
수중 센서네트워크 구현을 위한 단일 반송파 디지털 변조기법의 실험적 고찰

김세영* · 한정우** · 김기만***

Experimental Results of Single Carrier Digital Modulation for Underwater Sensor Networks

Se-young Kim* · Jeong-woo Han** · Ki-man Kim***

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음
(NIPA-2010-C1090-1021-0001)

요 약

본 논문에서는 단일 반송파 기반의 디지털 변조 기법들의 성능을 수중 통신 실험을 통하여 분석하였다. 통신 실험은 실제 해상에서 수행되었으며 적용된 변조기법은 위상 비동기 방식인 ASK, FSK와 위상 동기 방식의 QPSK이다. 통신 성능을 평가하기 위해 이미지 파일을 600bps~3Kbps의 전송률을 가지는 신호로 변조하여 전송하였다. 수신된 신호를 복조하여 BER을 추정된 결과 ASK와 FSK의 경우 보상 알고리즘 없이 10^{-3} ~ 10^{-4} 의 오차율을 나타내었고, QPSK의 경우 선형 등화기를 이용하여 10^{-4} 의 오차율을 가지는 통신이 가능함을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, underwater acoustic communication experiment was carried out to test a performance of single carrier digital modulation schemes. The communication experiment was performed at real sea and tested modulation schemes are ASK, FSK with non-coherent detection and QPSK with coherent detection. A modulated image data was transmitted with data rates of 600bps~3Kbps. From the results of BER of the demodulated signal, ASK and FSK show the achievable BER of 10^{-3} ~ 10^{-4} without compensation techniques and QPSK show that of 10^{-4} with linear equalizer.

키워드

수중 음향 통신, 수중 센서 네트워크, ASK, FSK, QPSK, 비트 오차율

Key word

Underwater Acoustic Communication, Underwater Sensor Network, ASK, FSK, QPSK, BER

* 정회원 : 한국해양대학교 전파공학과
** 정회원 : 한국해양대학교 전파공학과
*** 종신회원 : 한국해양대학교 전파공학과 (교신저자, kimkim@hhu.ac.kr)

접수일자 : 2010. 09. 16
심사완료일자 : 2010. 10. 01

I. 서 론

해양은 매질의 특성상 전달손실 및 감쇠효과등의 장애요소로 인해 육상통신에 사용되는 전파를 이용하여 통신을 수행하기 매우 어려운 환경이다. 따라서 수중에서는 전파대신 10KHz 이상의 음파를 사용하여 통신을 수행하는데 음파는 고주파 손실이 커서 대역이 제한되어 있으며 배경잡음의 영향을 많이 받는다. 또한, 음파는 다중경로 전달 현상과 도플러 현상, 낮은 신호대 잡음비를 가지므로 이를 극복하기 위한 다양한 신호처리 기법들이 연구되었다[1-2]. 초기에는 주로 군사적인 목적으로 수중통신에 대한 연구가 이루어졌지만 최근에는 상업용으로도 활발히 이루어지고 있으며, 특히 해양환경 모니터링, 재난 방지 시스템, 자원탐사, 군사적 목적 등을 위한 무선 수중 센서 네트워크 시스템에 대한 관심이 증가하고 있다[3-4].

수중 센서네트워크를 구성하는 센서 노드들은 목적에 따라 각종 데이터를 수집하여 인접 또는 상위 노드로 전송하는 역할을 하며 이를 위해 기본적인 센싱 기능과 통신기능을 가지고 있어야 한다. 해양은 범위가 매우 넓기 때문에 원거리의 통신을 고려해야 하고 이미지 및 영상데이터에 대한 수요가 늘고 있기 때문에 고용량의 데이터를 실시간으로 전송할 수 있는 통신 기법이 요구된다. 또한 실시간 처리뿐만 아니라 신뢰성을 높이기 위해 데이터 전송 오류를 줄이고 전송 횟수를 줄이는 것도 충분히 고려되어야 한다.

기존의 수중 통신기법 연구내용을 살펴보면, 미국의 WHOI(Woods Hole Oceanographic Institution)에서는 15 KHz 대역에서 MFSK (Multiple Frequency Shift Keying) 변조기법을 사용하여 1200 bps의 전송률을 가지는 데이터 전송 실험을 수행하였다[5]. 일본에서는 수중 영상 전송을 위해 4-DPSK(Differential Phase Shift Keying) 변조기법으로 20 KHz 대역에서 16 kbps의 전송률을 얻었으며, 고속 전송을 위한 QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 변조기법을 이용하여 60m의 근거리에서 500 bps의 전송률을 실현한 시스템도 보고되었다[6-7].

