JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지(J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.) Vol. 20, No. 7 : 1229~1236 Jul. 2016

시 · 공간 변동 수중음향 채널에서 CAZAC 코드를 적용한 반송파 주파수 옵셋 보상 기법의 성능평가

박지현 · 배민자 · 김종주 · 윤종락*

Performance of Carrier Frequency Offset Compensation using CAZAC Code in Time and Spatial Variant Underwater Acoustic Channel

Jihyun Park · Minja Bae · Jongju Kim · Jong Rak Yoon*

Department of Information and Communication Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요 약

수중 음향 다중경로 채널에서 수중음향 통신 시스템의 성능은 채널의 시변적 경계면 상태 변동에 의해 영향을 받는다. 이러한 채널에서 시공간적 변동에 의해 송신 신호와 수신 신호의 위상과 주파수가 일치하지 않아 반송 주파수 옵셋이 발생되고 위상편이키잉 방식의 수중음향통신시스템의 성능을 저하시킨다. 본 논문에서는 수중 음향 통신 채널의 시 공간적 변동 채널에서 위상 코드를 적용한 반송 주파수 옵셋 보상 추정 기법의 성능을 평가하였다. 위상 코드는 주파수 옵셋을 추정하고 보상하기 위한 코드로 CAZAC를 적용하였으며, 실내 수조에서 성능을 평가하였다. QPSK 시스템에 위상코드를 적용한 결과는 적용하지 않은 경우보다 약 4-6배 비트오류율이 개선되었다.

ABSTRACT

In underwater acoustic multipath channel, a performance of underwater acoustic (UWA) communication systems is affected by dynamic variation of boundary and high temporal and spatial variability of the channel conditions. Time and spatial variations of UWA channel induce a carrier frequency offset (CFO) since a phase and a frequency of received signal mismatch with a transmitting signal. Therefore, a performance of a phase shift keying underwater acoustic communication system is degraded. In this study, we have analyzed a performance of CFO estimation and compensation using a phase code in time and spatial variation channel. A constant amplitude zero autocorrelation (CAZAC) signal is applied as a phase code signal and its performance is evaluated in water tank. The bit error rate of a quadrature phase shift keying (QPSK) system with a phase code is improved about 4 to 10 times better than that without a phase code.

키워드 : 수중 다중경로, 반송주파수 옵셋, CAZAC(constant amplitude zero autocorrelation) 코드, 수중 음향 통신 시스템

Key word : Underwater multipath, carrier frequency offset, CAZAC(constant amplitude zero autocorrelation), underwater acoustic communication system

Received 01 June 2016, **Revised** 02 June 2016, **Accepted** 13 June 2016

* **Corresponding Author** Jong Rak Yoon (E-mail:jryoon@pknu.ac.kr, Tel:+82-51-629-6233)
Department of Information and Communication Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

Open Access http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2016.20.7.1229 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

수중음향 통신 채널에서 다중경로의 시·공간적 변동성은 통신 성능을 좌우하는 주요 환경요인이다. 해면변동, 조석, 염도와 수온 그리고 해저의 반사 매질 특성 등은 시간 및 공간적 변동 특성을 가지고 있으며, 수중 다중경로로 송신되는 송신 신호의 각 경로 특성을 변화시킨다. 또한, 송신기와 수신기의 수심 및 거리, 송신 반송파 주파수 그리고 이동성을 가지는 수중 시스템의 위치 변동 등의 외적인 요인에 의해서도 영향을 받게 된다. 수중 음향 통신의 성능에 영향을 미치는 다른 환경요인으로는 흡수손실, 배경잡음, 도플러 등이 있다[1-3].

수중 다중경로 채널에서 시·공간적 변동 특성은 송신 신호는 진폭, 위상, 주파수 그리고 각 경로의 시간지연(time delay)에 영향을 준다. 따라서 디지털 수중음향 통신의 각 심벌 신호는 위상의 변화를 받게 되며 각각의 심벌신호는 다중경로에 의해 지연 확산되어 통신채널의 상관대역폭 (coherence bandwidth)이 제한되어 심벌 간 간섭 (inter symbol interference)이 발생된다. 시·공간적 변동 특성을 가지는 수중 다중경로 채널에서 통신시스템의 성능을 채널의 주파수 선택성 (frequency selective)과 페이딩을 매개변수로 하여 평가한 연구들이 있다[4-6].

