

돌고래 휘슬음을 모방한 frequency shift keying 수중통신기법의 다중경로결합 수신 방법

Multipath combining method for frequency shift keying underwater communications mimicking dolphin whistle

안종민,¹ 이호준,¹ 김용철,¹ 김완진,² 정재학[†]

(JongMin Ahn,¹ HoJun Lee,¹ YongChul Kim,¹ WanJin Kim,² and JaeHak Chung^{1†})

¹인하대학교, ²국방과학연구소

(Received September 4, 2018; revised September 21, 2018; accepted November 22, 2018)

초 록: 본 논문은 수중에서 은밀성을 확보하기 위해 FSK(Frequency Shift Keying)를 이용하여 돌고래 휘슬음을 모방하는 통신 기법과 다중경로 결합 이득을 이용하여 BER(Bit Error Rate) 성능을 높이는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 휘슬음을 짧은 시간 구간으로 나누고 그 구간에 심볼의 직교성을 보장하는 FSK 변조신호를 만든다. 그리고 휘슬음을 모방할 때 다중경로 채널에서 심볼간의 ISI(Inter Symbol Interference)가 줄어드는 특징을 이용하여 다중경로 결합 이득을 얻는 방법이다. 제안한 방법의 성능을 보이기 위해 전산모의실험과 실제 호수실험을 진행하였다. 전산 모의실험을 통해 다중경로에 의해 추가적인 다중경로 결합 이득이 발생함을 보였다. 호수 실험에서는 제안된 FSK 방법이 20 msec의 심볼 길이와 900 Hz의 변조 대역을 갖는 경우 다중경로 결합 이득을 얻어 0.002의 BER 갖고 0.185의 BER을 갖는 CSS(Chirp Spread Spectrum)보다 우수함을 보였다. 그리고 모방한 신호와 실제 휘슬 신호의 시간-주파수 영역에서 평균 상호 상관 값을 통해 모방도를 분석하여 제안된 FSK 방법이 CSS 방법에 비해 높은 모방도를 보였다.
핵심용어: 생체 모방, 수중 통신, FSK (Frequency Shift Keying), 돌고래, 휘슬

ABSTRACT: This paper proposes a dolphin whistle mimicking underwater communication method using FSK (Frequency Shift Keying) and method to improve BER (Bit Error Rate) performance by using multipath gain combining. The proposed method divides whistle sound into short time intervals and transmits FSK modulated signal that ensures orthogonality of the symbol. Multipath gain can be obtained by using characteristic of mimicked signal frequency that varies with time. To demonstrate the performance of the proposed method, computer simulations and lake experiments were conducted. Computer simulation results show that an additional multipath gain is obtained by multipath. From lake experiments, when symbol length is 20 msec and modulation band is 900 Hz, the proposed FSK method with multipath combining gain obtains BER of 0.002, which is better than CSS (Chirp Spread Spectrum) with BER of 0.185. The proposed based on FSK method has higher imitation degree than the CSS method by analyzing mean cross-correlation value in the time - frequency domain of the imitated signal and actual whistle signal.

Keywords: Bio-mimicking, Underwater communication, FSK (Frequency Shift Keying), Dolphin, Whistle

PACS numbers: 43.30.Bp, 43.80.Ka

1. 서 론

수중 통신방법 중에서 은밀성을 확보하기 위해 수

중 생물의 소리를 모방하여 통신 신호를 생성하는 변조 기법이 연구되고 있다.^[1-3] 돌고래들은 의사소통하기 위해 휘슬음(whistle)을 쓰며^[4,7], 돌고래 휘슬음은 돌고래에 종의 따라 수백 msec부터 1s~2s의 시간 길이와 수십 Hz에서 수백 kHz의 주파수 대역을 갖는 주파수 변조된 특성을 보인다.^[4,7] 이런 돌고래의

[†]Corresponding author: Jaehak Chung(jchung@inha.ac.kr)
Department of Electronic Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Republic of Korea
Tel: 82-32-860-7421)

휘슬음을 CSS(Chirp Spread Spectrum)기반으로 모방한 통신기법이 연구되었다.^[2] CSS 기반 휘슬 모방 통신 방법은 휘슬음을 짧은 시간구간으로 나누어 심볼을 생성한 뒤 그 구간 내에서 up/down 방향의 chirp 신호를 만들어 전송한다.

