

수중에서 OFDM 변조를 이용한 음향 통신의 성능분석

*한정우 · **손윤준 · † 김기만

*한국해양대학교 대학원, **국방기술품질원, † 한국해양대학교 전파공학과 교수

Performance Analysis of Acoustic Communication Using OFDM Modulation in Underwater

*Jeong-Woo Han · **Yoon-Jun Son · † Ki-Man Kim

* Dept. of Radio Communication Engineering, National Korea Maritime University, Pusan, 606-791, Korea

** Defense Agency for Technology and Quality, Geoje, 656-714, Korea

† Dept. of Radio Communication Engineering, National Korea Maritime University, Pusan, 606-791, Korea

요 약 : 수중 통신 시스템의 성능은 수중채널의 특성에 영향을 받으며, 잔향 및 다중경로(Multi-path)로 인한 지연확산은 데이터 전송 시 인접 심벌간의 간섭(Inter Symbol Interference : ISI)의 원인이 되며, 이는 통신 성능 저하의 주 원인이 된다. 본 논문에서는 잔향 및 다중경로로 인한 인접 심벌간의 간섭을 극복하기 위해 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 변조기법을 이용한 수중에서의 음향통신 실험을 통해 그 성능을 분석하였다. 그 결과 전송속도가 2 kbps인 경우 BER(Bit Error Rate)이 1.22×10^{-1} 이었으며, 전송속도가 4 kbps인 경우 BER은 2.47×10^{-2} 이었다.

핵심용어 : 수중 음향 통신, 다중경로, OFDM, 수중 통신 실험, BER

Abstract : The performance of underwater communication system is influenced on channel characteristic. Delay spread cause by reverberation and multi-path happen the ISI (Inter Symbol Interference) and reduces the communication performance. In this paper, we analyze the performance of acoustic communication experiment in underwater to use the OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) technique for overcome the reverberation and multi-path. As a result, we acquired the BER of modulation techniques. The BER of 2kbps data rate is 1.22×10^{-1} and BER of 4 kbps data rate is 2.47×10^{-2} .

Key words : Underwater acoustic communication, Multi-path, OFDM, Underwater communication experiment, BER,

1. 서 론

수중통신은 매질 특성상 전파 대신 음파를 사용하여야 하며, 시스템의 성능은 채널의 특성에 의해 좌우된다. 수중에서의 음파통신의 경우 신호의 전달 과정에서 수중채널의 잔향 및 해수면과 해저면으로 인해 발생하는 신호의 다중경로 전달 등에 의해 수신 신호가 크게 왜곡된다. 그렇기 때문에 수중에서 음파통신을 이용한 신호의 전송을 위해서는 다중경로 특성이나 도플러 확산 등에 의한 신호왜곡을 보상하는 방법이 시스템 설계에 고려되어야 하며 특히 천해에서의 다중경로는 해면의 시변 산란에 의해 도플러 확산과가 직접파에 혼입되어 통신 채널의 특성을 좌우한다(Baggeroer, 1984). 특히 다중경로 수신된 신호의 경우, 수신 신호의 인접 심벌간의 간섭(Inter - Symbol Interference : ISI)을 발생시켜 통신 시스템의 성능을 저하시킨다. 이러한 수중 통신 채널의 특성 때문에

과거에는 FSK(Frequency shift keying) 등과 같은 비동기 위상 (non-coherent) 변조기법을 이용하여 수중 통신 시스템을 구현하였다. 그러나 미국 WHOI (Woods Hole Oceanographic Institution)에서 PSK(Phase Shift Keying) 기법을 이용한 수중 통신의 결과를 발표한 이후로 PSK나 QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 등과 같은 동기위상 (phase-coherent) 디지털 변조 기법을 활용한 수중 통신 시스템 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근에는 기존의 단일 반송파 디지털 변조 기법뿐만 아니라 다중반송파를 이용한 디지털 변조 기법을 수중 음파 통신에 적용시키는 연구 및 실험이 활발히 진행되고 있다(LLB,Z.S,S.M, et al, 2007; M. Stojanovic, 2008). 국내의 경우 전송률을 향상시키기 위해 송신 하이브리드 어레이를 사용하거나 채널 추정을 이용한 방법을 연구하였다(Lee,Son,Kim, et al 2002; 이 등, 2002). 또한 수중 채널 모델을 이용하여 FSK 방식뿐만 아니라, PSK와 같은 변조 기법에 따른 성능을

