

# 파일럿 기반 수중 CSS 통신 시스템의 시간 동기 오차 추정에 관한 연구

김준호\*, 조용호°, 고학림<sup>oo</sup>

## A Study on the Timing Offset Estimation for Pilot-Based Underwater CSS Communication System

Jun-Ho Kim\*, Yong-Ho Cho°, Hak-Lim Ko<sup>oo</sup>

### 요약

본 논문에서는 육상 저전력 IoT 통신에 사용되는 chirp 신호를 사용하는 수중 CSS 통신 시스템의 시간 동기 오차 추정에 대해 연구하였다. 육상에 비해 변화가 매우 빠른 수중 채널에서 발생하는 시간 동기 오차의 CSS 시스템에 대한 영향을 분석하고, 이를 극복하기 위해 파일럿 신호 기반 수중 CSS 통신 시스템과 시간 동기 오차를 추정하고 보상하는 알고리즘을 제안하였다. AWGN 및 실제 수중 채널을 모사한 Bellhop 채널 모델에서 제안 시스템의 성능을 분석하였으며, 이를 통해 시간 오차가 존재하고 0dB 이하의 낮은 신호대 잡음비 환경에서도 제안 시스템을 통해 저전력 수중통신이 가능함을 확인하였다.

**키워드** : 수중 음향 통신, 저전력 통신, CSS, 시간 동기 오차 추정, 동기화

**Key Words** : Underwater acoustic communication, Low-Power communication, CSS, Timing offset estimation, Synchronization

### ABSTRACT

In this Paper, a study is conducted on the timing offset estimation for pilot based underwater CSS communication that uses chirp signals utilized for low-power IoT communication. The effect of timing offset on the CSS system is analyzed under a fast-varying underwater acoustic channel. In order to overcome the fast-varying timing offset, a pilot based underwater CSS communication system, and the estimation and compensation algorithm for timing offset are proposed. The performance of the proposed system is numerically analyzed under AWGN and underwater Bellhop channel. It is verified by the numerical analysis that the proposed system is capable of low-power underwater communication even in a low SNR environment of 0dB or less with hpresence of fast-varying timing offset.

※ 본 연구는 2021년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(분산형 수중 관측·제어망 개발)

※ “본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음” (IITP-2021-2018-0-01417)

• First Author : Hoseo University, Oceanic IT Convergence Technology Research Center, katurablue@naver.com, 정희원

° Corresponding Author : Mokpo National University, Department of Electronics Information and Communication Engineering, yhcho@mokpo.ac.kr, 정희원

<sup>oo</sup> Corresponding Author : Hoseo University, Department of Information and Telecommunication Eng., hlko@hoseo.edu, 종신희원

논문번호 : 202010-243-A-RE, Received September 29, 2020; Revised December 10, 2020; Accepted December 10, 2020

## I. 서 론

매년 발생하는 해양 사고 및 분쟁 등으로 인해 해양에서의 감시, 탐지와 같은 기술들이 요구되면서 해상 및 수중 통신 연구가 활발히 진행되고 있다. 수중 음향 채널은 육상의 전파 채널과 달리 수온과 수압 염도 및 수면 위에서의 풍속 등 다양한 요인에서 영향을 받기 때문에 안정적인 통신 시스템을 구현하기 매우 어렵다. 따라서 파도 및 조류가 끊임없이 발생하는 해양에서는 안정적인 통신 링크를 유지하기 위해 높은 송신 전력과 빠른 시변 채널에 강인한 변조 기법이 요구된다.

수중 무선 음향 통신의 운용을 위해서는 배터리 사용이 필요하다. 수중에서 전력 사용의 효율성 증가를 위해 다양한 연구가 진행되었다. 수중 음향 장비의 전력 효율을 증가시키기 위해 저전력 신호 탐지 메커니즘을 이용한 wake-up 기법에 대한 연구가 진행되었으며,<sup>[1]</sup> PSSK(Phase Shift Silence Keying)를 이용해 전력 효율을 높이고 DFE(Decision Feedback Equalization)를 사용하여 신뢰성을 높이는 연구가 진행되었다.<sup>[2]</sup>

Chirp 신호는 시간에 따라 주파수가 변하는 신호로, 데이터 전송률은 낮지만 낮은 전력으로도 장거리 전송이 가능한 장점이 있다. Chirp 신호는 초기에는 레이더 및 소나(SONAR)와 같은 군사용 목적으로 사용되었으나 최근에는 데이터를 전송을 위한 통신에 활용되고 있다. 육상에서는 이미 IoT와 같이 저전력 통신이 요구되는 분야에 CSS(Chirp-Spread-Spectrum) 변조 방식을 LoRa(Long Range) 통신 기술로써 사용하고 있다.<sup>[3]</sup> 이러한 CSS 신호의 고효율 특성을 활용하여 육상 통신뿐만 아니라 위성통신 및 수중통신에도 chirp 기반 통신 시스템 연구가 진행되고 있다.<sup>[4-9]</sup>

수중 음향 채널은 육상에 비해 변화 속도가 매우 빠르지만 수중 음파의 전달 속도는 상대적으로 매우 느리기 때문에 CSS 신호는 매 심볼마다 서로 다른 채널을 겪는다. 이 때, 각 심볼에서 서로 다른 시간 동기 오차가 발생하게 되고 이를 보상하지 않을 경우 CSS 복조 성능이 크게 악화된다.

