

서해 실효역에서 CSS 기반 저전력 수중 통신 시스템의 성능 분석에 대한 연구

이 태 석*, 김 준 호*, 고 학 림*, 조 용 호°

Performance Analysis of CSS Based Low-Power Underwater Communication Systems in Western Sea of Korea

Tae-Seok Lee*, Jun-Ho Kim*, Hak-Lim Ko*, Yong-Ho Cho°

요 약

해양 자원 확보를 위한 개발 탐사, 수중 환경 관측, 재해 감지, 해양 방위 등의 중요성이 높아지면서 수중 통신 기술 연구가 활발히 진행되고 있다. 수중 통신의 전송 방식으로는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing), CDMA(Code Division Multiple Access), 그리고 chirp 신호 등이 많이 활용되고 있다. Chirp 신호는 주파수가 시간에 따라 연속적으로 변화하는 신호이며, LFM(Linear Frequency Modulation), HFM(Hyperbolic Frequency Modulation), Zad-offchu, CSS(Chirp Spread Spectrum) 방식 등으로 활용되고 있다. Chirp 신호를 활용하는 방식 중의 하나인 CSS 방식은 잡음과 도플러 천이에 높은 강건성을 갖기 때문에 육상의 저전력 통신 시스템에서 크게 활용되고 있다. 본 논문에서는 수중 통신을 위한 CSS 방식의 성능을 분석하였다. 특히 잡음에 강건한 특성을 확인하고자 충청남도 태안군 인근 천해역에서 OFDM 방식과 성능 비교 실험을 수행하였다. 실험결과 OFDM 방식대비 CSS 방식이 낮은 비트 오류율과 블록 오류율을 가짐을 확인하였다. 서로 다른 Spreading Factor(SF)와 대역폭을 갖는 CSS 방식에 따른 성능 비교 실험을 수행하였다. 실험 결과 SF 8을 갖는 CSS 방식이 잡음과 도플러 천이에 모두 높은 강건성을 보임을 확인하였다. 따라서 실효역 환경에서 CSS 방식을 활용시 SF 8을 기본으로하고 대역폭을 가변하여 전송률을 조절하는 것이 수중에서 잡음과 도플러 천이에 대해 안정적인 통신을 수행할 수 있음을 확인하였다.

Key Words : underwater, CSS, chirp, acoustic communication, low-power

ABSTRACT

As the importance of exploration for underwater resources, observation for underwater environment, disaster monitoring, and marine defense increases, research on underwater communication technology is being conducted actively. OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing), CDMA(Code Division Multiple Access), and chirp signals are widely used as a transmission method for underwater communications. The chirp signal means that the frequency changes continuously over time, and is used in LFM(Linear Frequency Modulation), HFM(Hyperbolic Frequency Modulation), Zad-offchu, and CSS(Chirp Spread Spectrum) methods. The CSS method has high robustness against noise and Doppler shift. Due to this characteristic, the CSS method is widely used in

* 이 논문은 2019년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(분산형 수중관측 제어망 개발)

• First Author : Hoseo University Department of Information and Telecommunication Eng., Itaeseok88@naver.com, 학생회원

° Corresponding Author : Hoseo University Department of Information and Telecommunication Eng., yhcho@hoseo.edu, 정회원

* Hoseo University Department of Information and Telecommunication Eng., katurablue@naver.com, 정회원

* Hoseo University Department of Information and Telecommunication Eng., hlko@hoseo.edu, 종신회원

논문번호 : 201910-255-C-RE, Received October 30, 2019; Revised November 14, 2019; Accepted November 14, 2019

commercialization systems for low power communication on land. In this paper, the performance of the CSS method is analyzed based on the at-sea experiment. In order to assess the robustness against the noise and Doppler shift, comparison of the performance between the CSS and OFDM methods is conducted in the shallow waters near Taean-gun, Chungcheongnam-do. It is analyzed by the results of the experiment that the CSS method shows the improved bit error rate and block error rate compared to the OFDM method. In addition, performance of the CSS methods with different spreading factors(SFs) and bandwidth is analyzed. It is analyzed by the CSS method with SF of 8 has good robustness against noise and Doppler shift. Therefore, it is feasible to use the CSS method with the SF of 8 and the variable bandwidth for adaptive data rate for reliable underwater communication.

I. 서 론

해양 자원 확보를 위한 개발 탐사, 수중 환경 관측, 재해 감시, 해양 방위 등의 중요성이 높아지면서 수중 통신 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 수중 통신의 전송 방식으로 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing), CDMA(Code Division Multiple Access), 그리고 chirp 신호 등이 많이 활용되고 있다.

Chirp 신호란 주파수가 시간에 따라 연속적으로 변화하는 것을 의미하며 Linear Frequency Modulation(LFM), Hyperbolic Frequency Modulation(HFM), Zad-offchu, Chirp Spread Spectrum(CSS) 방식 등으로 활용되고 있다. Chirp 신호는 도플러에 강건한 특성을 가져 레이더의 신호로써 많이 활용되어 왔다^[1]. 국내에서는 특히 이러한 chirp 신호를 기반으로 동해 실험역에서 약 2kHz의 반송 주파수, 4bps의 전송률, 64개의 수신 센서를 활용하여 60km에서 BER 0, 90km에서 BER 0.0007 ~ 0.0197 성능을 확인한 연구 사례가 있다^[2].

CSS 방식은 chirp 신호를 기반으로 하며, 육상에서 상용화된 LoRa(Long Range)의 물리 계층 방식으로 크게 알려졌다. CSS 방식은 1940년대에 레이더 어플리케이션을 위해 개발되었다^[3]. CSS 방식은 IEEE가 OQPSK DSSS 방식 등으로 달성할 수 있는 성능보다 더 긴 범위와 이동성을 요구하는 어플리케이션을 위해 LR-WPAN(Low-Wate Wireless Personal Area Networks) 802.15.4 표준에 채택되었다^[3].

