

저전력 수중음향통신을 위한 등화기에 관한 연구

*이태진 · 김기만†

* 한국해양대학교 대학원, † 한국해양대학교 전파공학과 교수

A Study on the Equalization for Low Power Underwater Acoustic Communication

*Tae-Jin Lee · Ki-Man Kim†

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

요 약 : 이 논문에서는 저전력 수중음향통신을 위해 PSSK(Phase Silence Shift Keying) 기법이 적용되었을 때 심볼 간 간섭을 최소화하기 위한 등화기를 제안하였다. PSSK 방식은 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 변조와 PPM(Pulse Position Modulation) 기법이 서로 혼합된 형태이며, 저전력 통신을 위해 제안된 기법이다. 하지만 이는 수중 채널의 지연 확산 특성으로 인해 성능이 저하되는 문제점을 갖고 있다. 이에 이 논문에서는 PSSK 수신단에서 오차를 최소화하기 위한 결정 궤환 등화기를 제안하였으며, 제안한 방법의 성능을 입증하기 위해 해상시험을 수행하였다. 실험 결과 등화기를 적용하지 않은 PSSK 전송의 경우는 오차율이 4.36×10^{-2} 이었지만, 제안한 등화기를 적용한 경우 8.95×10^{-4} 으로 나타났다.

핵심용어 : 수중음향통신, 저전력 소비, PSSK, PPM, QPSK, 비트오차율, 전력효율, 등화기

Abstract : In this paper, we propose an equalizer to minimize the inter-symbol interference when PSSK(Phase Silence Shift Keying) technique is applied to the low power underwater acoustic communication. PSSK is a QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) modulation combined with PPM(Pulse Position Modulation), and it was proposed for low power communication. However, it has poor performance due to delay spread of underwater channel. In this paper, we propose a decision feedback equalizer to minimize the error in PSSK receiver. The sea trial was performed to evaluate the performance of the proposed method. In the result, the BER of PSSK was 4.36×10^{-2} before the equalizer was applied, but the BER of PSSK was 8.95×10^{-4} after the proposed equalizer was applied.

Key words : underwater acoustic communication, low power consumption, PSSK(Phase Silence Shift Keying), PPM(Pulse Position Modulation), QPSK(Quadrature Phase Shift Keying), bit error rate, power efficiency, equalizer

1. 서 론

수중음향통신에 대한 연구 및 개발은 주로 해양 자원 채취, 심해 파이프 제어, 수중 이동체 제어 등을 위한 방법에 대해 이루어져 왔다[1,2]. 또한 해양 환경 모니터링, 재해 방지 시스템 구축, 군사적 감시 등의 용도를 위해 무선 수중 센서네트워크에 대한 관심이 증가하고 있지만 대부분의 연구는 고가의 고풍력 수중 모뎀을 활용한 방법들이어서 실제 수중이라는 운용 환경의 특수성은 고려되지 않은 실정이다. 수중에 모뎀을 설치한 경우 외부 전원을 사용하기 어려워 자체적인 전지로만 동작시켜야 하며, 수시로 전지를 교체하기도 어려운 환경이다. 이로 인해 저전력 소모를 갖는 통신 기법에 대한 연구가 반드시 필요하다. PSSK(Phase Silence Shift Keying)나 PPSM(Phase Shift Pulse position Modulation)과 같은 저전력 소모를 나타내는 통신 기법에 대한 연구가 일부 이루어져 왔다[3,4,5]. 하지만 실질적인 성능은 채널의 특성을 결정하는 해수면, 해저, 수심 등의

시공간 변화에 의한 다중경로 전달 특성이나 도플러 확산, 잡음 및 감쇄 등에 따라 큰 영향을 받는다[6,7]. 이 가운데 천해에서 가장 큰 영향을 미치는 다중경로 전달 특성은 인접 심볼 간 간섭을 일으켜 성능을 크게 저하시킨다.

