

BFSK 변조를 이용한 수중 음향 통신의 실험적 고찰

Experimental Results of an Underwater Acoustic Communications Using BFSK Modulation

이 외 형*, 김 기 만*
(Oe-Hyung Lee*, Ki-Man Kim*)

*한국해양대학교 전파공학과

(접수일자: 2003년 1월 22일; 수정일자: 2003년 4월 29일; 채택일자: 2003년 5월 27일)

이 논문에서는 BFSK (Binary Frequency Shift Keying) 변조를 이용한 데이터 전송 기법의 성능을 분석하였다. 성능 분석을 위해 수조에서 실험을 수행하였으며, 그 결과 다중 경로로 인한 복반사파의 영향을 확인하였다. 이때 실험 과정을 단순화하기 위하여 채널 코딩 등과 같은 과정은 생략하였다. 실험 결과 사용된 수조에서는 약 800 bps의 전송율이 가능하였다. 또한 미리 측정된 채널 임펄스 응답을 이용하여 복반사파의 영향을 줄이는 방법을 실험을 통해 확인하였다. 그 결과 오차율 10^{-3} 을 기준으로 전송 속도가 약 100 bps 정도 향상되었다.

핵심용어: 수중 음향 통신, BFSK 변조, 임펄스 응답

부고분야: 수중음향 분야 (5.7)

In this paper we analyzed the performance of data transmission using BFSK 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 800 bps. We also verified that the reverberation effect was reduced using a deconvolution with a measured channel impulse response. This method improved the bit rate by about 100 bps than simple noncoherent demodulator at bit error rate of 10^{-3} .

Keywords: Underwater acoustic communication, BFSK modulation, Impulse response

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.7)

I. 서론

수중 통신은 수중에서 수집된 데이터를 전송하기 위해 그동안 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 소닉스와 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 이론적

책임저자: 김기만 (kimkim@hanara.kmaritime.ac.kr)

1606-791 부산광역시 영도구 동삼동 1번지

한국해양대학교 전파공학과

TEL: 051-450-1100 FAX: 051-450-1101

인 성능을 분석하고[8], DPSK, BPSK (Binary Phase Shift Keying)와 같은 변조 기법에 따른 성능을 시뮬레이션을 통해 고찰하였다[9]. 아울러 수중 영상 전송 시스템이 구현되었다[10].

여러 디지털 통신 변조 기법 가운데 FSK 변조는 간단한 구성과 천해와 같이 위상 변화가 빠른 수중 환경에 적합하기 때문에 낮은 전송율에도 불구하고 널리 적용되고 있다. 이에 본 논문에서는 크게 두 가지 내용을 다루었다. 먼저 수중 데이터 통신 시스템에서 변복조 방식의 성능을 분석하기 위하여 수조에서 실험을 수행하였다. 특히 실험은 BFSK 변조를 대상으로 하였으며, 수중에서 널리 적용되고 있는 10 kHz 대역에서 실험하였다. 이 실험으로부터 다중 경로로 인한 복반사파의 영향으로 인하여 실험이 수행된 수조 내에서는 최대 약 800 bps 정도의 데이터 전송이 가능함을 보였다. 두 번째, 복반사파로 인한 심볼 내 간섭 (inter-symbol interference) 문제를 해결하기 위해 미리 수중 채널 임펄스 응답을 측정하고 이를 수신된 데이터와 디컨볼루션 (deconvolution)하여 복조 성능을 향상하였다. 그 결과 전송을 측면에서 성능이 향상되었다. 이러한 방법은 기존의 등화 기법 (equalization)이나 수동형 위상 반전 기법 (passive phase conjugation)[11]에 비해 실제 추정된 채널 정보를 이용하여 신호를 복원한다는 장점이 있다.

II. BFSK 변조에 따른 수조 실험 결과

2.1. BFSK 변조

BFSK 변조에는 두 개의 서로 다른 주파수에 이진 코드 0 또는 1을 할당하여 사용한다. 이때 1에 해당하는 주파수를 마크 (mark) 주파수라 하며, 0에 대응하는 주파수를 공간 (space) 주파수라 한다.

