

# 수동형 시역전에 기반한 수중음향통신 알고리즘 및 실험적 검증

## Algorithm and Experimental Verification of Underwater Acoustic Communication Based on Passive Time-Reversal Mirror

엄민정, 김재수,\*<sup>†</sup> 조정홍,\*\* 김회용,\*\* 성 일\*\*\*

(Min-Jeong Eom, J. S. Kim,\*<sup>†</sup> Jung-Hong Cho,\*\* Hoeyong Kim,\*\* and Il Sung\*\*\*)

LIG넥스원(주) Maritime연구소, \*한국해양대학교 해양공학과, \*\*(주)한화, \*\*\*국방과학연구소  
(접수일자: 2014년 7월 8일; 수정일자: 2014년 8월 27일; 채택일자: 2014년 9월 18일)

**초 록:** 수중음향통신에서는 다중경로에 의한 지연확산 채널과 조류로 인한 자연적 유동 혹은 인위적인 플랫폼 이동 등으로 도플러 확산 채널이 발생한다. 이로 인하여 발생하는 인접 심볼 간 간섭을 제거하기 위하여 등화기가 사용되고 있으나 다중 경로 등의 음향환경정보를 사용하고 있지 않다. 반면 수동형 시역전의 경우 한 방향 전파과정으로 산출한 채널응답특성의 수치적 정합필터를 통하여 자기 등화를 수행하게 되므로 등화기보다 비교적 단순한 알고리즘으로 간섭을 제거하는 특성을 갖는다. 본 논문에서는 2010년 동해에서 수행한 통신 실험의 실측 데이터에 수동형 시역전을 적용하여 다중경로로 인한 간섭을 제거하고, 통신성능이 향상됨을 보이고자 한다. 이를 검증하기 위하여 수동형 시역전의 적용 전/후의 신호 대 간섭 잡음비를 비교하고 분석한다. 또한 수동형 시역전과 적응형 등화기의 알고리즘을 각각 독립적으로 수행하여 비트오류율을 산출하고 이를 비교하여 수동형 시역전의 통신성능을 검증한다.

**핵심용어:** 수중음향통신, 수동형 시역전, 인접 심볼 간 간섭, 신호 대 간섭 잡음비, 비트오류율

**ABSTRACT:** The underwater acoustic communication is characterized by doubly spread channels, which are the delay spread due to multiple paths and the doppler spread due to environmental fluctuations or a moving platform. An equalizer is used to remove the inter-symbol interferences that the delay spread causes, but an equalizer doesn't use an acoustic environment such as a multipath. However, a passive time-reversal mirror is simpler than an equalizer because a matched filter is implemented numerically at the receiver structure along with one-way propagation. In this paper, a passive time-reversal mirror is applied to remove interferences due to a multipath in sea-going experimental data in East Sea in Oct. 2010 and improved communication performance is confirmed. The performance is verified by comparing the signal-to-interference plus noise ratio before/after passive time-reversal mirror. It is also performed independently of the passive time-reversal mirror and adaptive equalizer and the bit error rate is compared to verify the performance of underwater acoustic communication.

**Keywords:** Underwater acoustic communication, Passive time-reversal mirror, Inter-symbol interference, Signal-to-interference plus noise ratio, Bit error rate

**PACS numbers:** 43.60.Dh, 43.60.Gk, 43.30.Wi

### 1. 서 론

최근 해양 개발에 대한 관심이 고조되면서 해양 탐사 및 수중 통신에 대한 연구의 필요성이 부각되

고 있다.<sup>[1]</sup> 수중에서의 통신은 매질의 특성상 손실이 적은 음향을 사용하며 음파 전달 특성은 수심, 수온 및 염도에 따른 음속 구조에 지배적인 영향을 받는다. 또한 시변동에 따른 해수면 파동과 해저 지형 및 지음향 정보를 고려해야하는 복잡성이 따른다.<sup>[2]</sup>

수중음향통신은 가용 주파수가 낮아 채널 대역에 제한이 따르며, 두 가지의 채널 특성을 갖는다. 첫 번

<sup>†</sup>Corresponding author: J. S. Kim (jskim@kmou.ac.kr)  
College of Ocean Science and Technology, Room 313, Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-Ro, Yeongdo-Gu, Busan 606-791, Republic of Korea.  
(Tel: 82-51-410-4325, Fax: 82-51-403-4320)

