

논문 2009-46TC-10-2

비백색 잡음 환경에 적합한 스펙트럼 기반 탐지기

(Spectrum Based Detector in Non-white Noise Environment)

유 석 근*, 주 언 경**

(Seog Kun Yu and Eon Kyeong Joo)

요 약

정합필터(matched filter)는 백색잡음 환경에서 출력 침투 신호전력 대 평균 잡음전력의 비를 최대화하는 최적 탐지기이다. 하지만 비백색 잡음 환경에서는 정합필터를 이용하여 최적 탐지성능을 얻을 수 없다. 따라서 정합필터 이전에 백색화 과정을 수행하는 선백색화 정합필터(pre-whitening matched filter) 탐지기가 사용된다. 그리고 이것의 성능은 백색화 과정에 사용되는 비백색 잡음모델의 추정 정확성에 크게 영향을 받는다. 성능을 높이기 위해서는 정확한 잡음모델을 추정해야 하지만 이는 계산 복잡도를 많이 증가시킨다. 그러므로 본 논문에서는 기존 선백색화 정합필터 탐지기와 유사한 복잡도에서는 우수한 성능을 보이며, 유사한 성능에서는 낮은 복잡도를 보이는 스펙트럼 기반의 탐지기를 제안한다. 그리고 제안된 탐지기의 성능과 복잡도를 기존 탐지기와 비교하고 이를 분석한다.

Abstract

The MF(matched filter) is the optimum signal detector that maximizes the output instantaneous signal power to average noise power ratio in white noise environment. But it cannot give the optimum detection performance if the background noise is not white. So, the whitening process preceding the matched filter is needed in the conventional detector which results in a PWMF(pre-whitening matched filter). Its performance is mainly affected by the estimation accuracy of non-white noise model which is used in the whitening procedure. To estimate more accurate model to improve performance, the computational complexity is increased. Therefore, a spectrum based detector which shows better performance than the PWMF under the similar complexity condition or less complexity under the similar performance condition is proposed in this paper. And its performance and complexity are analyzed and compared with the conventional PWMF.

Keywords : 비백색잡음, 스펙트럼 기반 탐지기, 선백색화 정합필터.

I. 서 론

탐지기의 전달함수, $H(w)$ 가 다음 수식을 만족하면 출력 침투 신호전력 대 평균 잡음전력을 최대화 할 수 있다^[1]. 여기서 $P(w)$ 는 배경 잡음의 전력 스펙트럼밀도이며, $S(w)$ 는 신호 성분의 스펙트럼을 나타낸다. 그리고 위첨자 *는 켈레 복소수를 의미한다.

$$H(w) = \{S^*(w)/P(w)\}e^{-jw\tau} \quad (1)$$

백색 잡음 환경에서는 $P(w)$ 가 상수이므로 최적 탐지기는 정합필터가 된다. 그러나 비백색 잡음 환경에서 정합필터로는 최적의 성능을 얻을 수 없다. 따라서 비백색 수신신호를 먼저 백색화하는 선백색화 정합필터 탐지기가 사용된다^[2~3]. 백색화 과정을 수행하기 위해서는 먼저 잡음 모델을 추정해야 하며 일반적으로 AR(auto-regressive)모델을 이용한다. 이 경우 반복 계산 과정을 통해 모델을 추정하므로 잡음 모델의 정확도가 증가할수록 계산 복잡도도 증가한다.

본 논문에서는 선백색화 정합필터 탐지기와 유사한 성능을 유지하면서 계산 복잡도는 줄일 수 있는 탐지기를 제안한다. 제안된 탐지기는 수신신호의 스펙트럼을 이용하여 잡음의 전력 스펙트럼밀도를 추정하고, 이를

* 학생회원, ** 평생회원, 경북대학교 전자전기컴퓨터 학부

(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

접수일자: 2008년8월5일, 수정완료일: 2009년10월14일

수식 (1)의 $P(w)$ 에 대입하여 최적 시스템의 전달함수 $H(w)$ 를 얻는다. 백색화 과정과는 다르게 주파수 영역에서 $P(w)$ 를 추정하므로 스펙트럼 기반 탐지기라 한다. 본 논문에서는 제안된 스펙트럼 기반 탐지기의 복잡도와 성능을 분석하고, 모의실험을 통해 기존 탐지기 와 비교한다.

