

협대역 다중신호 주파수선의 자동 탐지 및 추출기법 연구

이 성은*

황 수복*

* 국방과학연구소 제2체계개발본부 수탐1팀

A Study on the Automatic Detection and Extraction of Narrowband Multiple Frequency Lines

Lee, Sung-Eun*

Hwang, Soo-Bok*

*Agency for Defense Development

E-mail : selee@sunam.kreonet.re.kr

요약문

수중신호의 스펙트로그램상에 형성되는 신호 주파수선은 토널의 신호 세기와 바다 자체의 전달 특성 등으로 인하여 미약하게 탐지되거나 불규칙하게 끊어져서 불연속하게 되며 또한 임펄스성의 주변잡음 성분과 혼재하여 어느 토널이 연속적으로 탐지되는 지가 모호하게 되는 경우가 많고 정밀하게 신호 성분만을 탐지, 추출하기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 신호 세기가 미약한 경우나 높은 주변잡음이 복합되어 있는 경우에도 정밀하게 신호 성분만을 탐지, 추출할 수 있는 협대역 다중 주파수선의 자동 탐지 및 추출을 위한 기법을 제안한다. 제안된 알고리즘에 실제 수중표적 신호를 적용하여 제안된 알고리즘이 매우 유용함을 보인다.

바다에는 지리적, 환경적 특성에 따른 주변 (ambient) 잡음과 어선, 상선, 함정 등과 같은 표적들로부터 발생하는 소음 및 수중생물 등에서 발생하는 소음들이 복합되어 나타난다. 이러한 수중 소음원에 대해 스펙트럼 처리를 거쳐서 형성되어진 표적의 협대역 신호 성분으로는 스펙트럼상에 존재하는 토널 (tonals)과 스펙트럼을 시간에 따라 연속적으로 나타낸 스펙트로그램상에 연속되는 프레임으로 형성되는 주파수선 (frequency lines)이 있다[1-2].

수동 소나 시스템은 이러한 복합 소음을 수신하여 신호처리를 통해 스펙트럼마다 나타나는 토널 및 주파수선의 신호 성분으로부터 신호 세기, 대역폭, 토널 개수, 토널간의 상호 관계등의 다양한 특징인자를 분석, 비교하여 관심 표적을 식별하게 되며, 표적 식별율을 향상시키기 위해서는 무엇보다도 주파수선의 신호 성분만을 정밀하게 탐지하고 표적의 고유한 특징인자를 분석, 추출하여야 한다.

1. 서 론

그러나 스펙트로그램상에 형성되는 주파수선은 그 주파수선을 이루는 토널의 신호 세기와 바다 자체의 전달 특성 등으로 인하여 미약하게 되거나 불규칙하게 끊어져서 불연속하게 되고 또한 임펄스성의 주변 잡음 성분과 혼재하여 어느 토널이 계속 연속되는 지가 모호하게 되는 경우가 많으며 정밀하게 신호 성분만을 탐지, 추출하기가 매우 어렵다[2].

수중유도무기와 같이 매우 짧은 시간에 공격이 이루어지는 경우 운용자에 의해 지속적인 신호 관찰과 장시간의 특성 분석에 의한 표적 탐지/식별은 매우 제한적이다. 따라서 본 논문에서는 신호 세기가 미약한 경우나 높은 주변잡음이 복합되어 있는 경우에도 정밀하게 신호 성분만을 탐지, 추출할 수 있는 협대역 다중 주파수선의 자동 탐지 및 추출을 위한 기법을 제시하였으며, 실제 수중표적 신호에 적용하여 제안된 알고리즘이 매우 유용함을 보인다. 표적 신호 주파수선의 자동 탐지 및 추출 알고리즘의 흐름은 그림 1과 같다.

