

주파수 선택 지표에 따른 길쌈 부호 수중 음향 통신 시스템의 성능 평가

Performance of Convolution Coding Underwater Acoustic Communication System on Frequency Selectivity Index

서철원, 박지현, 박규철, 신정채*, 정진우*, 윤종락†

(Chulwon Seo, Jihyun Park, Kyu-Chil Park, Jungchae Shin*, Jin Woo Jung*, and Jong Rak Yoon†)

부경대학교 정보통신공학과, *(주)한화구미사업단 연구2부
(접수일자: 2013년 6월 19일; 채택일자: 2013년 8월 13일)

초 록: 천해 수중 음향 채널의 배경잡음과 다중경로에 의한 비트 오류율(BER)을 경감하기 위해 Quadrature Phase Shift Keying(QPSK)에 전방 오류 정정 코드(FEC)로 부호화 비율 1/2의 길쌈 코딩(CC)을 적용하였다. 전송신호의 대역폭에 대한 채널의 일관성 대역폭의 비를 주파수 선택 지표로 정의하였고 주파수 선택지표에 따른 전송 신호의 BER과 비트 에너지 대 잡음비의 이득을 평가하였다. 실내 수조 실험 결과, 주파수 선택지표가 약 1.0 이하인 경우 BER은 이론적인 결과와 일치하고 비트 에너지 대 잡음비의 이득은 약 5 dB로 이론적인 결과와 일치한다. 주파수 선택지표가 1.0 이상인 주파수 선택적인 다중경로 채널에서도 BER은 효율적으로 감소하지만 비트 에너지 대 잡음비가 일정 크기 이상인 조건에서만 CC의 비트 오류 감소에 효과가 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 정의한 주파수 선택지표가 다중 경로 채널에서 CC의 성능 평가의 지표로 적용될 수 있다. 아울러 등화기를 적용하지 않고 저속 수중 음향 통신 시스템에 효과적으로 BER을 줄일 수 있다.

핵심용어: 수중음향통신 채널, 오류정정코드, 길쌈 코드, 주파수 선택성

ABSTRACT: The convolution code(CC) of code rate 1/2 as a forward error correction (FEC) in Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) is applied to decrease bit error rate (BER) by background noise and multipath in shallow water acoustic channel. Ratio of transmitting signal bandwidth to channel coherence bandwidth is defined as frequency selectivity index. BER and bit energy-to-noise ratio gain of transmitted signal according to frequency selectivity index are evaluated. In the results of indoor water tank experiment, BER is well matched theoretical results at frequency selectivity index less than about 1.0. And bit energy-to-noise ratio gain is also matched theoretical value of 5 dB. BER is effectively decreased at frequency selective multipath channel with frequency selectivity index higher than 1.0. But bit energy-to-noise ratio greater than a certain size in terms of CC weaving is effective in reducing bit errors. In the results, the defined frequency selectivity index in this study could be applied to evaluate a performance of CC in multipath channel. Also it could effectively reduced BER in a low speed underwater acoustic communication system without an equalizer.

Keywords: Underwater acoustic communication channel, Error correcting code, Convolution code, Frequency selectivity

PACS numbers: 43.30.Zk, 43.60.Dh

1. 서 론

수중 음향 통신 시스템은 잠수정, 환경감시, 해저 자원개발, 기뢰 전술 등의 다양한 응용분야에 적용되고 있으며, 특히 천해에서의 응용이 증가하고 있다. 이러한 수중 통신 시스템에서 요구하는 전송률은 향해 정보 및 수중 장비 상태의 명령과 제어를 위

†Corresponding author: Jong Rak Yoon (jryoon@pknu.ac.kr)
Department of Information and Communication Engineering,
Pukyong National University, Daeyeon 3dong, Namgu, Busan
608-737, Republic of Korea
(Tel: 82-2-629-6233, Fax: 82-2-629-6210)

한 100~1,000 bps, 수중 청음기 및 지진계의 정보 전송을 위한 1~10 kbps, 수중 영상 정보의 전송을 위한 10~100 kbps로 대별된다.^[1]

천해는 해상 교통량이 많아 배경잡음이 높고, 얇은 수심으로 심해에 비해 상대적으로 다중 경로가 많아 고속 전송률을 요구하는 수중 영상 정보 전송 시스템에서는 전송신호의 대역폭이 커서 BER을 증가시키는 영향을 최소화하는 시스템이 요구된다.