최근 수중 다중경로 환경에 강인하고 대역 효율이 좋으며 고속 디지털 전송에 적합한 QPSK (Quadrature Phase Shift keying) 등의 위상변조 (phase modulation) 방식이 수중음향통신시스템에 적용되고 있다. 지연확산에 의한 오류감소를 위해 등화기 (equalizer)나 DLL (Delay Lock Loop)이 적용되고 잡음이나 페이딩에 대응하기 위한 채널코딩 (channel coding) 등이 적용되고 있다[6-9]. 그러나 수중음향 채널의 상관대역폭과 상관시간 (coherence time)의 시・공간적 변동성 및 이에 따른 프레임 동기 및 등화기의 탭 계수의 변동, 페이딩 변화 등에 의해 정확한 채널 파라미터의 설정이 어렵다. 아울러 수신 신호 처리기법의 복잡성과 고 사양의 시스템구조 및 전력소비의 증가 등은 통신 신뢰성 측면에서는 장애 요인이다.

위상 변조방식의 수중음향 통신시스템은 수신 신호 처리 과정에서 가장 중요한 기술 중의 하나는 반송주파수의 위상정보를 추출하는 것이다. 본 논문에서는 시·공간적으로 변동하는 수중 다중경로 채널에서 송신 신호와 수신 신호의 위상 및 진폭 그리고 주파수의 불일치에 따른 CFO (carrier frequency offset) 감소기법을 제시한다. 자기상관 (autocorrelation) 특성이 우수한 CAZAC (constant amplitude zero autocorrelation) 코드를 위상 코드 (phase code)로 사용하여 시·공간적 변동성에 따른 CFO를 추정하고 보상하였다. 실내수조 실험으로 수면변동에 따른 반송주파수 위상변동과 도플러 특성 결과를 분석하여 그 성능을 평가하였다.

Ⅱ. 수중 다중경로 채널의 변동특성과 CAZAC 코드를 적용한 위상코드

수중 다중경로 채널은 그림 1과 같이 경계면의 변동에 따라 각 경로의 송신 신호에 영향을 미치며, 시간지연에 의한 수신 신호의 지연확산이 발생한다. 수중 다중경로 채널의 임펄스 응답은 식(1)과 같다[10].

$$h(t,\tau)=\sum_{l=1}^{L}a_l(t)\,\delta(t-\tau_l(t)) \tag{1}$$

여기서, L은 다중경로 채널의 경로 수이며, $a_l(t)$와 $\tau_l(t)$는 l 차 다중경로의 시변 복소 진폭 및 전파 지연이다. $a_l(t)$는 주파수에 따른 흡수손실과 전파 손실 그리고 반사계수에 의존하다. 결과적으로 시변적 다중경로 채널에서 $a_l(t)$와 $\tau_l(t)$에 의해 송신 주파수는 도플러 확산 (Doppler spread)과 위상 천이 (phase shift)를 갖는다.

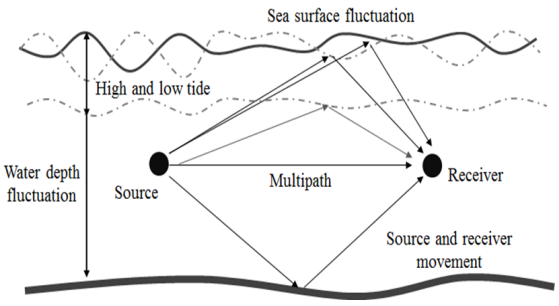

Fig. 1 Time and spatial variation of underwater acoustic multipath channel

디지털 수중음향 통신의 송신 신호는 연속(continuous) 또는 프레임 (frame) 단위로 송신된다. 송신신호는 각 경로의 특성에 영향을 받으며, 이로 인해 상관대역폭과 상관 시간이 변화한다.

