
수중에서 고속 데이터 전송을 위한 OFDM 기법 적용성 연구

한정우* · 김세영* · 김기만*

A Study on OFDM Technique for High-speed Data Transmission in Underwater

Jeong-Woo Han* · Se-Young Kim · Ki-Man Kim*

이 논문은 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

요 약

수중무선통신 시스템에서의 성능은 수중채널의 특성에 영향을 받으며, 특히 잔향 및 다중경로(Multi-path)로 인한 지연확산은 데이터 전송 시 인접 심벌간의 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. 그리고 단일 전송파의 전송속도는 5 kbps 이었다.

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. Transmission of single carrier is 5 kbps.

키워드

Underwater Communication, Multi Path, ISI, QPSK, OFDM

I. 서 론

수중 통신은 매질 특성상 전파대신 음파를 사용하여 야 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 확산파가 직접파에 혼입되어 통신 채널의 특성을 좌우한다[1][2]. 이러한 채널 특성의 시공간적인 변화는 디지털 수중 통신에서 송신하는 인접 심벌간의 상호간섭을 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[2]. 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 WHOI에서는 15 kHz 대역에서 MFSK(Multiple Frequency Shift Keying) 변조 기법을 사용하여 1200 bps로 데이터 전송 실험을 수행하였으며[3], 일본에서는 20 kHz 대역에서 4-DPSK(Differential Phase Shift Keying) 변조 기법을 사용하여 16 kbps의 전송률을 얻었으며[3], QAM 변조를 이용하여 60 m의 근거리에서 500 kbps 전송률을 실현한 시스템도 보고되었다[4]. 국내의 경우 전송률을 향상시키기 위해 송신 하이드로폰 어레이를 사용하거나 채널 추정을 이용한 방법을 연구하였다[5][6]. 또한 수중 채널 모델을 이용하여 FSK 방식뿐만 아니라, PSK와 같은 변조 기법에 따른 성능을 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였다[7][8].

이에 본 논문에서는 수중 채널에서 다중경로로 인해 발생하는 인접 심벌간의 간섭(ISI)을 피하기 위해 디지털 변조 기법 중 다중경로에 강한 성능을 나타내는 OFDM 기법의 적용성을 확인하기 위하여 수중 채널 모델을 이용하여 성능을 모의실험 하였다.

II. OFDM 전송 시스템

2.1 OFDM 전송기법

OFDM 전송기법은 다중 반송파 방식이므로 주파수

선택적 페이딩 채널을 비선택적 페이딩 채널로 근사화시켜 처리할 수 있으므로 임의의 주파수 선택적 채널을 flat 페이딩 부채널(Sub-Channel)의 합으로 표현가능하다. 또한 전송 심벌의 길이가 원래 심벌의 주기에 비해 병렬화하여 모인 데이터의 수만큼 길어지게 되어 고속 전송 시 발생하는 인접 심벌간의 간섭(ISI)의 문제도 해결할 수 있다 [9][10]. 기존의 다중 반송파 방식인 주파수 분할 다중화(Frequency Division Multiplexing : FDM) 시스템에서는 각 주파수 대역이 중첩되지 않게 하기 위해 각각의 부반송파(Sub-Carrier) 사이에 일정한 보호구간(Guard Band)을 설정하였으나 대역폭의 사용 효율이 저하되었다. 그림 1은 FDM과 OFDM의 차이를 나타내고 있다. 그림 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 보장 되어야한다.

그림 2는 OFDM 전송기법의 전체 블록다이어그램을 나타낸 것이며, 그림 3은 OFDM 전송기법에서의 전송과정을 나타낸 것이다. 병렬화된 데이터 심벌들은 해당 반송파로 변조되고 합해져서 하나의 OFDM 심벌을 구성하게 된다. 각각의 채널과 반송파를 부채널과 부반송파라고 부른다.