짧은 심볼 시간구간을 갖는 경우 CSS는 심볼간의 유사 직교성 때문에 BER 성능이 좋지 않다.^[8] 따라서 본 논문에서는 심볼 길이가 심볼 대역의 역수 보다 크거나 같을 경우 심볼 간 내적이 0이 되어 심볼간에 직교성이 보장되는 FSK(Frequency Shift Keying) 기반 휘슬 모방 수중통신 방법을 제안한다. 주파수 상에서 빠르게 변화하는 휘슬을 모방한 통신신호는 매 심볼의 반송 주파수가 변화하기 때문에 채널 지연이 발생할 경우에도 심볼 간 간섭(ISI)이 발생하지 않는다. 본 논문에서는 이런 신호의 특징을 이용하여 수신신호 복조 시 채널 지연된 신호를 통해 다중경로를 결합하여 이득을 추가로 얻을 수 있는 방법도 제안한다. 제안된 방법의 성능을 보이기 위해 전산 모의 실험과 실제 호수실험을 하였으며 제안한 방법이 기존의 CSS를 이용한 방법보다 BER 성능이 향상되었으며 다중경로에 의한 추가적인 이득을 얻을 수 있음을 보였다. 그리고 생성된 모방 통신 신호와 본래 휘슬음의 시간-주파수 영역에서 평균 상호 상관값을 통해 제안한 방법의 모방도를 분석 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서 FSK 기반 돌고래 휘슬 모방 변조 방법을 설명하고, 3절에서 FSK 기반 휘슬 모방 통신 신호에서 다중경로 결합 이득을 얻는 방법을 설명한다. 4절에서는 전산 모의 실험과 실제 호수실험을 통해 제안한 방법의 BER 성능을 보이고 모방도를 분석한다. 그리고 5 절에서 결론을 맺는다.

II. FSK 기반 돌고래 휘슬 모방 변조방법

돌고래의 휘슬음은 시간에 따라 주파수가 변화하며 특정 패턴을 갖으며 이 패턴을 frequency contour라 한다.^[4,7] 이 휘슬음의 frequency contour와 수중 통신 신호의 시간-주파수 특성을 같게 만든다면 휘슬음과 유사한 주파수 변이를 가지는 통신신호를 생성할 수 있다. Frequency contour는 돌고래 휘슬음의 STFT

(Short Time Fourier Transform)를 사용하여 쉽게 얻을 수 있다. 휘슬음이 전체 시간길이 T 를 갖는 경우 STFT 결과 W 는 Eq. (1)을 이용하여 계산할 수 있다.^[2]

$$W[k \times \tau, f_k] = \sum_{n=1}^N w[n] h(n - k \times \tau) e^{-\frac{2\pi j n f}{N}}, \quad (1)$$

여기서 $w[n]$ 은 샘플링된 돌고래의 휘슬음, 그리고 $h(n)$ 는 윈도우, N 은 FFT 크기를 나타낸다. $k = 1, 2, \dots, K$ 이며 K 는 휘슬음의 시간 길이 T 를 임의의 시간 구간 τ 로 나눈 개수를 나타낸다.

휘슬음에 STFT를 취하면 매 τ 마다 변화하는 주파수 값($f_1, f_2, \dots, f_k, \dots, f_K$)을 알 수 있다. Fig 1은 Eq. (1)를 이

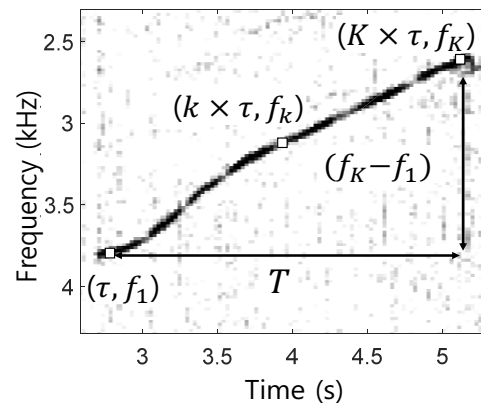


Fig. 1. Spectrogram of dolphin whistle.