본 논문에서는 심볼 별 시간 동기 변화에 대응하고 이에 따른 성능 하락 방지를 위해 파일럿 신호가 합성된 CSS 기반 수중 음향 통신 시스템을 제안한다. 수중 음향 채널에서의 도플러 및 다중경로 현상으로 발생하는 시간 동기 오차가 CSS 통신 시스템에 미치는 영향에 대해 분석하고, 파일럿 신호 기반 신호 동기 오차 추정 및 보상 알고리즘을 제안한다. 더 나아가

합성되는 파일럿 신호와 데이터 신호의 최적 전력을 도출하였다. 모의실험 결과 시간 동기 오차가 존재하는 환경에서 제안하는 시스템이 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

## II. CSS 통신 시스템 모델

CSS 신호는 시간에 따라 사용하는 대역폭 내에서 주파수가 선형적으로 증가 또는 감소한다. 한 심볼 주기 동안 주파수가 최소 대역폭에서 최대 대역폭으로 상승할 경우를 up-chirp, 최대에서 최소로 감소하는 경우를 down-chirp 신호라 한다. 이 때 CSS 한 심볼의 주기가 시작될 때의 주파수에 따라 전송되는 비트 데이터가 달라진다. Up 또는 down chirp에 따라서 CSS 심볼의 시작 주파수가 최소 또는 최대일 경우를 basic chirp 신호로 사용하며, 전송하고자 하는 비트 데이터에 따라 순환 자리 이동(cyclic-shift)를 이용하여 심볼의 시작 주파수를 달리 할당한다.

시스템의 대역폭을  $BW$ , 한 심볼 주기를  $T_{sym}$ 이라 했을 때, basic chirp 신호  $v_0(t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_0(t) = \exp\left\{j2\pi\left(\frac{\mu t}{2} - \frac{BW}{2}\right)t\right\}, 0 \leq t \leq T_{sym} \quad (1)$$

식 (1)에서 변조 지수를  $M$ 이라 할 때, 시간에 따른 주파수 변화속도  $\mu$ 는 다음 식과 같다.

$$\mu = \frac{BW}{T_{sym}} = \frac{BW^2}{M} \text{ (Hz/s)} \quad (2)$$

또한 기준 신호  $x_0(t)$ 의 위상을  $\phi_0(t)$ 라 했을 때, 위상을 미분하면 아래와 같다.

$$\frac{\delta\phi_0(t)}{\delta t} = 2\pi\left(\mu t - \frac{BW}{2}\right) \text{ (radian/s)} \quad (3)$$

여기서 CSS 심볼의 주파수는 다음 식과 같다.

$$f(t) = \left(\mu t - \frac{BW}{2}\right) \text{ (Hz)} \quad (4)$$

Basic chirp를 기준으로 순환 자리 이동을 통한  $M$ 개의 서로 다른 CSS 심볼은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_m(t) = v_0 \left\{ \left\{ t - m \frac{T_{sym}}{M} \right\} \bmod T_{sym} \right\}, \quad (5)$$

$t \in [0, T_{sym}]$

샘플링 주기를  $T_s$ 라고 할 때, 이산시간 영역에서 CSS 신호는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_0[n] &= \exp \left\{ j2\pi \left( \mu n \frac{T_s}{2} - \frac{BW}{2} \right) n T_s \right\} \\ &= \exp \left\{ j2\pi \left( \frac{n^2}{2M} - \frac{n}{2} \right) \right\}, \quad (6) \\ n &= 0, 1, \dots, M-1 \end{aligned}$$

수신된 신호가 채널을 거치며 변화된 위상을  $\psi$ , 잡음 성분을  $w[n]$ 이라 했을 때 수신된 신호  $y_m[n]$ 은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_m[n] = \exp(j\psi)v_m[n] + w[n], \quad (7)$$

$n = 0, 1, \dots, M-1$

수신 신호  $y_m[n]$ 의 복조 과정을 그림 1에 나타내었다.

그림 1과 같이, 수신신호  $y_m[n]$ 에 basic chirp 신호  $v_0^*[n]$ 을 곱하여 de-chirping을 수행하고 DFT(Discrete-Fourier-Transform)을 취하여 CSS 복조를 진행한다. de-chirping 과정은 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} z_m[n] &= y_m[n]v_0^*[n] \\ &= \left[ \exp(j\psi) \exp \left\{ j2\pi \left( \frac{(n+m)^2}{2M} - \frac{n+m}{2} \right) \right\} + w[n] \right] \\ &\quad \times \exp \left\{ -j2\pi \left( \frac{n^2}{2M} - \frac{n}{2} \right) \right\} \\ &= \exp(j\psi) \exp \left\{ j2\pi \left( \frac{2nm + m^2}{2M} - \frac{m}{2} \right) \right\} + \hat{w}[n] \\ &= \exp \left\{ j\psi + j2\pi \left( \frac{m^2}{2M} - \frac{m}{2} \right) \right\} \exp \left\{ \frac{j2\pi nm}{M} \right\} + \hat{w}[n] \quad (8) \end{aligned}$$

여기서  $\hat{w}[n] = w[n] \exp \left\{ -j2\pi \left( \frac{n^2}{2M} - \frac{n}{2} \right) \right\}$ 이다.

