

수조에서 전송 다이버시티를 사용한 수중음향통신의 성능 고찰

박 찬 섭* · † 김 기 만

* 인하대학교 전자공학과, † 한국해양대학교 전파공학과 교수

Performance Evaluation of Underwater Acoustic Communication using Transmit Diversity in Water Tank

Chan-Sub Park* · † Ki-Man Kim

* Department of Electronic Eng., Inha University, Incheon, 402-751, Korea

† Department of Radio Communication Eng., Korea Maritime University, Busan, 606-791, Korea

요 약 : 수중음향 채널은 일반적으로 다중경로 전달과 분산 등으로 인해 통신하기에 어려운 매질 가운데 하나로 인식된다. MIMO (Multiple-input multiple-output) 기술은 대역이 제한된 수중음향 채널에서 데이터 전송율을 증가시키기 위해 최근 활발히 연구되고 있다. 이 경우 전송 다이버시티 기술을 적용할 수 있는데 대표적인 것이 Alamouti 구조이다. 이 논문에서는 실험을 통하여 전송 다이버시티 기술의 성능을 고찰하였다. 실험에는 2개의 송신기와 2개의 수신기가 사용되었으며, 실내의 음향수조에서 수행되었다. 실험 결과 5~8%의 오차율을 확인하였는데 이는 같은 전송율을 기준으로 SISO(Single-input single-output) 채널에서의 오차율 14.8% 보다 향상된 결과를 나타내었다.

핵심용어 : 수중음향통신, 전송 다이버시티, 수조실험, 알라무티 구조, 인접 심볼간 간섭, 등화기

Abstract : Underwater acoustic channels are generally recognized as one of the most difficult communication media because of the multipath propagation, dispersion, and so on. MIMO (Multiple-input multiple-output) techniques have been actively pursued in underwater acoustic communications recently to increase the data rate over the bandwidth-limited channels. The transmit diversity techniques can be applied in this case, and one of them is Alamouti's scheme. In this paper the performances of the transmit diversity technique are evaluated via experiment. Two transmitters and two receivers were used in experiment, and the experiment was performed in indoor water tank. The error rate 5~8% was confirmed in experimental results, and these are the improved values than the error rate 14.8% for SISO(Single-input single-output) channel under same data rate condition.

Key words : underwater acoustic communication, transmit diversity, experiment in water tank, Alamouti's scheme, intersymbol interference, equalizer

1. 서 론

수중음향통신 과정에서는 채널의 대표적인 특징인 시변 다중경로 전달특성으로 인하여 위상 천이 변조를 사용하는 경우 송신 심볼의 크기뿐만 아니라 위상이 변하여 성상도에 변화가 생긴다. 즉, 여러 심볼 구간에 걸쳐 인접 심볼간 간섭(ISI, intersymbol interference)이 유발되는데 이러한 전송신호의 왜곡을 극복하기 위해 그동안 등화기들이 연구되고 적용되어 왔다. 또한 최근에는 통신 품질과 전송율을 향상시키는 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 기법을 적용하는 연

구가 활발히 진행 중이다. MIMO 시스템은 공간적으로 떨어진 다수의 송신 트랜스듀서들을 이용하여 신호를 전송하고, 다수의 수신 하이드로폰으로 수신된 신호를 이용하여 복원하는데 특히, 품질 향상을 위해 다이버시티 기법을 활용한다. 이 가운데 Alamouti 구조가 대표적이다(Alamouti, 1998).

이와 관련하여 Choi 등은 지연 확산과 도플러 확산이 동시에 존재하는 채널에서 여러 종류의 터보 등화기들을 MIMO에 적용한 결과를 제시하였다(Choi, 2011). Song 등은 시역전(time reversal) 처리와 MIMO 시스템을 결합하여 계산량을 감소시켰으며(Song, 2011), Ling 등은 RELAX-BLAST 방법

† 교신저자 : 정희원, kimkim@hhu.ac.kr 051) 410-4918

* 정희원, imanager@nate.com 051) 410-4918

(주) 이 논문의 일부는 “송신 다이버시티를 사용한 수중음향통신의 실험 결과”란 제목으로 “한국해양학회 2013년 춘계학술대회 학술 발표회논문집(인천 하버파크호텔, 2013.5.9-10, pp.195-198)”에 발표되었음.