다중 경로 채널의 경우 경계면에서 반사되는 각각의 경로가 서로 다른 지연 시간을 갖게 되고 이는 송신 신호 대역폭 내에서 주파수 선택적인 특성을 보이며 디지털 통신에서 인접 심벌간의 간섭을 야기하여 수중 통신 시스템의 성능을 저하시킨다. 이러한 다중 경로가 미치는 영향의 크기는 해면과 해저 경계면의 음향 물성이나 송수신기의 상대적인 위치에 따라 달라진다.^[2-4]

그러나 수중 통신에서 다중 경로의 영향의 크기는 전송 신호의 대역폭에 따라 다르다. 다중 경로의 지연확산에 의해 결정되는 통신채널의 일관성 대역폭 (coherence bandwidth) B_c 가 송신 신호 대역폭 B_s 보다 넓은 경우는 다중 경로의 영향이 무시될 수 있는 주파수 비 선택적인 채널이 되며 그렇지 않은 경우 다중 경로에 의해 오류가 발생하는 주파수 선택적인 채널이 된다. 따라서 수중 통신 시스템은 수중 배경 잡음 및 다중 경로 각각의 영향을 극복하기 위해 채널 코딩과 등화기를 동시에 적용해야 한다.

본 연구자들은 다중경로가 있는 주파수 선택적인 실제 해양 채널에 등화기를 적용하지 않고 BFSK를 적용하여 송수신기 깊이를 변화시켜 다중경로 변화에 의한 오류율 변화를 제시하였다.^[5]

CC(Convolutional Code), RS(Reed-Solomon) 코드 및 Turbo code 등을 다중 경로가 있는 주파수 선택적인 모의 채널에 적용하여 각 코드의 성능을 해석하여 다중 경로 오류는 랜덤오류이며 전송률 증가에 따라 BER이 증가한다는 일반적인 정성적인 결과를 제시한 연구가 있다.^[6] 다중 경로 신호를 잡음 신호로 평가하고 있어 E_b/N_0 이득에 대한 추가적인 해석이 요구되고 또한 채널의 주파수 선택성 크기 변화 즉 다중 경로 영향의 크기 변화에 대한 오류의 정량적인 평가가 요구된다.

이러한 채널 코딩 성능의 직접적인 평가 연구와 더불어 동해 천해 환경에서 주파수와 시간에 따른 수중채널의 일관성 대역폭 B_c 와 일관성 시간 T_c 를 구하여 전송 신호 패킷 설계에 적용한 연구가 있다.^[7] B_c 및 T_c 를 기반으로 패킷 설계 요소를 결정하는 관계에 대해서 보완 연구가 요구되는 결과이다.

시변 다중 경로 채널을 레일리 페이딩으로 가정하고, 수온 약층에 의한 비동기식 FSK 모뎀의 성능 연구^[8], 3 m 깊이의 극천해의 수중 음향 채널의 통계적 특성을 구하기 위한 연구^[9] 및 다중경로와 도플러 천이에 의한 ISI를 저감하기 위해 결정 궤환 등화기를 적용한 OFDM 성능 연구 등^[10]이 있다.

본 연구자들은 이전 연구에서 QPSK와 부호율 1/2인 길쌈 코드를 적용한 QPSK의 주파수 선택성에 따른 비트에너지 대 잡음비 E_b/N_0 이득 특성을 비교한 바 있다.^[11] 본 연구에서는 실험 환경을 달리하여 이전 연구 결과의 재현성을 제시하였고 추가하여 주파수 선택지표 B_s/B_c 에 따른 QPSK/CC의 BER 개선효과를 해석하였다. 개선 효과는 동일한 주파수 선택지표에 대해 비트에너지 대 잡음비 E_b/N_0 의 크기에 따른 QPSK와 QPSK/CC의 BER을 비교하여 평가하였다. 아울러 주파수 선택지표가 수중 통신 시스템의 성능에 미치는 다중 경로 영향을 평가하는 지표로 적용될 수 있음을 보였다.

II. 길쌈 코드

채널의 B_c 가 전송 신호의 B_s 보다 큰 주파수 비 선택적인 채널에서 배경 잡음에 의한 오류를 저감하기 위해 채널 코딩 기법을 적용한다. 이 기법은 송신하고자 하는 정보 비트보다 많은 비트를 갖도록 하여 정보의 중복 도를 증가시켜 송신하는 FEC(Forward Error Correction)기술이다.

부호율 k/n 인 CC는 k 개 입력 정보 비트를 n 개 비트로 출력하므로 B_s 가 n/k 로 확장된다. 본 연구에서는 부호율 1/2를 사용하였으므로 B_s 는 2배가 되고 이론적인 잡음에 대한 E_b/N_0 의 이득은 약 5 dB이 된다. 따라서 B_s 가 3 dB 증가하지만 2 dB의 잉여 이득이 있으므로 동일한 BER 조건에서 저 전력을 요구하

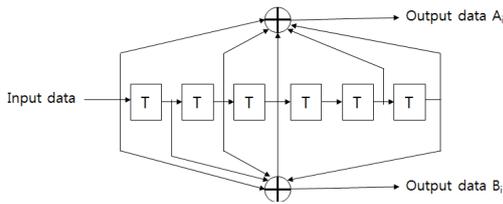


Fig. 1. FEC k=7, rate 1/2 convolutional encoder.

