

# 비백색 잡음 환경에서 정합필터 성능개선을 위한 백색화 기법<sup>†</sup>

(Whitening Method for Performance Improvement of the  
Matched Filter in the Non-white Noise Environment)

김 정 구\*  
(Jeong-Goo Kim)

**요 약** 비백색잡음(non-white noise)인 잔향(reverberation)이 신호탐지(signal detection)의 주 방해신호인 천해 능동소나(active sonar) 환경에서의 표적탐지는 선백색화기(pre-whitener)를 사용하여 수신신호를 백색화한 후 백색잡음에서 최적 탐지기(optimum detector)인 정합필터를 사용한다. 그러나 이 방법은 잔향이 비정상(non-stationary) 특성을 가지기 때문에 구현이 매우 힘들다. 기존의 연구에 따르면 이러한 잔향은 지역적 정상상태(local stationary)라고 가정할 수 있다. 본 논문에서는 먼저 잔향신호의 지역적 정상상태의 범위를 추정(estimation)하고, 이 추정을 바탕으로 비백색 잔향신호 환경에서 선백색화 블럭 정규화 정합필터(pre-whitening block normalized matched filter)의 성능을 개선할 수 있는 선백색화 기법을 제안하였다. 제안된 잔향신호의 백색화 기법은 표적신호 전·후의 잔향신호를 사용하여 처리블럭(processing block)을 백색화하기 때문에 기존의 백색화 기법보다 우수한 성능을 보였다. 제안된 백색화 기법을 이용한 탐지기의 성능을 평가하기 위해 우리나라 인근해역에서 실측된 데이터를 이용하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 모의실험 결과 제안된 기법을 사용한 탐지기는 기존의 백색화 기법을 사용한 탐지기보다 우수한 탐지성능을 보였다.

**핵심주제어** : 능동소나, 정합필터, 비백색잡음, 백색화기법,

**Abstract** In shallow water active sonar environment, reverberation which is a non-white noise is one of the main source of performance degradation of target detection. In this case, the received signal is whitened before applying matched filter known as an optimum filter in the presence of white noise. However implementation of this method is very difficult because of the non-stationary characteristic of reverberation. Traditionally reverberation is assumed local stationary. In this paper, we estimate a range of stationary of reverberation signal, and then propose a pre-whitening method which improve the performance of pre-whitening block normalized matched filter in presence of non-white reverberation noise. Proposed whitener shows better whitening performance than traditional whitener because it use later as well as before reverberation of target signal. To evaluate performance of the proposed whitener, an actual measurement data sampled at the East-Sea is used for computer simulation. The target detector with new whitener is shown better performance than detector with traditional whitener.

**Key Words** : Active sonar, Matched filter, Non-white noise, Whitening.

<sup>†</sup> 이 논문은 2006년 부산대학교 과제 연구비에 의해 연구되었음.

\* 부산대학교 정보컴퓨터공학부

## 1. 서론

해수면, 해저면, 해수에 의한 신호의 반사, 확산, 그리고 회절의 영향으로 잔향이 존재하는 수중에서 낮은 도플러 천이를 가지는 능동 소나의 신호 탐지는 매우 어렵다고 알려져 있다[1]. 이러한 상황에서 신호탐지가 어려운 이유는 첫째, 잔향이 송신신호에 의해 발생되기 때문에 목표물 스펙트럼과 잔향 스펙트럼이 매우 높은 상관관계를 가진다 [1][2]. 둘째, 사용하는 탐지기가 정합필터를 사용한다는 것이다. 정합필터는 백색잡음에서 신호 대 잡음비를 최대화 하는 최적 탐지기로 알려져 있다 [3]. 그러나 잔향신호는 일반적으로 비백색 스펙트럼을 가지며, 비정상 특성을 가진다. 비백색, 비정상 잡음의 환경에서 정합필터는 신호 대 잡음비를 최대화 할 수 없어 신호탐지 성능이 매우 열화될 수 있다.

