

논문 2016-53-7-17

# 이론적 수중음향 채널모델에서 QPSK 변조의 성능분석

## ( Analysis of QPSK Performance over a Theoretical Underwater Acoustic Channel )

강 희 훈\*, 임 요 응\*\*

( Heehoon Kang<sup>Ⓒ</sup> and Yo-woong Im )

### 요 약

본 논문에서는 수중 음향 채널 모델에서 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 모델의 성능을 분석한다. 수중음향채널의 배경잡음과 다양한 환경 파라미터는 수중모뎀의 비트오류율(BER:Bit Error Rate) 성능을 저하시키는 원인이다. 본 논문에서는 이론적인 수중채널모델에서 비부호화된 QPSK와 부호율 2/3의 길쌈부호기를 사용한 부호화된 QPSK의 BER 성능을 분석한다. 수중 음향 통신 시스템의 성능을 개선하기 위해서 파일럿 심볼 기반의 채널 등화 방식을 적용하였다.

### Abstract

In this paper, we analyze a QPSK MODEM over underwater acoustic channel model. Ambient noises and parameters of underwater environments debase the BER performance of an underwater modem. In the paper, the BER performance of uncoded QPSK and rate-2/3 convolutional coded QPSK is analyzed. And To improve BER Performance, we apply a channel equalization technique to the underwater modem.

**Keywords :** MODEM(MODulator/DEModulator), UWAC(UnderWater Acoustic Channel), QPSK(Quadrature Phase Shift Keying), Channel Equalization, Convolutional Code

## I. 서 론

수중 음향 통신 시스템은 해저 탐사부터 해난 사고 등의 다양한 분야에 필요한 요소이다. 수중 통신 시스템에서 요구하는 전송률은 항해 정보 및 수중 장비 상태의 명령과 제어용으로는 100~1,000[bps], 수중 청음기 및 지진계의 정보 전송용으로는 1~10[kbps], 수중 영상 정보의 전송용으로는 10~100[kbps]를 요구한다.<sup>[1]</sup>

수중 음향 채널은 배경잡음이 높고, 8000[m] 이하의 얇은 수심은 심해에 비해 상대적으로 다중 경로가 많아 고속 전송에 어려움을 야기한다. 따라서 수중 영상 정

보 전송 시스템에서는 다중경로의 영향으로 전송신호의 대역폭이 커서 BER 성능을 저하시킨다.

수중 음향 채널의 다중 경로 전파는 해수면과 해저면에서 반사되는 각 경로가 서로 다른 지연 시간으로 수신기에 도달하게 되어 송신 신호 대역폭 내에서 인접 심벌 간의 간섭을 야기하는 주요 원인이다. 이러한 다중 경로가 미치는 영향의 크기는 해면과 해저 경계면의 음향 물성이나 송수신기의 상대적인 위치에 따라 달라진다.<sup>[2~5]</sup>

## II. 이론적 수중음향 채널 모델

수중 환경에서 음파 신호는 수심, 수온, 전송거리, 풍속에 의한 해수면의 변화, 해저면 매질의 상태 등으로 인해 다양하고 복잡한 특성을 가진다.<sup>[6~7]</sup>

### 2.1 전송손실

음파의 세기는 기하학적 확산과 흡수 매커니즘에 의

\* 정희원, 여주대학교 전자과(Department of Electronics, Yeosu Institute of Tech.)

\*\* 정희원, 전남대학교 전기전자통신컴퓨터공학부(Department of Electrical, Electronic, Communication and Computer Engineering, Chonnam National University)

Ⓒ Corresponding Author (E-mail : khh@yit.ac.kr)

Received ; March 7, 2016

Revised ; May 31, 2016

Accepted ; July 1, 2016

해서 수중을 전파하는 동안 감쇠된다.<sup>[6]</sup>

$$TL(f) = 20\log R + \alpha(f)R * 10^{-3} \quad (1)$$

식(3)을 1[km]의 거리에서는 대략 식(4)로 간략화된다.