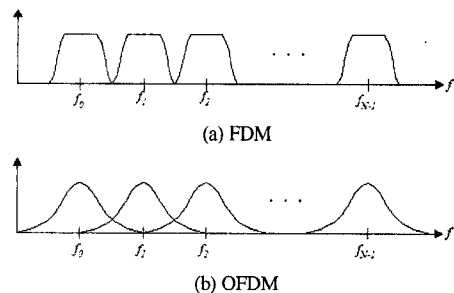


그림 1. 다중 반송파 방식의 스펙트럼 특성
Fig. 1. Spectrum of FDM.

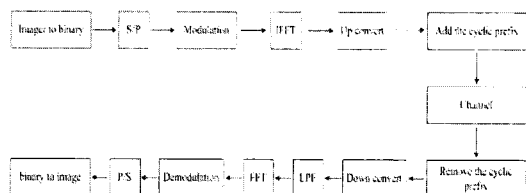


그림 2. OFDM 전송기법의 블록다이어그램
Fig 2. Block Diagram of OFDM Technique

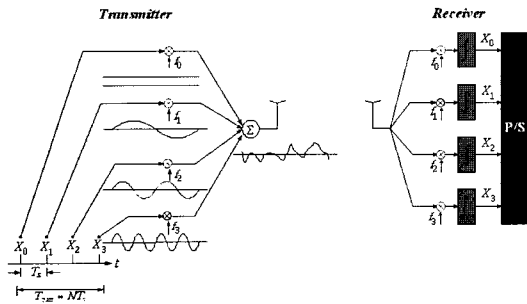


그림 3. OFDM 전송방식
Fig 3. OFDM Transmit Technique

그림 2에서 전송되는 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(LPF)를 통해 채널로 전송된다. 수신부에서는 수신신호를 기저대역으로 천이시킨 후 A/D변환기(Analog to Digital Converter), 대역통과필터(BPF), DFT를 사용하여 복조한다. OFDM의 수신신호 $y(n)$ 은 다음 식(2)와 같이 표현된다.

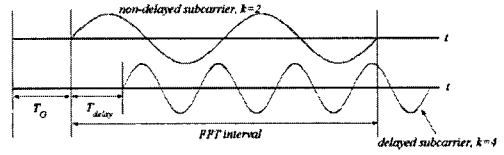
$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) X(k) \times \exp(j2\pi(\frac{f_{offset}}{\Delta f} + k)(n + \delta)) + AWGN \quad (2)$$

f_{offset} 은 수신신호의 주파수 오프셋을 의미하며, δ 는 심벌 오프셋을 의미한다. DFT와 IDFT는 각각 FFT(Fast Fourier Transform)와 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)으로 구현될 수 있다.

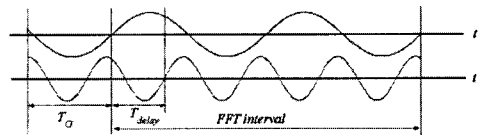
2.2 Cyclic Prefix

OFDM 심벌이 다중경로를 통해 전송되는 동안 현재의 심벌은 이전의 심벌에 의해 영향을 받게 된다. 이러한 각각의 OFDM 심벌간의 간섭을 방지하기 위해 연속된

OFDM 심벌 사이에 보호구간(Guard Interval : GI)을 삽입한다. 이때 보호구간의 길이는 채널의 최대 지연확산보다 길어야 한다.



(a) Zero-Value Guard Interval



(b) Cyclic Prefix

그림 4. 보호구간의 삽입방법 및 효과
Fig 4. Method and Effect of Guard Interval

보호구간의 삽입으로 인해 OFDM 심벌의 주기는 $T_{sym} = T_s + T_{GI}$ 가 된다. T_s 는 데이터의 주기를 나타내며, T_{GI} 는 보호구간을 나타낸다. 수신부에서는 이러한 보호구간을 제거한 후 복조를 수행한다. 보호구간의 값을 '0'으로 하면 인접 심벌간의 간섭은 발생하지 않으나 채널간의 간섭이 발생하게 된다. 이를 방지하기 위해 보호구간에 '0'의 값이 아닌 Cyclic Prefix를 삽입한다. 그림 4는 보호구간에 각각 '0'과 Cyclic Prefix를 삽입한 그림을 나타낸다.

