으로 주파수와 진폭의 시간 변동 특성이 예측된다.

$$\hat{x}(k)^- = f[\hat{x}(k-1)^+, k-1] \quad (11)$$

$$\hat{x}(k) = h[\hat{x}(k)^-, k] \quad (12)$$

$$F(k-1) \approx \frac{\partial f[x(k), k]}{\partial x(k)} \Big|_{x(k) = \hat{x}(k-1)^+} \quad (13)$$

$$H(k) \approx \frac{\partial h[x(k), k]}{\partial x(k)} \Big|_{x(k) = \hat{x}(k)^-} \quad (13)$$

$$P(k)^- = F(k-1)P(k-1)^+ F(k-1)^T + GQ(k-1)G^T \quad (14)$$

$$K(k) = P(k)^- H(k)^T \{H(k)P(k)^- H(k)^T + R(k)\}^{-1} \quad (15)$$

$$\hat{x}(k)^+ = \hat{x}(k)^- + K(k)\{z(k) - \hat{x}(k)\} \quad (16)$$

$$\hat{f}(k) = \left[ 0 \quad 0 \quad \frac{1}{2\pi T_s} \quad 0 \right] \cdot \hat{x}(k)^+ \quad (17)$$

$$\hat{a}(k) = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \cdot \hat{x}(k)^+ \quad (17)$$

$$P(k)^+ = (I - K(k)H(k))P(k)^- \quad (18)$$

여기서 ‘^’ 표시는 추정치를 의미하며,  $F(k)[4 \times 4]$ 는 선형 상태 천이 행렬,  $H(k)[1 \times 4]$ 는 선형인 측정 신호와 상태 벡터 사이의 연결 행렬,  $K(k)[4 \times 1]$ 는 칼만 이득,  $P(k)[4 \times 4]$ 는 상태벡터의 추정치에 대한 오류 공분산 행렬이다. 또한 윗첨자 ‘-’는 선 (priori) 추정치, ‘+’는 후 (posterior) 추정치를 나타낸다. 확장 칼만 필터의 상태 벡터의 초기값  $\hat{x}(0)^+ = E[x(0)]$ 와 상태 벡터의 추정치에 대한 오류 공분산 행렬의 초기값  $P(0)^+ = E[(x(0) - \hat{x}(0)^+)(x(0) - \hat{x}(0)^+)^T]$ 는 각 응용 분야에서 측정 신호의 주파수와 진폭의 시간적 변화량에 대한 통계적인 특성으로부터 결정되어질 수 있다.

### III. 주파수와 진폭의 시간 변동 특성 추적

#### 3.1. 수치모의 실험

수치모의 실험은 주파수 변조되고 동시에 진폭 변조된 신호에 대해서 도플러효과가 부가된 측정신호로부터 주파수와 진폭의 시간적 변동 특성을 추적하고 신호대잡음비에 따른 주파수-진폭 추적기 성능을 분석하였으며, Bitmead 등에 의해 제안된 방법과 주파수 추적 결과를 비교하였다. 또한 CRIB를 계산하여 제안한 추적기의 추정치와 비교·분석하였다. 샘플링 주파수는 1 kHz, 정현파 음원주파수는 60 Hz, 음원의 이동속도는 5 knot, CPA (Closest Point of Approach)는 4미터로 하여 CPA 통과 후 4초 동안의 모의신호를 사용하였으며 신호대잡음비는 약 20 dB로 하였다. 이때 도플러효과에 의한 최대 주파수 편이( $\Delta f_{max}$ )는 약 0.2 Hz이며 이것으로부터 시변 주파수 변화량의 분산값에 비례하는 필터 입력 파라미터  $q_f \propto (\pi \Delta f_{max} / F_s)^2 / 2$  [ $\approx$  근사적인 주파수 변화량의 분산]는 대략  $5.2 \times 10^{-9}$ 으로 하였고 음원과 측정 센서간의 거리변화에 따른 최대 진폭 편이( $\Delta A_{max}$ )는 대략 0.64 정도로 높은 시간 변화폭으로 설정하였으며 시변 진폭 변화량의 분산값에 비례하는 필터 입력 파라미터  $q_a \propto (\Delta A_{max} / 2)^2 / 2$  [ $\approx$  근사적인 진폭 변화량의 분산]는 대략  $5.1 \times 10^{-4}$ , 파라미터  $R \propto 1/10^{SNR/10}$ 은 0.01로 두고 수치모의 실험을 수

행하였다.