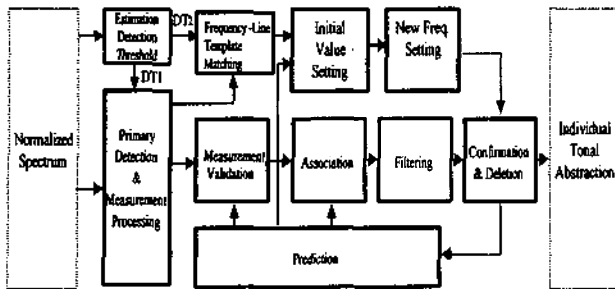


그림 1. 협대역 다중 신호 주파수선의 탐지 및 추출 알고리즘

II. 신호 주파수선의 추출

표적의 신호 주파수선이 시간에 따라 일정하지 않고 가변적일 수 있기 때문에 주파수선의 추적에 위한 칼만 필터 알고리즘은 식 (1)과 같다[4].

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Fx(k) + w(k) \\ z(k) &= Hx(k) + v(k) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 상태천이 행렬 F 와 측정 행렬 H , 모델 오

차 $w(k)$ 및 측정 잡음 $v(k)$ 의 분산 $Q(k)$, $R(k)$ 는 식 (2)와 같고, 주파수선의 시정수 $\alpha=1$, $T=1$, $Q(t)=0.1$ 로 둔다.

$$\begin{aligned} F &= \begin{bmatrix} 1 & \frac{2\pi}{a}(1-e^{-aT}) \\ 0 & e^{-aT} \end{bmatrix} \\ H &= [1 \quad 0] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Q(k) &= E[w(k)w(k)^T] = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix} Q(t) \\ q_{11} &= \left(\frac{2\pi}{a}\right)^2(4e^{-aT}-3-e^{-2aT}+2aT) \\ q_{12} &= q_{21} = \left(\frac{2\pi}{a}\right)(1+e^{-2aT}-e^{-2aT}) \\ q_{22} &= (1-e^{-2aT}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$R(k) = E[v(k)v(k)^T]$$

주파수선 추적기의 초기화 및 추적을 위해 토널 신호 탐지 과정은 다음과 같다. 스펙트럼상에서 소음 규준화 후 토널 신호를 탐지하기 위해서 적정 크기의 신호탐지 준위(threshold) D_T 를 설정하는데 일반적으로 고정된 값을 적용하게 되면, 잡음이 영향이나 신호의 전달 특성에 의해 임계값보다 적은 크기의 토널은 실제 표적의 토널 신호라 하더라도 그 해당 프레임에서는 탐지되지 못하고 결국 주파수선을 불안정하게 만드는 요인이 된다[3-4]. 따라서 시간적으로 변화되는 실제 표적 신호의 특성에 따라 소음 규준화된 스펙트럼 데이터에 대해 관심 주파수 대역에 존재할 수 있는 토널 신호 특성을 고려하여 토널 신호 성분 및 소음 규준화시에 발생하는 상,하위 극단 값을 제거하여 순간 신호탐지 준위 D_T 를 설정하고, 이에 대해 평균화된 신호탐지 준위(D_{T1} , D_{T2})를 자동적으로 추정하여 토널 신호 탐지율을 높이도록 하였다.

$$D_{T(n)} = mean + const \times std \quad (3)$$

$$D_{T(n)} = const \times D_{T(n-1)} + (1 - const) \times D_{T(n)} \quad (4)$$

$$D_{T2(n)} = \alpha \times D_{T(n)} \quad (5)$$

여기서 n 은 시간을 나타내고, α 는 상수, $const$ 는 오탐지 확률에 의해서 결정한다.

D_{T1} 보다 높아서 1로 탐지되는 토널들과 D_{T2} 의 탐지 준위값과 연계하여 토널 신호 후보들 중에서 특정 프레임에서 토널 신호로 오인될 만한 피크치를 가지는 잡음 성분을 제거하고 토널 신호 성분만을 효과적으로 탐지할 수 있도록 변형된 주파수선 템플릿 매칭(template matching) 기법을 적용하였으며, 산술식은 아래와 같이 정의된다.

$$E(t, k) = \begin{cases} 1, & \text{if } \left(\sum_{i=j-k-2}^{k+2} \sum_{j=k-2}^{k+2} S(i, j)R(i, j) = 3 \text{ and } \left(\sum_{i=j-k-2}^{k+2} \sum_{j=k-2}^{k+2} R(i, j)M(i, j) \right) / 3 \geq D_{T2} \right) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 t 는 시간, k 는 주파수빈 번호, $S(i, j)$ 는 초기 탐지신호 매트릭스, $R(i, j)$ 는 주파수선 템플릿 매트릭스, $M(i, j)$ 는 규준화된 스펙트로그램 매트릭스를 나타낸다.

