

해상실험을 통한 저전력 수중음향통신 기법의 성능 분석

이태진* · †김기만

* 한국해양대학교 대학원, † 한국해양대학교 전파공학과 교수

Performance Analysis of the Underwater Acoustic Communication with Low Power Consumption by Sea Trials

Tae-Jin Lee* · †Ki-Man Kim

*, † Dept. of Radio Communication Eng., Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 이 논문에서는 저전력 통신 기법 가운데 하나인 PSPM(Phase Shift Pulse position Modulation) 전송 기법이 근거리 수중음향 채널에서 어떠한 성능을 나타낼지 고찰하기 위해 해상실험을 통해 분석하였다. PSPM은 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)와 PPM(Pulse Position Modulation) 기법을 서로 혼합한 형태로 WBAN(Wireless Body Area Network) 시스템에서 저전력 통신을 위해 제안된 기법이다. 이는 기존의 일반적인 전송 방식에 비해 대역효율은 떨어지지만 전력효율은 증가하는 것으로 알려져 있다. 이 논문에서는 실험에서 취득한 PSPM 데이터를 통해 BER 성능을 분석한다. 실험 결과 QPSK의 경우 총 56,000개의 전송 데이터 비트 중 오차 비트 수가 3,384개로 BER이 약 6.04×10^{-2} 이고, PSPM의 경우는 19,652개로 BER이 약 3.5×10^{-1} 를 얻었다. 또한 영상 데이터 전송에 따른 PSNR(Peak signal-to-noise ratio)을 비교한 결과 QPSK의 경우 9.37 dB 였으며, PSPM의 경우 9.11 dB 였다.

핵심용어 : 수중음향통신, 저전력 소비, 수중센서네트워크, 근거리 전송, PSPM, PPM, QPSK, 비트오차율, 전력효율

Abstract : In this paper, we analysis to consider the performance of PSPM (Phase Shift Pulse-position Modulation), the one of the low power communication technique, in near-field underwater sound channel by sea trial. PSPM is a QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) modulation combined with PPM(Pulse Position Modulation) for low power communication in WBAN(Wireless Body Area Network). It is known that the bandwidth efficiency of PSPM is lower than conventional PSK but the power efficiency increases. In this paper, we will analyze the BER performance of PSPM using data acquired from the sea trials. The BER of QPSK was 6.04×10^{-2} , PSPM was 3.5×10^{-1} . Also, PSNR of QPSK was 9.37 dB and in case of PSPM was 9.11 dB.

Key words : underwater acoustic communication, low power consumption, underwater sensor network, short range transmission, PSPM(Phase Shift Pulse position Modulation), PPM(Pulse Position Modulation), QPSK(Quadrature Phase Shift Keying), bit error rate, power efficiency

1. 서 론

수중음향통신은 그동안 주로 군사적인 목적을 위해 제한적으로 사용되었으나 최근 해양 탐사나 해저 자원 탐사가 활발해지면서 수중 운동체와 같이 활용 분야가 확대되었다[1]. 수중음향통신은 매질의 특성으로 인하여 전파 대신 음파를 사용해야 하며, 시스템의 성능은 채널의 특성에 의해 크게 좌우된다. 수중음향통신 시스템 설계에는 채널의 특성을 결정하는 해수면, 해저, 수심 등의 시공간 변화에 의한 다중경로 특성이나 도플러 확산, 잡음 및 감쇄 등이 고려되어야 한다. 이러한 수중 채널의 특성 때문에 과거에는 FSK(Frequency Shift Keying) 변조 기법과 같이 비동기식 디지털 변조 기법을 이용하여 수중음향통신 시스템을 구현하였으나 미국 WHOI(Woods

Hole Oceanographic Institution)에서 PSK(Phase Shift Keying) 변조 기법을 적용한 결과를 발표한 이후로 QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 등과 같은 동기식 디지털 변조 기법을 활용한 수중음향통신 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 또한 전송률 증대를 위해 OFDM 기법을 적용하거나 다중경로 특성을 보상하기 위한 SS(Spread Spectrum) 방식에 대한 연구도 이루어지고 있다[3,4]. 최근 수중음향통신 분야에서는 해양 환경 모니터링 및 재해 방지 시스템 구축 차원에서 수중에서 센서 네트워크를 구축하기 위한 연구들이 진행되고 있으며, 특히 수중이라는 운용환경의 특수성으로 인해 저전력 소모를 갖는 통신 기법에 대한 연구가 반드시 필요하다[5].