De-chirping 된 신호  $z_m[n]$ 의 첫 번째 항은 다시 샘플 인덱스  $n$ 과 관계없는 상수 위상항  $\psi_m$ 와,  $n$ 에 따라 변화하는 위상항으로 구분할 수 있다. 상수 위상  $\psi_m$ 은 아래와 같다.

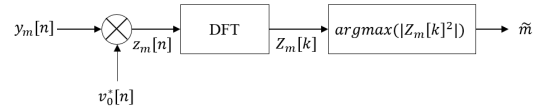


그림 1. CSS 시스템의 복조 과정 블록 다이어그램  
Fig. 1. Demodulation block diagram of CSS system

$$\psi_m = \psi + 2\pi \left( \left[ \frac{m^2}{2M} \right] - \left[ \frac{m}{2} \right] \right) \quad (9)$$

이후 de-chirp 된 신호  $z_m[n]$ 에 DFT를 취하여 DFT 출력값  $Z_m[k]$ 을 얻는다. 이 과정을 아래 식에 나타내었다.

$$\begin{aligned} Z_m[k] &= \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{n=0}^{M-1} z_m[n] \exp \left\{ \frac{-j2\pi nk}{M} \right\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{n=0}^{M-1} \exp \{ j\psi_m \} \exp \left\{ \frac{j2\pi nm}{M} \right\} \exp \left\{ \frac{-j2\pi nk}{M} \right\} \\ &\quad + \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{n=0}^{M-1} \hat{w}[n] \exp \left\{ \frac{j2\pi n(m-k)}{M} \right\} \\ &= \frac{\exp \{ j\psi_m \}}{\sqrt{M}} \sum_{n=0}^{M-1} \exp \left\{ \frac{j2\pi n(m-k)}{M} \right\} + W[k] \\ &= \begin{cases} \sqrt{M} \exp \{ j\psi_m \} + W[m], & \text{if } k = m \\ W[k], & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10) \end{aligned}$$

식 (10)과 같이 DFT 출력 신호  $Z_m[k]$ 는 인덱스  $k$ 가 송신신호의 CSS 심볼 인덱스인  $m$ 일 경우 가장 큰 피크 전력값을 가지며, 그 외에 인덱스에서는 잡음 전력 값을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서  $|Z_m[k]|^2$ 에서 가장 큰 값을 갖는 인덱스  $k$ 를 2진수로 변환하면, 송신 비트  $m$ 으로 복조가 가능하다.

### III. CSS 시스템 시간 동기 오차 영향 분석

#### 3.1 실험 데이터 분석

본 연구의 선행 연구에서는 앞서 서술한 CSS 통신 시스템의 실험 성능을 알아보기 위해, 대한민국 경상남도 거제도 인근 해역에서 실험을 수행하였다.<sup>[10]</sup> 해당 실험에서 사용된 CSS 시스템의 반송 주파수는 12kHz이며 이때의 대역폭은 1kHz를 사용하였다. 이때의 통과대역 샘플링 주파수는 200kHz이다. 프레임 동기를 위해 256ms 길이의 HF(Hyperbolic Frequency Modulation) 신호를 프리앰블로 사용하였다. 본 논문에서는 확산인자가 8인 CSS 심볼이 사용되었으며, 한 심볼의 길이는 256ms이다. 하나의 프레임에는 프리앰블과 4개의 CSS 심볼이 포함되며, 프리

앰플과 CSS 심볼 사이에 zero-padding 구간을 추가하여 총 1.5초 길이의 CSS 신호가 전송되었다. 그림 2에 해당 실험역 측정의 실험 시나리오를 나타내었다.

그림 2와 같이 선박간 거리를 100m부터 700m 까지 200m 간격으로 측정을 수행하였다. 해당 해역의 수심은 약 35m이며, 송신 트랜스듀서는 해저면으로부터 약 5m 위 지점에 위치하도록 고정시키고, 수신 하이드로폰은 해수면으로부터 약 5m아래에 고정하여 신호를 수신하였다. 위와 같이 측정된 데이터의 수신 신호를 기저대역으로 down-conversion하여 HFM 신호의 상호 상관을 통해 프레임 동기화를 수행하였다. 수중 저전력 통신을 가정하여  $\pm 5V$ 로 정규화된 송신 신호를 2dB의 낮은 증폭률로 증폭하여 트랜스듀서를 통해 전송하였다. 이때 700m 거리에서 수신된 프리앰블 신호의 상호 상관 결과를 그림 3에 나타내었다.

