



저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사 학위논문

수동형 시역전을 이용한 MIMO
수중음향통신의 성능 분석

Performance Analysis of MIMO Underwater
Acoustic Communication based on Passive
Time-Reversal Processing



2016년 2월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

남기훈

본 논문을 남기훈의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 김 기 만 (인)

위 원 김 재 수 (인)

위 원 박 선 호 (인)



2016년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

목 차	i
List of Figures	ii
List of Tables	iv
Abstract	v
1. 서 론	1
1.1 연구의 필요성 및 목적	1
1.2 논문 구성	3
2. 시역전 기술	4
2.1 능동형 시역전	4
2.2 수동형 시역전	6
3. 해상 실험 및 수치모의실험	9
3.1 해상 실험 환경	9
3.2 송신 신호	11
3.3 수치모의신호	14
4. 수중통신 성능 분석	18
4.1 신호 복조 시스템	19
4.2 해상실험	20
4.3 수치모의실험	26
4.5 해상 실험과 수치모의실험의 통신성능 비교·분석	31
5. 결 론	33
참고문헌	35

List of Figures

Fig.1 Schematic diagram of active time-reversal	5
Fig.2 Schematic diagram of passive time-reversal	8
Fig.3 Experimental information	10
Fig.4 The sound-speed profile in SAVEX15	10
Fig.5 Flow diagram of transmitted signal generation	11
Fig.6 The transmitted signal packet structure	12
Fig.7 Probe signal	13
Fig.8 The transmitted signal at time domain	13
Fig.9 Eigenray tracing	15
Fig.10 Arrival time and amplitude	15
Fig.11 Flow diagram of demodulation system	19
Fig.12 Received signal in SAVEX15 (ch : 7)	20
Fig.13 Channel impulse response	21
Fig.14 Constellation of experimental received signal (data packet : 1,2,3)	22
Fig.15 Constellation of experimental received signal (data packet : 4,5,6)	23
Fig.16 Constellation of experimental received signal (data packet : 7,8,9)	24
Fig.17 Constellation of experimental received signal (data packet : 10)	22
Fig.18 Simulated received signal (ch : 7)	26
Fig.19 Constellation of simulated received 2 (data packet : 1,2,3)	27
Fig.20 Constellation of simulated received signal (data packet : 4,5,6)	28
Fig.21 Constellation of simulated received signal (data packet : 7,8,9)	29

Fig.22 Constellation of simulated received signal
(data packet : 10) 30



List of Tables

Table 1 Information of eigenray	16
Table 2 BER (experiment, VirTEX simulation)	32



Performance Analysis of MIMO Underwater Acoustic Communication based on Passive Time-Reversal Processing

Ki Hoon Nam

Department of Ocean Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

In underwater acoustic environment, inter-symbol interference (ISI) caused by multipath propagation and crosstalk between transmitters in Multiple Input Multiple Output (MIMO) communications result in distortion of signal. Time-reversal (TR), either active or passive, exploiting spatial diversity to achieve spatial and temporal focusing suppresses both ISI and crosstalk. This thesis presents the performance of communication derived by applying the passive TR and a comparison of the performance of communication between simulated signal data using VirTEX (Virtual Time-series Experiment) and at-sea experimental signal data. Consequently, VirTEX simulator can be useful as a simulator for evaluating the performance of communication system in MIMO communication.

KEY WORDS: Underwater acoustic communication, Time reversal, Multiple Input Multiple Output (MIMO), Bit error rate (BER), VirTEX

1. 서 론

1.1 연구의 필요성 및 목적

수중 환경은 도파관 구조로써 해수면과 해저면의 반사에 의하여 시간차를 갖는 신호가 수신기에 도달하게 된다. 그 결과 다중경로가 발생하여 복잡한 채널 환경을 갖는다[1]. 다중경로를 갖는 채널 환경에서 서로 다른 도달 시간을 갖는 신호들의 합성으로 인하여 지연확산이 발생하게 되고 이는 신호 왜곡을 일으킨다. 특히 지연확산에 의한 심볼 간 간섭(Inter-Symbol Interference, ISI)의 발생으로 인하여 통신성능 복원에 어려움이 발생한다.

수중음향통신은 전파를 이용한 육상통신에 비하여 낮은 반송파 주파수를 사용하게 되고 전송 신호의 대역폭에 제한이 되어 있기 때문에 통신용량의 증가에 많은 어려움이 있다. 송신 신호의 통신용량을 높이기 위한 방안으로 국내외에서 Multiple Input Multiple Output(MIMO) 수중음향통신 연구가 진행되고 있다[2]. MIMO 시스템은 복수개의 송신기에서 서로 다른 데이터를 공간적으로 떨어져있는 수신기로 송신하는 공간 다중화(spatial multiplexing)를 이용하여 추가적인 주파수의 할당 없이 송신기의 개수와 비례하는 통신용량을 얻을 수 있는 특징을 갖는다. 또한 MIMO 시스템은 다중 수신기 배열을 통하여 공간 다이버시티 효과를 얻을 수 있기 때문에 데이터의 신뢰도를 높일 수 있다. 하지만 서로 다른 송신기에서 전달한 신호가 1개의 수신기에 동시에 기록되는 현상인 크로스토크(crosstalk)가 발생하여 SISO(Single Input Single Output), SIMO(Single Input Multiple Output) 수중음향통신과 비교하여 신호 복원에 어려움이 있다.

시역전(Time Reversal) 기술은 광학분야에서 처음 도입되었고 이후 수중 통신에 적용되었다[3]. 그 후 미국을 비롯한 선진국에서 1990년대 중반부터 수중음향통신 분야에서 시역전 기술이 시뮬레이션과 해상 실험에서 적용되었고 성능이 입증되었다[4,5]. 시역전 기술은 수신된 신호를 시간영역에서 반전하여 재전송함으로써 정확한 채널 추정이 이루어지지 않아도 왜곡된 신호 보상이 가능하며 구현이 간단하다는 특징을 갖는다. 시역전 기술은 공간 다이버시티를 얻기 위하여 시공간적인 집속을 이용하고 특히 다중경로가 있는 수중 통신 채널 환경에서 유용하게 활용될 수 있다. 시간적 집속을 통해 다중경로에 의한 ISI를 완화시킬 수 있고, 공간적 집속은 높은 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 얻을 수 있게 한다 [6]. 또한 시역전 기술의 이점은 다중 채널 적응형 등화기에 비하여 구현이 간단하기 때문에 낮은 계산 복잡성을 갖는다는 점이다[7].

본 논문은 국내 해역에서 실시된 MIMO 수중음향통신 실험(Shallow water Acoustic Variability EXperiment in 2015, SAVEX15)의 데이터에 수동형 시역전 기술을 적용하여 통신 성능 결과를 도출한다. 그리고 도출된 결과를 통해 MIMO 수중음향통신에서 수동형 시역전 기술의 유용성을 검증한다. 또한 본 논문은 해상 실험의 환경정보를 기반으로 VirTEX(Virtual Time-series Experiment) 시뮬레이터를 이용하여 수신 신호를 모의하고, 해상 실험 데이터와 시뮬레이터 데이터의 비교, 분석을 통해 MIMO 수중음향통신에서 VirTEX 시뮬레이터의 활용성을 검증하는데 목적이 있다[8].

1.2 논문 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서 능동형 시역전과 수동형 시역전에 관한 이론을 설명한다. 제 3장에서는 해상 실험의 환경과 해상 실험에서 송신한 신호의 변조 방법에 관하여 기술하고, VirTEX 시뮬레이터를 이용하여 가상 수신신호를 생성한다. 제 4장에서 통신 복조 시스템에 대하여 설명하고 비트오류율(Bit Error Rate, BER)을 산출하여 해상 실험 결과와 시뮬레이터 결과를 비교, 분석한다. 마지막으로 제 5장에서 결론을 맺는다.



2. 시역전 기술

2.1 능동형 시역전

시역전 기술은 수신된 신호로부터 얻어낸 채널 정보를 시간영역에서 반전시켜 역으로 전파하는 기법이다. 시역전 기술은 채널응답특성의 시공간적 정합필터를 이용하여 수중채널에서 발생하는 다중경로에 의한 페이딩을 감소시킨다. Fig.1은 능동형 시역전을 도식화 한 것이고, 사전에 생성한 송신 신호 $s(t)$ 와 N 개의 수신기 배열에서 i 번째 수신 신호를 $r_i(t)$ 라 할 때 송신 신호와 수신 신호의 관계는 식(1)과 같다.

$$r_i(t) = s(t) * h_i(t) \quad (1)$$

여기서 $h_i(t)$ 는 채널응답특성을 나타내고 $*$ 는 convolution연산을 의미한다. 시역전 기술을 통해 수신 신호 $r_i(t)$ 를 시간영역에서 반전시킨 $r_i(-t)$ 를 재전송하게 되면 식(2)와 같이 표현되고 $y(t)$ 는 재집속된 수신 신호를 의미한다.

$$\begin{aligned} y(t) &= \sum_{i=1}^N r_i(-t) * h_i(t) \\ &= s(-t) * \left[\sum_{i=1}^N h_i(-t) * h_i(t) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

결과적으로 다중경로를 갖는 채널에서 재집속된 수신 신호 $y(t)$ 는 주엽(main lobe)이 증폭되고 부엽(side lobe)이 억제되어 ISI가 경감하게 되는 효과를 얻을 수 있다.