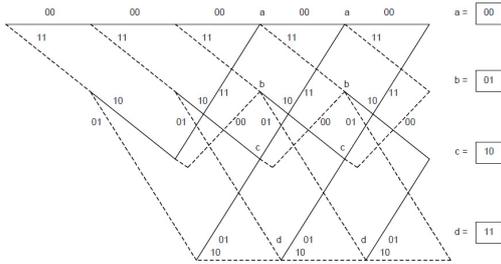


Fig. 2. Viterbi algorithm of hard decision.

는 수중 음향 통신 시스템에 부호율 1/2의 CC를 적용할 수 있다. Fig. 1은 본 연구에서 적용한 CC 생성기로 부호율은 1/2, 구속장 길이는 7로 하였고 복호기는 Fig. 2와 같이 경판정(hard decision)의 비터비(Viterbi) 알고리즘을 적용하였다.

III. 수조 실험

디지털 전송 신호의 B_s 에 대한 채널 B_c 의 비 B_s/B_c 를 주파수 선택 지표로 정의하고 B_s/B_c 에 따른 CC를 적용한 수중 통신 시스템의 성능을 수조 실험으로 평가하였다.

수조 실험에서 송수신기를 포함한 실험환경은 불변으로 B_c 는 일정하다. B_s 는 전송 신호 심벌 발생률을 변화시켜 변화도록 하여 B_s/B_c 를 변화시켰다. 각각의 B_s/B_c 에 대해 E_b/N_0 에 따른 BER 특성을 구하였다.

실험에 사용한 수조는 Fig. 3과 같이 $2.0 \times 1.5 \times 1.0$ m 크기로 수면을 제외한 경계면은 1 mm의 강철판이며 실제 실험시의 수심은 0.65 m로 하였다. Fig. 3에서 송신기와 수신기는 각각 0.45 m와 0.35 m 깊이에 위치하고 수평거리는 1.0 m이다. 채널의 임펄스 응답을 구하기 위해 0.5 s 길이의 LFM(Linear Frequency Modulation) 신호를 25~35 kHz 대역으로 1 s 간격으로 200회 전송하여 송신하고 정합 필터를 사용하여 다중경로

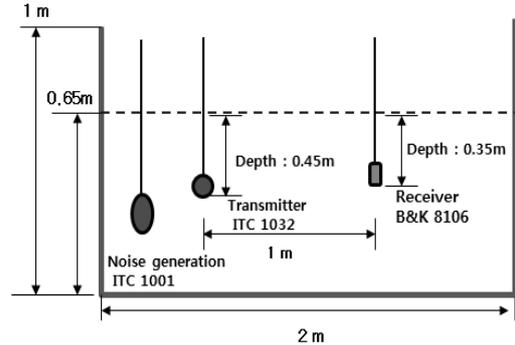


Fig. 3. Experimental configuration in water tank.

세기 응답을 구하여 B_c 를 구하였다.

반송주파수 30 kHz의 QPSK 정보 심벌 발생률을 50, 100, 200 및 400 sps로 하고 1/2 CC를 적용한 전송 신호의 전송률을 심벌 발생률과 동일하게 하여 각각의 B_s 가 50, 100, 200 및 400 Hz가 되도록 하였다.

Fig. 3에서 잡음 발생기는 2,000 Hz의 대역폭을 갖는 PN(Pseudo Noise) 신호를 반송주파수 30 kHz로 변조한 신호를 발생한다. B_s 의 최대 대역폭인 400 Hz보다 큰 잡음신호이다. 여기서 PN 신호는 수중 배경 잡음으로 가정한 신호로 전송 심벌과는 상관성이 없는 무상관 신호이다.

전송 신호 발생용 송신기(ITC 1032)와 잡음 발생기(ITC 1001)의 송신 전압 감도가 달라 E_b/N_0 는 E_s 를 일정하게 하고 N_0 를 변화시켜 조정하였다. 각각의 QPSK 심벌 발생률에 대해 E_b/N_0 는 0~20 dB까지를 2 dB 간격으로 변화시켰다.

QPSK 정보 심벌 데이터 비트는 무작위 50,000 비트이며 BER은 전송한 50,000 비트중의 오류 비율로 측정 가능한 BER의 최소치는 2×10^{-5} 이다.