CSS 변조 기법에서, 스펙트럼의 확산은 주파수가 연속적으로 변하는 chirp 신호를 생성함으로써 달성된다. CSS 방식은 도플러 천이에 강한 특징을 가지며, 전달 및 잡음에도 강한 강인성을 갖고 있기 때문에 육상에서 저전력 통신에 활용되고 있다^[4,5]. CSS 방식이 가진 장점으로 인해 수중 통신에 CSS를 활용하기 위

한 연구가 활발히 진행되고 있다^[6-13]. 국내에서는 주로 은밀 통신을 위해 CSS 방식이 활용되고 있다^[6,9]. 국외에서는 CSS 방식을 기반으로 새로운 기법을 제안하려는 연구들이 확인되었다^[10-13]. 논문 [10]에서는 chirp 신호의 자가 압축, 순환 쉬프트 및 처프 속도 직교성을 증명하기 위해 수학적 도출하였다. 그리고 chirp 신호를 활용하여 중국 후리구 샤먼시의 항구에서 부두 실험을 수행하였다. 논문 [11]에서는 CSS 방식을 기반으로 광섬유 통신 분야에서 도입된 OCDM(Orthogonal Chirp Division Multiplex)이라는 새로운 변조 방식을 소개하였다. 그리고 수중 채널을 바탕으로 OFDM 대비 OCDM 변조 방식의 성능 분석을 수행하였다. 논문 [12]에서는 높은 PAPR 영향을 효과적으로 완화시키기 위한 CSK(Cyclic Shift Keying) 변조와, 주파수 선택적 페이딩을 완화시키기 위해 CSS 변조를 결합한 CSK-CSS-OFDM 시스템을 제안하였다. 논문 [13]에서는 CSS 방식에 기반한 QOCM(Quasi-Orthogonal Chirp Multiplexing) 방식을 새로이 제안하였으며, 시뮬레이션 및 수조 실험을 통해 제안한 방식의 성능을 OFDM 방식과 비교하였다.

OFDM 방식은 주파수 선택적인 채널에 강점이 있어 다수의 다중 경로를 갖는 수중 채널 환경에서 보다 원활한 통신을 수행할 수 있게 한다^[14]. 등화 성능의 향상을 통해 OFDM 방식은 수중에서의 고속 데이터 전송을 가능하게 한다. 단일탐 등화기, 다중경로 강건성, 높은 주파수 대역 효율성, 그리고 높은 전송률 등의 장점들로 인해 OFDM 방식은 수중 통신에 보편적으로 활용되고 있다.

본 논문에서는 수중 통신을 위한 CSS 방식의 성능을 분석하였다. 특히 잡음에 강건한 특성을 확인하고자 충청남도 태안군 인근 천해역에서 OFDM 방식과 성능 비교 실험을 수행하였다.

II. 시스템 모델

그림 1과 표 1에 실측에 활용된 송출 신호 구조에 대한 상세가 나타난다. 첫번째 경우(그림 1(a))에 해당하는 프레임은 바탕으로 실험을 통해 CSS의 잡음 강건성을 확인하였다. 두번째 경우에 해당하는 프레임은 바탕으로 잡음 강건성 대비 도플러 천이 강건성 소실 정도를 실험을 통해 재확인하였다. 이를 통해 IV절에서 실험에 활용될 수 있는 수증음향 CSS 시스템의 최적 파라미터에 대한 고찰을 수행하였다.

그림 2에 AWGN 기반 비트오류율 성능곡선이 나타난다. 시뮬레이션 수행 결과, CSS SF10의 신호는 -17dB의 SNR에서 BER 10^{-3} 의 성능을 기록하였다. CSS의 이러한 잡음에 강건한 특성은 한 심볼 당 보내는 비트 수가 많기 때문에 가능하다고 알려져 있다³⁾. 한 심볼 당 보내는 비트 수가 늘어남에 따라, SF 수치가 1 증가할 때마다 BER 10^{-3} 기준 2~4dB 정도의 성능 차이가 보임을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 활용한 OFDM 신호들의 경우 BER 10^{-3} 기준 0~4dB 정도의 성능을 보임을 확인하였다. 이러한 수치는 SF 4일 때의 CSS 신호가 가지는 성능과 근사함을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션을 통해 CSS 신호가 기존 수증 통신에 보편적으로 활용되던 OFDM 신호에 비해 잡음에 더 강건함을 확인하였다. 이 결과를 바탕으로 첫번째 경우(그림 1(a))에 대한 실측 프레임을 구성하였다.

두번째 경우(그림 1(b))는 CSS의 잡음에 강한 특성

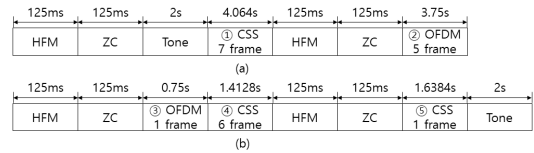


그림 1. 송출 신호 구조 (a=경우 1, b=경우 2)
Fig. 1. Data transmission format (a=case 1, b=case 2)

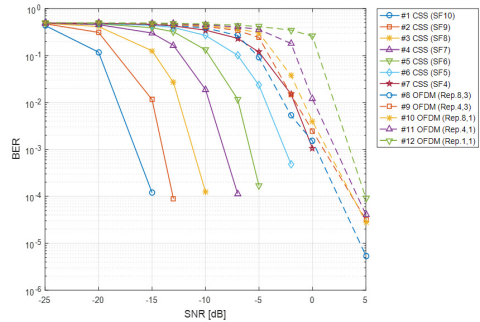


그림 2. 비트오류율 성능곡선 (AWGN)
Fig. 2. BER curve (AWGN)