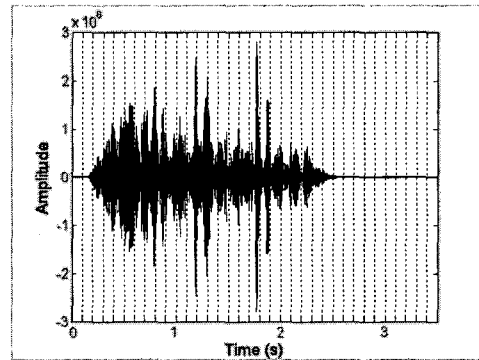
이러한 단점을 보완하기 위해 일반적으로 AR(auto-regressive) 모델을 이용한 선백색화기(pre-whitener)를 사용하여 수신신호의 잔향신호를 백색화 시키고 정합필터를 사용하여 신호를 탐지한다. 기존의 잔향신호 백색화기법은 우선 수신신호를 블록화 하여 인접블록간의 잔향을 지역적 정상화(local stationary)를 가정하여 수행하게 된다 [4][5]. 기존의 경우 현재 탐지하고자 하는 블록과 이전 블록간의 정상화를 이용하여 잔향을 백색화 하게 된다. 하지만, 탐지블록과 정상성을 유지하는 범위 안에서 가능한 많은 블록을 사용 한다면 좀 더 정확한 AR 모델을 구할 수 있다.

## 2. 백색화 이론

백색화 기법을 이용한 탐지알고리즘은 우선 그림 1과 같이 수신된 신호를 송신된 신호와 같은 크기의 블록으로 나눈다. 여기서 점선은 나누어진 블록을 나타내며, 수신된 신호는  $y(t)$ ,  $k$  번째 블록의 신호는  $y_k(t)$ 라고 하자.

먼저  $k-1$  번째 블록에서는 표적이 탐지되지 않았다고 가정하고,  $k$  번째 블록에 표적의 존재 유무를 판단하는 탐지문제를 고려한다. 우선  $k$  번째 블록을 백색화 시키기 위해서는  $k-1$  번째 블록에서

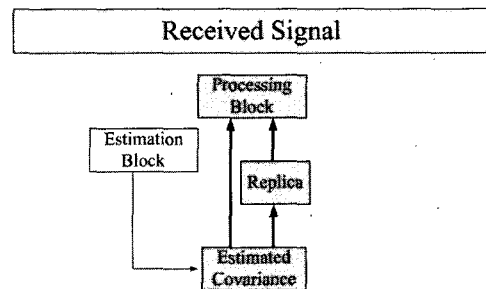
$k$  번째 블록의 공분산(covariance)을 추정해야한다 [4][5]. 이는 인접한 두 블록사이에는 정상성을 지니고 있다는 가정을 이용한다. 여기서 추정된 공분산 값을 이용하여  $k$  번째 블록에서의 신호를 백색화 시킨다. 여기서 백색화된 수신 신호를 정합필터에 통과시킨다. 만약 표적이 검출되지 않았다면 다음 블록으로 위와 같은 과정을 수행한다.



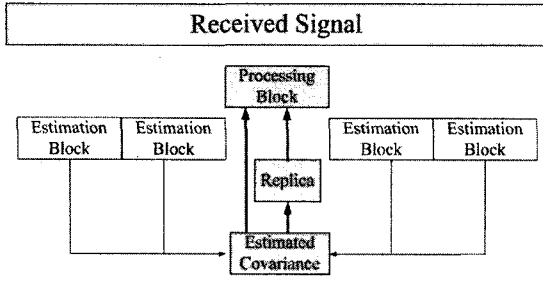
<그림 1> 블록화 된 잔향 신호

## 3. 향상된 백색화 기법

탐지기에서 표적신호에 대한 잔향신호의 추정은 가능한 많은 수의 데이터를 사용 할수록 처리블록의 공분산을 정확하게 추정할 수 있다. 그러므로 전술한 것처럼 이전 블록만을 사용하는 것이 아니라, 정상성이 유지되는 범위 안에서 가능한 많은 블록을 이용하여 잔향의 공분산을 추정하게 되면, 현재 처리 블록을 백색화 하는데 필요한 공분산을 보다 정확히 추정할 수 있다.



<그림 2> 기존 선백색화 과정



<그림 3> 제안된 선백색화 과정

그림 2는 기존의 선백색화 과정으로 잔향의 공분산을 추정하기 위해 오직 처리블록의 이전 블록만을 사용하고 있으며[4][5], 그림 3은 다수의 블록을 이용하여 잔향의 공분산을 추정하는 것을 나타내고 있다.