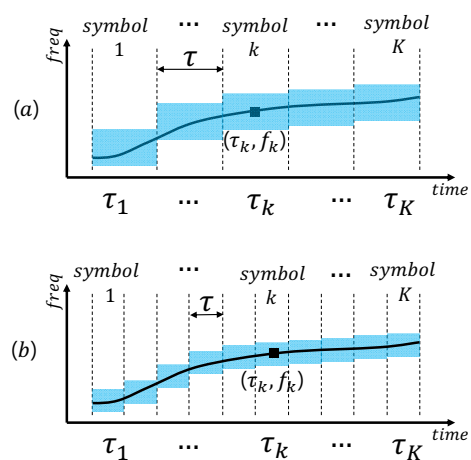


Fig. 2. Dolphin whistle mimicking communication signal spectrogram, (a) large K , (b) small K .

용하여 도출한 돌고래 휘슬음의 frequency contour 예이다.

본 논문에서 제안하는 돌고래의 휘슬음을 모방한 생체모방 FSK 수중 통신을 하기 위해서 다음과 같은 방법을 사용한다. 먼저 T 길이의 휘슬음을 짧은 시간 구간 τ 로 나누고 이 τ 구간을 디지털 통신의 심볼구간으로 정한다. 그러면 Eq. (1)로부터 K 개의 전송 가능한 심볼을 얻을 수 있다. k 번째 심볼을 Eq. (1)에서 얻은 주파수 f_k 를 기준으로 임의의 대역폭 f_m 을 가지는 FSK 신호로 변조하면 돌고래의 휘슬음과 유사한 frequency contour를 가지는 생체모방 통신신호를 만들 수 있다. Fig. 2(a)와 같이 큰 심볼 길이 τ 와 대역폭 f_m 을 설정한다면 돌고래 소리를 자연스럽게 모방하기 어렵지만, Fig. 2(b)와 같이 τ 와 f_m 이 작게 설정하면 고래의 휘슬음과 유사하게 된다.

심볼 길이 τ 와 대역폭 f_m 은 주어진 수중 채널 환경에서 통신이 가능한 범위 내에서 모방도를 높이기 위해 변조 대역을 작게 설정하는 것이 좋다. 본 논문에서는 모방도 분석을 위해 기존 연구에서 제안된 시간-주파수 영역에서 평균 상호 상관 값을 구한다.^[2]

CSS 기반 모방 방법은 up/down chirp을 사용하며 모방도를 높이기 위해 심볼의 길이를 작게 설정하는 경우 심볼이 유사 직교성이 낮아져서 BER 성능이 저하된다. FSK 기법에서 매 심볼에 해당되는 주파수 간의 직교성을 유지하기 위해서는 아래 Eq. (2)를 만족하면 된다.^[9]

$$f_m \geq 1/\tau. \quad (2)$$

Eq. (2)를 만족하는 k 번째의 FSK 심볼을 반송주파수 f_k 로 전송하면 심볼 간 직교성을 갖는 생체모방 FSK 신호가 된다. 직교성을 만족하는 2진 FSK 기반 휘슬 모방 통신 신호는 아래 Eq. (3)과 같이 생성할 수 있다.

$$x(t) = \begin{cases} \cos[2\pi(f_k - f_m/2)t], & \text{bit : 0} \\ \cos[2\pi(f_k + f_m/2)t], & \text{bit : 1} \end{cases} \quad (3)$$

위와 같이 생성된 생체모방 FSK 신호를 전송할 때 수신단 동기 및 채널 추정을 위해 preamble을 포함하는 통신 프레임에 설계한다. 이 preamble을 생체모방 통신의 은밀성을 높이기 위해 FSK로 변조된 신호가

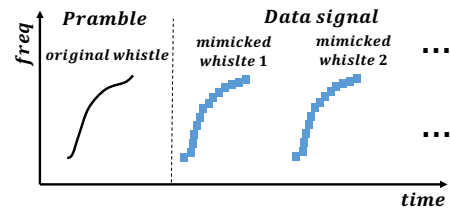


Fig. 3. Dolphin whistle biomimicking communication signal structure.

