

확장 칼만필터를 이용한 수중 표적의 불안정 주파수선 추출 기법

The extraction method of unstable frequency line generated by underwater target using extended Kalman filter

이 성 은*, 황 수 복*, 남 기 곤**, 김 재 창**

(Sung-Eun Lee*, Soo-Bok Hwang*, Ki-Gon Nam**, Jae-Chang Kim**)

요 약

수동 소나 시스템에서는 표적을 탐지, 추적 및 식별을 위하여 표적의 방사 소음으로부터 발생하는 주파수선을 주요 특징 인자로 활용한다. 이 연구에서는 수중 표적의 방사 소음으로부터 시간 영역의 표본화된 데이터를 이용한 불안정 주파수선의 추출 기법에 대하여 연구하였다. 불안정 주파수선은 시간에 따라 주파수선이 변화되어 나타나므로 불안정 주파수선 추출을 위하여 비선형 시스템에 유용한 확장 칼만 필터 알고리즘을 적용하였다. 모의 실험 및 표적 신호에 적용하여 제시한 방식이 불안정 주파수선을 추출할 수 있음을 보인다.

ABSTRACT

In passive sonar system, frequency lines generated by underwater target are very important for detection, tracking and classification. In this paper, the extraction method of unstable frequency line from the time samples of the radiated noise of underwater target is studied. As unstable frequency line is time varying, an extended Kalman filter algorithm which is desirable for nonlinear system is applied to extract unstable frequency line. The proposed method shows good extraction of unstable frequency line by application of simulated signal and real target.

I. 서 론

수중에는 어선, 상선 및 함정 등과 같은 여러 표적들에 의하여 발생된 소음이 복합적으로 존재할 수 있으므로 이들 표적의 고유한 신호 특징을 추출, 분류하여 표적을 식별하면 오식별율이 훨씬 줄어들 수 있다¹⁻³.

수동 소나 시스템에서는 표적을 탐지, 추적 및 식별을 위하여 표적의 방사 소음으로부터 발생하는 주파수선을 주요 특징 인자로 활용한다. 주파수선은 안정 및 불안정 주파수선으로 구분되며⁴, 안정 주파수선은 주파수값이 시간에 따라 변화되지 않고 매 프레임 일정한 주파수값을 나타내며, 주로 어선이나 상선 그리고 함정등의 주요 신호 특징 인자이다. 불안정 주파수선은 주파수값이 시간에 따라 변화되어 다르게 나타나며, 주로 소형이면서 고속으로 움직이는 표적들의 주요 신호 특징 인자로 알려져 있다⁵. 그러나 수중 표적의 안정 주파수선을 추출하기 위하여 사용되고 있는 일반적인 FFT 처리에 의한

신호처리 방식으로는 FFT 처리를 수행하는 일정 시간 구간 동안에는 신호의 특성이 변화하지 않는 것으로 가정하기 때문에 불안정 주파수선을 정상적으로 추출할 수가 없다⁶.

표적의 주파수선을 추적하기 위한 주파수선 추적 기법에는 HMM (hidden Markov model) 기법⁶과 칼만 필터 기법⁷ 등이 있다. HMM 기법은 음성 신호처리 분야에 많이 이용되며, 계산 시간이 오래 걸리는 단점 때문에 수중 표적과 같은 표적의 주파수선을 추적하는 데는 적합하지 않다. 칼만 필터 기법은 계산 시간이 짧고 추적 성능이 비교적 우수하기 때문에 수중 표적의 주파수선을 추적하는 데 적합하나, 선형 특성을 가지므로 시간에 따라 주파수값이 변화하는 비선형 특성의 불안정 주파수선 추적에는 부적합하다. 칼만 필터 기법은 주로 주파수 영역 상에서 수중 표적의 안정 주파수선 추적에 이용되고 있다.

