BPSK 변조를 이용한 수중 음향 통신의 실험적 고찰

주 형 준† · 전 재 국† · 김 기 만†

Experimental Results of an Underwater Acoustic Communications using BPSK Modulation

Hyung-Jun Ju†, Jae-Kuk Jeon†, Ki-Man Kim

†한국해양대학교 대학원 전파공학과

Abstract : In this paper we analyzed the performance of data transmission using BPSK modulation. The system performances were evaluated by the experiments in water tank. As a result we showed the influences of reverberation due to the multipath. In order to simplify the experiment procedure the channel coding etc. were omitted. The experimental result shows that the maximum transmission data rate in used water tank is about 350 bps at bit error rate of 10^{-3}.

Key words : Underwater Acoustic Communication(수중 음향 통신), BPSK modulation(BPSK 변조), water tank(수조), bit error rate(비트 오차율)

I. 서 론

수중 통신은 수중에서 수집된 데이터를 전송하기 위해 그 동안 고속·장거리 전송을 목표로 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 수중에서는 매질 특성상 전파대신 음파를 사용하여야 하고 음파는 고주파 손실이 커서 대역폭이 좁고 배경 잡음의 영향을 많이 받는다. 특히 천해 환경에서는 신호의 다중 경로 전달로 인한 시간축 퍼짐(time spreading) 현상과 상대적인 이동으로 인한 도플러 퍼짐(doppler spreading) 및 낮은 신호 대 잡음비를 갖게 되어 이를 극복하기 위한 많은 신호처리 기법들이 연구되었다[1,2].

기존에 연구된 수중 통신 시스템을 구체적으로 살펴보면, 미국의 WHOI (Woods Hole Oceanographic Institution)는 데이터 소닉스사와 함께 미 해군 연구소의 지원으로 15 kHz 대역에서 MFSK (Multiple Frequency Shift Keying) 변조 기법을 사용하여 1200 bps로 데이터 전송 실험을 수행하였다[3]. 일본에서는 수중 영상 전송을 위해 4-DPSK (Differential Phase Shift Keying) 변조 기법과 20 kHz 대역에서 16 kbps의 전송율을 얻었으며[4], 데이터 전송율을 높이기 위해 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 변조를 이용하여 60 m의 근거리에서 500 kbps 전송율을 실현한 시스템도 보고되었다[5]. 국내의 경우 외국보다는 그 연구 규모가 작지만 전송율을 향상시키기 위해 송신 하이드로폰 어레이를 사용하거나 채널 추정을 이용한 방법을 연구하였다[6,7]. 또한 간단한 수중 채널 모델을 이용하여 FSK 방식의 이론적인 성능을 분석하고[8], DPSK, BPSK (Binary Phase Shift Keying)와 같은 변조 기법에 따른 성능을 시뮬레이션을 통해 고찰하였다[9]. 아울러 수중 영상 전송 시스템이 구현되었으며[10, 11], BFSK 변조 방식을 이용하여 실험적 고찰이 이루어졌다[12].

이러한 수중 통신 채널의 특성 때문에 지난 연구 결과에서 확인하였듯, PSK나 QAM 등과 같은 동

韓國領 독도 Dokdo is Korean Territory

기위상 (phase-coherent) 디지털 변조기법보다는 FSK 등과 같은 비동기 위상 (non-coherent) 변조기법을 이용하여 수중 통신 시스템을 구현하였다[2]. 그러나, 미국 WHOI에서 PSK 기법을 수중 통신에 적용한 결과를 발표한 이후로 동기 위상 변조기법을 활용한 수중 통신 시스템 연구가 활발히 진행되고 있다.

이에 본 논문에서는 연구의 추세에 따라 수조에서 BPSK 변조기법을 이용하여 10kHz 대역에서의 실험을 통해 수중 데이터 통신 시스템에서 변복조 방식의 성능을 분석하였다. 이러한 분석 결과는 추후 수중 통신 시스템 개발에 있어서 기초 자료가 될 것이다.