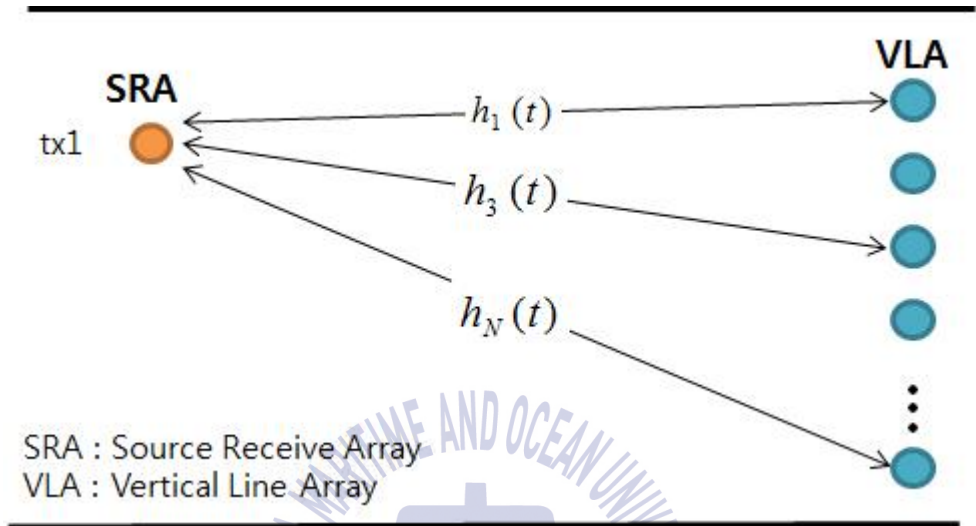
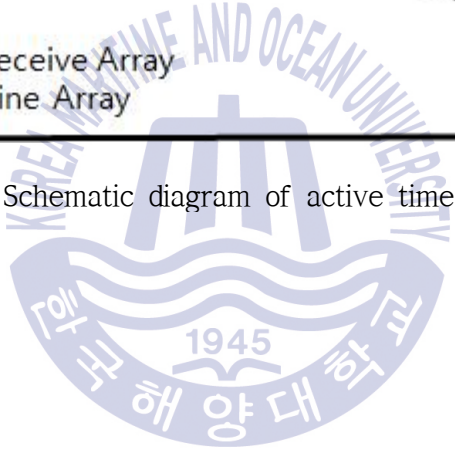


Fig.1 Schematic diagram of active time-reversal



2.2 수동형 시역전

송수신기에 의한 양방향 전파과정을 통한 시공간적 정합필터를 수행한 능동형 시역전과 달리 수동형 시역전은 송신기에서 수신기에 따른 한 방향 전파과정으로써 수행될 수 있다. 수신 채널별로 탐침신호를 이용하여 채널응답특성을 산출하는 방법으로 시역전 기술을 적용한다. 소음성분을 무시할 때, 수신기 배열에서 i 번째 수신 신호는 식 (1) $r_i(t) = s(t) * h_i(t)$ 과 같다. 수동형 시역전은 각 수신기 성분의 채널응답특성에 대하여 시간영역에서 반전시킨 $h_i(-t)$ 를 이용하여 수치적 정합필터를 수행한다. 여기서 N 개의 수신기 배열을 갖는 환경에서 재집속된 수동형 시역전 신호 $y(t)$ 는 식(3)과 같이 표현된다.

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

이때, MIMO 환경을 구성하기 위해 2개의 송신기와 N 개의 수신기 배열을 갖는 환경을 가정하자. 수동형 시역전의 구조는 Fig.2과 같고 i 번째 수신 신호는 식(4)와 같다.

$$r_i(t) = s_1(t) * h_{i1}(t) + s_2(t) * h_{i2}(t) \tag{4}$$

여기서 $s_1(t)$ 과 $s_2(t)$ 는 각각 첫 번째, 두 번째 송신기에서 전달한 송신 신호 정보를 의미하고 $h_{i1}(t)$ 과 $h_{i2}(t)$ 은 각각 첫 번째, 두 번째 송신기에 의한 전달신호에 대응하는 채널응답특성을 나타낸다. 첫 번째 송신기에서 전달한 송신 신호 $s_1(t)$ 를 기준으로 한 재집속된 수동형 시역전 신호 $y_1(t)$ 를 계산하기 위하여 식(3)에 식(4)를 적용하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 y_1(t) &= \sum_{i=1}^N r_i(t) * h_{i1}(-t) \\
 &= s_1(t) * \left[\sum_{i=1}^N h_{i1}(t) * h_{i1}(-t) \right] + s_2(t) * \left[\sum_{i=1}^N h_{i2}(t) * h_{i1}(-t) \right]
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 $y_1(t)$ 는 채널응답 $h_{i1}(t)$ 를 통해 재집속된 수동형 시역전 신호이며 $\sum_{i=1}^N h_{i1}(t) * h_{i1}(-t)$ 는 첫 번째 송신기에서 전달된 원하는 신호 정보이고 $\sum_{i=1}^N h_{i2}(t) * h_{i1}(-t)$ 는 MIMO 환경에서 성능 저하를 일으키는 두 송신기 사이의 크로스토크를 나타낸다[9].

위와 같은 방법으로 두 번째 송신기에서 전달한 송신신호 $s_2(t)$ 를 기준으로 한 수동형 시역전 신호 $y_2(t)$ 는 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 y_2(t) &= \sum_{i=1}^N r_i(t) * h_{i2}(-t) \\
 &= s_1(t) * \left[\sum_{i=1}^N h_{i1}(t) * h_{i2}(-t) \right] + s_2(t) * \left[\sum_{i=1}^N h_{i2}(t) * h_{i2}(-t) \right]
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 $\sum_{i=1}^N h_{i1}(t) * h_{i2}(-t)$ 는 두 송신기 사이의 크로스토크를, $\sum_{i=1}^N h_{i2}(t) * h_{i2}(-t)$ 는 두 번째 송신기에서 전달된 원하는 신호 정보를 의미한다.

본 논문에서는 능동형/수동형 시역전 기술 중에서 수동형 시역전 기술을 이용하여 수중 MIMO 채널 환경의 통신성능을 분석하였다.

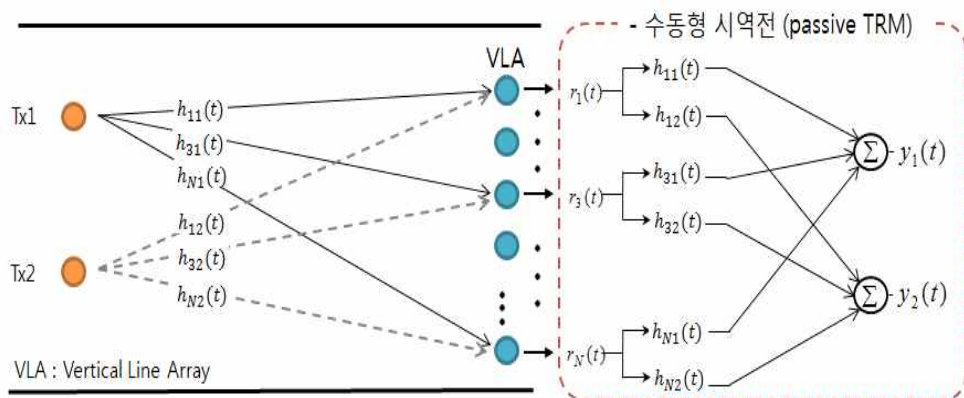


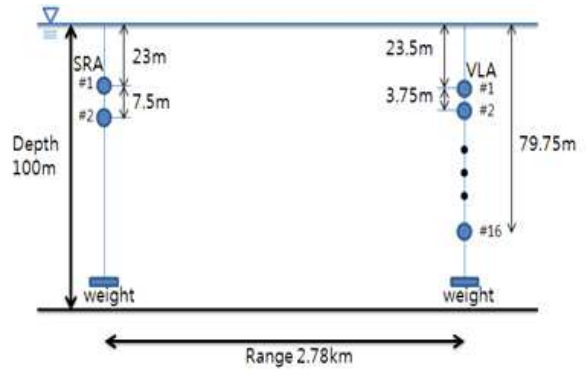
Fig.2 Schematic diagram of passive time-reversal