이 연구에서는 방사 소음의 표본화된 시간 데이터로부터 확장 칼만 필터를 이용하여 시간에 따라 주파수가 변화하는 불안정 주파수선 추출 방식을 제시하고자 한다. 그리고 모의 실험 및 실제 표적 신호에 적용하여 제시한 방식이 불안정 주파수선을 정상적으로 추출할 수 있음을 보인다.

*국방과학연구소

**부산대학교 전자공학과

접수일자: 1996년 10월 30일

II. 확장 칼만필터를 이용한 주파수선 추출

2.1 확장 칼만 필터 알고리즘

방사 소음의 불안정 주파수선은 시간에 따라 주파수선 키 변화되어 나타나는 비선형 특성을 가지므로, 불안정 주파수선이 시간에 따라 지수함수적으로 관련되어 나타나는 랜덤 프로세스 $x(t)$ 로 가정할 수가 있다^{8,9)}.

따라서 시간에 따라 지수함수적으로 감소하면서 변화되어 나타나는 랜덤 프로세스 $x(t)$ 의 자기상관관계(auto-correlation) $R_{xx}(\tau)$ 는 다음과 같다.

$$R_{xx}(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}, \alpha > 0 \tag{1}$$

여기에서 $1/\alpha$ 는 랜덤 프로세스의 상관관계 시간이다. 식 (1)의 전력 스펙트럼 밀도는

$$\phi_x(\omega) = \frac{2\alpha}{\omega^2 + \alpha^2} \tag{2}$$

로 표현된다. 이러한 랜덤 프로세스 $x(t)$ 는 평균이 영이고, 전력 스펙트럼 밀도 $\phi_w(\omega) = 1$ 인 백색 가우시안 잡음 $w(t)$ 가 입력된 선형 시스템의 출력으로 모델링할 수 있다. 이와 같은 선형 시스템의 전력 스펙트럼 밀도는

$$\phi_y(\omega) = |H(j\omega)|^2 \phi_w(\omega) \tag{3}$$

로 주어진다. 따라서 모델링된 시스템의 전달함수 $H(j\omega)$ 는 식 (4)와 같이 유도할 수 있다.

$$H(j\omega)H(-j\omega) = \frac{\sqrt{2\alpha}}{\alpha + j\omega} \cdot \frac{\sqrt{2\alpha}}{\alpha - j\omega} \tag{4}$$

그리고 식 (4)의 전달 함수의 안정 부분만을 선택하면

$$H(s) = \frac{X(s)}{W(s)} = \frac{\sqrt{2\alpha}}{s + \alpha} \tag{5}$$

이 된다. 따라서 식 (5)의 양변에 역 라플라스 변환을 취하면 시스템의 상태 방정식은 식 (6)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= dx_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= -\alpha x_2(t) + \sqrt{2\alpha} w(t) \end{aligned} \tag{6}$$

여기에서 상태 변수 $x_1(t)$ 는 순시 주파수이고, $x_2(t)$ 는 주파수 변화율, d 는 주파수 편차, $w(t)$ 는 시스템 모델 오차이다. 식 (6)을 1차 선형 미분 방정식으로 표현하면 식 (7)과 같다.

$$\dot{X}(t) = AX X(t) + BW w(t) \tag{7}$$

여기에서 A 와 B 는 식 (8)과 같이 정의되며, \bullet 는 1차 미분을 나타낸다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & d \\ 0 & -\alpha \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{2\alpha} \end{bmatrix} \tag{8}$$

시스템에 대한 측정 방정식은

$$z(t) = a(t) \cos(2\pi f_0 t + x_1(t)) + v(t) \tag{9}$$

로 표현할 수 있다. 여기서 $a(t)$ 는 진폭, f_0 는 반송파 주파수, $x_1(t)$ 는 순시 주파수, $v(t)$ 는 측정 잡음이다.