그림 3과 같이 HFM 신호의 상호 상관을 통해 해당 측정 해역의 채널 임펄스 응답을 알 수 있다. 이를

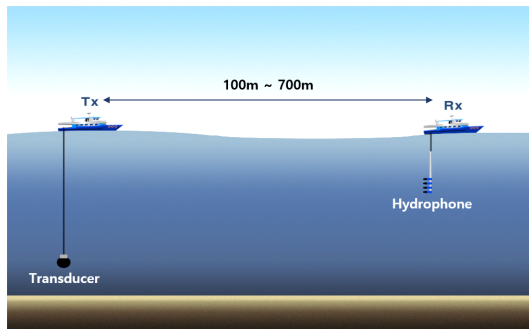


그림 2. 실험역 측정 시나리오  
Fig. 2. Scenario for real-ocean experiment

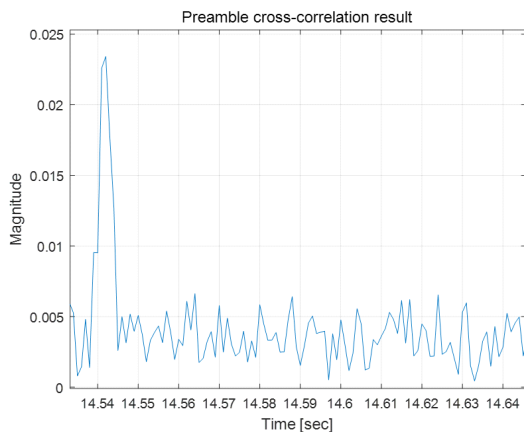


그림 3. HFM 신호의 상호 상관 피크 검출 결과  
Fig. 3. Cross-correlation result between HFM signal and received signal

통해 해당 해역은 하나의 경로로 수신되는 것을 알 수 있으며, 도플러로 인해 상호상관의 피크가 확산된 것이 확인되었다. 이러한 환경에서 HFM 신호의 상호 상관 피크가 가장 큰 지점을 기준으로 프레임 동기화를 수행하였다. 이후 4개의 각 CSS 심볼마다 피크 검출을 통한 복조를 수행하였으며, 그림 4에 해당 데이터의 CSS 심볼 피크 검출 결과를 나타내었다.

그림 4와 같이 CSS 신호의 피크와 주변 잡음과의 비교를 통해 700m 거리에서도 피크 검출이 충분히 가능한 것으로 나타났다. 그러나, 전송되는 4개의 CSS 심볼은 각각 [225, 27, 66, 226]의 정보를 갖으며, 수신된 CSS 심볼의 피크 인덱스는 각각 [223, 25, 65, 226]으로 각 심볼마다 [2, 2, 1, 0]샘플의 인덱스 오차가 발생한것이 확인되었다. 여기서, 1 샘플의 오차는 1kHz 대역폭을 사용하기 때문에 약 1ms의 시간 동기 오차를 의미한다. 해당 현상은 프레임 동기 오차로 인해 발생할 가능성이 있으나, 한 프레임 안에서 발생한 각 심볼의 피크 인덱스의 오차가 각기 다른것은 시시각각 변하는 수중 음향 채널의 다중경로와 도플러 현상때문으로 보여진다. 각 거리마다 발생한 CSS 심볼의 피크 검출 인덱스 오차를 알아보기 위해 그림 5에 거리별 측정 데이터에 대한 CSS 심볼 피크 검출 오차의 히스토그램을 나타내었다.

그림 5와 같이, 각 거리별 측정 데이터의 CSS 피크 검출시 인덱스 오차가  $\pm 10$  샘플 내에서 발생함을 확인할 수 있다. 또한 CSS 한 프레임 내에서 각 심볼마다 서로 다른 시간 동기 오차가 관찰되었다. 실험역 시험 데이터 분석시 시간 동기 오차 추정을 하지 않은

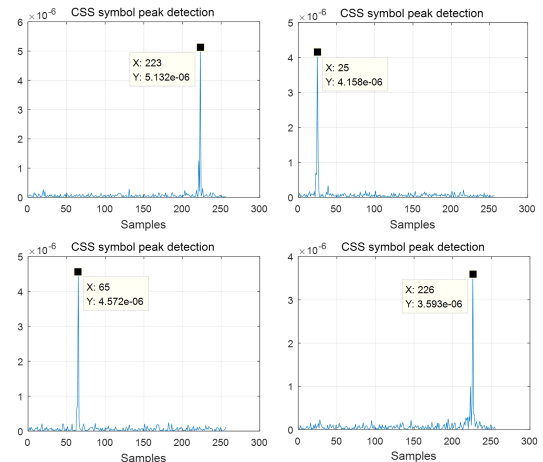


그림 4. 700m 거리에서 측정된 CSS 심볼의 피크 인덱스  
Fig. 4. Peak index of CSS symbols at 700m distance measurement data

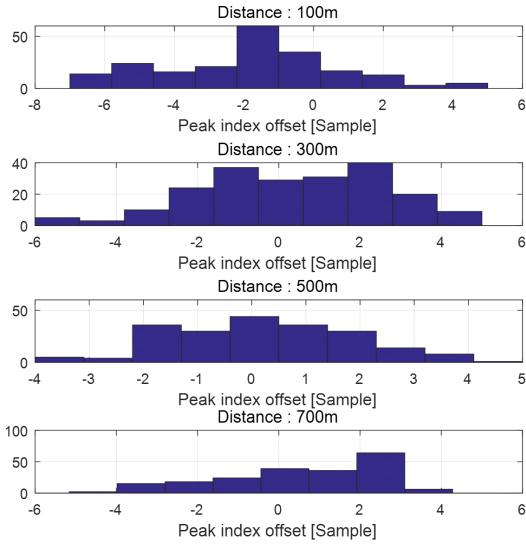


그림 5. 측정 데이터의 거리별 시간 동기 오차 히스토그램  
Fig. 5. Histogram of measurement data timing synchronization error in each distance