아닌 실제 돌고래의 휘슬음과 같은 frequency contour를 가지는 chirp 신호를 사용하면 좋다. 이러한 통신 프레임 구조의 예는 Fig. 3에 나타내었다.

Eq. (2)에서 구한 변수를 이용한 FSK 기반 생체모방 통신 신호는 시간마다 주파수 f_k 로 hopping하기 때문에 Fast Hopping(FH)-FSK 변조신호와 같다. Coherent 수신기는 수신 신호의 위상정보를 이용하여 송신 신호를 검출하기 때문에 채널 추정이 필요하다. Fast hopping 신호의 경우 심볼 단위로 hopping하므로 파일럿을 통한 채널 추정이 어렵다. 따라서 fast hopping 신호는 수신신호의 위상정보를 사용하지 않는 non-coherent한 수신기를 사용해야 한다. 그러므로 제안된 FSK 기반 생체 모방 통신 신호는 non-coherent 수신기를 사용한다. 만일 수신단에서 모방된 휘슬음의 시간-주파수 특성 (τ_k, f_k)를 알고 있다면 k 번째 심볼을 f_k 로부터 기저대역으로 dehoppping한 후 일반적인 에너지 검출 방식을 사용하여 복조할 수 있다.

다음절에서는 FSK 기반 생체모방 통신 신호를 복조할 때 전송신호가 주파수가 변이 성질에 의해 ISI 없이 다중경로 결합 이득을 얻는 방법을 설명한다.

III. 다중경로 이득을 이용한 FSK 기반 휘슬 모방 복조 방법

송신 센서에서 전송된 신호는 수신 센서로 직접 도달하는 경로와 수면이나 바닥에 반사되는 경로 등의 다중경로 채널을 통해 수신된다. 이 다중경로 신호는 연속되는 심볼이 전송될 때 다음 심볼에 영향을 주어서 ISI를 발생시키기도 하지만 다음 심볼에 주는 영향이 없다면 원래 전송 신호의 정보를 담고 있다. 이러한 다중경로에 포함된 전송 신호의 정보를 복호 시 이용한다면 통신 성능을 향상시킬 수 있

다. 본 절에서는 수중 채널에서 돌고래의 휘슬음이 시간에 따라 주파수 변이할 경우 다중경로에 의해 지연된 신호를 이용하여 통신 성능을 향상시키는 다중경로 결합방법을 제안한다.

송신 센서에서 수신 센서로 직접 전송되는 신호보다 d_l 시간 지연되는 경우에 모든 다중경로를 포함하여 수신된 FSK 기반 휘슬 모방 통신 신호 $r(t)$ 는 Eq. (4)와 같다.

$$r(t) = \sum_{l=1}^L g_l(t) \times x(t-d_l) + n(t). \quad (4)$$

Eq. (4)에서 $g_l(t)$ 는 시간 t 에서 l 번째의 다중경로의 채널 값이고 $n(t)$ 는 가우시안 잡음을 나타낸다.

휘슬음 생체 모방 FSK 신호는 주파수가 시간에 따라 변화하기 때문에 인접한 두 심볼이 서로 다른 주파수를 사용한다면 ISI(Inter Symbol Interference)를 회피할 수 있다. 그러나 휘슬 모방 FSK 신호에서 연속되는 두 심볼의 반송주파수가 같거나 f_m 만큼 차이 나는 경우에는 ISI가 발생한다. 그러므로 k 번째 심볼이 이전 심볼과 다른 주파수를 사용하여 ISI를 회피하기 위한 반송주파수 f_k 는 Eq. (5)를 만족해야한다. Eq. (5)에서 k 는 Fig. 2의 1부터 K 의 범위를 갖는다.

$$f_k = \{f_k | (f_k \neq f_{k-1}) \cap ((f_k \pm f_{k-1}) \neq f_m)\}. \quad (5)$$

Eq. (5)와 같이 심볼 간에 서로 다른 주파수를 사용하면 다중경로 지연으로 인한 ISI가 발생하지 않기 때문에 다중경로로 들어온 신호를 결합하여 수신 SNR(Signal to Noise Ratio)을 높일 수 있다.