제는 해양 도파관 구조에 따른 다중경로로 인한 지연확산 채널이며 두 번째로는 조류, 내부파 등의 환경적 유동 혹은 송신기와 수신기의 인위적인 이동에 의한 도플러 확산 채널이다. 이로 인하여 인접 심볼 간 간섭(Inter-Symbol Interference, ISI)이 발생되고 고속 데이터 전송 및 대용량 전송 효율에 문제가 되어 통신성능이 저하된다.<sup>[1,3-5]</sup>

1980년대에는 두 채널 특성에 본질적으로 강한 FSK(Frequency Shift Keying) 변조 기술과 같은 위상 비 동기식 통신에 대한 연구가 이루어졌다. 그러나 전송 효율을 높일수록 광대역을 필요로 하므로 통신 개발에 제한을 갖는다. 이에 1990년대부터 PSK(Phase Shift Keying) 변조 기술과 같은 위상 동기식 통신에 관한 연구가 이루어지고 있다. 위상 동기식 통신의 경우 대역 제한 채널로 인한 왜곡된 신호를 보상하고자 수신부에서 등화기가 주로 사용된다.<sup>[1,5-9]</sup> 그러나 등화기의 경우 정확한 채널 추정을 필요로 하므로 지연확산에 따른 탭 수 산정 및 시변동에 따른 변수 갱신이 요구되며 설계에 복잡성이 따른다. 이외에도 보상 구조로서 빔 형성을 이용한 공간 필터, 신호 대 간섭 잡음비(Signal-to-Interference plus Noise Ratio, SINR)와 전송 효율을 높이기 위한 공간 다이버시티 및 시역전 등의 기술이 연구 되고 있다.<sup>[10-12]</sup>

본 논문에서는 해상 실험을 통한 실측 데이터에 수동형 시역전을 적용하였으며, 등화기 알고리즘보다 비교적 단순한 시역전 알고리즘으로 통신성능이 개선됨을 보이고자 한다. 본 논문의 내용 중 일부 결과는 Reference 13에서 간단히 소개된 바 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서 시역전에 관한 이론을 설명하고, 제 III장에서는 해상 실험에 대하여 언급한다. 제 IV장에서는 해상 실험 데이터를 분석하고 산출된 SINR 및 비트오류율(Bit Error Rate, BER)을 통하여 통신성능이 개선됨을 검증한다. 마지막으로 제 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 시역전 기술

Fig. 1과 같은 시역전 기술은 광학에서 이미 오랫동안 연구되어 왔으며<sup>[14]</sup> 수중음향통신에서도 국외 해상 실험을 통하여 적용 가능성을 확인하였다.<sup>[11]</sup>

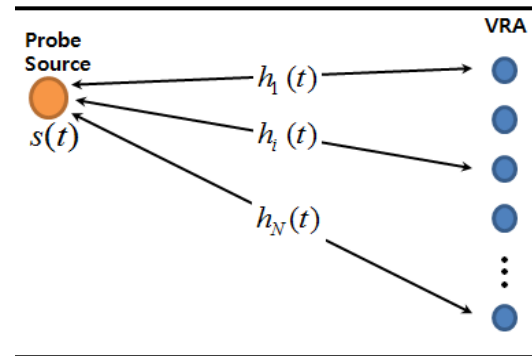


Fig. 1. The schematic of the time-reversal mirror.

또한 국내에서도 자기 등화 기술로서 수동형 시역전을 연구해 왔으며 모의실험을 통하여 검증해왔다.<sup>[15]</sup>

시역전의 경우 정확한 채널 추정 이 이루어지지 않아도 왜곡된 신호의 보상이 가능하며 복잡한 등화기 구조와 달리 비교적 간단한 알고리즘 설계로 독립적인 사용이 가능하다.<sup>[11,13]</sup> 또한 특별한 공간 다이버시티를 필요로 하지 않으며, 시역전 처리 후에도 남아 있는 ISI를 제거하기 위하여 단일 채널 적응형 등화기 구조를 추가함에 따라 다중 채널 적응형 등화기와 대등한 성능을 얻을 수 있다.<sup>[16]</sup>

### 2.1 능동형 시역전

능동형 시역전은 수신 신호의 시간 영역을 뒤집어 되전파하는 것으로 가역성 원리에 따라 시/공간적 정합 필터를 수행하여 방사된 탐침 음원 위치에 재집속되는 원리이다.<sup>[11,17]</sup>

$$r(t) = s(t) * h(t). \quad (1)$$

수신 신호  $r(t)$ 는 탐침 음원  $s(t)$ 와 채널응답특성  $h(t)$ 의 컨볼루션( $*$ )으로 정의된다. 시역전한 수신 신호  $r(-t)$ 를 되전파할 경우 Eq.(2)와 같이 표현되며  $y(t)$ 는 방사된 탐침 음원 위치에 재집속된 수신 신호를 뜻한다.