III. 수중 통신 채널

3.1 수중 채널 환경

수중 환경에서 음파 신호는 수심, 수온, 전송거리, 해수면의 변화, 해저면의 상태 등으로 인해 다양하며 복잡한 특성을 가진다. 특히 천해의 경우 해수면과 해저면의 반사등으로 인해 다중경로를 포함한 다양한 특성으로 인해 수중통신의 성능 저하를 일으킨다. 특히 해저면의 상태에 따른 신호의 지연은 진흙의 경우 10 ms, 모래일 경우 30 ms까지 신호의 지연이 발생하기도 한다[11]. 음파의 속도는 다음과 같이 표현된다.

$$c = \sqrt{\frac{C}{\rho}} \quad (6)$$

ρ 는 밀도, C 는 stiffness 계수이다. 일반적으로 음파의 속도는 공기 중에서는 340m/s, 수중에서는 1450 - 1540 m/s, 해저에서는 1500 - 2500 m/s로 알려져 있다. 특히 천해의 경우 음파의 속도가 수압의 영향 보다는 수온에 영향을 받게 되는데 그림 5에는 천해에서 깊이에 따른 음파 전달 속도의 한 예를 나타낸 것이다.

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.

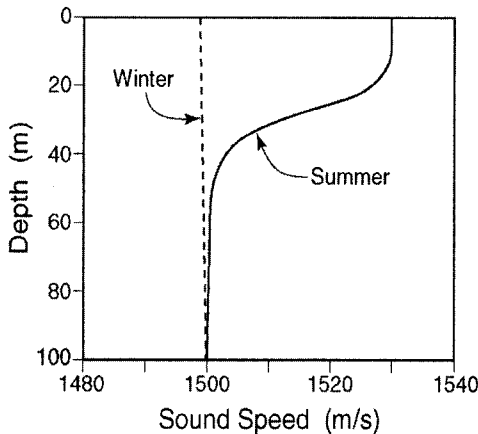


그림 5. 천해에서 음파 전달 속도 예.
Fig 5. Acoustic Wave Speed in Shallow Water

3.2.1 전달 손실(Path-Loss)

수중 환경에서 전송 손실은 크게 감쇠 (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 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)

그림 6과 같은 음향 신호의 다중 경로 전파는 인접 심벌간의 간섭을 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.

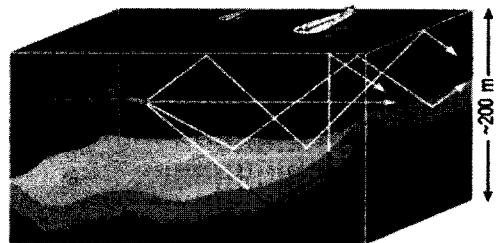


그림6. 수중에서의 다중경로
Fig 6. Multi - Path in Underwater

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 모의 수중 채널 환경

본 논문에서 모의실험에 사용한 모의 수중 채널환경 파라미터는 그림 7과 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. 시뮬레이션을 위한 모의 수중 채널의 환경은 수심 100 m, 송신기 수심 50 m, 수신기 수심 20 m, 그리고 송신기와 수신기 사이의 거리는 500m, 1 km로 가정하였다. 이러한 파라미터들을 기초로 Ray mode model을 사용하여 모의 수중 채널의 임펄스 응답을 계산하였으며, 이를 이용하여 수중 채널에서의 고속 데이터 전송 시 OFDM의 성능을 평가하였다.

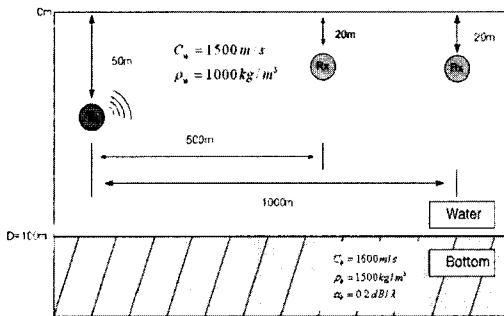


그림 7. 수중 채널 모델
Fig 7. Underwater Channel Model

IV. 모의실험

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

모델의 임펄스 응답이다. 수중채널 모델에서 음속이 1500m/s 이며, 수신기의 거리가 각각 500m, 1000m이므로 거리에 따라 시간상 약 0.33초와 0.67초에서 각각 다른 형태의 임펄스응답을 나타낸다. 또한 500m에 비해 1000m의 경우 다중경로로 인한 잔향이 500m에 비해 길게 수신되는 것을 확인할 수 있다.