을 최대한 얻으면서도 도플러 천이에 대해 강건성을 잃지 않는 최대점을 확인하기 위한 실측 프레임을 구성하였다. 실험적 수증 통신에서는 강한 조류로 인해 송수신 센서에 이동성이 생기면서 큰 도플러가 발생하게 된다. 따라서 실험적 통신을 위해서는 도플러에 대한 강건성이 크게 고려되어야 한다. 본 논문에서는 모호성 함수(ambiguity function)를 활용하여 파형의 도플러 천이 강건성을 확인한다. 모호성 함수에 대한

표 1. 송출 신호 구조에서의 프레임 상세
Table 1. Frame Details in data transmission format

경우 1 (a)				경우 2 (b)			
프레임	#	비고	전송률	프레임	#	비고	전송률
① CSS 7 frame	1	SF 10	48.8 bps	④ CSS 6 frame	1	Rep. 8,3	38.6 bps
	2	SF 9	87.8 bps		1	SF 10, BW 5kHz	48.8 bps
	3	SF 8	156.2 bps		2	SF 10, BW 4kHz	39.1 bps
	4	SF 7	273.4 bps		3	SF 11, BW 5kHz	26.8 bps
	5	SF 6	468.7 bps		4	SF 10, BW 2kHz	19.5 bps
	6	SF 5	781.2 bps		5	SF 12, BW 5kHz	14.6 bps
	7	SF 4	1,250 bps		6	SF 10, BW 1kHz	9.7 bps
② OFDM 5 frame	1	Rep. 8,3	38.6 bps	⑤ CSS 1 frame	1	SF 13, BW 5kHz	7.9 bps
	2	Rep. 4,3	93.3 bps				
	3	Rep. 8,1	149.3 bps				
	4	Rep. 4,1	314.6 bps				
	5	Rep. 1,1	1,306 bps				

수식은 다음과 같이 표현된다^[15].

$$|X(\tau, f_d)|^2 = \left(\int_{-\infty}^{\infty} s(t) s^*(t+\tau) e^{j2\pi f_d t} dt \right)^2 \quad (1)$$

모호성 함수는 식 1과 같이 2차원 상관관계 함수의 모듈러 제곱으로 정의된다. 여기서 $s^*(t+\tau)$ 는 시간 지연에 대한 응답을 확인한다. $e^{j2\pi f_d t}$ 는 도플러 천이에 대한 응답을 확인한다. 모호성 함수를 활용하면 도플러 천이에 따른 상관값의 변화를 통해 도플러 천이에 의한 강건성을 확인할 수 있다. CSS 신호의 모호성 함수 적용 결과가 그림 3-5에 나타난다.

식 1의 모호성 함수에서 시간 지연을 0로 설정한 상태에서 도플러 천이에 강건한 정도를 확인하였다. 그림 3에서 우측 그림은 좌측의 그림에서 최대 상관성 기준 -3dB가 되는 지점을 기준으로 확대하여 나타내었다.

그림 3에서 $\pm 120\text{Hz}$ 이내의 도플러 천이에서는 상관성이 크게 소실되지 않음을 확인할 수 있다. 이를 통해 SF 4, BW 5kHz의 신호가 도플러 천이에 매우 강건함을 알 수 있다.

그림 4와 5에서 확산 계수(SF; Spreading Factor)가 높아질수록 최대 상관성 기준 -3dB 값이 점차 줄어들음을 확인할 수 있다. 즉 확산계수가 높아질수록 잡음에 강건한 특성을 갖지만 도플러 천이 강건성이 감소됨을 알 수 있다.

표 2를 통해 각 경우별 CSS 프레임 구조에 따른 도플러 천이 강건성 정도를 확인할 수 있다. 이 때 도플러 천이 추정값은 모호성 함수 적용(Zero delay) 시 최대 상관성 기준 -3dB 지점에서의 도플러 천이 수치를 의미한다. 첫번째 경우(그림 1(a))에서의 CSS 프레

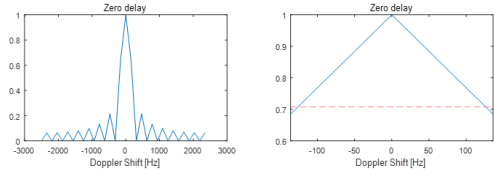


그림 3. 모호성 함수 적용 결과 (CSS SF:4, BW:5kHz)
Fig. 3. Ambiguity result (CSS SF:4, BW:5kHz)

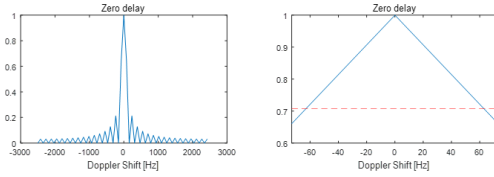


그림 4. 모호성 함수 적용 결과 (CSS SF:5, BW:5kHz)
Fig. 4. Ambiguity result (CSS SF:5, BW:5kHz)

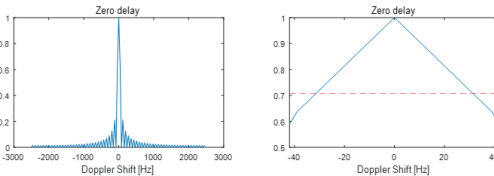


그림 5. 모호성 함수 적용 결과 (CSS SF:6, BW:5kHz)
Fig. 5. Ambiguity result (CSS SF:6, BW:5kHz)

임들은 최소 $\pm 1.87\text{Hz}$ 이상의 도플러 천이에서도 양호한 성능을 보일 것으로 기대할 수 있다.