WBAN(Wireless Body Area Network) 분야에서 저전력 통

† 교신저자 : 연희원, kimkim@hhu.ac.kr 051)410-4423

* 연희원, itsfred@korea.com 051)410-4918

신을 위해 연구된 기법들 가운데 하나인 PSPM 변조 기법은 PPM 기법과 QPSK 변조 기법이 결합된 것으로 기존의 일반적인 디지털 전송 방식에 비해 대역효율은 떨어지지만 전력효율은 증가하는 것으로 알려져 있다[2]. 본 논문에서는 PSPM 변조 기법을 이용하여 수중센서네트워크의 요구사항 가운데 하나인 근거리 저전력 수중음향통신의 적용성 및 성능을 검증하기 위하여 해상실험을 수행하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 수중채널에서의 감쇄, 주변 잡음, 도플러 확산에 대해 언급하고, 다중경로 전달 특성에 대해 분석과 모의 수중채널 모델링에 대해 기술한다. 3장에서는 PSPM 변조 기법과 그 특징을 다루며, 4장에서 시뮬레이션 및 해상실험 결과를 제시한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 수중 채널 특성

수중 채널은 수온, 염도, 기하학적 구조 등에 의하여 영향을 받기 때문에 복잡하며 신뢰성을 유지하기 어려운 통신 환경이다. 수중 채널에서의 경로 손실은 크게 감쇄와 기하학적 확산(geometric spreading)으로 나눌 수 있는데 전자는 주로 음향 에너지가 열에너지로 변화하는 데서 발생하는 것으로 거리와 주파수에 따라 증가한다. 후자는 파면의 퍼짐에 의해 생겨나는 손실이며, 천해의 경우 원통형 확산(Cylindrical spreading)이 대양에서는 구형 확산(Spherical spreading)이 발생한다. 이는 주파수와 독립적으로 거리에 따라 증가한다. 잡음은 크게 인공 잡음(man-made noise)과 주변 잡음(ambient noise)으로 나눌 수 있다. 전자는 주로 펌프 등과 같은 기계류 소음을 나타내는 반면, 후자는 조수간만, 해류, 폭풍, 바람, 지진, 비 등으로 인한 유체역학에 관련된 소음이다. 이는 대역폭, SNR 등을 결정한다. 또한 해면 풍속과 유속의 변화는 시간선택적 페이딩과 도플러 확산을 유발한다[6].

수중 채널의 반사 및 잔향에 의한 다중경로 지연확산은 ISI(Inter-Symbol Interference)와 주파수 선택적 페이딩을 발생시켜 통신 시스템의 성능을 저하시킨다. 이러한 다중경로