경우 비트 데이터 에러가 발생함을 확인하였다. 해당 현상의 원인을 분석하기 위해 2절에서는 시간 동기 오차가 CSS 심볼 복조에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

### 3.2 시간 동기 오차 영향 분석

CSS 심볼에서  $N$  샘플 만큼 시간 동기 오차가 발생했을 경우, 식 (8)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 z_m[n] &= y_m[n+N]v_0^*[n] \\
 &= \left[ \exp(j\psi) \exp\left\{j2\pi\left(\frac{(n+N+m)^2}{2M} - \frac{n+N+m}{2}\right)\right\} \right] \\
 &\quad + w[n+N] \times \exp\left\{-j2\pi\left(\frac{n^2}{2M} - \frac{n}{2}\right)\right\} \\
 &= \exp\left\{j\psi + j2\pi\left(\frac{N^2 + 2Nm + m^2}{2M} - \frac{N+m}{2}\right)\right\} \\
 &\quad \times \exp\left\{\frac{j2\pi(n+N)m}{M}\right\} + \hat{w}[n+N]
 \end{aligned} \tag{11}$$

위 식을 살펴보면, 시간 동기 오차  $N$ 으로 인해 샘플 인덱스  $n$ 에 따라 변화하는 위상 항의 형태가  $\left\{\frac{j2\pi nm}{M} \text{ RIGHT}\right\}$ 에서  $\left\{\frac{j2\pi(n+N)m}{M} \text{ RIGHT}\right\}$ 로 변환 것을 알 수 있다. 식 (11)의 de-chirping 신호  $z_m[n]$ 의 DFT 결과는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}
 Z_m[k] &= \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{n=0}^{M-1} \exp\{j\psi_m\} \exp\left\{\frac{(j2\pi(n+N)m)}{M}\right\} \\
 &\quad \times \exp\left\{\frac{-j2\pi nk}{M}\right\} \\
 &= \frac{\exp(j\psi_m)}{\sqrt{M}} \sum_{n=0}^{M-1} \exp\left\{\frac{j2\pi(n(m-k+N))}{M}\right\} \\
 &= \begin{cases} \sqrt{M} \exp(j\psi_m) + \hat{W}[k], & \text{if } k = m + N \\ \hat{W}[k], & \text{otherwise} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{12}$$

식 (12)와 같이 해당 심볼의 시간 오차에 의해 DFT 결과  $Z_m[k]$ 가 최대 전력값을 갖는 인덱스가 기존의  $k = m$  에서  $k = m + N$ 으로 변환된 것을 확인할 수 있다. 따라서 해당 심볼의 시간 오차가 보상되지 않을 경우 비트 데이터 복조시 에러가 발생한다.

## IV. 파일럿 기반 CSS 신호 동기 오차 추정

기존의 CSS 통신 시스템은 가 심볼마다 시간 동기 오차가 발생하면 비트 검출 성능이 크게 악화된다. 본 논문에서는 수중 환경에서 매 심볼 발생하는 서로 다른 시간 오차에 대한 영향을 극복하기 위해 파일럿 신호 기반으로 매 심볼 시간 오차를 추정하고 보상하는 CSS 통신 시스템 구조를 제안하였다. 그림 6는 제안하는 파일럿 기반 CSS 통신 시스템의 송수신 과정을 나타낸다.

제안하는 시스템의 송신기는 송신하고자 하는 비트 데이터를 확산인자가 8인 CSS 심볼로 변조한다. 이때 한 심볼의 길이는  $2^8 = 256$  샘플이며, CSS 심볼과 동

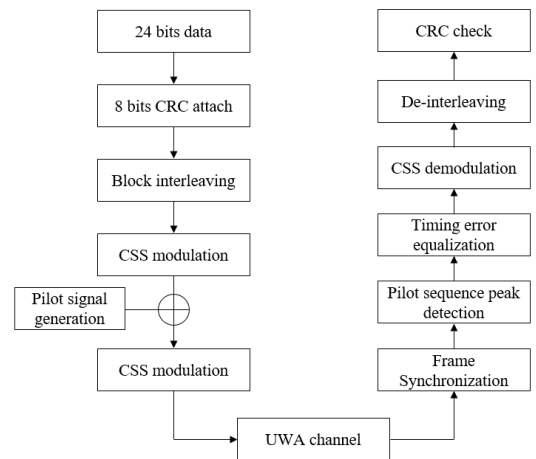


그림 6. 제안하는 파일럿 기반 CSS 통신 시스템  
Fig. 6. Proposed pilot based CSS communication system

일한 256샘플 길이의 PN(Pseudo Noise) 시퀀스를 파일럿 신호로 생성하고 두 신호를 합성하여 다음과 같이 송신 신호를 완성한다.

$$s_m[n] = \sqrt{\gamma}p[n] + \sqrt{1-\gamma}v_m[n] \quad (13)$$

여기서  $p[n]$ 은 PN 시퀀스이고,  $\gamma$ 는 파일럿 신호와 CSS 신호의 전력비를 결정하는 파라미터이다. 이렇게 생성한 송신 신호와 프리앰블로 프레임 구성한다.