논문 [14]에 서해 인천 인근 해역에서의 24시간 실험에 따른 수중 채널의 변화가 나타난다. 해당 논문의 경우 앵커링을 한 반고정 상태였기에 1.5Hz 이내의 도플러 천이(Threshold -15dB)가 나타났다. 위와 같은 경우에는 SF 10 이하의 파라미터를 갖는 CSS 방식

표 2. 송출 신호 구조에서의 프레임 상세
Table 2. Frame Details in data transmission format

경우 1 (a)					경우 2 (b)				
프레임	#	비고	전송률	도플러 천이 강건성	프레임	#	비고	전송률	도플러 천이 강건성
CSS	1	SF 10	48.8 bps	$\pm 1.87\text{Hz}$	CSS	1	SF 10, BW 5kHz	48.8 bps	$\pm 1.87 \text{ Hz}$
	2	SF 9	87.8 bps	$\pm 3.75\text{Hz}$		2	SF 10, BW 4kHz	39.1 bps	$\pm 1.5 \text{ Hz}$
	3	SF 8	156.2 bps	$\pm 7.5\text{Hz}$		3	SF 11, BW 5kHz	26.8 bps	$\pm 0.93 \text{ Hz}$
	4	SF 7	273.4 bps	$\pm 15\text{Hz}$		4	SF 10, BW 2kHz	19.5 bps	$\pm 0.7 \text{ Hz}$
	5	SF 6	468.7 bps	$\pm 30\text{Hz}$		5	SF 12, BW 5kHz	14.6 bps	$\pm 0.46 \text{ Hz}$
	6	SF 5	781.2 bps	$\pm 60\text{Hz}$		6	SF 10, BW 1kHz	9.7 bps	$\pm 0.3 \text{ Hz}$
	7	SF 4	1,250 bps	$\pm 120\text{Hz}$		7	SF 13, BW 5kHz	7.9 bps	$\pm 0.23 \text{ Hz}$

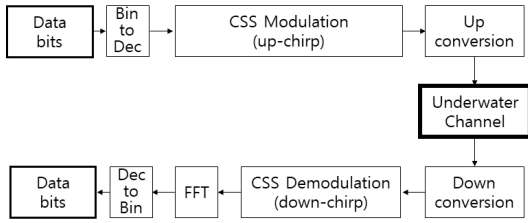


그림 6. CSS 시스템 블록도
Fig. 6. CSS system block diagram

이 도플러로 천이 인한 성능 감쇠가 적을 것임을 기대할 수 있다. 두번째 경우(그림 1(b))의 CSS 프레임에서는 도플러 천이 강건성의 소실에 따른 성능 감쇠를 확인하기 위해 SF와 대역폭을 조절하여 도플러 천이 강건성을 임의로 낮추었음을 표 2를 통해 확인할 수 있다. 이에 따라 1.5Hz 이내의 도플러에서도 두번째 경우의 CSS 프레임에서는 큰 성능 감쇠를 얻게 될 것으로 예상하였다.

송출 신호는 HFM 신호, z adoff-chu 신호, tone 신호, OFDM 신호, 그리고 CSS 신호로 구성된다. HFM 신호는 시간 동기를 검출하는데 사용하였다. z adoff-chu 신호는 뒤 프레임에 대한 인덱스를 나타내는 용도로 사용하였다. tone 신호는 도플러의 확산 정도와 천이 정도를 추정하기 위해 사용하였다. 기존 수중통신에서 활발히 활용되는 OFDM 신호를 CSS 신호와의 성능 비교 용도로써 사용하였다.

송신단에서 HFM 신호는 다음과 같이 표현된다^[16].

$$x_{HFM}(l) = \exp\left(j2\pi\left(\frac{\ln(\alpha l + (1/f_{\min}))}{\alpha}\right)\right) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{T f_{\max} f_{\min}} \quad (3)$$

여기서 T는 HFM 신호의 길이를 의미한다. 본 연구에서는 f_{\min} 과 f_{\max} 가 각각 2.5kHz와 7.5kHz의 값을 가진다.

Z adoff-chu 신호, $x_p(n)$ 는 다음과 같이 표현된다^[17].

$$x_p(n) = \frac{1}{N_{FFT}} \sum X(k) \exp\left(j\frac{2\pi}{N}kn\right) \quad (4)$$

$$X(k) = \begin{cases} x_{ZC}(i), & k = \text{even}, N_{GB} < k < N_{FFT} - N_{GB} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$x_{ZC}(i) = \exp\left(j\frac{\pi u}{N_{ZC}}i^2\right), i = 0, 1, \dots, N_{ZC} - 1, N_{ZC} = 199 \quad (6)$$

여기서 N_{ZC} , N_{GB} , N_{FFT} 는 각각 z adoff-chu 신호의 길이, 주파수 도메인에서의 가드구간 길이, FFT(Fast Fourier Transform) 연산의 크기를 의미한다. u는 ZC 신호의 root index를 의미한다.

송신단에서 tone 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$x_{Tone} = Re\left\{e^{j2\pi f_0 t}\right\} \quad (7)$$

여기서 tone 신호의 반송 주파수 f_0 는 23.5kHz를 사용하였다.

그림 8에 전체적인 수중 음향 CSS 시스템의 블록 다이어그램이 나타난다. 송신단에서는 전송 심볼을 초기 천이값에 할당하여 up-chirp 신호를 생성한다. 저대역 CSS 신호 생성에 대한 수식은 다음과 같이 표현된다^[5].

$$S_{CSS}(k) = e^{j\theta(k)}, k = 0, 1, \dots, N_{CSS} - 1 \quad (8)$$

$$\theta(k) = \sum_0^k j2\pi f(k) T, \theta(k) \in [-\pi, \pi] \quad (9)$$

$$N_{CSS} = 2^{SF} \times \frac{FS}{BW} \quad (10)$$

$$f(k) = \left(\frac{BW}{2^{SF}} \times \left(k + \tau + \frac{BW}{FS}\right)\right) + f_{ofs}, \text{ up-chirp} \quad (11)$$

$$\left(k + \tau + \frac{BW}{FS}\right) \in [0, 2^{SF} - 1] \quad (12)$$

$$f_{ofs} = \left(\frac{FS}{2}\right) - \left(\frac{BW}{2}\right) \quad (13)$$

여기서 T는 주기를 의미한다. τ 는 초기 천이값을 의미한다. SF는 spreading factor를 의미한다. SF가 높을수록 더 강한 전달특성과 낮은 전송률을 가지게 된다. BW는 bandwidth를 의미한다. FS는 sampling frequency를 의미한다. N_{CSS} 는 CSS 샘플 갯수를 의미한다. f_{ofs} 는 주파수 오프셋 수치를 의미한다.