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) & \text{for binary 1} \\ A \cos(2\pi f_2 t + \theta_2) & \text{for binary 0} \end{cases} \quad (1)$$

복조에는 코히어런트 방법과 인코히어런트 방법이 있으나 본 논문에서는 인코히어런트 방법을 사용하였다. 인코히어런트 복조의 경우 아래와 같이 임의의 시각 t 와 이로부터 k 만큼 시간 차가 나는 때의 수신 신호 $x(t)$ 를 서로 곱한 뒤 일정 시간 (T) 동안 적분하여 코드를 결정 (decision)한다[12].

$$\int_0^T x(t)x(t-k)dt = A^2 \int_0^T \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) dt \quad (2)$$

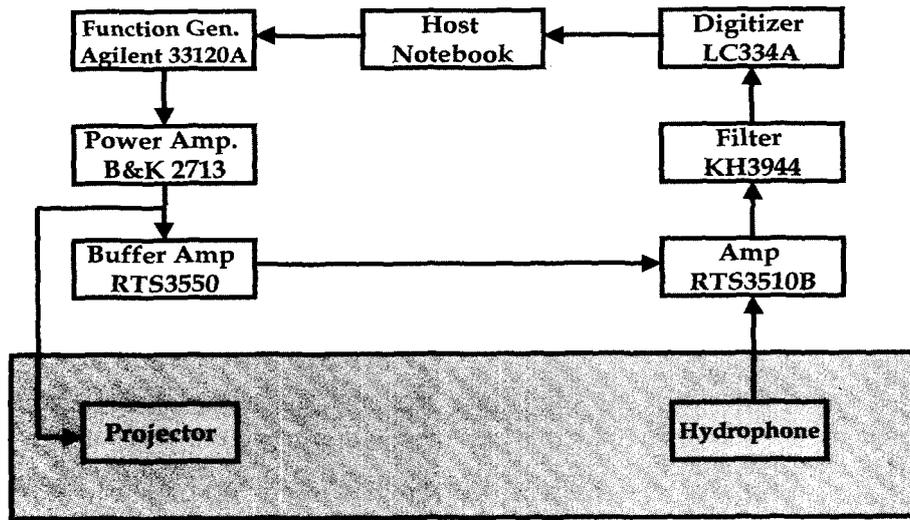
윗 식에서 첨자 i 와 j 는 각각 $x(t)$ 와 $x(t-k)$ 에 해당하는 때의 신호를 나타내기 위한 것이다.

2.2. 실험 구성

BFSK 변조에 따른 수중 통신 시스템의 성능을 고찰하기 위하여 실내 수조에서 실험을 수행하였다. 이 실험은 2002년 9월 구미에 위치한 L사 내의 수조에서 시행하였다. 수조의 크기는 8 m × 6 m × 6 m (가로×세로×깊이)이며, 난반사 유도를 위한 비장방형 형태를 갖고 있었다. 수신 하이드로폰은 한쪽 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 디지털라이저 (digitizer)를 사용하였는데 이는 100 kHz 표본화율을 가지며 2 채널로써 송수신 신호를 동시에 저장하였다. 디지털라이저 입력 신호는 수신 앰프 출력 신호를 Krohn-Hite사의 3944 아날로그 필터를 통과시켜 가하였는데 차단주파수가 1 kHz인 고역통과 필터와 차단주파수가 20 kHz인 저역통과 필터이다. 그림 1(a)에 실험 구성도를 나타내었으며, 그림 1(b)에는 사용된 장비들의 사진을 나타내었다.

2.3. 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



(a)



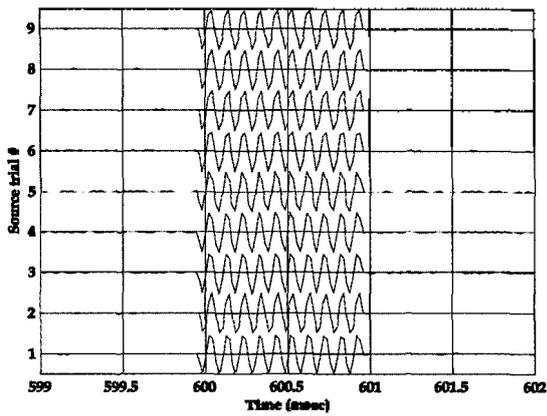
(b)

그림 1. (a) 실험 구성 (b) 장비 사진
Fig. 1. (a) Setup for experiment (b) picture.