3. 해상 실험 및 수치모의실험

3.1 해상 실험 환경

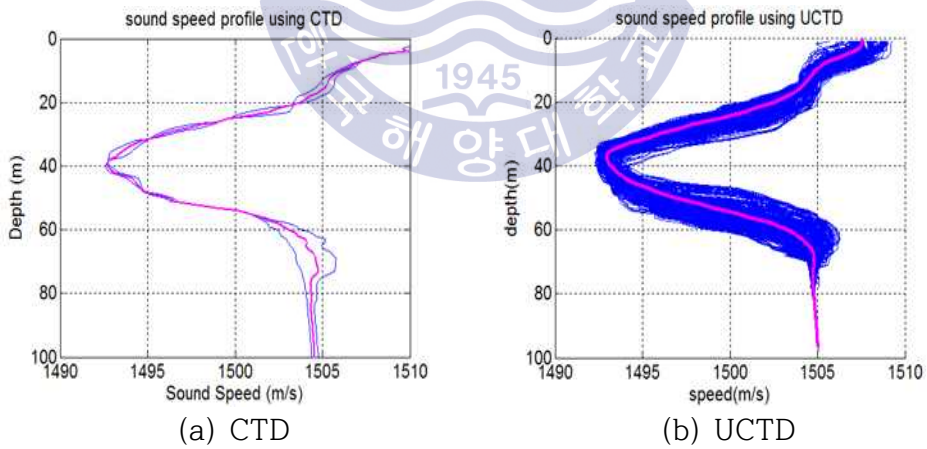
본 논문에서 분석한 데이터는 미국 Scripps 해양연구소와 한국해양과학기술원(KIOST)의 주관으로 실행된 실험(SAVEX15)에서 획득한 데이터로서 실험은 제주도 남서방향의 동중국해에서 진행되었다. 실험 해역의 수심은 약 100m이고 송신기 위치는 각각 23, 30.5m에 위치한다. 수신기는 16개 수직 배열을 사용하여 23.5~79.75m에 깊이에 3.75m간격으로 배치되었고 결과적으로 (2×16)의 송수신기 채널을 갖는 MIMO 수중통신 환경이 구성되었다. 송신기와 수신기의 거리는 약 2.78 km이다. Fig.3은 실험 해역의 위치와 실험 환경의 모식도이다. 실험 해역의 음속은 CTD(Conductivity, Temperature, Depth)와 UCTD(Underway CTD)를 이용하여 측정하였으며, 그림 Fig.4는 측정된 음속구조를 도식화 한 것으로 (a)는 CTD, (b)는 UCTD로 측정된 데이터를 나타낸다. 음속구조를 보면 약 수심 100m의 얕은 수심을 갖는 천해임에도 음파 통로(Sofar Channel)가 형성되는 특징을 갖는다. CTD는 2회를 측정하였고 UCTD의 경우 측정의 편의성으로 인하여 CTD에 비하여 많은 횟수를 측정할 수 있었고, 측정횟수는 324회이다. 음속 데이터는 평균을 취하여 시뮬레이션에 사용하였다.



(a) Experimental sea area
(south western Jeju Island)

(b) Experimental setup

Fig.3 Experimental information



(a) CTD

(b) UCTD

Fig.4 The sound-speed profile in SAVEX15

3.2 송신 신호

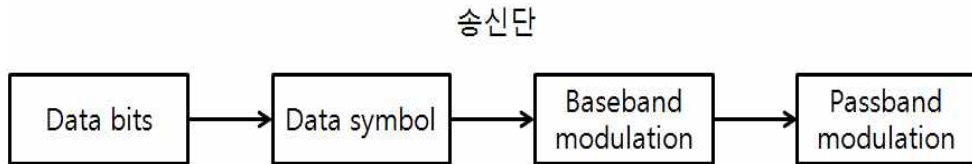


Fig.5 Flow diagram of transmitted signal generation

송신 신호를 생성하기 위한 흐름도는 Fig.5와 같이 나타낼 수 있다. 첫 번째로 0과 1로 이루어진 비트 정보를 이용하여 심볼로 변조한다. 변조 방식으로는 PSK(Phase Shift Keying), FSK(Frequency Shift Keying), QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 등이 있고 본 논문에서는 BPSK(Binary Phase Shift Keying)를 이용하여 심볼 변조를 하였다[10]. BPSK는 0과 1의 값을 갖는 비트 정보를 이용하여 반송파에 180도의 위상차를 가지도록 하는 변조 방식이다. BPSK 변조는 1개의 비트가 1개의 심볼로 맵핑되는 만큼 심볼오류에 대한 면역성이 우수한 반면 QPSK나 16QAM과 같은 다른 변조 방식에 비하여 동일한 대역폭에서 낮은 전송률을 갖는 단점이 있다. 다음으로 기저대역 변조(baseband modulation)를 위하여 BPSK로 변조된 심볼과 올림코사인필터(raised cosine filter)를 이용하여 펄스 성형(pulse shaping)을 수행한다. Fig.6은 송신 신호 패킷 구조를 나타내며, 3.1절에서 언급한 바와 같이 MIMO 수중통신실험을 위하여 송신기는 두 개를 이용하였고 각 송신기에서의 전달 신호를 비트 정보와 가드타임(guard time)을 다르게 설정하였다. 이 때, 첫 번째 송신기(Tx 1)의 송신 신호의 데이터 패킷 앞부분에 채널응답특성 분석과 시역전 기술의 이용을 위한 탐침 신호로써 올림코사인필터와 연속파(continuous wave, CW)의 곱연산으로 생성된 신호를 삽입한다. 생성된 탐침신호는 Fig.7에 나타내었으며 16.5 kHz의 반송파 주파수를 갖게 된다. 다음으로 통과대역 변조(passband modulation) 과정을 통해 데이터 패킷의 주파수를 반송파

주파수만큼 높은 주파수로 천이시켰다. 마지막으로 데이터 패킷의 비트 정보를 변경하며 위와 같은 일련의 과정을 총 10회 연속적으로 수행하여 송신 신호를 생성하였고, Fig.8은 송신 신호를 시간영역에서 도식화한 것이다.

각 송신기에서 송신하는 신호 데이터의 두 번째 데이터 패킷 부분의 시점과 종점을 동일하게 하였고 이를 통해 수신기에서 데이터 패킷이 중첩되어 MIMO 환경의 실험 데이터를 얻을 수 있도록 송신 신호를 구성하였다. 데이터 패킷은 2,000 (symbol/sec)의 심볼률을 갖으며 하나의 데이터 패킷의 송신 심볼은 1,728개이다. 따라서 한 데이터 패킷의 길이는 0.864 초이다.



Fig.6 The transmitted signal packet structure

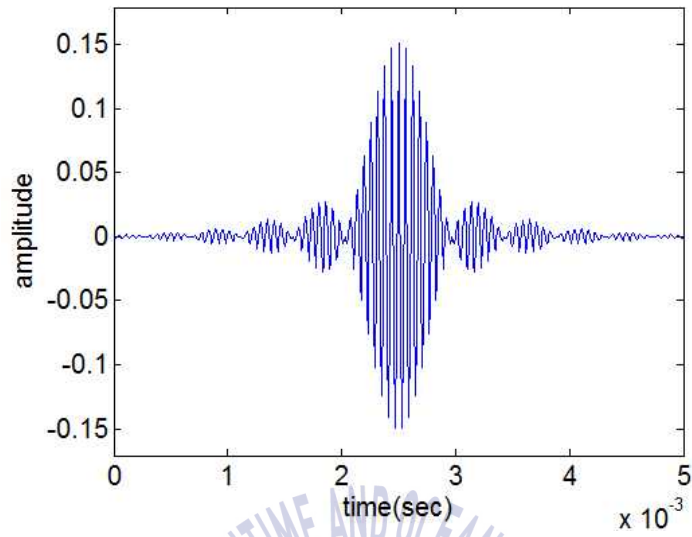


Fig.7 Probe signal

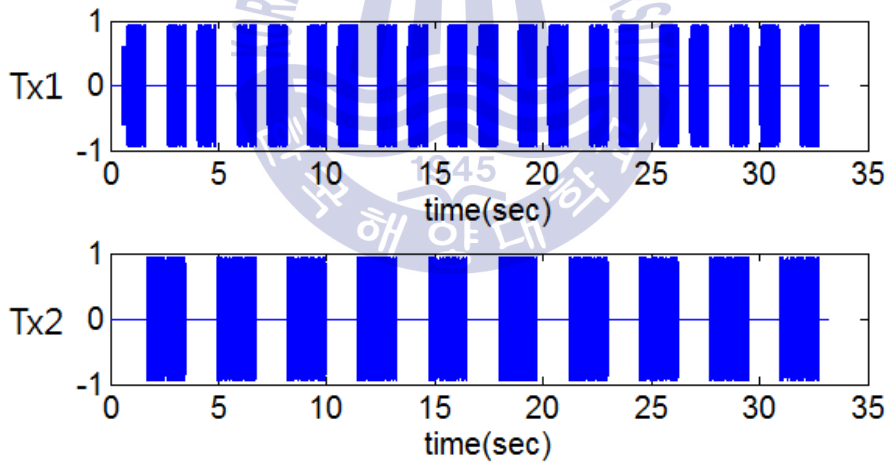


Fig.8 The transmitted signal at time domain

3.3 수치모의신포

수치모의신포를 생성하기 위하여 음선이론을 기반으로 한 음파전파모델 BELLHOP을 이용하여 개발된 VirTEX시뮬레이터를 이용한다[8, 11-13]. VirTEX 시뮬레이터는 3.1절에 나타낸 해상 실험에서 획득한 해양 환경 정보를 입력값으로 활용하여 시뮬레이션을 수행한다. 이 때, 해저면의 지음향 매개변수로서 해저 지형의 구성 성분은 점토질(clay)이고 음속은 1,493 m/s, 밀도는 1.42 g/cm³, 감쇠계수는 0.5 dB/λ로 설정하였다[14]. 해저 지형의 형태는 평면이며 해수면의 유동이 없는 deterministic한 환경으로 가정하였다.

