

# 능동 소나에서 표적 신호 향상을 위한 적응 디지털 필터

## An Adaptive Digital Filter for Target Signal Enhancement in Active Sonar

성 하 중\*, 김 기 만\*\*, 이 충 웅\*\*\*, 윤 대 희\*\*\*

(Ha Jong Sung\*, Ki Man Kim\*\*, Chungyong Lee\*\*\*, Dae Hee Youn\*\*\*)

\*LG 전자 전송연구소 디지털통신실, \*\*한국해양대학교 전파·정보통신공학부, \*\*\*연세대학교 전기·전자공학과  
(접수일자: 1999년 9월 1일; 수정일자: 2001년 2월 1일; 채택일자: 2001년 3월 13일)

CW (Continuous Wave) 신호를 사용하는 능동형 소나에서 잔향을 포함한 잡음의 특성이 백색 (white)이 아닌 경우 일정 오경보 확률 처리 (CFAR: Constant False Alarm Rate)를 수행할 때 잔향 부근에서 높은 문턱치를 추정하게 된다. 이로 인해 표적을 검출하지 못하며, 근접한 다중 표적을 구분하지 못하는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 적응 잔향 제거 필터를 제안하였다. 제안된 필터는 적응 필터와 이 필터로부터 일정한 시간 차를 두고 계수 값을 복제해 쓰는 필터로 구성된다. 능동형 소나가 움직이는 수중 환경에서 수집된 실측 데이터를 이용하여 제안된 적응 잔향 제거 필터의 성능을 고찰하였다. 그 결과 제안된 방법은 기존의 방법에 비해 표적 신호 구간이 긴 경우 향상된 성능을 나타내었다.

**핵심용어:** 능동 소나, 적응 필터, 표적 검출

**투고분야:** 음향 신호처리 분야 (1,2)

In active sonar system using CW signal, when the noise included reverberation has not the white characteristics, the CFAR detector estimates high threshold. Because of this reason it cannot detect targets and not resolve the closely spaced multiple targets. In order to solve these problems, we propose an adaptive reverberation rejection filter. The proposed filter is composed of an adaptive filter and a fixed filter with its coefficients. To study the performance of the proposed adaptive reverberation rejection filter, various experiments have been performed under in moving active sonar environments. As a results, the proposed method has the improved performance than the previous methods.

**Keywords:** Active sonar, Adaptive filter, Target detection

**Ask subject classification:** Acoustic signal processing (1,2)

## I. 서론

수중에서 능동 소나를 운용할 때 표적으로부터 반사되어 하이드로폰 (hydrophone)에 수신된 신호에는 원하는 표적신호 이외에 배경잡음 (Background Noise)과 잔향잡음 (Reverberation Noise)이 포함되어 있다. 배경잡음

과 잔향 잡음으로 인하여 고정된 탐지 기준치를 수신된 신호에 적용하여 표적 탐지 유무를 판단함은 오경보 확률을 일정한 수준 이하로 유지해야 하는 Neyman-Pearson 설계 기준을 충족시킬 수 없게 된다. 따라서 이런 경우에는 잡음 파워를 추정하고 탐지 기준치를 가변적으로 계산하여 배경 잡음과 잔향잡음의 영향을 배제할 수 있는 일정 오경보 확률 (CFAR: Constant False Alarm Rate) 처리 방법을 적용해야 한다[1-3].

일정 오경보 확률 처리기를 운용함에 있어 중요한 문제

들은 잔향 잡음에 의한 영향과 다중 표적 환경에 의해서 나타나는 문제들이다. 특히 전자의 경우 검사 셀 혹은 검사 셀 주변 셀의 잔향 잡음의 상태에 따라 가변적으로 탐지 기준치가 변화하여 오경보 확률이 증가하거나 또는 실제로 표적이 있음에도 불구하고 표적이 없는 것으로 판단하는 경우가 발생한다. 즉 잡음의 특성이 백색 (white)이 아닌 경우 일정 오경보 확률 처리기는 잡음 부근에서 높은 문턱치를 추정하여 표적을 검출하지 못하며, 근접한 다중 표적을 구분하지 못하는 문제점이 있다. 이러한 문제점은 CW (Continuous Wave) 신호를 사용하는 능동 소나에서 집중적으로 발생한다[4-6].