상관대역폭은 수신 신호의 지연확산에 영향을 받으며 지연확산 유효치 τ_{rms}는 식(2)와 같다[11,12].

$$\tau_{\mathrm{rms}} = \sqrt{\overline{\tau^2} + \overline{(\tau)}^2} \tag{2}$$

여기서, $\overline{\tau^2}$는 평균제곱지연(mean square delay), $\overline{(\tau)}^2$ 평균초과지연(mean excess delay)이다. 지연확산 유효치 에 대한 채널의 상관대역폭은 식(3)과 같다[12].

$$B_c = \frac{1}{\tau_{rms}} \tag{3}$$

식(3)과 같이 채널의 상관 대역폭 B_c가 전송 대역폭 B_s에 비해 작다면($B_c < B_s$) 대역폭 제한에 의해 오류가 증가한다. 반대로 채널의 상관 대역폭 B_c가 전송 대역폭 B_s에 비해 크다면($B_c > B_s$) 오류 없는 전송이 가능하다. 따라서 다중경로에 의한 지연확산 특성은 채널의 상관대역폭이 제한되어 데이터 전송률을 제한하게 된다.

상관시간은 채널의 임펄스 응답이 변하지 않는 시간 구간으로 수중 다중경로 채널에서는 경계면의 변동과 지연확산 등에 의해 발생된다. 상관시간은 최대 도플러 천이(shift)에 관계되며, 식(4)와 같다[12].

$$T_c = \frac{1}{B_D} \tag{4}$$

여기서 T_c은 최대 도플러 천이 주파수 B_D에 관계되며, 각 심벌은 상관시간보다 짧게 설정하여 전송되어야 신뢰성 있는 성능을 확보할 수 있다.

이러한 조건에서 송신되는 신호라 하더라도 수신 측의 복조과정에서는 채널의 시·공간적 변동성에 의한 반송주파수 및 위상 변화가 정확히 추정되어야만 수신 측의 신호 대 잡음 비를 최대화할 수 있다. 위상 고정루프나 지연 고정루프를 이용하여 송신 신호의 위상천이 및 주파수 옵셋의 추정이 이루어지고 있다. 하지만 시공간 변화의 다중경로 채널에서 신뢰성 있는 강인한 성능을 얻는 것은 여전히 어려운 것으로 알려져 있다. 훈련 신호를 이용하여 심벌그룹을 이용한 위상추정을 시도한 연구도 있다. 본 연구에서는 시·공간적 채널 변동성에 의한 송신 신호의 주파수 옵셋을 추정하기 위해 상대적으로 구현이 단순하고 자기상관 특성이 우수한 CAZAC 코드를 시작 및 종료 위상 코드로 사용하였다. CAZAC 코드는 PN(pseudo noise)에 비해 높은 자기 상관 함수 특성을 가지고 있다. 또한 자기 상관 함수의 최대 피크를 제외한 주변의 자기상관 값에 의한 영향이 없어 시간 및 주파수 영역에서 동기화에 적용된다[9-15].

N 길이를 가지는 CAZAC 코드의 자기상관 함수는 식(5)와 같다[13].

$$c_x(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) x^*(k+m)_{\mathrm{mod}N} \tag{5}$$

여기서, N은 짝수이며, $x(k)$는 k에 대해 $|x(k)|=1$인 일정한 진폭으로 부엽(side lobe)은 0이 된다.

표 1은 CAZAC 코드 기반의 4-위상 심벌의 위상 코드이다. CAZAC 코드를 생성한 후 시작 위상 코드와 종료 위상 코드로 사용하고 QPSK의 I 채널과 Q채널의 위상 코드 정보를 추출한다. QPSK변조 방식에 적용된 위상 코드는 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} r_I(t) &= \cos(2\pi f_c t + \phi \pm \Delta\phi_{pcI}) \\ r_Q(t) &= -\sin(2\pi f_c t + \phi \pm \Delta\phi_{pcQ}) \end{aligned} \tag{8}$$

여기서, $r_I(t)$와 $r_Q(t)$는 QPSK 수신 신호의 I 채널과 Q채널의 신호이며, $\Delta\phi_{pcI}$와 $\Delta\phi_{pcQ}$는 각 채널의 시작 위상 코드와 종료 위상 코드의 위상변화량이다.