에 대한 실험 결과를 제시하였다(Ling, 2009). Alamouti 구조와 OFDM 전송을 결합한 연구도 이루어지고 있다(Li, 2010). 이러한 대부분의 국외 연구에서는 해상 실험 결과를 제시하고 있는데 반해 국내의 경우에는 SISO(Single Input Single Output) 채널에 대한 연구가 주로 이루어지고 있고, 실험 결과도 SISO 채널로 제한되어 있는 상태이다(Han, 2011). MIMO 채널인 경우에는 공간 상관 계수를 도출하거나 시뮬레이션을 통한 MIMO-OFDM 시스템의 성능 분석에 대한 연구에 머무르고 있다(Ko, 2012; Han, 2010).

본 논문에서는 Alamouti 구조를 갖는 수중음향통신 시스템의 가능성을 실제 수조에서 실험을 통해 고찰하였다. 실험에는 2개의 송신기와 2개의 수신기를 사용하였으며, ISI 채널을 고려하여 송신 신호를 구성하였다(Lindskog, 2000). 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 ISI 채널에서 송신 다이버시티를 활용하는 Alamouti 구조에 대해 설명하고, 3장에서 수조 실험 및 결과를 정리하고, 마지막 4장에서 결론을 맺는다.

2. ISI 채널을 위한 Alamouti 구조

Alamouti 구조는 공간 다이버시티를 사용하는 MIMO 시스템 가운데 하나로 알려져 있다. 본 논문에서는 임의의 ISI 채널에 2개의 송신기와 2개의 수신기가 있는 경우를 고려하였으며, 송신기들은 다이버시티 이득을 얻을 수 있도록 서로 충분히 떨어져 있다고 가정하였다. 패킷 내에 2L개의 심볼들을 갖는 Payload를 가정하면, 이는 각각 길이가 L인 x 와 y 로 표기된 2개의 블록으로 나뉜다. 이들은 2개의 time slot으로 나뉘어 두 번 전송되는데 첫 번째 송신기에서는 x 와 $-y^\dagger$ 이 송신되며, 두 번째 송신기에서는 y 와 x^\dagger 이 송신된다. 여기서 윗첨자 \dagger 는 시역전 공액 복소수를 의미한다. 예를 들어 $x = [x(1) \dots x(L)]^T$ 이라면 $x^\dagger = [x^*(L) \dots x^*(1)]^T$ 이다. 윗첨자 $*$ 은 공액 복소수를 의미하고, 윗첨자 T는 전치(transpose)를 뜻한다. time slot 사이에는 silence 구간을 삽입하는데 이 구간의 길이는 채널의 최대 지연 확산 시간 보다 길도록 한다. 이러한 두 번의 time slot 구간동안 수신한 벡터를 각각 r_1 과 r_2 라고 하면 기저대역에서 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

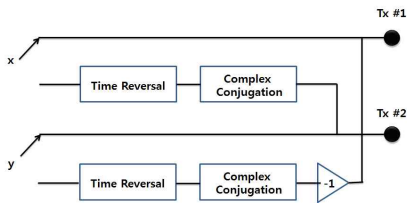


Fig. 1 Transmit data structure for ISI channel

$$\begin{aligned} r_1 &= H_1 x + H_2 y + n_1 \\ r_2 &= H_1 (-y^\dagger) + H_2 (x^\dagger) + n_2 \end{aligned} \quad (1)$$

윗 식에서 n_1 과 n_2 는 각각 첨가 잡음 벡터이고, H_1 과 H_2 는 아래 식과 같이 주어지는 채널 임펄스 응답 행렬로써 H_1 은 첫 번째 송신기와 수신기 사이의 채널 임펄스 응답으로 구성되며, H_2 는 두 번째 송신기와 수신기 사이의 채널 임펄스 응답으로 구성된다. 수중음향채널의 채널응답은 다중경로 전파 특성으로 인해 일반적으로 수 ms에서 수십 ms의 지연 확산을 갖고, 음향통신의 목적으로 사용할 수 있는 대역폭은 송수신 거리에 따라 제한적이기 때문에 채널에 의한 ISI는 수십 개의 심볼에 걸쳐 발생할 수 있다. 이러한 ISI 채널 특성은 적어도 한 데이터 블록 구간동안 변화하지 않는다고 가정한다.