일반적으로 디지털 통신에서 다중경로 전달 특성으로 인한 인접 심볼 간 간섭을 최소화하기 위해 적용되는 방법은 등화기이다. 그동안 다양한 등화기들이 연구되었고, 그 가운데 대표적인 것들로 Zero Forcing 등화기, 선형 등화기 및 결정 궤환 등화기 등이 있다[8,9,10]. 하지만 저전력 소모를 갖는 전송 기법을 위한 등화기에 대한 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 논문에서는 PSSK와 같은 저전력 전송 기법을 위한 등화기를 제안하고, 해상실험을 통해 성능을 분석하였다. 제안한 방법은 PSSK가 PPM(Pulse Position Modulation)이 포함된 방법이라는 점에 착안하여 PPM을 위한 결정 궤환 등화기를 PSSK 신호 복원에 적용하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 PSSK 전송 기

* 연회원, itsfred@korea.com 051)410-4918

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

법과 그 특징을 다루며, 3장에서는 PSSK를 위한 등화기를 제안한다. 4장에서 해상실험 결과를 제시하고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. PSSK 전송 기법

PSSK 전송 방식은 기존 PSK 변조 방식의 한 종류로 볼 수 있으며, PSK의 대역 효율적 측면과 PPM 및 OOK(On-Off Keying) 변조 방식의 전력 효율적인 면을 모두 고려한 방식이다. PSSK는 PSK 신호의 주기를 심벌 주기와 silence 주기로 나누어 신호의 전력을 감소시켜 전력 효율을 높인다. 또한, PSK의 신호 주기를 나누는 만큼 변조 레벨을 낮출 수 있기 때문에 PSK에 비하여 SNR(Signal-to-Noise Ratio) 성능을 향상시킬 수 있다. PSSK 변조 방식은 PSK 신호를 2개의 직교 심벌로 전송하는 방식이다. 예를 들어 8-PSK는 하나의 심벌에 위상을 이용하여 전송하지만 8-PSSK는 2개의 4-PSK를 직교하여 전송하는 방식을 이용한다. 이처럼 PSSK는 첫 번째 비트 정보를 이용하여 반주기 신호 2개로 나뉘며 $(\log_2 M) - 1$ 비트의 PSK 신호를 전송한다.

그림 1은 PSSK의 심벌 주기를 나타낸 것이다. T의 심벌 주기를 1/2로 나누고 첫 번째 비트 정보를 이용하여 심벌의 위치를 결정한다. 심벌의 주기가 silence 구간으로 인해 대역폭이 2배로 증가하지만, M-ary PSK를 M/2-ary PSK 2개로 나누기 때문에 심벌간의 해밍 거리가 확보되며 이 때문에 생기는 silence 주기로 인해 신호 전력을 3 dB 감소시킬 수 있다. 또한 silence 주기는 갑작스럽게 위상이 180°로 변화하는 것을 방지해 줌으로써 back-off 이득 성능도 향상된다.

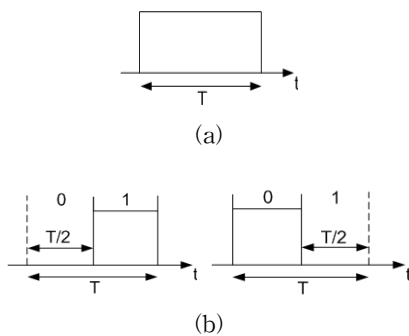


Fig. 1. Signal duration, (a) PSK, (b) PSSK.

PSSK 신호로의 변환은 그림 2 (a)와 같이 랜덤 데이터를 S/P(직렬-병렬) 변환기를 이용하여 $\log_2 M$ 의 열로 정렬 시킨 후 첫 번째 비트를 이용하여 심벌의 위치를 결정한다. 송신 신호는 PSK 변조된 신호와 심벌의 위치 정보를 가지고 있는 신호의 곱으로써 전송된다. 이렇게 송신되는 신호의 대역 효율은 $0.25 \log_2 M$ ($M \geq 4$)가 된다. PSSK 대역 효율은 PSK의 1/2이며, 이것은 심벌의 주기를 T/2로 감소하였기 때문이다.

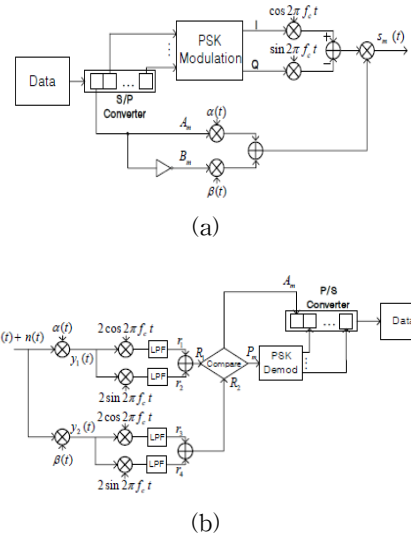


Fig. 2. PSSK transceiver, (a) transmitter, (b) receiver.

