

---

# 수중 환경 변화에 강인한 잔향 제거 시스템

김 기 만\*

## A Robust Reverberation Rejection System against the Underwater Environmental Variations

Ki-Man Kim\*

### 요 약

항해 및 군용 장비로써 많이 이용되는 능동형 소나 시스템의 문제점 가운데 하나는 잔향 문제이다. 잔향은 하이드로폰으로부터 송신된 신호가 수면, 해저, 공간으로부터 반사되어 수신단에 입사된 신호를 말한다. 이러한 잔향은 원하는 신호를 수신하는데 장애가 되며 성능 향상을 위해 이들은 제거되어야 한다. 본 연구에서는 잔향을 제거하기 위한 방법에 대하여 연구하였다. 제안된 방법은 고유 부공간중 신호 부공간과 잡음 부공간이 서로 직교하는 성질을 이용하며, 잡음 부공간을 찾음으로써 잔향을 제거한다. 제안된 방법의 성능을 입증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

### Abstract

An active sonar is used to the navigation system or military purposes. In the active sonar one of the problems is a reverberation. The reflected signals from surface, bottom, and volume are received at receiver. This reverberation is an interference in the active sonar, and for the enhanced performance must be rejected. In this paper I study the method to reject the reverberation. The proposed method use the orthogonal property between the signal subspace and noise subspace in the eigen subspace. In the proposed method the noise subspace is calculated. I have performed the computer simulations to prove the performance of the proposed method.

---

\* 한국해양대학교 전파공학과 Department of Radio Sciences & Engineering, Korea Maritime University  
본 연구는 한국해양대학교 학술진흥회 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

접수일자 : 1997년 9월 3일

### I. 서론

능동형 소나에서의 문제점 가운데 한가지는 다양하게 나타나는 잡음의 효율적인 제거이다. 수동형 소나에서 나타나는 배경 잡음, 열 잡음을 비롯하여 자체 잡음, 수류 잡음, 잔향(reverberation) 등이 능동형 소나에서 나타나는 잡음들이다. 이들 잡음중 시스템의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 성분은 잔향이다[1]. 전통적으로 잔향의 파워와 배경 잡음의 파워 비가 같아지는 거리를 검출 거리라고 정의하고 있으므로 이 잔향 성분이 소나의 성능에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 송신된 신호가 수면, 해저면, 수중의 부유 물질등에 의해 반사되는데 이들을 각각 surface, bottom, volume 잔향이라고 한다. 잔향들로 인해 원하는 신호 성분을 검출하는데 방해가 될 수 있으며, 성능을 저하시키는 요인이 된다.

잔향을 효과적으로 제거하려면 이의 특성을 매우 정확히 알고 있어야 하나 이러한 특성은 항상 고정된 것이 아니라 풍속, 해저면 물질의 종류, 부유 물질의 특성, 수온등 많은 복합적인 요인들로 인해 시간에 따라 또한 위치, 깊이, 계절에 따라 변화한다. 따라서 변화하는 환경에 보다 더 효율적으로 대처하기 위해 적응 신호 처리(adaptive signal processing) 기법이 요구된다. 본 연구에서는 능동형 소나에서 원하는 신호 성분을 얻기 위해

함께 섞여 있는 잔향 성분을 적응적인 방법으로 제거하는 필터를 설계하도록 한다. 설계된 필터는 고유 부공간 개념을 도입하며, 잡음 부공간에 해당하는 고유 벡터들을 찾은 뒤 이 각각에 해당하는 필터 출력들을 평균하여 전체 출력을 얻는 구조를 갖는다. 설계된 필터의 효용성을 입증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 기존의 방법들과 비교하였다.

### II. 적응 잡음 제거 기법

초기의 적응 잡음 제거 기법은 1965년경 Bell 연구소의 Kelly[2]에 의해 시작되었다. 그는 전화선 로상의 반향(echo) 제거를 위해 이 기법을 이용하였으며, 그후 Widrow[3]는 의용공학, 제어를 비롯한 다양한 적용 분야로 이 기법을 확장시켰다. 일반적인 적응 잡음 제거 시스템을 그림 1에 나타내었다. 그림에서 2개의 입력은 주 신호원과 보조 신호  $x(n)$ 으로 구성되며, transversal 구조를 갖는 적응 필터를 통해 추정된 신호  $y(n)$ 은 다음과 같다.