그림 2는 CAZAC 코드의 주파수 특성과 4-위상에 대응하는 시간 신호이다. 그림 2(a)는 반송파 주파수 30 kHz로 대역폭은 1 kHz이며, 그림 2(b) QPSK의 I 채널과 Q 채널 (0,0)에 대응되는 CAZAC 코드(-1, -j)의 시간 신호이다. 그림 2(c)는 I 채널과 Q 채널 (0,1)에 대응되는 CAZAC 코드(-1, +j), 그림 2(d)는 I 채널과 Q 채널 (1,1)에 대응되는 CAZAC 코드(1, +j), 그리고 그림 2(e)는 I 채널과 Q 채널 (1,0)에 대응되는 CAZAC 코드(1, -j)의 시간 신호이다. 4가지의 CAZAC 코드는 표 1의 위상 코드를 0.64초간 프레임의 앞단과 뒷단에 삽입하여 1초 프레임 전송 시 위상변화량을 추정한다.

Table. 1 CAZAC code of 4-phase symbols

CAZAC code elements c(m)	I channel	Q channel
C(0)	1	+j
C(1)	1	+j
C(2)	1	+j
C(3)	1	+j
C(4)	-1	+j
C(5)	-1	-j
C(6)	1	+j
C(7)	1	-j
C(8)	-1	-j
C(9)	1	+j
C(10)	-1	-j
C(11)	1	+j
C(12)	1	-j
C(13)	-1	-j
C(14)	-1	+j
C(15)	1	+j

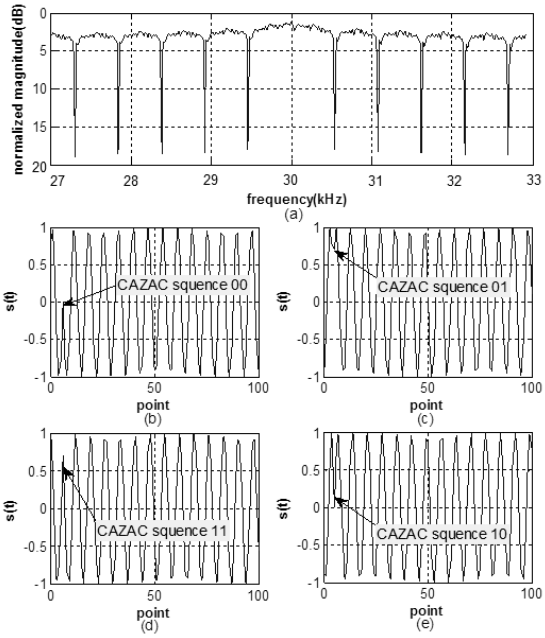

Fig. 2 4-phase code (CAZAC) sequence, (a) frequency response, (b) bit signal (00), (c) bit signal (01), (d) bit signal (11), (e) bit signal (10)

Ⅲ. 실험 및 결과

그림 3은 시·공간적으로 변동하는 수중 다중경로 채널에서 CFO 감소기법의 성능을 평가하기 위한 실내수조(2 x 1.5 x 1m) 실험 구성도이다. 수면파의 주기는 송신 프레임 보다 짧은 0.5 Hz로 하였으며, 파고는 0.2 m이다. 수심은 0.6 m, 송신기 (ITC-1001)와 수신기 (B&K 8106)의 수심은 각각 0.2 m이며, 거리는 1 m이다. 표 2는 실험 파라미터로 변조방식은 QPSK, 반송파 주파수는 30 kHz를 사용하였다. 총 전송된 이미지의 비트 수는 9800 비트이다.