식 (6)-(9)의 선형 상태 방정식으로 부터 시스템 모델의 이산(discrete) 상태 방정식을 구하면 식 (10)과 같이 표시 된다^{10, 11)}.

$$\begin{aligned} X(k) &= \phi(k, k-1)X(k-1) + w(k) \\ z(k) &= HX(k) + v(k) \end{aligned} \tag{10}$$

여기에서 $X(k)$ 는 $x_1(k)$ 와 $x_2(k)$ 로 구성되는 상태 벡터이고, $\phi(k, k-1)$ 는 상태 천이 행렬, 그리고 k 는 이산 시간 t_k 를 나타낸다. $z(k)$ 는 측정 벡터로서 식 (11)과 같이 표현되며, H 는 측정 행렬로서 비선형이므로 선형 근사화시켜야 한다.

$$\begin{aligned} z(k) &= h(x(k), k) + v(k) \\ &= a_k \cos(2\pi f_0 t_k + x_1(k)) + v(k) \end{aligned} \tag{11}$$

그리고 $w(k)$ 와 $v(k)$ 는 평균이 영이고 분산 행렬이 각각 $Q(k) = E[w(k)w(k)^T]$, $R(k) = E[v(k)v(k)^T]$ 이며, 정규분포를 가진다.

$\phi(k, k-1)$ 은 식 (6), (7)로부터 다음과 같이 선형적으로 계산되며, L^{-1} 은 역 라플라스 변환이고, I 는 단위 행렬이다.

$$\begin{aligned} \phi(k, k-1) &= L^{-1} \{ (sI - A)^{-1} \} \\ &= \begin{bmatrix} \phi_{11}(k, k-1) & \phi_{12}(k, k-1) \\ \phi_{21}(k, k-1) & \phi_{22}(k, k-1) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{12}$$

식 (12)에서

$$\begin{aligned} \phi_{11}(k, k-1) &= 1 \\ \phi_{12}(k, k-1) &= \beta(1 - \exp(-2\pi/r(k))) \\ \phi_{21}(k, k-1) &= 0 \\ \phi_{22}(k, k-1) &= \exp(-2\pi/r(k)) \end{aligned} \tag{13}$$

이며, $\beta = d/\alpha$, $r(k) = 2\pi/\alpha(k - (k-1))$ 이다. 그리고 식 (8), (12)로부터 $w(k)$ 의 분산 행렬 $Q(k)$ 는

$$\begin{aligned} Q(k) &= \begin{bmatrix} Q_{11}(k) & Q_{12}(k) \\ Q_{21}(k) & Q_{22}(k) \end{bmatrix} \\ &= \int_{t_{k-1}}^{t_k} \phi(t_k, \tau) BB^T \phi^T(t_k, \tau) d\tau \end{aligned} \tag{14}$$

로 정의되며, 식 (15)와 같이 계산된다. 여기에서 위첨자

T 는 선지 행렬을 나타낸다.

$$\begin{aligned} Q_{11}(k) &= \beta^2 \{ 4\pi/r(k) + 4 \exp(-2\pi/r(k)) \\ &\quad - 3 - \exp(-4\pi/r(k)) \} \\ Q_{12}(k) &= \beta \{ 1 - \exp(-2\pi/r(k)) \}^2 \\ Q_{21}(k) &= Q_{12}(k) \\ Q_{22}(k) &= 1 - \exp(-4\pi/r(k)) \end{aligned} \quad (15)$$

식 (9)-(11)로부터 측정 행렬 H 는 비선형이므로 $Z(k)$ 를 선형 근사화시키기 위하여 이 논문에서는 Taylor 급수 전개로 1차 미분항까지 적용하였으며, 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned} H &\approx \left. \frac{\partial h(x, k)}{\partial x} \right|_{x=x_1(k)} \\ &= [-a_k \sin(2\pi f_0 t_k + x_1(k)) \ 0] \end{aligned} \quad (16)$$

이상으로부터 확장 칼만 필터 알고리즘의 상태 벡터에 대한 예측치 추정 $\hat{x}(k)$, 측정치 추정 $\hat{z}(k)$ 및 공분산 행렬 $P(k)$ 은 다음과 같으며, 여기에서 $f = \phi(k, k-1)$ 이다.

