

수중통신에서 고속 데이터 전송을 위한 다중반송파 기법 연구

한정우* · 김기만† · 손윤준**

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

A Study on Multi-carrier Technique for High-speed Data Transmission in Underwater Communication

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

* 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 : 수중무선통신 시스템의 성능은 수중채널의 특성에 영향을 받으며, 특히 잔향 및 다중경로(Multi-path)로 인한 지연확산은 데이터 전송 시 인접심벌간의 간섭(Inter Symbol Interference : ISI)을 발생시켜 통신의 성능을 저하시킨다. 본 논문에서는 잔향 및 다중경로로 인한 인접 심벌간의 간섭에 강한 성능을 나타내는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기법을 이용하여 수중에서 고속 데이터 전송의 적용성을 검토하였다. 실제 수중 채널을 모의하는 모델을 사용하여 수중에서 통신 성능을 확인하였다. 그 결과 1000m의 거리에서 단일 반송파의 경우 BER이 2×10^{-1} 이었으며, 다중 반송파의 경우 BER이 8×10^{-2} 이었다.

핵심용어 : 수중통신, 다중채널, 단일 반송파, 다중 반송파, OFDM

Abstract : The performance of underwater wireless communication system is influenced on channel characteristic. Especially, a delay spread cause by reverberation and multi-path happen the ISI (Inter Symbol Interference) and reduces the communication performance. In this paper, we study the application of high speed data transmission in underwater to use the OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) technique for robust the reverberation and multi-path. we confirm the performance of communication in underwater to use the model for actually underwater channel simulation model. As a result, we acquired the BER of modulation techniques. The BER of single carrier is 2×10^{-1} and BER of multi carrier is 8×10^{-2} in 1000m.

Key words : Underwater communication, Multi-path, Single carrier, Multi carrier, OFDM

1. 서 론

수중통신은 매질 특성상 전파 대신 음파를 사용하여야 하고 음파는 고주파 손실이 커서 대역폭이 좁고 배경 잡음의 영향을 많이 받는다. 특히 수중통신 시스템의 성능은 채널의 특성에 의해 좌우되며, 수중 채널의 경우 전달 과정에서 잔향 및 다중경로 전달 등에 의해 수신 신호가 크게 왜곡된다. 수중에서 고속 데이터 전송을 위하여 수중 통신 채널 특성을 결정하는 해면, 해저, 수심 등의 시공간 변화에 의한 다중경로 특성이나 도플러 확산이 시스템의 설계에 고려되어야 하며 특히 천해에서의 다중경로는 해면의 시변 산란에 의해 도플러 확산과 직접파에 혼입되어 통신 채널의 특성을 좌우한다(Baggeroer, 1984; Daniel et al, 2000). 이러한 채널 특성의 시공간적인 변화는 디지털 수중 통신에서 송신하는 인접 심벌간의 상호간섭 (Inter-Symbol Interference : ISI)을 발생시켜 통

신 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(Daniel et al, 2000). 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. 기존에 연구된 수중 통신 시스템을 살펴보면, 미국의 WHOI 에서는 15 kHz 대역에서 MFSK (Multiple Frequency Shift Keying) 변조 기법을 사용하여 1200 bps로 데이터 전송 실험을 수행하였다(Suzuki et al, 1992). 일본에서는 20 kHz 대역에서 4-DPSK (Differential Phase Shift Keying) 변조 기법을 사용하여 16 kbps의 전송률을 얻었으며(Suzuki et al, 1992), QAM 변조를

* 대표저자 : 정희원, hjw1002@hhu.ac.kr 051)410-4918
** 정희원, junny07@korea.com 055)680-6394
† 교신저자 : 종신회원, kimkim@hhu.ac.kr 051)410-4423

이용하여 60 m의 근거리에서 500 kbps 전송률을 실현한 시스템도 보고되었다(Kaya, 1989). 최근에는 다중반송파를 이용한 수중통신의 연구 및 실험이 활발히 진행되고 있다(LI, et al, 2007; Stojanovic, 2008). 국내의 경우 전송률을 향상시키기 위해 송신 하이드로폰 어레이를 사용하거나 채널 추정을 이용한 방법을 연구하였다(이 등, 2002). 또한 수중 채널 모델을 이용하여 FSK 방식뿐만 아니라, PSK와 같은 변조 기법에 따른 성능을 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였으나(손 등, 2000; 윤 등, 2002) 그동안의 대부분의 연구는 모두 단일 반송파를 사용하는 전송 기법에 대한 것으로 국한되었다.

