

특징 주파수의 시간적 변동 특성의 효과적인 분석 기술

윤종락^{*} · 노용주^{*}

^{*}부경대학교

Effective Analysis Technique for Time-variation of Signature Frequency

Jong-rak Yoon^{*} · Yong-ju Ro^{*}

Pukyong National University

E-mail : jryoon@pknu.ac.kr · yjro@mail1.pknu.ac.kr

요 약

수중 표적으로부터 수신된 신호에서, 파도와 난류 등의 영향으로 선박의 특정 기계류들의 부하변동과 도플러 효과 등에 의해 야기되는 특징 주파수의 시간적 변동과 같은 음향 특징 추출은 수중음향 신호처리에서 중요한 연구분야이다. 본 연구에서는 이들의 발생기구를 해석을 기초로 효과적인 분석·추적 기법을 제시한다.

I. 서 론

대잠전 운용에서 표적의 탐지, 식별에 활용될 수 있는 수중 표적의 음향 추출은 중요한 연구분야이다. 특히 수중 표적의 음향 특징 중 표적으로부터 발생하는 특징 주파수는 소나 시스템의 표적체 탐지, 식별 인자 중의 하나이다.

수중 표적체의 특징 주파수는 파도 등의 표적체 외부의 영향으로 인한 표적체의 기계류들의 부하 변동이나 도플러 효과 등에 의해 시간적으로 변화된다.

저속의 대형선박이나 상선 등과 같이 특징주파수의 시간적 변동이 천천히 나타나는 경우에는 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)처리로 일정 시간 구간에 대해 대략적인 주파수의 분석·추출이 가능하다. 그러나 고속의 소형선박이나 어뢰 등과 같이 특징 주파수의 시간적 변동이 큰 경우에는 정상적으로 분석·추출할 수 없다. 따라서 비선형 특성을 갖는 시간적으로 자주 변화되는 특징 주파수를 실시간으로 분석·추출할 수 있는 기법이 요구된다.

칼만 필터 기법은 계산 시간이 짧아 실시간 처리가 가능하나 선형특성을 갖는 신호모델을 사용하기 때문에 비 선형 특성을 갖는 주파수의 시간적 변동의 분석·추적에는 부적합한 것으로 알려져 있다. 따라서 비선형

특성의 특징 주파수의 시간적 변동을 예측하기 위해 일정 시간 구간 내에서 선형화 작업을 수행하는 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF)기법을 적용하여 수중 표적체로부터 수신된 신호의 특징 주파수의 시간적 변동 특성의 분석·추적을 수행한다.

본 연구에서는 특징 주파수의 시간적 변동 성분의 예측 성능을 향상시키기 위해 그 발생기구를 해석하고 확장 칼만 필터를 적용하여 측정신호로부터 특징 주파수의 시간적 변동 성분 추적 결과를 수치모의 실험과 실제 측정 실험으로 확인하였다. 또한 신호대잡음비에 따른 특징 주파수의 시간적 변동 성분 추적 성능을 검토하였다.

II. 특징 주파수의 시간적 변동 추적

수중 표적으로부터 수신된 신호의 특징 주파수의 시간적 변동 특성은 파도의 스펙트럼의 특성과 관련되어 나타나는 것으로 알려져 있다. 파도의 스펙트럼 특성은 바람의 속도, 바람의 지속시간과 바람의 영향이 미치는 거리 등에 의존하고 이동하는 표적의 관점에서는 표적의 속도와 방위의 함수로 정의될 수 있다. 파도의 자기상관함수를 정확히 설명하기는 어렵지만 샘플들 사이의 시간 간격이 커질수록 샘플 값들의 상관성이 점점 낮아지는 함수로 고려할 수 있다. 따라서 특징 주파수의 시간적 변동을 야기 시키는 원인 중 가장 주요한 파도의 랜덤 프로세서를 Gauss-Markov 프로세서로 가정할 수 있고, 그러므로 특징 주파수의 시간적 변동을 Gauss-Markov 프로세서 $x(t)$ 로 모델화 시킬 수 있다.[1] Gauss-Markov 프로세서의 자기상관함수 $R_{xx}(\tau)$ 는 다음과 같다.

$$R_{xx}(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|} \quad (1)$$

여기서, σ^2 : $x(t)$ 의 분산, α : $x(t)$ 의 대역폭이다.
스펙트럼 밀도 함수 $S(s)$ 는 아래와 같다.