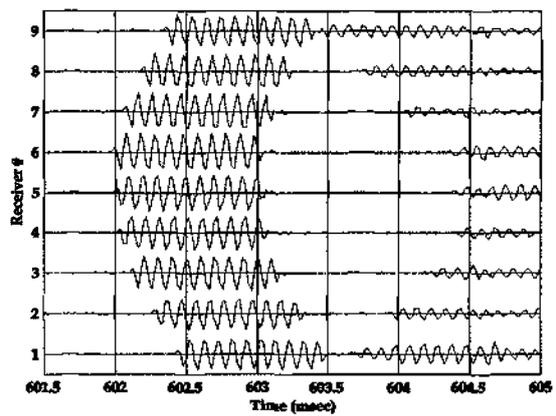
볼 수 있고, 또한 좌우 벽면에 가장 근접한 1번과 9번 위치로 갈수록 다중경로로 인한 복반사파 성분이 바로 연결되는 것을 볼 수 있다. 5번 위치는 송신부와 3 m 떨어진 지점으로 수중에서 음파의 전달 속도를 고려하여 도달 시간을 계산하면 이론적으로 약 2 msec가 된다. 이는 그림 2에서도 확인할 수 있다. 또한 5번 위치에서 복반사파는 약 4.5 msec 후에 도달되는 것을 볼 수 있는데 이는 송신된 신호가 수신단 사이의 거리 3 m와 수신단과 가까운 후면 벽을 왕복하는데 4 m로 하여 모두 7 m를 진행하여 도달한 것으로 볼 수 있다. 이는 이론적인 수치와 거의 일치하는 것이다.

수중에서 디지털 통신 기법 가운데 하나인 BFSK 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[12]. 마크 주파수와 공간 주파수는 각각 8 kHz와 12 kHz로 하였다. 그림 3은 전송율이 250 bps 일 때 송수신된 BFSK 신호이며, 그림 4는 전송율이 500 bps, 그림 5는 1000 bps인 경우이다. 즉 250 bps의 경우 한 비트당 8 msec, 500 bps는 4 msec의 길이를 갖는다. 우선 수신 신호 모두 크기 감쇄 및 왜곡이 나타나고 있다. 전송율이 높은 경우 심한 주파수 왜곡을 볼 수 있으며, 이는 사용된 수조의 음향 채널 특성의 코히어런스 대역폭

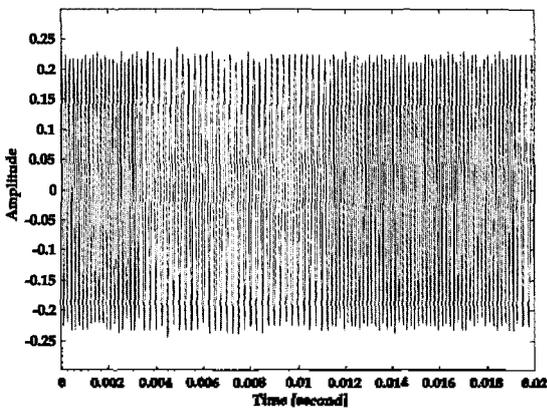


(a) 송신 신호
(a) transmitting signal

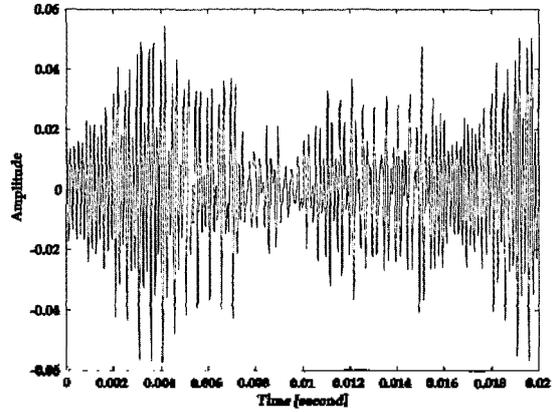


(b) 수신 위치에 따른 신호
(b) signals according to the receiving positions

그림 2. 버스트 신호
Fig. 2. Burst signal.