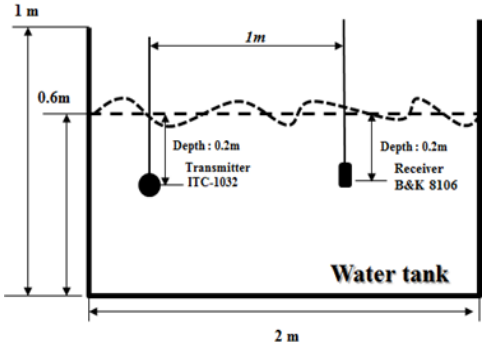

Fig. 3 Experiment configuration

Table. 2 Experimental parameters

Modulation	QPSK
Carrier frequency	30 kHz
Bit rate	100 sps
Transmission bit number	9800 bit
Transmitter / receiver distance	1 m
Transmitter / receiver depth	0.2 m/ 0.2 m
Water surface state	mirror and fluctuation

그림 4는 송신 프레임으로 CAZAC 코드를 이용한 시작 위상 코드를 0.64초 삽입하고, 동기를 위해 PN코드 0.12초, 정보데이터 0.5초 그리고 종료 위상코드 0.64초로 구성된 1초 송신프레임 구성도이다. 시작 위상 코드와 종료 위상 코드는 수중 다중경로 채널로 전송되는 과정에서 각 경로의 특성에 따라 진폭, 위상 그리고 주파수의 영향을 받게 된다. 이로 인해 송신프레임의 초기 동기 및 위상 변동의 영향을 받아 CFO가 증가한다.

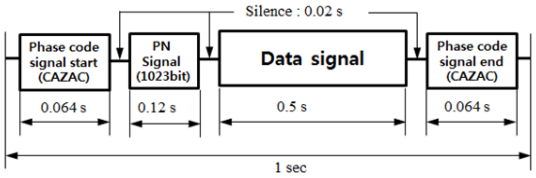

Fig. 4 Transmission frame structure for 1s period

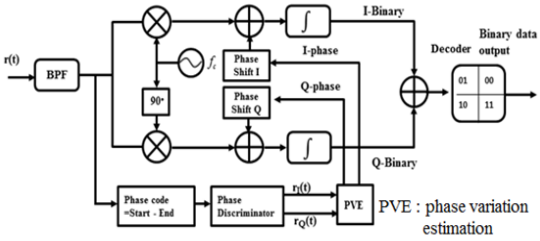

Fig. 5 Block diagram of CFO compensation using phase code in QPSK demodulation

그림 5는 CFO의 영향을 감소시키기 위해 위상코드 보상 방법의 구성도이다. 시작과 종료 위상 코드의 변동위상에 대한 변화량을 추출하고, 각 채널에서 변화한 위상변동 값을 식(8)과 같이 QPSK 복조 시 위상정보를 보상한다.

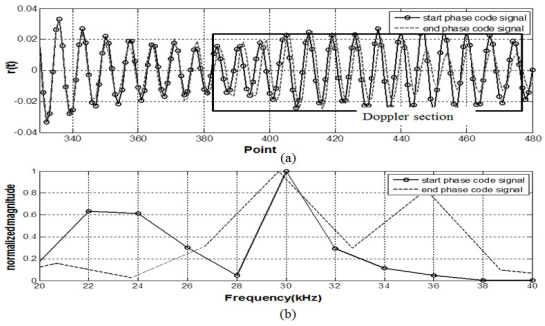

Fig. 6 Amplitude and phase variation and doppler shift in fluctuated water surface, (a) envelope and phase of start and end phase code signal, (b) Doppler shift

그림 6은 다중경로 채널에 전송된 송신 신호의 수신 시간 파형으로 그림 6(a)는 수변 변동에 의한 시작 위상 코드와 종료 위상 코드의 샘플 포인터에 따른 위상차와 와 도플러 천이에 대한 시간파형이다. 그림 6(b)는 도플러 발생구간의 주파수 특성으로 도플러 천이 주파수는 약 100 Hz로 나타났다. 이러한 수면변동은 송신 신호의 위상 및 주파수 변화를 야기하고 이에 따른 CFO 증가로 수중음향 통신 시스템의 성능은 저하된다.

그림 7(a)는 시작 위상 코드와 종료 위상 코드의 진폭 및 위상 변화이며, 1초 프레임 전송 시 수변 변동이 신호의 진폭과 위상에 영향을 주고 있다. 그림 7(b)는 시작과 종료 위상 코드의 위상변화량을 보이는 것으로 최소 10°에서 최대 100°의 위상변화를 확인하였다. 이러한 위상변화는 CFO에 의한 오류를 야기한다.