$$TL(f)_{1km} \approx \alpha(f) * 10^{-3} \quad (2)$$

감쇠상수  $\alpha$ 는 식(5)와 같다.<sup>[6~7]</sup>

$$\alpha(f) = 0.01 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{4100+f^2} + 2.75 * 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (3)$$

## 2.2 음파의 속도

8000[m] 이하의 해양에서 음파의 속도는 식(6)과 같다.<sup>[6~7]</sup>

$$c = 1448.9 + 4.591T - 0.05304T^{-2} + 0.0002374T^{-3} + 1.340(S-35) + 0.0163z + 1.674 * 10^{-7} z^{-2} - 0.01025T(S-35) - 7.139 * 10^{-13} Tz^{-3} \quad (4)$$

여기서 T는 수온이며 단위는 섭씨로 표현하며 S는 염도로 [mg/l]이고 z는 해양의 깊이이다.

## 2.3 수중환경잡음

수중환경잡음(Ambient Noise)은 간섭의 영향을 주는 요소들을 말한다. 난류(Turbulence), 선박이동(Shipping), 파도(Waves), 열잡음(Thermal noise) 등을 대표적인 간섭요소로 정의하고 있다.<sup>[6~7]</sup>

### 2.3.1 난류잡음

난류잡음은 식(7)과 같다.<sup>[6~7]</sup>

$$10\log N_t(f) = 17 - 30\log(f) \quad (5)$$

여기서 f는 송신음파신호이며 단위는 주파수[kHz]이다. 난류잡음 스펙트럼 밀도의 단위는 dB re uPa/Hz이다.

### 2.3.2 선박이동잡음

선박이동 잡음은 식(8)과 같다.<sup>[6~7]</sup>

$$10\log N_s(f) = 40 + 20(s - 0.5) + 26\log f - 60\log(f + 0.03) \quad (6)$$

대부분 10[Hz]~100[Hz]에 분포되어 있다.

### 2.3.3 파도잡음

파도 잡음은 식(9)와 같다.<sup>[6~7]</sup>

$$10\log N_w(f) = 50 + 7.5\sqrt{w} + 20\log f - 40\log(f + 0.4) \quad (7)$$

여기서 w는 해수면 풍속 [m/s]이며 이 잡음의 대부분은 10[Hz]~100[kHz]에 분포되어 있다.

### 2.3.4 열잡음

열잡음은 바람과 파도에 의해서 발생하는 잡음 주파수보다 높은  $f > 100$ [kHz]에 발생한다.<sup>[6~7]</sup>

$$10\log N_{th}(f) = -15 + 20\log f \quad (8)$$

## 2.4 도플러 효과

각 주파수에 따른 풍속에 대한 도플러 확산은 식(11)과 같다.<sup>[6~7]</sup>

$$f_D = (0.0175/c)f w^{3/2} \cos\theta \quad (9)$$

식(11)에서 c는 음속으로 염분, 수온, 압력 등의 영향을 받지만 일반적으로 1500[m/s]이며, w는 해면 풍속,  $\theta$ 는 지표각(grazing angle)을 나타낸다. 일반적으로 수중 음향 채널은 음속 1500[m/s]는  $T=15^\circ\text{C}$ ,  $S=32\%$ ,  $p=10\text{m}$  이내 환경이다.

## III. 수중 음향 통신용 QPSK 모델

### 3.1 시스템 블록도

그림 1은 수중음향통신을 위한 QPSK 블록도를 나타낸다.<sup>[2]</sup>

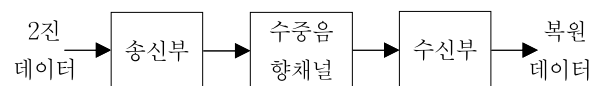


그림 1. 수중음향채널에서 QPSK 시스템  
Fig. 1. The QPSK system under an underwater acoustic channel.

3.2 송신부 블록도

그림 2는 송신부의 블록도를 나타낸다.

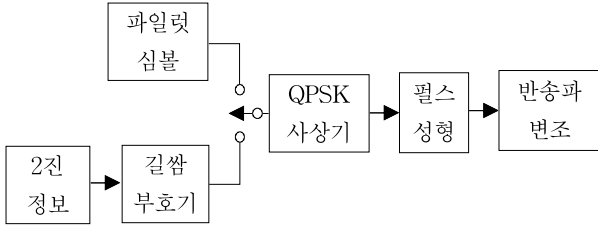


그림 2. 송신부 블록도  
Fig. 2. A Transmitter block diagram.