$$\begin{aligned} y(t) &= r(-t) * h(t) \\ &= s(-t) * h(-t) * h(t). \end{aligned} \quad (2)$$

시역전의 경우 다중경로의 수가 많을수록 성능이 우

수하다. 이는 되전파할 때 다중경로의 신호가 재음원이 되어 방사되는 것과 같으므로 공간 다이버시티와 동일한 효과로 볼 수 있다.<sup>[15]</sup>

### 2.2 수동형 시역전

양방향 전파 과정을 통하여 시/공간적 정합 필터를 수행한 능동형 시역전과 다르게 수동형 시역전은 한방향 전파 과정으로만 수행된다.  $N$  개의 수신 배열을 이용한 수동형 시역전의 구조는 Fig. 2와 같다.

탐침신호를 이용하여 수신 채널별 채널응답특성을 산출하며 시역전된  $h_i(-t)$ 를 이용하여 수치적 정합필터를 수행한다. 수동형 시역전 신호는 다음과 같이 표현된다.<sup>[15-18]</sup>

$$y(t) = \sum_{i=1}^N r_i(t) * h_i(-t) = s(t) * \left[ \sum_{i=1}^N h_i(t) * h_i(-t) \right] \quad (3)$$

이는 채널응답특성의 자기상관의 합으로 구성되며, 푸리에 변환을 통하여 주파수 영역으로 변환할 경우 수동형 시역전은 Eq.(4)로 표현된다.

$$Y(w) = \sum_{i=1}^N R_i(w) \times H_i^*(w) = S(w) \times \left[ \sum_{i=1}^N H_i(w) \times H_i^*(w) \right] = S(w) \times \sum_{i=1}^N |H_i(w)|^2 \quad (4)$$

시간 영역의 컨볼루션은 주파수 영역에서의 곱으로 표현할 수 있으며 (\*)는 공액복소수 행렬을 나타낸다. 역 푸리에 변환을 통하여  $Y(w)$ 를 시간 영역으로 변환할 경우 Eq.(3)의  $y(t)$ 와 동일하며, 능동형 시역전에서 탐침 음원의 위치에 재집속된 수신 신호와

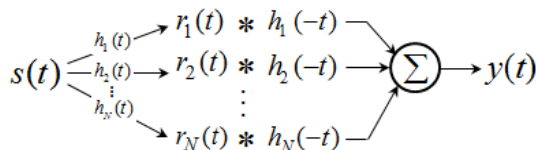


Fig. 2. A diagram of the passive time-reversal mirror.

동일하다.

## III. 해상실험

### 3.1 실험 구성

본 실험은 2010년 10월 동해시 인근 해역에서 수행하였으며, 송신기와 수신기 거리는 468 m이고 수심은 약 350 m이다. 송신기는 수심 60m에 위치하며 수평으로는 무지향성이고 수직으로는  $\pm 40^\circ$ 의 유효 빔폭을 갖는다. 수신기는 비균등 간격의 수직 선배열(24채널)로서 주파수 대역과 센서 간의 간격은 Table 1과 같다. 수신기는 수심 92.5 ~ 107.5 m에 위치하며 수신 샘플링 주파수는 65536 Hz로 구성된다.

당시의 음속은 XBT(EXpendable Bathythermograph)를 이용하여 1 시간 간격으로 총 7 번을 측정하였다. 측정된 음속 구조는 Fig. 4와 같으며 실험을 수행하는 동안 일정한 음속 구조를 갖는다.

### 3.2 전송 신호

전송 신호의 패킷구조는 Fig. 5와 같으며 중심 주파수는 6 kHz로서 채널응답특성을 위한 탐침신호<sup>[19]</sup>와 통신용 데이터 신호로 구성된다. 본 논문에서는 4~8 kHz 대역의 LFM(up-sweep)을 탐침신호로 사용하였

Table. 1. The frequency bands and array spacing of vertical receiver array.

	Frequency (Hz)	Spacing (cm)
Band 1	400 ~ 800	187.5
Band 2	800 ~ 1600	93.75
Band 3	600 ~ 1300	46.87
Band 4	3200 ~ 6400	23.43

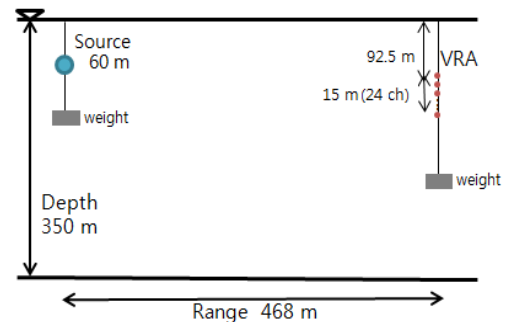


Fig. 3. The geometry of the sea-going experiment.