제안된 백색화 기법에서  $k$ 번째 블록의 백색화 필터를 구현하는 방법은 다음과 같다. 현재 처리블록을  $k$ 번째 블록이라고 가정한다. 우선 공분산을 추정하기 위하여  $k$ 번째 블록과 정상성을 유지하는 범위 내의 모든 블록들을 이용하여 잔향의 공분산을 추정하고 이 추정 값으로 추정 블록신호에 AR (Auto Regressive) 모델을 적용한다. 이 때 인접 블록간의 정상성의 추정은 아래 표현된 Itakura 거리식을 이용한다.

$$d_I(s_1, s_2) = \ln \left[ \int_{-\pi}^{+\pi} \frac{1}{2\pi} \frac{s_1(\lambda)/\sigma_1^2}{s_2(\lambda)/\sigma_2^2} \right] \quad (1)$$

여기서  $\sigma_i^2$ 은  $i$ 번째 신호블록의 추정분산 오류를 나타내고  $s_i(\lambda)$ 는  $i$ 번째 신호블록의 전력 스펙트럼 밀도를 나타낸다.

Itakura 거리 0.2를 기준으로 거리가 0.2이하의 블록들은 정상성을 가진다고 추정하고, Itakura 거리가 커질수록 높은 비정상성을 가진다고 추정한다[4].

컴퓨터 모의실험을 위하여 한 지점에서 360도 각 방위에 대해 총 60개의 채집된 신호를 사용하였으며, 표적신호는 60개의 채집된 신호 중 1개의 신호에 존재하는 것으로 가정하였다.

컴퓨터를 이용한 실험결과 모든 잔향신호에서 동일한 결과는 보이지 않지만 우리나라 인근해역에서 채집된 신호에 대해서는 처리블록을 포함하

여 약 5개 블록에 대해서는 정상성을 유지함을 보였다. 따라서 본 논문에서는 처리블록 전·후 각각 2개 블록을 추정블록으로 사용하였다.

추정블록의 신호들을  $x_k(t)$ 라 하면 추정된 AR 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x_k(t) = - \sum_{j=1}^{\hat{p}_k} \hat{a}_k(j) x_k(t-j) + \varepsilon_k(t) \quad (2)$$

여기서 수신신호에 포함된  $\varepsilon_k(t)$ 는 백색잡음을 의미한다. 그리고 추정된  $\hat{a}_k$ 는 AR모델의 계수를  $\hat{p}_k$ 는 AR모델의 차수를 나타낸다. 그리고 계수,  $\hat{a}_k$ 는 수정된 공분산 기법(modified covariance method)를 사용하여 추정하며, AR모델의 차수,  $\hat{p}_k$ 는 아래에 표현된 최소 묘사 길이(minimum description length; MDL)[6]를 통하여 추정하게 된다.

$$MDL(p) = N \ln \sigma_{wp}^2 + p \ln N \quad (3)$$

식 (3)에서  $\sigma_{wp}^2$ 는 AR모델에 백색잡음 인가시의 추정분산을 나타내며,  $N$ 은 신호의 길이를 나타낸다.

이렇게 구해진 AR모델을 사용하여, 백색화 필터를 구현하면 다음 식으로 표현할 수 있다[7].

$$w_k(z) = 1 + \sum_{j=1}^{\hat{p}_k} \hat{a}_k(j) z^{-j} \quad (4)$$

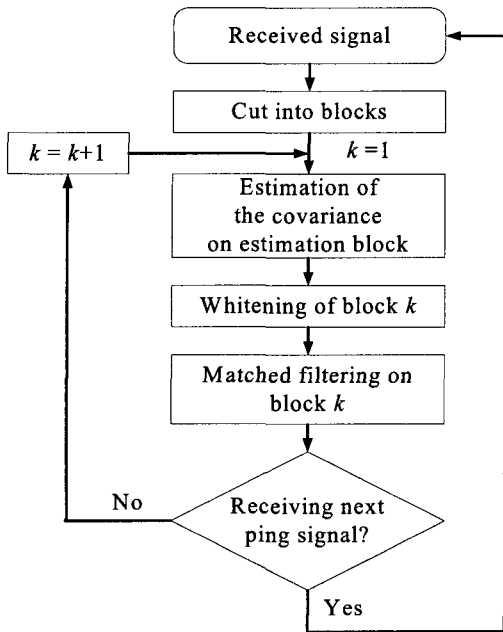
식 (4)의 계수를 가지는 필터를 사용하여  $k+1$  블록에서 신호를 백색화시키고, 백색화된 신호는 식 (5)으로 나타낼 수 있다.