위와 같은 환경 정보를 토대로 BELLHOP을 이용하여 고유음선(Eigenray) 경로를 계산하였고 Fig.9에서 1번 송신기 위치와 16개의 수신기 배열 중 1, 6, 11, 16번 수신기 위치에서의 고유음선경로를 도식화 하였다. 약 100m의 얕은 수심을 갖는 해역임에도 불구하고 음속구조 특성으로 인하여 음파 통로가 형성되는 것을 확인할 수 있다. Fig.10에 고유음선의 도달시간과 진폭을 계산하여 도식화하였다. 또한 Table 1에서 고유음선의 진폭이 높게 산출된 두 경우를 뽑아 도달시간 및 진폭의 수치, 음선 반사 횟수, 그리고 송·수신 각도를 나타내었다. 수신기의 수심이 깊어질수록 도달하는 음파의 세기가 낮아지는 것이 확인되고 12번 수신기(64.8m)부터는 직접파보다 반사파의 세기가 더 강한 것을 확인할 수 있다.

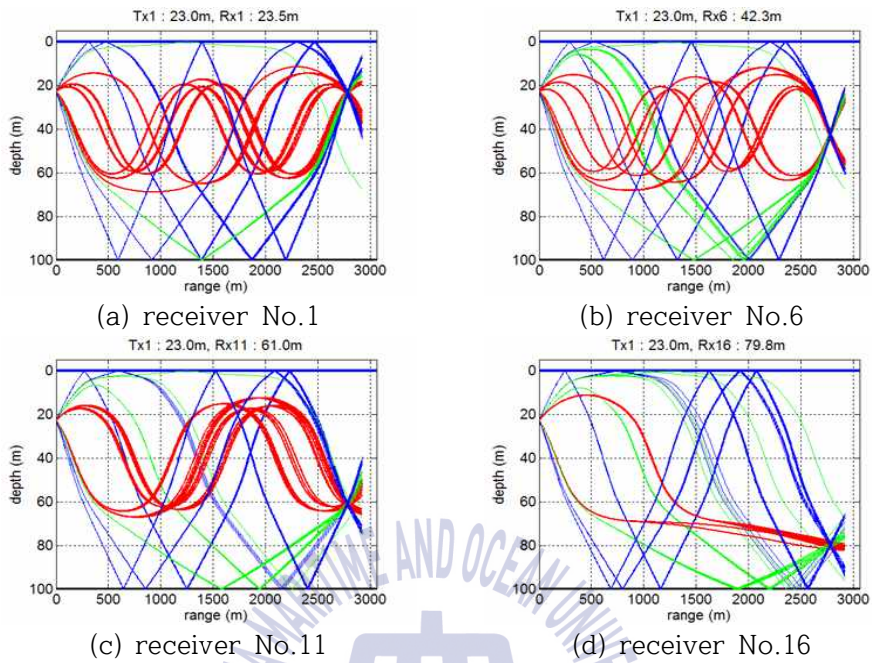


Fig.9 Eigenray tracing

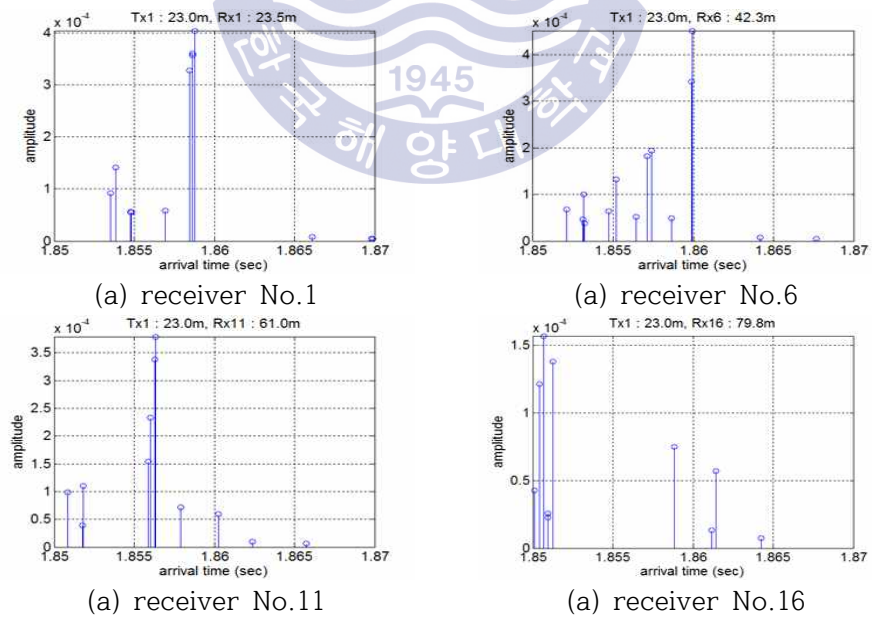


Fig.10 Arrival time and amplitude

Table 1. Information of eigenray

arrival #	arrival(se c)	amplitude ($\times 10^{-3}$)	top bounce #	bottom bounce #	source angle(°)	received angle(°)
9	1.8586	0.3607	0	0	-2.711	-2.875
11	1.8588	0.4046	0	0	-2.238	2.515

(a) receiver No.1

arrival #	arrival(se c)	amplitude ($\times 10^{-3}$)	top bounce #	bottom bounce #	source angle(°)	received angle(°)
12	1.8599	0.3416	0	0	2.287	6.349
13	1.8599	0.4512	0	0	-1.536	6.116

(b) receiver No.6

arrival #	arrival(se c)	amplitude ($\times 10^{-3}$)	top bounce #	bottom bounce #	source angle(°)	received angle(°)
6	1.856	0.23289	0	0	3.4906	-1.993
8	1.8563	0.37929	0	0	-3.177	-1.501

(c) receiver No.11

arrival #	arrival(se c)	amplitude ($\times 10^{-3}$)	top bounce #	bottom bounce #	source angle(°)	received angle(°)
6	1.8507	0.1568	0	0	-3.850	0.614
9	1.8513	0.1379	0	1	-4.370	-2.151

(d) receiver No.16

VirTEX 시뮬레이터는 해상 실험 중 존재하는 잡음 성분을 고려하지 않는 특징이 있다. 그렇기 때문에 해상 실험 데이터의 SNR을 계산하여 수치 모의된 신호에 적용을 통해 잡음 성분을 고려한다. 이 때, SNR은 식(7)을 근거로 산출 하였다.

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \quad (7)$$

여기서, P_{signal} 은 직접파 신호의 파워, P_{noise} 는 직접파 신호가 아닌 잡음 구역의 파워이고, 만약 두 신호가 동일한 임피던스를 통하여 측정되었다면 식 (8)과 같이 진폭의 제곱의 비로 표현가능하다.

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} = \left(\frac{A_{\text{signal}}}{A_{\text{noise}}} \right)^2 \quad (8)$$

해상실험신호에서 각 수신기별 산출된 SNR의 평균값을 구하였고 그 값은 21.3dB로 계산되었다. 산출된 SNR값을 백색 가우시안 잡음의 형태로 수치 모의된 신호에 적용하였다.

4. 수중통신 성능 분석

통신성능은 복조과정을 통하여 도출된 수신신호의 비트 정보와 송신신호의 비트 정보를 비교하여 오차율을 나타내는 BER(Bit Error Rate)을 산출하여 판단한다. 해상 실험 및 수치모의신호는 16.5 kHz를 반송파 주파수로 사용했고, 샘플링 주파수는 100 kHz, 대역폭은 2.5 kHz, 변조 방식은 BPSK를 적용하였다. 그리고 전송률은 2,000(symbol/sec)이며 한 데이터패킷의 전송 심볼은 1,728개이다.