II. 백색화 과정

비백색 잡음 신호 $x(t)$ 의 n 번째 표본 $x[n]$ 은 일반적으로 AR모형을 이용하여 다음과 같이 표현 할 수 있다^[4-6].

$$x[n] = -\sum_{j=1}^{\hat{p}} \hat{a}[j]x[n-j] + w[n] \quad (2)$$

여기서, $\hat{a}[j]$ 는 추정된 AR모델의 j 번째 계수, \hat{p} 는 추정된 차수이며 $w[n]$ 은 백색잡음이다. 그리고 $[\cdot]$ 는 이산 신호를 나타낸다. AR모델의 계수와 차수를 이용하여 PEF(prediction error filter)를 구성 할 수 있으며 PEF는 $x[n]$ 을 입력하면 $w[n]$ 을 출력하는 백색화 필터의 역할을 한다^[4-5].

백색화 필터의 성능을 최대화하기 위해서는 AR모델을 이용하여 추정된 비백색 잡음과 실제 잡음 간의 추정오류제곱의 평균값(average prediction error power)을 최소화해야 한다^[4-6]. 이 값을 최소화하기 위한 차수는 MDL(minimum description length) 기준식을 통해 추정한다. MDL 기준식은 차수를 변화시켜가며 추정오류제곱의 평균값과 동일한 $w[n]$ 의 분산값^[4-6]을 계산하여 그 값이 최소가 되는 차수를 최적의 차수로 선택하는 방법이다^[2-3]. 그리고 계수는 수정 공분산 기법을 통해 추정한다^[2-6]. 획득된 AR모델의 차수와 계수를 이용하여 백색화 필터의 전달함수를 얻을 수 있다.

III. 제안된 탐지기의 전달함수 추정과정

수신측은 탐지해야 할 신호의 스펙트럼인 $S(w)$ 를 이미 알고 있다고 가정한다. 그러므로 잡음 전력 스펙트럼밀도인 $P(w)$ 만을 추정할 수 있다면 식(1)에 의해 비백색 잡음 환경에서 최적인 전달함수 $H(w)$ 를 구할 수 있다. $P(w)$ 는 다음 과정을 통해 얻을 수 있다.

우선 수신된 신호를 N 개의 블록으로 나눈다. 그리고 연속된 인접 블록은 정상성이 유지된다고 가정한다. 또

한 k 번째 블록의 잡음 전력 스펙트럼밀도인 $P_k(w)$ 를 얻기 위해서는 이전의 $k-1$ 번째 블록까지는 탐지하여야 할 신호성분이 없다고 가정한다. 따라서 $k-1$ 번째 블록의 전력 스펙트럼밀도는 정상성에 의해 k 번째 블록의 잡음 전력 스펙트럼밀도인 $P_k(w)$ 와 같다. $k-1$ 번째 블록의 전력 스펙트럼밀도는 블록의 자기상관 함수(auto-correlation function)를 구한 후, 구해진 자기상관 함수의 푸리에 변환을 통해 얻을 수 있다. 그 후, $S^*(w)$ 를 획득한 잡음 전력스펙트럼밀도로 나누어 k 번째 블록에서의 최적 전달함수 $H_k(w)$ 를 추정한다.

IV. 두 탐지기의 복잡도 비교

MDL 기준식을 계산하기 위해서 p 의 차수를 갖는 AR모델에서의 $w[n]$ 의 분산인 $\hat{\sigma}_p^2$ 를 얻어야 한다. $\hat{\sigma}_p^2$ 을 계산하기 위해서 필요한 AR모델의 계수들은 수정 공분산 기법을 통해 추정 할 수 있다. 따라서 p 차수를 갖는 AR모델의 추정 계산 복잡도는 표 1과 같이 수정 공분산 기법의 복잡도와 $\hat{\sigma}_p^2$ 을 계산하기 위한 복잡도의 합으로 나타낼 수 있다.

수정 공분산 기법의 복잡도는 $p \times p$ 크기를 갖는 역행렬을 가우스-조단 소거법(Gauss-Jordan elimination)^[7]을 이용하여 계산하기 위한 복잡도와 그 외의 연산을 위한 복잡도의 합으로 표현된다. 그 외의 연산의 복잡도란 역행렬 계산을 위한 연산 외에 사용된 덧셈과 곱셈의 수의 합을 나타낸다. $\hat{\sigma}_p^2$ 을 얻기 위한 복잡도 역시 사용된 덧셈과 곱셈의 수의 합으로 표현된다^[2-3].