$$z_{k+1}(t) = w_k(y_{k+1}(t)) \quad (5)$$

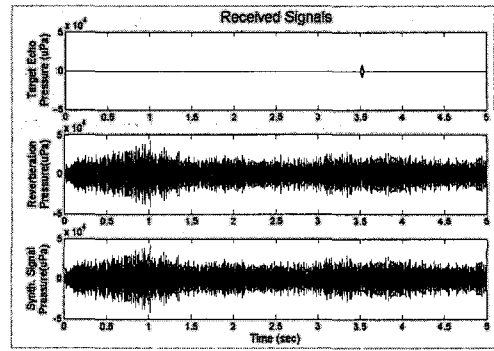
따라서 표적의 탐지는 식 (5)에서 표현된 신호  $z_{k+1}(t)$ 를 사용하여 백색잡음 환경에서의 탐지문제로 단순화 시킬 수 있다.

표적탐지에서 잔향신호가 포함된 수신신호는 식 (5)을 이용하여 백색화된 신호를 다양한 도플러 주파수를 가진 정합필터에 통과 시켜 표적을 탐지

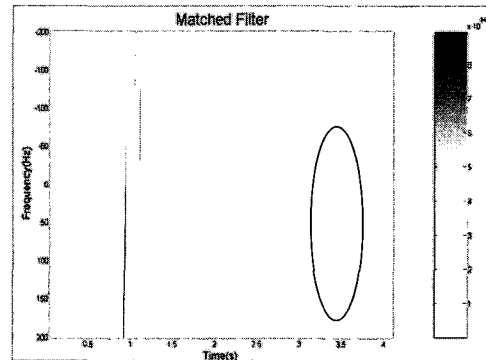
하게 된다. 그림 4는 이러한 과정을 블록 다이어그램으로 표현한 것이다.



<그림 4> 선백색화 탐지과정



<그림 5> 모의실험에 사용된 신호



<그림 6> 정합필터 탐지기의 출력

#### 4. 모의 실험

제안된 탐지기의 성능을 알아보기 위하여, 근해 상에서 능동소나를 이용하여 실험한 신호를 이용하였다. 그림 5의 첫 번째 그림은 모의 표적 신호이며, 두 번째는 실제 수신된 잔향을 나타내고 세 번째 신호는 모의 표적신호와 실제 잔향이 합쳐진 신호를 나타낸다. 사용된 신호는 펄스의 길이가 50ms인 LFM (linear frequency modulated) 펄스 신호가 사용되었으며, 신호의 중심 주파수는 7400 Hz 이며, 600Hz의 주파수 폭을 가지고 있다. 그리고 모의 표적의 위치는 3.5초로 지정하였으며, +50Hz의 도플러 주파수를 가지도록 설정 하였다. 그림 5의 3번째 그림에서 신호 대 잔향비(signal to reverberation power ratio)는 열악한 환경인 -6dB가 되도록 설정하였다.

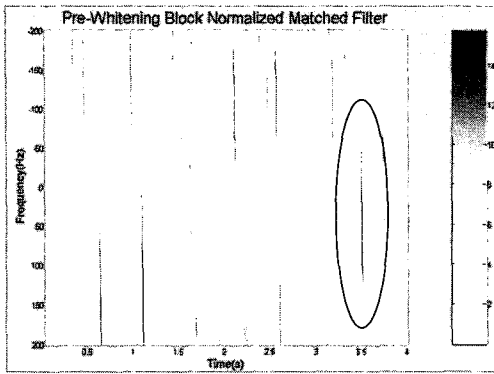
그림 6은 선백색화 과정을 거치지 않고 정합필터 탐지기를 이용한 결과를 나타내고 있다. 여기서 가로축은 시간을 세로축은 도플러 주파수를 나타내고 있으며, 세로 막대기는 출력전력의 크기를

나타내고 있다. 그리고 원은 표적의 위치를 나타낸다. 잔향 역시 표적 신호와 마찬가지로 송신신호와 같은 특성을 나타내며, 표적 신호보다 큰 크기를 가지기 때문에 1초 부분의 아주 큰 잔향이 마치 표적처럼 출력이 되고 있다. 표적은 잔향에 비해 매우 작은 크기를 가지므로 그림 6에서 표적을 찾는 것은 매우 어렵다.