지난 동안 표적 검출 능력을 향상시키기 위하여 많은 연구가 이루어졌다. 초기의 시도는 일종의 고역통과필터 MTI (Moving Target Indicator) 프로세서를 사용하는 것으로써 레이다에서 클러터 (clutter)를 제거하기 위해 이용되기 시작하였다[7]. 이후 수신 신호의 특성을 이용하는 최적 MTI 프로세서 및 선형 예측 방법 등이 소개되었다[7]. 그러나 대부분의 경우 레이다 환경으로부터 접근된 방법들이다. 이에 본 논문에서는 잔향 잡음 문제를 해결하기 위해 능동형 소나에 적합한 적응 대역 제한 필터를 제안하였다. 제안된 필터는 두 종류의 필터로 구성되어 있다. 먼저 일반적인 선형 예측 모드로 동작하거나 고유 벡터를 계산하는 적응 필터와 이로부터 일정한 시간차를 두고 적응 필터에서 계산된 계수값을 받아 처리하는 필터로 구성되어 있다. 제안된 필터의 성능을 고찰하기 위해 능동형 소나가 움직이는 수중 환경에서 실험을 수행하였으며, 그 효율성을 입증하였다.

## II. 잔향 제거를 위한 디지털 필터

CW 신호를 사용하는 능동형 소나의 경우 수신 신호에는 수면, 해저 및 각종 부유 물질로부터의 반사로 인한 잔향 성분을 포함하게 된다[8-10]. 이러한 성분들은 표적 탐지 확률을 저하시키는 역할을 하며, 이에 따라 그 동안 잔향을 제거하기 위한 다양한 방법들이 연구되어 왔다.

MTI 필터는 대부분의 잔향 성분이 매우 낮은 도플러 주파수 대역에서 나타난다는 특징을 이용한 것으로 일종의 고역 통과 필터 (highpass filter) 역할을 한다. MTI 필터는 기대되는 잔향의 특성에 따라 미리 정해진 주파수 응답을 갖도록 설계되어 있으며, 구현이 용이하기 때문에 널리 이용되었다. 그러나 잔향이 기대된 특성을 벗어났을

경우 성능이 크게 저하되는 단점을 갖는다.

실제로 잔향은 항상 정규 분포를 갖는 것이 아니므로 이 문제를 해결하기 위한 방법이 최적 MTI 프로세서이다. 만약 원하는 표적의 도플러 주파수를 모른다면 최적 해는 IF (Improvement Factor)를 최대화하는 기준을 사용하며, 그 해는 표적의 도플러 주파수를 모르는 경우 입력 데이터의 공분산 (covariance) 행렬의 최소 고유치에 대응하는 고유벡터  $E_{\min}$ 으로 주어진다.

$$W_{opt} = E_{\min} \quad (1)$$

만약 표적의 도플러 주파수를 안다면 해는 다음과 같다.

$$W_{opt} = \beta M^{-1} S^* \quad (2)$$

여기서  $\beta$ 는 임의의 상수이며, S는 표적 성분을 나타내는 신호벡터이다. 이 방법은 표적 신호 성분을 향상시키면서 잔향을 제거한다. 만약 주변 환경이 시시각각 변화하는 경우 위의 최적 해는 사용하기 어려우며, 이 경우 적응 알고리즘을 이용하여 입력 데이터의 환경에 적절히 대처할 수 있는데 최소 고유치에 대응하는 고유벡터는 다음 식과 같은 eigen-filter를 이용하여 반복적으로 구할 수 있다[7].

$$W(k+1) = W(k) - 2\mu M(k)W(k) \quad (3)$$

$$W(k+1) = \frac{W(k+1)}{|W^H(k+1)W(k+1)|^{1/2}} \quad (4)$$

$$M(k) = \gamma M(k-1) + (1-\gamma)X^H(k)X(k) \quad (5)$$

윗 식에서 벡터  $W(k)$ 는 최소 고유치에 대응하는 고유벡터로 수렴하며,  $\mu$ 는 수렴 속도를 결정하는 상수이다. 또한  $\gamma$ 는 망각 인자 (forgetting factor)로써 0과 1사이의 값을 갖는다. 만약 행렬 M의 고유치 분포율이 크다면 수렴 속도가 늦으므로 이를 향상시키기 위해서는 lattice, Gram-Schmidt 또는 혼합 구조를 갖는 필터를 이용하여 수렴 속도를 향상시킬 수 있다[7].