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} w_k x(n-k) \quad (1)$$

윗 식에서  $w_k$  는 N개의 필터내 계수들이다. 주 신호원과 필터 출력  $y(n)$ 과의 차를 오차 신호  $e(n)$ 이라 하면 필터내 계수들을 계산하기 위한 방

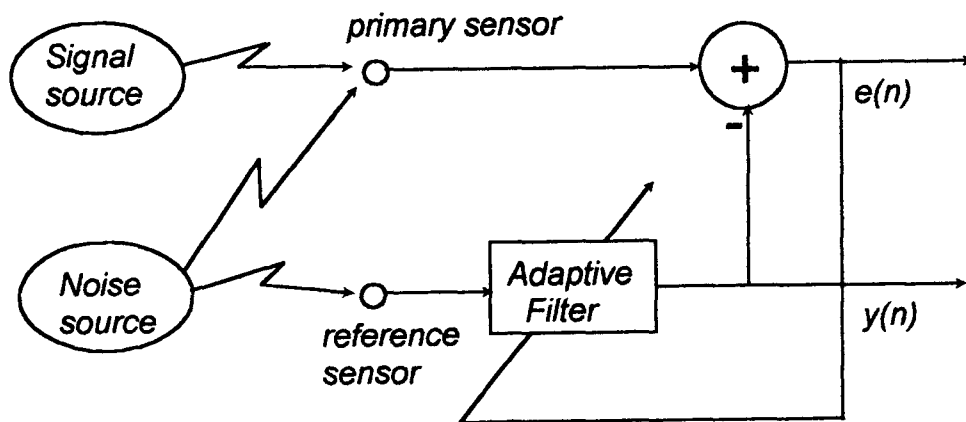


그림 1. 적응 잡음 제거기의 구조.  
Figure 1. Block diagram of an adaptive noise canceller.

법으로 LMS(Least Mean Square) 알고리즘이 제안되었다[2]. 이 방법은 적은 계산량을 가지면서도 효율적인 성능을 갖는다. LMS 알고리즘은 오차 신호  $e(n)$ 의 제곱 평균치를 최소화하는 방향으로 계수들을 구해나가며 그 관계식은 아래와 같다.

$$w_k(n+1) = w_k(n) + \mu x(n-k)e(n) \quad (2)$$

윗 식에서  $\mu$ 는 수렴 속도를 결정하는 상수이다.

잔향 성분을 제거하기 위한 방법은 크게 신호의 도플러 주파수를 모르는 경우와 아는 경우로 나누어 생각할 수 있다. 신호의 도플러 주파수를 모르는 경우 신호 성분은 관심 있는 주파수 대역 전 영역에 걸쳐 분포 할 수 있다고 가정한다. 이때 최적 해는 백색 잡음의 이득을 일정하게 유지하면서 출력 파워를 최소화하는 방향으로 구한다[3]. 이러한 기준의 최적 해  $W_{opt}$ 는 식 (3)과 같이 공분산 행렬(covariance matrix)의 최소 고유치에 대응하는 고유 벡터  $v_{min}$ 으로 주어진다.

$$W_{opt} = v_{min} \quad (3)$$

그러나 이 방법은 원하는 신호가 공분산 행렬을 구하는 과정에 포함되면 원하는 신호 성분도 잡음으로 간주하여 성능 저하를 초래한다. 일반적으로 고유 벡터를 추정하는 문제는 많은 계산량을 필요로 하기 때문에 준최적(suboptimal) 방법으로선형 예측 방법을 이용한다[3]. 선형 예측을 수행하기 위해 예측 오차 필터(Prediction Error Filter) 구조가 연구되어졌다[4].

신호의 도플러 주파수를 아는 경우에는 일정한 오경보 확률하에 원하는 신호의 검출 확률을 최대로 하는 Neyman-Pearson 기준이 이용된다. 이 기준은 가우시안 분포 함수를 갖는 잡음인 경우 원하는 신호의 이득을 일정하게 유지하면서 출력 파워를 최소화하는 방법과 동일한 결과를 나타낸다. 이 방법의 최적해는 다음과 같다.

$$W_{opt} = R_x^{-1} S(S^H R_x^{-1} S)^{-1} \quad (4)$$

윗 식에서  $S$ 는 원하는 신호 성분을 나타내는 방향 벡터이며,  $R_x$ 는 데이터의 공분산 행렬이다. 그

리고 윗 첨자  $H$ 는 Hermitian transpose를 나타낸다.