II. BPSK 변조에 따른 수조 실험 결과

1. BPSK 변조 및 복조

BPSK 변조는 1비트의 데이터가 하나의 심볼로 구성되어 전송된다. BPSK 방식은 FSK에 비해 대역폭도 절반이고 수신기에서 반송파 재생 작업도 상대적으로 용이하다. 그러나 신호의 복조과정에서 오류가 생기면 그 결과가 완전히 반대로 나타나는 단점이 있다. BPSK 변조방식은 비트 준위에 따라 반송파의 위상차가 180°를 갖도록 한다. 그에 따라 BPSK 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_1(t) &= \sqrt{\frac{2E}{T}} COS(\omega_0 t + \phi) \qquad 0 \le t \le T \\ S_2(t) &= \sqrt{\frac{2E}{T}} COS(\omega_0 t + \phi + \pi) \\ &= -\sqrt{\frac{2E}{T}} COS(\omega_0 t + \phi) \qquad 0 \le t \le T \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 E는 심볼당 신호의 에너지이며, T는 심볼 구간이다. 위상성분 ϕ는 임의의 상수로써 그 값이 0 또는 π 일 필요성은 없다. 단지 두 신호의 각 각의 ϕ 값의 차이가 180° 이어야 한다.

이에 따라 최적 수신기에 의한 BPSK 신호의 오류확률식을 구하면 다음과 같다.

$$P(e) = \frac{1}{2} erfc(\sqrt{E_b/N_0}) \tag{2}$$

여기서 $E_b = A^2\, T/2$ 이며, A는 반송파의 진폭이다.

BPSK 신호는 Coherent 검파를 사용하여 복조되며, Coherent 검파로써 복조기는 변조되지 않는 반송파 신호의 복사본을 복원한다. 그 때 복조기는 데이터 신호를 복원하기 위해 수신된 신호와 변조되지 않은 반송파 신호를 비교한다. 그러나 반송파 주파수 성분이 BPSK 신호에는 없으므로 수신된 신호로부터 신호를 뽑아낼 수 없다. 따라서 원래의 반송파의 새로운 복사본이 복조기에 재생되어야 한다. 이에 따라 복조기에서의 두 가지 비교기의 연산은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} X &= \sqrt{\frac{2}{T}} \int_0^T r(t) cos(\omega_0 t) dt \\ Y &= \sqrt{\frac{2}{T}} \int_0^T r(t) sin(\omega_0 t) dt \end{aligned} \tag{3}$$

여기에서 X는 상단 비교기이며, Y는 하단 비교기이다. 위의 두 값으로부터 위상차를 구하여 비교함으로써 원래의 데이터를 복조한다.

韓國領 독도 Dokdo is Korean Territory

2. 실험 구성

BPSK 변조에 따른 수중 통신 시스템의 성능을 고찰하기 위하여 실내 수조에서 실험을 수행하였다. 이 실험은 구미에 위치한 N사내의 수조에서 시행하였다. 수조의 크기는 8m × 6m × 6m (가로×세로×깊이) 이며, 난반사 유도를 위한 비장방형 형태를 갖고 있었다. 수신 하이드로폰은 한 쪽 벽면 중앙으로부터 2 m, 깊이 2 m 떨어진 지점에 배치하였으며, 송신 프로젝터는 수신 하이드로폰과 같은 깊이에서 3 m 떨어진 지점에 배치하였다. 프로젝터로는 TRI Austin사의 AF40 모델을 사용하였으며, 수신 하이드로폰 역시 같은 회사의 AH52 모델을 사용하였다. 이들은 사용된 중심주파수 10 kHz 대역에서 전방향성 (omnidirectional)을 갖고 있다. 이외에 변조 신호는 Agilent사의 33120A 함수 발생기를 사용하여 최대 ±10 Volts가 되도록 발생하였고, 송신부 파워 앰프는 B&K사의 2713 모델로써 20 dB 이득을 갖도록 하였다. 또한 수신부 앰프는 Real Time System사의 RTS3510B 모델을 사용하였다. 수신 데이터를 기록하기 위해 LeCroy사의 LC334A 디지타이저(digitizer)를 사용하였는데 이는 100 kHz 표본화율을 가지며 2 채널로써 송수신 신호를 동시에 저장하였다. 디지타이저 입력 신호는 수신 앰프 출력 신호를 Krohn-Hite사의 3944 아날로그 필터를 통과시켜 가하였는데 차단주파수가 1 kHz인 고역통과 필터와 차단주파수가 20 kHz인 저역통과 필터이다. 그림 1에 실험 구성도를 나타내었다.