IV. 결 과

Fig. 4(a)는 LFM 신호를 200회 전송하여 평균한 정규화 다중경로 세기 신호이고 Fig. 4(b)는 지연확산 신호의 스펙트럼이다. Fig. 4(a)의 정규화된 다중 경로 세기 신호에서 세기가 0.1 이상의 신호를 식(1)~(3)에 적용하여 지연시간 유효 값 τ_{rms} 와 일관성 대역폭 B_c 을 구하였다.^[12]

$$\tau_{rms} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2}, \quad (1)$$

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_p P(\tau_p) \tau_p^2}{\sum_p P(\tau_p)}, \quad \overline{\tau} = \frac{\sum_p P(\tau_p) \tau_p}{\sum_p P(\tau_p)}, \quad (2)$$

$$B_c = \frac{1}{5\tau_{rms}}. \quad (3)$$

식(2)에서 $P(\tau_k)$ 는 각 경로 시간 τ_k 에서의 세기이다. τ_{rms} 는 약 2.1 ms로 B_c 는 약 95 Hz이다. Fig. 4(b)의 지연확산 신호의 스펙트럼과 비교하면 약 4 dB 대역 폭에 해당한다.

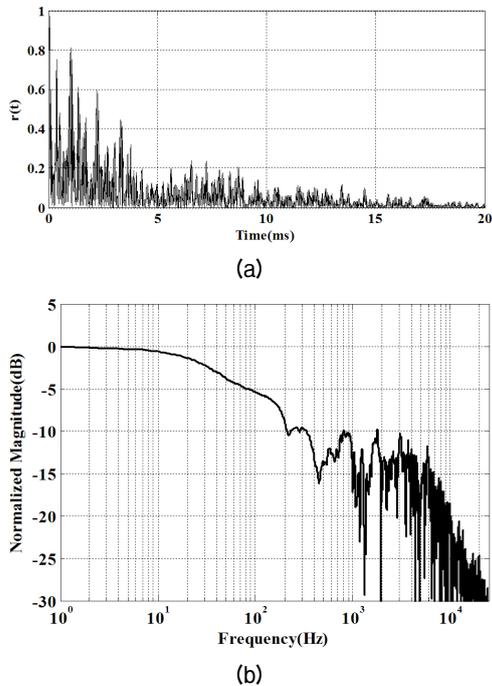


Fig. 4. Water tank channel impulse response profile: (a) average delay spread of 200 pings, and (b) spectrum of delay spread.

Table 1. Frequency selectivity index of each signal bandwidth ($B_c = 95$ Hz).

Signal bandwidth B_s (Hz)	Frequency selectivity index : B_s/B_c	
B_s of QPSK with 1/2 CC	50	0.53
	100	1.05
	200	2.11
	400	4.21

Table 1은 각 전송 신호에 대한 채널의 주파수 선택 성을 주파수 선택 지표 B_s/B_c 로 나타낸 것이다. Table 2~5는 B_s/B_c 에 따른 QPSK와 QPSK/CC를 적용한 BER을 비교한 실험 결과이고 Figs. 5~8은 이를 그림으로 비교한 것이다. Table 2~5에서 각각의 BER의 정수 값은 반올림 값이고 0은 QPSK 정보 심벌 데이터 비트 50,000개 중에서 오류 비트가 발생하지 않은 결과이다.

Table 2~5와 같이 동일한 B_s/B_c 에서 E_b/N_o 가 작은 값에서는 QPSK의 BER이 작고 큰 값에서는 QPSK/CC의 BER이 작다. 따라서 일정 크기 이상의 E_b/N_o

Table 2. BERs to E_b/N_o of QPSK (left) and QPSK/CC (right) for frequency selectivity index of 0.53 (sps: 50).

E_b/N_o	BER	E_b/N_o	BER
0 dB	$\sim 6 \times 10^{-2}$	0 dB	$\sim 5 \times 10^{-2}$
2 dB	$\sim 4 \times 10^{-2}$	2 dB	$\sim 1 \times 10^{-3}$
4 dB	$\sim 6 \times 10^{-3}$	4 dB	0
6 dB	$\sim 1 \times 10^{-3}$	6 dB	0
8 dB	$\sim 1 \times 10^{-4}$	8 dB	0
10 dB	0	10 dB	0
12 dB	0	12 dB	0
14 dB	0	14 dB	0
16 dB	0	16 dB	0
18 dB	0	18 dB	0
20 dB	0	20 dB	0

Table 3. BERs to E_b/N_o of QPSK (left) and QPSK/CC (right) for frequency selectivity index of 1.05 (sps: 100).