주파수-진폭 추적기의 성능을 표시하기 위한 지수로 식 (19)에 보이는 바와 같이 정규화 역 오류 공분산 (Normalized inverse error covariance)  $\xi^{-1}$ 을 정의하고, 추적 오류의 공분산을 실제 주파수와 진폭의 분산으로 정규화한다.

$$\xi_f^{-1} = \frac{E[(f(k) - \mu_f)^2]}{E[(\hat{f}(k) - f(k))^2]}$$

$$\xi_a^{-1} = \frac{E[(a(k) - \mu_a)^2]}{E[(\hat{a}(k) - a(k))^2]} \quad (19)$$

여기서  $f(k)$ 와  $a(k)$ 는 실제 주파수와 진폭이고  $\hat{f}(k)$ 와  $\hat{a}(k)$ 는 추적된 주파수와 진폭이며  $\mu_x$ 는 첨자  $x$ 의 평균값이다.

측정신호  $z(k) = a(k)\cos(2\pi f k T_s + \phi) + v(k)$ 로부터 진폭의 평균값과 위상과 주파수의 추정치에 대한 CRB는 아래 식과 같은 범위로 계산되어진다[9].

$$\frac{2\sigma_v^2}{N} \leq CRB(\hat{\mu}_a) \leq \frac{2(\sigma_a^2 + \sigma_v^2)}{N} \quad (20)$$

$$\frac{4}{NR} \leq CRB(\hat{\phi}) \leq \frac{4}{NR} \quad (21)$$

$$\frac{12}{(2\pi T)^2 N^3 R} \leq CRB(\hat{f}) \leq \frac{12}{(2\pi T)^2 N^3 R} \quad (22)$$

$$R \approx \frac{\mu_a^2}{2\sigma_v^2} + \frac{\sigma_a^4}{4\sigma_v^4}, \quad \hat{R} \approx \frac{\mu_a^2}{2(\sigma_a^2 + \sigma_v^2)} + \frac{\sigma_a^4}{4(\sigma_a^2 + \sigma_v^2)^2} \quad (23)$$

여기서  $\mu_a$ ,  $\sigma_a^2$ 는 진폭의 평균과 분산이고,  $\sigma_v^2$ 는 부가

잡음의 분산이며,  $N$ 은 총 데이터 개수이다. 또한 CRB의 하한은 신호대잡음비 ( $= \sigma_a^2/\sigma_v^2 \ll 1$ )인 경우이고 상한은 임의의 신호대잡음비에 대한 결과이다. 식 (20)-(22)를 이용하여 CRB를 계산하고 제안한 진폭-주파수 추적기의 추정치와 비교하였다.

그림 1과 2는 주파수와 진폭에 대한 추적 결과이다. 그림 1에서 회색 실선은 실제 주파수의 변화 성분이고 검은 실선은 추적된 결과이고 점선은 60 Hz 정현파 이동 음원의 도플러 주파수 편이다. 전체적인 주파수의 시간적 변동 특성을 확인할 수 있는 결과를 보인다. 진폭 변조는 주파수의 시간적 변화와 독립적이므로 진폭 변조가 되더라도 주파수의 추적에는 영향을 끼치지 않는다. 그림 2에서 회색 실선은 실제 진폭의 변화 성분이고 검은 실선은 추적된 결과이고 점선은 60 Hz 정현파 이동 음원과 측정 센서간의 거리 변화에 따른 진폭 편이다. 진폭의 변화 특성을 잘 추적하고 있다. 제안된 주파수-진폭 추적기의 진폭의 시간 변동 추적 성능이 주파수 추적 성능보다 우수한 것으로 확인된다. 그림 3은 Bitmead 등이 제안한 기법으로 동일한 조건에서 주파수를 추적한 결과를 보인다. 회색 실선은 실제 주파수의 변화 성분, 검은 실선은 추적 결과이고 점선은 도플러 주파수 편이다. 그림 1과 비교하면 그 성능이 저하됨을 확인할 수 있으며, 이것은 시간에 따른 진폭의 변화 특성 때문인 것으로 판단된다.