이에 본 논문에서는 새로운 방법을 제시하기 보다는 수중 채널에서 다중경로로 인해 발생하는 인접 심벌간의 간섭을 피하기 위해 디지털 변조 기법 중 다중경로에 강한 성능을 나타내는 OFDM 기법의 적용성 확인 및 기존 단일 반송파 기법과 성능을 비교하기 위하여 수중 채널 모델을 이용하여 성능을 모의실험 하였으며, 실제 수조 실험을 통해 결과를 분석하였다.

2. 다중 반송파 시스템

2.1 OFDM 전송기법

OFDM 전송기법은 다중 반송파 방식이므로 주파수 선택적 페이딩 채널을 비선택적 페이딩채널로 근사화시켜 처리할 수 있으므로 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)을 설정하였으나 대역폭의 사용 효율이 저하되었다. Fig 1은 FDM과 OFDM의 차이를 나타내고 있다. Fig 1에서 보이는 것처럼 OFDM 방식은 인접한 부채널 사이의 스펙트럼이 중첩되어있어 FDM에 비해 대역폭 효율이 높다. 그러나 OFDM을 사용할 경우 서로 다른 각각의 부반송파 사이에 직교성이 보장되어야 한다.

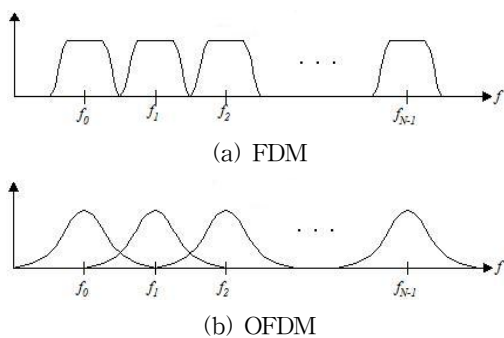


Fig. 1 Spectrum of multi carrier.

Fig. 2는 OFDM 전송기법에서의 전송과정을 나타낸 것이다. 입력 비트열은 먼저 PSK(Phase Shift Keying)나 QAM (Quadrature Amplitude Modulation)의 데이터 심벌로 변환되고, 직렬 병렬 변환기(Serial to Parallel : S/P)에 의해 병렬화 된다. 병렬화 된 데이터 심벌들은 해당 반송파로 변조되고 합해져서 하나의 OFDM 심벌을 구성하게 된다. 각각의 채널과 반송파를 부채널(Sub-Channel)과 부반송파(Sub-Carrier)라고 부른다.

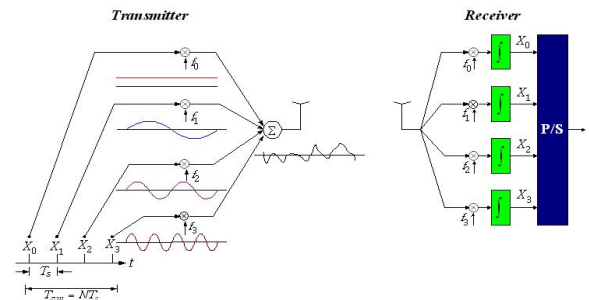


Fig. 2 OFDM transmit technique

Fig. 2에서 전송되는 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, N은 부반송파의 개수를 의미한다. 시간영역에서의 송신신호 $x(n)$ 은 D/A변환기(Digital to Analog Converter), 저역통과필터(LPF)를 통과해서 식(2)와 같이 $x(t)$ 로 변환된다.

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot \exp(j2\pi k \Delta f t) \quad (2)$$

신호 $x(t)$ 는 반송 주파수 f_c 가 곱해져 최종 송신신호인 x_{TX} 가 되어 채널로 전송되며, 송신신호는 식(3)과 같다.

$$x_{TX} = s(t) \cdot \exp(j2\pi f_c t) \quad (3)$$

수신부에서는 수신신호를 기저대역으로 천이시킨 후 A/D변환기(Analog to Digital Converter), 대역통과필터(BPF), DFT를 사용하여 복조한다. 수신된 신호는 ADC에 의해 디지털화되며, 다음 식(4)와 같이 표현된다.