송신단에서는 수집된 CSS 수신호에 초기 천이값을 0으로 설정한 down-chirp 신호를 곱한 후 FFT를 취함으로써 복조를 수행한다. 복조 과정에 대한 수식은

다음과 같이 표현된다.

$$y = \operatorname{argmax}(FFT(r_{CSS} \times ref_{CSS})) - 1 \quad (14)$$

$$ref_{CSS}(k) = e^{j\theta(k)}, k = 0, 1, \dots, N_{CSS} - 1 \quad (15)$$

$$\theta(k) = \sum_0^k j2\pi f(k) T, \theta(k) \in [-\pi, \pi] \quad (16)$$

$$f(k) = BW - \left(\frac{BW}{2^{SF}} \times \left(k + \frac{BW}{FS} \right) \right) + f_{ofs, down-chirp} \quad (17)$$

$$\left(k + \frac{BW}{FS} \right) \in [0, 2^{SF} - 1] \quad (18)$$

여기서 y 는 복조 과정을 통해 도출된 심볼값을 의미한다. r_{CSS} 는 수신된 CSS 신호를 의미한다. FFT는 fast fourier transform을 의미한다.

III. 실험역 측정 환경

서해 실험역에서 수중 음향 CSS 시스템의 성능을 분석하기 위해 19년 8월 20일 충청남도 태안군 모항항 인근 해역에서 실험역 실험을 수행하였다.

그림 7에 실험이 수행된 측정 위치가 나타난다. 태안군 모항항 인근 해역에서의 측정 당시 송신 선박과 수신 선박의 GPS 좌표는 36°54'32.2"N 126°11'40.3"E, 수신 선박의 좌표는 36°54'54.4"N 126°12'29.8"E였다. 송수신 선박 사이의 거리는 GPS를 이용하여 1-2km의 거리를 이격시킨 후 닻을 내려 송신 선박과 수신 선박의 위치를 고정하였다.

그림 10에 실험역 측정 시나리오를 나타내었다. 송신용 트랜스듀서와 수신용 하이드로폰을 수심 20m 위치에 고정시켰다. 송신용 트랜스듀서는 Neptune T303 모델, 수신용 하이드로폰은 Neptune B200 모델을 사용하였다. 선박의 위치가 고정된 태안군 모항항 인근 해역의 수심 측정은 Veleport 사의 MiniSVP(Sound Velocity Profiler) 장비를 사용하였



그림 7. 측정 위치 개괄
Fig. 7. An overview of the experiment location

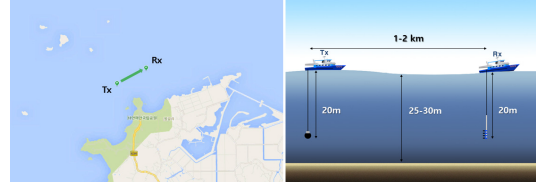


그림 8. 측정 시나리오
Fig. 8. Scenario of experiment

고, 분석 결과 25~30m의 수심을 확인하였다.

실험 당일에는 맑은 날씨가 계속되었다. 국립해양조사원의 해양관측정보를 바탕으로 실험 당시 조류의 세기와 방향, 풍향을 확인하였다. 수중 음향 CSS 시스템의 성능분석 실험은 7월 20일 13시부터 17시까지 수행되었다. 실험을 시작한 13시에는 송신 선박에서 수신 선박의 방향(남서)의 조류를 확인하였다. 14시부터는 반대 방향인 북동 방향의 조류를 확인하였다. 이러한 북동 방향의 조류는 17시까지 계속되었다. 조류의 세기는 13시부터 점점 작아지면서 14시 즈음에 제일 약한 유속을 확인하였다. 이후 다시 유속이 강해지다가 16시 30분 즈음 제일 강한 유속이 나타났다. 이후에는 다시 점점 약해지는 유속을 확인하였다. 13시의 풍향은 북쪽을 향하였으며 15시 30분부터는 북서쪽을 향하였다. 17시에는 풍향이 송신 방향의 반대 방향인 서쪽을 향하였다.

IV. 실험역 측정 결과 성능 분석

표 4에 실험역 측정에 사용된 프레임 구조가 나타난다. II절에서 상세 내용을 서술한대로 첫번째 경우(그림 1(a))에 해당하는 프레임은 CSS의 잡음 강건성을 확인하기 위해 구성하였다. 두번째 경우(그림 1(b))에 해당하는 프레임은 잡음 강건성 대비 도플러 천이 강건성 소실 정도를 확인하게 위해 구성하였다. 채널 추정을 위해 별도의 톤 신호를 추가로 활용하였다. 성능 비교를 위해 근사한 전송률을 가진 OFDM 프레임을 배치하였다. 본 논문에서 활용된 수중 음향 OFDM 시스템의 파라미터와 블록 다이어그램이 표 3과 그림 9에 나타난다¹⁴⁾.

측정에 사용된 수중 음향 CSS & OFDM 프레임은 24.5kHz의 중심 주파수, 200kHz의 샘플링 주파수, 5kHz의 기저대역 샘플링 주파수를 가진다. OFDM 프레임의 CP는 22.6ms의 길이를 가진다.

그림 10에 첫번째 경우(그림 1(a))를 바탕으로 한 CSS 프레임과 OFDM 프레임의 서해 실험역 측정 성능을 비교하였다. 여기서 x축(Time)의 408은 오후 4

표 3. OFDM 파라미터
Table 3. OFDM parameters

파라미터	값
Sampling frequency	200kHz
Carrier frequency	24.5kHz
Bandwidth	5kHz
FFT size	512
DC subcarrier	3
Guardband	7(left), 6(right)
OFDM symbol length	0.1024sec
CP length	0.0226sec
Modulation	QPSK
Channel coding	Turbo
Coding rate	1/3
Pilot spacing	2/1 (Time/Freq.)