E_b/N_o	BER	E_b/N_o	BER
0 dB	$\sim 1 \times 10^{-1}$	0 dB	$\sim 3 \times 10^{-1}$
2 dB	$\sim 7 \times 10^{-2}$	2 dB	$\sim 2 \times 10^{-2}$
4 dB	$\sim 2 \times 10^{-2}$	4 dB	$\sim 4 \times 10^{-4}$
6 dB	$\sim 7 \times 10^{-3}$	6 dB	0
8 dB	$\sim 8 \times 10^{-4}$	8 dB	0
10 dB	0	10 dB	0
12 dB	0	12 dB	0
14 dB	0	14 dB	0
16 dB	0	16 dB	0
18 dB	0	18 dB	0
20 dB	0	20 dB	0

에서 QPSK/CC는 BER 개선에 효과가 있음을 보인다.

Fig. 5는 Table 1에서 B_s/B_c 가 0.53인 경우의 QPSK 및 QPSK/CC의 BER 특성이다. Fig. 5에서 이론적인 결과는 주파수 비 선택적인 채널의 BER 및 E_b/N_o 이득 특성이다. 실험 치의 E_b/N_o 이득은 약 4dB로 이론 치의 5 dB과 잘 일치함을 보인다. 따라서 B_s/B_c 가 0.53인 경우는 주파수 비 선택적인 채널로 판단되고 BER은 채널의 잡음에만 영향을 받는 것으로 해석된다.

Fig. 6은 Table 1에서 주파수 선택 지표 1.05인 경우의 BER 특성으로 Fig. 5와 같이 주파수 비 선택적인 경우의 이론적인 결과와 잘 일치한다.

Table 4. BERs to E_b/N_o of QPSK (left) and QPSK/CC (right) for frequency selectivity index of 2.11 (sps: 200).

E_b/N_o	BER	E_b/N_o	BER
0 dB	$\sim 1 \times 10^{-1}$	0 dB	$\sim 4 \times 10^{-1}$
2 dB	$\sim 1 \times 10^{-1}$	2 dB	$\sim 3 \times 10^{-1}$
4 dB	$\sim 1 \times 10^{-1}$	4 dB	$\sim 2 \times 10^{-1}$
6 dB	$\sim 6 \times 10^{-2}$	6 dB	$\sim 2 \times 10^{-2}$
8 dB	$\sim 2 \times 10^{-2}$	8 dB	$\sim 1 \times 10^{-3}$
10 dB	$\sim 1 \times 10^{-3}$	10 dB	0
12 dB	0	12 dB	0
14 dB	0	14 dB	0
16 dB	0	16 dB	0
18 dB	0	18 dB	0
20 dB	0	20 dB	0

Table 5. BERs to E_b/N_o of QPSK (left) and QPSK/CC (right) for frequency selectivity index of 4.21 (sps: 400).

E_b/N_o	BER	E_b/N_o	BER
0 dB	$\sim 3 \times 10^{-1}$	0 dB	$\sim 5 \times 10^{-1}$
2 dB	$\sim 2 \times 10^{-1}$	2 dB	$\sim 5 \times 10^{-1}$
4 dB	$\sim 2 \times 10^{-1}$	4 dB	$\sim 4 \times 10^{-1}$
6 dB	$\sim 1 \times 10^{-1}$	6 dB	$\sim 2 \times 10^{-1}$
8 dB	$\sim 9 \times 10^{-2}$	8 dB	$\sim 7 \times 10^{-2}$
10 dB	$\sim 4 \times 10^{-2}$	10 dB	$\sim 6 \times 10^{-4}$
12 dB	$\sim 2 \times 10^{-2}$	12 dB	0
14 dB	$\sim 1 \times 10^{-2}$	14 dB	0
16 dB	$\sim 4 \times 10^{-3}$	16 dB	0
18 dB	$\sim 1 \times 10^{-3}$	18 dB	0
20 dB	$\sim 9 \times 10^{-4}$	20 dB	0

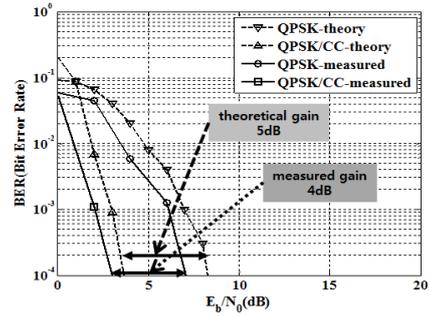


Fig. 5. BER to E_b/N_o of QPSK and QPSK/CC for frequency selectivity index of 0.53 (QPSK sps: 50).