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) X(k) \exp(j2\pi (\frac{f_{offset}}{\Delta f} + k)(n + \delta)) + A WGN \quad (4)$$

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 FFT를 사용하여 OFDM 복조를 한다. 이후, 다시 병·직렬 변환기에 의해 직렬화되며 PSK 혹은 QAM 복조가 이루어진다. Fig. 3은 OFDM 통신 시스템의 송신부와 수신부의 블록다이어그램을 보여준다.

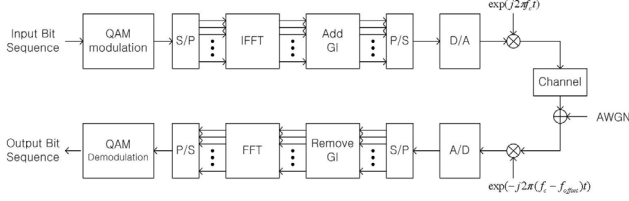


Fig. 3 Block diagram of basic OFDM system.

2.2 보호구간(Guard Interval : GI)

OFDM 심벌이 다중경로(Multipath)를 통해 전송되는 동안 현재의 심벌은 이전의 심벌에 의해 영향을 받게 된다. 이러한 각각의 OFDM 심벌간의 간섭을 방지하기 위해 연속된 OFDM 심벌 사이에 보호구간을 삽입한다. 이때 보호구간의 길이는 채널의 최대 지연확산보다 길어야 한다. 보호구간의 삽입으로 인해 OFDM 심벌의 주기는 $T_{sym} = T_s + T_G$ 가 된다. T_s 는 데이터의 주기를 나타내며, T_G 는 보호구간을 나타낸다. 수신부에서는 이러한 보호구간을 제거한 후 복조를 수행한다.

OFDM 보호구간의 삽입방식은 크게 네 가지로 구분된다. Fig 4는 본 논문에서 사용하게 될 자신의 신호 중 일부를 복사하여 삽입하는 CP(Cyclic Prefix) 방식을 보여준다. 수신부에서 수신된 첫 번째 부반송파 신호는 복조 시 채널의 지연확산으로 인하여 지연 수신된 두 번째 부반송파로부터 간섭으로 인하여 ISI가 발생한다. 또한 T_{delay} 만큼의 지연신호가 첫 번째 부반송파에 영향을 주어 인접 채널간의 간섭(Inter Channel Interference : ICI)이 발생하게 된다. 이는 부반송파간의 직교성이 더 이상 성립하지 않음을 의미한다. 이러한 인접 채널간의 간섭을 피하기 위해 보호구간에 자신의 신호 중 일부를 복사하여 삽입하는 CP 방식을 사용한다. 첫 번째 부반송파의 복조 시 지연되어 수신된 두 번째 부반송파로부터 간섭을 받으나 보호구간을 제거한 후에는 ISI가 발생하지 않으며, 부반송파 사이에 직교성이 유지되므로 ICI도 발생하지 않는다.

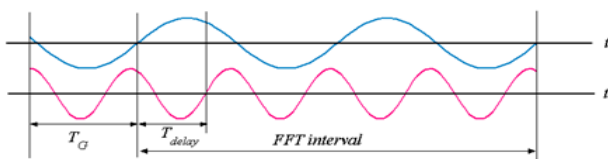


Fig. 4 Guard interval(cyclic prefix method)

3. 수중통신 채널 특성

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 수압의 영향 보다는

수온에 영향을 받게 되는데 Fig 5는 천해에서 깊이에 따른 음파 전달 속도의 한 예를 나타낸 것이다. 또한 천해의 경우 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).

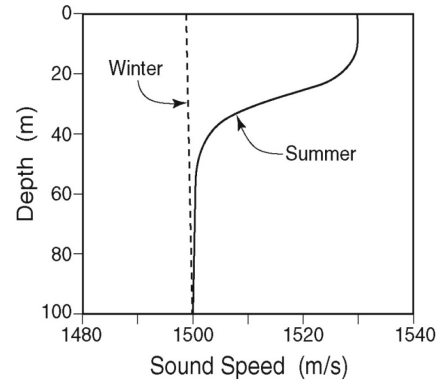


Fig. 5 Acoustic wave speed in shallow water

3.2 수중통신 오차 유발 요인

수중 통신 시스템의 성능을 결정하는 요인에는 음향 신호의 거리에 따른 전달 손실과 다중경로 전달 과정으로 인한 간섭 신호, 시스템 자체의 잡음과 해양의 배경 잡음, 해면 및 해저에 의한 복 반사에 기인되는 잔향 및 수중 운동체의 이동에 의한 도플러 효과 등이 있다.