그림 4는 주파수와 진폭의 시간적 변동 특성에 대한 본 논문에서 제안하는 주파수-진폭 추적기와 Bitmead 등이 제안한 주파수 추적기의 신호대잡음비에 따른 정규화 역 오류 공분산 ( $\xi^{-1}$ )을 보여준다. 정규화 역 오류 공분산  $\xi^{-1}$ 은 50회의 수치모의실험을 수행하여 계산하였다. 그림에서 가장 위에 있는 선 (---)과 두 번째 있는 선

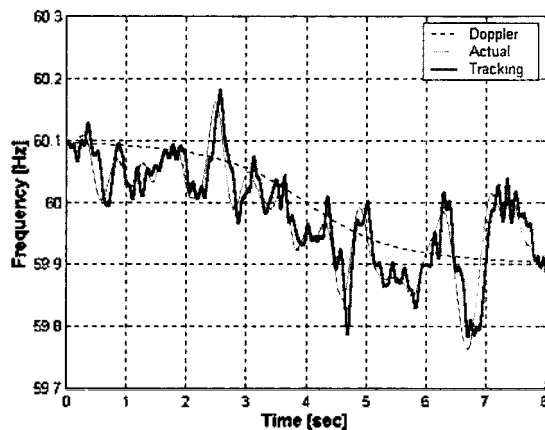


그림 1. 주파수-진폭 변조된 이동 음원의 주파수 추적 결과  
Fig. 1. Frequency tracking result for moving FM-AM source.

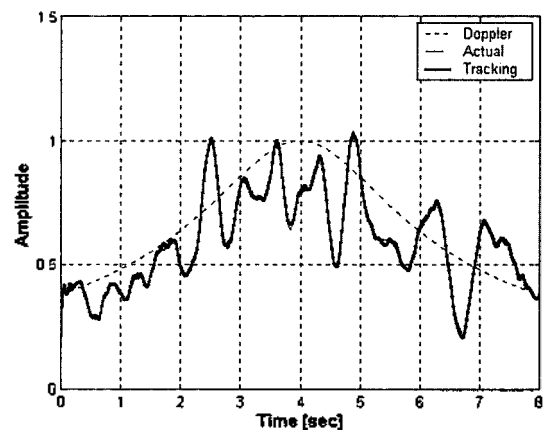


그림 2. 주파수-진폭 변조된 이동 음원의 진폭 추적 결과  
Fig. 2. Amplitude tracking result for moving FM-AM source.

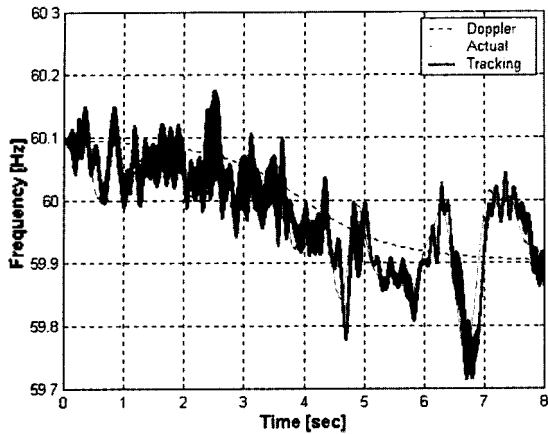


그림 3. Bitmead 등이 제안한 기법을 이용한 이동 음원의 주파수 추적 결과  
 Fig. 3. Frequency tracking result using the proposed method from Bitmead etc.

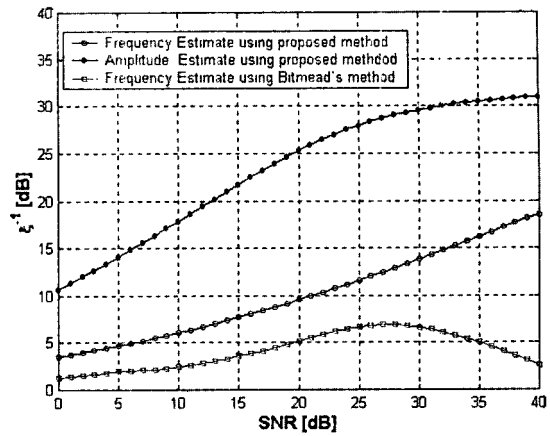


그림 4. 주파수-진폭 변조된 이동 음원의 주파수-진폭 추적의 정규화 역 오류 공분산  
 Fig. 4. Normalized inverse error covariance of frequency-amplitude tracking for moving FM-AM source.