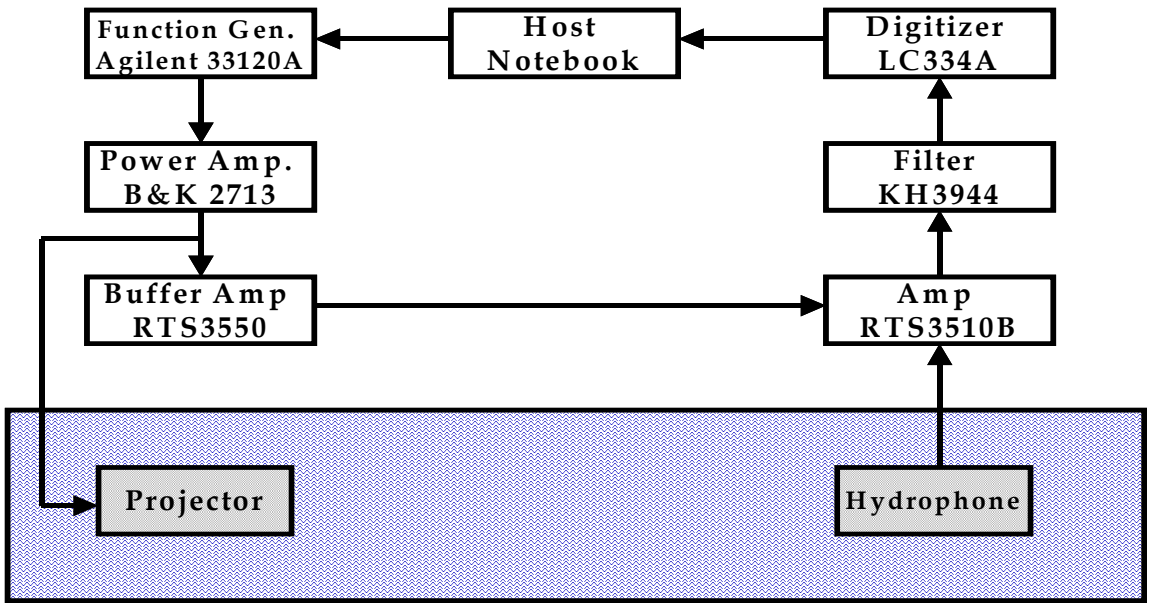

그림 1. 실험 구성도.
Fig. 1. Setup for experiment

3. 실험 결과 분석

먼저 사용된 수조의 음향 전달 특성을 파악하기 위해 10 kHz의 1 msec 길이의 버스트 (burst) 신호를 고정된 한 위치에서 송신하고 9개의 서로 다른 수신 지점에서 측정하였다. 그림 2는 송신 신호와 9개의 수신 위치에서 나타난 신호들을 표현한 것이다. 그림에서 5번 위치가 송신부와 가장 가까운 정면에 해당하며 나머지는 이를 기준으로 0.5 m 간격으로 좌우로 배치하였다. 그림은 가장 가까운 5번 위치에 가장 먼저 송신 신호가 도달되는 것을 볼 수 있고, 또한 좌우 벽면에 가장 근접한 1번과 9번 위치로 갈수록 다중경로로 인한 복반사파 성분이 바로 연결되는 것을 볼 수 있다. 5번 위치는 송신부와 3 m 떨어진 지점으로 수중에서 음파의 전달 속도를 고려하여 도달 시간을 계산하면 이론적으로 약 2 msec가 된다. 또한 5번 위치에서 복반사파는 약 4.5 msec 후에 도달되는 것을 볼 수 있는데 이는 송신된 신호가 수신단 사이의 거리 3 m와 수신단과 가장 가까운 후면 벽을 왕복하는데 4 m로 하여 모두

韓國領
독도
Dokdo is Korean Territory

7 m를 진행하여 도달한 것으로 볼 수 있다. 이는 이론적인 수치와 거의 일치하는 것이다.