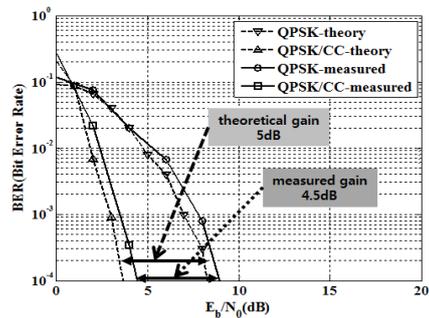


Fig. 6. BER to E_b/N_o of QPSK and QPSK/CC for frequency selectivity index of 1.05 (QPSK sps: 100).

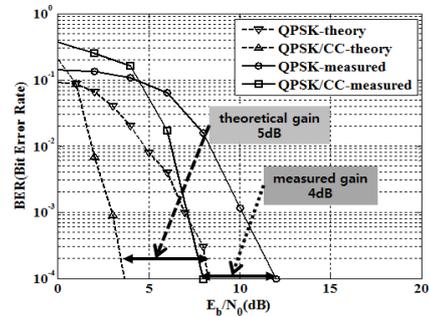


Fig. 7. BER to E_b/N_o of QPSK and QPSK/CC for frequency selectivity index of 2.11 (QPSK sps: 200).

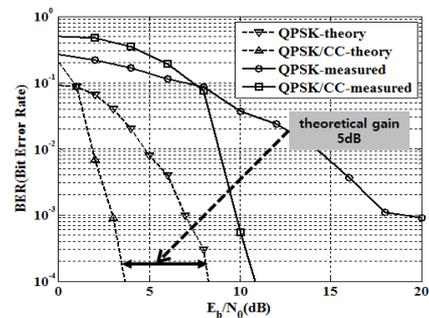


Fig. 8. BER to E_b/N_o of QPSK and QPSK/CC for frequency selectivity index of 4.21 (QPSK sps: 400).

Fig. 7은 Table 1에서 B_s/B_c 가 2.11인 경우의 BER 특성으로 BER은 작아지지만 주파수 비 선택적인 경우와 비교하면 상대적으로 양의 바이어스 오차를 갖는다. 이는 채널의 잡음 뿐만 아니라 다중경로에 의한 주파수 선택성의 영향도 동시에 받는 이유이다. 그러나 E_b/N_0 이득은 약 4 dB로 이론 치와 유사하다.

Fig. 8은 Table 1에서 B_s/B_c 가 4.21인 경우의 BER 특성으로 주파수 비 선택적인 경우와 비교하면 바이어스 오차가 더 커진다. QPSK는 다중 경로에 의해 E_b/N_0 가 18 dB 이상이 되면 BER의 감소 효과는 더 이상 없는 것으로 해석된다. 그러나 CC를 적용하면 BER은 여전히 크게 개선된다.

Figs. 5~8의 실험 결과에서 QPSK와 QPSK/CC의 BER이 교차하는 E_b/N_0 가 있으며 교차점 이후에서 CC는 효과가 있다. 특히 B_s/B_c 가 약 1.0 이하에서는 E_b/N_0 가 약 1.0 dB 이상, 약 2.0 일 때는 약 5.0 dB 이상, 약 4.0 일 때는 약 8.0 dB 이상에서 CC는 BER 개선 효과가 있다.

결론적으로 다중경로에 의해 B_s/B_c 가 커지면 BER은 증가하지만 CC를 적용하면 BER은 작아진다. B_s/B_c 가 1.0 이하는 주파수 비 선택 채널로 정의할 수 있다. 또한 B_s/B_c 값을 기준으로 E_b/N_0 가 일정 크기 이상에서만 CC는 BER 개선 효과가 있다. 이에 반해 QPSK는 E_b/N_0 를 크게 하더라도 더 이상 BER 개선 효과가 없으며 이는 기존 연구 결과와 일치한다.

Fig. 5~8은 QPSK와 QPSK/CC의 B_s 가 같은 조건에서 E_b/N_0 이득을 평가하기 위한 실험 결과이다. QPSK/CC의 정보 심벌 발생률은 QPSK의 1/2이므로 동일한 정보 심벌 발생률을 얻기 위해서는 2배의 신호 전송율이 요구된다. Figs. 9~11은 QPSK와 QPSK/CC의 정보 심벌 발생률이 같은 경우의 실험 결과를 비교한 것이다.

Fig. 9는 B_s 가 50 Hz이고 B_s/B_c 가 0.53인 QPSK와 동일한 정보 심벌 발생률을 갖는 B_s 가 100 Hz이고 B_s/B_c 가 1.05인 QPSK/CC의 BER을 비교한 결과이다. 동일한 BER에 대해 E_b/N_0 의 잉여 이득이 약 2.6 dB로 이론적인 2.0 dB와 잘 일치한다.