$$H_1 = \begin{bmatrix} h_1(1) & 0 & \dots & 0 \\ h_1(2) & h_1(1) & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \\ h_1(L) & h_1(L-1) & & h_1(1) \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & h_1(L) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} h_2(1) & 0 & \dots & 0 \\ h_2(2) & h_2(1) & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \\ h_2(L) & h_2(L-1) & & h_2(1) \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & h_2(L) \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (1)을 행렬 형태로 정리하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} H_1 & H_2 \\ H_2^\dagger - H_1^\dagger \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \\ &= H \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

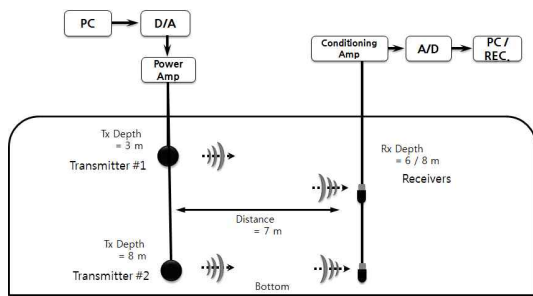
채널 임펄스 응답 행렬은 채널 추정 기법을 이용하여 추정하게 된다. 이제 식 (4)로부터 송신 데이터 열을 복원하기 위해서 H^H 을 곱하는데 윗첨자 H는 행렬의 hermitian을 뜻한다.

$$\begin{aligned} H^H \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} H_1^\dagger & H_2 \\ H_2^\dagger - H_1^\dagger \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 & H_2 \\ H_2^\dagger - H_1^\dagger \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + H^H \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} H_1^\dagger H_1 + H_2 H_2^\dagger & 0 \\ 0 & H_2^\dagger H_2 + H_1 H_1^\dagger \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + H^H \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

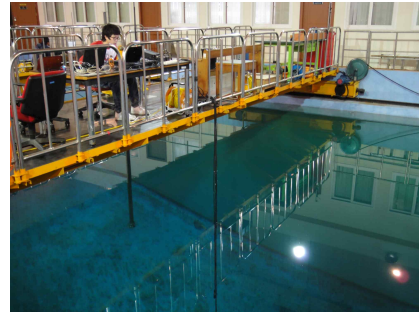
식 (5)에서 행렬 내의 0은 원소가 0인 행렬을 의미하며 두 번째 잡음 항을 무시한다면 첫 번째 항은 블록 대각 행렬 구조를 가진다. 따라서 이로 인해 송신 데이터 열 x 와 y 를 분리하는 것이 가능하게 되지만 분리된 각 데이터 열 x 와 y 내에서는 여전히 ISI의 영향을 받으므로 등화기가 추가로 적용되어야 한다.

3. 실험 및 결과

Alamouti 구조를 갖는 수중음향통신의 성능을 검증하기 위해 그림 2와 같은 환경에서 2012년 5월에 경상남도 진해에 위치한 수조에서 실험을 수행하였다. 실험은 평균 수심이 10 m인 수조에서 수행하였으며, 2개의 송신 트랜스듀서는 모두 ITC-1001 모델로 수심은 각각 3 m, 8 m로 하였다. 또한 수신 하이드로폰은 B&K 8106 모델로 수심 6, 8 m에 각각 배치하였으며, 수평거리는 약 7 m로 하여 실험을 진행하였다. 송신 신호는 B&K 2713 전력 증폭기를 사용하여 증폭되었으며, 수신 신호는 컨디셔닝 앰프를 거치도록 하였다. 전송신호는 roll-off 지수 0.35인 raised-cosine 펄스를 갖는 QPSK 변조 신호로 12 kHz의 반송파를 사용하여 전송하였으며, 데이터는 수조라는 밀폐된 환경을 고려하여 비교적 낮은 192 sps (symbol per second)의 심볼율을 갖도록 하였다. 수신 신호는 192 kHz의 표본화율로 표본화되고, 이는 반송파를 제거한 후 정합필터를 통과하여 기저대역으로 변환된다. 이어서 약 500 심볼의 프리앰블 구간의 PN(Pseudo Noise) 신호를 이용한 패킷 동기화 과정을 거치고, 2차 PLL(Phase Locked Loop)에 기반한 위상 추적, Alamouti 수신기 및 등화기 등을 적용하여 데이터를 검출하였다. 각 payload는 1980개의 심볼로 구성하였다.