시 8분을 의미한다. 420은 오후 4시 20분을 의미한다. 1번 소그림부터 6번 소그림까지 실측 데이터에서 도출된 MED(Maximum Excess Delay spread), RMS delay spread, doppler shift, doppler spread, SNR(Signal to Noise Ratio) 추정치, EVM(Error Vector Magnitude) 수치에 대한 내용이 나타난다. 1~2번 소그림의 MED, RMS delay spread를 통해 실측 당시의 다중경로 영향 정도를 확인할 수 있다. 3~4번 소그림의 doppler shift와 doppler spread를 통해서 는 실측 당시의 도플러 영향 정도를 확인할 수 있다.

표 4. 실험역 측정에 사용된 프레임 구조
Table 4. Frame structure used for measurement

경우 1 (a)				경우 2 (b)			
#	프레임	비고	전송률	#	프레임	비고	전송률
1	Tone	Doppler	-	1	OFDM	Rep. 8,3	38.6 bps
2	CSS	SF 10	48.8 bps	2	CSS	SF 10, BW 5kHz	48.8 bps
3		SF 9	87.8 bps	3		SF 10, BW 4kHz	39.1 bps
4		SF 8	156.2 bps	4		SF 11, BW 5kHz	26.8 bps
5		SF 7	273.4 bps	5		SF 10, BW 2kHz	19.5 bps
6		SF 6	468.7 bps	6		SF 12, BW 5kHz	14.6 bps
7		SF 5	781.2 bps	7		SF 10, BW 1kHz	9.7 bps
8		SF 4	1,250 bps	8		SF 13, BW 5kHz	7.9 bps
9		Rep. 8,3	38.6 bps	9		Tone	Doppler
10	OFDM	Rep. 4,3	93.3 bps				
11		Rep. 8,1	149.3 bps				
12		Rep. 4,1	314.6 bps				
13		Rep. 1,1	1,306 bps				

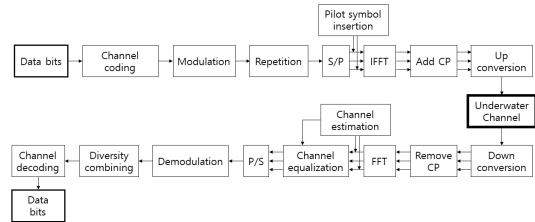


그림 9. OFDM 블록 다이어그램
Fig. 9. OFDM block diagram

첫번째 경우(그림 1(a))에 대한 실험은 선박간 2km의 이격거리에서 10W의 송출전력으로 수행되었다. 이때의 SNR 추정치와 OFDM 프레임용 기반으로 한 EVM 수치가 5~6번 소그림에 나타난다. 소그림 7~8번에 첫번째 경우에 대한 CSS 프레임과 OFDM 프레임 기반 BER 성능 결과가 나타난다. 소그림 7번을 통해 CSS SF7~SF9 프레임이 에러 없는 안정적인 통신 성능을 보임을 확인할 수 있다. 특이사항으로, SF10의 경우 본래 제일 높은 성능을 보여야 하지만 4시 13분의 수집 데이터에서 에러가 발생함을 확인할 수 있다. 이는, 당시 4Hz의 doppler shift로 인한성능 감쇠가 큰 영향을 미친 것으로 여겨진다(소그림 3번). II절 표 2를 통해 CSS 파라미터 SF 10의 경우 도플러 천이 강건성이 ±1.87Hz의 범위를 가짐을 확인할 수 있다. 도플러 천이 강건성이 ±3.75Hz의 범위를 가지는 SF 9 파라미터의 CSS 프레임은 해당 도플러 천이에 큰 성능 감쇠를 겪지 않았음이 나타난다.

첫번째 경우(그림 1(a))에 대한 실험에서는 CSS 프

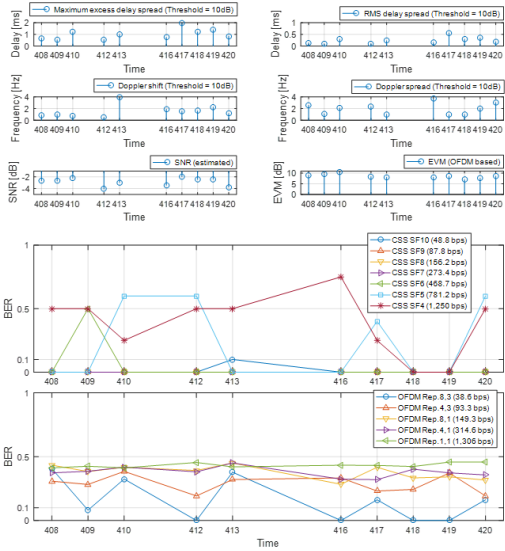


그림 10. CSS 프레임과 OFDM 프레임의 서해 실험역 측정 성능비교 (Case 1)
Fig. 10. Performance Comparison of Real-World Measurement of CSS Frames and OFDM Frames (Case 1)

레이의 잡음 강건성을 확인하기 위한 실험이었기에, 잡음 강건성보다 멀티패스에 특히 강점을 보이는 OFDM 신호는 해당 조건에서 에러가 발생할을 8번 소그림을 통해 확인할 수 있다. CSS 신호는 실측 당시의 조건에서 273.3bps의 전송률에서 안정적인 통신 성능을 보였다.

그림 11에 두번째 경우(그림 1(b))를 바탕으로 한 CSS 프레임과 OFDM 프레임의 서해 실험역 측정 성능비교자료가 나타난다. 여기서 x축(Time)의 110은 오후 1시 10분을 의미한다. 140은 오후 1시 40분을 의미한다. 두번째 경우에 대한 실험은 선박간 1km의 이격거리에서 10W의 송출전력으로 수행되었다.