3. PSSK 전송을 위한 등화기

디지털통신 신호가 수중에서 다중경로로 전달되는 특징 중 하나는 인접 심벌 간 간섭으로 인하여 신호의 왜곡을 유발하는 것이다. 이때 수중 채널은 시간에 따라 변화되는데, 이러한 이유로 최근 수중통신에서는 수중채널 특성을 추적할 수 있는 적응형 알고리즘이 요구되고 있다.

앞에서 언급하였듯이, PSSK 전송은 PPM 기법의 특성을 가지고 있기 때문에 지연 확산으로 인한 오류에 취약점이 존재한다. 즉, 심벌이 존재하는 위치를 결정하는데 오차가 발생할 수 있으며, 이는 결과적으로 PSSK 전송의 오차 확률을 증가시켜 성능의 저하로 이어진다. 이러한 문제를 개선하고자 본 논문에서는 PSSK 전송을 위한 결정 궤환 등화기를 제안하였고, 이 등화기에는 시변 채널 특성을 고려하여 LMS(Least Mean Square) 기반의 적응형 알고리즘이 적용되었다. 이 등화기는 기존의 등화기와 역할이 같으나, PPM 변조기법에 적용하기 위해 다른 구조를 갖는다. 본 등화기의 구조와 PSSK 수신기 블록 다이어그램을 그림 3과 4에 나타내었다. 그림 3의 등화기 모델은 그림 4의 점선 부분이다.

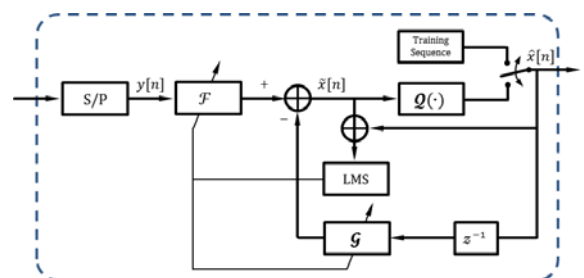


Fig 3. Equalizer system model

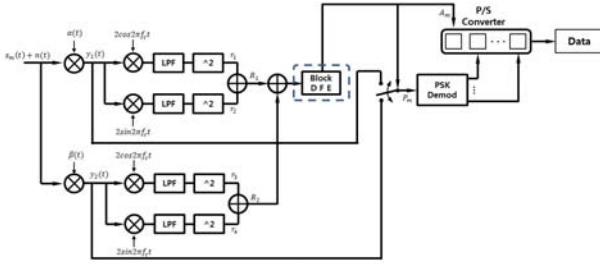


Fig 4. PSSK receiver structure

송신 심볼 $x[n]$ 은 채널을 통해 순차적으로 전송된다. $t = 0$ 일 때 $\alpha(t) = 1$ 이며, $t = kT/2$ 일 때 $\alpha = 0$ 이며 $\beta(t) = \alpha(t - 0.5T)$ 로서 $\alpha(t)$ 가 반주기만큼 지연된 함수이다. $y[n]$ 은 수신된 심볼 벡터이며, 시간 항 n 은 t 의 discrete-time version이다. 여기서 등화기는 심볼 단위로 값이 입력된다. 수신된 신호는 순방향 필터 F 와 역방향 필터 g 를 통과한다. 따라서 결정기(decision device)의 입력은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\tilde{x}[n] = F^T y[n] - g^T \tilde{x}[n-1] \quad (1)$$

$\tilde{x}[n]$ 은 추정된 심볼이 누적된 벡터이며, 위첨자 T 는 행렬의 transpose이다. 그림 3에서 $Q(\cdot)$ 으로 나타낸 것은 비선형 결정기이다. 이 결정의 출력은 다음 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\hat{x}[n] = Q(\tilde{x}[n]) \quad (2)$$

여기서 $Q(\cdot)$ 는 Minimum Euclidean distance detector로서 다음으로 정의된다.

$$Q(\tilde{x}[n]) = e_i \quad (3)$$

여기서 e_i 는 $\tilde{x}[n]$ 벡터열에서 가장 큰 값을 갖는 항을 가리킨다. 등화기의 계수를 결정하기 위해 LMS 기법을 사용하였으며, F 와 g 는 다음과 같은 LMS 수식으로 반복 결정된다.