$$\hat{X}(k) = FX(k-1) \quad (17)$$

$$\hat{z}(k) = H X(k) \quad (18)$$

$$P(k) = FP(k-1)F^T + Q(k) \quad (19)$$

그리고 필터 이득은 식 (20)과 같다.

$$K(k) = P(k)H^T [HP(k)H^T + R(k)]^{-1} \quad (20)$$

$k+1$ 시간에서 새로운 측정치 $z(k+1)$ 가 입력되었을 때, 채신된 상태 벡터의 추정 예측치와 공분산 행렬은 식 (21), (22)와 같이 예측치와 측정치의 조합으로 구할 수 있다.

$$X(\hat{k}+1) = X(\hat{k}) + K(k+1)[z(k+1) - z(\hat{k})] \quad (21)$$

$$P(k+1) = (I - K(k+1)H)P(k) \quad (22)$$

따라서 추정된 상태 벡터 $X(\hat{k}+1)$ 의 첫번째 요소인 순시 주파수를 취함으로써 표적의 주파수선을 추정할 수 있다.

그리고 식 (11)에서 측정 잡음 $v(k) = 0$ 이라고 하면, 주파수선의 진폭은

$$E(abs(z(k))) = E(a_k) \frac{2}{\pi} \quad (23)$$

이 되므로, 그 진폭은 식 (24)와 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{a}_k = \frac{\pi}{2} m_k \quad (24)$$

여기서 m_k 는 식 (25)와 같이 1차 순환 추정기 모델로 추정하였으며¹²⁾, 여기서 $\beta = 0.25$ 로 설정하였다.

$$\begin{aligned} m_0 &= abs(z(0)) \\ m_k &= (1 - \beta)m_{k-1} + \beta \cdot abs(z(k)) \end{aligned} \quad (25)$$

이상의 확장 칼만 필터 알고리즘은 방사 소음의 매 표본화된 시간 데이터로부터 안정 및 불안정 주파수선을 추적할 수 있다.

2.2 불안정 주파수선 추출 과정

표적의 방사 소음 시간 데이터에 확장 칼만 필터 알고리즘을 적용하여 불안정 주파수선을 추출하기 위한 전체 처리 과정은 그림 1과 같다. 방사 소음의 시간 신호를 표본화하고 FFT 처리에 의해 산출된 순시 스펙트럼을 지수 평균 처리한다. 평균 처리된 스펙트럼으로부터 주파수선의 중심주파수를 추출하여 확장 칼만 필터 알고리즘의 측정 방정식에 반송파 추적 주파수 f_0 로 초기화 한다. 그리고 일반적으로 확장 칼만 필터 알고리즘 수행시는 측정 잡음 분산 σ^2 을 알고 있는 것으로 가정하지만, 실제 표적 신호와 같이 잡음 분산을 모르는 경우와 잡음 분산이 변화를 하는 경우에는 필터 이득 계산시 측정 잡음 분산을 추정하여 적용하여야 주파수선을 정상적으로 추출할 수가 있다. 따라서 이 논문에서는 FFT 출력으로부터 FFT 처리 구간의 전체 전력을 산출하고 추적 신호 주파수선의 대역폭에 해당하는 전력이 제거된 측정 잡음의 분산 σ^2 을 추정하여 확장 칼만 필터 알고리즘에 적용, 주파수선을 추출하도록 하였으며, 또한 측정 잡음의 분산은 FFT 처리를 수행하는 매 프레임마다 새로운 분산을 추정토록 하였다.