$$S_x(s) = \frac{2\sigma^2\alpha}{-s^2 + \alpha^2} \quad (2)$$

따라서 $x(t)$ 는 수신 수중방사소음의 순시 주파수이고 그것의 적분 프로세서 $x_1(t)$ 는 순시 위상으로 가정되어 질 수 있고 아래와 같이 정의된다.

$$x_1(t) = 2\pi \int^t x(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

이상과 같은 적분 Gauss-Markov 프로세서는 그림 1에서 설명되어진다.[2]

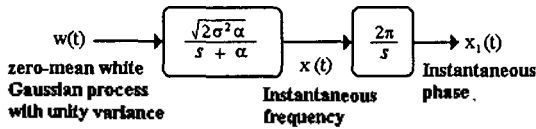


그림 1 적분 Gauss-Markov 프로세서

적분 Gauss-Markov 프로세서의 연속 선형 시스템의 상태 방정식은 아래와 같이 유도된다.

$$\dot{X}(t) = FX(t) + Gw(t) \quad (4)$$

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}, \quad \dot{X}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 2\pi\Delta f \\ 0 & -\alpha \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{2\sigma^2\alpha} \end{bmatrix}$$

여기서, $X(t)$ 는 상태벡터이며, 상태변수 $x_1(t)$ 는 순시 위상, $x_2(t)$ 는 순시 주파수이고 $w(t)$ 는 선형시스템의 입력으로 평균이 0이고 분산이 1인 백색 가우시안 잡음이다. 따라서 수중 표적체로부터 수신된 신호의 특징주파수의 시간적 변동 $f(t)$ 는 다음 식으로 추적 가능하다.

$$\dot{f}(t) = f_0 + \Delta f \cdot x(t) \quad (5)$$

여기서, f_0 는 표적 음원의 기본주파수이다.

또한, 시스템의 측정 방정식은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$z(t) = a(t) \cos[2\pi f_0 t + x_1(t)] + v(t) \quad (6)$$

여기서, $a(t)$ 는 측정신호의 진폭이고 $v(t)$ 는 평균이 0이고 분산이 σ_v^2 인 백색 가우시안 잡음이다.

식 (4), (6)의 연속 상태방정식을 이산 상태방정식으로 바꾸어 계산하면 아래의 식으로 표현된다.

$$X(k) = \Phi(k, k-1) X(k-1) + w(k) \quad (7)$$

여기서, $X(k) = [x_1(k), x_2(k)]^T$ 는 이산 순시 위상 $x_1(k)$ 와 이산 순시 주파수 $x_2(k)$ 로 구성되는 이산 상태 벡터이고 $\Phi(k, k-1)$ 은 상태 천이 행렬이고 다음과 같이 선형적으로 계산된다.

$$\Phi(k, k-1) = L^{-1}[(sI - F)^{-1}] = \begin{bmatrix} \phi_{11}(k, k-1) & \phi_{12}(k, k-1) \\ \phi_{21}(k, k-1) & \phi_{22}(k, k-1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\phi_{11}(k, k-1) = 1$$

$$\phi_{12}(k, k-1) = \frac{2\pi\Delta f}{\alpha} (1 - e^{-\alpha T_s})$$

$$\phi_{21}(k, k-1) = 0$$

$$\phi_{22}(k, k-1) = e^{-\alpha T_s}$$

그리고 $w(k)$ 는 평균이 0이고 공분산 행렬이 $Q(k)$ 인 부가 잡음이며, 정규분포를 가진다.

여기서, $Q(k) = E[w(k)w(k)^T]$ 이고 다음 식으로 구한다.[2]

$$Q(k) = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \Phi(t_k, \xi) G(\xi) E[w(\xi)w^T(\eta)] G^T(\eta) \Phi^T(t_k, \eta) d\xi d\eta = \begin{bmatrix} Q_{11}(k) & Q_{12}(k) \\ Q_{21}(k) & Q_{22}(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Q_{11}(k) = \frac{8\pi^2\Delta f^2\sigma^2}{\alpha} [T_s - \frac{2}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T_s}) + \frac{1}{2\alpha}(1 - e^{-2\alpha T_s})]$$

$$Q_{12}(k) = 4\pi\Delta f\sigma^2 [\frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T_s}) - \frac{1}{2\alpha}(1 - e^{-2\alpha T_s})]$$

$$Q_{21}(k) = Q_{12}(k)$$

$$Q_{22}(k) = \sigma^2(1 - e^{-2\alpha T_s})$$

또한, 이산 측정 모델은 아래와 같이 표현된다.