$$\begin{aligned} \epsilon[n] &= \tilde{x}[n] - x[n - \Delta] \\ F[n+1] &= F[n] - \mu_1 \tilde{y}[n] \epsilon[n] \\ g[n+1] &= g[n] - \mu_2 \tilde{x}[n-1] \epsilon[n] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\epsilon[n]$ 은 이전 값과의 오차이며 μ_1 과 μ_2 는 수렴 속도를 결정하는 가중치로서, μ_1 은 순방향 필터의 수렴 속도를, μ_2 는 역방향 필터의 수렴 속도에 영향을 미친다. 이 가중치 값은 너무 작은 경우 혼련 신호열 구간 동안 등화기의 계수가 충분히 수렴되지 못한채로 다음 모드로 넘어가게 된다. 그러나 가중치의 값이 클 경우 등화기의 계수가 수렴하지 못하고 발산하며 전혀 다른 값으로 결정되어 오차가 증가하며 더욱이 결정 역방향 등화기의 특성상 그 오차가 전파되어 오차확률이 지속적으로 증가한다. 그러므로 가중치의 값은 채널 환경에 따라 적절한 선택해야 한다. Δ 는 채널과 등화기의 심볼 지연 간격을 의미한다. 등화기는 혼련모드(training mode)와 적응 모드(adaptive mode)로 나뉘며, 혼련모드일 때 계수는 MLS (Maximal Length Sequence)로 이루어진 PN(Pseudo Noise) 코드를 사용하여 갱신된다.

4. 해상 실험 결과

제안된 PSSK 전송을 위한 등화기의 성능을 확인하기 위하여 근거리 영역에서 실제 해상실험을 수행하였다. 데이터 패킷은 400 심볼을 가지는 텍스트 데이터이며, 각 패킷을 3번 연속으로 반복하여 송신하였다. 수신 신호의 패킷 동기화를 위해 송신 신호의 시작 부분에 pseudo random sequence로 구성된 120bit의 프리앰블(preamble)을 삽입하였으며, 이를 그림 5에 나타내었다. 전송속도는 120 bps의 저속 전송이다. 이는 Delay spread가 넓은 수중 통신 환경에서 QPSK에 비해 심볼의 길이가 절반인 PSSK가 고속으로 전송할 수록 ISI의 영향에 크게 민감해져 성능비교가 어려워지는 단점이 있기 때문이다.

채널 환경은 그림 6과 같이 실험 해역의 수심은 6 m, 송·수신기는 수면으로부터 2.5 m에 위치하였으며, 송·수신기 사이의 거리는 30 m로 하였다. 실험 시 주변에 두 척의 배가 존재하였고, 근처에 매립공사로 인한 소음이 있었다. 기타 실험 파라메타는 Table 1과 같다. 디지털-아날로그 신호 변환을 거친 신호는 전력 증폭기를 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 프리앰블의 자기상관 특성을 이용하여 수행하였다.

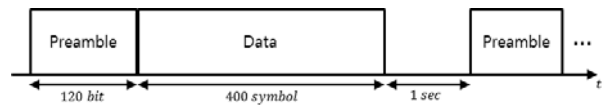
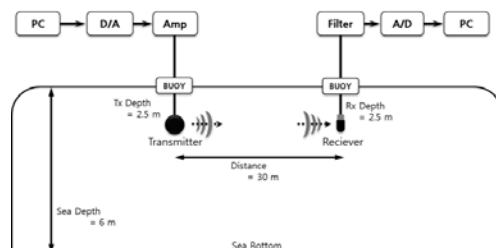


Fig 5. Packet frame



(a)



(b)

Fig 6. Experimental environment, (a) Experimental view, (b) Experimental geometry

Table 1. Experimental parameters

송신기	ITC-1001
수신기	B&K-8103
전송속도	120 bps
반송파 주파수	16 (kHz)
샘플링 주파수	96 (kHz)

송·수신기가 비교적 근거리이고, 고정되어 있었음을 감안하여 반송파 주파수 오프셋 복원, 시간동기화 및 채널 추정은 적용하지 않았다. 그림 7에는 해상실험에서 수신된 PSSK 신호의 정상도와 제안한 등화기를 거친 후 및 비교를 위해 등화기를 거친 QPSK 기법의 정상도를 나타내었다.

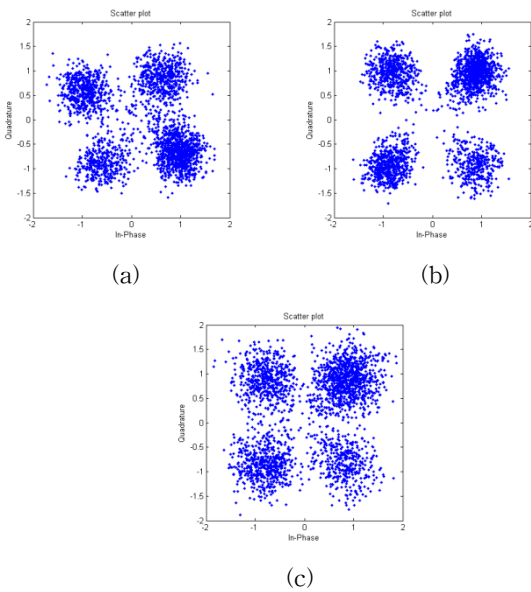


Fig. 7. Constellations, (a) before equalization for PSSK, (b) after equalization for PSSK, (c) after equalization for QPSK.