AR모델 추정 복잡도는 차수 p 와 한 블록의 표본 수

표 1. 각 블록에서의 AR-모델 추정 복잡도
Table 1. Complexity of AR-model estimation at each block.

Processing		Complexity
Modified covariance method	$(p \times p)$ inverse matrix	$O(p^3)$
	The rest operation	$O(2p^3) + O(2p^2n_s)$
$\hat{\sigma}_p^2$ computation		$O(4p^2) + O(2pn_s)$

$$(p = 1, 2, \dots, m)$$

표 2. 각 블록에서의 $P(w)$ 추정 복잡도
Table 2. Complexity of $P(w)$ estimation at each block.

Processing	Complexity
ACF	$O(0.5n_s^2)$
$P(w)$ calculation (2^l point-FFT)	$O(l \log_{10} l)$

$$l = 2^{\lceil \log_2 2n_s - 1 \rceil}$$

n_s 의 영향을 받는다. 최적의 차수와 계수를 추정하기 위해서 p 를 1에서부터 m 까지 변화시켜가며 MDL 기준식을 구하고 그 중 최소값을 가지는 p 의 값을 최적 차수로 선택한다^[2~6]. m 은 최적 차수를 선택하기 위한 검사 범위의 최대값을 뜻한다. 그러므로 AR모델을 추정하기 위한 전체 복잡도는 표 1에서 p 를 1에서 m 까지 변화시켜가며 구한 복잡도 들을 모두 합하여 얻을 수 있다.

표 2는 $P(w)$ 를 추정하기 위한 계산 복잡도를 나타내며 ACF 계산을 위한 복잡도와 이를 FFT(fast Fourier transform)하기 위한 복잡도로 구성된다.

ACF의 복잡도도 사용된 덧셈과 곱셈의 합으로 표현된다. 그리고 FFT의 복잡도는 $O(l \log_{10} l)$ ^[8]으로 표현되며 l 은 FFT의 표본수로서 $2^{\lceil \log_2 2n_s - 1 \rceil}$ 가 된다. 여기서 $[x]$ 는 x 보다 큰 가장 작은 정수를 의미한다. $P(w)$ 추정 복잡도는 n_s^2 에 비례하므로 n_s 가 적어질수록 복잡도는 빠르게 감소한다. 그러므로 좀 더 낮은 주파수로 하향 표본화(down sampling)를 수행하면 큰 폭으로 그 복잡도를 감소시킬 수 있다. 반면에, AR모델 추정 복잡도는 m 의 크기에 주로 영향을 받는다. 그리고 그 신호에 가장 적합한 AR모델의 차수를 선택하기 위해서는 가능한 m 의 값을 증가시켜야 한다.

V. 성능 비교 및 분석

제안된 스펙트럼 기반 탐지기의 성능과 복잡도를 기존의 선백색화 정합필터 탐지기와 비교하기 위해서 Matlab을 통해 구현된 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 사용된 컴퓨터는 메모리가 1Gbyte이며 CPU 클럭이 3GHz인 펜티엄 4 프로세서를 탑재하고 있다. 모든 모

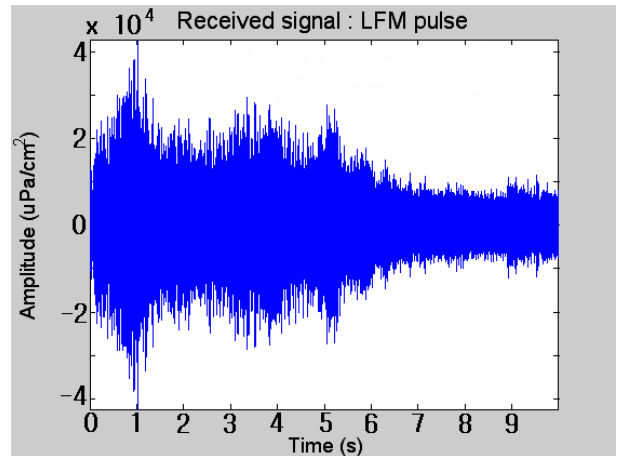


그림 1. 천해상에서 획득한 수신 신호.
Fig. 1. The received signal in a shallow sea.