* 연회원 : hjw1002@hhu.ac.kr 051)410-4918

** 연회원 : junny07@korea.com 055)680-6394

† 교신저자 : 연회원, kimkim@hhu.ac.kr 051)410-4423

시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였으나(손 등, 2000; 윤 등, 2002) 그동안의 대부분의 연구는 모두 단일 반송파를 사용하는 전송 기법에 대해 연구가 진행되어왔으며, 최근에는 OFDM과 같은 다중 반송파 기법을 적용한 연구가 활발히 진행되고 있다(김 등, 2004).

이에 본 논문에서는 수중 채널에서 다중경로로 인해 발생하는 인접 심벌간의 간섭을 극복하기 위해 다중반송파를 이용하는 OFDM 변조 기법의 적용성 확인 및 기존 단일 반송파 기법과 성능을 비교하기 위하여 해상 실험을 통해 성능을 분석하였다.

2. OFDM 변·복조 기법

2.1 OFDM 전송기법

OFDM 전송기법은 다중 반송파 방식으로 임의의 주파수 선택적 채널을 flat 페이딩 부채널의 합으로 표현 가능하다. 또한 전송 심벌의 길이가 원래 심벌의 주기에 비해 병렬화 하여 모인 데이터의 수만큼 길어지게 되어 고속 전송 시 발생하는 인접 심벌간의 간섭(ISD)의 문제도 해결할 수 있다(Bahai et al, 2004; Nee et al, 2000). 기존의 다중 반송파 방식인 주파수 분할 다중화(Frequency Division Multiplexing : FDM) 시스템에서는 각 주파수 대역이 중첩되지 않게 하기 위해 각각의 부반송파 사이에 일정한 보호구간(Guard Band)의 설정으로 인해 대역폭의 사용 효율이 저하되었다. 그러나 OFDM을 사용할 경우 서로 다른 각각의 부반송파 사이에 직교성을 이용하기 때문에 부반송파들의 중첩이 발생하더라도 주위의 부반송파의 간섭 없이 복조할 수 있다.

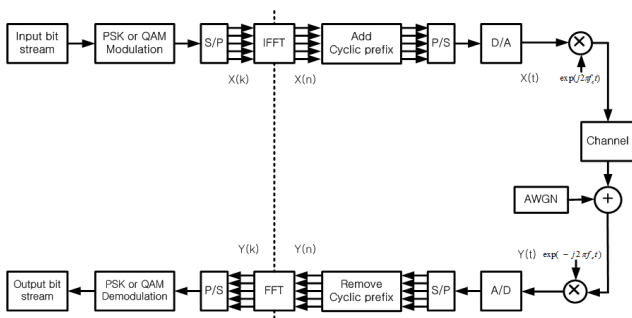


Fig. 1 OFDM transmit technique.

Fig. 1는 OFDM 전송기법에서의 전송과정을 나타낸 것이다. 전송하고자하는 데이터는 PSK(Phase Shift Keying) 혹은 QAM (Quadrature Amplitude Modulation)의 데이터 심벌로 변환되고, 직렬 변환기(Serial to Parallel : S/P)에 의해 병렬화 된다. 병렬화 된 데이터 심벌들은 역 고속 푸리에 변환(Inverse Fast Fourier Transform : IFFT)을 통해 해당 반송파로 변조되고 합쳐져서 하나의 OFDM 심벌을 구성하게 된다. 각각의 채널과 반송파를 부채널(Sub-Channel)과 부반송파(Sub-Carrier)라고 부른다. 전송하고자하는 n-th OFDM 심벌 $x(n)$ 은 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \exp(j \frac{2\pi}{N} nk) \quad (1)$$

$x(n)$ 은 OFDM 심벌을 의미하며, $X(k)$ 는 입력 데이터, N 은 부반송파의 개수를 의미한다. 시간영역에서의 송신신호 $x(n)$ 은 D/A변환기(Digital to Analog Converter), 저역통과필터(Low Pass Filter : LPF)를 통과한 후, 반송 주파수 f_c 가 곱해져 최종 송신신호인 x_{TX} 가 되어 채널로 전송되며, 송신신호는 식(2)과 같다.

$$x_{TX} = x(t) \cdot \exp(j2\pi f_c t) \quad (2)$$

채널을 통과해 수신된 신호는 기저대역으로 천이된 후 A/D 변환기(Analog to Digital Converter : ADC), 대역통과필터(Band Pass Filter : BPF)를 거쳐 다음 식(3)과 같이 표현된다.