국내에서는 수중에서 수집된 영상을 전송하기 위한 시스템을 개발한 것이 보고되었으며, 채널 추정을 이용한 방법을 제안하기도 하였다[8-9]. 또한, DPSK, BPSK

와 같은 변조기법에 따른 통신 성능을 시뮬레이션을 통해 고찰한 연구 결과도 있다[10].

여러가지 디지털 통신기법들 중에서 수중 센서네트워크 구현에 효율적인 통신기법을 선정하는 것이 중요하며 이를 위해 본 논문에서는 단일 반송파 기반의 디지털 변조기법에 대한 통신 성능을 해상실험을 통해 분석하였다. 고려된 변조기법은 위상 비동기방식의 ASK, FSK와 위상 동기방식의 QPSK이며 20m의 근거리에서 이미지 데이터를 600 bps~3 Kbps의 전송률을 가지는 변조신호로 전송하여 복조된 결과를 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 수중 통신 실험에 적용된 단일 반송주파수 기반의 디지털 변조 기법들을 간략히 설명하고 제 III장에서는 해상실험 구성 및 실험 데이터에 대한 분석 결과를 설명한다. 제 IV장에서는 결론을 맺는다.

II. 단일 주파수 디지털 변조 기법

수중통신 실험에 적용된 ASK, FSK 및 QPSK 변조방식의 기본적인 이론들은 이미 잘 알려져 있으며, 관련 서적을 통해서 참조하였다[11]. 따라서 본 장에서는 기본이론의 자세한 설명은 생략하고 실험에서 사용한 수신단의 복조기법을 중점적으로 설명한다.

ASK 수신단에는 비동기 방식의 포락선 검출기가 적용되었다. 반송파 주파수를 중심 주파수로 가지는 대역 필터에 통과된 수신신호 파형의 포락선 변화를 검출한다. 최종적인 정보신호는 포락선 검출된 신호를 표본화하여 비트 판정과정을 거쳐서 복구하게 된다. ASK 변조기법은 전송 비트에 따라 반송파의 진폭을 변화시켜 신호를 전송하는 방식이므로 인접 심볼의 진폭의 영향을 크게 받는다. 특히 다중경로 현상이 심한 수중환경에서 ASK 신호를 전송할 경우 심볼간 간섭이 일어나 비트오류를 증가시킬 수 있으므로 그림 1과 같이 신호를 구성하였다. 비트구간인 T_b 의 40%에 해당하는 길이만큼 변조신호를 전송하고 나머지 60% 길이만큼의 보호 구간(guard time)을 삽입함으로써 이전 심볼의 진폭에 의한 간섭을 줄이고자 하였다.

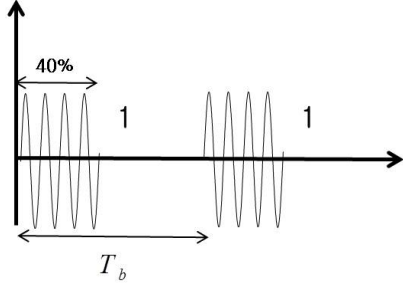


그림 1. 보호구간을 삽입한 ASK 신호 생성
Fig. 1 ASK signal generation with guard time

FSK 변조기법은 정보 비트에 따라서 반송파의 중심 주파수를 변화시켜 신호를 전송하는 방식으로 ASK에 비해 진폭왜곡에 강인한 장점을 가진다. 수신단에서는 ASK와 동일하게 비동기 방식의 포락선 검출기를 적용하였고, 반송 주파수를 분리하기 위하여 1 KHz의 대역을 가지는 두 개의 대역통과 필터를 사용하였다.