다중경로 신호를 수신 복호 시에 이용하는 방법으로 CDMA(Code Division Multiple Access)의 RAKE 수신기가 있다.^[10-12] 본 논문에서 사용하는 FSK 기반 생체모방 수신기는 non-coherent 복조를 이용하고 L 개의 다중경로에서 얻은 신호의 에너지를 합함으로써 수신 SNR을 증가시키므로 RAKE 수신기의 최대 우도 비 결합에 상응하는 효과를 얻을 수 있다. 이와 같은 방법으로 다중경로의 이득을 결합하여 얻을 수 있는 이득은 Eq. (6)과 같다.

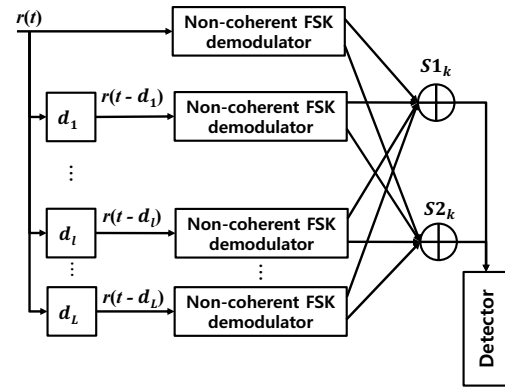


Fig. 4. Multipath gain combiner.

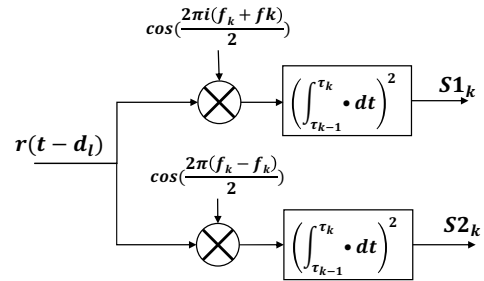


Fig. 5. Non-coherent FSK demodulator.

$$G = 10 \log \left(\frac{1}{|g_1|^2} \sum_{l=1}^L |g_l|^2 \right) (dB). \quad (6)$$

다중경로 지연 시간 d_l 는 수신단에서 preamble을 이용하여 추정할 수 있다. 추정한 모든 다중경로에 대해 non-coherent 에너지 검출기를 사용하여 신호를 검출하고 합하면 다중경로 결합 이득을 얻을 수 있다. 이 구조는 채널 등화기가 사용되지 않기 때문에 간단하게 구현할 수 있으며 구조는 Fig. 4에 나타내었다.

L 개의 다중 경로로 수신된 k 번째 심볼은 각각의 경로로 수신된 신호의 주파수 에너지의 합으로 검출할 수 있다. Fig. 5는 l 번째 경로로 수신된 신호의 주파수를 non-coherent FSK demodulator로 구하는 과정을 나타낸다.

$f_k + f_m/2$ 와 $f_k - f_m/2$ 의 에너지를 각각 $S1_k$ 과 $S2_k$ 라 할 경우 모든 다중경로에서 구한 $S1_k$ 와 $S2_k$ 의 합 중 큰 에너지를 갖는 주파수를 검출하여 Fig. 4와 같이 전송된 bit를 결정한다.

IV. 실험

제안한 방식의 FH-FSK 방식 및 다중경로 결합 방식의 BER 성능을 기존 CSS 방식과 비교한다. 전산 모의 실험을 위해 Bellhop 모델을 통해 얻은 해양 채널을 사용하여 다중경로 결합 이득에 대한 성능을 보이고, 이 방법을 이용한 BER 성능 분석 실험을 진행하였다. 경천호에서 실제 호수 실험을 수행하였다. 그리고 생체 모방 신호와 돌고래 휘슬음의 시간-주파수영역에서 평균 상호 상관 값을 통해 CSS 기반 생체모방 신호와 제안한 FSK 기반 생체 모방 신호의 모방도를 분석 및 비교하였다.