두번째 경우에 대한 실험에서는 도플러 천이 강건성 감쇠에 따른 성능을 분석하였다. 표 2에 두번째 경우의 각 CSS 프레임의 도플러 천이 강건성 정도가 나타난다.

그림 11의 소그림 8번에서 오후 1시 9분부터 오후 1시 17분에 수집한 OFDM 신호가 원활한 통신이 가능함을 볼 수 있다. 반면 소그림 7번을 통해 두번째 경우(그림 1(a))의 CSS 신호는 높은 에러를 보임을 확인할 수 있다. CSS 신호의 잡음 강건성을 높이는 데에만 집중해서는 도플러 천이 강건성을 소실하게 된다. 이러한 도플러 천이 강건성은 강한 조류가 발생하는 바다 환경에서 특히 큰 영향을 미친다. 두번째 경우에 대한 CSS 신호 기반 실험을 통해 잡음 강건성과

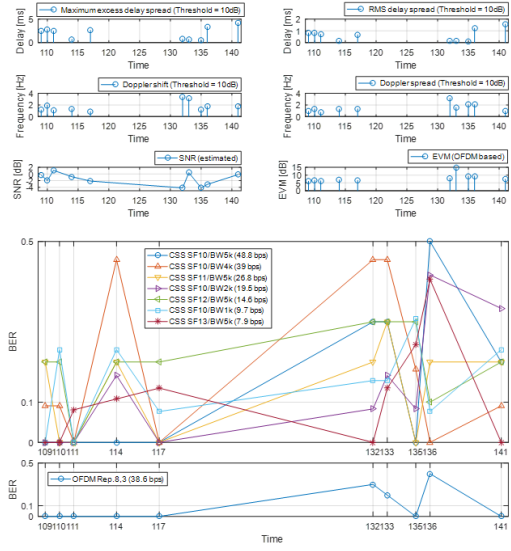


그림 11. CSS 프레임과 OFDM 프레임의 서해 실험역 측정 성능비교 (Case 2)
Fig. 11. Performance Comparison of Real-World Measurement of CSS Frames and OFDM Frames (Case 2)

도플러 천이 강건성에 대한 trade off 고려가 중요함을 확인할 수 있었다.

첫번째와 두번째 경우(그림 1)에 대한 실험역 실험 결과를 바탕으로 바다 환경에 활용될 수 있는 수중음향 CSS 시스템의 최적 파라미터에 대한 고찰을 추가로 수행하였다.

서해에서의 지난 실측[18-22]에서 도플러 천이 정도는 앵커링(선박 고정)하였을 때 3~4Hz 이내, 고정되지 않았을 때 10Hz 이내의 도플러 천이 정도를 확인하였다. 이에 따라서, 만약 기저대역 샘플링 주파수와 대역폭 수치가 같다면 SF 8 파라미터를 기본값으로 설정하는 것이 원활한 CSS 기반 통신에 도움이 될 것으로 여겨진다. SF 8에서의 도플러 천이 강건성은 $\pm 7.5\text{Hz}$ (표 2)이기 때문에 높은 도플러 천이 강건성과 잡음 강건성을 함께 얻을 수 있다. 여기에 추가적인 성능을 얻기 위해 대역폭을 조절할 수 있다. 이 때 대역폭이 넓어질 경우 신호전력이 분산되기 때문에 CSS 방식을 저전력 통신에 활용시 대역폭도 고려해야 한다.

기저대역 샘플링 주파수와 대역폭 수치가 서로 다르다면, 그 비율에 따라 SF처럼 잡음 강건성과 도플러 천이 강건성 수치가 영향을 준다. 이는 CSS 한 심볼에 따른 전체 샘플 길이가 달라지기 때문이다(수식 10). 이 경우에도 모호성 함수(수식 1)의 활용을 통해 $\pm 7.5\text{Hz} \sim \pm 10\text{Hz}$ 의 잡음 강건성을 얻을 수 있도록

비율을 결정해야 할 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 CSS 통신 방식을 수중 통신에 적용하기 위해 특히 잡음에 강건한 특성을 확인하고자 OFDM 통신 방식과 대역폭, 전송률, 평균전력을 근사하게 설정하여 19년 8월 20일 충청남도 태안군 인근 천해역에서 성능 비교 실험을 수행하였다.

이를 위해 시뮬레이션 성능 결과를 바탕으로 두가지 경우(그림 1)로 전체 프레임의 구성하였다. 첫번째 경우는 잡음 강건성을 확인하려는 목적으로 CSS 신호의 확산 계수(SF)를 서로 달리하여 프레임을 구성하였다. 두번째 경우는 잡음 강건성을 높임에 따라 소실되는 도플러 천이 강건성 정도를 확인하기 위한 목적으로 프레임을 구성하였다.

첫번째 경우에 따른 실험결과 2km 선박간 거리와 10W의 송출전력에서 CSS 신호의 높은 잡음 강건성을 확인할 수 있었다. 두번째 경우의 실험에서는 조류로 인해 도플러 천이가 존재하는 실험 환경에서 잡음 강건성과 도플러 천이 강건성 사이에서 trade off 고려가 중요함을 확인하였다.

더 나아가 실험역 실험 결과를 바탕으로 바다 환경에 활용될 수 있는 수중음향 CSS 시스템의 최적 파라미터에 대해 고찰하였다. CSS 신호의 기저대역 샘플링 주파수와 대역폭 수치가 같을시 SF 8 파라미터를 기본으로 대역폭을 가변하여 활용하면 도플러 천이가 존재하는 실험역 수중 환경에서 안정적인 통신이 가능함을 확인하였다.