파일럿 심볼은 수신단에서 수신된 신호의 위상을 추정하고 수신된 신호의 동기 획득에 사용된다. 길쌈부호기는 부호율이 2/3이다.<sup>[5]</sup> 그림 3에 길쌈부호기를 나타낸다.

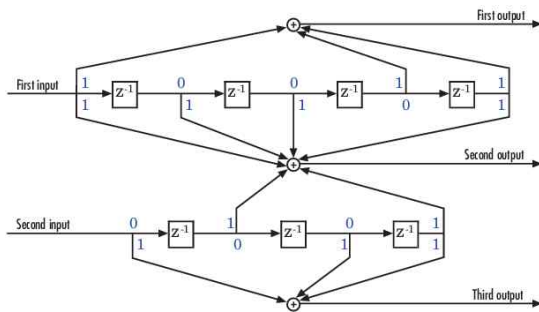


그림 3. 부호율 2/3인 길쌈부호기 블록도  
Fig. 3. A block diagram of a Convolutional Encoder with rate-2/3.

QPSK 사상기는 그레이 부호로 부호화된 QPSK 신호격자점으로 2비트의 2진 데이터를 해당 QPSK 신호점에 할당한다. 펄스 성형은 RRC(Root Raised Cosine) 필터를 사용한다. 반송파 변조는 기저대역 복소 신호를 통과대역 변조신호로 변환한다.

3.3 채널 모델

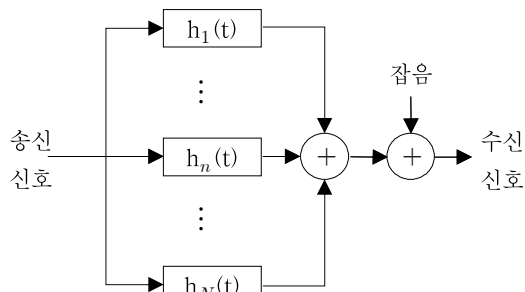


그림 4. 가상실험을 위한 수중음향채널모델 블록도  
Fig. 4. An underwater acoustic channel block diagram for simulation.

그림 4는 심볼간 간섭을 야기하는 다중경로 전파 모델을 나타낸다. 또한 II장에서 언급한 채널 변화를 야기하는 매개변수들을 고려한다. 매개변수에는 수온, 염도, 수압 또는 수심이나 pH 농도가 있다.

3.4 수신부 블록도

그림 5는 수신부의 블록도를 나타낸다.

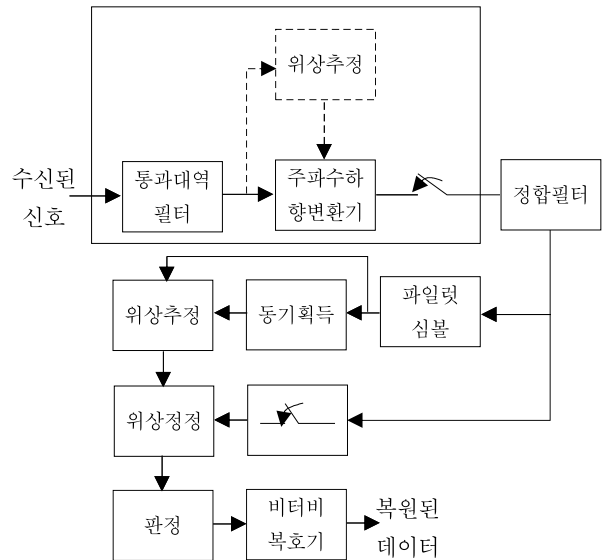


그림 5. 수신부 블록도  
Fig. 5. A Receiver block diagram.

통과대역 필터는 송신부와 동일한 중심주파수와 주파수 대역으로 일치시킨다. 주파수하향변환기는 통과대역 신호를 기저대역 복소 신호로 변환한다.