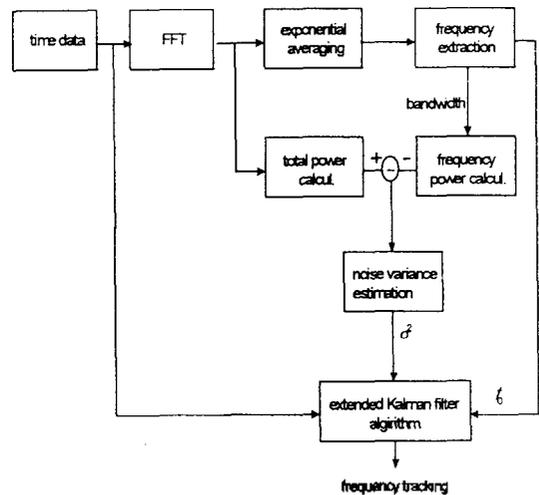


그림 1. 주파수선 추적을 위한 처리 과정

III. 실험 및 결과

3.1 모의 실험 및 결과

방사 소음의 안정 및 불안정 주파수선 추적의 타당성을 보이기 위해서 불안정 주파수선이 정현파 특성을 가

지는 시험용 신호를 발생하여 확장 칼만 필터 알고리즘을 이용한 주파수선 추적 알고리즘을 수행하였다.

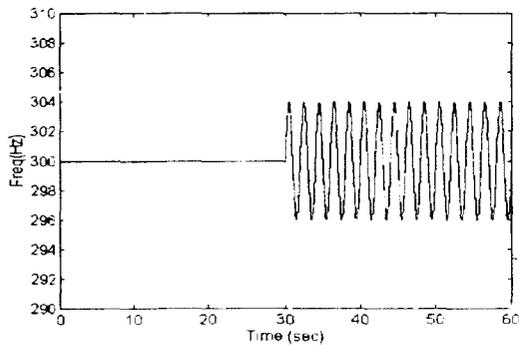
불안정 주파수선이 정현파인 시험용 신호는

$$z(k) = a_k \cos \left\{ 2\pi \frac{f_0}{f_s} k + K_f \sin \left(2\pi \frac{f_m}{f_s} k \right) \right\} + v(k) \quad (26)$$

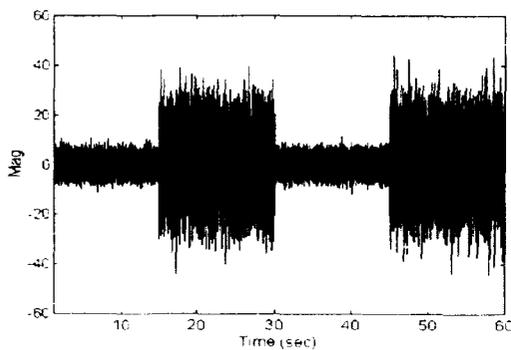
로 생성하였으며, 여기서 신호 진폭 $a_k=5$, 반송파 주파수 $f_0=300$ Hz, 시간신호의 표본화 주파수 $f_s=900$ Hz, 최대 주파수 편이 $K_f=\Delta f/f_m=4$, 변조 주파수 $f_m=0.5$ Hz, 그리고 측정 잡음 $v(k)$ 의 분산 σ^2 은 갑작스럽게 새로운 표적이 출현하거나 또는 표적의 특정 기계장치를 작동하는 경우를 가정하여 0~15초, 30~45초 사이에는 1, 시간이 15~30초, 45~60초 사이에는 10으로 설정하였다.

그림 2의 (a)는 0~30초 동안에는 안정 주파수선 300Hz와 30~60초 동안에는 주파수 변화율이 4Hz 변화폭의 정현파 특성을 가지는 불안정 주파수선을 발생시키는 입력 시뮬레이션 신호이고, 그림 2의 (b)는 입력 시뮬레이션 신호에 측정 잡음 분산을 0~15초, 30~45초 사이에는 1, 시간이 15~30초, 45~60초 사이에는 10을 첨가한 입력 시간 신호이다. 그림 2의 (c)는 입력 시간 신호에 대해 주파수 분해능이 1Hz인 FFT 처리를 통해 얻어진 스펙트로그램으로 시간이 30~60초 사이에 있는 불안정 주파수선