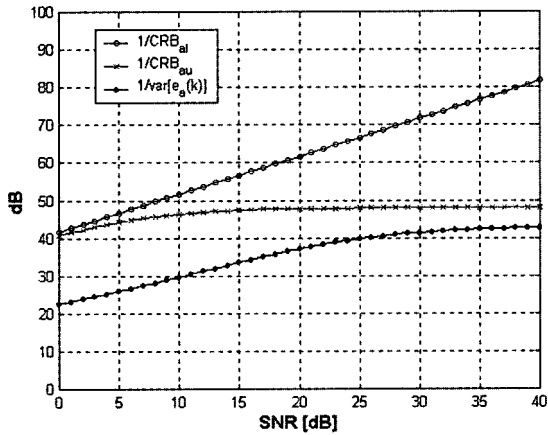


그림 5. 진폭 추적의 CRB와 역 오류 분산  
 Fig. 5. CRB and inverse error variance of amplitude tracking.

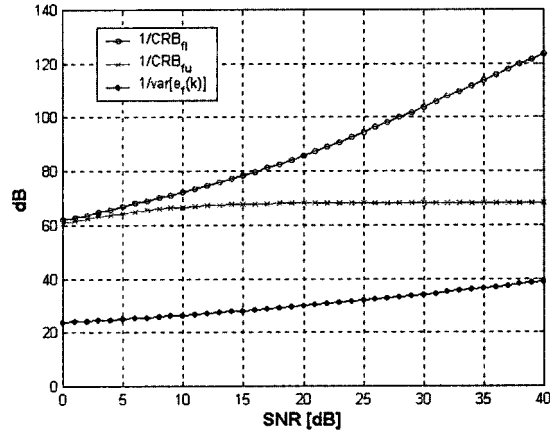


그림 6. 주파수 추적의 CRB와 역 오류 분산  
 Fig. 6. CRB and inverse error variance of frequency tracking.

(⊖)은 본 연구에서 제안한 방법으로 추적한 진폭과 주파수 추적 결과이고 세 번째 있는 선 (⊗)은 Bitmead 등이 제안한 기법으로 추적한 주파수 추적 결과이다. 신호대잡음비가 높으면  $\xi^{-1}$ 은 높게 나타나는 비례관계를 보인다. 신호대잡음비가 0 dB이면 제안된 기법의 주파수 추적에 대한  $\xi^{-1}$ 은 약 3 dB, 진폭에 대하여는 10 dB이며, Bitmead 등이 제안한 기법의 주파수 추적에 대한  $\xi^{-1}$ 은 약 1 dB 정도로 나타났다. 본 연구에서 제안한 주파수-진폭 추적기의  $\xi^{-1}$ 은 Bitmead 등이 제안한 주파수 추적기의  $\xi^{-1}$ 보다 5 dB의 신호대잡음비에서 약 3 dB, 20 dB의 신호대잡음비에서는 약 5 dB 정도로 높게 계산된다. 따라서 신호 진폭의 시간 변화폭이 큰 경우에 제안한 주파수-진폭 추적기가 Bitmead 등이 제안한 주파수 추적기보다 우수한 주파수 추적 성능을 나타낸다.

그림 5와 6은 제안한 주파수-진폭 추적기의 역 오류

분산  $1/var[e(k)]$ 과 식 (20)-(22)에 의해 계산된 CRB를 비교한 결과를 보인다. 여기서 CRB는 상한과 하한의 역수를 취해 dB로 나타낸다. 그림에서 가장 위에 있는 선 (⊖)은 CRB 하한의 역수이고 중간에 있는 선 (⊗)은 CRB 상한의 역수이며, 가장 아래 있는 선 (⊖)은 역 오류 분산을 나타낸다. 그림 5에서 보이는 바와 같이 진폭 추정의 역 오류 분산  $1/var[e_a(k)] (= 1/var[a(k) - \hat{a}(k)])$ 는 신호대잡음비가 증가할수록 진폭 추정의 CRB 상한의 역수에 근접하는 특성을 보인다. 그림 6의 제안된 방법으로 구한 주파수 추정의 역 오류 분산  $1/var[e_f(k)] (= 1/var[f(k) - \hat{f}(k)])$ 도 신호대잡음비가 증가할수록 주파수 추정의 CRB 상한의 역수로 근접하는 경향을 보이지만 20 dB 이상으로 낮게 계산된다. 이것은 식 (22)으로 계산된 주파수 추정의 CRB는 시불변 주파수의 추정에 대한 것이기 때문에 본 연구에서 대상으로 하는 시변 주파

수의 추정에 대한 CRB 상한의 역수는 더 낮게 계산될 것으로 사료된다.