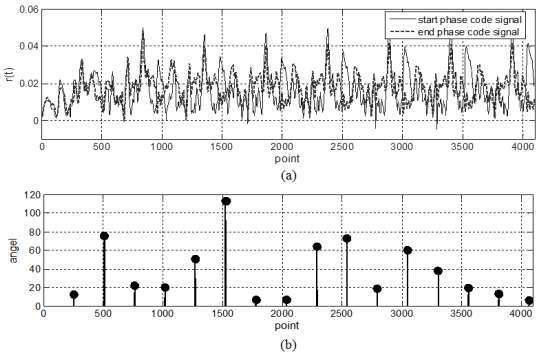

Fig. 7 Amplitude and phase variation of phase code signal in fluctuated water surface, (a) envelope of start and end phase code signal, (b) phase difference of start and end phase code signal

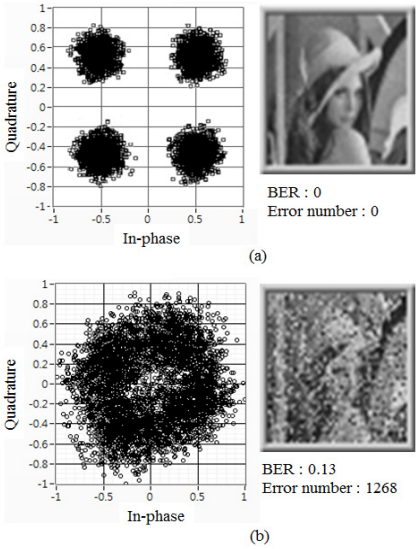

Fig. 8 Image transmission performance in water tank channel, (a) mirror state, (b) fluctuation state

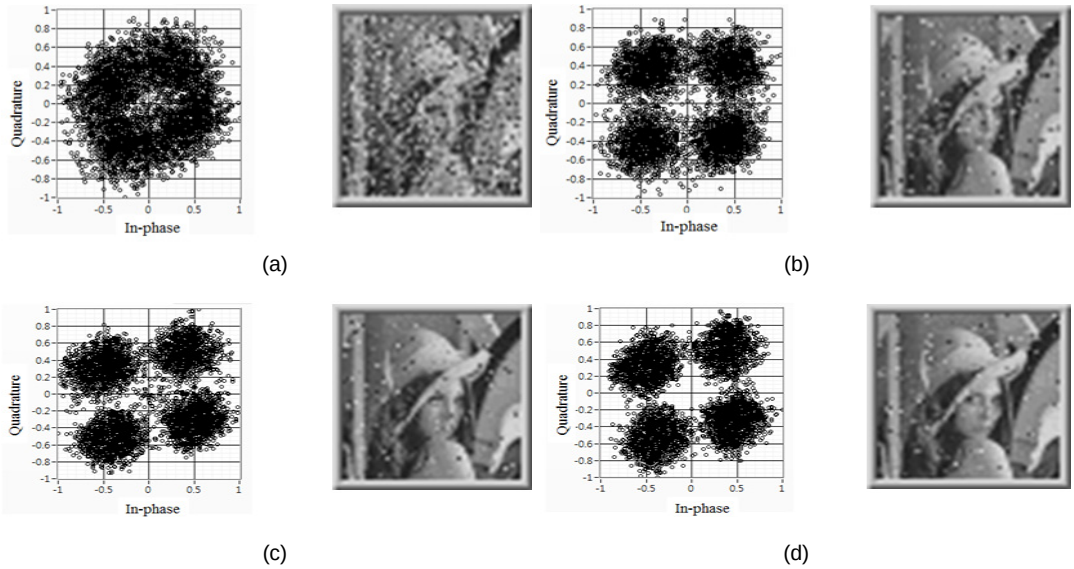

Fig. 9 Constellations and received images for three different phase weight, (a) Exp.1; I=0, Q=0, (b) Exp.2; I=$\pi/4$, Q=$3\pi/4$, (c) Exp.3; I=$\pi/2$, Q=$3\pi/4$, (d) Exp.4; I=$\pi/4$, Q=$3\pi/4$

그림 8은 PN 신호를 이용한 프레임 동기만 한 경우의 거울 및 변동하는 수면 상태의 수신 이미지 대한 성상도와 복원 이미지이다. 그림 8(a)는 거울 상태의 전송성능으로 오류는 없다. 그림 8(b)는 수면 변동이 있는 상태의 전송성능으로 BER은 0.13으로, CFO의 영향으로 오류가 증가함을 보인다.