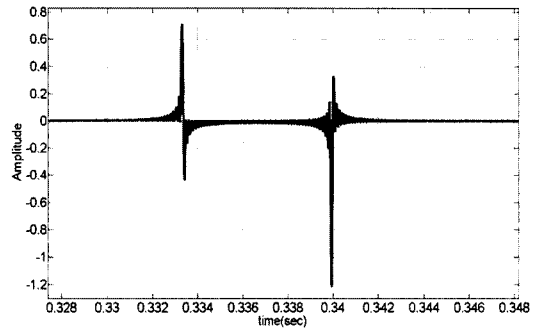


그림 8. 수중 채널 모델의 임펄스 응답 (500m)
Fig 8. Impulse Response in Underwater Channel Model (500m)

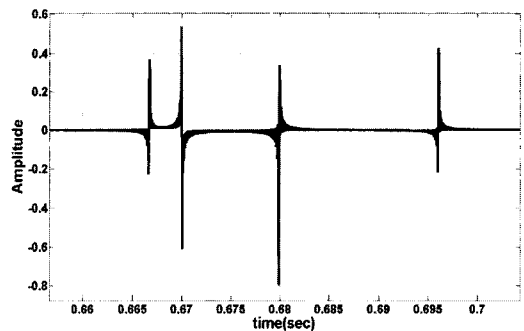


그림 9. 수중 채널 모델의 임펄스 응답 (1000m)
Fig 9. Impulse Response in Underwater Channel Model (1000m)

그림 10는 모의실험에 사용된 원본 영상이며, 그림 11과 그림 12은 수신기의 거리가 500m인 경우 단일 반송파 방식인 QPSK와 다중 반송파 방식인 OFDM을 각각 수중 채널 모델을 이용해 실행한 모의실험의 결과이다.

수신기의 거리가 500m에서 단일 반송파를 이용한 모의실험의 경우 에러 데이터의 개수가 총 20,000개의 데이터 중 786개 이었으며, 다중 반송파를 이용했을 경우 총 20,000개의 데이터 중 에러 데이터는 발생하지 않았다.



그림 10. 모의실험에서 사용된 원본 이미지
Fig 10. Original Image in Simulation



그림 13. 수중채널 모델에서 단일 반송파를 이용한 모의실험 (1000m)
Fig 13. Simulation use the Single Carrier in Underwater Channel Model (1000m)



그림 11. 수중채널 모델에서 단일 반송파를 이용한 모의실험 (500m)
Fig 11. Simulation use the Single Carrier in Underwater Channel Model (500m)



그림 14. 수중채널 모델에서 다중 반송파를 이용한 모의실험 (1000m)
Fig 14. Simulation use the Multi Carrier in Underwater Channel Model (1000m)



그림 12. 수중채널 모델에서 다중 반송파를 이용한 모의실험 (500m)
Fig 12. Simulation use the Multi Carrier in Underwater Channel Model (500m)

그러나 다중 반송파의 경우 단일 반송파에 비해 향상된 성능을 보여주었으나, 인접 심벌간의 간섭을 극복하기 위해 적용한 보호구간으로 인해 실제 데이터에 비해 증가한 데이터를 전송하는 형태가 되어 단일 반송파에 비해 전송속도의 감소를 발생시킨다. 모의실험 결과 단일 반송파의 전송속도는 5 kbps인 반면, 다중 반송파의 경우 보호구간의 길이가 부반송파의 1/2 일 경우 약 3 kbps로 전송속도가 감소하였다.

그림 13과 그림 14는 수신기의 거리가 1000m인 경우 단일 반송파 방식인 QPSK와 다중 반송파 방식인 OFDM을 각각 수중채널 모델을 이용해 실행한 모의실험의 결과이다.