수신기에서 다중경로로 인한 이득을 분석하기 위해 2-path 채널을 가정하였다. 본 논문에서 제안한 다중경로 이득을 얻는 경우 같은 BER을 얻기 위해 기존 방법 보다 더욱 낮은 SNR이 요구된다. 이때 다중경로 이득에 의해 SNR이 감소하는 값을 SNR이득이라 한다. 첫 번째 경로의 채널이득은 1로 설정하였고 2번째 채널의 크기를 0.4~0.9로 변화시키면서 같은 BER을 얻는 경우 SNR이득 값을 확인하였다. FSK 기반 휘슬 모방 통신 신호의 심볼 길이 τ 는 20 msec이고 변조 대역 f_m 는 300 Hz이다. 실험 결과 BER에 따른 SNR이득 값은 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 g_2 는 첫 번째 경로의 채널 대비 2번째 경로의 채널 크기 값을 나타낸다. x축은 FSK기반 휘슬 모방 통신의 수신 BER을 나타내고 y축은 2번째 경로로 인한 SNR 이득 값을 나타낸다. Fig. 6에서 g_2 가 0.9, 0.6, 0.4 일 때 얻어지는 최대 SNR 이득은 각각 2.35 dB, 1.27 dB, 0.6 dB이다. Eq. (6)을 통해 g_2 에 대한 최대 이득 G 를 구하면 각각 2.6 dB, 1.34 dB, 0.65 dB이므로 Fig. 6의 전산모의 실험 결과와 유사함을 알 수 있다. 수신 신호의 SNR이 낮은 경우 다중경로 지연 추정 시 오차가 발생하기 때문에 다중경로 결합 이득이 이론값보다는 낮게 나타났다. 이 실험으로 부터 제안한 다중경로 결합 이득 방법은 FH-FSK 복호 시에 수신 SNR을 향상시킴을 확인할 수 있다.

다음으로 전산 모의 실험을 통해 다중경로 수중 채널에서 FSK기반 휘슬 모방 통신 방법과 CSS기반 모방 통신 방법의 BER 과 비교한다. 다중경로가 존재하는 환경에서 CSS기반모방 통신 신호의 수신기는

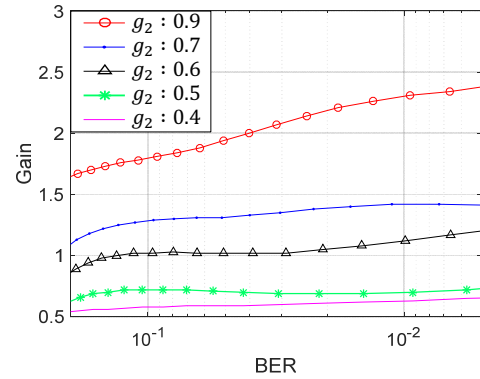


Fig. 6. Path combining vs BER gain.

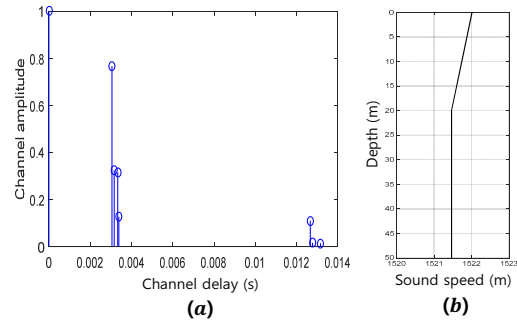


Fig. 7. Channel delay (a) and sound speed profile (b).