채널을 통과하여 수신된 신호는 프리앰블을 이용하여 시간 동기화한다. 그 이후, 아래 식과 같이 수신된 신호와 파일럿 신호의 상호상관 피크 전력 인덱스  $n$ 을 검출하고 프리앰블로 추정된 인덱스와의 차이를 이용하여 각 심볼마다 발생한 시간 동기 오차를 추정한다.

$$n_p = \arg \max_n \left( \left| \sum_{m=0}^{M-1} y_m[n] p^*[m+n] \right|^2 \right) \quad (14)$$

여기서  $n_p$ 는 프리앰블로 추정된 시간 동기 인덱스이다. 추정된 오차는 CSS 복조에서 검출된 인덱스에 보상된다. 이후 2진수로 변환하여 비트 데이터로 복조한다.

### V. 모의실험

본 논문에서 제안하는 파일럿 기반 CSS 통신 시스템의 성능 분석을 위해 모의실험을 수행하였다. 모의 실험에서 사용한 제안 시스템의 파라미터는 표 1과 같다.

제안하는 시스템은 12kHz의 중심 주파수를 사용하며 대역폭은 1kHz로 설정하였다. CSS 확산 인자는 8

표 1. 모의실험 파라미터  
Table. 2. Simulation parameters

Parameter	Value
Carrier frequency	12kHz
Bandwidth	1kHz
CSS spreading factor	8
Number of CSS symbol	4
CSS symbol length	256ms
Preamble length	256ms
Frame length	1.5s

이며 한 심볼의 길이는 256ms이다. HFM 시퀀스는 동일한 길이를 사용하였으며, 한 개의 프리앰블과 4개의 CSS 심볼로 1.5s 길이의 프레임을 구성하였다.

CSS 신호와 PN 신호의 최적 전력비  $\gamma$ 를 도출하기 위해 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 채널 환경에서  $\pm 10$ 샘플의 시간 동기 오차가 발생하는 상황을 가정하여 모의실험을 진행하였다. 신호대 잡음비(SNR)가 -10dB부터 -6dB까지인 환경에서  $\gamma$ 값을 0.1에서 0.9까지 변화 시키며 시간 동기 오차 추정 실패율과 비트 에러율을 관찰하였다. 그림 7에 모의실험 결과를 나타내었다.

모의실험 결과, 파일럿 신호의 전력 기대치인  $\gamma$  값이 커질수록 시간 동기 오차 추정 실패율은 감소함을 보였다. 하지만  $\gamma$  값이 작은 경우 시간 동기 오차 추정 실패율이 높아지면서 비트 에러율 성능이 감소했으며, 반대로  $\gamma$  값이 0.5 보다 커지는 경우 CSS 신호 전력이 작아짐에 따라 비트 에러율 복조 성능이 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 두 성능지표가 교차하는 지점을 두 신호의 최적 전력비로 가정하고 그 지점을 관찰한 결과, 신호대 잡음비가 -10dB인 경우  $\gamma$  값이 0.42일 때 비트 에러율과 시간 동기 오차 추정 성능의 교차지점이 발생하는 것을 확인하였다. -9dB 이상일 경우부터는  $\gamma$ 값이 0.45 ~ 0.46 사이에서 두 성능지표의 교차지점이 발생하는 것을 확인하였다.

위 실험 결과를 바탕으로 파일럿 신호와 CSS 신호의 전력비를 결정하는  $\gamma$ 값을 0.45로 설정하여 신호대 잡음비에 따른 비트 에러율 모의실험을 진행하였다. 각 심볼마다 시간 동기 오차가  $\pm 10$ 샘플 사이에서 무

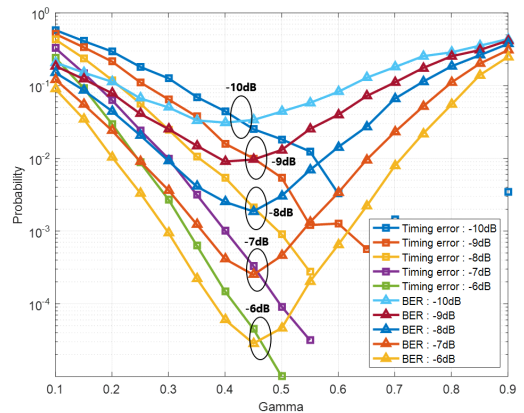


그림 7. SNR과  $\gamma$  값에 따른 동기 오차 추정 실패율 및 비트 에러율 성능  
Fig. 7. Bit error rate and timing offset estimation failure rate according to  $\gamma$  and SNR

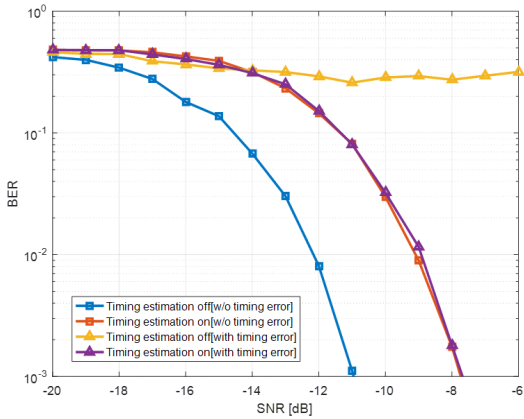


그림 8. AWGN 채널 환경에서의 비트 에러율 성능  
Fig. 8. Bit error rate performance in AWGN channel

작위로 발생하는 상황과 발생하지 않는 상황에서의 모의 실험 결과를 그림 8에 나타내었다.