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 변화하는 데서 발생하는 것으로 거리와 주파수에 따라 증가한다. 후자는 파면 (wavefront)의 퍼짐에 의해 생겨나는 손실이며, 천해의 경우 Cylindrical spreading이 대양에서는 Spherical spreading이 발생한다. 이는 주파수와 독립적으로 거리에 따라 증가한다.

3.2.2 도플러 확산(Doppler spread)

도플러 확산은 송수신단의 움직임이나 Surface reflection point의 움직임에 기인하며 수중 통신에서 큰 의미가 있다. 이는 수신부에서 많은 인접 심벌들 사이의 간섭을 일으킴으로써, 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. 도플러 확산은 간단한 주파수 병진과 연속적인 주파수 확산을 발생시킨다. 전자의 경우 수신부에서 쉽게 보상되나, 후자의 경우 보상하기 어렵다.

3.2.3 다중 경로(Multi-Path)

Fig. 4와 같은 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 나뉠 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 모의 수중 채널 환경

본 논문에서 모의실험에 사용한 모의 수중 채널환경 파라미터는 Fig. 6과 같다.

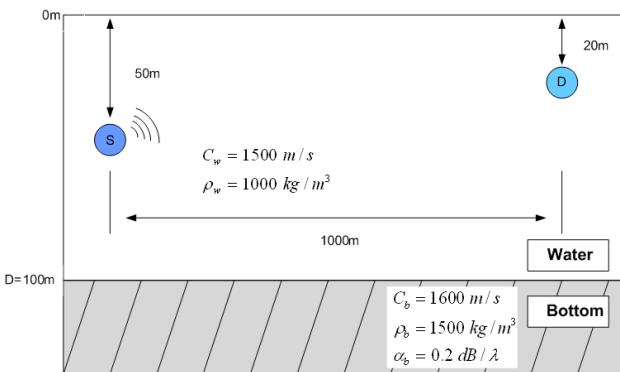


Fig. 6 Underwater channel model

본 논문에서 모의실험에 사용한 수중채널 환경은 다중경로 문제를 감안하여 천해 영역으로 가정하였으며, 그 파라미터는 Fig. 9와 같다. C_w 는 water sound speed, ρ_w 는 water density, C_b 는 bottom sound speed, ρ_b 는 bottom density, α_b 는 bottom attenuation 을 나타낸다. 모의실험을 위한 모의 수중 채널의 환경은 수심 100 m, 송신기 수심 50 m, 수신기 수심 20 m, 그리고 송신기와 수신기 사이의 거리는 1000m로 가정하였으며, 송·수신기 사이의 음속은 등속인 1500m/s로 설정하였다. 또한 반송파 주파수는 12 kHz로 설정하였으며, 샘플링 주파수는 192 kHz로 설정하였다. 또한, 해수면 및 해저면이 평탄하다 가정하였다. 이러한 파라미터들을 기초로 음파 전달 모델을 이용하여 모의 수중 채널의 임펄스 응답을 계산하였으며, 이를 이용하여 수중 채널에서의 고속데이터 전송 시 OFDM의 성능을 평가하였다. Fig. 7은 이러한 모의 수중채널에서의 고유음선(Eigen Ray)를 나타낸 그림이다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 다중경로로 인해 신호의 지연이 발생되며 이때의 임펄스 응답을 Fig. 8에 나타내었다.