QPSK 변조기법은 두 개의 기저대역 신호를 직교 반송 다중화하여 전송하는 방식으로 대역폭의 변화 없이 데이터의 전송율을 두 배로 증가시킬 수 있다. 송신단에서는 정보데이터를 각각 홀수열과 짝수열로 분리하고 직교반송파를 곱하여 각각 BPSK 변조시킨 후 합하여 심볼로 전송한다. 수신단에서는 국부 발진기를 통해 두 직교 반송파를 생성하여 위상동기 방식으로 신호를 복조한다. 일반적으로 QPSK와 같이 위상 동기방식을 사용하는 경우 초기 위상 및 타이밍의 동기화를 위하여 데이터 전송을 프레임 단위로 전송하며 본 논문에서 사용한 프레임 구조를 그림 2에 나타내었다. 하나의 프레임은 훈련 신호와 데이터 신호로 구성되며 훈련 신호는 송신단에서 미리 알고 있는 신호로 프레임의 동기화 및 등화기의 초기 채널 추정에 이용된다.



그림 2. QPSK 신호의 프레임 구조
Fig. 2 Frame structure of QPSK signal

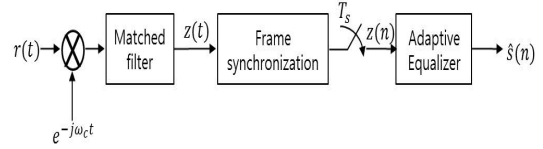


그림 3. QPSK 수신기 구조
Fig. 3 QPSK receiver structure

그림 3은 본 논문에서 사용된 QPSK 수신단의 구조를 나타낸다. 수신신호 $r(t)$ 에 두 직교 반송파를 곱하여 정합필터를 통과시켜 기저대역 신호 $z(t)$ 를 생성하며 다음과 같이 표현된다.

$$z(t) = \int_0^{T_s} p(t-\tau)r(\tau)e^{-j\omega_c\tau}d\tau \quad (1)$$

여기서 T_s 는 심볼주기를 나타내며, $p(t)$ 는 전송펄스를, ω_c 는 반송 주파수를 각각 의미한다. 기저대역 신호 $z(t)$ 는 프레임의 시작점을 찾기 위해서 동기화 과정을 거치는데 다음과 같이 초기 타이밍 $\hat{\tau}_0$ 를 추정할 수 있다[12].

$$\hat{\tau}_0 = \max_{\tau} \text{Re} \left[\sum_{n=0}^{N_T-1} z(t)s_n p(t+\tau-nT_s)^* \right] \quad (2)$$

여기서 N_T 는 훈련 심볼의 개수를 의미하고, s_n 은 복소 데이터 심볼을, *는 공액 복소값을 나타낸다. 동기화가 이루어진 기저대역 신호는 심볼 주기 T_s 로 표본화되어 이산신호 $z(n)$ 으로 출력된다.

수중 채널의 다중경로 특성은 ISI를 야기시켜 통신 성능을 저하시키므로 이를 보상하기 위한 등화기의 사용은 필수적이다. 또한 수중채널은 시변 특성을 가지므로 채널의 시간적 변화를 효율적으로 보상할 수 있는 적응형 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서 적용한 횡단선 적응 등화기의 구조를 그림 4에 나타내었다. 등화기는 L 개의 탭을 가지며 적응 알고리즘의 최적 해를 구하는 여러 방법들중 본 논문에서는 상대적으로 구현이 간단하고 계산량이 적은 LMS(Least Mean Square)알고리즘을 사용하여 탭 계수를 갱신하였다[11].

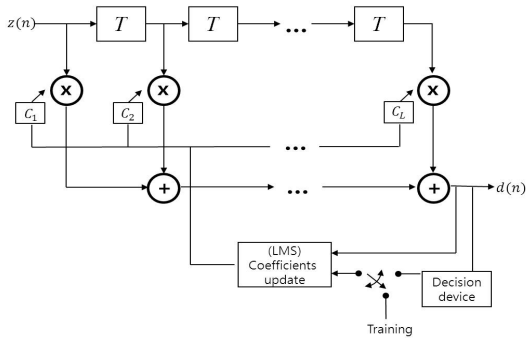


그림 4. LMS를 이용한 적응 등화기 구조
Fig. 4 Adaptive equalizer structure with LMS

III. 해상통신실험 구성 및 결과 분석

3.1 해상실험 구성

본 논문에서는 2장에서 설명한 디지털 변조기법들을 적용하여 실제 해상에서 수중통신 실험을 수행하였다. 실험은 한국해양대 앞바다에서 수행 되었으며 실험 해역과 송.수신단에 사용된 장비들을 그림 5에 나타내었다. 그림 6은 송.수신기의 위치를 나타낸다. 평균 수심은 약 5m이며 송수신기 사이의 거리는 20m, 깊이는 각 2m로 동일하게 설정하였다. 표 1은 실험에 적용된 주요 파라미터들과 송.수신기의 제원을 나타낸다.