그림 8과 같이 시간 동기 오차가 없는 환경에서는 제안하는 파일럿 기반 CSS 통신 시스템이, 기존 CSS 시스템보다 비트 에러율  $10^{-3}$  지점에서 약  $-3dB$ 의 성능감소를 보였다. 하지만 시간 동기 오차가 발생한 상황에서는 기존 CSS 통신 시스템은 복조가 불가하였으나, 제안하는 시스템은 시간 동기 오차가 없는 상황에서의 비트 에러율 성능이 동일하였다.

실제 해역의 환경 파라미터를 이용하여 Bellhop 채널 모델링을 통해 생성한 모의 수중 음향 채널에서의 모의실험을 진행하였다. 모의실험에서는, 북위 36.94, 동경 125.00에 위치한 서해정점(307-03)에서 2014년 8월 7일 15시 59분에 관찰된 음속 및 수온 정보를 바탕으로 Bellhop 음선 추적 모델을 이용해 생성된 채널을 사용하였다. 표 2에 12개의 각 다중경로에 해당하는 지연 시간과 진폭, Rician 분포 k factor를 나타내었다.<sup>[11]</sup>

표 2. Bellhop 채널 모델의 경로 파라미터  
Table. 2. Parameters of Bellhop channel model

Path	1	2	3	4	5	6
Delay [ms]	0	0.06	1.50	1.56	1.67	6.33
Magnitude	0.54	0.58	0.42	0.27	0.27	0.18
K factor	43.50	52.48	19.95	119.31	61.68	12.59
Path	7	8	9	10	11	12
Delay [ms]	6.39	6.61	6.67	14.39	14.50	14.78
Magnitude	0.07	0.07	0.07	0.03	0.01	0.01
K factor	79.43	31.62	50.12	50.12	31.62	12.59

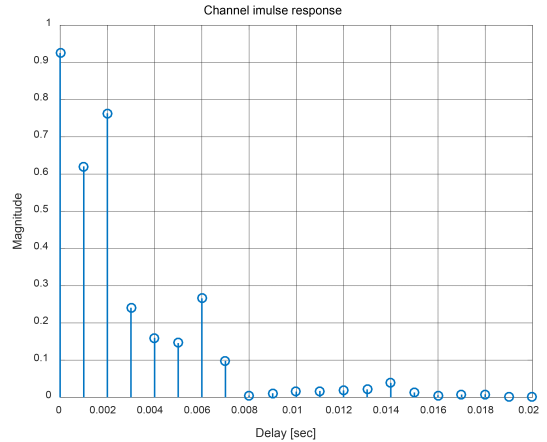


그림 9. 채널 임펄스 응답  
Fig. 9. Channel impulse response

위의 파라미터를 이용하여 생성된 채널의 임펄스 응답을 그림 9에 나타내었다.

그림 9와 같이 생성된 모의 채널은 1kHz 대역폭에 따라 10ms의 간격으로 샘플링된다. 이때 생성된 채널은 지연 시간 20ms 이내에서 12개의 다중경로로 성분을 갖는 것으로 확인되었다. 위 채널 환경에서  $\gamma$ 값을 0.2부터 0.8까지 달리하며 신호대 잡음비에 따른 비트 에러율 성능 모의실험을 진행하였으며, 그 결과를 그림 10에 나타내었다.

그림 10에서 O로 표기된 파란색 실선은 해당 채널에서 시간 동기 오차를 추정하지 않았을 때의 성능을 나타낸다. 해당 모의실험 결과와 같이 시간 동기 오차를 추정 및 보상하지 않을 경우 CSS 통신 시스템의 성능이 매우 크게 저하되는 것을 확인할 수 있다. 또

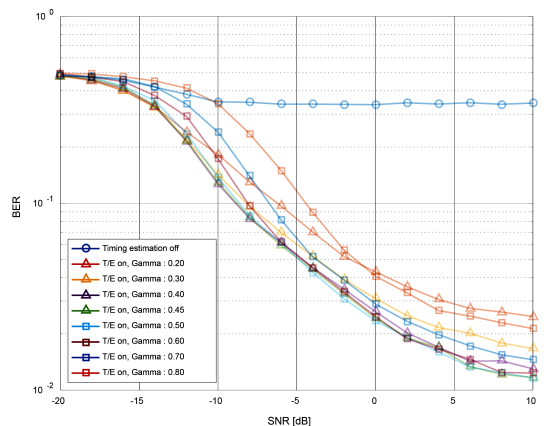


그림 10. Bellhop 채널에서  $\gamma$  값에 따른 비트 에러율 성능  
Fig. 10. Bit error rate performance in Bellhop channel model according to  $\gamma$