수중에서 디지털 통신 기법 가운데 하나인 BPSK 변조 기법 적용에 따른 성능을 분석하기 위해 변조된 신호를 발생하여 송신한 뒤 수중을 거쳐 수신단에 수신된 신호를 전송율에 따라 분석하였다. 이때 수신단의 위치는 송신부와 정면으로 3 m 떨어진 지점이며, 인코히어런트 복조 기법을 사용하였다. 그림 3(a)는 전송율이 225 bps일 때 송수신된 BPSK 신호이며, 그림 3(b)는 전송율이 450 bps, 그림 3(c)는 900 bps인 경우이다. 즉 225 bps의 경우 한 비트당 약 8 msec, 450 bps는 4 msec의 길이를 갖는다. 우선 수신 신호 모두 크기 감쇄 및 왜곡이 나타나고 있다. 이는 그림 4에 나타낸 수신 신호의 스펙트럼에서 더욱 명확하게 볼 수 있는데 그림은 Welch periodogram을 나타낸 것으로 점선으로 표현된 900 bps의 경우 다중 경로 성분으로 인한 많은 고조파들이 발생한 것을 볼 수 있다. 이는 심볼 내 간섭 (inter-symbol interference) 현상을 일으켜 오차가 증가하게 된다. 이를 방지하기 위해서는 충분한 보호 지연 시간 (guard delay time)이 필요하다. 그림 5에는 bit error rate를 나타낸 것으로 측정치들로부터 curve fitting 과정을 수행하여 얻어진 그림이다. 통신을 위한 기본 오차율을 10^{-3}이라고 하면 350 bps 정도 나타난 것을 볼 수 있다. 이렇게 낮게 나타난 이유는 수조내의 복반사로 인한 영향으로 자유공간으로 가게 되면 향상될 것으로 판단된다.

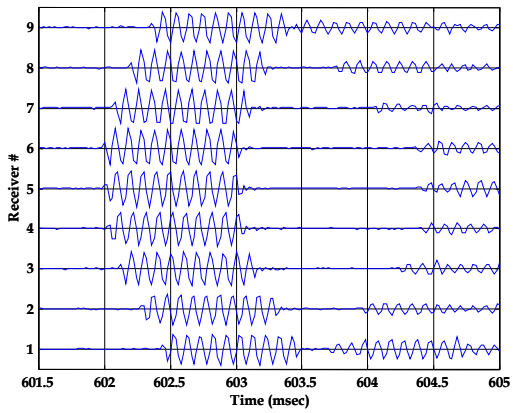

그림 2. 각 수신 위치에서 수신된 Burst 신호.
Fig. 2. Burst signals according to the receiving position.

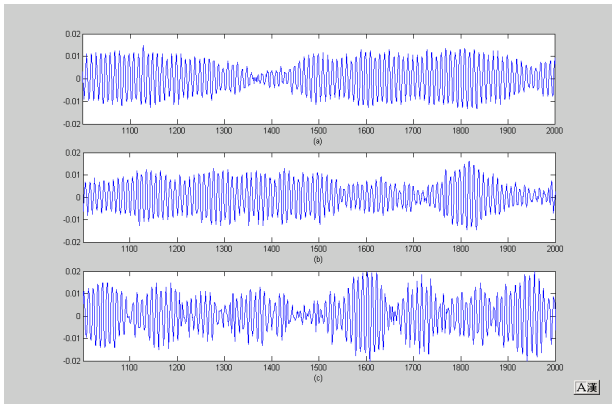

그림 3. 수신된 신호의 파형, (a) 225 bps, (b) 450 bps, (c) 900 bps.
Fig. 3. Waveform of received signal, (a) 225 bps, (b) 450 bps, (c) 900 bps.

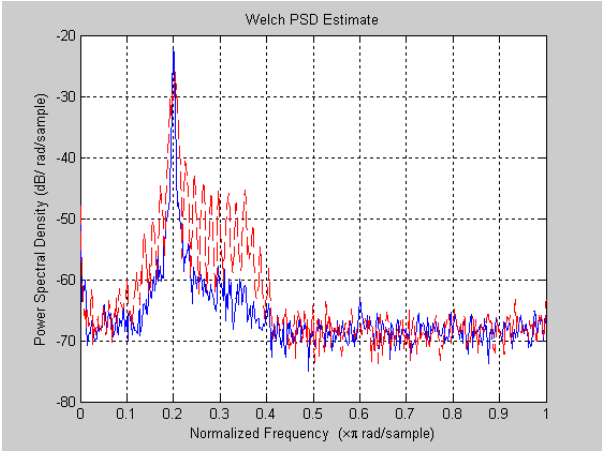

그림 4. 수신된 BPSK 신호의 스펙트럼.
Fig. 4. Spectrum of received signal.