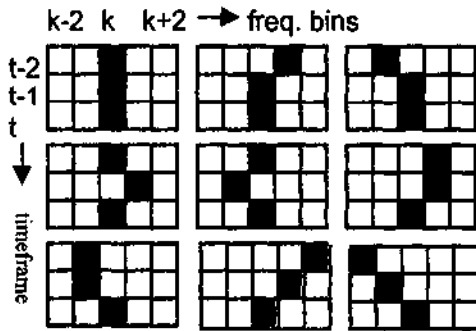


그림 2. 주파수선 템플릿 구성

위와 같은 과정으로 토널 신호가 탐지된 후 주파수선 추적기에 초기값으로 입력하기 위한 중심 주파수, 순간 주파수 및 순간 주파수 변화율의 추정은 식 (7)~(9)와 같이 수행한다.

$$f_c(k) = k \times resolution \quad \text{if } E(t, k) = 1 \quad (7)$$

$$f_i(t, k) = \left(\sum_{i=k-1}^{k+1} R(t, i) \right) \times resolution \quad \text{if } E(t, k) = 1 \quad (8)$$

$$f_i(t, k) = \left(\sum_{i=k-1}^{k+1} \sum_{j=k-1}^{k+1} R(j, i) - \sum_{i=k-1}^{k+1} R(j=i, i) \right) / 2 \times resolution \quad (9)$$

또한 주파수선을 추적할 때 새로운 주파수들 식 (10)과 같이 선정하여 추적기를 초기화한다.

$$R = 0.1 \times resolution$$

$$P_i(0|0) = \begin{bmatrix} R & R/T \\ R/T & 2R/T^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$f_{i,c} = f_c(k, i)$$

$$x_{i,1}(0|0) = f_i(k, i)$$

$$x_{i,2}(0|0) = f_i(k, i) \quad (10)$$

필터가 초기화되어 추적이 개시된 후에 측정치가 1번 이상 존재하면 추적이 시작되며, 개별 토널 신호의 특성 분석은 추적이 확인된 주파수선에 대해서만 수행하게 된다. 그리고 필터가 초기화되어 개시된 후 측정치가 연속적으로 4번 이상 존재하지 않게 되면 추적을 더 이상 행하지 않고 그 추적은 폐기한다.

추적 패기가 되지 않은 레직에 대해서는 주파수선 예측을 수행한다. 이 때 추정된 상태 벡터에 대한 예측치, 상태 공분산(covariance), 측정치 및 이노베이션 공분산은 다음 식에 의해서 결정되어진다.

$$\hat{X}_i(k+1|k) = F(k+1) \hat{X}_i(k|k)$$

$$P_i(k+1|k) = F(k+1) P_i(k|k) F^T(k+1) + Q(k)$$

$$\hat{Z}_i(k+1|k) = f_{i,c} + H(k+1) \hat{X}_i(k+1|k)$$

$$S_i(k+1) = H(k+1) P_i(k|k) H^T(k+1) + R(k) \quad (11)$$

측정치를 이용하여 다음 식 (12)와 같이 유효화 처리를 수행하며, 게이트는 Ellipsoidal gate를 이용하였다.

$$\rho_{j,i} = \rho_j(\nu_{j,i}) \leq \gamma$$

$$\rho_j(\nu_{j,i}) = \nu_i^T S(k+1)_j^{-1} \nu_i \quad (12)$$

$$\nu_i = Z_i(k+1) - \hat{Z}_i(k+1|k)$$

여기서 $\gamma = 2.71$ 로 두며, 게이트의 크기를 나타낸

다. 그리고 ν 는 이노베이션, S 는 이노베이션 공분산, j 는 기 추적 주파수 번호, i 는 측정된 주파수 번호를 나타낸다. 그리고 다음 식 (13)을 만족하는 경우는 중첩된 주파수인 것으로 클러스터링한다.

$$|f_c(k, i) - f_c(k, j)| \leq 4 \times \text{resolution} \quad (13)$$

또한 유효화 영역 내의 매우 근접한 곳에 다른 추적 트랙이 존재할 경우에는 이 트랙과 관련된 측정치 중에서 규준화 거리가 최대인 측정치를 추정하여 그 해당 트랙을 제거하도록 하였다.