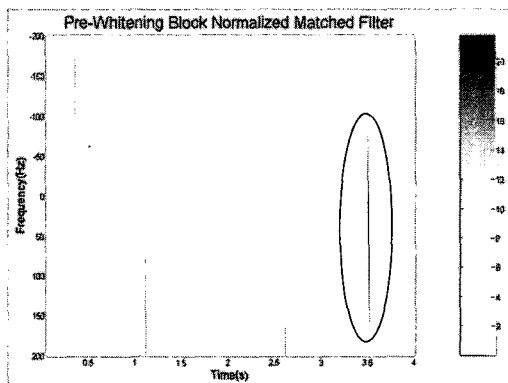
그림 7은 기존의 선백색화 필터를 사용하는 정합필터 탐지기의 출력 값이다. 그림 7에서는 백색화 과정을 통하여 그림 6에서 보이는 잔향이 사라진 것을 확인 할 수 있다.

그러나 여전히 3.5초에 위치하는 표적과 비슷한 크기를 가지는 표적으로 오인할 수 있는 신호(false target)들이 존재하는 것을 확인 할 수 있다.

그림 8은 제안된 선백색화 과정을 거친 후 정합필터 탐지기를 수행한 결과이다. 그림 8에서는 그림 7에 나타나는 false target이 대부분 사라진 것을 확인 할 수 있으며, 표적 신호의 전력이 가장 크게 나타나므로 표적 탐지가 그림 6과 7에 비해 용이해 졌음을 알 수 있다.



<그림 7> 기존 선백색화 탐지기 출력



<그림 8> 제안된 선백색화 탐지기 결과

## 5. 결론

본 논문에서는 비백색 잡음 환경에서 정합필터의 성능개선을 위한 백색화 기법을 제안하였다. 제안된 백색화 기법을 천해환경의 능동 소나 표적 탐지에서 선백색화 블록 정규화 정합필터의 성능을 우리나라 인근해역에서 채집된 잔향신호를 사용하여 모의 실험하였다. 또한 제안된 백색화 기법을 이용한 탐지기의 성능을 기존의 백색화 기법과 비교·분석하였다.

그 결과 우리나라 인근해역의 상황에서는 표적 신호의 길이가 50ms 인 경우 표적신호 길이의 약 5배에 해당하는 신호 길이에 대해 잔향신호의 정상성이 유지되었다. 따라서 제안된 표적 탐지에서는 처리블록 전·후 각각 2개의 블록을 이용하여 처리블록의 공분산을 추정하였다. 제안된 백색화 기법을 사용한 표적 탐지는 기존의 백색화 기법보다 우수한 성능을 보였다.

## 참고 문헌

- [1] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1983.
- [2] R. O. Nielsen, *Sonar Signal Processing*, Artech House, Inc., Boston, MA, 1991.
- [3] B. Sklar, *Digital Communications*, 2nd ed., Prentice-Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 2001.
- [4] V. Carmillet, P. O. Amblard, and G. Jourdain, "Detection of phase or frequency modulated signal in reverberation noise," *JASA*, vol. 105, no. 6, pp. 3375-3389, June 1999.
- [5] G. Ginolhac and G. Jourdain, "Detection in presence of reverberation," *Proc IEEE OCEANS 2000*, Providence, RI, vol. 2, pp. 1043-1046, Sep. 2000.
- [6] S. Kay, *Modern Spectral Estimation*, Prentice-Hall PTR, Englewood Cliff, NJ, 1987.
- [7] S. Kay and J. Salisbury, "Improved active sonar detection using autoregressive prewhiteners," *JASA*, vol. 87, no. 4, pp. 1603-1611, Apr. 1990.



김 정 구 (Jeong-Goo Kim)

- 종신회원
- 1988년 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1991년 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)

- 1995년: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 1995년 ~ 2005년 밀양대학교 정보통신공학과 부교수
- 1999년 ~ 2001년 UCSD 교환교수
- 2006년 ~ 현재 부산대학교 정보컴퓨터공학부 부교수
- 관심분야: 부호이론, 통신시스템, 방송전송기술