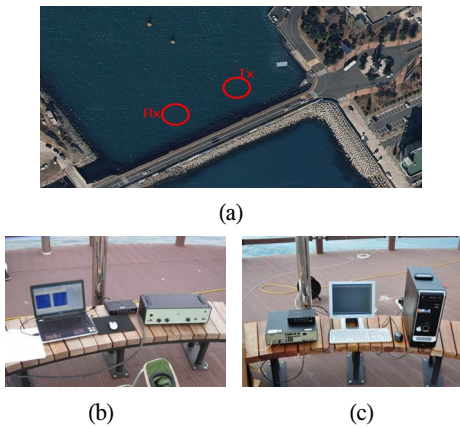


그림 5. 수중통신 실험환경
(a) 실험 해역 (b) 송신단 장비 (c) 수신단 장비
Fig. 5 Experimental environment for underwater communication (a) Experimental sea (b) Transmission devices (c) Receiver devices

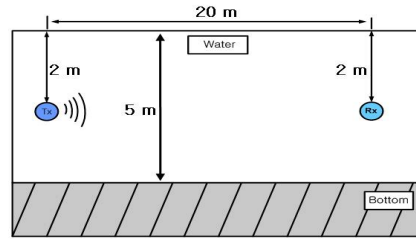


그림 6. 송.수신기의 위치
Fig. 6 Location of transmitter and receiver

소스신호로 100*71 pixel (56,800 Bits)의 크기를 가지는 이미지 신호를 전송하였다. ASK와 QPSK는 데이터 전송률을 1 Kbps, 3 Kbps로 BFSK는 600 bps, 1 Kbps로 각각 설정하였다. 반송파의 주파수는 24 KHz로 하였으며, BFSK의 경우 16, 24 KHz의 두 가지 반송 주파수로 신호를 변조하였다. 수신단 A/D 변환기의 샘플링 주파수는 192 KHz로 설정하였다. 송신센서로는 ITC-1001 모델을 사용하였고, 수신기센서는 B&K-8103 모델을 사용하였다.

그림 7은 송신단과 수신단 구성의 블록 다이어그램을 나타낸다. 정보 데이터는 각각의 디지털 변조방식으로 변조되어 미리 PC에 저장된다. D/A 컨버터를 거친 전송 신호는 파워 앰프를 통해 증폭되고 수중채널에서 전파되어 송신기에 수신된다. 수신단에서는 아날로그 대역 통과 필터를 거친 수신신호를 A/D 변환 후 복조 알고리즘을 적용하여 정보 데이터를 복구하였다.

표 1. 실험에 적용된 파라미터
Table I. Experimental parameters

Modulation	ASK	BFSK	QPSK
Bit rate	1 Kbps 3 Kbps	600 bps 1 Kbps	1 kbps 3 kbps
Sensor	Tx	ITC - 1001	
	Rx	B&K - 8103	
Source data	100 * 71 gray scale image (56,800 bit)		
Frequency	Carrier : 24 KHz (ASK, QPSK) 16 KHz/24 KHz (BFSK) Sampling : 192 kHz		
Distance	20m		
Sensor depth	Tx : 2m / Rx : 2m		

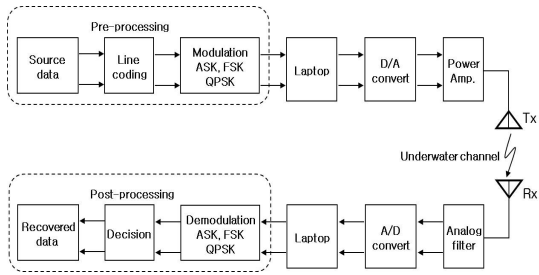


그림 7. 송·수신단 구성의 블록 다이어그램
Fig. 7 Block diagram of structure of transmitter and receiver