한 Bellhop 채널 환경 적용시 AWGN 채널 환경 대비 BER  $10^{-2}$  지점에서 약 -11dB의 성능차이가 발생함이 확인되었다.  $\gamma$ 값에 따라 시간 동기 오차 추정 및 보상을 수행했을 경우, 해당 채널에서는  $\gamma=0.45$ 일 경우의 BER이 가장 낮은 것으로 나타났다. 파일럿 신호의 전력 비중이 가장 큰  $\gamma=0.8$ 의 경우 SNR -1dB를 기준으로 낮은 SNR 구간에서는  $\gamma=0.2$ 인 경우보다 BER 성능이 떨어지는 것을 보였으며, 그 이상인 구간에서는  $\gamma=0.2$ 인 구간의 성능이 우수한 것으로 나타났다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 저전력 수중 음향 통신 시스템 구현을 위해, CSS 신호를 이용한 통신 시스템을 제안하였다. 선행 연구의 실험역 시험에서 관찰된 프레임 시간 동기 오차가 CSS 통신 시스템에 미치는 영향을 분석하고, 이를 극복하기 위해 파일럿 신호 기반 CSS 통신 시스템을 제안하였으며, 모의실험을 통해 그 성능을 분석하였다. 시간 동기 오차 추정을 위해 추가된 파일럿 신호와 데이터 전송을 위한 CSS 신호의 최적 전력비를 알아보기 위해, 전력비와 SNR에 따른 시간 동기 추정 실패율과 비트 에러율간의 상관관계를 분석하여 0.45의 최적 전력비를 도출하였다. AWGN 채널과 수중 채널을 모사한 Bellhop 채널 모델에서 성능 실험을 수행한 결과, SNR이 낮은 실제 해역에서도 시간 동기 오차 추정을 통해 기존의 프레임 시간 동기 오차로 인해 발생했던 CSS 복조 피크 검출 실패 문제가 해결될 것으로 보인다. 추후 본 시스템을 이용한 실험역 실험을 통해, 파일럿 기반 수중 CSS 통신 시스템의 성능 검증을 수행할 예정이다.

## References

[1] N. Xiuhui, Z. Yi, X. Yan, C. Hao, G. Xiaodong, and D. Jinyan, "Design and implementation of remote low power wake up mechanism for underwater acoustic equipment," *2018 IEEE 18th ICCT*, Chongqing, China, Oct. 2018.

[2] T. Lee, M.-S. Han, J.-W. Han, K.-M. Kim, S.-Y. Chun, and K. Son, "Decision feedback equalization for low power underwater communication system," *OCEANS'11 MTS/*

*IEEE KONA*, Waikoloa, HI, USA, Sep. 2011.

[3] H. Mroue, A. Nasser, B. Parrein, S. Hamrioui, E. Mona-Cruz, and G. Rouyer, "Analytical and simulation study for LoRa modulation," *2018 ICT*, St Malo, France, Jun. 2018.

[4] T. Lee, T.-H. Im, H.-L. Ko, and Y.-H. Cho, "Performance analysis of CSS based low-power underwater communication systems by lake experimental results," *2019 ICTC*, JeJu Island, Korea, Oct. 2019.

[5] Y. Qian, L. Ma, and X. Liang, "The Performance of chirp signal used in LEO satellite internet of things," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, pp. 1319-1322, Jun. 2019.

[6] X. Tu, X. Xu, Z. Zou, L. Yang, and J. Wu, "Fractional fourier domain hopped communication method based on chirp modulation for underwater acoustic channels," *IEEE J. Syst. Eng. and Electron.*, vol. 28, pp. 449-456, Jul. 2017.

[7] X. Wang, M. Fei, and X. Li, "Performance of chirp spread spectrum in wireless communication systems," *IEEE Singapore Int. Conf. Commun. Syst.*, Guanzhou, China, Jan. 2009.

[8] C. He, Q. Meng, J. Huang, and Q. Zhang, "A novel bandwidth efficiency chirp-based underwater acoustic communication," *2010 Int. Conf. Inf. Netw. and Automat.*, Kunming, China, Nov. 2010.

[9] C. En, L. Xiaoyang, and Y. Fei, "Multiuser underwater acoustic communication based on multicarrier-multiple chirp rate shift keying," *OCEANS 2014*, Taipei, Taiwan, Nov. 2014.

[10] J. Kim, H.-C. Lee, Y. Yang, Y.-W. Kim, Y.-H. Cho, and H.-L. Ko, "Study on performance analysis of underwater CSS system in south-sea of Korea," *KICE Conf.*, vol. 24, no. 1, pp. 271-273, Gyeong-Ju, Korea, Jul. 2020.

[11] J.-W. Kang, H.-S. Kim, J.-M. Ahn, and J.-H. Chung, "Underwater acoustic communication system using diversity based on ray modeled underwater acoustic channel in Yellow Sea," *J. The Acoustical Soc. Korea*, vol. 35, no. 1, pp. 1-7, 2016.



**김 준 호 (Jun-Ho Kim)**



2014년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 학사  
2016년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 석사  
2021년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 공학박사  
2021년 3월~현재 : 호서대학교

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

**고 학 립 (Hak-Lim Ko)**



1983년 2월 : 숭실대학교 전자공학과 공학사  
1986년 2월 : Fairleigh Dickinson Univ. 전기 및 컴퓨터 공학과 공학석사  
1995년 2월 : North Carolina state Univ. 전기 및 컴퓨터 공학과 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 학사  
2016년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 석사  
2013년 8월 : KAIST 전기 및 전자공학과 박사  
2013년 9월~2016년 2월 : 삼성

전자 DMC 연구소 책임연구원  
2016년 3월~2021년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 조교수  
2021년 3월~현재 : 국립목포대학교 정보통신공학과 부교수  
<관심분야> 이동통신, 수중통신, 해양통신, 사물인터넷  
[ORCID:0000-0002-7550-206X]