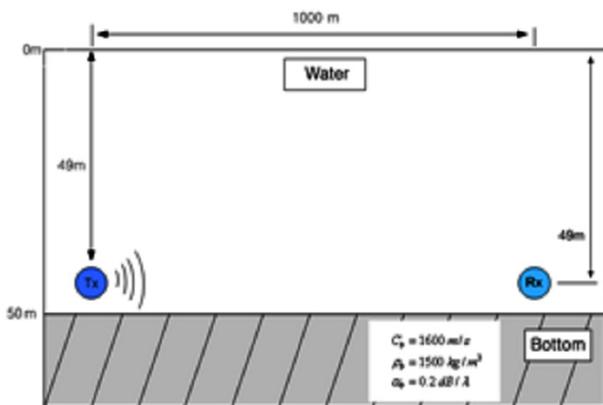


Fig. 1 Source-receiver geometry

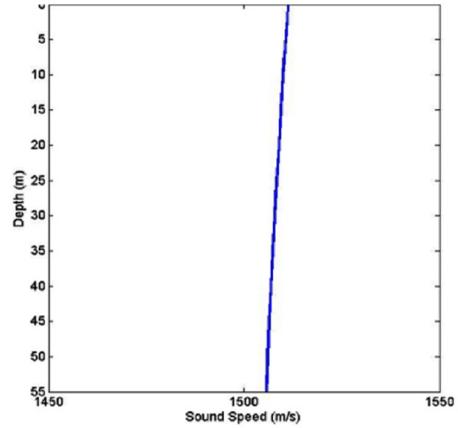


Fig. 2 Measured sound velocity profile

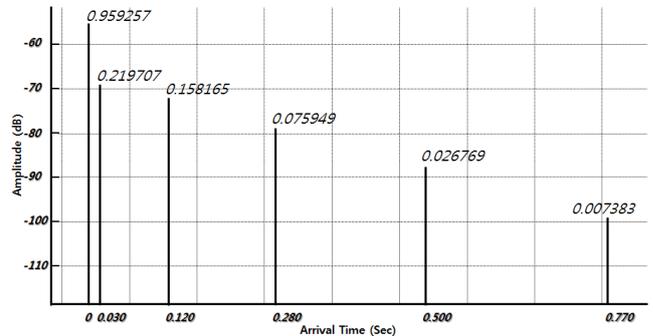


Fig. 3 Example of underwater channel characteristics

지연확산 현상은 다음과 같이 수중 채널을 모델링한 결과에서도 확인할 수 있다. 그림 1은 송신 및 수신기의 배치 구조를 나타낸 것으로 수심 50 m해역에서 송수신기는 모두 수심 49 m에 배치하였고, 거리는 1 km로 가정하였다. 그림 2는 남해 진해 앞바다에서 실제 측정된 음속분포도(sound velocity profile)이며, 이러한 송수신기 배치 구조와 음속분포 데이터를 이용하여 계산한 수중 채널 특성이 그림 3이다. 이 그림으로부터 직접파뿐만 아니라 다중경로 지연확산에 따라 다양한 시간대에 도달되는 간접파들을 확인할 수 있다.

3. PSPM 변조 기법

PSPM 변조 방식은 신호의 주기(T)를 4로 나누어 $T/4$ 주기로 심볼을 배치하고 나머지 $3T/4$ 의 주기에는 0을 전송한다. 결국 한 신호주기에서 심볼이 차지하는 비율이 줄어들어 송신신호전력이 감소한다. 여기서 PSPM은 처음 2비트를 이용하여 심볼 위치를 결정하며, 신호 구간에는 QPSK 변조된 신호를 삽입하여 결국 전체적으로는 4비트가 하나의 심볼을 구성하게 된다. 동일하게 4비트를 이용하여 신호를 전송하는 16-PSK와 비교하면 PSPM의 심볼간 거리는 $2\sqrt{E_s} \sin(\pi/4)$ 인 것에 비해, 16-PSK는 $2\sqrt{E_s} \sin(\pi/16)$ 되는 것을 알 수 있다[7]. 여기서 E_s 는 신호 에너지이며, 그림 4에 16-PSK와

PSPM의 정상도를 나타내었다.

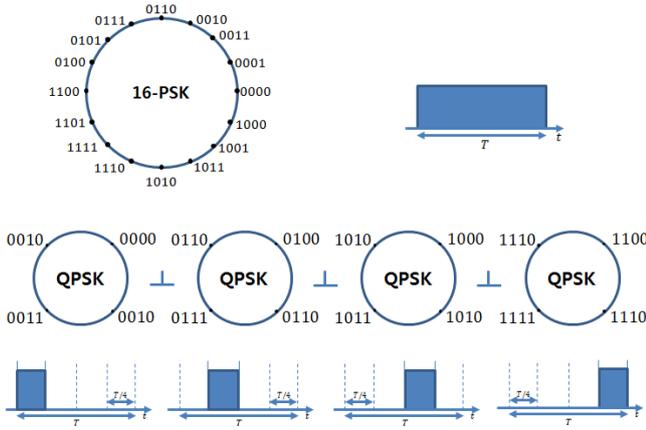


Fig. 4. Comparison of 16-PSK and PSPM constellation

PSPM 신호는 다음과 같이 정의된다.