규준화 거리는 다음 식 (14)에 의해서 구하였다.

$$g_{i,j} = e^{-\frac{d_{ij}^2}{2}} / (2\pi)^{M/2} \sqrt{|S_i(k+1)|} \quad (14)$$

여기서 $d_{ij} = \nu_{ij}^T S(k+1)_i^{-1} \nu_{ij}$, M 은 측정차원(measurement dimension)을 나타내며, i 는 트랙 번호, j 는 관찰 번호를 나타낸다.

유효화된 측정 중심주파수와 예측 중심주파수를 이용하여 연관을 수행한다. 연관 수행은 유효화된 측정치를 확률적으로 트랙에 연관시키는 확률 레이더 연관 PDA 방법을 사용하였다.

조합 이노베이션 $\nu_i(k+1)$ 은 다음 식 (15)로 형성되며, 사건 $\theta_{i,j}(k+1)$ 의 조건하에서의 이노베이션 $\nu_{i,j}(k+1)$ 은 다음 식 (16)과 같이 구해진다.

$$\nu_i(k+1) = \sum_{j=1}^{m(k)} \beta_{i,j}(k+1) \nu_{i,j}(k+1) \quad (15)$$

$$\nu_{i,j}(k+1) = Z_i(k+1) - \hat{Z}_i(k+1|k) \quad (16)$$

이때 사후 확률 $\beta_{i,j}(k+1)$ 은 다음 식 (17)로 결정되어진다.

$$\beta_{i,j}(k+1) = e_{i,j} / \left[b_i + \sum_{j=1}^{m(k+1)} e_{i,j} \right]$$

$$\beta_{i,0}(k+1) = b_i / \left[b_i + \sum_{j=1}^{m(k+1)} e_{i,j} \right], \quad (17)$$

$$j=1, 2, \dots, m(k+1)$$

여기서

$$c_{i,i} = \exp[-1/2 \nu_{i,j}^T(k+1) S_i^{-1}(k+1) \nu_{i,j}(k+1)]$$

$$b_i = \lambda_i \sqrt{|2\pi S_i(k+1)|} (1 - P_D P_G) / P_D$$

$$\lambda_i = m_i(k+1) / V_i(k+1)$$

$$V_i(k+1) = C_{n_x} \lambda_i^{n_x/2} |S_i(k+1)|^{1/2}$$

n_x : 측정차원, $C_1=2, C_2=\pi$, 탐지확률 $P_D \cong 0.9$, 유효화 영역내에서 올바른 측정치가 존재할 확률 $P_G=0.9$ 로 설정하였다.

측정치가 존재할 경우의 상태 벡터의 갱신은 식 (18)에 의해서 이루어진다.

$$\hat{X}_i(k+1|k+1) = \hat{X}_i(k+1|k) + W_i(k+1) \nu_i(k+1) \quad (18)$$

여기서

$$W_i(k+1) = P_i(k+1|k) H^T(k+1) S_i(k+1)^{-1}$$

이다.

이때 상태 공분산은 다음 식 (19)로 이루어진다.

$$P_i(k+1|k+1) = \beta_{i,0}(k+1) P_i(k+1|k) + [1 - \beta_{i,0}(k+1)] (I - W_i(k+1) H(k+1)) P_i(k+1|k) + \hat{P}_i(k+1) \quad (19)$$

여기서

$$\hat{P}_i(k+1) = W_i(k+1) \left[\sum_{j=1}^{m(k+1)} \beta_{i,j}(k+1) \nu_{i,j}(k+1) \nu_{i,j}^T(k+1) - \nu_i(k+1) \nu_i^T(k+1) \right] W_i^T(k+1)$$

이다.