3.2 실험결과 분석

정보 데이터를 전송하기에 앞서 송·수신단 사이의 채널특성을 파악하기 위하여 짧은 구간의 burst 신호를 이용하여 임펄스 응답을 측정하였다. 그림 7은 측정된 임펄스 응답을 나타낸다. Burst 신호의 중심 주파수는 24 KHz이며, 일정한 시차를 두고 5번에 걸쳐 전송한 신호들을 시간상에서 평균화하여 나타낸 결과이다. 그림 8에서 가장 먼저 들어오는 경로의 시간은 송신기와 수신기 사이의 실제 거리에 근거한 지연시간을 나타내지 않고 편의를 위하여 임의로 시간축을 설정한 것이다. 임펄스 응답을 살펴보면 약 1 ms 지점에 가장 큰 에너지를 가지는 신호의 경로를 직접파로 간주 할 수 있으며, 약 7.2 ms 지점에서 상대적으로 큰 에너지를 가지는 반사경로가 나타남을 확인 할 수 있다. 첫 번째 경로와 두 번째 경로와의 지연 시간차는 약 6.2 ms로 약 9m의 차이를 가지는 경로를 통해 도달한다.

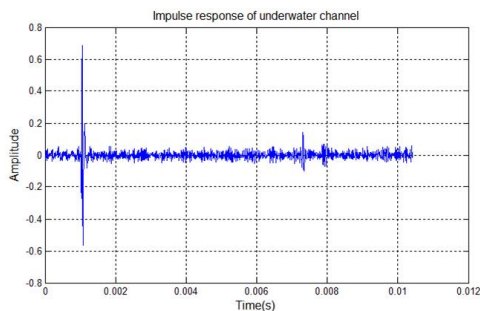


그림 8. Burst 신호를 이용하여 측정된 실험환경의 임펄스 응답
Fig. 8 Impulse response of the experimental environment using a burst signal

그림 9는 전송 이미지 데이터와 ASK 복조로 복구된 결과를 나타낸다. 2.1절에서 설명한 복조 알고리즘을 적용하였고, 오류 보상 알고리즘은 적용되지 않았다. 육안으로 봤을 때 1 Kbps, 3 Kbps 두 가지 전송률의 결과 모두 원본 이미지와 흡사함을 알 수 있고, 심하게 왜곡된 부분은 나타나지 않는다. BER(Bit Error Rate)을 추정한 결과 1 Kbps의 경우 1.56×10^{-4} (6/56,800), 3 Kbps의 경우 3.5×10^{-5} (2/56,800)로 확인하였다.

그림 10은 FSK 복조로 복구된 이미지 결과를 나타낸다. ASK와 동일하게 오류 보상 알고리즘은 적용되지 않았다. BER 추정결과는 600 bps일 때 5.11×10^{-4} (29 / 56,800), 1 Kbps일 때 1.58×10^{-4} (9 / 56,800)으로 나타났다.



(a)



(b)



(c)

그림 9. 전송 이미지 데이터와 ASK 복조 결과
(a) 전송 이미지 (b) 1 Kbps (c) 3 Kbps
Fig. 9 Transmitted image data and results of ASK demodulation
(a) transmitted image (b) 1 Kbps (c) 3 Kbps



(a)



(b)

그림 10. FSK 복조 결과 (a) 600 bps (b) 1 Kbps
Fig. 10 Results of FSK demodulation
(a) 600 bps (b) 1 Kbps

그림 11은 QPSK 복조로 복구된 이미지와 성상도를 나타낸다. 1 Kbps 결과의 경우 전체 이미지의 약 30% 정도까지는 큰 왜곡 없이 복구하였지만 이 후부터는 심하게 왜곡되어 식별이 불가능하다. 3 Kbps의 경우에도 1 Kbps의 결과보다는 상대적으로 약하지만 뒷부분의 데이터들이 왜곡된 결과를 확인할 수 있다. 각각의 성상도를 분석한 결과 진폭에 의한 왜곡보다는 위상 불일치에 의한 왜곡의 효과가 큰 것을 확인하였다. 따라서 선형 등화기를 적용하여 비트 오류를 보정하고자 하였다. 적용된 등화기의 적응 알고리즘은 LMS(Least Mean Square)으로 정하였고, 8개의 Tab을 가지며 Step-size는 0.01로 설정하였다. Training 신호로는 500 Symbol (1000 bits)의 길이를 가지는 랜덤 데이터열을 사용하였다.