### Ⅲ. 잡음 부공간을 이용하는 잔향 제거 시스템

잔향의 도플러 주파수를 모르는 경우 최적 해는 공분산 행렬을 고유치 분해하였을 때 최소 고유치에 대응하는 고유벡터로 주어짐을 앞서 설명하였다. 그러나 공분산 행렬  $R_x$ 를 고유치 분해(eigen decomposition)하였을 때 다음과 같은 성질을 갖는다.

$$R_x = \sum_{i=1}^M \lambda_i v_i v_i^H \quad (5)$$

$$\lambda_1 > \dots > \lambda_N > \lambda_{N+1} = \dots = \lambda_M \quad (6)$$

윗 식에서  $\lambda_i$ 는  $i$ 번째로 큰 고유치이며,  $v_i$ 는 이에 대응하는 고유 벡터이다. 즉  $M$ 차 공분산 행렬을 고유치 분해하여 고유치들을 크기순으로 정렬하면 이상적인 경우  $N$ 개의 큰 값들과 나머지  $M-N$ 개의 같은 값을 갖는다. 여기서  $N$ 개의 큰 값들은 신호 성분, 즉 잔향 성분과 관련이 있으며 이를 신호 부공간(signal subspace)이라 한다. 나머지 항들은 주변 배경 잡음과 관련된 항으로 잡음 부공간(noise subspace)이라 하고, 이 두 부공간은 서로 직교하는 성질을 갖는다[8]. 따라서 기존의 방법은 최소 고유치에 대응하는 고유 벡터를 찾으면 이것이 신호 부공간을 차지하는 잔향 성분과 서로 직교하여 잔향을 제거하는 방식이었다. 그러나 앞선 식에도 나타나 있듯이 최소 고유치는 하나가 아닌 여러 개가 존재하며, 이들 모두의 정보를 이용할 경우 보다 개선된 성능을 나타내게 된다. 특히 잡음 부공간의 fluctuation을 평균화함으로써 보다 일관성 있는 특성을 얻게 된다. 결국 잔향 제거기 출력은 다음과 같이 주어진다.

$$y(n) = \frac{1}{M-N} \sum_{i=N+1}^M v_i^H x \quad (7)$$

$$x = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-M+1)]^T \quad (8)$$

윗 식에서  $x$ 는 입력 데이터 벡터이다. 이 과정을 그림 2에 나타내었다. 또한 고유치 분해시 요구되는 많은 계산량을 감소 시키기 위해 제한조건을

가지면서 순차적으로 최소화하는 방법 등을 이용하면 계산량을 감소시킬 수 있다.

IV. 시뮬레이션 및 결과 고찰

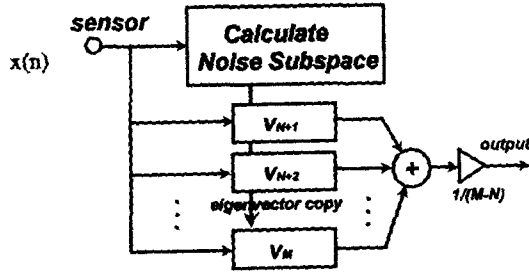


그림 2. 제안된 방법의 구조.  
Figure 2. Block diagram of the proposed method.

제안된 방법의 성능을 증명하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션을 위하여 모의 신호를 발생하였다. 발생된 신호는 스펙트럼으로부터 시간 영역 샘플을 구할 때 이산 푸리에 변환을 이용하였다. 즉 수중 공간을 그림 3과 같이 작은 셀(cell)로 나누어 각각으로부터 반사되어 수신된 신호를 모두 합하였다. 수신된 신호의 스펙트럼은 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$P(f, r) = \sigma^2(r) Y(f, r) * |S_T(f)|^2 * D(f) \quad (9)$$