의실험은 실제 천해 환경에서 LFM(linear frequency-modulated)^[9~10]펄스를 이용해 획득한 능동 소나 수신 신호를 사용하여 수행 되었다. 천해 능동 소나 수신 신호는 대표적 비백색 잡음 환경으로 비정상 특성을 가지고 있다. LFM 펄스의 중심 주파수는 7,400Hz, 펄스폭은 50ms 그리고 주파수범위는 600Hz이다. 그림 1은 31,250Hz로 표본화된 천해 능동 소나 수신신호이다. 탐지해야 할 표적 신호는 3.5초에 위치하며 +50Hz의 도플러 주파수를 가진다. 이 때 입력 SRR(signal to reverberation ratio)은 -6dB로 잔향에 비해 표적 신호의 크기가 매우 작으므로 그림을 통해 표적신호의 유무를 판단하기 어렵다.

수신신호는 탐지과정의 복잡도를 간소화하기 위해 기저대역으로 옮긴 후, 4,096Hz로 하향 표본화하였다. 각 탐지기가 충분한 탐지 정밀도를 갖게 하기 위해서 인가된 수신신호를 각 블록 간에 2ms의 시간지연을 갖는 5,000개의 겹쳐진 블록으로 나누었다. 그리고 각 블록의 길이는 송신 펄스폭과 같다. 그러므로 한 블록의 표본 수 n_s 는 205이다.

수신신호가 비정상적 특성을 가지고 있으므로, 지역적 정상성^[5~6]이 유지되는 범위는 AR모델과 $P(w)$ 의 추정 정확도에 영향을 주어 탐지기의 성능을 좌우한다. 실험 결과, 본 수신신호에서는 탐지수행 블록과 겹치지 않는 앞 2개, 뒤 2개 모두 총 4개의 추정블록을 이용하여 AR모델과 $P(w)$ 를 추정하였을 때 각 탐지기가 최대 성능을 가졌다^[11]. 그러므로 본 논문에서는 모두 4개의 추정블록을 이용하였다. 그리고 사용된 수신신호에서 MDL 기준식 계산을 통해 획득된 최적의 차수는 각 블

록에서 5~35의 다양한 값을 가졌다. 따라서 정확한 잡음 모델을 추정하기 위해서는 차수 추정 범위의 최대값 m 을 35이상으로 설정하여야 한다. 표 3은 n_s 가 205일 때, m 값에 따른 AR모델 추정 복잡도와 $P(w)$ 추정 복잡도를 나타낸다.

4개의 추정블록을 사용하였으므로 각 복잡도는 표 1과 2에 m, n_s 값을 대입하여 구한 결과의 4배가 된다. m 이 7인 AR모델의 추정 복잡도는 94,388로 $P(w)$ 추정 복잡도 89,599와 가장 유사하였으며 정확한 잡음 모델을 추정하기 위해서 m 을 40으로 충분히 크게 하였을 경우에는 계산 복잡도가 2,984,000로 나타나 제안된 경우 보다 약 33배가 되었다.

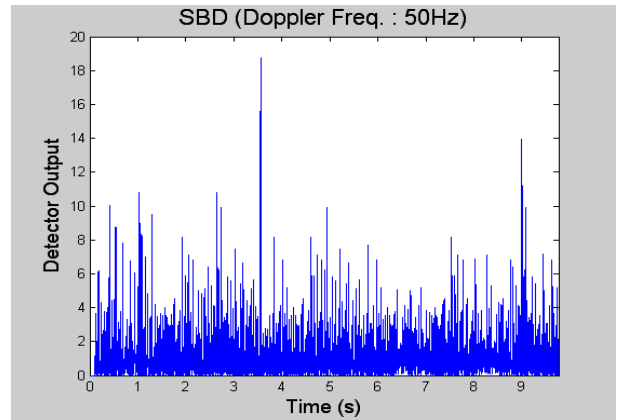
각 탐지기는 표적의 위치와 속도를 추적하기 위해 -200Hz에서 200Hz의 도플러 주파수에서 1Hz 간격마다 같은 과정을 수행하였다. 각 탐지기에서 표적의 속도와 같은 도플러 주파수가 50Hz인 경우에 표적 신호