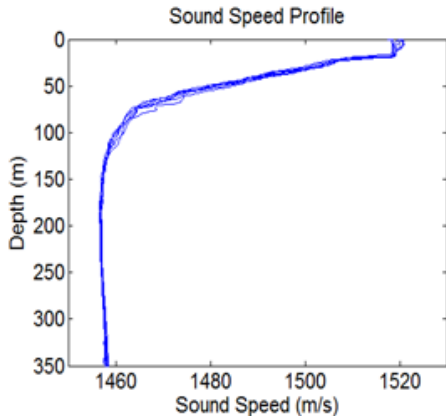


Fig. 4. The sound speed profile at East-sea in Oct. 2010.

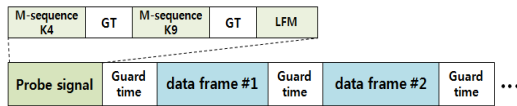


Fig. 5. The transmitted signal packet.

다. 통신을 위한 데이터 신호는 roll-off가 0.25인 root raised-cosine 필터를 사용하였으며, 4 kHz의 대역폭을 갖는다. 또한 BPSK(Binary Phase Shift Keying)로 변조되어 3.2 kbps의 전송률로서 하나의 데이터 프레임 전송 시간은 0.51 s이다.<sup>[20]</sup>

### IV. 실험 결과

#### 4.1 채널응답특성

탐침신호 LFM을 이용하여 채널응답특성을 도출하였다. 수신 채널 1번(수심 92.5 m)과 22번(수심 104.68 m)은 기기 결함으로 인하여 수신 상태가 열악하였으며 데이터 분석에서 이를 제외하였다. Fig. 6은 수심에 따른 채널응답특성으로 두 개의 다중경로가 보이며 약 10 ms의 지연확산이 나타난다. 두 개의 다중경로에 대한 분석을 위하여 음선 이론 기반의 BELLHOP과 빔 형성으로 방향성을 분석하였으며, 직접파와 해수면 반사파의 채널응답특성임을 확인하였다.<sup>[12]</sup>

시변동에 따른 채널응답특성을 확인하고자 수신선 배열 중앙의 채널(수심100m)의 신호를 분석하였으며 결과는 Fig 7과 같다. 시변동에 따른 다중경로의 수는 동일하게 직접파와 해수면 반사파의 채널응

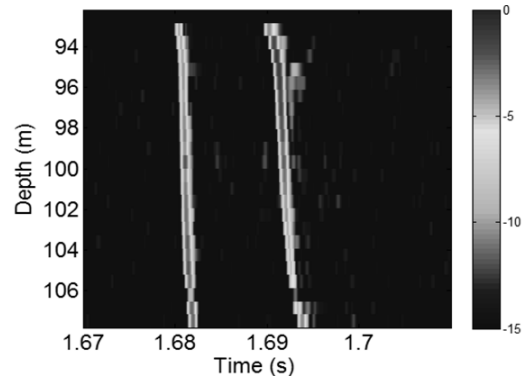


Fig. 6. The channel impulse response along the water depth.

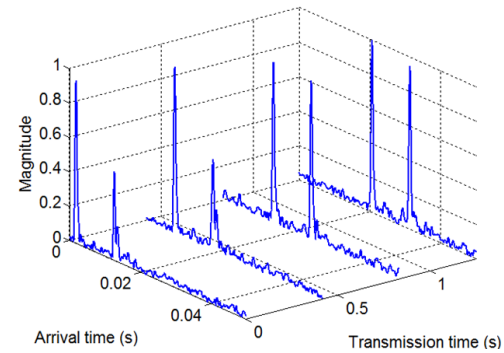


Fig. 7. The channel impulse response in time-varying at single channel (ch.12).

답특성으로 나타났으나 환경적 유동으로 인하여 송신기와 수신기의 거리가 멀어짐을 확인할 수 있다. 또한 해수면 반사파의 경우 극소의 지연 확산이 나타나며 신호의 세기에도 변화를 보인다. 이는 해수면 파동으로 인하여 입사각이 일정하지 않아 발생하는 것으로 추정된다.