본 절에서는 해상실험 데이터에 수동형 시역전 기술을 이용하여 통신성능을 파악한다. 그 결과를 통해 MIMO 수중음향통신에서 시역전 기술의 유용성을 검증한다. 그리고 VirTEX 시뮬레이터를 이용하여 생성한 가상수신신호의 통신성능을 해상실험 데이터 처리와 동일한 과정을 통해 파악한다. 해상실험과 시뮬레이션의 두 결과를 비교하여 수중통신 MIMO 환경에서 VirTEX 시뮬레이터의 활용 가능성을 검증한다.

4.1 신호 복조 시스템

전체적인 신호 복조 시스템의 흐름도는 Fig.11과 같이 나타난다. 해상 실험을 통하여 수신된 신호, 또는 시뮬레이터를 통한 가상 수신신호에 대하여 대역통과필터를 적용한다. 탐침 신호와 수신신호의 상관관계를 계산하여 각 수신기 배열의 수신신호마다 전달함수 $h(t)$ 를 지정할 수 있다. 이 때, 탐침신호는 첫 번째 송신기에서 전달된 신호에만 존재하기 때문에 이 탐침신호를 이용하여 채널을 추정하고 상관관계를 계산한다. 즉, 두 개의 송신신호가 겹쳐진 수신신호에서 탐침신호가 존재하는 첫 번째 송신신호의 통신성능을 분석하였다. 지정된 전달함수를 이용하여 2장에서 설명한 수동형 시역전 기술을 통하여 수신신호의 데이터 패킷을 결정한다. 결정된 데이터 패킷에 판정 피드백 위상고정루프(Decision Feedback Phase Locked Loop, DFPLL)를 적용하여 주파수와 위상을 동기화시킨다 [10]. 그리고 기저대역 복조(baseband demodulation) 과정으로써 위상고정 루프가 적용된 데이터 패킷 신호를 반송파 주파수를 제거(down-conversion)하여 기저대역 영역으로 주파수를 천이시킨다. 다음으로 등화기(Decision Feedback Equalizer, DFE)를 선택적으로 사용하여 잔여 ISI의 감소 여부를 결정하여 수신신호의 심볼이 도출된다. 심볼 변조 과정의 역순을 통하여 수신 심볼 정보를 비트 정보로 복조시킨다. 최종적으로 복조가 완료된 비트 정보와 송신 비트 정보를 비교하여 BER을 산출하게 된다.

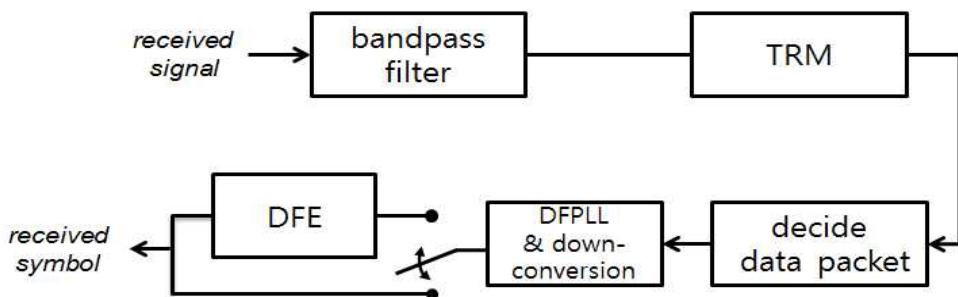


Fig.11 Flow diagram of demodulation system

4.2 해상 실험

해상 실험 데이터에서 4.1절의 과정을 통해 BER을 산출할 수 있고, 산출된 BER을 통하여 통신성능을 확인한다. 수신된 데이터는 16개의 수신기 배열에서 저장되었고 각 수신기에서 수신된 신호는 30개의 데이터 패킷이 있으며 이 중에서 10개의 데이터 패킷이 MIMO 환경의 데이터 패킷으로써 본 논문에서는 MIMO 환경의 데이터 패킷의 통신성능을 분석하였다. Fig.12는 7번 채널에서의 해상 실험 수신 신호를 필터의 적용 전후를 도식화하였다. 이 때 사용한 필터는 대역통과필터이며 차단 주파수는 반송파 주파수를 기준으로 $\frac{1}{2}$ 대역폭을 \pm 해준 값으로 15,250~17,750 Hz이다.

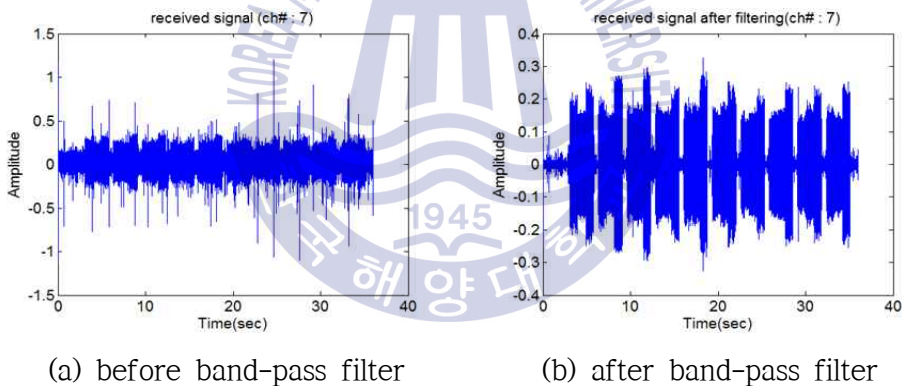


Fig.12 Received signal in SAVEX15 (ch : 7)

첫 번째 송신기의 송신 신호에 존재하는 탐침신호를 이용하여 채널응답 특성을 계산하였고 1~4번째 데이터 패킷에서의 결과를 Fig.13에 나타내었다. 이 때, y축은 16개의 수신기 배열로써 각 수신기의 수심을 의미한다. BELLHOP 전파모델링 결과인 3장 3절의 결과를 통해 세기가 강한 직접파가 우선적으로 나타나는 점을 알 수 있다. 약 60미터 이상의 수심에 위치하는 수신기의 경우 음파의 세기가 작아지는 특징을 확인할 수 있고, 이는 음파 통로가 발생하여 직접파가 도달하지 못하고 해저면 반사에 의한 세기가 감쇠된 음파가 도달하여 발생한 현상이라고 판단된다. 그리고 음속구조의 특성에 의하여 음선경로의 길이가 송수신기 위치의 직선거리보다 길어질 수 있기 때문에 수심이 깊어질수록 직접파의 도달이 빠른 특징을 확인할 수 있다. Fig.13-(a), (b), (c)에서 불규칙적으로 임펄스성 신호를 관찰할 수 있는데, 이는 딱총새우와 같은 해양 환경적 소음 성분일 것이라고 예측된다.

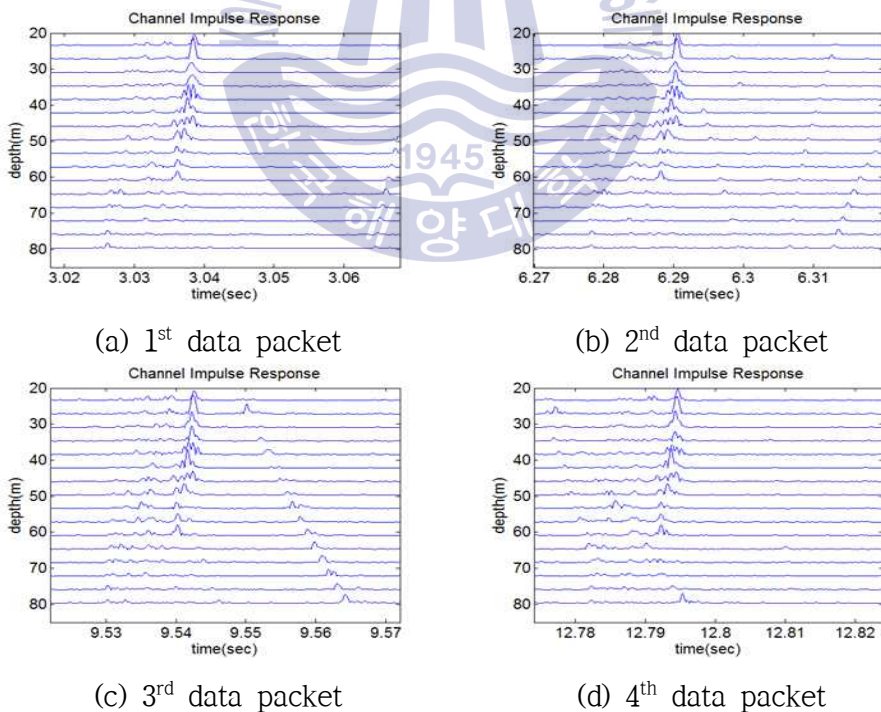
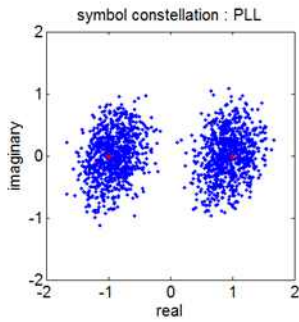