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) X(k) \exp(j2\pi (\frac{f_{offset}}{\Delta f} + k)(n + \delta)) + AWGN \quad (3)$$

f_{offset} 은 수신신호의 주파수 오프셋을 의미하며, δ 는 심벌 오프셋을 의미한다. 신호 $y(n)$ 은 직·병렬 변환기를 거쳐 다시 병렬화되며 보호구간을 제거한 후 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform : FFT)를 이용하여 복조한다. 이후, 다시 병·직렬 변환기에 의해 직렬화되며, 직렬화된 데이터는 PSK 혹은 QAM 복조가 이루어진다.

3. 수중 실험을 통한 성능분석

3.1 수중 채널 환경

일반적으로 음파의 속도는 공기 중에서는 340m/s, 수중에서는 1450 - 1540 m/s, 해저에서는 1500 - 2500 m/s로 알려져 있다. 수중 환경에서 음파 신호는 수심, 수온, 전송거리, 해수면의 변화, 해저면의 상태 등으로 인해 다양하며 복잡한 특성을 가진다. 특히 천해의 경우 음파의 속도가 수온의 영향보다는 수온에 영향을 받게 되는데 Fig 2는 천해에서 깊이에 따른 음파 전달 속도의 한 예를 나타낸 것이다. 또한 천해의 경우

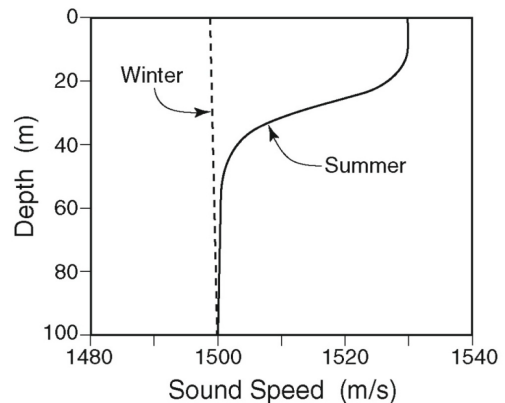


Fig. 2 Acoustic wave speed in shallow water

해수면과 해저면의 반사등으로 인해 다중경로를 포함한 다양한 특성으로 인해 수중통신의 성능 저하를 일으킨다. 해저면의 상태에 따른 신호의 지연은 진흙의 경우 10 ms, 모래일 경우 30 ms까지 신호의 지연이 발생하기도 한다(Coatelan et al, 1995).

3.2 수중통신 오차 유발 요인

3.2.1 전달 손실(Path-Loss)

수중 환경에서 전송 손실은 크게 감쇄 (attenuation)와 기하학적 확산 (geometric spreading)으로 나눌 수 있다. 전자는 주로 음향에너지가 열에너지로 변화하는데서 발생하는 것으로 거리와 주파수에 따라 증가한다. 후자는 파면 (wavefront)의 퍼짐에 의해 생겨나는 손실이며, 천해의 경우 Cylindrical spreading이 대양에서는 Spherical spreading이 발생한다. 이는 주파수와는 독립적으로 거리에 따라 증가한다.

3.2.2 도플러 확산(Doppler spread)

도플러 확산은 송수신단의 움직임이나 파도로 인해 수면에서 신호 반사 지점의 움직임에 기인한다. 이는 수신부에서 많은 인접 심벌들 사이의 간섭을 일으키는 원인으로써, 수중 통신 성능의 저하를 가져온다. 대역폭과 심벌 구간 사이의 곱이 대역폭과 심벌 구간 사이의 곱이 1보다 작으면 무시할 수 있으나 1보다 크면 무시할 수 없다.