그림 9와 표 3은 수면 변동 상태에서 위상 코드의 CFO보상기법의 성능평가 결과이다. Exp. 1은 CFO추정 및 보상을 하지 않은 경우로 총 전송비트 9800 비트에서 오류비트 수는 1268개, 오류율은 0.13으로 나타났다. Exp. 2는 CFO추정을 위한 위상 코드 보상 값을 I 채널 $\pi/4$, Q채널 $3\pi/4$로 보상한 결과이며, 오류 비트 수 327개, 오류율은 0.033으로 Exp. 1에 비해 약 4배의 성능 개선을 보인다.

Exp. 3과 Exp. 4는 CFO추정을 위한 위상코드 보상 값을 I 채널 $\pi/2$, $3\pi/4$, Q채널 $\pi/4$, $3\pi/4$로 보상한 결과이다. 각각의 오류율은 0.029, 0.013으로 보상을 하지 않은 Exp. 1에 비해 각각 약 4배와 10배의 성능 개선을 보인다.

실험 결과로부터 위상변조 방식의 수중음향 통신 시스템의 CFO 추정 및 보상을 위해 CAZAC 코드로 위상 코드를 적용하면 비트오류율은 약 4~10배 개선된다고 할 수 있다.

Table. 3 Performance of carrier frequency offset estimation

Exp. no	CFO estimation weight	BER and Error number
Exp.1	I channel : 0	BER : 0.13, Error number :1268
	Q channel : 0	
Exp.2	I channel : $\pi/4$	BER : 0.033, Error number :327
	Q channel : $3\pi/4$	
Exp.3	I channel : $\pi/2$	BER : 0.029, Error number :273
	Q channel : $3\pi/4$	
Exp.4	I channel : $\pi/4$	BER : 0.013, Error number :128
	Q channel : $3\pi/4$	

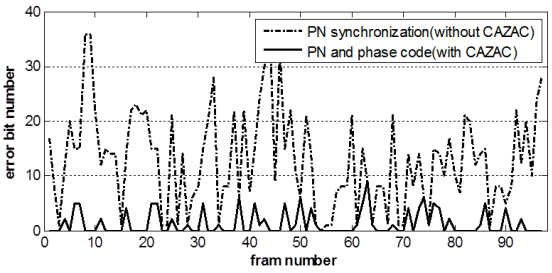

Fig. 10 Performance comparison of phase code

그림 10은 PN 코드로 동기화한 성능과 PN 코드와 위상 코드를 적용한 성능평가 결과이다. 위상 코드를 적용 전과 후의 비트오류는 각각 1268개 및 128개로 약 10배의 성능 차이를 보인다. 또한 각 프레임 별 오류에서도 CFO 보상 후가 낮은 오류 비트가 발생하였다.

Ⅳ. 결 론

수중 다중경로 채널의 시·공간적 변동에 의한 CFO 감소 기법의 성능을 평가하였다. 실내 수조의 수면 변동에 따른 시·공간적 수중음향통신 채널 변동으로 송신 신호는 100 Hz의 도플러 천이가 발생되었으며, 따라서 위상과 주파수 변동에 의해 CFO가 증가되었다. 이러한 음향 채널에서 CAZAC 시퀀스로 위상 코드를 적용하여 CFO를 보상하였다. QPSK 변조 방식에 위상코드를 적용한 경우, 비트 오류율은 적용하지 않은 경우보다 약 4～10배 개선됨을 확인하였다. 결론적으로 시·공간적 변동하는 수중 다중경로 음향채널에 위상코드를 적용하면 위상 변화에 민감한 위상변조 방식의 수중음향 통신 시스템의 성능을 개선할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the ‘ISABU Creative research Program (PE99361)’ of the Korea Institute of Ocean Science & Technology (KIOST).