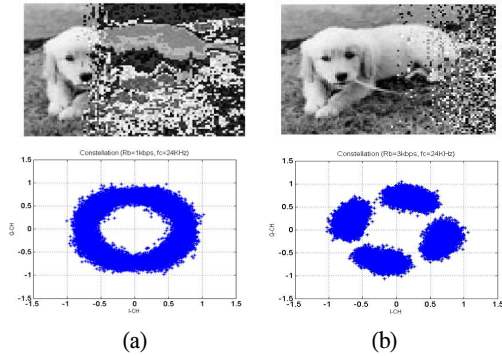


그림 11. QPSK 복조 결과와 성상도

(a) 1 Kbps (b) 3 Kbps

Fig. 11 Results of QPSK demodulation and constellation

(a) 1 Kbps (b) 3 Kbps

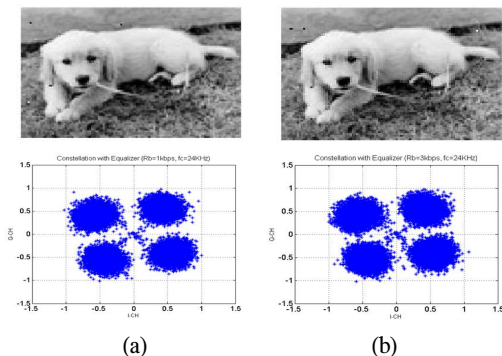


그림 12. 등화기법이 적용된 QPSK 복조 결과와 성상도

(a) 1 Kbps (b) 3 Kbps

Fig. 12 Results of QPSK demodulation and constellation with equalizer

(a) 1 Kbps (b) 3 Kbps

그림 12는 선형 등화기법을 QPSK 복조에 적용한 결과와 성상도를 나타낸다. 이미지의 왜곡된 부분이 보정된 결과를 확인할 수 있고, 성상도 상에서 위상왜곡으로 인해 틀어진 형태가 개선되었음을 확인할 수 있다. 등화기법을 적용한 후 BER을 추정된 결과 1 Kbps의 경우 1.93×10^{-4} (11 / 56,800), 3 Kbps의 경우 2.82×10^{-4} (16 / 56,800)으로 확인 되었다.

이상의 실험 결과를 통하여 ASK와 FSK의 경우 20 m의 근거리에서 특별한 오차보상 알고리즘 없이 600 bps~3 Kbps의 전송률로 BER 약 10^{-3} ~ 10^{-4} 이내의 오차율을 가지는 통신이 가능함을 확인하였다. QPSK의 경우에는 LMS 알고리즘 기반의 선형 등화기를 적용하여 1 Kbps, 3 Kbps의 전송률로 10^{-3} ~ 10^{-4} 의 오차율을 가지는 통신 성능을 나타내었다.

이론적으로는 같은 실험조건에서 데이터의 전송률이 높을수록 오차율이 나빠지지만 기 제시된 실험 결과들은 그 반대의 결과들을 나타내고 있다. 즉 보상 알고리즘을 적용하지 않았을 경우 세 가지 변조기법 모두 데이터율이 높을수록 BER이 향상된 결과를 나타내고 있다. 원인을 분석한 결과 전체 전송신호 구간 중 뒷부분에 대부분의 오차가 집중되어 있는데, 이는 실험에 사용된 A/D 컨버터의 하드웨어적인 문제로 추정된다. 사용된 A/D 컨버터에서 지원하는 최대 샘플링 주파수는 192 KHz이며, 최대 주파수로 신호의 수신시간이 증가할 경우 뒷단의 신호샘플들이 일부 누락되어 신호의 위상동기가 불일치하는 결과를 확인하였다. ASK와 FSK의 경우에는 비동기 복조 방식을 사용하였기 때문에 신호 뒷단에서 신호 샘플이 일부 누락되어도 성능에 큰 차이 없이 복조가 가능하였지만 동기 방식을 사용하는 QPSK의 경우에는 그림 10에서도 알 수 있듯이 신호의 수신시간(데이터 전송률)에 따라 성능이 크게 영향을 받는다. 따라서 전송률이 낮은 경우 상대적으로 신호 수신시간이 길기 때문에 위에서 언급한 이유로 전송률이 높은 경우에 비해 성능이 저하된 결과가 나타났다.