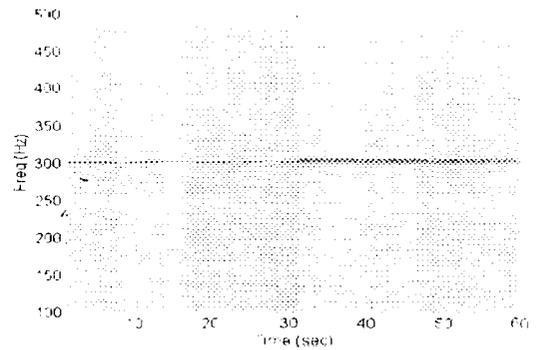
300Hz 성분이 넓은 대역폭을 가지는 주파수선으로 탐지되고 있으나, 불안정 주파수선으로 추출되지는 않고 있다. 이는 일반적인 FFT 처리 방식으로는 불안정 주파수선을 정상적으로 추출할 수 없음을 보여 준다. 그림 3은 식 (26)에서 측정 잡음 $v(k)$ 가 평균이 영, 분산 σ^2 이 40으로 가정하여 제작된 확장 칼만 필터 알고리즘을 수행되어 얻어진 주파수선 추적 결과로서, 시간 30~60초 사이에 불안정 주파수선을 나타내는 반송파 주파수 300Hz와 주파수 변화율이 정상적으로 추출되지 않고 있다. 이는 측정 잡음 분산을 다르게 설정하면 불안정 주파수선 추적이 정상적으로 이루어지지 않음을 보여 준다. 그림 4의 (a)는 그림 2의 (b)인 입력 시간 신호에 대해 시간에 따라 추정된 측정 잡음 분산으로 0~15초, 30~45초 사이에는 1, 시간이 15~30초, 45~60초 사이에는 10으로 입력 신호의 잡음 분산을 정상적으로 추정하고 있음을 보여 준다. 그림 4의 (b)는 그림 2의 (c)에서 추출된 주파수선 300Hz를 초기 추적 주파수로 설정하고, 추정된 측정 잡음 분산을 적용하여 확장 칼만 필터 알고리즘을 수행한 주파수선 추적 결과로서, 안정 주파수선 300Hz와 주파수 변화율이 4Hz인 불안정 주파수선을 정상적으로 추출하고 있음을 알 수 있다.



(a) 입력 시뮬레이션 신호



(b) 시간 신호



(c) 스펙트로그램

그림 2. 불안정 주파수선이 정현파인 입력 시험 신호

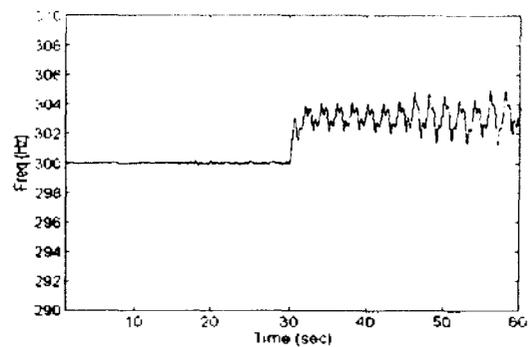
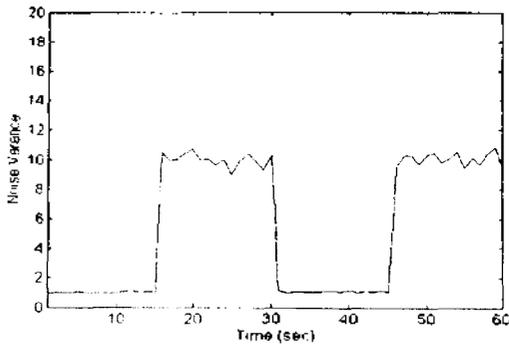
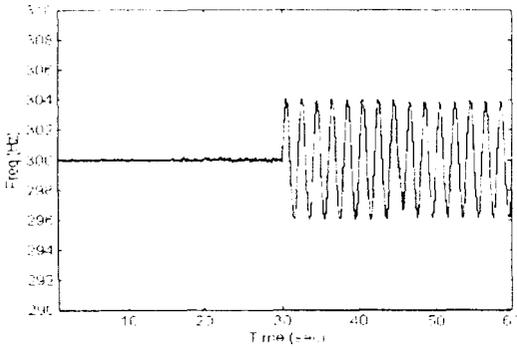