References

- [1] S. Shi, et al., "Comparison of radar waveforms combining pseudo-random binary phase coding and chirp modulation for an high-frequency monostatic radar," *IET Radar, Sonar & Navig.*, vol. 10, no. 5, pp. 935-944, May 2016
- [2] J.-H. Lee, et al., "Sea trial results of long range underwater acoustic communication based on frequency modulation in the East Sea," *The J. Acoustical Soc. Korea*, vol. 38, no. 4, pp. 371-377, Jul. 2019.
- [3] SEMTECH, "AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics," Revision 2, May 2015
- [4] U. Raza, et al., "Low power wide area networks: An overview," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 19, no. 2, pp. 855-873, Jan. 2017.
- [5] L. Vangelista, et al., "Frequency shift chirp modulation: The LoRa modulation," *IEEE Sign. Process. Lett.*, vol. 24, no. 12, pp. 1818-1821, Oct. 2017.
- [6] Y. C. Kim, et al., "Underwater biomimetic communication using Dolphin's whistles," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun. 2019*, pp. 1519-1520, Gangwon-do, Korea, Jan. 2019.
- [7] J. Park, et al., "A chirp-based bio-mimetic communication technique and its performance in a lake environment," *J. KICS*, vol. 43, no. 11, pp. 1809-1812, Nov. 2018.
- [8] G. H. Lee, et al., "Experimental results of the covert underwater acoustic communication with hybrid hopping method," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun. 2019*, pp. 723-723, Gangwon-do, Korea, Jan. 2019.
- [9] G.-M. Kim, et al., "Covert underwater acoustic communication," *J. KICS(ICM)*, vol. 33, no. 8, pp. 82-88, Jul. 2016.
- [10] F. Yuan, et al., "Joint virtual time reversal communications with an orthogonal chirp spread spectrum over underwater acoustic channel," *Applied Acoustics*, vol. 117, pp. 122-131, Feb. 2017.
- [11] P. J. Bouvet, et al., "On the analysis of orthogonal chirp division multiplexing for shallow water underwater acoustic communication," *OCEANS 2017-Aberdeen*, pp. 1-5, Aberdeen, Oct. 2017.
- [12] Y. Xiang, et al., "An underwater acoustic OFDM communication system based on cyclic shift keying and chirp spread spectrum," *OCEANS 2018-Charleston*, pp. 1-6, Charleston, Jan. 2018.
- [13] J. Shi, et al., "Towards robust high speed underwater acoustic communications using chirp multiplexing," *OCEANS 2018-Charleston*, pp. 1-5, Charleston, Jan. 2018.
- [14] Y.-H. Cho, et al., "Performance analysis of OFDM-Based underwater communication systems for time-varying underwater channel in western sea of korea," *J. KICS*, vol. 43, no. 10,

pp. 1654-1663, Oct. 2018.

- [15] Y. Kwak, *Radar System Engineering*, Cheong-Mun-Gag, 2017
- [16] J.-H. Kim, et al., "Analysis of synchronization detection performance according to bandwidth of HFM in the West Sea underwater channel environment," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun. 2017*, pp. 1649-1650, Jeju Island, Korea, Jun. 2017.
- [17] R. Pec, et al., "Synchronization method for cellular systems," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun. 2016*, pp. 301-302, Jeju Island, Korea, Jun. 2016.
- [18] T.-S. Lee, et al., "Study on implementation of OFDM system of west coast," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun. 2016*, pp. 1224-1225, Gangwon-do, Korea, Jan. 2016.
- [19] S.-H. Jin, et al., "Analysis of underwater channel characteristics at western sea of korea," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun. 2017*, pp. 58-59, Gangwon-do, Korea, Jan. 2017.
- [20] K.-Y. Kim, et al., "Analysis of underwater channel characteristics at Tae-an Sea Area," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun. 2017*, pp. 1179-1180, Jeju Island, Korea, Jun. 2017.
- [21] J. H. Kim, et al., "Performance analysis of pilot symbol spacing for OFDM system based on measurement data at West sea," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun. 2017*, pp. 52-53, Gangwon-do, Korea, Jan. 2017.
- [22] Y.-H. Cho, et al., "Performance analysis of underwater OFDM systems with different pilot spacings in western sea of korea," *J. KICS*, vol. 42, no. 12, pp. 2248-2254, Dec. 2017.

이 태 석 (Tae-Seok Lee)



2013년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 졸업
 2015년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 석사
 2020년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 박사
 2019년 12월~현재 : 산엔지니어링

기술연구소 선임연구원
 <관심분야> 이동통신, 수중통신, 사물인터넷
 [ORCID:0000-0002-3971-0777]

김 준 호 (Jun-Ho Kim)



2014년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 졸업
 2016년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 석사
 2016년 3월~현재 : 호서대학교 정보통신공학과 박사과정

<관심분야> 수중통신, 이동통신, 배열신호처리, 스마트 안테나
 [ORCID:0000-0001-7481-2181]

고 학 림 (Hak-Lim Ko)



1983년 2월 : 숭실대학교 전자공학과 공학사
 1986년 2월 : Fairleigh Dickinson Univ. 전기 및 컴퓨터공학과 공학석사
 1995년 2월 : North Carolina state Univ. 전기 및 컴퓨터공학과 공학박사

1996년~현재 : 호서대학교 정보통신공학과 정교수
 <관심분야> 스마트 안테나 시스템, 이동통신, 수중통신, 해양통신
 [ORCID:0000-0003-4811-1116]

조 용 호 (Yong-Ho Cho)



2004년 2월: KAIST 전기 및
전자공학과 졸업

2006년 2월: KAIST 전기 및
전자공학과 석사

2013년 8월: KAIST 전기 및
전자공학과 박사

2013년 9월~2016년 2월: 삼성

전자 DMC 연구소 책임연구원

2016년 3월~현재: 호서대학교 해양IT융합기술연구
소 조교수

<관심분야> 이동통신, 수중통신, 해양통신, 사물인
터넷

[ORCID:0000-0002-7550-206X]