#### 4.2 SINR 분석

본 절에서는 수동형 시역전 적용 전/후의 SINR을 산출하여 성능을 확인하고자 한다. SINR은 Eq.(5)를 근거로 산출하였다.

$$SINR = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_i}, \tag{5}$$

여기서  $P_s$ 는 직접파 신호의 파워,  $P_i$ 는 간섭 신호의 파워를 나타낸다. 파워는 단위시간당 에너지를 나타낸 것으로 임의의 신호  $x(t)$ 의 에너지는 Parseval 이

론에 따라 Eq.(6)으로 표현된다.

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2df, \quad (6)$$

여기서  $X(f)$ 는 임의의 신호  $x(t)$ 를 연속적인 푸리에 변환을 통하여 정규화된 것으로 시간 영역 상의 총 에너지는 주파수 영역 상의 총 에너지와 같다. 따라서  $M$ 개 길이를 갖는 이산 신호  $x(m)$ 의 푸리에 변환을 통한 파워 값은 아래와 같다.<sup>[21,22]</sup>

$$P = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} |X(k)|^2. \quad (7)$$

Fig. 8은 송신 신호 중 탐침신호 LFM을 나타낸 것으로 10ms의 신호 길이를 갖는다. Fig. 9(a)는 단일 채널(ch.12)의 수신 신호로서 앞서 언급한 채널응답특성과 동일하게 직접파와 해수면 반사파가 나타난다. 각각의 경로에 따른 주파수별 신호 세기는 Fig. 9(b)로서 Eq.(5)를 기반으로 한 SINR은 0.21 dB로 분석된다.

수동형 시역전을 적용한 신호의 시간영역은 Fig. 10(a)와 같고 적용 전 단일 신호에 비교하여 간섭 신호인 해수면 반사파의 신호가 줄어들음을 확인 할 수 있다. 각 경로에 따른 주파수 영역의 신호 세기는 Fig. 10(b)에 나타나며 해수면 반사파의 신호 세기가 줄어들어 SINR 또한 17.28 dB로 향상되었다.

### 4.3 통신성능 분석

본 절에서는 수동형 시역전과 적응형 등화기를 독립적으로 수행하였으며, 산출된 각각의 BER을 비교하여 통신성능을 검증하고자 한다.

데이터 신호는 0.51 s의 신호 길이로서 프리앰블 16개 심볼과 1632개 데이터 심볼을 전송하였다. 앞

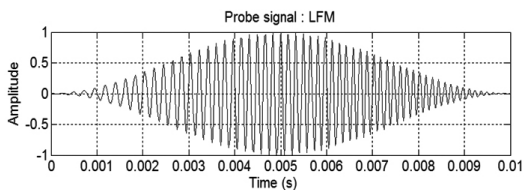


Fig. 8. The transmitted probe signal.

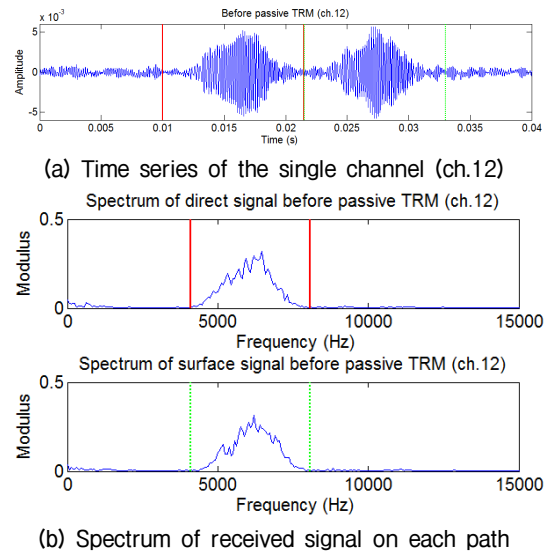


Fig. 9. The received signal before passive TRM (full line: direct signal, dot line: surface signal).

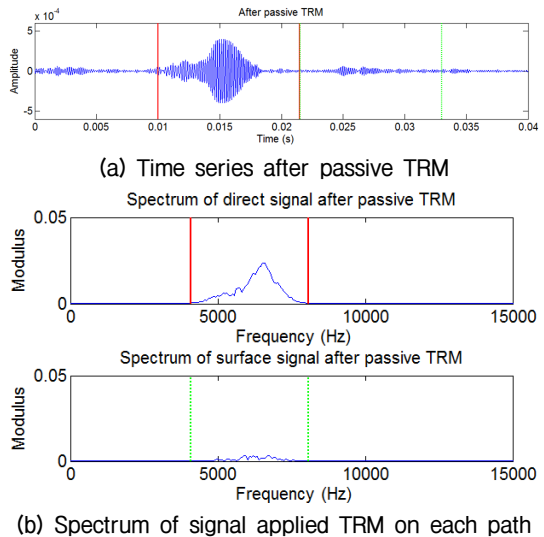


Fig. 10. The signal after passive TRM (full line: direct signal, dot line: surface signal).