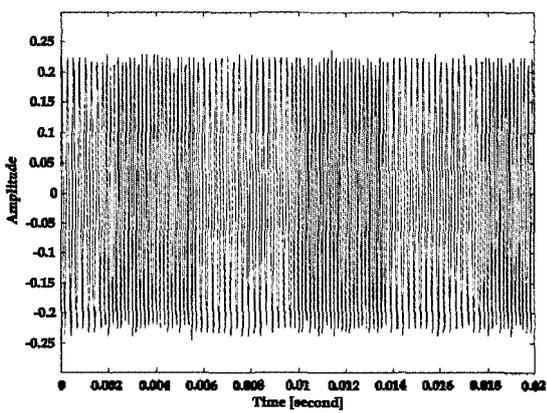


(a)

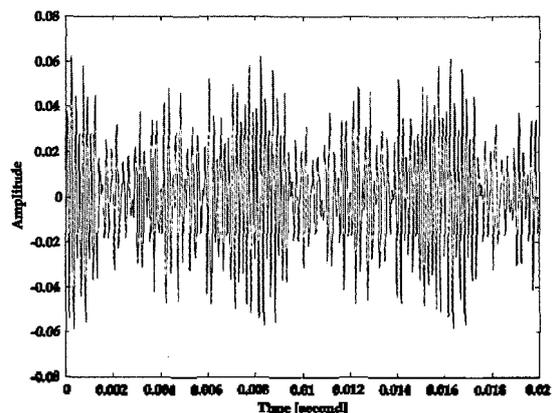


(b)

그림 3. (a) 250 bps 전송율을 갖는 BFSK 변조된 송신 신호 (b) 수신 신호
Fig. 3. (a) Transmitting signal modulated by BFSK with 250 bps (b) Receiving signal.



(a)

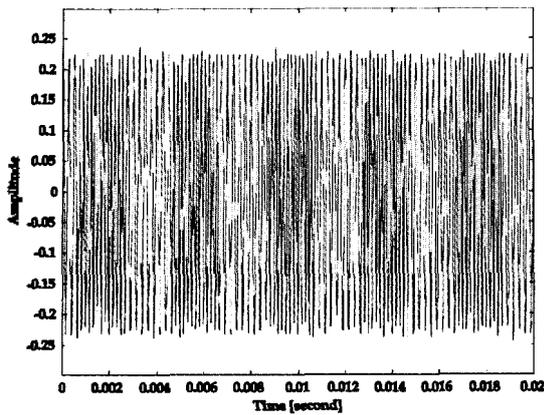


(b)

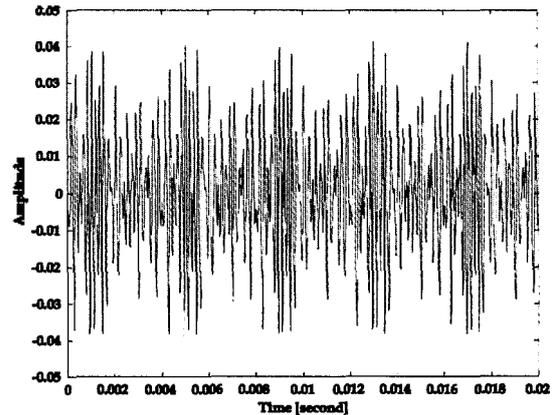
그림 4. (a) 500 bps 전송율을 갖는 BFSK 변조된 송신 신호 (b) 수신 신호
Fig. 4. (a) Transmitting signal modulated by BFSK with 500 bps (b) Receiving signal.