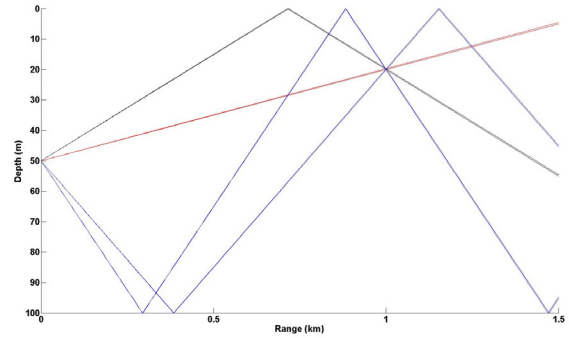


Fig. 7 Eigen ray of underwater channel model

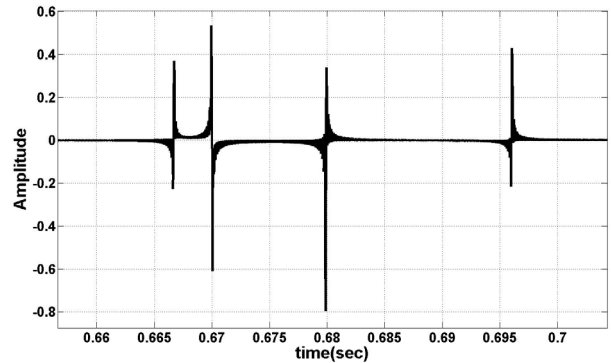


Fig. 8 Impulse response of underwater channel model

4. 모의실험

본 논문에서는 다중경로로 인한 인접 심벌간의 간섭을 받는 수중 채널에서의 데이터 전송을 위해 OFDM 방식의 통신 시스템을 고려하였으며, 수중 채널 모델을 이용해 영상 데이터 전송 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 다중 반송파를 사용하는 OFDM의 성능을 평가하기 위해 동일한 수중채널 모델에서 단일 반송파를 사용하는 QPSK를 모의실험을 해서 각각의 성능을 비교하였다. 영상 데이터는 50 * 50, 8 bit 그레이 스케일 데이터이며, 수중 통신에서 전송 방식은 QPSK 변조를 이용하고, 부반송파의 개수는 512개로 하였으며, 이중 400개의 부반송파만 정보를 가지고 나머지는 가상 부반송파로 두었다. 보호구간은 부반송파의 1/2과 1/4일 경우로 설정하였으며, 데이터 전송속도는 5 kbps로 설정하였다. 또한 SNR은 30 dB로 설정하였으며, 수신시 동기는 완벽하다고 가정하였다. 이때 채널 코딩이나 등화기(equalizer)와 같은 기법들은 적용하지 않았다.

Fig. 9는 모의실험에 사용된 원본 영상이며, Fig. 10은 수신기의 거리가 1000 m인 경우 단일 반송파 방식인 QPSK를 수중 채널 모델을 이용해 실행한 모의실험 결과이며, Fig. 11과 Fig. 12는 보호구간이 각각 1/4, 1/2인 다중 반송파 방식인 OFDM을 이용하여 각각 수중채널 모델을 이용해 실행한 모의실험의 결과이다. 이들 결과의 수치적 결과 값을 Table 1에 나타내었다.



Fig. 9 Original image in simulation

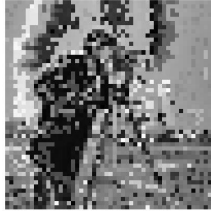


Fig. 10 Simulation use the single carrier in underwater channel model (1000m)



Fig. 11 Simulation use the multi carrier in underwater channel model (1000m, Guard Interval : 1/4)



Fig. 12 Simulation use the multi carrier in underwater channel model (1000m, Guard Interval : 1/2)

Table 1 Simulation result

변조기법	보호 구간	총 데이터	에러 데이터	BER
QPSK	•	20,000	4,625	2.31×10^{-1}
OFDM	1/4	20,000	3,494	1.74×10^{-1}
OFDM	1/2	20,000	1,778	8.89×10^{-2}

결과적으로 다중 반송파를 사용할 경우 단일 반송파에 비해 에러 데이터가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 다중 반송파의 경우 단일 반송파에 비해 향상된 성능을 보여주었으나, 보호구간이 지연확산보다 짧은 경우 Fig. 11에서 보여주는 것처럼 인접 심벌간의 간섭 현상으로 인해 성능이 저하되는 것을 확인할 수 있다.

5. 수조실험 및 결과

수중에서 OFDM 시스템의 실제 적용성 및 성능을 검증하기 위하여 수조를 이용하여 실험을 수행하였다. 모의실험에 비해 실제 수조실험의 경우 공간적인 한계 및 실험장비의 한계 등으로 인해 수조 실험에 사용한 데이터는 모의실험 소스 데이터의 1/4크기인 25×25 크기의 흑백 이미지 파일로 하였다. OFDM 전송 방식은 QPSK 변조를 사용하고, 반송파의 개수는 128개로 하였으며, 이중 100개의 반송파만 정보를 가지고 나머지는 가상 반송파로 두었다. 또한 공간의 한계로 인해 발생하는 신호의 지연시간을 고려해서 보호구간을 반송파의 절반으로 설정하였으며, 반송 주파수는 실험에 사용된 센서의 제원에 따라 12 kHz로 하였으며, 샘플링 주파수는 192kHz이다. 데이터 전송속도는 100 bps, SNR은 20dB로 설정하였다. Fig. 13은 실제 실험에 사용된 수조의 제원이며, Table 2는 실험에 사용된 세부 파라미터이다. Fig. 14는 수조 실험의 블록 다이어그램이며, Fig. 15는 수조 실험 시 구축한 장비의 사진이다.