$$s_m(t) = \sum_{n=0}^3 A_{m,n} \alpha(t-nT/4) \exp[j(2\pi f_c t + \theta_m)] \quad (0 \leq t \leq T) \quad (1)$$

$$A_{m,n} = \begin{cases} 1, & n < \text{floor}(4m/M) < n+1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\alpha_n(t) = u[t - 0.25(n-1)T] - u[t - 0.25nT], \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

$\alpha_n(t)$ 는 스텝 함수로서 반송파를 심볼 위치에 맞춰주고, 이 값에 의해 반송파는 정보신호와 동일하게 1/4주기 동안에는 $[\cos 2\pi f_c t - j \sin 2\pi f_c t]$ 를, 3/4주기 동안에는 0을 전송한다.

$$s_m(t) = \sum_{n=0}^3 A_{m,n} \alpha(t-nT/4) (\cos 2\pi f_c t - j \sin 2\pi f_c t) \quad (4)$$

송신신호 $s_m(t)$ 는 위상 변조된 신호와 심볼의 위치정보를 가지고 있는 신호의 곱으로서 전송되며 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 이렇게 송신되는 PSPM 신호의 대역효율은 PSK의 1/4에 해당한다. PSPM 수신기는 그림 5와 같으며, 먼저 수신 신호 Q_n 의 신호전력을 비교하여 심볼의 위치를 파악하게 된다.

$$\max(|Q_n|^2) = \begin{cases} Q_1 \Rightarrow a_1 = 0, a_2 = 0, P_m = r_1 + jr_2 \\ Q_2 \Rightarrow a_1 = 0, a_2 = 1, P_m = r_3 + jr_4 \\ Q_3 \Rightarrow a_1 = 1, a_2 = 0, P_m = r_5 + jr_6 \\ Q_4 \Rightarrow a_1 = 1, a_2 = 1, P_m = r_7 + jr_8 \end{cases} \quad (5)$$

식 (5)에서와 같이 Q_n 의 신호전력을 비교하여 얻은 2비트의 정보와, P_m 의 PSK 복조 정보를 합하여 PSPM 신호를 복조하게 된다.

PSPM 변조 기법은 한 심볼 주기에 $T/4$ 주기 동안만 신호를 전송하기 때문에 전송신호의 전력을 6 dB 감소시키는 효과를 갖는다. 그림 6은 QPSK 변조 신호와 PSPM 변조 신호

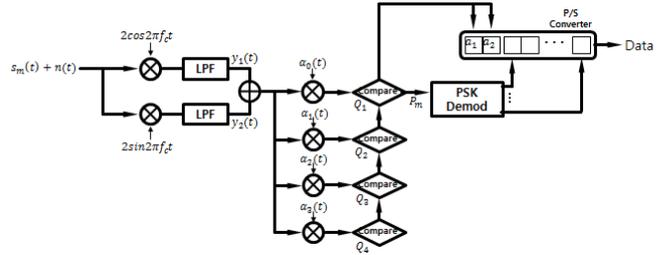


Fig. 5. PSPM Receiver

의 전력 스펙트럼을 비교한 그림으로 PSPM 변조 기법의 전력 스펙트럼이 QPSK 변조 기법에 비해 약 6 dB 이상 낮은 것을 확인할 수 있다. 또한 PSPM 변조에서는 0을 전송하는 무음 주기로 인해 위상이 갑작스럽게 180° 변화할 확률이 QPSK에 비해 매우 낮다. 이러한 특징으로 인해 Back-off이득이 발생한다[8-10].