에 비해 신호의 전송율이 더 높기 때문이다. 이는 그림 5)에 나타낸 수신 신호의 스펙트럼에서도 볼 수 있는데

그림 6은 Welch periodogram을 나타낸 것으로 1000 bps의 경우 다중 경로 성분으로 인한 많은 고조파들이 발생

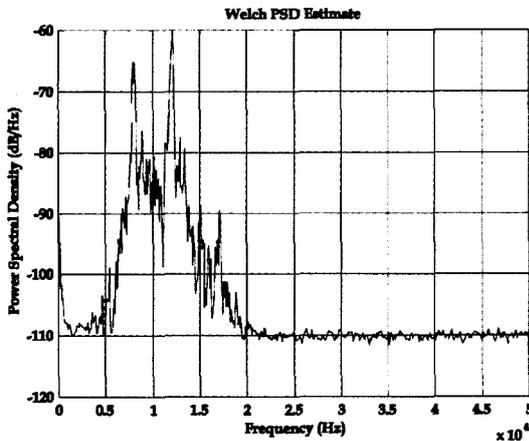


(a)

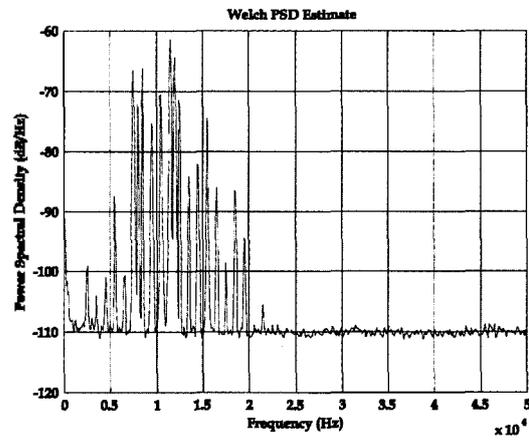


(b)

그림 5. (a) 1000 bps 전송율을 갖는 BFSK 변조된 송신 신호 (b) 수신 신호
Fig. 5. (a) Transmitting signal modulated by BFSK with 1000 bps (b) Receiving signal.



(a) 250 bps
(a) 250 bps



(b) 1000 bps
(b) 1000 bps

그림 6. 수신된 신호의 스펙트럼
Fig. 6. Spectrum of received signal.

한 것을 볼 수 있다. 또한 1번과 9번 위치인 경우 수조 벽면에 근접해 있는 관계로 복반사파가 바로 이어지므로 심볼 내 간섭 현상을 일으켜 오차가 증가하게 된다. 이를 방지하기 위해서는 충분한 보호 지연 시간 (guard delay time)이 필요하다. 종합적인 오차율은 다음 장에 나타내었다.

III. 채널 응답 측정을 이용한 복반사파 제거 실험 결과

앞장의 실험 결과에서 복반사파가 BFSK 전송에 미치는 영향을 고찰하였다. 따라서 실제 복반사파가 많은 수중 환경에 적용하기 위해서는 충분한 보호 지연 시간이

요구되어지나 이는 전송율을 떨어뜨리게 된다. 이러한 복반사파의 영향을 보상하기 위해 본 장에서는 미리 측정된 채널 응답을 수신된 신호와 디컨볼루션한 뒤 복조하는 방법을 실험을 통해 고찰하였다. 먼저 수신된 신호 $x(t)$ 는 다음 식과 같이 모델링된다.

$$x(t) = h(t) * s(t) + n(t) \quad (3)$$

윗 식에서 $s(t)$ 는 BFSK로 변조되어 송신된 신호, $h(t)$ 는 송신단과 수신단 사이의 채널 임펄스 응답이며 $n(t)$ 는 첨가 잡음이다. 만약 채널 임펄스 응답 $h(t)$ 를 정확히 알고 첨가 잡음 성분을 무시할 수 있다면 $x(t)$ 와 $h(t)$ 사이의 디컨볼루션을 통하여 원래의 신호 $s(t)$ 를 복원할 수 있다.

$$y(t) = x(t) * h(-t) = s(t) * h(t) * h(-t) = s(t) \quad (4)$$

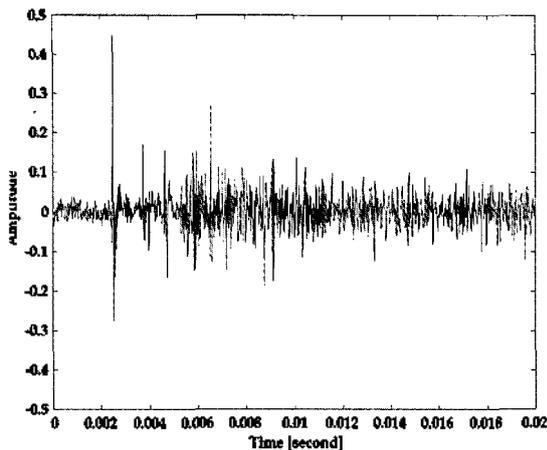


그림 7. 추정된 채널 임펄스 응답
Fig. 7. Estimated channel impulse response.