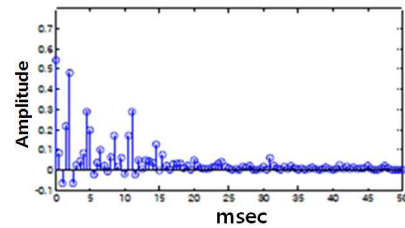


(a)

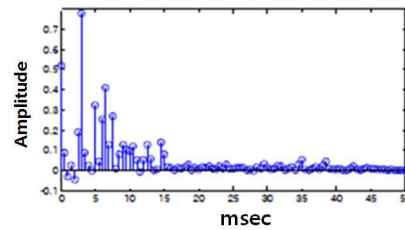


(b)

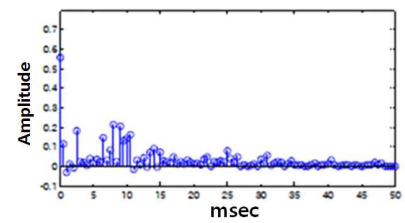
Fig. 2 (a) Experimental setup in water tank, (b) Photo



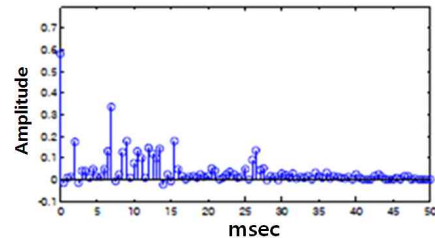
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3 Channel impulse responses, (a) Tx1-Rx1, (b) Tx2-Rx1, (c) Tx1-Rx2, (d) Tx2-Rx2

채널 임펄스 응답은 송신신호가 수신기에 도달할 때까지의 정보를 나타낸다. 이러한 채널 임펄스 응답을 통하여 송수신기 위치에 따른 시·공간적인 채널 특성을 확인할 수 있다. 이 실험에 앞서 LFM (Linear Frequency Modulation) 신호를 이용하여 채널 응답 특성을 추정하였으며, 이를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2와 같은 수조라는 막힌 공간으로 인하여 수많은 반사파를 관찰할 수 있으며, 보통 약 20 ms 내외에서 길게는 27 ms의 지연이 발생하는 것을 볼 수 있는데 이는 송수신된 신호를 비교하는 Fig. 4에서도 확인할 수 있다.

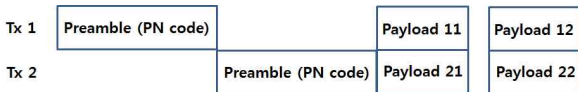


Fig. 4 Structure of Tx signal

패킷 동기화를 위하여 프리앰블 구간에서 PN(Pseudo Noise) 부호열을 송신 센서를 번갈아 가면서 송신하였고, 이어서 동시에 데이터 열을 전송하였다. 이러한 데이터의 패킷 구조는 Fig. 4와 같다. 그림에서 각 payload 사이의 관계는 앞선 2절에서 설명한 바와 같이 전송하고자 하는 신호의 한 프레임은 반으로 나누어 payload 11과 payload 21의 위치로 하여 전송한다. 이어 중간 silence 구간이 지난 뒤 payload 12 구간에서는 payload 21 신호와 반대 부호를 가지면서 time reversed complex conjugate 된 신호를 전송하고 payload 22 구간에서는 payload 11 구간 신호와 시역전 공액 복소 성분의 신호를 전송한다.