만약 측정치가 존재하지 않으면 다음 식 (20)으로 이루어진다.

$$\hat{X}_i(k+1|k+1) = \hat{X}_i(k+1|k)$$

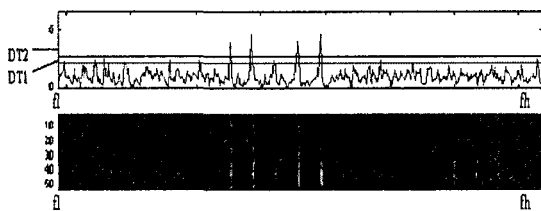
$$P_i(k+1|k+1) = \hat{P}_i(k+1|k) \quad (20)$$

이상과 같은 방법으로 연속 프레임에 대해 추적을 반복하면서 주파수선을 자동적으로 추적해 나간다 [5-6].

III. 실험 및 고찰

상기 제시된 협대역 신호 주파수선의 자동 탐지 및 추출 기법을 수중 하이드로폰 B&K-8101을 이용하여 far field 조건에서 수신된 상선의 방사소음 신호에 적용하였다.

그림 3에서 (a)는 주파수 스펙트럼 결과 및 소음 기준화 처리를 거친 스펙트로그램을 나타내며 시간 변화에 따른 표적 주파수선의 특성을 보여 준다. (b)는 자동적으로 설정되는 신호 탐지준위 D_{T1} 이상 되는 탐지된 토널 신호의 주파수선으로서 신호 주파수 측정치를 나타내며, 신호 성분 이외에 많은 잡음 성분들을 포함하고 있다. 이는 자동적으로 처리되는 시스템에 있어서는 거짓 정보를 제공해 주게 된다. (c)는 (b)에 표시된 D_{T1} 보다 높아서 1로 탐지되는 토널들과 D_{T2} 의 탐지 준위값과 변형된 주파수선 템플릿 매칭 기법을 거쳐서 추적기의 필터 초기값으로 입력되는 신호 성분들로서 주변잡음이 거의 제어되어 있음을 알 수 있다. 그러나 신호 주파수선이 부분적으로 불연속적으로 나타나고 있어 지속적으로 표적을 추적하는데 제약점이 있게 된다. 이를 추적기를 통해 (d)에 표시된 최종 추적되는 신호 주파수선은 연속적이며 신호 성분만을 효율적으로 추출할 수 있음을 보여 주고 있다.



(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3. 협대역 신호주파수선 추출 결과

(a) 스펙트럼 및 스펙트로그램

(b) 측정치

(c) 추적기 초기값

(d) 최종추적 결과

IV. 결 론

본 논문에서는 수동 소나 시스템에서 표적의 자동 탐지 및 추적 분야에서 효율적으로 적용할 수 있는 협대역 다중 신호 주파수선의 자동 탐지 및 추출 기법을 제안하였으며, 실제 수중에서 측정된 상선 신호에 적용하여 제안된 기법이 매우 유용함을 보였다. 또한, 제시된 기법은 실제 수동 소나 관련 시스템에 적용하여 신호 세기가 미약한 경우나 높은 주변잡음이 복합되어 존재하는 경우에도 정밀하게 신호 주파수 성분만을 탐지, 추출 가능함을 확인하였다.

참고문헌

1. R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, McGraw-Hill, 1975.
2. Richard O. Nielsen, Sonar Signal Processing, Artech House, 1991.

3. W. A. Strzinski and E. D. Lowe, "A Performance Comparison of Four Noise Background Normalization Schemes Proposed for Signal Detection Systems", J. Acoustical Society of America, vol.76, no.6, pp.1738-1742, Dec. 1984.
4. 하석운, "수중음향신호의 배경잡음 평균추정 방법에 관한 연구", 대한전자공학회 추계종합학술대회 논문집, 제15권, 제2호, pp.631-634, 1992년 11월.
5. M. S. Grewal and A. P. Andrews, "Kalman Filtering Theory and Practice", Prentice-Hall, Chapter 3, 1993.
6. Y. Bar-Shalom and X. R. Li, "Estimation and Tracking : Principles, Techniques, and Software", Artech House, Chapter 10, 1993.