Fig. 10은 B_s 가 100 Hz이고 B_s/B_c 가 1.05인 QPSK와 B_s 가 200 Hz이고 B_s/B_c 가 2.11인 QPSK/CC의

BER을 비교한 결과이다. 동일한 BER에 대해 E_b/N_0 이득이 약 1.2 dB로 이론적인 2.0 dB보다 작다.

Fig. 11은 B_s 가 200 Hz이고 B_s/B_c 가 1.06인 QPSK와 B_s 가 400 Hz이고 B_s/B_c 가 4.21인 QPSK/CC의 BER을 비교한 결과이다. 동일한 BER에 대해 E_b/N_0 이득이 약 1.2 dB로 이론적인 2.0 dB보다 작다.

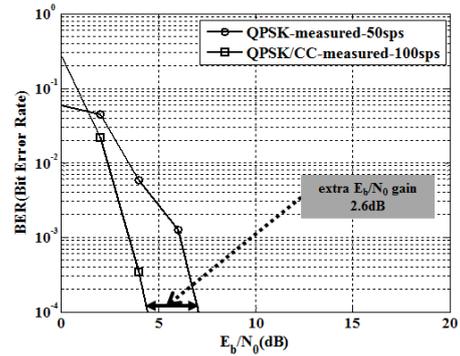


Fig. 9. Result of BER comparison to 50 sps QPSK and 100 sps QPSK/CC.

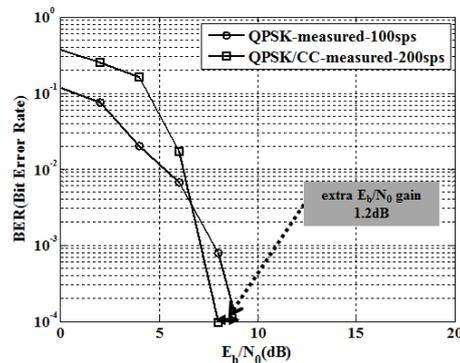


Fig. 10. Result of BER comparison to 100 sps QPSK and 200 sps QPSK/CC.

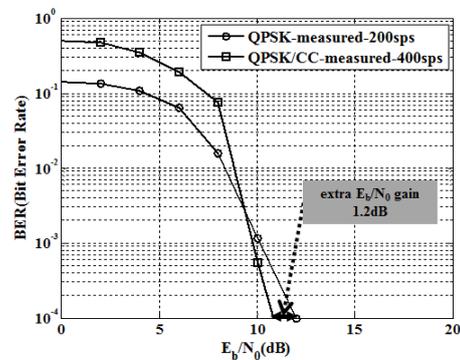


Fig. 11. Result of BER comparison to 200 sps QPSK and 400 sps QPSK/CC.

이상의 결과로부터 CC의 BER 개선효과 및 E_b/N_o 잉여 이득을 얻기 위해서는 E_b/N_o 가 일정 크기 이상이어야 함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 다중 경로 채널에서 부호율 1/2 인 CC의 성능을 평가하였다. 주파수 선택 지표 B_s/B_c 가 각각 0.53과 1.05에서 BER은 이론적인 결과와 잘 일치하여 채널은 주파수 비 선택적인 채널로 BER은 잡음에만 영향을 받는 것으로 평가된다. 아울러 E_b/N_o 이득은 각각 약 4dB 및 4.5 dB로 이론적인 5dB과 잘 일치한다.

주파수 선택 지표가 2.11 및 4.21인 경우는 E_b/N_o 가 높은 영역에서 QPSK/CC는 QPSK 보다 BER 개선에 보다 효과가 있다.

이러한 결과는 동일한 채널 일관성 대역폭에서 주파수 선택 지표가 약 1.0 이하로 되도록 신호 대역폭이 낮은 저속 디지털 수중통신시스템을 설계하면 CC 만을 적용하여도 배경잡음에 의한 비트오류를 효과적으로 저감할 수 있음을 보인다. 아울러 주파수 선택 지표가 약 1.0 이상인 주파수 선택적 채널에서 다중 경로에 의한 QPSK/CC의 BER과 등화기가 적용된 QPSK/CC의 BER을 비교하여 바이어스 오차를 해석하면 설계된 등화기의 성능을 평가할 수 있을 것이다.