최적 MTI 프로세서의 경우 고유벡터를 찾는 과정에서 많은 계산량이 요구된다. 이에 적은 계산량을 갖는 준최적 (suboptimal) 방법으로써 그 해는 예측 오차 필터 (prediction error filter: PEF)에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$W_{PE} = [1; W_{LP}] \quad (6)$$

$W_{LP}$ 는 Yule-Walker 방정식의 해로써 이 예측 오차 필터는 잔향을 백색화 (whitening) 시키는 역할을 한다. 이

예측 오차 필터 역시 적응 알고리즘을 이용하여 구현이 가능하다.

### III. 표적 탐지 성능 향상을 위한 적응 잔향 제거 필터

기존의 방법들은 대부분의 수신 구간 동안 잔향만 존재하고 표적 신호 구간은 상대적으로 짧다는 성질을 이용한다. 그러나 만약 송신 신호의 길이가 긴 경우 적응 필터 사용시 망각 인자 값에 따라 성능이 저하될 수 있다. 즉 식 (5)에 나타난 망각 인자 값이 작으면 최근 입력 데이터에 상대적으로 많은 가중치가 가해져서 적응 필터는 표적 신호의 통계적인 특성에 적응하게 된다. 이로 인해 표적 신호 제거 (signal cancellation) 현상이 발생한다. 이에 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선한 잔향 제거 필터를 제안한다. 본 논문에서 제안한 구조를 그림 1에 나타내었다. 제안한 필터는 크게 두 부분으로 구성되어 있다. 아래 부분은 일반적인 적응 알고리즘을 사용하는 필터이며, 윗 부분은 적응 필터에서 계산된 계수를 그대로 사용하여 필터링하는 역할을 한다. 다만 이 두 필터의 입력 데이터는 D개 샘플만큼 시간 차이가 나도록 하였다. 그 결과 표적 신호가 없는 구간에서 잔향 성분에 맞추어져 있는 적응 필터의 계수를 사용하면 표적 신호 발생 구간에서 표적 신호를 추정하지 못하기 때문에 잔향 성분은 제거되고 표적 신호 성분만 남게 된다. 적응 알고리즘으로는 계산량이 비교적 적고 효율적인 LMS (Least Mean Square) 알고리즘을 사용할 수 있다. 적응 필터와 고정된 필터 사이의 입력되는 데이터의 시간차 D는 적어도 송신되는 신호 펄스의 길이보다 길어야 한다. 적응 필터 구조에서는 고유벡터 방법 또는 선형 예측 방법 모두를 사용할 수 있다. 만약 적응 필터 부분에서 선형 예측 방법을 사용한다면 아래 식과 같아진다.

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \mu e_a(k)x(k-D-1) \quad (7)$$

$$e_a(k) = x(k-D) - y_a(k) \quad (8)$$

$$e_f(k) = x(k) - \sum_{i=0}^{N-1} w_i(k)x(k-i-1) \quad (9)$$

능동 시스템의 표적 탐지 분야에서 일반적으로 사용되는 성능 측정 방법은 검출 확률로써 이는 계수 벡터의 함수로 주어진다. 필터의 출력 파워를  $\eta$ 라 하고, 검출을 위한 문턱치를  $\alpha$ 라고 할 때 검출 확률  $P_d$ 와 오경보 확률  $P_f$