### 3.2. 실제 데이터 분석 결과

실제 해양에서 측정된 선박 방사소음 자료로부터 특정 토널을 취하고 주파수와 진폭의 시간 변동 특성을 추적하였다. 분석에 사용된 신호는 300톤급의 선박이 11.7 knot의 속도로 CPA 거리 306미터로 깊이 30미터의 수신기를 통과할 때 측정된 것이다. 최초 샘플링 주파수는 100 kHz이며 계산 시간을 줄이기 위해 저역필터를 통과한 신호를 1 kHz로 다시 샘플링하여 사용하였다. 주파수와 진폭의 추적에 사용된 신호는 주파수가 대략 114 Hz인 토널 신호이며 선박 방사 소음의 측정 환경은 그림 7과 같다. 이때 이론적인 최대 도플러 주파수 편이는 대략 0.457 Hz로 계산되며 3.1절의 수치모의실험을 기초로 하여 파라미터  $q_n$ 는 대략  $2.5816 \times 10^{-3}$ 으로 지정하였고 진폭의 최대 편이가 대략 1.5인 것으로부터 파라미터  $q_a$ 는  $1.13 \times 10^{-3}$ 으로 설정하였다. 또한 일반적으로 선박 방사소음은 신호 대잡음비가 10 dB이상으로 하여 측정되므로 파라미터 R의 값은 0.1로 하여 분석을 하였다.

그림 8은 대략적인 CPA 통과 시점을 기준으로  $\pm 50$ 초 시간에 대한 측정 신호에 대한 스펙트로그램 결과를 보인다. 사용된 분석 구간의 길이는 4096 샘플이고 중폭영역은 2048 샘플로 주파수의 분해능은 대략 0.25 Hz이며, 시간 분해능은 약 2초로 설정되었다. 스펙트로그램의 주파수 추적결과에서 보는 바와 같이 자세한 주파수의 시간적 변동 특성을 확인하기는 어렵고 대략적인 윤곽 정도만을 확인할 수 있는 정도이다. 대략 50초 부근으로 음원이

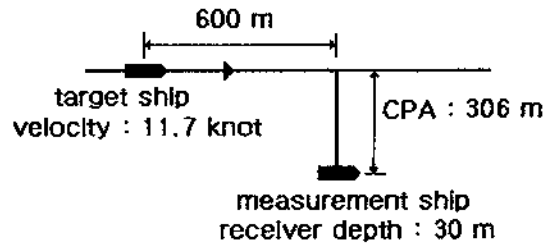


그림 7. 측정 환경  
Fig. 7. Configuration of the measurement.

CPA를 통과하는 시점이 예측 가능하다. 그림 9는 제안된 이산 확장 칼만 필터 주파수-진폭 추적기의 주파수 추적 결과이다. 스펙트로그램의 결과와 비교할 때 전체적인 경향은 스펙트로그램의 결과와 비슷하지만, 주파수 및 시간 분해능이 향상된 결과를 얻을 수 있다. 이 결과로부터 음원이 CPA를 통과하는 시점은 약 50초 부근으로 예측 가능하다.

그림 10은 제안된 방법으로 추적된 진폭의 변동 특성이다. 그림에서 회색선은 대역필터된 신호의 시간 파형이며, 검은 실선은 진폭의 추적 값이다. 그림 10(a)는 전체 100초에 대한 추적결과를 보이고 (b)는 최초 10초까지의 데이터에 대한 추적결과이다. (a) 그림에서 대략 50초 부근에서 높은 에너지를 갖는 것으로 이때가 음원이 CPA를 통과하는 시점으로 예측될 수 있다. 확대된 그림(b)에서는 대역 필터된 신호의 진폭을 잘 추적하고 있음을 확인할 수 있다.