$$z(k) = h(x(k), k) + v(k) = a_k \cos[2\pi f_0 k T_s + x_1(k)] + v(k) \quad (10)$$

여기서, $h(x(k), k)$ 는 비선형 측정신호 응답함수이고 k 는 정규화된 이산 시간이다. ($t_k = k * T_s$, T_s : 샘플링 간격) 또한 측정 신호 진폭의 예측치는 1차 순환 필터를 이용하여 구하여진다. [3][4][5]

$$\hat{a}(k) = \frac{\pi}{2} m(k) \quad (11)$$

$$m(0) = |z(0)|$$

$$m(k) = (1 - \beta) m(k-1) + \beta |z(k)|$$

여기서, β 는 1차 순환 필터의 계수이다.

식 (10)에서 측정 벡터는 순시 위상에 대해 비 선형 특성이므로 Taylor급수 전개로 1차 미분항까지 적용하여 선형 근사화 하면 다음 식과 같다.

$$z(k) - h[x^*(k), k] = H(k)X(k) + v(k) \quad (12)$$

여기서, 선형 측정 응답행렬 $H(k)$ 는 아래의 식으로 표현된다.[2]

$$H(k) = \frac{\partial h(x, k)}{\partial x} \Big|_{x=x^*(k)} = [-a(k) \sin[2\pi f_0 k T_s + x_1^*(k)], 0] \quad (13)$$

여기서, $X^*(k) = [x_1^*(k), x_2^*(k)]^T$ 는 임의 시간구간 내의 기준 상태 벡터로 정의되고 아래와 같은 관계식으로 표현된다.

$$X(k) = X^*(k) + \Delta X(k) \quad (14)$$

여기서, $\Delta X(k)$ 는 미소 상태벡터로 정의되고, $v(k)$ 는 평

균이 영이고 공분산 행렬이 $R(k) = E\{v(k)v(k)^T\}$ 인 부가 잡음이고 정규분포를 갖는다.

측정신호로부터 순시 위상과 주파수를 추정하는 확장 칼만 필터 알고리즘 루프는 아래 그림과 같이 설명되어진다.[2][3]

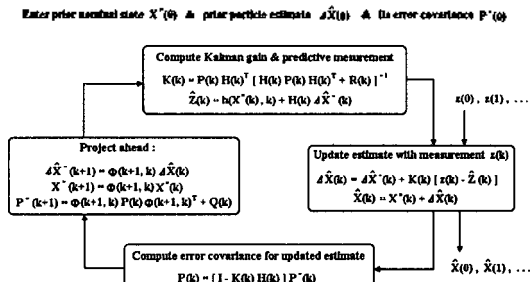


그림 2. 확장 칼만 필터 루프

III. 실험결과

해수면의 영향으로 야기되는 수신 신호의 주파수 변동 대역폭은 해상상태 혹은 바람의 속도 $w[m/s]$ 에 관련되는 함수로 아래와 같이 알려져 있다.[7]

$$B_w = 2f_w \left(1 + \frac{4\pi f_0 \cos \theta_0}{c} h_w\right) \quad (15)$$

여기서, $f_w = 1/w$ 는 파도의 주파수[Hz], $h_w = 0.005w^{5/2}$ 는 파도의 높이[m], f_0 는 음원의 신호 주파수[Hz], θ_0 는 수직 입사각 [radian], c 는 음속 [m/s]이다. 해상상태에 따라 식 (15)를 이용하여 변동 대역폭을 계산하고 특정 주파수의 시간적 변동 성분 추적 모델을 구성한다.[7] 그림 3은 해상상태에 따른 대략적인 파도 스펙트럼을 보인다. 적분 Gauss-Markov 프로세서의 입력 파라미터인 σ^2 와 α 는 해상 상태에 따라 설정되어 질 수 있다. 실험에서는 $\alpha = B_w/2$ 와 $\sigma^2 = H_w^2/2$ 으로 설정하였다.