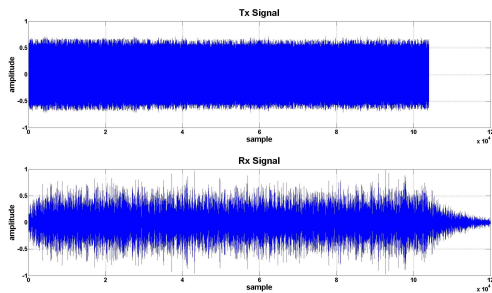
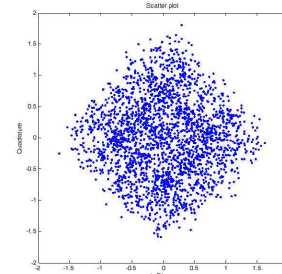


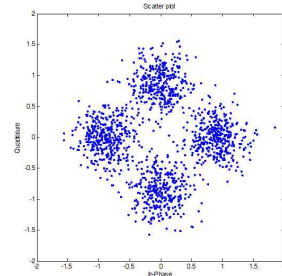
Fig. 5 Transmit and Receive signal

등화기로는 31개의 탭을 갖는 선형 등화기를 사용하였으며, 등화기 계수 값은 망각인자가 0.99인 RLS(Recursive Least Square) 알고리즘을 적용하였다. 실험 당시 수신단에서의 SNR은 평균 약 17 dB 정도로 추정되었으며, SNR 추정은 Wiesel 등이 제안한 방법을 이용하였다(Wiesel, 2006). Fig. 6에는 수신된 신호와 Alamouti 수신기 및 등화기를 통과한 후의 정상도를 나타내었다. 그림에 따르면 Alamouti 수신기와 등화기를 모두 거친 후 비교적 데이터 복원이 이루어진 것을 볼 수 있다. 또한 (a)와 (c)를 비교해 보면 수신기 2의 위치에 비해 수신기 1의 위치가 ISI 특성이 열악하여 신호처리 전에

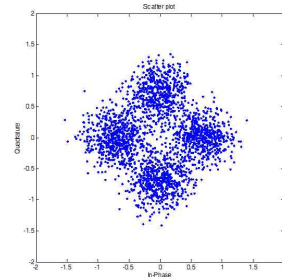
는 오차율이 높았지만 신호처리 후에는 오차율을 줄일 수 있었다. 실험은 동일한 데이터를 10회 반복하여 전송하였으며, 시변동성이 크게 나타나지 않는 수조환경임을 고려하여 오차율을 패킷별이 아닌 전체를 평균하여 산정하였다. 그 결과 채널 부호화 과정을 고려하지 않은 상태에서 SER(Symbol Error Rate)은 수신기 1번 위치에서는 평균 8% 정도였으며, 수신기 2번 위치에서는 평균 5% 정도로 나타났다. 이는 비록 수조 환경이 닫힌 공간이라서 전달 특성이 복잡하고 20 ms 이상의 긴 지연 특성을 갖지만 전송율이 비교적 낮았기 때문에 ISI 영향을 줄여 결과가 나타난 것으로 판단된다. 공간 다이버시티를 사용하는 Alamouti 수신기와 기존의 SISO(Single Input Single Output) 채널만을 사용하는 수신기와의 성능을 비교하기 위해 Fig.6 (e)에 SISO 채널 수신기의 결과를 나타내었다. 비교를 위해 SISO 채널의 경우 전송율을 384 sps로 하였는데 오차율은 약 14.8% 정도로 나타나 다이버시티 효과를 확인할 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

참고문헌

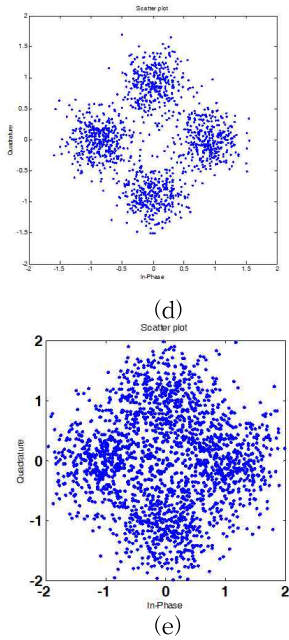


Fig. 6 Constellations, (a) received signal at receiver 1, (b) recovered signal at receiver 1, (c) received signal at receiver 2, (d) recovered signal at receiver 2, (e) SISO channel