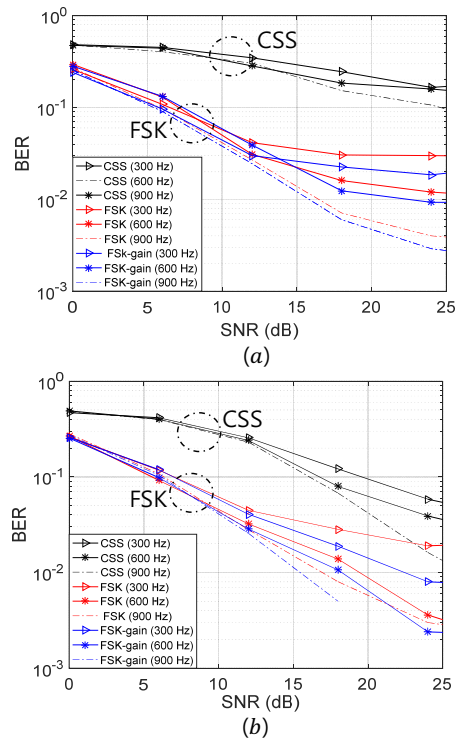


Fig. 8. Simulation BER result, (a) 10 msec, (b) 20 msec.

MC(Matched Correlation)를 이용한다. 제안한 방법의 BER을 구할 때 다중경로 결합 이득 방법을 사용하였다. 다중경로 수중채널은 Bellhop모형을 통해 Fig. 7(b)와 같은 음속 구조를 갖도록 모델링하였다. Bellhop 모델링 결과 얻어진 수중 채널은 Fig. 7(a)와 같다.

돌고래 소리와 유사하며 수중환경에서 통신이 가능하도록 FSK기반 휘슬 모방 통신 신호와 CSS기반 휘슬 모방 통신 신호의 심볼 길이를 10 msec, 20 msec로 변조 대역은 300 Hz, 600 Hz, 900 Hz로 설정하였다. 이 신호가 Fig. 7의 채널을 통과하여 얻은 전산모의 실험 BER 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 다중경로결합 이득을 얻기 위해 추정된 여러 다중경로 중 크기가 제일 큰 경로 값의 60% 이상인 크기를 가지는 경로 3개를 선택하여 결합하였다.

Fig. 8(a)는 심볼 길이가 10 msec인 경우, 그리고 (b)는 20 msec인 경우의 BER 결과이다. 검은색 선은 CSS기반 휘슬 모방 통신, 붉은색 선은 FSK기반 휘슬 모방통신 그리고 파란색 선은 다중경로 결합 이득을 얻는 BER결과를 나타낸다.

Fig. 8(a)의 10 msec의 BER결과는 Fig. 8(b)의 20 msec인 경우보다 작은 BER을 보인다. non-coherent FSK 신호 복조 방법은 신호를 시간에 대해 적분하여 신호의 에너지를 구하기 때문에 심볼 길이가 길수록 신호 전력의 높아지고 SNR이 커진다. 따라서 Fig. 8에서 신호의 심볼 길이가 길수록 좋은 BER 성능을 보인다. 제안한 FSK 방법은 Eq. (2)의 직교성을 만족하도록 설계되어있기 때문에 CSS에 비해 BER성능이 높다. 다중경로 결합 이득의 경우 수신 SNR이 낮은 경우 다중경로 지연시간 추정 오차로 인하여 모든 다중경로의 이득을 얻기 어렵기 때문에 BER 이론값만큼 향상되지 않는다. 그러나 SNR이 높아질수록 추정오차가 적어져서 다중경로 결합 이득으로 인한 BER 성능이 향상됨을 알 수 있다. Fig. 7(a) 채널에서 다중경로를 통해 얻을 수 있는 최대 이득 G 는 2.6 dB이다. 시뮬레이션 결과 20 msec 300 Hz 경우 SNR 25 dB에서 FSK기반 휘슬 모방 통신 신호가 다중경로 결합 이득을 얻어 BER이 0.019에서 0.008로 BER 성능이 약 2배 향상됨을 보였다.

실제 호수 실험은 한국 경천호에서 2018년 5월 28일 진행하였다. 호수실험에서는 제안한 FSK 방법과

CSS의 BER 성능을 비교하였다.

Fig. 9는 호수실험의 환경을 나타낸다. 송신 센서(Tx)와 수신 센서(Rx)의 거리는 약 300 m이며, 가장 깊은 곳의 수심은 약 37.5 m이다. Tx의 깊이는 5 m이고 Rx의 깊이는 30 m이다.