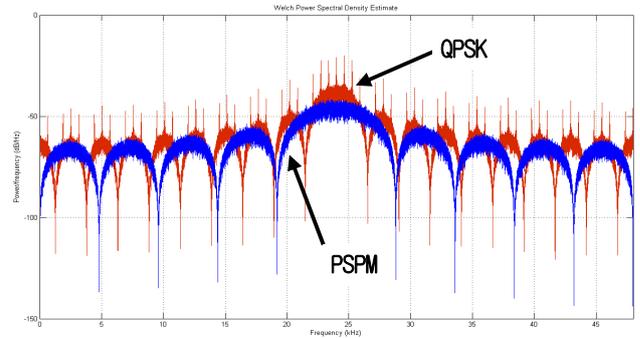


Fig. 6. Comparison of QPSK and PSPM power spectrum

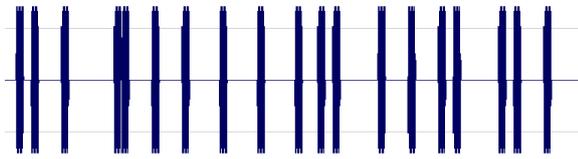
4. 시뮬레이션 및 해상실험 결과

PSPM 변조 방식을 수중음향통신에 적용하였을 때의 성능을 확인하기 위하여 시뮬레이션과 근거리 영역에서 실제 해상 실험을 수행하였다.

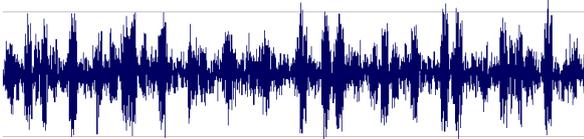
4.1 시뮬레이션

해상실험에 앞서서 수중 채널 전달 모델링으로부터 얻어진 그림 3과 같은 임펄스 응답을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용한 전송 데이터는 100×70 크기를 갖는 그레이 이미지로 각 픽셀은 8 비트로 양자화 되어 총 56,000 비트이다. 시뮬레이션 기본 파라미터는 반송파 24 kHz, 샘플링 속도 192 kHz, 그리고 전송율은 3 kbps로 설정하였다. 그림 7에는 송신 및 수신 신호 파형을 나타내었으며, 그림 8에는 복조된 결과를 나타내었다. 성능 비교를 위해 동일한 채널 임펄스 응답으로 QPSK와 PSPM 방식에 대해 시뮬레이션을 수행하였으며, 채널 코딩이나 등화기(equalizer)와 같은 기법들은 적용하지 않았다. 또한 수신단에서 반송파 주파수와 위상 및 시간 동기는 정확히 알고 있다고 가정하였다. 시뮬레이션 결과 QPSK의 오차비트수는 총 56,000개

의 데이터 중 6,479개로 BER (Bit Error Rate)이 약 1.17×10^{-1} 이었으며, PSPM의 오차비트수는 6,869개로 약 1.22×10^{-1} 로 유사한 성능을 나타내는 것을 확인하였다.



(a) Transmit Signal of PSPM



(b) Received Signal of PSPM

Fig. 7. Comparison of transmit and receive signal



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. (a) source image, (b) QPSK result, (c) PSPM result

4.2 해상실험

실제 수중에서 PSPM 변조 기법의 적용성 및 성능을 검증하기 위하여 해상실험을 수행하였다. 그림 9는 실험 주변 해



Fig. 9. Experimental view

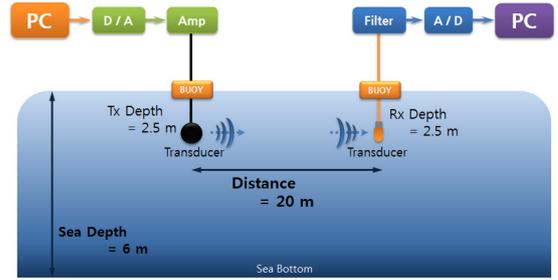


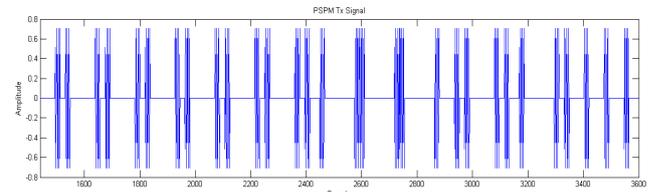
Fig. 10. Experimental setup

Table 1. Experimental parameters

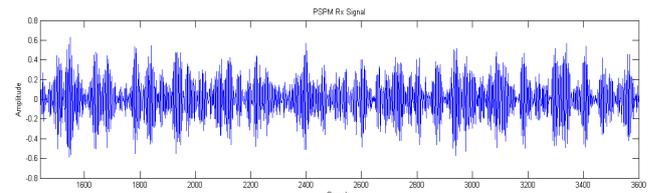
송신기	ITC-1001
수신기	B&K-8103
전송속도	5 kbps
전송데이터	100×70 grayscale image (56,000 bit)
반송파	16 (kHz)
샘플링	96 (kHz)