수신기의 거리가 1000m에서 단일 반송파를 이용한 모의실험의 경우 여러 데이터의 개수가 총 20,000개의 데이터 중 4625개로 BER이 약 2×10^{-1} 이었으며, 다중 반송파를 이용했을 경우 총 20,000개의 데이터 중 1778개로 약 8×10^{-2} 이었다. 결과적으로 다중 반송파를 사용할 경우 단일 반송파에 비해 여러 데이터가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 수중 통신의 성능을 저하시키는 오차 유발 요인 중 하나인 다중경로로 인한 인접 심벌간의 간섭을 극복하기 위한 방법으로 OFDM방식의 통신 기법을 수중채널 모델에 적용하여 성능을 확인하였다. 모의 실험 결과 단일 반송파 방식인 QPSK에 비해 다중 반송파 방식인 OFDM이 수중통신에서 성능 저해요소 중 하나인 다중경로에 강한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 앞으로 보호구간의 길이와 전송속도간의 관계를 고려하여 수중채널에 적당한 보호구간을 설정하여

야 할 것이며, 채널 추정을 통해 보호구간이나 Cyclic Prefix 구간을 가변하는 방법을 연구할 필요성이 있으며, 현재 모의실험에서는 캐리어 변동을 포함하지 않았으나 이러한 요인도 고려되도록 하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.(계약번호 UD070054AD)

참고문헌

- [1] A. Baggeroer, "Acoustic telemetry - an overview," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol.9, no.4, pp.229-235, Oct. 1984.
- [2] Daniel B. Kilfoyle and Arthur B. Baggeroer, "The state of art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol.25, no.1, pp.4-27, Jan. 2000.
- [3] M. Suzuki and T. Sasaki, "Digital acoustic image transmission system for deep sea research submersible," *IEEE Oceanic Eng. Conf.*, pp.567-570, Newport, Oct. 1992.
- [4] A. Kaya and S. Yauchi, "An acoustic communication system for subsea robot," *IEEE Oceanic Eng. Conf.*, Seattle, pp.765-770, Oct. 1989.
- [5] 이외형, 손윤준, 김기만, "하이브리드 송신 어레이를 이용한 수중 음향 통신 시스템의 성능 향상," *한국음향학회지*, vol.21, no.7, pp.606-613, Oct. 2002.
- [6] Oe-Hyung Lee, Yoon-Jun Son and Ki-Man Kim, "Underwater acoustic communications using channel estimation," *IEEE Oceanic Eng. Conf. Biloxi*, vol.3, pp.2453-2456, Oct. 2002.
- [7] 윤종락, 백승관, 박지현, 임춘단, "FSK 방식의 수중 데이터 전송 특성 해석," 제4회 해상무기체계 발전 세미나 논문집, pp.299-303, July 2002.
- [8] 손근영, 노용주, 윤종락, "수중 데이터 통신 시스템 개발- 변조 방식의 성능 분석," *한국음향학회 학술발표대회 논문집*, vol.19, no.2(s), Nov. 2000.
- [9] Nee.R.V. and Prasad.R, *OFDM for wireless multi- media communications*, Artech House, 2000

- [10] Bahai.Ahmad R.S, Saltzberg.Burton R, Ergen. Mustafa. *Multi-carrier digital communications : theory and applications of OFDM*, Springer, 2004
- [11] S. Coatlan and A. Glavieux, "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, Oct. 1995.

저자소개

한정우(Jeong woo Han)



2007년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)

2007년 3월~현재 : 한국해양대학교 전파공학과 석사과정

※관심분야 : 수중통신, DSP, 마이크로프로세서 하드웨어 구현

김세영(Se Young Kim)



2005년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)

2007년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과 석사과정

2007년 3월~현재 : 한국해양대학교 전파공학과 박사과정

※관심분야 : 소나 신호처리, 어레이 신호처리

김기만(Ki-man Kim)



1988년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1990년 8월 : 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1995년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학박사)

1995년 3월~1996년 8월 : 연세대학교 의과대학 의용공학교실 (Fellow)

1996년 9월~현재 : 한국해양대학교 전파공학과 교수

※관심분야 : 수중통신, 소나 신호처리, 3차원 음향제어, 채널 추정, DSP 및 CPLD 구현