정합필터는 송신 펄스 성형에 정합되는 필터를 포함하고 있으며 이는 신호대잡음비가 최대가 되는 순간을 결정한다. 동기과정은 파일럿 심볼을 통해서 송신단의 비트주기와 심볼주기를 획득한다. 위상추정은 송신된 신호의 위상을 추정하여 복조과정에 이용한다. 판정블록은 '0' 기준으로 비트를 복원하는 과정이다. 비터비 복호기는 길쌈부호화된 데이터를 복원하는데 본 논문에서는 경판정을 적용하였다.

IV. 가상실험 결과

가상실험을 위한 조건은 표 1에 나타낸다. 가상실험은 매트랩 2014a버전을 이용하여 수행하였다.

표 1. 가상실험을 위한 조건

Table 1. Parameters for Simulation.

파라미터 명	환경
해풍의 속도	1, 2, 4, 8[m/s]
반송파주파수	25[KHz]
송신기 좌표	rs=0, zs=50
수신기 좌표	rr=100, zr=50 / rr=1000, zr=5
음속	1500[m/s]
송수신기의 깊이	50m
염도	S=33‰
수온	T=15°C
pH 값	pH=10m
해저면 모델	Jackson 모델

이론적 수중음향 채널 모델에서 비부호화된 QPSK 시스템과 부호율이 2/3인 길쌈부호화된 QPSK 시스템에 대한 가상실험 결과를 나타낸다.

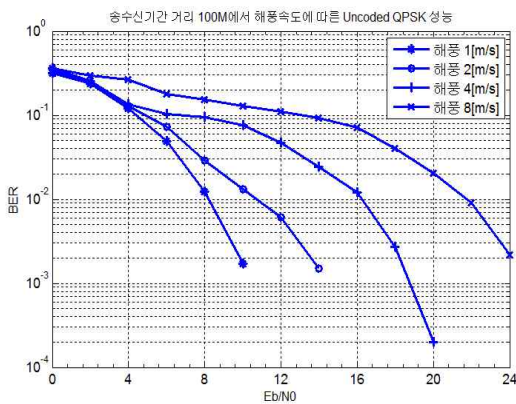


그림 6. 송수신기간 거리 100[m], 해풍에 따른 직접 경로에 대한 비부호화된 QPSK의 BER 성능  
Fig. 6. BER Performance of uncoded QPSK for Direct path due to Sea Breeze, Distance 100[m] between Tx and Rx.

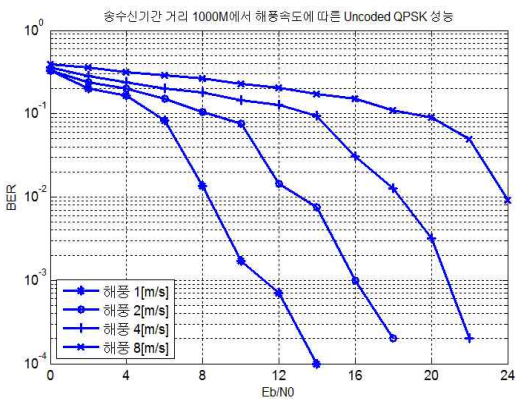


그림 7. 송수신기간 거리 1000[m], 해풍에 따른 직접 경로에 대한 비부호화된 QPSK의 BER 성능  
Fig. 7. BER Performance of uncoded QPSK for Direct path due to Sea Breeze, Distance 1000[m] between Tx and Rx.

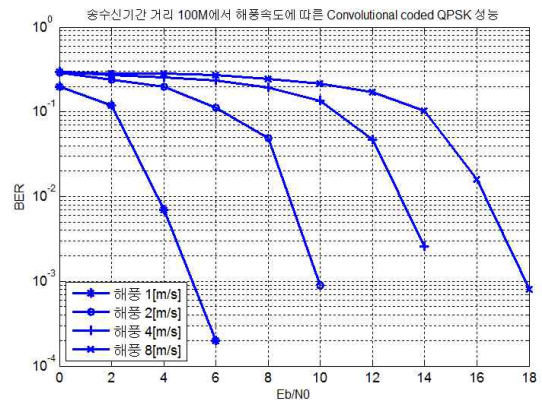


그림 8. 송수신기간 거리 100[m], 해풍에 따른 직접 경로에 대한 길쌈 부호화된 QPSK의 BER 성능  
Fig. 8. BER Performance of Convolutional coded QPSK for Direct path due to Sea Breeze, Distance 1000[m] between Tx and Rx.