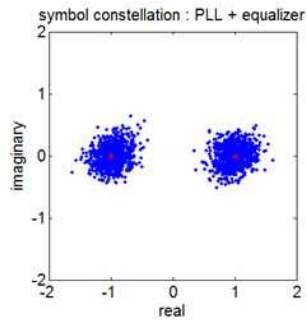
Fig.13 Channel impulse response

(a) TR + DFPLL

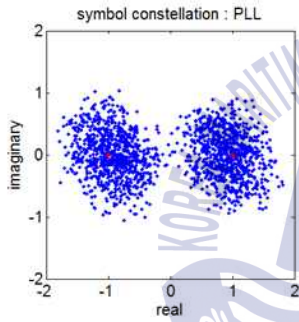


data packet : 1
BER = 0/1728

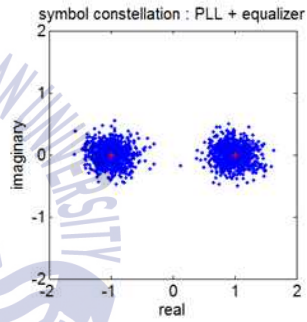
(b) TR + DFPLL + DFE



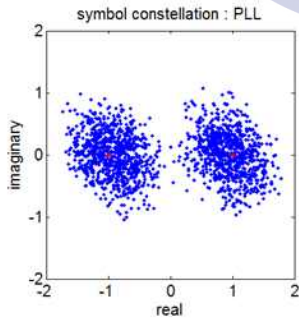
data packet : 1
BER = 0/1628



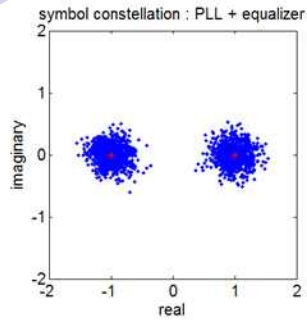
data packet : 2
BER = 3/1728



data packet : 2
BER = 0/1628



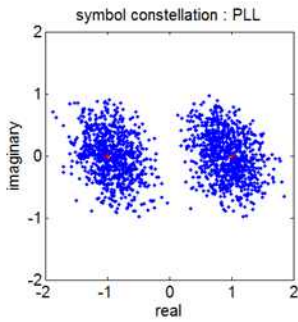
data packet : 3
BER = 0/1728



data packet : 3
BER = 0/1628

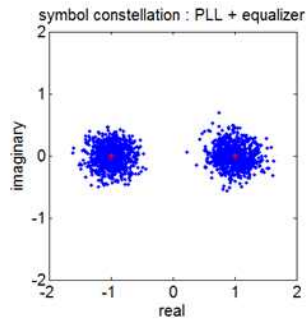
Fig.14 Constellation of experimental received signal
(data packet : 1,2,3)

(a) TR + DFPLL

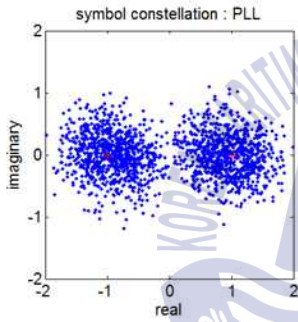


data packet : 4
BER = 0/1728

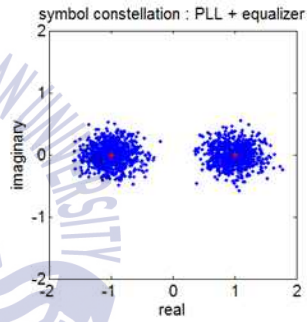
(b) TR + DFPLL + DFE



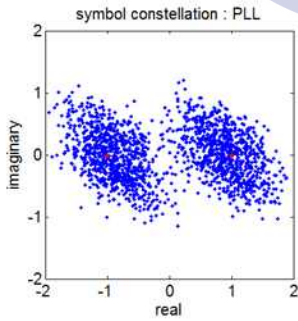
data packet : 4
BER = 0/1628



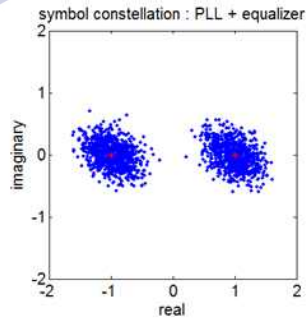
data packet : 5
BER = 6/1728



data packet : 5
BER = 0/1628



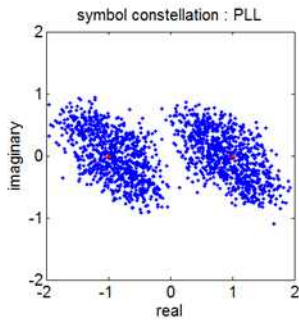
data packet : 6
BER = 19/1728



data packet : 6
BER = 0/1628

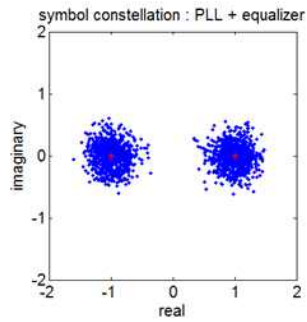
Fig.15 Constellation of experimental received signal
(data packet : 4,5,6)

(a) TR + DFPLL

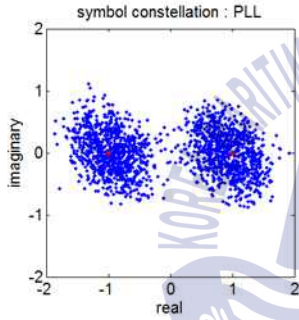


data packet : 7
BER = 4/1728

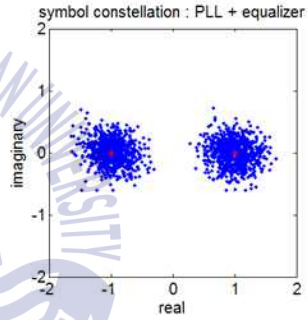
(b) TR + DFPLL + DFE



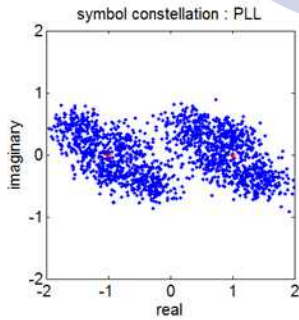
data packet : 7
BER = 0/1628



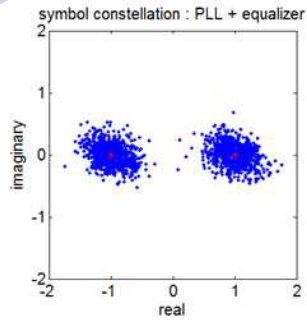
data packet : 8
BER = 1/1728



data packet : 8
BER = 0/1628



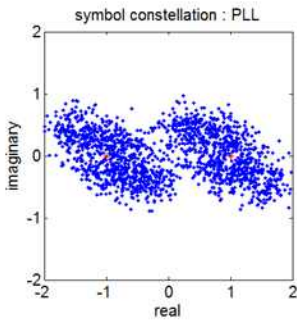
data packet : 9
BER = 40/1728



data packet : 9
BER = 1/1628

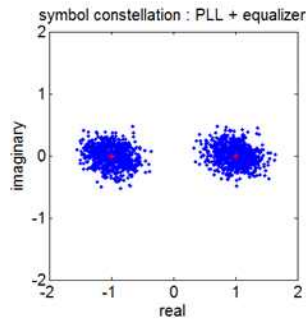
Fig.16 Constellation of experimental received signal
(data packet : 7,8,9)

(a) TR + DFPLL



data packet : 10
BER = 42/1728

(b) TR + DFPLL + DFE



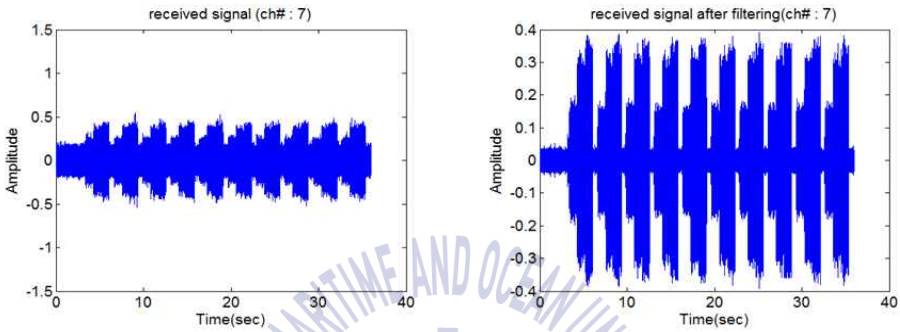
data packet : 10
BER = 0/1628

Fig.17 Constellation of experimental received signal
(data packet : 10)

Fig.14~17는 MIMO 환경의 10개의 데이터 패킷의 성상도를 도식화 한 것으로 수동형 시역전 기술을 적용한 후, (a)는 위상고정루프를 적용한 것이고 (b)는 위상고정루프와 등화기를 같이 적용한 것이다. 등화기를 적용함으로써 남은 ISI를 보상시키기 때문에 (b)의 경우에서 통신성능이 향상되는 것을 알 수 있다. 그리고 하나의 데이터 패킷의 심볼수는 1,728개이지만 등화기 적용시 training sequence로 100개의 송신 심볼을 사용하기 때문에 (b)의 경우 하나의 데이터 패킷에서 1,628개의 수신 심볼을 확인할 수 있다.