서 언급한 채널응답특성의 지연확산을 고려하면 간섭을 받지 않은 심볼은 약 32개이며, 이를 제외한 약 1600개 심볼은 ISI가 발생한다. 이에 동기화만을 수행한 수신 신호의 정상도는 Fig. 11(a)와 같으며 BER은 46%로 분석된다. Fig. 11(b)는 적응형 등화기를 독립적으로 수행한 것으로 BER은 5%로 분석된다. 본 절에서 사용한 적응형 등화기는 Reference 20을 기반으로 수행하였다.

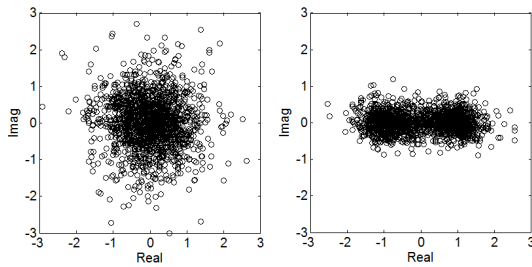
반면 수동형 시역전을 적용한 통신 알고리즘의 구

조는 Fig. 12와 같으며 실선을 따라 수동형 시역전만을 수행하는 것으로 결과는 Fig. 13(a)의 정상도로 나타난다. 정상도에서 간섭 제거가 확인되나 위상변이로 인하여 BER은 82%로 분석된다. Fig. 7의 채널응답특성에서 자연적 유동으로 인한 송신기와 수신기 이동을 확인하였으며, 이에 추가적으로 Fig. 12의 점선 과정

인 PLL(Phase Locked Loop)을 적용하였다. 위상 추정은 최대우도(Maximum Likelihood, ML) 함수 기반으로 아래의 식과 같다.<sup>[5]</sup>

$$\hat{\phi}_{ML} = -\tan^{-1} \left( \frac{\text{Im} \left[ \sum_{n=0}^{K-1} I_n^* y_n \right]}{\text{Re} \left[ \sum_{n=0}^{K-1} I_n^* y_n \right]} \right), \quad (8)$$

여기서  $y_n$ 은 심볼 주기의 샘플,  $I_n$ 은 결정된 수신 심볼을 뜻한다. Eq.(8)에 따라 추정된 위상은 Fig. 14와 같으며 수동형 시역전 적용 후에 추가적인 PLL을 수행한 정상도는 Fig. 13(b)와 같다. 위상이 보상되어 BER은 0%로 나타나 통신성능이 향상됨을 보인다.



(a) only synchronization (b) only adaptive equalizer

Fig. 11. The constellation of received signal.

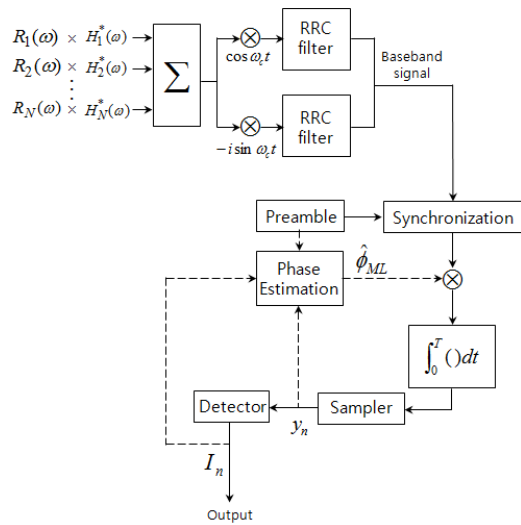
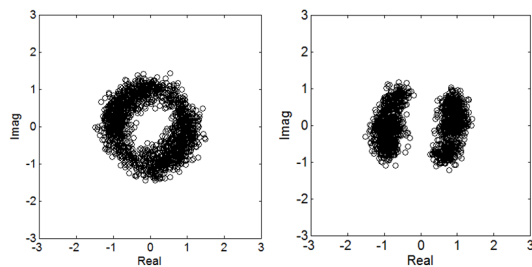


Fig. 12. The receiver block diagram with passive TRM and PLL (full line: passive TRM, dotted line: PLL process).



(a) only passive TRM (b) passive TRM + PLL

Fig. 13. The constellation of received signal.