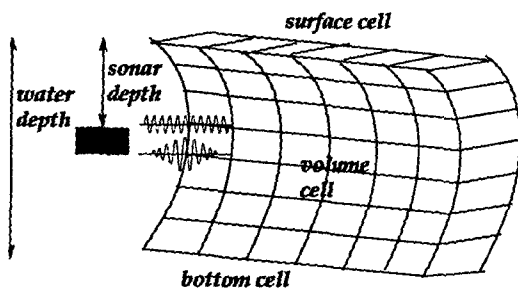
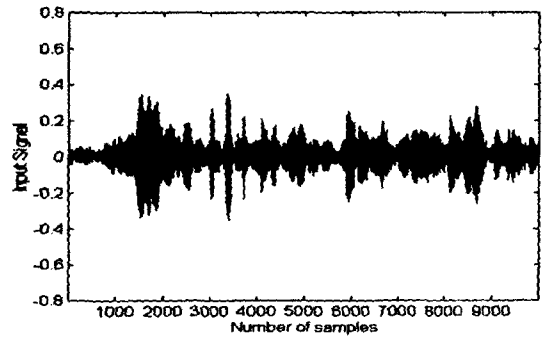


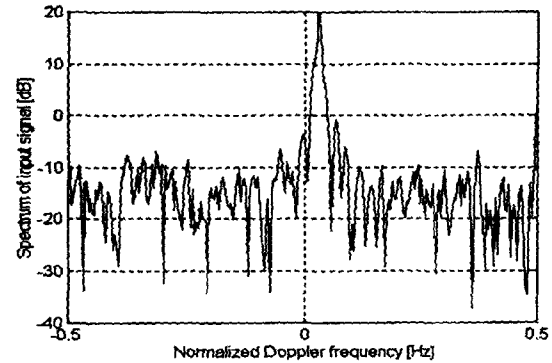
그림 3. 이산 셀 모델링.  
Fig. 3. Discrete cell modelling.

수신된 신호의 스펙트럼은 거리 r의 함수인 파워  $\sigma^2(r)$ 를 가지며, 송신한 신호의 스펙트럼

$|S_T(f)|^2$ 와 소나 움직임에 의한 도플러 성분  $Y(f, r)$ , 그리고 산란체 고유의 스펙트럼  $D(f)$  사이의 컨볼루션으로 주어진다. 또한 발생 신호의 확률 밀도 함수는 정규 분포를 갖는다고 가정하였다. 그림 4에 잔향 성분의 시간 영역 그림과 스펙트럼을 나타내었다. 산란체의 움직임 등에 의해 도플러가 발생되어 있음을 볼 수 있다.



(a)



(b)

그림 4. 잔향 신호 (a) 시간 영역, (b) 스펙트럼.  
Figure 4. Reverberation signal (a) time domain, (b) spectrum.

그림 5에는 간단한 고역통과(highpass) 필터를 통과 시킨 결과 스펙트럼을 보여준다. 잔향의 도플러 주파수가 매우 낮다면 이 방법은 우수한 성능을 나타내나 높은 도플러 주파수를 가지면 큰 성능 저하를 초래한다.

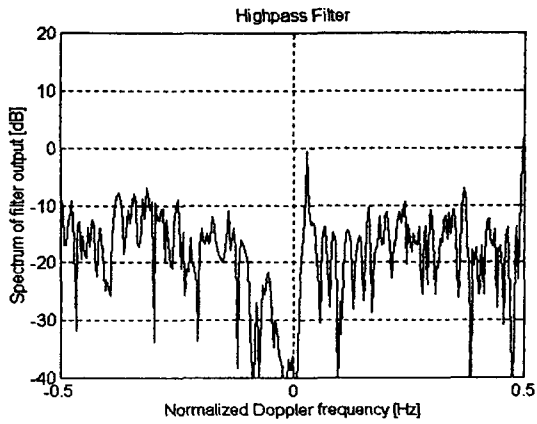


그림 5. 고역통과 필터링 결과 스펙트럼.  
Figure 5. Spectrum of the result of the highpass filtering.

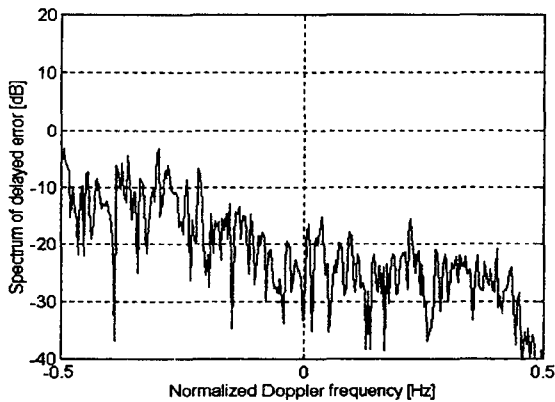


그림 6. 최소 고유치에 대응하는 고유 벡터만을 사용한 경우의 스펙트럼.  
Figure 6. Spectrum of the results of the eigenfilter with eigenvector corresponding to minimum eigenvalue.