그림 3. 확장 칼만 필터의 주파수선 추적결과(잡음 분산 고정 $\sigma^2=40$)

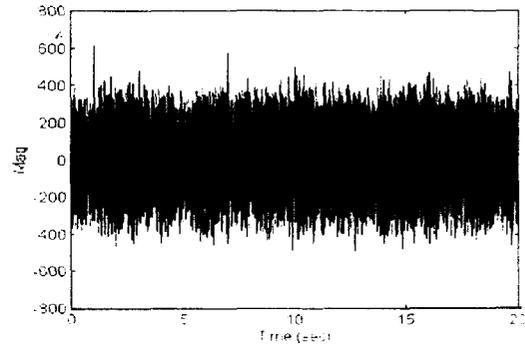


(a)잡음 분산 추정값



(b)주파수선 추적 결과

라 신호 특성이 변화되는 실제 표적 신호에 적용하기 위해서는 측정 잡음의 분산이 일정치 않고, 분산을 알지 못하므로 분산 추정이 이루어져야 함을 알 수 있었다. 그리고 추출된 추적 주파수와 추정된 잡음 분산을 제시된 확장 칼만 필터 알고리즘에 적용하여 수중 표적으로부터 발생하는 안정 및 불안정 주파수선 추출이 가능함을 확인할 수 있었다.



(a)방사 소음의 시간 신호

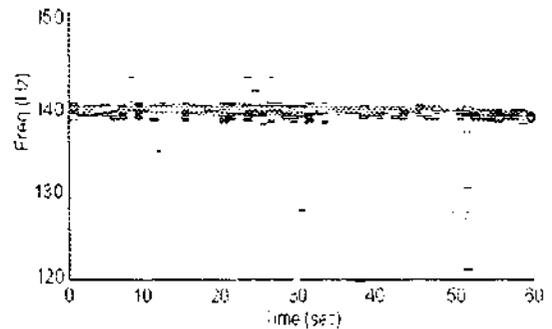
그림 4. 확장 칼만 필터의 주파수선 추적 결과

3.2 표적 신호 적용 시험 및 결과

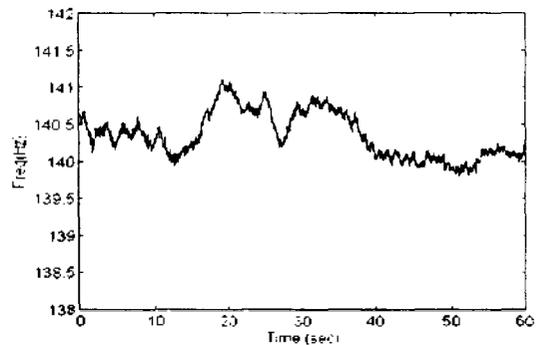
수중에는 여러 표적들에 의하여 발생한 소음이 복합적으로 존재할 수 있으므로, 수중 청음기를 통해서 수신되는 수중 방사 소음에는 여러 표적들로부터 발생하는 각각의 고유한 특징 인자인 주파수선들이 복합적으로 포함되어 있다. 따라서 수동 소나 시스템에서는 여러 표적 소음들이 복합된 소음으로부터 원하는 표적을 식별하기 위하여 우선 표적의 주요 특징 인자인 주파수선을 추출하고, 추출된 주파수선들을 표적 특성별로 분류될 수 있어야 한다.