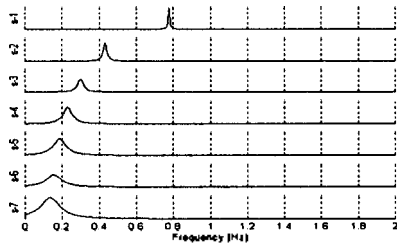


그림 3 해상상태에 따른 파도 스펙트럼

제안된 방법으로 수치모의실험과 실제 실험을 통해 측정신호로부터 주파수 변화성분을 추적하였다. 수치모의실험은 FM변조신호로부터 메시지 신호 추적과 도플

러 주파수 천이 추적 두 가지 경우로 수행하였다.

그림 4는 FM 변조 모의신호의 메시지 추적 결과를 보여준다. 여기서 반송파 주파수는 120Hz이고 측정신호의 신호대잡음비는 대략 10dB로 하였다. 해상상태 3인 경우의 주파수 변화특성을 얻기 위해 메시지 신호는 중심주파수 0.3Hz에서 대역폭 0.2Hz로 대역 제한된 가우시안 잡음으로 평균 진폭은 대략 0.6로 설정하였다. 그림 4에서 (a)는 FM변조 측정 모의신호의 시간파형이며, (b)는 실제 메시지 신호를 (c)는 제안된 방식으로 추적된 메시지 신호를 보여준다. 실제 메시지 신호와 추적된 메시지 신호는 좋은 일치성을 보인다.

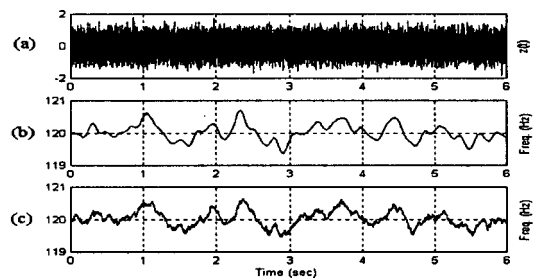


그림 4 FM 변조 신호의 메시지 신호 추적결과

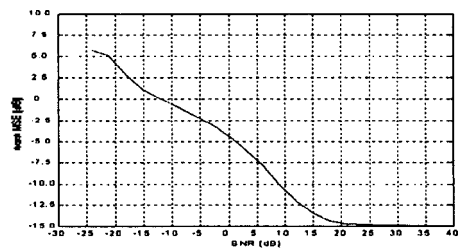


그림 5 신호대잡음비에 따른 평균자승에러

제안된 방법이 적용 가능한 배경잡음레벨을 추정하기 위해 SNR에 따른 실제 메시지 신호와 추적된 메시지 신호사이의 정규화 평균자승에러 (normalized Mean Square Error : norm MSE)를 다음식으로 정의하였다.

$$\text{normMSE} = 10 \log_{10} \left(\frac{E\{[F(k) - \hat{F}(k)]^2\}}{E\{F(k)^2\}} \right) \quad (16)$$

여기서, $F(k)$ 는 실제 메시지 신호이고 $\hat{F}(k)$ 는 추적된 메시지 신호이다. 그림 5는 앞의 FM변조신호로부터 메시지 신호 추정 수치모의실험에서 신호대잡음비에 따른 정규화 평균자승에러의 결과를 보여준다. 측정신호의 신호대잡음비가 대략 3dB 이상일 때 정규화 평균자승에러는 -6dB이하로 낮아지고 이 경우를 제안된 방법을 적용하여 특정주파수 변동 추적이 유효한 배경잡음레벨로 정의하면, 약 3dB 이상의 신호대잡음비가 요구된다.

그림 6은 도플러 효과에 의해 주파수 천이가 발생하는 경우의 측정 모의신호로부터 주파수의 시간적 변동 특성을 추적한 결과를 보여준다. 측정모의신호는 120Hz의 정현파가 10노트의 속도로 이동하는 음원으로부터 방사된 경우에 수신된 신호로 가정하였고 측정신호의 신호대잡음비는 10dB로 두었다. 그림 6에서 (a)는 측정 모의신호의 시간파형이고 (b)는 시간에 따른 실제 주파수 천이 곡선이며, (c)는 추적된 주파수 천이를 보여주고 있다. 제안된 방법의 입력 파라미터는 앞의 경우와 동일하게 설정되었고 추적된 주파수 변동은 실제 도플러 주파수 천이 곡선과 비교해서 미세한 차이를 보이지만 전체적으로 시간에 따른 주파수의 변화 특성을 잘 추적하고 있음이 확인된다.