그림 6에는 최소 고유치에 대응하는 고유벡터 하나만을 사용하여 잔향을 제거한 결과를 나타내며, 그림 7에는 본 논문에서 제안된 잡음 부공간 전부를 이용하는 방법을 적용하였을 때 결과를 나타내었다. 이때 5차 공분산 행렬을 사용하였으며, 공분산 행렬은 망각 인자를 도입하여 지속적으로 평균을 취하였다. 결과는 잡음 부공간 전체를 이용하는 경우 보다 우수한 성능을 나타냄을 보여주고 있다.

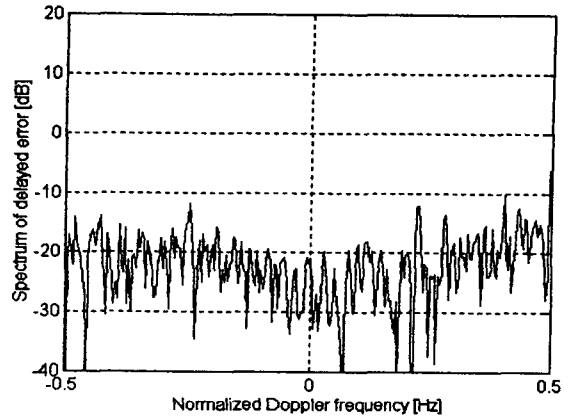


그림 7. 잡음 부공간에 대응하는 고유 벡터들을 모두 사용한 경우의 스펙트럼.  
Figure 7. Spectrum of the results of the eigenfilter with all eigenvectors corresponding to noise subspace.

## V. 결 론

본 논문에서는 능동형 소나 시스템에서 문제가 되는 잔향을 제거하는 방법에 대하여 논의하였다. 제안된 방법은 신호의 잡음 부공간 전체를 이용함으로써 하나만을 이용하는 것보다 향상된 성능을 갖는다. 그리고 시뮬레이션을 통해 그 성능을 고찰하였다.

앞으로의 과제는 잡음 부공간을 신호 부공간과 나누기 위해서 잔향 성분의 rank를 정확히 추정하는 방법에 대하여 연구되어야 하며, 실측 데이터를 수집하여 실제 적용 가능성을 검토하여야 한다. 또한 고유치 분해시 많은 계산량을 필요로 하는데이의 해결 방법, 즉 적은 계산량을 가지면서 고유 벡터를 찾는 방법에 대해서도 연구되어야 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] R.J. Urick, Principles of underwater sound, 3rd edition, McGraw-Hill Com., 1983.
- [2] B. Widrow, "Adaptive noise cancelling : principles and applications," Proc. IEEE, vol.55, no.12, pp.2143-2159, Dec. 1975.
- [3] W.Chen, K.M. Wong, "Detection of the number

- of signals : a predicted eigen-threshold approach,"  
IEEE Trans. Signal Proc., vol.39, no.5, May 1991.
- [4] S. Haykin, Adaptive filter theory, Prentice-hall,  
1991.
- [5] L.E. Brennan and I.S. Reed, "Theory of adaptive  
RADAR," IEEE Trans Aerospace and Electronic  
Syst., vol.AES-9, no.2, pp.237-252, March 1973.
- [6] R.O. Schmidt, "Multiple emitter location and  
signal parameter estimation," IEEE Trans  
Antennas & Propagat., vol.AP-34, no.3,  
pp.276-280, March 1984.
- [7] J.A. Cadzow, Y.S. Kim, and D.C. Shiue, "General  
directional-of-arrival estimation : a signal subspace  
approach," IEEE Trans Aerospace and Electronic  
Syst., vol.AES-25, no.1, pp.31-47, Jan. 1989.
- [8] G. Strang, Linear algebra and its applications,  
Academic press, 1980.

김 기 만(Ki-Man Kim)

1984.3-1988.2 연세대학교 전자공학과(공학사)  
1985.9-1990.8 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
1990.9-1995.2 연세대학교 대학원 전자공학과(공학박사)  
1995.3-1996.8 연세대학교 의과대학 의용공학교실  
(fellow)  
1996.9-현재 한국해양대학교 전파공학과 전임강사  
\* 주관심분야: 수중음향신호처리, smart antenna, 3  
차원 음장제어, 능동소음제어등임.