역 사진이며, 채널 환경은 그림 10과 같이 수심 6 m, 송·수신기는 수면으로부터 2.5 m, 그리고 송·수신기 사이의 거리는 20 m로 하였다. 실험 시 주변에 두 척의 배가 존재하였고, 근처에 매립공사로 인한 소음이 있었다. 실험 파라미터는 Table 1과 같다.

실험에서 수신 신호의 패킷 동기화를 위해 송신신호의 시작 부분에 pseudo random sequence로 구성된 Preamble Block을 삽입하였다. 디지털-아날로그 신호 변환을 거친 신호는 전력 증폭기(B&K 2713)를 통해 증폭되어 송신 센서를 통해 전송된다. 수신부에서는 대역을 제한하기 위해 아날로그 필터를 거친 다음, 아날로그-디지털 변환을 통해 PC로 데이터를 저장하였다. 수신 신호의 검출 및 동기는 Preamble Block의 자기



(a) Transmit Signal of PSPM



(b) Received Signal of PSPM

Fig. 11. Comparison of Tx and Rx signal.

상관 특성을 이용하여 수행하였다. 그림 11은 PSPM 변조 기법의 송신·수신 신호 파형으로, 수중 채널의 영향으로 인해 데이터 신호 구간의 왜곡뿐만 아니라 무음 구간에 다중경로로 인한 이전 신호의 간섭 및 수중 채널의 배경잡음의 영향으로 인해 신호가 크게 왜곡되는 것을 확인할 수 있다.

실험에 사용된 원본 영상은 시뮬레이션에서 사용한 것과 같으며 그림 12는 QPSK, 그림 13은 PSPM을 전송속도 5 kbps 일 때의 실험 결과 그림이다. 이때 송·수신기가 비교적 근거리이고, 고정되어 있었음을 감안하여 반송파 주파수 오프셋 복원, 시간동기화 및 채널 추정에는 적용하지 않았다. 실험 결과 QPSK의 오차비트수의 경우 총 56,000개의 데이터 비트 중 3,384개로 BER이 약 6.04×10^{-2} 이고, PSPM의 총 오차비트수는 19,652개로 BER이 약 3.5×10^{-1} 인 결과를 얻었다. 참고 문헌 [2]의 결과와 달리 PSPM이 QPSK에 비해 상대적으로 높은 오차를 나타낸 이유는 참고문헌에서 시뮬레이션한 단순한 AWGN 채널환경이 아닌 실제 수중통신채널이 가지는 멀티패스에 의한 채널 왜곡이 PSPM이 가진 PPM의 성능을 저하시켰기 때문으로 보인다.



Fig. 12. QPSK demodulation image

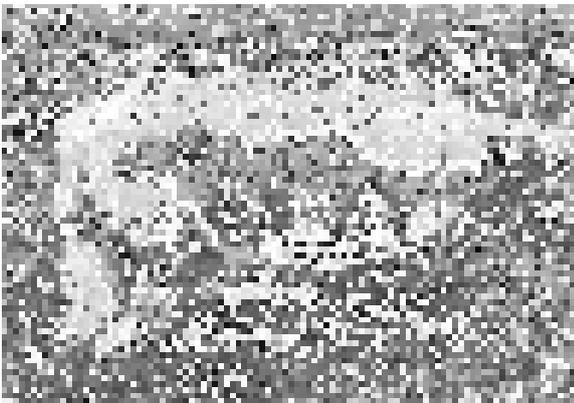


Fig. 13. PSPM demodulation image

데이터 전송 품질을 눈으로 쉽게 확인하기 위해 영상 데이터를 사용하였으며, 일반적으로 영상의 품질을 평가하기 위해 PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)을 이용한다. PSNR의 경우

평균전력을 취하지 않고 최대 전력을 이용하는데 식 (6)과 같이 표현 될 수 있다. 이 식에서 분모항은 두 영상 데이터에 대해 동일한 위치에서의 분산으로 평균제곱오차(Mean Square Error : MSE)를 의미하며, 분자는 원본영상 신호의 전력의 자승을 의미한다.