실험용 이동 물체의 방사 소음은 바다의 해상 상태가 1, 수심이 약 15m인 해역에서 B&K-8101 수중 청음기를 통해서 거리 100m 위치에서 녹음되었다. 그림 5의 (a)는 방사 소음의 시간 신호이고, 그림 5의 (b)는 주파수 분해능이 1Hz인 FFT를 수행하여 얻어진 스펙트로그램으로 140Hz가 주파수선으로 탐지되고 있으나, 대역폭이 넓은 신호로 나타나고 있으며 주파수가 변화하는 불안정 주파수선으로는 확인되지 않는다. 그림 5의 (c)는 방사 소음의 표본화된 시간 데이터로부터 초기 추적 주파수를 140Hz로 하고 측정 잡음 분산을 추정하여 확장 칼만 필터 알고리즘을 수행한 주파수선 추적 결과로서, 주파수 140Hz가 주파수 변화폭이 약 1Hz 범위를 가지는 불안정 주파수선으로 추적되고 있음을 보여 주고 있다.

모의 실험 및 표적 신호에 적용한 결과 시험 조건에 따



(b)시간 신호의 스펙트로그램



(c)주파수선 추적 결과

그림 5. 수중표적의 불안정 주파수선 추출결과

IV. 결 론

이 논문에서는 소형이면서 고속으로 움직이는 수중 표적에 의하여 발생하는 방사 소음의 주요 특징 인자로 알려지고 있는 불안정 주파수선을 추출하기 위하여 확장 칼만 필터 알고리즘을 이용하여 방사 소음의 표분화된 시간 데이터로부터 안정 및 불안정 주파수선의 추적 기법을 제시하였다.

제시된 방식을 이용하여 모의 실험 및 실제 수중에서 측정된 실험용 이동 물체의 방사 소음에 적용하여 정상적인 불안정 주파수선 추적이 가능함을 확인하였다.

이 연구 결과는 수중 고속 표적을 탐지, 식별하기 위한 수동 소나 시스템에서 불안정 주파수선 추출 분야에 응용이 가능하리라고 생각한다. 앞으로 실제 시스템에 적용하기 위한 방안에 대한 연구가 뒤따라야 할 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

1. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill, 1983, Chapters 10-12.
2. W. S. Burdic, *Underwater Acoustic System Analysis*, Prentice-Hall, 1984, Chapters 10, 12.
3. R. O. Nielson, *Sonar Signal Processing*, Artech House, 1991, pp. 143-185.
4. Rockwell International, "Torpedo Detection and Alerting System Description," Feb. 1993.
5. B. Boashash, *Time-Frequency Signal Analysis*, Wiley, 1992, Chapter 8.
6. R. L. Streit and R. F. Barrett, "Frequency Line Tracking Using Hidden Markov Models," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, Vol. ASSP-38, pp. 586-598, Apr. 1990.
7. Y. Bar-Shalom and T. E. Fortmann, *Tracking and Data Association*, Artech House, 1986.
8. M. S. Grewal and A. P. Andrews, *Kalman Filtering Theory and Practice*, Prentice-Hall, 1993, Chapter 3.
9. D. R. Polk and S. C. Gupta, "Quasi-Optimum Digital Phase-Locked Loops," *IEEE Transactions on Communications*, pp. 75-82, Jan. 1973.
10. S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*, Prentice-Hall, 1993, Chapter 13.
11. Y. Bar-Shalom and X. R. Li, *Estimation and Tracking: Principles, Techniques, and Software*, Artech House, 1993, Chapter 10.
12. S. M. Bozic, *Digital and Kalman Filtering*, Edward Arnold, 1979, Chapter 6.

▲ 이 성 은(Lee Sung Eun)

한국음향학회지 15권 5호 참조(1996. 10)

▲ 황 수 복(Hwang Soo Bok)

한국음향학회지 15권 5호 참조(1996. 10)

▲ 남 기 곤(Nam Ki Gon)

한국음향학회지 15권 5호 참조(1996. 10)

▲ 김 재 창(Kim Jae Chang)

한국음향학회지 15권 5호 참조(1996. 10)