4.3 수치모의실험

VirTEX 시뮬레이터를 이용하여 3.3절의 방법으로 가상 수신 신호를 모의하였고(Fig.18) 해상 실험 데이터와 동일한 복조 알고리즘(4.1절)을 적용하여 BER을 산출했다.

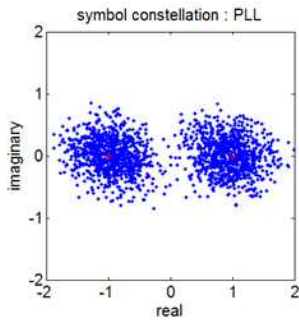


(a) before band-pass filter

(b) after band-pass filter

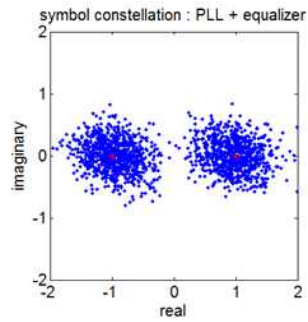
Fig.18 Simulated received signal (ch : 7)

(a) TR + DFPLL

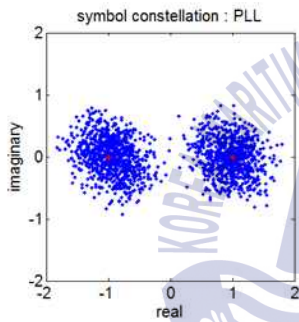


data packet : 1
BER = 1/1728

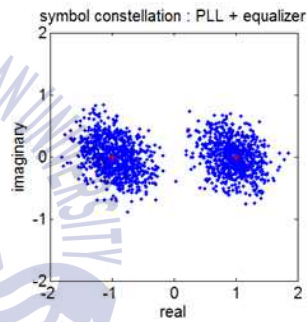
(b) TR + DFPLL + DFE



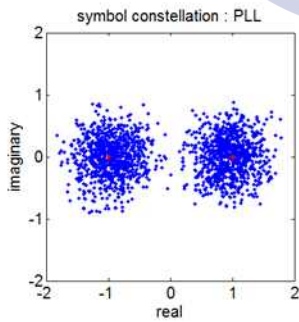
data packet : 1
BER = 0/1628



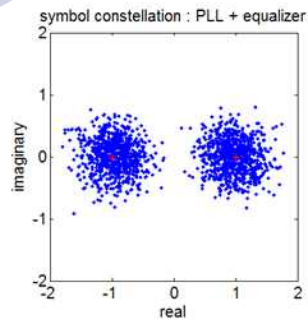
data packet : 2
BER = 2/1728



data packet : 2
BER = 1/1628



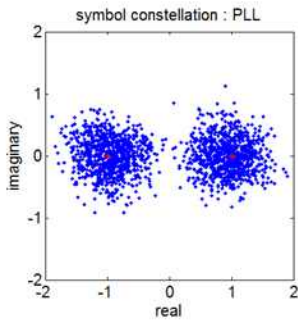
data packet : 3
BER = 1/1728



data packet : 3
BER = 0/1628

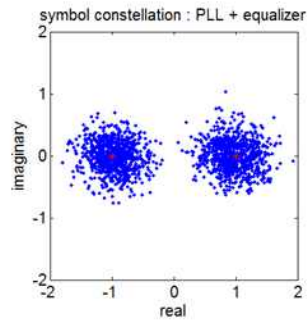
Fig.19 Constellation of simulated received signal
(data packet : 1,2,3)

(a) TR + DFPLL

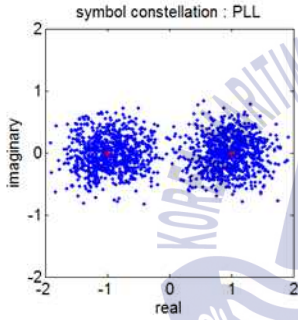


data packet : 4
BER = 1/1728

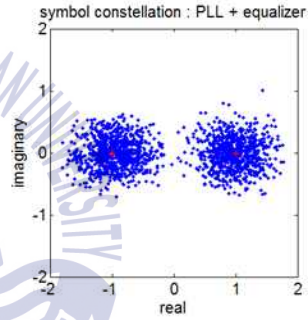
(b) TR + DFPLL + DFE



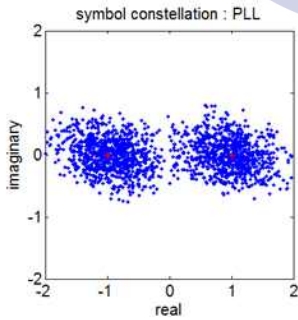
data packet : 4
BER = 0/1628



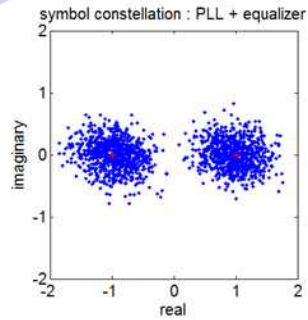
data packet : 5
BER = 4/1728



data packet : 5
BER = 1/1628



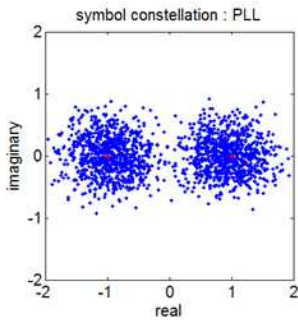
data packet : 6
BER = 12/1728



data packet : 6
BER = 0/1628

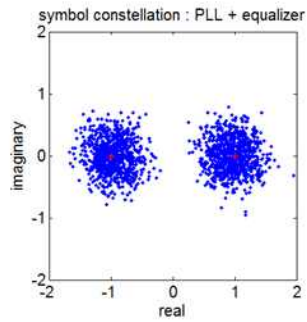
Fig.20 Constellation of simulated received signal
(data packet : 4,5,6)

(a) TR + DFPLL

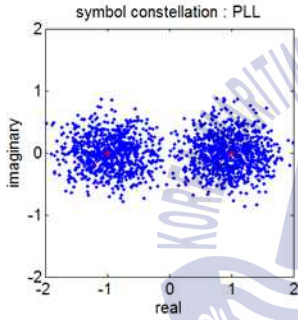


data packet : 7
BER = 6/1728

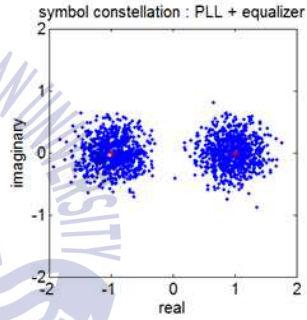
(b) TR + DFPLL + DFE



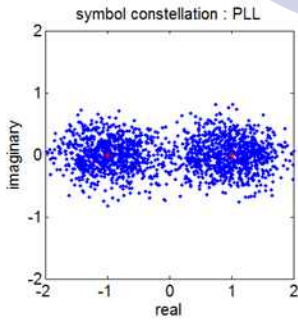
data packet : 7
BER = 0/1628



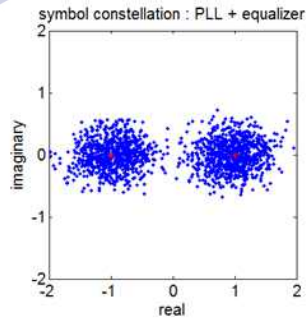
data packet : 8
BER = 2/1728



data packet : 8
BER = 0/1628



data packet : 9
BER = 19/1728



data packet : 9
BER = 3/1628

Fig.21 Constellation of simulated received signal
(data packet : 7,8,9)