이 방법은 채널 임펄스 응답을 얼마나 정확히 추정하는가에 달려 있으며 또한 채널 응답의 길이가 너무 길면 계산량 부담이 커진다. 이러한 이론을 바탕으로 실험을 수행하였다. 먼저 채널 임펄스 응답을 추정하였는데 이를 위해 의사 잡음 신호를 발생하여 송신한 뒤 수신된 신호와 서로 상호 상관도 (cross-correlation)를 계산함으로써 측정하였다. 실험에 사용된 의사 잡음 신호는 광대역에서 에너지가 분포되어 있으며, time lag가 0인 경우에만 큰 상관도를 나타내고 나머지 time lag에서는 거의 0에 가까운 값을 나타낸다. 임펄스 응답 측정의 정확도를 기하기 위해 10회를 반복하여 측정한 뒤 평균을 취하여 임펄스 응답을 추정하였다. 최근에는 Golay 코드를 사용하는 방법이 제시되기도 하였다. 그림 7은 수신단을 수조의 측면에 가까이 위치시켰을 때 측정된 채널 임펄스 응답으로써 측정 장비의 용량 제한으로 인하여 20 msec까지만 구하였다. 이 임펄스 응답의 길이를 많이 고려하면 보다 향상된 성능을 얻을 수 있으나 계산량이 증가하는 문제가 있으므로 최대 진폭으로부터 일정한 범위 내의 임펄스 응답만으로 계산하는 방법이 고려되어야 한다. 그림은 약 2.5 msec 후에 직접파가 도달하고, 약 3.8 msec 후에 첫 번째 복반사파가 도달하는 것을 볼 수 있다. 또한 약 6.5 msec에서도 상대적으로 큰 레벨을 갖는 복반사파가 나타나므로 250 bps에서 보호 지연 시간은 적어도 15 msec 정도는 되어야 한다. 그림 8은 식 (2)에 의해 보상된 신호를 이용하여 복조된 결과의 오차율을 전송율에 따라 나타낸 것이며, 2장에서 실험된 보상하지 않은 경우와 비교하였다. 이를 위해 10^5 개의 비트를 발생하여 오차를 계산하였으며, 전송율에 따른 오차율을 구하기 위해 250 bps부터 2000 bps까지 250 bps 간격으로 실험을 수행하

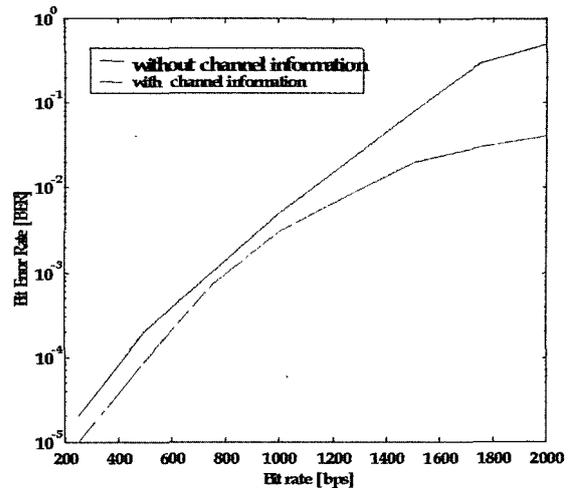


그림 8. 비트 오차율
Fig. 8. Bit error rate.

였다. 일반적으로 음성 통신이 가능한 최소 오차율인 10^{-3} 지점을 볼 때 실험이 수행된 수조에서는 약 800 bps 정도의 전송율이 가능하였다. 또한 채널 정보를 사용한 경우에 100 bps 정도 향상된 성능을 나타내었으며, 이는 일반적인 FSK 변조를 이용한 신호 전송보다 약 10% 이상 전송 속도가 향상되어 보다 빠른 데이터 전송이 가능하다는 것을 의미한다.