수조의 신호지연 및 다중경로의 특성을 파악하기위해 아주 짧은 short pulse인 burst 신호를 송신한 뒤 수신한 신호를 이용하여 수조의 채널특성을 분석하였다. Fig. 16은 burst 신호를 가지고 송·수신한 결과로써 초기 반향이 포함되어 있는 것을 볼 수 있다.

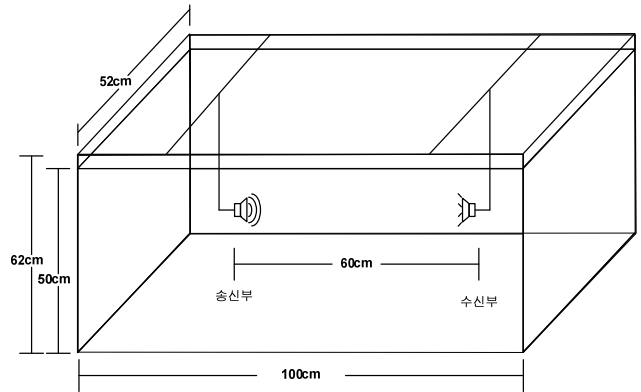


Fig. 13 Block diagram of water tank.

Table 2 Parameter for water tank experiment.

변조방식	QPSK	OFDM (QPSK)
전송속도	100 bps	100 bps
센서	송신부	ITC - 3013
	수신부	B&K - 8103
전송데이터	25 * 25 gray scale image (5,000 bit)	
Carrier / Sampling	12 kHz / 192 kHz	
Sub Carrier	Single Carrier	128(active : 100, null : 28)
CP length	-	64

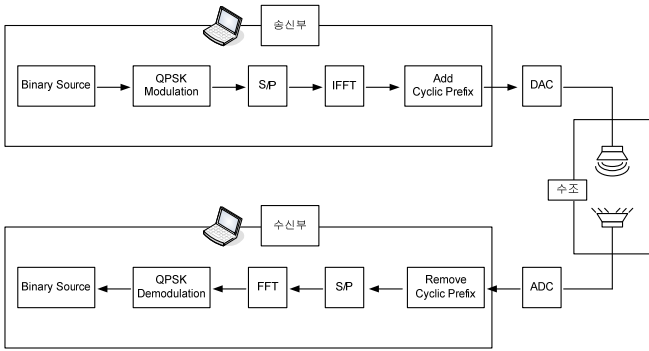


Fig. 14 Block diagram of experiment in water tank



Fig. 15 Block diagram of experimental setup.

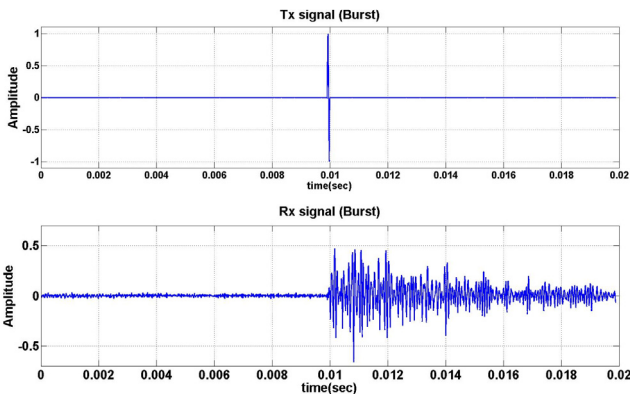


Fig. 16 Channel characteristics of small water tank

실험 과정은 Binary bit로 변환된 이미지 파일을 QPSK 심벌로 변환한 후 IFFT를 수행하여 각각의 부반송파로 변조시켰다. 이후 Cyclic Prefix 기법을 이용하여 보호구간을 삽입한 후 OFDM 심벌을 만들었다. 이렇게 생성된 OFDM 심벌을 반송파 주파수인 12 kHz로 Up conversion 하여 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 수행한 후 QPSK 복조를 하여 신호를 복원하였다. 수신 신호를 복조하기 위해 신호의 검출 및 시간 동기는 송신하는 신호의 앞부분에 훈련 심벌을 삽입하여 검출 및 동기를 맞추었으며, 이때 사용된 훈련 심벌은 IEEE 802.11a의 WLAN(Wireless LAN)에 사