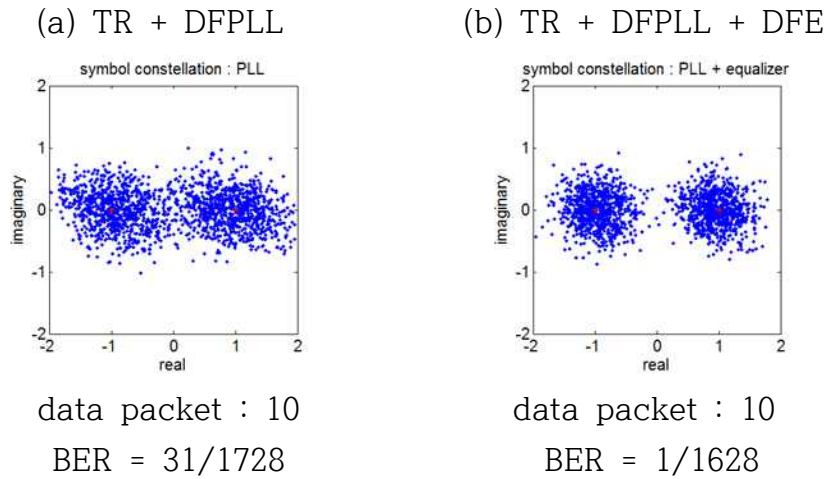


Fig.22 Constellation of simulated received signal
(data packet : 10)

Fig.19~22에서 수치모의신호의 정상도를 나타내었다. 해상실험 결과와 동일하게 추가로 등화기를 이용하여 잔여 ISI를 제거하였더니 통신성능이 향상 되는 것을 알 수 있다.

4.5 해상실험과 수치모의실험의 통신성능 비교·분석

본 절에서는 4.2절과 4.3절에서 산출된 해상 실험 신호와 수치모의신호의 BER을 비교 및 분석한다. 시역전 기술을 이용하여 MIMO 수중 통신 신호를 보상하고 위상고정루프를 적용하여 위상을 보정하였을 때 BER 수치는 0%~2.42%로 나타나고, 등화기를 추가적으로 수행한 결과는 대부분의 BER 수치가 0%로써 성능이 향상됨을 알 수 있다.

해상실험과 수치모의실험에서 각각 BER을 산출했고, Table 2에 BER을 표시했다. 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하는데 앞서 수치적으로 신뢰도가 적다고 판단되는 0.3%미만의 BER 결과를 무시하였을 때, 해상실험의 결과에 비하여 수치모의실험의 결과가 BER 값이 작은 것을 알 수 있다. 이는 실제 해상 실험과 달리 VirTEX 시뮬레이터의 경우 해수면 유동을 고려하지 않는 deterministic한 환경을 가정하기 때문으로 판단된다. 또한, VirTEX 시뮬레이터의 입력변수로써 해상 실험 당시의 환경정보를 이용하게 되는데 측정치, 추정치이므로 완전한 동일한 환경을 시뮬레이션 하는 것은 어려움이 있다. 그럼에도 각 데이터 패킷에서의 해상실험과 수치모의실험의 BER 값이 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

Table 2. BER (experiment, VirTEX simulation)

Number of data packet	TR+DFPLL		TR+DFPLL+DFE	
	experiment (%)	simulation (%)	experiment (%)	simulation (%)
1	0	0.06	0	0
2	0.17	0.12	0	0.06
3	0	0.06	0	0
4	0	0.06	0	0
5	0.35	0.23	0	0.06
6	1.10	0.69	0	0
7	0.23	0.35	0	0
8	0.06	0.12	0	0
9	2.31	1.10	0.06	0.18
10	2.43	1.79	0	0.06

5. 결 론

수중환경은 도파관 구조이기 때문에 수중음향통신 채널 환경은 반사파가 발생하게 되고 이로 인하여 다중경로가 발생한다. 다중경로 전파환경으로 인해 발생한 지연 확산의 영향으로 ISI가 발생하며 수중음향통신에서 송신신호가 큰 전송용량을 갖는데 걸림돌이 된다. 이를 완화시키기 위하여 본 논문에서는 자기 등화의 특징을 지닌 시역전 기술을 이용하여 수중 MIMO 채널환경의 통신성능을 분석하였다. 또한 BELLHOP 음파전파모델을 이용한 VirTEX 시뮬레이터를 통해 가상 수신 신호를 모의하고 해상 실험과 동일한 과정을 통하여 통신성능을 도출하였다.

제주 남서쪽 해안에서 실시된 SAVEX15 해상실험 데이터를 이용하여 MIMO 환경의 수중음향통신 시스템 성능을 시역전 기술을 적용하여 검증하였다. 수신 데이터 신호의 보상을 위하여 시역전 기술과 위상고정루프를 적용하였고 추가적으로 등화기를 사용하여 BER을 산출했다. 그리고 동일한 복조 과정을 통해 가상 수신신호의 BER을 산출했다. 그 결과 국내 해역에서 실시된 SAVEX15 해상실험의 통신성능 결과를 통해 MIMO 수중음향통신에서 시역전 기술의 유용성을 검증할 수 있었다.

해상실험과 수치모의실험의 BER이 약간의 차이를 보였지만, VirTEX 시뮬레이터의 입력값으로써 실험 당시의 정확한 환경 수치를 측정할 수 없었음을 고려한다면 유사한 경향을 보인다. 결과적으로 MIMO 수중음향통신 환경에서 VirTEX 시뮬레이터의 활용가능성은 충분하다고 판단된다. 그렇지만 송수신기의 거리가 멀어지게 되면 해상 환경 정보가 더욱 복잡하게 되고 한정적인 환경 수치를 갖는 시뮬레이터는 그 결과의 신뢰성이 낮아지게 된다. 따라서 다중빔 음향측심기(Multi-beam echo sounder)와 같

은 측정 장비를 이용하여 해저 수심 정보를 적용한다면 수중음향통신에서 VirTEX 시뮬레이터의 활용성, 신뢰성의 향상을 기대할 수 있을 것이다.



참고문헌

- [1] P. J. Urick. *Principles of underwater sound 3d Ed*, McGraw-Hill Book
- [2] H. C. Song, W. S. Hodgkiss, W. A. Kuperman, T. Akal, and M. Stevenson, 2007. *Multiuser Communications Using Passive Time Reversal*, IEEE J. OCEAN. ENG., vol. 32, no. 4, pp. 915-926
- [3] M. Fink, 1995, *Time reversal mirrors*, in Acoustical Imaging, B. F. Jones, Ed. New York: Plenum.
- [4] W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, H. C. Song, T. Akal, C. Ferla, and D. Jackson, 1998, *Phase conjugation in the ocean: Experimental demonstration of an acoustic time-reversal mirror*, J. Acoust. Soc. Amer., vol. 103, no.6, pp. 25-40.
- [5] W. S. Hodgkiss, H. C. Song, W. A. Kuperman, T. Akal, C. Ferla, and D. Jackson, 1999, *A long range and variable focus phase-conjugation experiment in shallow water*, J. Acoust. Soc. Amer., vol. 105, no. 3, pp.1597-1604.
- [6] H. C. Song, W. S. Hodgkiss, W. A. Kuperman, W. J. Higley, K. Raghukumar, and T. Akal, 2006, *spatial diversity in passive time reversal communications*, J. Acoust. Soc. Amer., vol. 120, no. 4, pp. 2067-2076
- [7] M. Stojanovic, J. A. Capitovic, and J. G. Proakis, 1993, *Adaptive multi-channel combining and equalization for underwater acoustic communications*, J. Acoust. Soc. Amer. vol. 94, no. 3, pp. 1621-1631.

- [8] J. S. Kim, 2009, *Virtual time series experiment (VIRTEX) simulation tool for underwater acoustic communications*, 09 Acoust. Soc. Amer. Conf., pp. 2174
- [9] T. Shimura, H. Ochi, and H. C. Song, 2013, *experimental demonstration of multiuser communication in deep water using time reversal*, J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 134, No. 4, pp. 3223-3229
- [10] John. G. Proakis, Masoud Salehi, *Digital Communications 5th Ed*, Mc Graw-Hill
- [11] J. S. Kim, H. C. Song, W. S. Hodgkiss, M. Dzieciuchand, and M. B. Porter, 2010, *Dynamic channel modeling with atime-evolving sea surface* 10 European Conferenceon Underwater Acoustic, vol. 2, pp. 741-745
- [12] M. Siderius and M. B. Porter, 2008, *Modeling broadbandocean acoustic transmissions with time-varying seascapes*, J. Acoust. Soc. Amer., vol. 124, no. 1, pp.137-150
- [13] 오세현, 김현수, 김재수, 조정홍, 정재학, 송희천, 2012, *수중채널 시뮬레이터를 활용한 수중음향통신 시스템 성능 분석*, 한국음향학회지, 제 31권, 제6호, pp. 373-383
- [14] Edwin L. Hamilton and Richard T. Bachman, 1982, *sound velocity and related properties of marine sediments*, J. Acoust. Soc. Amer., vol. 72, no. 6, pp 1891-1904