제안된 기법은 진폭의 시간적 변동이 큰 경우에 측정 신호로부터 주파수와 진폭의 시간적 변동 특성을 동시에 추적 가능하다. 이동 음원으로부터 측정된 신호에서 특

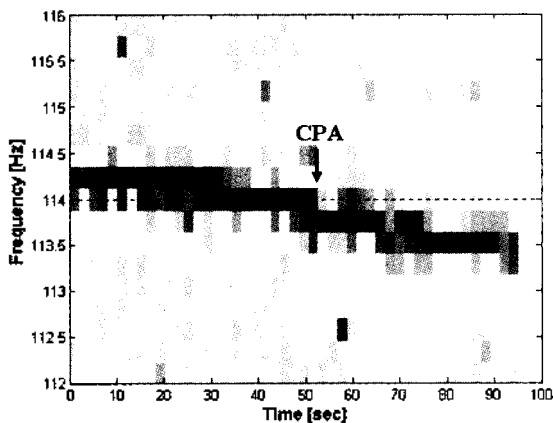


그림 8. 수중 방사소음의 스펙트로그램  
Fig. 8. Spectrogram of the radiated ship noise.

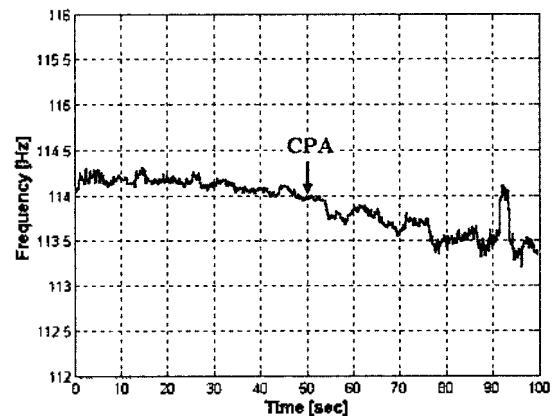
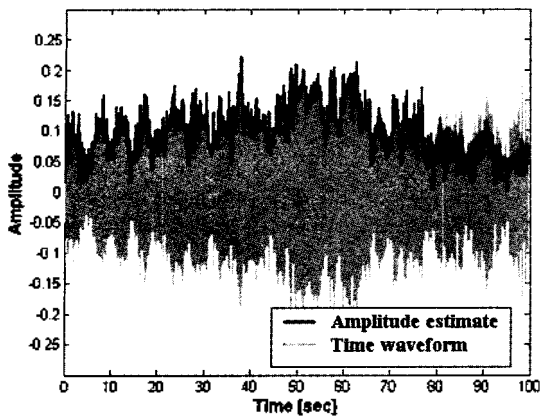
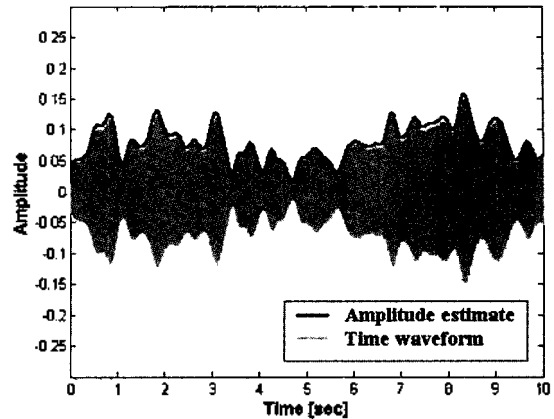


그림 9. 수중 방사소음의 주파수 추적 결과  
Fig. 9. Frequency tracking result for the actual radiated ship noise.



(a) 전체 진폭 추정 결과  
(a) Total amplitude tracking result



(b) 일부분 진폭 추정 결과  
(b) Truncated amplitude tracking result

그림 10. 수중 방사소음의 진폭 추정 결과  
Fig. 10. Amplitude tracking result for the actual ship radiated noise.

정 토널의 주파수와 진폭의 시간 변동 특성을 추적하여 이동 음원의 CPA를 통과하는 시점, 즉 CPA를 예측하는 문제에 응용 가능할 것으로 판단된다. 일반적으로 선박의 방사소음은 여러 개의 토널로 측정된다. 만약 선박의 각 부분에서 다른 토널들이 발생될 때 각 토널의 주파수와 진폭의 변동 특성을 분석하여 어떤 기준 토널의 위치에 대한 상대적인 발생 위치를 탐지할 수 있을 것으로 기대된다.