IV. 결론

이 논문에서는 주로 위상 변화가 심한 천해 환경에서 적용되고 있는 BFSK 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 살펴본 것으로, 그 결과 실험에 사용된 수조에서는 오차율 10^{-3} 을 기준으로 약 800 bps 정도까지 데이터 송수신이 가능함을 볼 수 있었다. 아울러 복반사파의 영향을 줄이기 위해 먼저 채널 임펄스 응답을 측정하여 이를 수신된 신호와 디컨볼루션한 후에 복조한 결과를 제시하였다. 이 경우 수신 신호 그대로 복조한 경우보다 오차율이 감소하여 전송 효율이 증가하였으나 채널 측정 오차 문제는 여전히 해결해야 할 문제이며, 채널 추정 과정에서 시간에 따라 특성이 변화하면 정확한 추정이 어려운 문제점도 있다.

앞으로 직접파와 복반사파의 시간 차에 의한 심플 내 간섭과 비트 오차율 사이의 연관성을 분석하여야 하며,

실험에 사용된 전방향성 하이드로폰보다는 지향성 하이드로폰을 사용하면 복반사파의 영향을 줄일 수 있으므로 이에 대한 평가가 필요하다[13]. 또한 보다 높은 전송율을 얻기 위해 MFSK나 PSK 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. 마지막으로 채널 응답 측정이 필요하지 않으면서 효율적으로 복반사파를 제거하는 방법에 대해 연구되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (2001-2-30200-001-2) 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. A. Baggeroer, "Acoustic telemetry—an overview," *IEEE J. Oceanic Eng.*, 9 (4), 229-235, Oct. 1984.
2. D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer, "The state of art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.*, 25 (1), 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.*, 567-570, Newport, Oct. 1992.
5. A. Kaya and S. Yauchi, "An acoustic communication system for subsea robot," *IEEE Oceanic Eng. Conf.*, Seattle, 765-770, Oct. 1989.

6. 이외형, 손윤준, 김기만, "하이드로폰 송신 어레이를 이용한 수중 음향 통신 시스템의 성능 향상," *한국음향학회지*, 21 (7), 606-613, Oct. 2002.
7. O.-H. Lee, Y.-J. Son and K.-M. Kim, "Underwater acoustic communications using channel estimation," *IEEE Oceanic Eng. Conf.*, 3, 2453-2456, Biloxi, Oct. 2002.
8. 윤종락, 백승관, 박지현, 임춘단, "FSK 방식의 수중 데이터 전송 특성 해석," 제4회 해상무기체계 발전 세미나 논문집, 299-303, July 2002.
9. 손근영, 노용주, 윤종락, "수중 데이터 통신 시스템 개발 - 변조 방식의 성능 분석," *한국음향학회 추계학술발표대회 논문집*, 192(s), Nov. 2000.
10. 임용곤, 박종원, 최영철, "Multipath를 고려한 수중영상 전송 시스템 설계," *한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회 논문집*, 4 (1), 419-424, May 2000.
11. D. Rouseff, D. R. Jackson, W. L. J. Fox, C. D. Jones, J. A. Ritcey and D. R. Dowling, "Underwater acoustic communication by passive-phase conjugation: theory and experimental results," *IEEE J. Oceanic Eng.*, 26 (4), 821-830, Oct. 2001.
12. G. Baudoin, F. Virolleau, O. Venard, and P. Jardin, *Teaching DSP through the Practical Case Study of an FSK Modem*, Texas Instruments report, Sept. 1996.
13. R. Alksne, *Rapidly Deployable System Underwater Acoustic Telemetry Trials Report*, DSTO Report, March 2000.

저자 약력

● 이 외 형 (Oe-Hyung Lee)

2001년 2월: 한국해양대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 3월~2003년 2월: 한국해양대학교 전자공학과 (공학석사)
 * 주관심분야: 수중 통신, DSP 및 마이크로프로세서 하드웨어 구현

● 김 기 만 (Ki-Man Kim)

1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1990년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1995년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
 1995년 3월~1996년 8월: 연세대학교 의과대학 의공학교실 (Fellow)
 1996년 9월~현재: 한국해양대학교 전자공학과 부교수
 * 주관심분야: 수중 통신, 소나 신호처리, 3차원 음향제어, 채널 추정, DSP 및 CPLD 구현