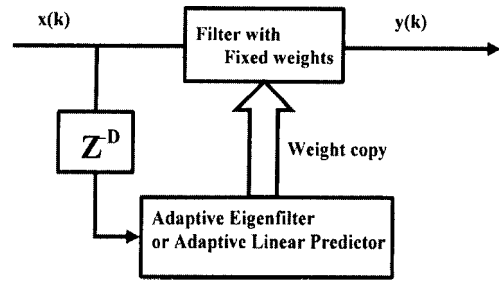


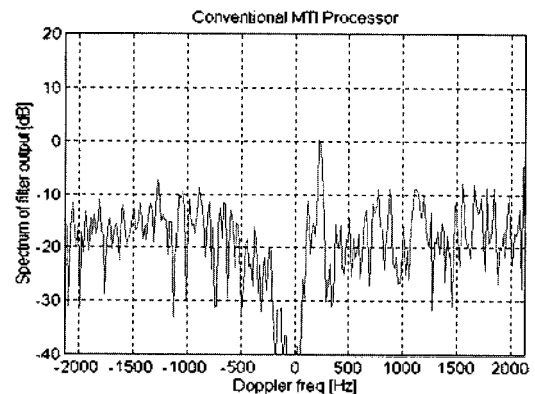
그림 1. 제안된 적응 잔향 제거 필터 구조  
Fig. 1. The proposed adaptive reverberation rejection filter structure.

는 다음 식과 같다.

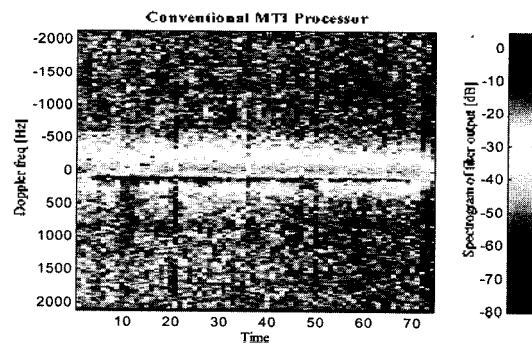
$$P_d = \int_{\alpha}^{\infty} f_{\eta}(\eta|H_1, w) d\eta = e^{-\alpha/\lambda_1} \quad (10)$$

$$P_f = \int_{\alpha}^{\infty} f_{\eta}(\eta|H_0, w) d\eta = e^{-\alpha/\lambda_0} \quad (11)$$