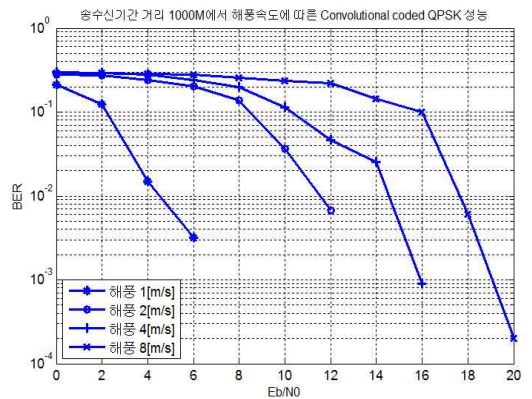


그림 9. 송수신기간 거리 1000[m], 해풍에 따른 직접 경로에 대한 길쌈 부호화된 QPSK의 BER 성능  
Fig. 9. BER Performance of Convolutional coded QPSK for Direct path due to Sea Breeze, Distance 1000[m] between Tx and Rx.

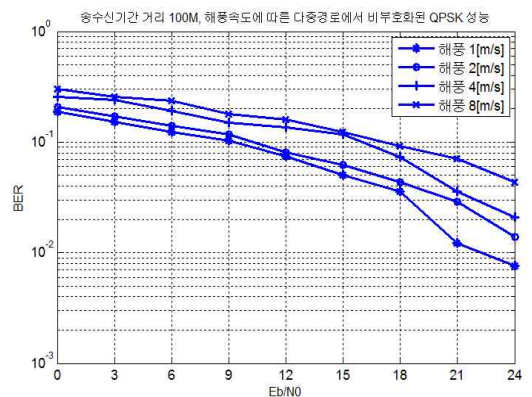


그림 10. 송수신기간 거리 100[m], 해풍에 따른 다중경로에 의한 비부호화된 QPSK의 BER 성능  
Fig. 10. BER Performance of Uncoded QPSK for Multipath due to Sea Breeze, Distance 100[m] between Tx and Rx.

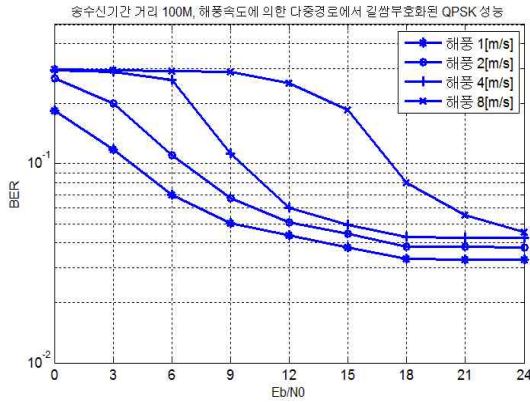


그림 11. 송수신기간 거리 100[m], 해풍에 따른 다중경로에 의한 길쌈 부호화된 QPSK의 BER 성능  
 Fig. 11. BER Performance of Convolutional coded QPSK for Multipath due to Sea Breeze, Distance 100[m] between Tx and Rx.