## V. 결론

수중음향통신은 해양도파관 구조로서 해수면과 해저면을 고려해야 하는 복잡성을 지닌다. 또한 대역 제한으로 인하여 다중경로에 의한 지연확산채널과 플랫폼의 인위적 이동 혹은 조류와 같은 자연적인 유동으로 인하여 도플러 확산의 채널 특성을 갖는다. 이로 인하여 ISI가 발생하며 수중음향통신에 있어서 고속 전송 및 대용량 전송에 걸림돌이 된다. 이를 완화하고자 시변동성을 고려한 다중 채널의 적응형 등화기의 기술이 확장되고 있으나 시변동에 따른 변수를 갱신해야하므로 알고리즘의 설계가 복잡해진다. 본 논문에서는 통신 성능을 향상하기 위하여 자기 등화의 특징을 지닌 시역전 기술을 독립적

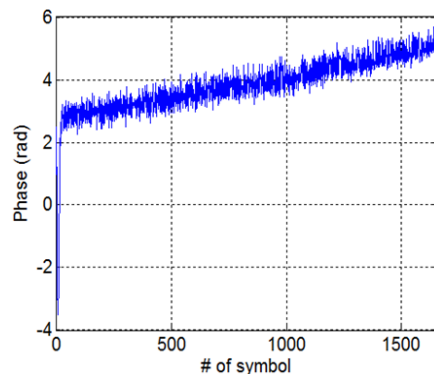


Fig. 14. A phase estimation based on maximum likelihood.



인 보상구조로 적용하며, 해상 실험 데이터를 이용하여 통신성능을 검증하였다.

탐침신호 LFM을 이용하여 채널응답특성을 산출하고 수동형 시역전 기술을 적용하였으며, 단일 채널(ch.12) 수신 신호와 수동형 시역전을 적용한 신호의 SINR을 비교하였다. 시역전을 적용한 신호의 SINR은 17.28 dB로서 적용전의 단일 채널 신호(0.21 dB)에 비교하여 약 17 dB 향상되었다. 또한 통신 신호에 수동형 시역전 기술을 독립적으로 적용한 결과 BER은 82%였으며, 추가적으로 PLL을 이용하여 위상을 보상한 결과 BER은 0%로서 통신 성능을 향상하였다.

앞으로의 연구로는 도플러 확산 채널을 고려한 시변동성 시역전 기술 연구와 전송률 증대를 위한 MIMO 시역전 통신 및 실험적 검증이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 (주)한화의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