결론적으로 주파수 선택 지표가 약 1.0 이하에서는 부호율 1/2의 CC는 전송 신호 대역폭이 3 dB 증가하고 5 dB의 E_b/N_o 이득이 있어 실제로 2 dB의 잉여 이득이 있다. 따라서 저 전력을 요구하는 수중음향 통신 시스템에서는 신호 전력이 2 dB 낮은 신호에 CC를 적용하여 동일한 BER을 얻을 수 있다. 주파수 선택 지표가 1.0 이상인 경우에는 주파수 선택 지표에 따라 BER 개선 효과 및 잉여 이득이 주어지는 E_b/N_o 의 크기가 결정되며 잉여 이득은 약 1.2 dB이다. 본 연구에서 정의한 주파수 선택 지표는 수중 음향 통신 채널의 일관성 대역폭 B_c 의 이론적 혹은 실험적 예측 결과에 적용하여 수중 음향 통신 시스템을 설계하는 데에도 응용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 (주)한화 구미사업단의 연구 지원으로 수행되었습니다.

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. K. Park, J. Park, S. W. Lee, J. W. Jung, J. Shin, J. R. Yoon, "Performance evaluation of underwater acoustic communication in frequency selective shallow water" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kor. **32**, 95-103 (2013).
6. J. Bae, M. Kim, S. Choi, J. Jung, S. Chun, K. Dho, "The analysis about channel code performance of underwater channel" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kor. **27**, 286-295 (2008).
7. D. Choi, H. Kim, N. Kim, S. Kim, J. Chung, "Coherence bandwidth and coherence time for the communication frame in the underwater of East Sea" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kor. **29**, 365-373 (2010).
8. M. Siderius, M. B. Poter, P. Hursky, V. McDonald, and the KauaiEx Group, "Effects of ocean thermocline variability on noncoherent underwater acoustic communications," J. Acoust. Soc. Am. **121**, 1895-1908 (2007).
9. J. Trubuil, A. Goalic, N. Beuzelin C. Laot, "Check and validate Reed Solomon Block Turbo Codes in shallow underwater acoustic communication," Proc. IEEE OCEANS, 1-6 (2010).
10. M. Chitre, S. Shahabudeen, M. Stojanovic, "Underwater acoustic communications and networking: recent advances and future challenges," Mar. Tech. Soc. J. **42**, 103-116 (2008).
11. J. Park, C. Seo, K. Park J. R. Yoon, "Effectiveness of convolutional code in multipath underwater acoustic channel," Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 07HG01-1-07HG01-3 (2013).
12. Y. W. Park, E. K. Hong J. H. Choi, *Fundamentals of Mobile Communications* (in Korean, Life & Power press, Paju, 2010), pp. 190-198.

저자 약력

▶ 서철원(Chulwon Seo)



2012년 2월: 부경대학교 전자정보통신공학부 학사
 2012년 3월 ~ 현재: 부경대학교 정보통신공학과 석사과정
 <관심분야> 수중음향통신, 디지털신호처리, 수중로봇제어

▶ 신정채(Jungchae Shin)



2007년 2월: 경북대학교 전자전기공학부 학사
 2004년 2월: 경북대학교 정보통신공학과 석사
 2010년 2월: 경북대학교 정보통신공학과 박사
 2010 ~ 현재: (주)한화 구미사업단 연구 2부 <관심분야> 수중음향 신호처리, 수중음향통신망

▶ 박지현(Jihyun Park)



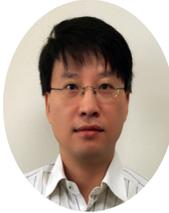
2000년 2월: 부산대학교 정보통신공학과 학사
 2002년 2월: 부경대학교 정보통신공학과 석사
 2008년 8월: 부경대학교 정보통신공학과 박사
 2008년 11월 ~ 현재: 부경대학교 음향진동연구소 선임연구원
 <관심분야> 수중음향통신시스템, 수중음향신호처리, 수중로봇제어

▶ 정진우(Jin Woo Jung)



2007년 2월: 숭실대학교 정보통신공학과 학사
 2009년 2월: 숭실대학교 정보통신공학과 석사
 2009 ~ 현재: (주)한화 구미사업단 연구 2부 <관심분야> 수중음향 신호처리, 수중음향통신망

▶ 박규철(Kyu-Chil Park)



1993년 2월: 부경대학교 전자공학과 학사
 1995년 2월: 부경대학교 전자공학과 석사
 2000년 3월: 일본 오카야마대학 자연과학연구과 박사
 2002년 3월 ~ 현재: 부경대학교 정보통신공학과 교수
 <관심분야> 음향정보처리, 역문제, 컴퓨터수치시뮬레이션

▶ 윤종락(Jong Rak Yoon)



1977년 2월: 부경대학교 어업물리 학사
 1980년 2월: 부경대학교 수산물리 석사
 1987년 2월: Florida Atlantic University 해양공학과 음향공학 전공 석사
 1990년 2월: Florida Atlantic University 해양공학과 음향공학 전공 박사
 1990년 4월 ~ 현재: 부경대학교 정보통신공학과 교수
 <관심분야> 수중음향, 수중음향통신, 음향신호처리