REFERENCES

[1] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3th ed. New York, NY:McGraw-Hill, 1983.

[2] H. Medwin, C. S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, New York, NY:Academic Press Company, 1998.

[3] Stojanovic, M, Preisig, J., “Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, pp. 84-89, Jan. 2009.

[4] J. Kim, K. Park, J. Park, and J. R. Yoon, “Coherence bandwidth effects on underwater image transmission in multipath channel,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 50, no. 7, pp. 07HG05-1-07HG05-5, Nov. 2011.

[5] K. Park, J. Park, S. W. Lee, J. W. Jung, J. Shin and J. R. Yoon, “Performance evaluation of underwater acoustic communication in frequency selective shallow water,” *Journal of the Acoustical Society of Korea*, vol. 32, no. 2, pp. 95-103, Feb. 2013.

[6] J. Park, C. Seo, K. Park, and J. R. Yoon, “Effectiveness of Convolutional Code in Multipath Underwater Acoustic Channel,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 52, no. 7, pp. 07HG01-1-07HG01-3, Jul. 2013.

[7] D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer, “The state of the art in underwater acoustic telemetry,” *IEEE Oceanic Engineering Society*, vol. 25, pp. 4-27, Jan. 2000.

[8] L. Liu, Y, Wang, L. Li, X. Zhang and J. Wang, “Design and implementation of channel coding for underwater acoustic system,” *ASICON '09. IEEE 8th International Conference*, Changsha, pp. 497-500, 2009.

[9] Y. R. Zheng, “Channel Estimation and Phase-Correction for Robust Underwater Acoustic Communications,” *MILCOM 2007 - IEEE Military Communications Conference*, Orlando: FL, pp.1-6, 2007.

[10] H. Fang, X. Hu and Ru Xu, “An Implementation of time and frequency synchronization for Carrier Interferometry OFDM in and Underwater Acoustic Channel,” *Circuits, Communications and Systems, 2009. PACCS '09. Pacific-Asia Conference*, Chengdu, pp. 23-26, 2009.

[11] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2th ed. New Hersey, NJ:Prentice-Hall, 2002.

[12] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 1993.

[13] J. Meng and G. Kang, “A novel OFDM synchronization algorithm based on CAZAC sequence,” *Proc. Int. Confer. Comput. App. Sys. Modeling (ICCASM)*, Taiyuan, pp.634-637, 2010.

[14] X. Hu, R. Xu, W. Wei, J. Liu and Y. Xie, “A novel scheme of Timing Synchronization For OFDM Underwater Communication System,” *OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*, Kobe, pp. 1-5, 2008.

[15] J. Tao, Y. R. Zheng, C. Xiao, T. C. Yang and W. Yang, “Channel Estimation, Equalization and Phase Correction for Single Carrier Underwater Acoustic Communications ,” *OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*, Kobe, pp. 1-6, 2008.

박지현(Jihyun Park)

2000 밀양대학교 정보통신공학과 학사
2002 부경대학교 정보통신공학과 석사
2008 부경대학교 정보통신공학과 박사
※관심분야 : 수중 음향, 수중 통신 시스템, FPGA설계

배민자(Minja Bae)

1993 부경대학교 정보통신공학과 학사
1995 부경대학교 전자공학과 석사
2007~현재 : 지니테크 대표이사
※관심분야 : 수중통신, 디지털 신호 처리, 통화 품질측정 알고리즘, 패킷신호처리

김종주(Jongju Kim)

1996 부경대학교 정보통신공학과 학사
2014 부경대학교 정보통신공학과 석사
2013~현재 : 뉴디어스 대표이사
※관심분야 : 수중통신, 디지털 신호 처리, 실시간 패킷 처리

윤종락(Jong Rak Yoon)

1987 Florida Atlantic University Dept. of Ocean Engineering M.S
1990 Florida Atlantic University Dept. of Ocean Engineering Ph.D
1990~현재 부경대학교 정보통신공학과 교수
※관심분야: 수중 음향, 음향 신호 처리, 음향 신호 해석 및 식별, 수중 음향 통신