3.2.3 다중 경로(Multi-Path)

음향 신호의 다중 경로 전파는 인접 심벌간의 간섭(Inter Symbol Interference : ISI)을 발생시켜 수중 통신 성능의 극심한 저하를 가져온다. 다중경로의 구조는 링크의 구성에 따라 달라진다. 일반적으로, 수직(vertical) 채널의 경우 짧은 시간의 퍼짐이 생기는 반면, 수평(horizontal) 채널의 경우 매우 긴 다중경로 확산이 생길 수 있다. 확산의 정도는 깊이와 송·수신기 간 거리의 함수로 나타난다.

3.2.4 잡음(Noise)

수중 환경에서의 잡음은 크게 인공 잡음(man-made noise)과 주변 잡음(ambient noise)으로 나눌 수 있다. 전자는 주로 펌프 기억 등과 같은 기계류 소음을 나타내는 반면, 후자는 조수간만, 해류, 폭풍, 바람, 지진, 비 등으로 인한 유체역학(hydrodynamics)에 관련된 소음이다. 이는 수신단의 이용 가능한 거리, 대역폭, SNR을 결정한다.

3.3 OFDM 성능분석을 위한 수중 채널 환경

수중 채널에서 OFDM 변조기법의 적용성 및 성능을 검증하기 위하여 2010년 9월에 한국해양대학교 앞 바다에서 수중 음향통신실험을 실시하였다.

수중실험의 채널의 환경은 Fig 4와 같이 수심 6m, 송·수신기 수심 2.5 m, 그리고 송·수신기 사이의 거리는 20m로 설정하였다. 또한 송·수신기와 방파제 사이의 거리는 15m로 하였다.



Fig. 3 Experiment point

9월에 실시한 실험은 태풍 곤파스가 소멸하고 다음날에 실시하였다. 실험을 실시한 장소가 평소에는 잔잔한 편이나 실험을 실시한 날에는 태풍의 영향으로 파도가 어느 정도 존재하였으며, 풍속은 기상청 기준으로 약 3.4~3.6 m/s 정도였다. 수중 채널의 잔향 및 다중경로의 특성을 파악하기위해 burst 신호를 이용하여 수중 채널특성을 분석하였다. burst 신호의 분석결과 실험 실시한 수중 상황이 태풍의 영향으로 다양한 형태로 나타났으며, 그중 지연 신호가 가장 길었던 임펄스 응답을 기준으로 하여 OFDM의 보호구간 길이를 설정하였다. Fig 5는 burst 신호를 이용하여 얻은 지연신호가 가장 길었던 수중채널의 임펄스 응답으로 최초의 신호가 수신된 이후 약 7ms 이후에 다중경로로 인해 잔향이 수신되는 것을 확인할 수 있다.

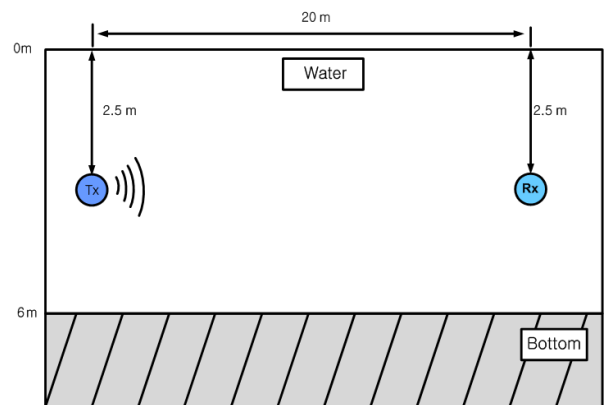


Fig. 4 Experiment environment

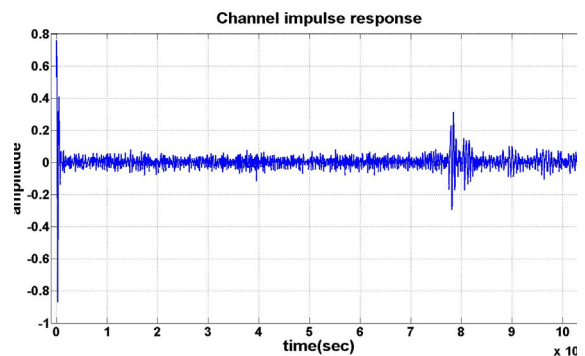


Fig. 5 Impulse Response of underwater channel.