1. D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer, "The state of the art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Ocean. Eng.* **25**, 4-27 (2000).
2. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound, Third Edition* (McGraw-Hill, New York, 1983), pp. 11-147.
3. A. C. Singer, J. K. Nelson, and S. S. Kozat, "Signal processing for underwater acoustic communications," *IEEE Communications Magazine*, 90-96 (2009).
4. T. Melodia, H. Kulhandjian, L. C. Kuo, and E. Demirors, *Advances in Underwater Acoustic Networking, in Mobile Ad Hoc Networking: Cutting Edge Directions, Second Edition* (John Wiley & Sons, Hoboken, 2013), pp. 804-842.
5. J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications* (McGraw-Hill, New York, 2008), pp. 160-688.
6. M. Stojanovic, J. A. Catipovic, and J. G. Proakis, "Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels," *IEEE J. Ocean. Eng.* **19**, 100-111 (1994).
7. J. C. Preisig, "Performance analysis of adaptive equalization for coherent acoustic communications in the time-varying ocean environment," *J. Acoust. Soc. Am.* **118**, 263-278 (2005).
8. M. Stojanovic, J. Catipovic, and J. G. Proakis, "Adaptive multichannel combining and equalization for underwater acoustic communications," *J. Acoust. Soc. Am.* **94**, 1621-1631 (1993).
9. H. S. Kim, D. H. Choi, J. P. Seo, J. H. Chung, and S. Kim, "The experimental verification of adaptive equalizers with phase estimator in the East Sea" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **29**, 229-236 (2010).
10. G. S. Howe, P. S. D. Tarbit, O. R. Hinton, B. S. Sharif, and A. E. Adams, "Sub-seas acoustic remote communications utilising an adaptive receiving beamformer for multipath suppression," in *Proc. Oceans '94*, 313-316 (1994).
11. G. F. Edelmann, T. Akal, W. S. Hodgkiss, S. Kim, W. A. Kuperman, and H. C. Song, "An initial demonstration of underwater acoustic communication using time reversal," *IEEE J. Ocean. Eng.* **27**, 602-609 (2002).
12. M. J. Eom, J. S. Park, Y. H. Ji, and J. S. Kim, "Mitigation of inter-symbol interference in underwater acoustic communication using spatial filter" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **33**, 48-53 (2014).
13. M. J. Eom, J. S. Kim, J. H. Cho, and H. Y. Kim, "Performance improvement of underwater acoustic communication based on passive time reversal mirror" (in Korean), in *Proc. KAOSTS 2014*, 1955-1957 (2014).
14. M. Fink, "Time-reversal mirrors," *J. Phys. D: Appl. Phys.* **26**, 1333-1350 (1993).
15. J. R. Yoon, M. K. Park, and Y. J. Ro, "Bit error parameters on passive phase conjugation underwater acoustic communication" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **24**, 454-461 (2005).
16. H. C. Song, "Bidirectional equalization for underwater acoustic communication," *J. Acoust. Soc. Am.* **131**, 342-347 (2012).
17. H. C. Song, W. S. Hodgkiss, W. A. Kuperman, W. J. Higley, K. Raghukumar, T. Akal, and M. Stevenson, "Spatial diversity in passive time reversal communications," *J. Acoust. Soc. Am.* **120**, 2067-2076 (2006).
18. J. S. Kim, H. C. Song, and W. A. Kuperman, "Adaptive time-reversal mirror," *J. Acoust. Soc. Am.* **109**, 1817-1825 (2006).
19. S. H. Oh, H. S. Kim, J. S. Kim, J. H. Cho, J. H. Chung, and H. C. Song, "Performance analysis of underwater acoustic communication systems using underwater channel simulation tool" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **31**, 373-383 (2012).
20. H. S. Kim, J. P. Seo, J. Y. Kim, S. Kim, and J. H. Chung, "Equalizer mode selection method for improving bit error performance of underwater acoustic communication systems" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **31**, 1-10 (2012).
21. D. H. Johnson and D. E. Dudgeon, *Array Signal Processing: Concepts and Techniques* (Prentice-Hall, Englewood cliffs, 1993), pp. 241-293.
22. K. F. Riley, *Mathematical Methods for the Physical Sciences: An Informal Treatment for Students of Physics and Engineering* (Cambridge University Press, New York, 1983), pp. 217.

**저자 약력**

▶ **엄 민 정 (Min-Jeong Eom)**



2012년: 한국해양대학교 해양공학과(공학사)  
 2014년: 한국해양대학교 해양공학과(공학석사)  
 2014년 8월: 경북대학교 수중음향특화연구센터 연구보조원  
 2014년 9월~ 현재: LIG넥스원(주) Maritime 연구소 연구원  
 <관심분야> 수중음향, 수중음향통신, 전파모델링

▶ **성 일 (Il Seong)**



1989년: 울산대학교 전자공학과(공학사)  
 1991년: 울산대학교 전자공학과(공학석사)  
 2005년 ~ 현재: 울산대학교 전자공학과 박사과정  
 1991년~ 현재: 국방과학연구소 소나체계 개발단 선임연구원  
 <관심분야> 소나신호처리 및 공기 중 음향신호처리

▶ **김 재 수 (J. S. Kim)**



1981년: 서울대학교 조선공학과(공학사)  
 1984년: 미국 University of Florida, 해양공학(공학석사)  
 1989년: 미국 MIT, 해양공학, 수중음향(공학박사)  
 1990년 ~ 1991년: 국방과학연구소 선임연구원  
 1999년 ~ 2001년: 미국 Scripps 해양연구소 Visiting Scientist  
 2009년 ~ 2010년: 미국 Scripps 해양연구소 Visiting Scientist  
 1991년 ~ 현재: 한국해양대학교 해양공학과 교수

▶ **조 정 홍 (Jung-Hong Cho)**



2005년: 한국해양대학교 해양건설공학과(공학사)  
 2007년: 한국해양대학교 해양공학과(공학석사)  
 2011년: 한국해양대학교 해양공학과(공학박사)  
 2011년 ~ 2013년: 한국해양대학교 수중음향특화연구센터 전임연구원  
 2013년 ~ 현재: (주)한화 선임연구원  
 <관심분야> 수중음향, 소나성능분석, 수중음향 신호처리

▶ **김 회 용 (Hoeyong Kim)**



2005년: 영남대학교 기계공학부(공학사)  
 2007년: 경북대학교 기계공학과(공학석사)  
 2012년: 경북대학교 기계공학과(공학박사)  
 2013년 ~ 현재: (주)한화 선임연구원  
 <관심분야> 음향/초음파 트랜스듀서, 수중음향