#### IV. 결론

본 연구는 백색 가우신안 잡음이 부가되는 환경 (AWGN)에서 측정 신호로부터 특정 주파수와 진폭의 시간적 변동 특성을 추적하기 위한 확장 칼만 필터 주파수-진폭 추적기를 제안하였다. 제안한 방법이 시간에 따라 진폭의 변동이 큰 환경에서 측정신호로부터 시간에 따라 변동되어 나타나는 주파수와 진폭의 특성을 추적하는데 효과적임을 수치모의 실험과 실제 선박 방사소음 측정 자료로부터 확인하였다.

추적기의 성능은 신호대잡음비에 비례하며, 입력 파라미터의 선택에 의존한다. 선박 방사소음에 적용되는 주파수-진폭 추적기의 입력 파라미터들은 해상상태와 음원의 속도 그리고 배경 잡음 준위 등의 통제적 특성의 함수로 결정될 수 있다.

제안된 방법은 수중 선박방사소음의 불안정 주파수 추적이나 음성의 시변 피치 포락선 검출, 파워 시스템의 전원 주파수 분석 등에 이용될 수 있을 것이다. 또한 이동음

원으로부터 측정된 특정 주파수의 도플러 주파수 천이를 추적하여 CPA를 예측하여 선박과 같은 여러 토널 신호를 발생하는 음원에서 발생 음원의 상대적인 위치를 탐지하는 문제나 배열 신호처리에서 도플러의 주파수 천이를 보상하는데 이용가능할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 2001년도 수중음향 특화센터 43과제 지원에 의하여 수행되었음.

#### 참고 문헌

1. B. F. La Scala and R. R. Bitmead, "Design of an extended Kalman filter frequency tracker," *IEEE Trans. on Signal Processing*, **44** (3), 739-742, 1996.
2. B. F. La Scala, R. R. Bitmead, and B. G. Quim, "An extended Kalman filter frequency tracker for high-noise environments," *IEEE Trans. on Signal Processing*, **44** (2), 431-434, 1996.
3. S. Bittanti and S. M. Savaresi, "On the parameterization and design of an extended Kalman filter frequency tracker," *IEEE Trans. on Automatic Control*, **45** (9), 1718-1724, 2000.
4. D. Morel and C. Jauffret, "Unstable spectral line tracking from time samples," *UDT 95 Proceedings*, 330-333, 1995.
5. J. R. Yoon and Y. J. Ro, "Effective detection method of unstable acoustic signature generated from ship radiated noise," *Journal of the Acoustical Society of Korea*, **20** (1E), 25-30, 2001.
6. P. Tichavsky and A. Nehorai, "Comparative study of four adaptive frequency trackers," *IEEE Trans. on Signal Processing*, **45** (6), 1473-1484, 1997.

7. S. R. Dooley and A. K. Nandi, "Fast frequency estimation and tracking using Lagrange interpolation," *Electronics Letters*, 34 (20), 1908-1910, 1998.
8. M. S. Grewal and A. P. Andrews, *Kalman Filtering—Theory and Practice Using MATLAB*, John Wiley & Sons., Chap. 5, 169-200, 2001.
9. G. Zhou and G. B. Giannakis, "Harmonics in Gaussian multiplicative and additive noise: Cramér-Rao bounds," *IEEE Trans. on Signal Processing*, 43 (5), 1217-1231, 1995.

---

## 저자 약력

---

● 노 용 주 (Ro Yong-Ju)



1997년 2월: 부경대학교 정보통신공학과 공학사  
 1999년 2월: 부경대학교 대학원 정보통신공학과 공학석사  
 2001년 2월: 부경대학교 대학원 정보통신공학과 박사과정 수료  
 ※ 주관심분야: 디지털신호처리, 수중음향신호처리, 표적 위치 탐지 등

● 윤 종 략 (Yoon Jong-Rak)

한국음향학회지 제18권 제6호 참조  
 현재: 부경대학교 정보통신공학과 교수

● 전 재 진 (Jeon Jae-Jin)

한국음향학회지 제16권 제2호 참조  
 현재: 국방과학연구소 책임연구원