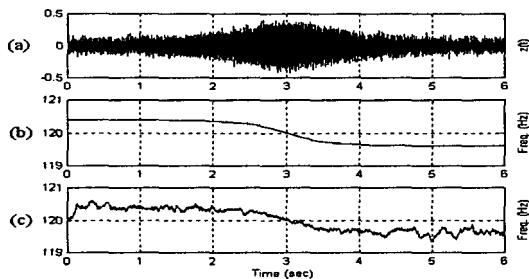


그림 6 도플러효과에 의한 주파수천이 추적결과

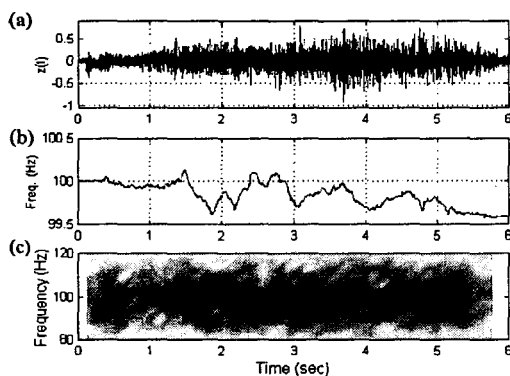


그림 7 이동 선박 방사소음 측정신호의 주파수 변동 추적 결과

실제 실험에서는 이동 선박의 방사소음 측정 신호로부터 시간에 따른 주파수 변동성분을 추적하였다. 그림 7은 속도 20노트로 이동하는 소형 선박의 방사소음을 10m의 CPA(Closest Point of Approach)거리에서 수중 청음기를 이용하여 측정된 신호에서 해상상태와 도플러 효과 등에 의한 100Hz의 특징 주파수의 시간 변동 특성을 추적한 결과를 보여준다. 그림에서 (a)는 측정 신호의 시간파형, (b)는 제안된 방법으로 추적한 특징 주

파수의 시간에 따른 변동 특성, (c)는 스펙트로그램의 결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 스펙트로그램 방법보다 제안된 방법으로 더 정밀한 특징주파수의 시간적 변동 특성 추적이 가능함을 확인할 수 있다.

V. 결 론

특징 주파수의 시간적 변동 성분은 확장칼만필터 알고리즘을 적용하여 추적 가능함을 보였다. 제안된 방법에서 추적성능을 향상시키기 위해 해상상태에 따라 확장칼만필터의 입력파라미터인 α 와 σ^2 를 정하는 기준을 제시하고자 하였다. 또한 추적 성능은 측정신호의 신호대잡음비에 의존하며, 제안된 방법을 적용하여 유효한 추적 성능을 얻기 위해서는 대략 3dB이상의 신호대잡음비가 요구되는 것으로 판단된다.

측정신호로부터 특징 주파수의 시간적 변동 성분 추적기법의 다른 응용 분야로는 CPA 등과 같은 이동음원의 상태 예측이다. 이동음원의 상태는 이동속도와 방향 그리고 CPA 등으로 설명되어질 수 있으며 도플러 주파수 천이 특성을 추적하여 역으로 이동음원의 상태를 예측할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] M.K.Ochi, Ocean Waves : The Stochastic Approach, Cambridge university press, 1998.
- [2] R.g. Brown and Y.C. Hwang, Introduction to Random Signal and Applied Kalman Filtering, John Wiley & Sons, 1997.
- [3] K. Rief and R. Unbehauen, The extended Kalman filter as an exponential observer for nonlinear system, IEEE trans. Signal processing 47(8), 2324-2328, 1999.
- [4] D.R.Polk and S.C.Gupta, Quasi-optimum digital phase-locked loops, IEEE trans. on comm. Jan. 75-82, 1973.
- [5] 이성은, 황수복, 남기곤, 김재창, 확장칼만필터를 이용한 수중표적의 불안정 주파수선 추출기법, 한국음향학회지, 15(6), 104-109, 1996.
- [6] D.Morel and C.Jauffret, Unstable spectral line tracking from time samples, UDT 95 Proceedings, 330-333, 1995.
- [7] D.B.kilfoyle and A.B.Baggeroer, The state of the art in underwater acoustic telemetry, IEEE oceanic engineering, 25(1), 4-27, 2000.