3.3 수중 실험을 위한 OFDM 신호의 구성

본 논문에서는 수중채널에서 다중경로로 인한 인접 심벌간의 간섭을 극복하기 위해 OFDM 변·복조 기법을 고려하였으며, 수중 실험에서 사용된 OFDM 변·복조 기법의 파라미터 값은 Table 1과 같다.

Table 1 Parameter of experiment

전송속도	2 kbps	4 kbps
전송데이터	100 * 70 gray scale image (56,000 bit)	
Carrier / Sampling	24 kHz / 192 kHz	
Sub Carrier	128 (active : 100, null : 28)	256 (active : 200, null : 56)
CP	25 ms (Sub carrier/2)	

수중채널은 비선형 복합 채널이며, 시간에 따라 채널의 특성이 변하는 시변특성을 가지므로 일정시간마다 동기화 및 채널추정이 필요하며 이를 위해 10개의 data block 사이마다 preamble이 존재하도록 설계하였다. Fig 6은 실험에 사용된 전송 신호의 구성을 나타낸다. 이때 preamble의 구성 중 short preamble은 신호의 검출 및 동기화에 이용되며, long preamble은 동기화 및 채널 추정에 이용이 된다. T_g 는 보호구간(Guard Interval : GI)으로 자신의 신호 일부분을 복사해 사용하는 cyclic prefix(CP) 기법을 이용하였으며, T 는 전송신호를 나타낸다.

4. 수중 통신 실험 및 결과

수중에서 OFDM 변·복조 기법의 적용성 및 성능을 검증하기 위하여 해양 환경에서 통신 실험을 수행하였다. Fig 7은 실험의 블록다이어그램을 나타낸다. 신호의 변·복조는 PC를 통해 이루어졌으며 송신부 PC에서 만들어진 신호가 DAC와 power amplifier를 통해 증폭되어 전송되며, 수신부에서는 아날로그 필터와 ADC를 거쳐 PC에 저장된다. 실험 과정은 Binary bit로 변환된 이미지 파일을 QPSK 변조 후 IFFT를 이용하여 OFDM 변조를 수행하였다. 실험 과정은 Binary bit

로 변환된 이미지 파일을 QPSK 변조 후 IFFT를 이용하여 OFDM 변조를 수행하였다. 생성된 OFDM 심벌은 10 block마다 동기화 및 채널 추정을 위한 preamble block이 삽입되며, 만들어진 신호는 반송 주파수인 24 kHz로 Up conversion 후 D/A 컨버터를 이용하여 센서를 통해 송신하였다. 수신부에서는 센서를 통해 수신된 데이터를 아날로그 필터와 A/D 컨버터를 거쳐 디지털 데이터로 변환한 후 기저대역으로 Down conversion 하였다. 다음으로 보호구간인 CP를 제거한 다음 FFT를 이용하여 OFDM 복조를 수행한 후 QPSK 복조를 하여 신호를 복원하였다. 수신 신호의 검출 및 시간 동기는 최초 신호의 Preamble을 이용하여 검출 및 초기 동기를 맞추었으며, 최초 동기화 후 10 block 마다 반복되는 preamble을 이용하여 주기적으로 동기화를 수행하였다. 이때 사용된 preamble은 IEEE 802.11a의 WLAN (Wireless LAN)에 사용되는 preamble을 사용하였다. 훈련 심벌은 짧은 훈련 심벌 (Short training symbol)과 긴 훈련 심벌(Long training symbol)로 구성된다. 특히 짧은 훈련 심벌의 경우 동일한 신호가 반복되는 특징을 가지므로 이러한 특징을 이용하여 짧은 훈련심벌의 자기상관을 이용하여 신호의 검출 및 시간 동기화를 수행하였으며, 이를 이용하여 얻은 실험의 결과는 다음과 같다.