여기서  $f_{\eta}(\eta|H_i, w)$  ( $i=0$  또는  $1$ )는  $\eta$ 의 분포 함수로써

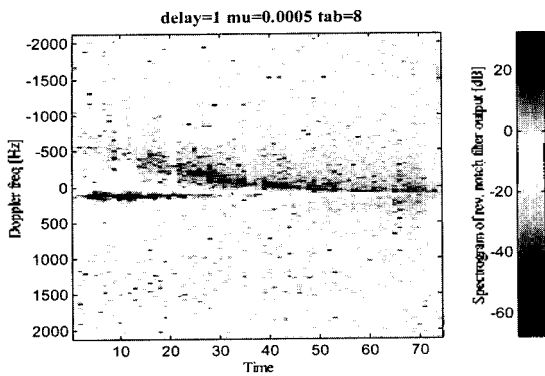


(a) 스펙트럼

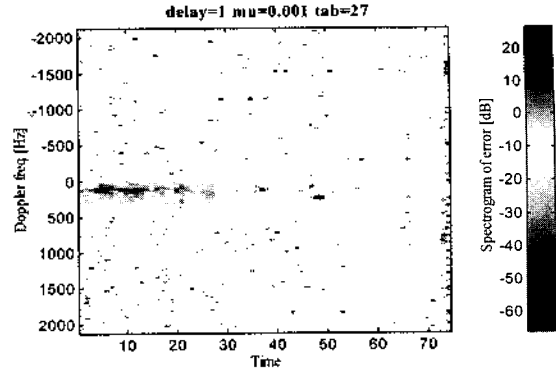


(b) 스펙트로그램

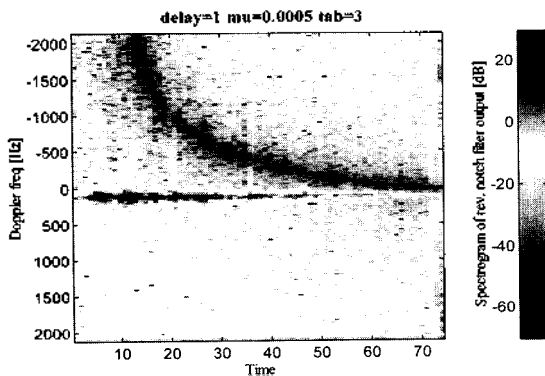
그림 2. MTI 프로세서를 적용한 결과  
(a) 스펙트럼 (b) 스펙트로그램  
Fig. 2. The results of MTI processor,  
(a) spectrum, (b) Spectrogram.



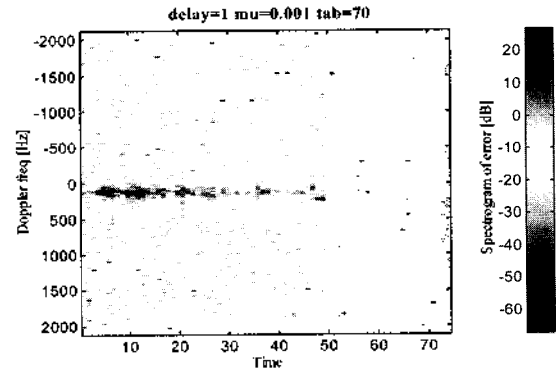
(a) 5 탭



(a) 27 탭



(b) 3 탭



(b) 70 탭

그림 3. 제안된 방법의 결과 스펙트로그램 (고유벡터 방법)  
(a) 5탭 (b) 3탭

Fig. 3. The spectrogram of the results of the proposed method (eigenvector method), (a) 5-tap, (b) 3-tap.

지수 분포를 나타내며,  $H_0$ 는 표적 성분이 없을 때이고  $H_1$ 은 표적 성분이 있는 경우이다. 그리고  $\lambda_i$ 는 각 경우의 평균값이다. 만약 eigen-filter를 적용 필터로써 사용하고 최적화된 경우  $\lambda_0$ 는 입력 데이터의 공분산 행렬 M의 최소 고유치가 되며,  $\lambda_1$ 은  $\sigma_s^2 + \lambda_0$  ( $\sigma_s^2$ 는 표적 신호의 분산)가 된다.

#### IV. 실험 및 결과 고찰

제안된 방법의 성능을 입증하기 위하여 실험을 수행하였다. 수중에서의 음속은 1522m/sec, 수심은 90m이며, 표적은 약 48 단위시간(단위시간은 표본화 시간임), 약 200Hz의 도플러 주파수를 갖는다. 그림 2에는 MTI 프로세서를 이용한 결과를 나타내었다. 표적 신호가 존재하는 부근에서 성능이 향상되고 있지 않음을 볼 수 있는데 이는 표적의 도플러 주파수가 잔향의 중심 주파수와 서로 근접하여 MTI 프로세서의 저지대역내에 있기 때문이다. 그림

그림 4. 제안된 방법의 결과 스펙트로그램 (선형 예측 방법)  
(a) 27탭 (b) 70탭

Fig. 4. The spectrogram of the results of the proposed method (linear prediction method), (a) 27-tap, (b) 70-tap.

3과 4에는 제안된 방법을 적용한 결과를 나타내었다. 그림 3에서 D는 500 샘플, 수렴 상수는 0.0005로써 고유 벡터 방법의 스펙트로그램을 나타내었다. 필터의 길이는 각각 5탭, 3탭을 사용하였다. 또한 그림 4에서 D는 500 샘플, 수렴 상수는 0.001인 선형 예측 방법의 스펙트로그램으로 필터의 길이는 27탭, 70탭을 사용하였다. 그림은 두 방법 모두 표적 존재 구간에서 잔향의 영향이 감소하고 있음을 보여주고 있으며, 27탭을 갖는 선형 예측 방법의 결과가 가장 향상된 결과를 보여 준다. 특히 고유 벡터 방법은 잔향을 제거하고 있으며, 적응 시간이 지나감에 따라 잔향의 주파수 성분에 맞춰지고 있다. 5탭보다 3탭이 보다 빠른 수렴 속도를 갖는 이유는 수렴 속도가 공분산 행렬의 고유치 분포에 비례하기 때문이다. 선형 예측 방법은 잔향을 제거하기 보다는 백색화 (whitening) 하고 있음을 보여준다. 결국 고유 벡터 방법은 출력단에서 SINR이 선형 예측 방법보다 좋지만 필터의 길이가 충분하지 않으면서 잔향과 표적의 도플러 주파수가 근접해 있는 경우 고유