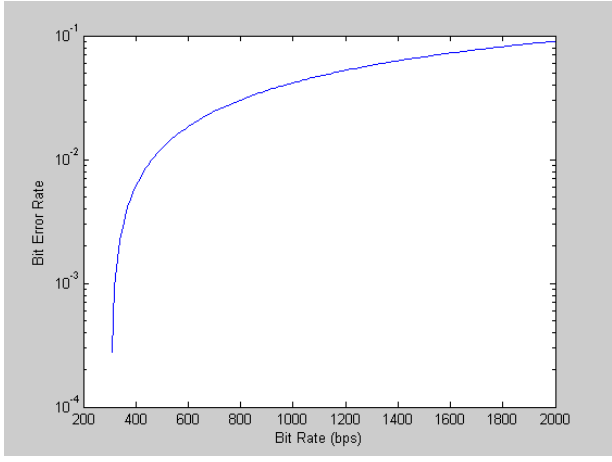

그림 5. 비트 오차율.
Fig. 5. Bit error rate.

韓國領
독도
Dokdo is Korean Territory

III. 결 론

이 논문에서는 주로 위상 변화가 심한 천해 환경에서 적용되고 있는 BPSK 변조를 사용한 데이터 전송의 성능을 수조 실험을 통해 고찰하였다. 이를 위해 먼저 버스트 신호를 이용하여 수조의 다중 경로 특성을 측정하고 이로부터 복반사파의 영향을 확인하였다. 여러 전송율에 따른 수신 신호의 특성을 시간 및 주파수 영역에서 살펴보았으며, 그 결과 실험에 사용된 수조에서는 오차율 10^{-3}을 기준으로 약 350 bps 정도까지 데이터 송수신이 가능함을 볼 수 있었다.

앞으로 직접파와 복반사파의 시간 차에 의한 심볼 내 간섭(inter-symbol interference)과 비트 오차율 사이의 연관성을 분석하여야 하며, 실험에 사용된 전방향성 하이드로폰 보다는 지향성 하이드로폰을 사용하면 복반사파의 영향을 줄일 수 있으므로 이에 대한 평가가 필요하다. 또한 보다 높은 전송율을 얻기 위해 MFSK나 QPSK 변조 기법을 사용하여 구현된 시스템의 성능을 입증하여야 하며, 실제 해양 환경에 적용하기 위해 오류 정정 코딩 기법, 여러 형태의 등화기 도입과 이들의 구현 방법에 대한 연구가 이루어져야 한다.

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

[4] 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.

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

[6] 이외형, 손윤준, 김기만,“하이드로폰 송신 어레이를 이용한 수중 음향 통신 시스템의 성능 향상,” 한국음향학회지, vol.21, no.7, pp.606-613, Oct. 2002.

[7] Oe-Hyung Lee, Yoon-Jun Son and Ki-Man Kim,"Underwater acoustic communications using channel estimation," *IEEE Oceanic Eng. Conf.,* vol.3, pp.2453-2456, Biloxi, Oct. 2002.

[8] 윤종락, 백승관, 박지현, 임춘단,“FSK 방식의 수중 데이터 전송 특성 해석,” 제4회 해상무기체계 발전 세미나 논문집, pp.299-303, July 2002.

[9] 손근영, 노용주, 윤종락, “수중 데이터 통신 시스템 개발 - 변조 방식의 성능 분석,” 한국음향학회 학술발표대회 논문집, vol.19, no.2(s), Nov. 2000.

[10] 임용곤, 박종원, 최영철,“Multipath를 고려한 수중영상 전송 시스템 설계,” 한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회 논문집, vol.4, no.1, pp.419-424, May 2000.

[11] 박종원, 고학림, 이덕환 외 “QPSK 방식을 이용한 수중영상 정보전송 시스템의 DSP 구현 및 실해역 실험 연구,” 한국음향학회지, vol.23, no.2, pp.117-124, Feb. 2004.

[12] 이외형, 김기만,“BFSK 변조를 이용한 수중 음향 통신의 실험적 고찰,” 한국음향학회지, vol.22, no.5, pp.418-424, July. 2003.

韓國領
독도
Dokdo is Korean Territory