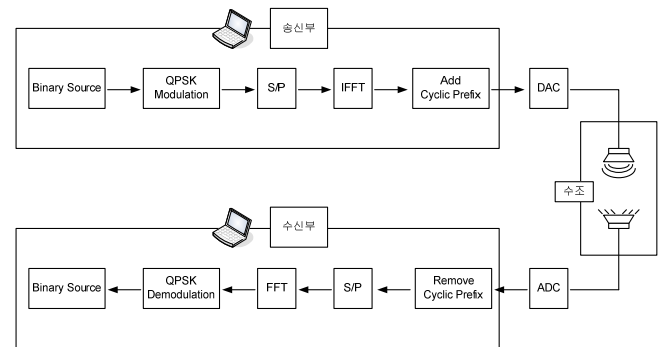


Fig. 7 Block diagram of experiment in underwater

Fig 8은 실험에 사용된 원본 이미지이며, Fig 9는 데이터 전송속도를 2kbps로 하였을 때의 정상도와 이미지를 복원한 결과 그림이며, Fig 10은 데이터 전송속도를 4kbps로 하였을

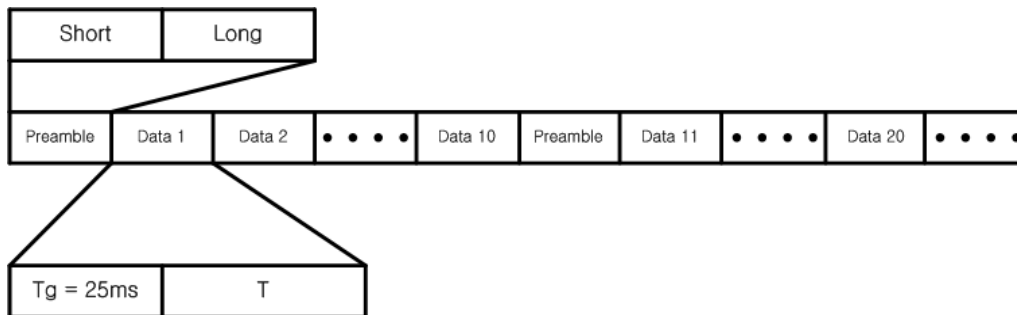


Fig. 6 Impulse Response of underwater channel.

때의 정상도와 이미지 복원 결과 그림이다. 이때 주파수 오프셋의 보인 및 채널추정은 적용하지 않았으며, 각 실험결과와 BER(Bit Error Rate)의 값은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Experiment result

전송속도	총 데이터	에러 데이터	BER
2 kbps	56,000	6,829	1.22×10^{-1}
4 kbps	56,000	1,385	2.47×10^{-2}



Fig. 8 Original image

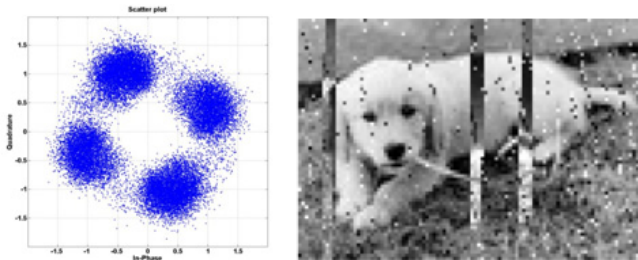


Fig. 9 Experiment result of QPSK modulation in underwater

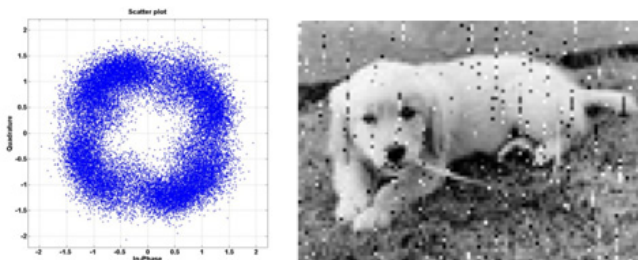


Fig. 10 Experiment result of OFDM system in underwater

Fig. 9와 Fig. 10을 보게 되면 주변 잡음 및 수중 채널의 환경으로 인해 정상도상에서 위상의 회전 및 진폭의 감쇠가 발생하였으나, 주파수 오프셋 보상 및 채널 추정을 하지 않고 심벌 타이밍 오프셋만을 보정한 결과로써는 일정수준 이상의 결과를 나타내었으며, 수중 통신에서 다중경로로 인한 인접심벌간의 간섭을 코딩 기법 및 등화기를 사용하지 않고 단순 변·복조 기법으로 극복할 수 있음을 확인하였다.