4. 결론

본 논문에서는 수중음향통신 시스템에 Alamouti 구조를 갖는 전송 다이버시티 기법을 적용한 시스템의 성능을 수조실험을 통해 조사하는데 의미가 있다. 실험 결과 약 5~8% 정도의 오차율을 갖는 것을 확인할 수 있었지만 이러한 수치는 실험 환경과 전송율에 따라 변동성이 있으므로 절대적인 오차율은 아니다. 특히, 수조는 사방이 막혀 있는 구조이므로 잔향 시간이 20 ms 이상이어서 통신 관점에서 열악한 환경임을 감안하여 전송율을 낮춘 것도 비교적 낮은 오차율이 나타나게 된 원인이라 할 수 있지만 다이버시티를 사용하지 않은 경우와의 비교를 통해 공간 다이버시티 효과를 확인할 수 있었다. 향후에는 수조가 아닌 실제 해상에서 실험을 수행하여 결과를 분석하며, 전송율을 올려야 할 것이다. 아울러 전송 다이버시티 뿐만 아니라 공간 다중화 기법이 모두 포함된 MIMO 기법에 대한 실험이 필요할 것이다.

후 기

이 논문은 방위사업청과 국방과학연구소의 지원(계약번호 UD130007DD) 및 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과입니다.

[1] Alamouti, S. M.(1998), "A simple transmit diversity technique for wireless communications," IEEE J. Selected Areas Communications, Vol. 16, pp. 1451 - 1458.

[2] Choi, J. W., Riedl, J., Kim K., Singer A. C., and Preisig J.C.(2011), "Adaptive linear turbo equalization over doubly selective channels," IEEE J. Oceanic Eng., Vol. 36, No. 4, pp. 473-489.

[3] Han, D. G., Hoe, B., Jang, K. H., Byun, S. H., Kim, S. M., and Lim, Y. K.,(2010), "Performance Evaluation of MIMO-OFDM System in Underwater Communication Environments," Proceedings of Korea Maritime Information & Communication Conference, pp. 597-599.

[4] Han, J. W., Kim, K. M., and Son, Y. J.(2011),"A Study on the Underwater Acoustic Communication using Direct Sequence Spread Spectrum," Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 35, No. 8, pp. 643-647.

[5] Ko, H. R., Lee, S. K., Kim, M. S., Cho, D. Y., Kim, K. Y., Park, B. H., Park, J. W., and Lim, Y. K.(2012), "Performance Evaluation of Coherence Characteristics of the Received Signals by Sensor Spacing in Underwater Channel Environments," Journal of Acoustical Society of Korea, Vol. 31, No. 2, pp. 107-113.

[6] Li B. and Stojanovic M.(2010), "A simple design for joint channel estimation and data detection in an Alamouti OFDM system," Proc. of MTS/IEEE Oceans Conference, pp. 1-5.

[7] Lindskog E. and Paulraj A.(2000), "A transmit diversity scheme for channels with intersymbol interference," Proc. of ICC 2000, Vol. 1, pp. 307 - 311.

[8] Ling J., Yardibi T., Su X., He H. and Li J.(2009), "Enhanced channel estimation and symbol detection for high speed multi-input multi-output underwater acoustic communications," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 125, pp. 3067-3078.

[9] Song A., Badiey M., McDonald V. K. and Yang T.C. (2011), "Time reversal receivers for high data rate acoustic multiple - input - multiple-output communication," IEEE J. Ocean. Eng., Vol. 36, No. 4, pp. 525-538.

[10] Wiesel A., Goldberg J. and Messer-Yaron H.(2006), "SNR estimation in time-varying fading channels," IEEE Trans. Communications, Vol. 54, No. 5, pp. 841-848.

원고접수일 : 2013년 2월 6일
 심사완료일 : 2013년 4월 29일
 원고채택일 : 2013년 5월 2일