실험 결과 등화기를 적용하지 않은 PSSK 전송의 경우는 오차율이 약 4.36×10^{-2} 이었지만, 제안한 등화기를 적용한 경우 8.95×10^{-4} 으로 나타나 거의 1/50 정도로 감소하였다. 등화기가 적용된 QPSK 전송 결과가 7.35×10^{-4} 로 나타난 것을 감안하면 PSSK 전송 성능이 QPSK 전송과 오차율 측면에서 유사하게 나타났다. 즉, 오차 성능은 유사하면서 전력 효율은 PSSK 전송이 QPSK 전송보다 우수하다.

5. 결론

본 논문에서는 기존에 근거리 저전력 통신을 위해 제안된 PSSK 전송 기법의 성능을 향상시키기 위한 등화기를 제안하였다. PSSK 전송은 기존의 일반적인 변조 기법에 비해 향상된 전력효율을 갖지만 다중경로 전달 현상이 심한 경우 성능이 크

게 저하되어 인접 심볼 간 간섭현상이 크게 발생한다. 이를 보상하기 위해 본 논문에서는 PSSK 방식을 위한 결정 궤환 등화기를 제안하였다. PPM용 등화기는 기존의 QPSK에 적용되는 등화기와는 구조적으로 다른 형태를 가지지만 알고리즘을 통해 채널을 추정하고 ISI를 감소시킨다는 측면에서 거의 동일하다. 그러나 PSSK의 특성상 심볼의 절반만을 이용하여 전송하면서 다음 심볼에 미칠 ISI의 영향이 줄어들 뿐 만아니라 저전력 측면에서도 이득을 갖게된다. 해상실험 결과 등화기를 적용하기 전에 비해 적용한 후의 비트 오차율이 크게 감소한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 비교적 근거리에서 저속 전송률이 가능한 분야에서 PSSK 전송의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 향후 연구 내용으로는 저전력 수중 통신을 위한 Sparse 등화기로 계산량을 감소시키고자 한다.

후 기

본 연구는 2012년도 한국해양대학교 연구강화지원사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 선희갑, 박영준, 김영길 (2011), “특성화된 수중음향통신모뎀을 위한 신호처리 모듈 구현,” 한국해양정보통신학회 논문지 15권 4호, pp.810-816.
- [2] 이승진, 손경호, 이상의, 황성준, 서정호 (2005), “만타형 수중운동체의 사향시험에 관한 연구,” 한국항해항만학회지 29권 8호, pp.679-684.
- [3] 최재훈, 손종원, 유홍균 (2010), “전력 효율을 개선하는 새로운 PSPM 변조 방식,” 한국통신학회논문지 35권 8호, pp. 150-156.
- [4] Belfiore C.A. and Park J.H. (1979), “Decision feedback equalization,” *Proc. of IEEE*, vol.67, no.8, pp.1143-1156.
- [5] Falahati A., Woodward B., and Bateman S.C. (1991), “Underwater acoustic channel models for 4800 b/s QPSK signals,” *IEEE Journal Oceanic Eng.*, vol.16, no.1, pp.12-20.
- [6] Kim D.K. and Lee H.S. (2009), “Phase-silence-shift-keying for power-efficient modulator,” *IEICE Trans. Communications*, E92-B, pp.2324-2326.
- [7] Loubet G. and Faure B. (1999), “Characterization of the underwater channel for acoustic communications,” *J. Acoust. Soc. Am* Volume 105, Issue 2, pp.1364-1364.
- [8] 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.
- [9] Proakis J. G., *Digital Communications*, 4th ed. Boston, MA: McGraw-Hill, 2001.

- [10] Ziemmer Rodger E., Tranter William H., Principles of Communications (Systems, Modulation, and Noise) 5th Ed, John Wiley & Sons, 2001.

원고접수일 : 2011년 9월 7일
심사완료일 : 2012년 3월 30일
원고채택일 : 2012년 4월 3일