특이사항으로는 Table 2와 Fig. 9, Fig. 10을 비교해 보았을 때, 2 kbps로 신호를 전송했을 때 보다 4 kbps로 신호를 전송하였을 때 좀 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 이는 이날 실험

기상 상태 및 수중 채널의 환경이 평소와는 달리 풍속과 높은 파도로 인해 수중채널의 상태가 변동이 심하였음을 보여주며, 이는 주파수 오프셋 보상 및 채널 추정을 통해 보상이 가능하다.

6. 결 론

수중통신에서 다중경로로 인한 인접 심벌간의 간섭으로 인한 문제를 극복하기위해 현재까지 다양한 연구가 진행되고 있을 만큼 인접 심벌간의 간섭의 극복은 수중통신에 있어서 극복되어야할 문제이다.

본 논문에서는 수중 채널에서의 통신 실험을 통하여 수중통신의 성능을 저하시키는 오차 유발 요인인 다중경로로 인한 인접 심벌간의 간섭을 극복하기 위해 OFDM 변·복조 기법을 사용하였다. 단순 변·복조 수준에서 인접 심벌간의 간섭을 극복하는 것을 확인하였으며, 전송 속도에 따른 성능도 비교, 분석 하였다.

향후 연구 내용으로는 주파수 오프셋 보상과 채널 추정 및 등화기의 적용, 채널 추정을 이용하여 보호구간을 가변하는 적응형 보호구간에 관한 연구가 필요하다. 아울러 통신거리의 증가와 고속의 데이터 전송속도를 위한 방법도 연구가 되어야 할 것이다.

후 기

이 논문은 방위사업청과 국방과학연구소의 지원(계약번호 UD10002KD) 및 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 (NIPA-2010-C1090-1021-0001) 으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 김병철, I-Tai Lu(2004), "OFDM 수중음향통신 신호처리 설계와 성능평가," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, vol.23, no.2(s), Nov.
- [2] 손근영, 노용주, 윤종락(2000), "수중 데이터 통신 시스템 개발 - 변조 방식의 성능 분석," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 19권, 2호(s).
- [3] 이외형, 손윤준, 김기만(2002), "하이드로폰 송신 어레이를 이용한 수중 음향 통신 시스템의 성능 향상," 한국음향학회지, 21권, 7호, pp.606-613.
- [4] 윤종락, 백승관, 박지현, 임춘단(2002), "FSK 방식의 수중 데이터 전송 특성 해석," 제4회 해상무기체계 발전 세미나 논문집, pp.299-303.
- [5] Baggeroer. A.(1984), "Acoustic telemetry - an overview," IEEE J. Oceanic Eng., vol.9, no.4, pp.229-235.

- [6] Bahai. A. R. S., Saltzberg. B. R., Ergen. M. (2004), Multi-carrier digital communications : theory and applications of OFDM, Springer.
- [7] Coatelan. S., Glavieux. A.(1995), "Design and test of a coding OFDM system on the shallow water acoustic channel," in Proc, of MTS/IEEE OCEANS conference, Vol.3, pp.2065-2070.
- [8] Li. B., Zhou. S., Stojanovic. M., Freitag. L. and Willet. P.(2007), "Non- uniform Doppler compensation for Zero-padded OFDM over fast-varying underwater acoustic channels," IEEE Oceans Conf.
- [9] Lee. O. H., Son. Y. J. and Kim. K. M. (2002), "Underwater acoustic communications using channel estimation," IEEE Oceanic Eng. Conf., vol.3, pp.2453-2456.
- [10] Nee. R. V. and Prasad. R.(2000), OFDM for wireless multi-media communications, Artech House.
- [11] Stojanovic. M.(2008), "OFDM for underwater acoustic communications: Adaptive synchronization and sparse channel estimation," in Proc. of Intl. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Proc.

원고접수일 : 2010년 11월 8일
심사완료일 : 2010년 12월 3일
원고채택일 : 2010년 12월 22일