백터 방법은 표적 성분도 제거할 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 일정 오경보 확률 처리 전에 잔향 잡음에 영향을 감소시키는 방법을 제안하였다. 특히, 잡음의 특성이 백색이 아닌 경우 일정 오경보 확률 처리기는 잡음 부근에서 높은 문턱치를 추정하여 표적을 검출하지 못하며, 근접한 다중 표적을 분해하지 못하는 특징이 있다. 이러한 문제점은 CW 신호에 있어서 집중적으로 발생하는데 이를 해결하기 위한 적응 대역 제한 필터를 제안하고, 적용함으로써 정확한 표적 탐지가 가능하도록 하였다. 차후 연구 방향으로는 빠른 수렴 속도를 갖는 적응 필터에 관한 연구와 더욱 다양한 환경에서의 성능 분석 및 표적 검출 기법과의 연결이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 연세대학교 정보통신 우수 대학원 지원 및 수중음향특화연구센터의 일부지원(UA-22)에 의해 이루어졌습니다.

## 참고 문헌

1. W.C. Knight, "Digital signal processing for sonar", *Proc. IEEE*, Vol. 69, no. 11, pp.1451-1506, Nov. 1981.
2. R.O. Nielsen, *Sonar signal processing*, Artech House, 1991.
3. 이구성, 김기만, 박상택, 이충용, 윤대희, "농동 소나 환경에서 일정 오경보 확률 탐지기 성능의 실험적 고찰," 한국음향학회지, 18권, 7호, pp. 3-9, Oct. 1999.
4. T.H. Glisson, "On sonar signal analysis", *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-6, no. 1, pp. 37-49, Jan. 1970.

5. H. Rohling, "Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations", *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-19, no. 4, pp. 608-621, July 1983.
6. P.P. Gandhi and S.A. Kassam, "Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 24, pp. 427-445, July 1988.
7. N. Levanon, *Radar Principles*, Wiley-Interscience, 1968.
8. Suzanne T. McDaniel, "Sea surface reverberation : a review," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 94, no. 4, pp. 1905-1920, 1993.
9. R.J. Urick, *Principles of underwater sound*, McGraw-Hill, Inc., 1975.
10. Medium effects on sonar performances, Technical Report, Thomson Sintra, 1991.

---

## 저자 약력

---

### ●성 하 중 (Ha Jong Sung)

1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (학사)  
 1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1999년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)  
 1999년 1월~현재: LG 전자 선임연구원  
 ※ 주관심분야: 이동통신 시스템, 소나/레이다 신호처리

### ●김 기 만 (Ki Man Kim)

1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 (학사)  
 1990년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1995년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)  
 1995년 3월~1996년 8월: 연세대학교 의과대학 의용공학교실 (Fellow)  
 1996년 9월~현재: 한국해양대학교 전자공학과 조교수  
 ※ 주관심분야: 소나 신호처리, 3차원 음향제어, 스마트 안테나, DSP 및 CPLD구현

### ●이 충 용 (Chungyong Lee)

1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (학사)  
 1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1995년 7월: Georgia Institute of Technology 전기·컴퓨터공학과 (Ph.D)  
 1996년~1997년: 삼성전자  
 1997년 9월~현재: 연세대학교 전기·전자공학과 부교수  
 ※ 주관심분야: 소나 신호처리, 스마트 안테나, Position Location, 음성인식

### ●윤 대 희 (Dae Hee Youn)

한국 음향학회지 제18권 7호 참조  
 현재: 연세대학교 전기·전자공학과 교수