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{Max_I^2}{MSE} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{Max_I}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (6)$$

PSNR을 비교한 결과 QPSK의 경우 9.37 dB이며, PSPM의 경우 9.11 dB 였다.

5. 결 론

본 논문에서는 근거리 저전력 통신을 위해 PSPM 변조 기법에 대하여 연구하였다. PSPM 변조는 WBAN 분야에서 연구된 것으로 기존의 일반적인 변조 기법에 비해 향상된 전력 효율을 갖는다. 이 방식을 수중음향통신에 적용하기 위하여 송·수신단이 근거리인 영역에서 해상실험을 수행한 결과 전력 효율적인 측면에서 PSPM 통신기법은 기존 PSK보다 약 6 dB의 효율적인 성능을 나타낸다. 그러나 PSPM은 심볼 주기가 $T/4$ 로 짧아졌을 뿐 아니라 ASK에 취약한 수중 채널 특성으로 인해 PSPM 복조 시 PPM으로 인한 위치 정보를 정확하게 잡아내기 어렵고, 이로 인해 PSK 정보까지 손실을 입어 QPSK 보다 상대적으로 성능이 낮게 나왔지만 비교적 근거리에서 저속 전송률이 가능한 분야에서는 적용이 가능할 것으로 판단된다.

향후 연구 내용으로는 PSPM의 성능이 PPM의 성능에 크게 영향을 받는 점이 확인되었으므로 수중 채널에서 PPM의 성능을 높이기 위해 등화기를 적용하는 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다. 이와 함께 통신거리의 증가 및 전송속도 증가에 대한 방법도 연구가 되어야 할 것이다.

후 기

이 논문은 방위사업청과 국방과학연구소의 지원(계약번호 UD100002KD) 및 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 (NIPA-2011-C1090-1021-0001) 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 이승건, 손경호, 이상의, 황성준, 서정호 (2005), “만타형 수중운동체의 사항시험에 관한 연구,” 한국항해항만학회지 29권 8호, pp.679-684.
- [2] 최재훈, 손종원, 유홍균(2010), “전력 효율을 개선하는 새로

- 운 PSPM 변조 방식,” 한국통신학회논문지 35권 8호, pp. 150~156.
- [3] 한정우, 손윤준, 김기만(2010), “수중에서 OFDM 변조를 이용한 음향 통신의 성능 분석,” 한국항해항만학회지 34권 10호, pp. 150~156.
- [4] Kim D.K. and Lee H.S. (2009), “Phase-silence-shift-keying for power-efficient modulator,” *IEICE Trans. Communications*, E92-B, pp.2324-2326.
- [5] Oh J. Y., Kim J. H., Lee H. S., and Kim J. Y. (2010), “PSSK modulation scheme for high-data rate implantable medical device,” *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 13, pp. 150~156.
- [6] Proakis, J. G., *Digital Communications*, 4th ed. Boston, MA: McGraw-Hill, 2001.
- [7] Raich, R. and Zhou, G. T. (2001), “Analyzing spectral regrowth of QPSK and OQPSK signals,” in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process., vol. 4, May 2001, pp. 2673 - 2676.
- [8] Scoatelan, S., Glavieux, A.(1995), “Design and test of a coding OFDM system on the shallow water acoustic channel,” *OCEANS'95. MTS/IEEE Challenges of Our Changing Global Environment Conference Proceedings*, Vol.3, pp.2065-2070, Oct.
- [9] Suzuki M. and Sasaki T. (1992), “Digital acoustic image transmission system for deep sea research submersible,” *IEEE Oceanic Eng. Conf.*, pp.567-570, Newport, Oct.
- [10] Ziemmer, E. Rodger, Tranter, H. William, *Principles of Communications (Systems, Modulation, and Noise)* 5th Ed, John Wiley & Sons, 2001.

원고접수일 : 2011년 08월 11일
심사완료일 : 2011년 11월 29일
원고채택일 : 2011년 11월 30일