표 3. $n_s=205$ 일 경우 AR모델과 $P(w)$ 의 추정 복잡도

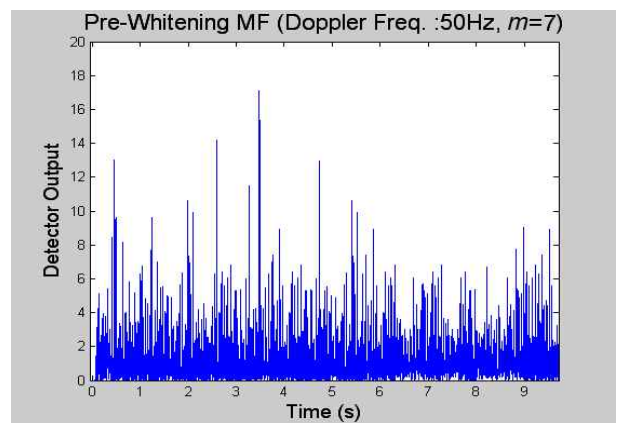
Table 3. Complexity of AR model and $P(w)$ estimation when $n_s=205$.

Estimation method	m	complexity
AR model	5	50,300
	6	70,608
	7	94,388
	8	121,664
	⋮	⋮
	36	2,402,208
	37	2,541,308
	38	2,684,624
	39	2,832,180
	40	2,984,000
$P(w)$	•	89,599

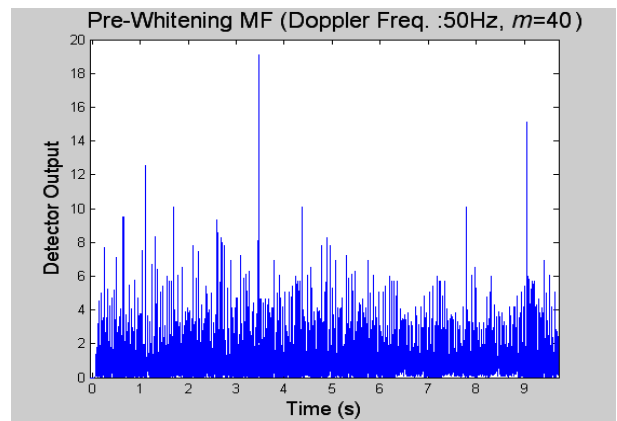
number of the estimation blocks = 4



(a)



(b)



(c)

그림 2. 제안된 탐지기와 기존 탐지기의 성능 ($n_s=205$)
 (a) 제안된 탐지기
 (b) 기존 탐지기 (유사한 복잡도, $m=7$)
 (c) 기존 탐지기 (유사한 성능, $m=40$)

Fig. 2. The performance of the proposed and conventional detector. ($n_s=205$)
 (a) Proposed detector
 (b) Conventional detector ($m=7$)
 (c) Conventional detector ($m=40$)

의 침투값이 가장 크게 나타났다. 그리고 수신신호에서 잡음의 대부분이 잔향으로 이루어져 있으므로 표적에 의해 발생된 침투전력 값과 평균 잡음전력 값을 이용하여 출력 SRR을 획득 할 수 있다. 그림 2는 도플러 주파수가 50Hz인 경우 여러 탐지기의 성능을 나타낸다.

a)는 제안된 탐지기의 결과이다. 표적신호의 침투값이 3.5초에 정확하게 나타났다. 그리고 잔향성분이 많이 제거되어 표적신호의 침투값이 대부분의 잔향성분 침투값 보다 2배 이상의 값을 보임을 알 수 있다. 이때의 출력 SRR은 10.9dB이었으며 한 블록에서 탐지 결과를 출력하는데 평균적으로 2.7ms가 소요되었다.

b)는 제안된 탐지기와 유사한 복잡도를 갖는 m 이 7인 기존 탐지기의 결과이다. 제안된 탐지기에 비해 잔향에 의한 영향이 많이 남아 있으며 표적 신호의 침투값도 작았다. 출력 SRR 역시 제안된 탐지기보다 1.2dB 작은 9.7dB로 나타났다. 그리고 한 블록의 결과를 얻는데 평균적으로 3.8ms의 시간이 필요하여 제안된 탐지기와 유사한 복잡도를 가짐을 알 수 있다. 이 경우, 추정 범위 최대값이 충분하지 못하여 백색화가 제대로 수행되지 않은 것으로 판단된다.