송신기와 수신기 사이의 거리와 해수면의 해풍의 영향을 받은 직접경로와 다중경로에 대한 QPSK BER 성능을 분석하였다. 송수신기간 거리가 증가함에 따라 비부호화된 QPSK와 길쌈부호화된 QPSK의 BER 성능이 악화됨을 알 수 있다. 또한 해수면의 해풍에 대해서 해풍의 초속이 증가하면 할수록 BER 성능이 저하됨을 알 수 있다. 하나의 경로인 직접경로에 있어 길쌈부호기의 사용은 송수신기의 거리가 100[m], 1000[m]일 때 해풍 1[m/s] 상황에서 BER 성능을 비교해 보면,  $10^{-2}$ 에서 대략 4[db] 이상의 전력이득이 있음을 알 수 있었다. 이론적인 수중채널 모델에서 그림 10의 결과 그래프는 다중경로를 4개로 설정하여 가상실험을 한 결과로 비부호화된 QPSK 시스템의 BER 성능이 개선되지 않음을 보여 준다. 이는 다중경로 신호의 영향이 심볼 간 간섭을 야기하여 시스템 성능을 저하시키기 때문이라고 판단할 수 있다. 이때 위상추정과 동기 획득을 위한 파일럿 심볼의 사용하였지만 BER 성능의 개선은 이루어지지 않았다. 또한 그림 11은 송수신기간 거리 100[m]에서 해풍에 따른 다중경로의 영향에 대한 QPSK의 BER 성능을 나타낸다. 가상 실험에서 사용한 부호율 2/3 길쌈부호기는 QPSK 시스템의 성능을 개선시키지 못하는 오류 마루(error floor) 현상을 나타내었다.

V. 결 론

이론적인 수중음향 채널 모델을 통해서 비부호화된 QPSK 시스템의 성능과 길쌈부호화된 QPSK 시스템의 성능을 분석하였다. 해풍에 따른 직접경로의 경우, 길쌈

부호기를 적용하여 QSPK 시스템의 성능을 개선할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 다중경로에 의한 영향은 길쌈부호기를 적용하여도 성능이 개선되지 않는 오류마루 현상을 나타내었다. 따라서 수중음향채널에서 단일반송파를 사용하는 통신 시스템을 적용할 경우, 다중경로에 영향을 줄여 오류를 줄일 수 있는 채널부호의 선택이 매우 중요하다. 또한 다중경로에 의해서 발생하는 심볼간 간섭을 줄일 수 있는 통신방법이 연구되어야 한다.

REFERENCES

- [1] A. Baggeroer, "Acoustic telemetry—an overview," IEEE J.Oceanic Eng. 9, 229-235, 1984.
- [2] A. Falahati, B. Woodward, and S. C. Bateman, "Underwater acoustic channel models for 4800 b/s QPSK signals," IEEE J. Oceanic Eng. 16, 12-20, 1991.
- [3] J. Kim, K. Park, J. Park, J. R. Yoon, "Coherence bandwidth effects on underwater image transmission in multipath channel," Jpn. J. Appl. Phys. 50, 07HG05-1-07HG05-5, 2011.
- [4] S. H. Oh, H. Kim, J. S. Kim, J. H. Cho, J. Chung, H. C. Song, "Performance analysis of underwater acoustic communication system using underwater channel simulation tool" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kor. 31, 373-383, 2012.
- [5] Chulwon Seo, Jihyun Park, Kyu-Chil Park, Jungchae Shin, Jin Woo Jung, and Jong Rak Yoon, "Performance of Convolution Coding Underwater Acoustic Communication System on Frequency Selectivity Index", The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.32, No.6 pp. 494-501, 2013.
- [6] H.G. Urban, Handbook of Underwater Acoustic Engineering (STN Atlas Elektronik GmbH, Bremen, 2002).
- [7] H. Medwin and C.S. Clay, Fundamentals of Acoustical Oceanography (Academic Press, San Diego, 1998).

저 자 소 개



강 희 훈(정회원)  
1997년 2월 서울과학기술대학교 전  
기공학과 학사 졸업.  
1999년 8월 광운대학교 전자공학  
과 석사 졸업.  
2003년 8월 광운대학교 전자공학  
과 박사 졸업.

현) 여주대학교 전자과 교수  
<주관심분야: 유무선 통신시스템, 수중음향통신  
시스템, USN>



임 요 응(정회원)  
1996년 2월 경희대학교 우주공학  
과 학사 졸업.  
2011년 2월 연세대학교 공학대학  
원 석사 졸업.  
2014년 3월 ~ 전남대학교 전파통신  
공학과 박사 과정 (주)준영  
시스템 대표 이상

<주관심분야: 유무선 통신네트워크, 수중음향 통  
신 네트워크, USN>