IV. 결 론

본 논문에서는 수중 센서네트워크 구현에 있어 센서 노드들간의 효율적인 통신기법을 선정하기 위하여 단일 반송파 기반의 디지털 변조기법들의 성능을 해상 실

험을 통하여 분석하였다. 실험은 송.수신기간 거리 20m, 평균 수심 약 5m의 환경에서 수행 되었고 변조기법으로는 ASK, FSK, QPSK를 사용하여 이미지 데이터를 전송하고 복조를 통해 복구된 이미지와 BER추정을 이용하여 성능을 평가하였다.

ASK와 FSK의 경우 600 bps~3 Kbps의 전송률로 BER 추정치는 약 10^{-3} ~ 10^{-4} 이내로 나타났으며, QPSK의 경우에는 선형 등화기법을 적용하여 1 Kbps, 3 Kbps의 전송률로 BER 약 10^{-3} ~ 10^{-4} 의 오차율을 가지는 통신이 가능함을 확인하였다. 신호의 전송률에 따른 하드웨어적인 문제점을 분석하였고 영향을 최소화하기 위해 샘플링 주파수의 조정 및 전송신호의 패킷 구성등의 해결방안을 고려해야 할 것으로 판단된다.

향후 통신거리와 데이터 전송률을 증가시키고 QAM 및 DPSK등의 변조기법에 대한 통신 성능분석이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

[1] 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.

[2] M. Stojanovic, "Recent Advances in High-Speed Underwater Acoustic Communications," IEEE J. Oceanic Eng., vol. 121, No. 2, April 1996, pp.125-136.

[3] M. Chitre, S. Shahabodeen and M. Stojanovic, "Underwater Acoustic Communications and Networking: Recent Advances and Future Challenges," Marine Technology Society Journal," vol. 42, No. 1, Spring 2008, pp. 103-116.

[4] I. F. Akyildiz, D. Pompili and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks : research challenges," Ad Hoc Networks, vol. 3, no. 2, pp. 257-279, Feb. 2005.

[5] S. Merriam and D. Porta, DSP-based acoustic telemetry modems, Sea Technology, May 1993.

[6] M. Suzuki and T. Sasaki, "Digital acoustic image transmission system for deep sea research submersible," IEEE Oceanic Eng., Conf., 567-570, Newport, Oct. 1992.

[7] A. Kaya and S. Yauchi, "An acoustic communication system for subsea robot," IEEE Oceanic Eng., Conf., Seattle, 765-770, Oct. 1989.

[8] 임용곤, 박종원, 최영철, "Multipath를 고려한 수중 영상 전송 시스템 설계," 한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회 논문집, 4(1), 419-424, May, 2000.

[9] O. H. Lee, Y. J. Son and K. M. Kim, "Underwater acoustic communications using channel estimation," IEEE Oceanic Eng., Conf., 1573-1576, Biloxi, Oct. 2002.

[10] 손근영, 노용주 윤종락, "수중 데이터 통신 시스템 개발 -변조방식의 성능 분석," 한국음향학회 학술 발표대회 논문집, 19 (2(s)), 345-348, Nov. 1998.

[11] B. Sklar, "Digital Communications: Fundamentals and Applications," Prentice Hall; 2 edition (January 21, 2001).

[12] 김현수, 최동현, 서종필, 정재학, 김성일, "동해 연근해에서 위상 추정기를 갖는 적응형 등화기의 실험적 성능 검증," 한국음향학회지, 제29권, 제4호, pp. 229~236, 2010.

저자소개

김세영(Se-Young Kim)



2005년 한국해양대학교
전파공학과 공학사
2007년 한국해양대학교
전파공학과 공학석사

2007년 3월~현재 한국해양대학교 전파공학과 박사과정
※관심분야: 수중통신, 소나 신호처리

한정우(Jenong-Woo Han)



2007년 한국해양대학교
전파공학과 공학사
2009년 한국해양대학교
전파공학과 공학석사

2009년 3월~현재 한국해양대학교 전파공학과 박사과정
※관심분야: 수중통신, OFDM, DSP



김기만(Ki-man Kim)

1988년 연세대학교 전자공학과
공학사

1990년 연세대학교 전자공학과
공학석사

1995년 연세대학교 전자공학과 공학박사

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

1996년 9월~현재 한국해양대학교 전파공학과 교수

※ 관심분야: 수중통신, 소나 신호처리, DSP