용되는 훈련 심벌을 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 동기를 맞추었으며, 이를 이용하여 얻은 수조실험의 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Experiment result

변조기법	총 데이터	에러 데이터	BER
QPSK	5,000	2,364	4.27×10^{-1}
OFDM	5,000	1,063	2.12×10^{-1}

실험결과 다중 반송파를 사용한 OFDM의 경우 단일 반송파를 사용한 QPSK에 비해 통신성능이 향상되어 에러 데이터가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 OFDM의 특징으로 인해 고속 전송 시 발생하는 인접 심벌간의 간섭 문제를 해결하므로 단일반송파 방식인 QPSK에 비해 향상된 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

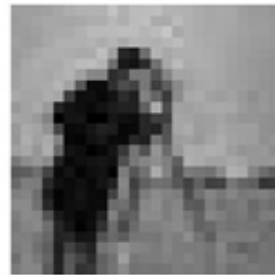


Fig. 17 Original image

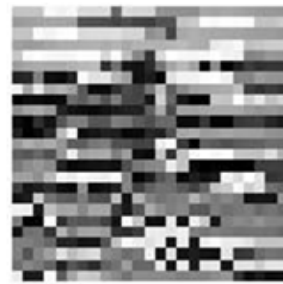


Fig. 18 Experiment result of QPSK modulation in water tank



Fig. 19 Experiment result of OFDM system in water tank

6. 결 론

본 논문에서는 수중통신의 성능을 저하시키는 오차 유발 요인 중 하나인 다중경로로 인한 인접 심벌간의 간섭을 극복하기 위한 방법으로 OFDM 방식의 통신 기법을 수중채널 모델에 적용하여 성능을 확인하였다. 모의실험 결과 단일 반송파 방식인 QPSK에 비해 다중 반송파 방식인 OFDM이 수중통신에서 성능 저해요소 중 하나인 다중경로에 강한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 수조 실험을 통해서도 실제 성능을 확인할 수 있었다.

향후 연구 내용으로는 채널 추정과 등화기의 적용, 채널 추정을 이용하여 보호구간을 가변하는 적응형 보호구간에 관한 연구가 필요하다. 아울러 수조 환경의 수중 통신 채널이 아닌 실제 친해 환경에서의 다양한 실험이 이루어져야 할 것이다.

후 기

이 논문은 방위사업청과 국방과학연구소의 지원(계약번호 UD070054AD) 및 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 (NIPA-2010-C1090-1021-0001) 으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 손근영, 노용주, 윤종락(2000), "수중 데이터 통신 시스템 개발 - 변조 방식의 성능 분석," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 19권, 2호(s).
- [2] 이희형, 손윤준, 김기만(2002), "하이브리드 송신 어레이를 이용한 수중 음향 통신 시스템의 성능 향상," 한국음향학회지, 21권, 7호, pp.606-613.
- [3] 윤종락, 백승관, 박지현, 임춘단(2002), "FSK 방식의 수중 데이터 전송 특성 해석," 제4회 해상무기체계 발전 세미나 논문집, pp.299-303.
- [4] Baggeroer, A.(1984), "Acoustic telemetry - an overview," IEEE J. Oceanic Eng., vol.9, no.4, pp.229-235.
- [5] Bahai, A. R. S., Saltzberg. B. R., and Ergen, M. (2004), Multi-carrier digital communications : theory and applications of OFDM, Springer.
- [6] Coatelan, S., and 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.
- [7] Kilfoyle, D. B., and Baggeroer, A. B.(2000), "The state of art in underwater acoustic telemetry," IEEE J. Oceanic Eng., vol.25, no.1, pp.4-27.
- [8] Kaya, A., and Yauchi, S.(1989), "An acoustic communication system for subsea robot," IEEE Oceanic Eng. Conf., Seattle, pp.765-770.

- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Nee, R. V. and Prasad, R.(2000), OFDM for wireless multi-media communications, Artech House.
- [12] Suzuki, M., and Sasaki, T.(1992), "Digital acoustic image transmission system for deep sea research submersible," IEEE Oceanic Eng. Conf., pp.567-570.
- [13] 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 : 2008년 8월 7일
 심사완료일 : 2010년 4월 27일
 원고채택일 : 2010년 4월 28일