반면에 m 을 40으로 증가시킨 c)의 경우는 충분히 큰 m 을 설정하여 제안된 탐지기와 마찬가지로 잔향성분 대부분이 제거되었다. 그리고 표적 신호 성분은 최대값을 가지고 표적의 위치도 정확하게 나타났으며 출력 SRR도 제안된 탐지기와 유사한 11.1dB로 나타났다. 그러나 한 블록의 결과를 출력하는데 평균적으로 약 61.2ms이 필요하여 제안된 탐지기보다 복잡도가 많이 증가함을 알 수 있다.

VI. 결 론

비백색 잡음 환경에서 기존의 정합필터를 사용하기 위해서는 먼저 AR모델을 사용하여 수신신호를 백색화하는 과정이 필요하다. 우수한 성능을 얻기 위해서는 더 정확한 AR모델이 요구되며 이를 위해서는 계산 복잡도가 크게 증가된다. 따라서 본 논문에서는 백색화 과정을 사용하는 대신 수신신호의 스펙트럼에서 직접 잡음 전력 스펙트럼밀도를 추정하는 스펙트럼 기반 탐지기를 제안하였다. 그리고 스펙트럼 기반 탐지기와 선백색화 정합필터 탐지기의 복잡도를 비교, 분석하고 천해에서의 능동 소나 수신신호 모의실험을 통해 두 탐지기의 성능을 비교하였다.

선백색화 정합필터 탐지기의 AR모델 추정 복잡도는 주로 차수 검사범위 최대값에 영향을 받았다. 그리고 제안된 탐지기의 잡음 전력스펙트럼밀도의 추정 복잡도는 블록의 표본수에 영향을 받았다. 모의실험 결과, 유사한 복잡도를 갖는 경우에는 제안된 탐지기의 출력 SRR이 1.2dB 높게 나타나 기존 탐지기보다 잔향의 영향을 많이 제거하였으며 표적신호 역시 쉽게 탐지할 수 있었다. 유사한 탐지성능을 나타내는 경우에는 제안된 탐지기의 계산 복잡도가 기존의 선백색화 정합필터 탐지기에 비해 약 1/33로 나타났다. 그러므로 비백색 잡음 환경 하에서는 기존의 선백색화 정합필터 탐지기보다 제안된 스펙트럼 기반 탐지기를 사용하는 것이 더 효율적일 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] B. Sklar, *Digital communications: Fundamentals and applications*, 2nd ed., Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, NJ, 2001.
- [2] V. Carmillet, P. O. Amblard, and G. Jourdain, "Detection of phase- or frequency-modulated signals in reverberation noise," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 105, no. 6, pp. 3375-3389, June 1999.
- [3] G. Ginolhac and G. Jourdain, "Detection in presence of reverberation," *MTS/IEEE Conf OCEANS 2000*, Providence, RI, vol. 2, pp. 1043-1046, Sep. 2000.
- [4] S. L. Marple, *Digital spectral analysis with applications*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1987.
- [5] S. Kay, *Modern spectral estimation : Theory and application*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1988.
- [6] N. Lofgren, K. Lindercrantz, A. Flisberg, R. Bagenholm, I. Kjellmer, and M. Thordstein, "Spectral distance for ARMA models applied to electroencephalogram for early detection of hypoxia," *J. Neural Eng.*, no. 3, pp. 277-234, July 2006.
- [7] V. Bykov, A. Kytmanov, M. Lazman, and M. Passare, *Elimination method in polynomial computer algebra (Mathematics and its applications)*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1996.
- [8] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, and J. R. Buck, *Discrete-time signal processing*, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, NJ, 1999.

- [9] R. J. Urick, *Principles of underwater sound*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1988.
- [10] T. Collins, and P. Atkins, "Doppler-sensitive active sonar pulse designs for reverberation processing," *Proc. IEE Radar, Sonar and Navigation*, vol. 145, pp.347-353, Dec. 1998.
- [11] S.-K. Yu, *Spectrum based detector for active sonar in reverberation environment*, M.S. Thesis, Kyungpook National University, Feb. 2007.

 저 자 소 개

유 석 근(학생회원)
 대한전자공학회 논문지
 제 45권 TC편 제 12호 참조

주 언 경(평생회원)-교신저자
 대한전자공학회 논문지
 제 39권 TC편 제 11호 참조