실험에 사용된 샘플링 주파수는 192 kHz이다. 호수 실험에 사용된 FSK기반 휘슬 모방 신호와 CSS기반 휘슬 모방신호의 심볼 길이와 대역은 전산모의 실험에서 사용한 것과 같다. 아래의 Fig. 10(a)는 심볼 길이 10 msec, 변조대역 300 Hz인 FSK 휘슬 모방 신호를 전송하였을 때 수신된 신호의 스펙트로그램을 나타낸 것이다. Fig. 10(b)는 preamble을 통해 구한 다중경로 채널의 시간축에서 크기를 나타낸다.

호수실험을 통해 얻은 FSK와 CSS 휘슬 모방 신호의 BER 결과 및 다중경로 결합 이득을 이용한 FSK의

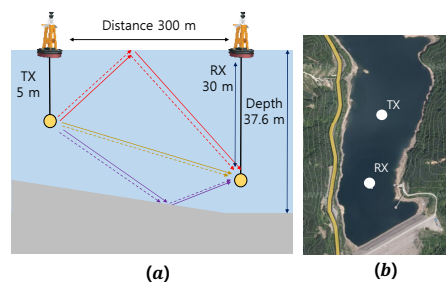


Fig. 9. Lake experiment configuration.

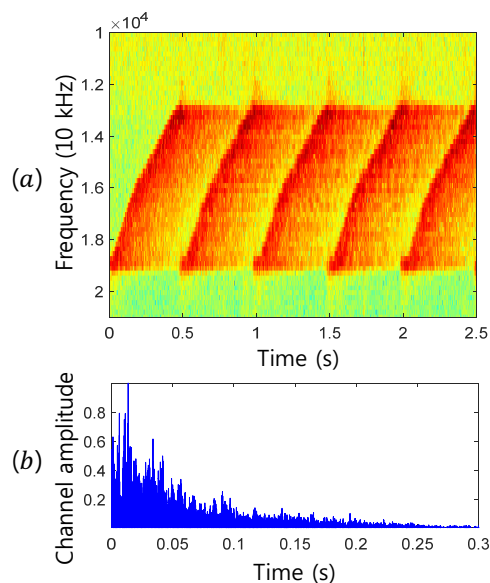


Fig. 10. Received signal spectrogram (a) and time delay spread (b) of Kyungchun lake experiment.

Table 1. BER results of Kyugchun lake experiments.

modulation scheme		CSS	FSK-one symbol	FSK-multipath gain combiner
10 msec	300 Hz	0.329	0.101	0.057
	600 Hz	0.284	0.077	0.061
	900 Hz	0.235	0.085	0.058
20 msec	300 Hz	0.245	0.019	0.014
	600 Hz	0.197	0.015	0.006
	900 Hz	0.185	0.008	0.002

Table 2. Correlation coefficient average.

Modulation scheme		CSS based whistle mimick signal	FSK based whistle mimick signal
10 msec	300 Hz	0.982	0.992
	600 Hz	0.950	0.963
	900 Hz	0.903	0.923
20 msec	300 Hz	0.977	0.987
	600 Hz	0.948	0.962
	900 Hz	0.901	0.910

BER 결과를 Table 1에 나타내었다. 복조 시 다중경로 결합 방법은 전산모의 실험과 같이 60% 이상 크기의 3개를 사용하였다.

Table 1의 호수 실험 결과도 심볼간 직교성이 만족하는 FSK 기법의 BER 성능이 CSS 보다 우수하였다. 신호 길이가 20 msec이고 변조 대역이 900 Hz인 경우 FSK의 BER은 0.008로 CSS기반 통신 방법에 비해 최대 20배 향상되었다.

Fig. 10(b)의 채널에서 선택된 다중경로 3개의 결합 이득 G 는 약 5 dB이다. 전산모의 실험에 사용된 채널 보다 실제 호수 실험에서 다중경로 지연이 길고 커서 때문에 더 많은 결합 이득을 얻을 수 있다. 이 방법을 적용한 호수 실험에서 신호 길이가 20 msec이고 변조 대역이 900 Hz인 경우 BER은 0.002를 얻어서 다중경로 이득을 이용하지 않은 FSK 방법 비해 4배 성능 향상을 보였다.

제안된 FSK 기반 생체 모방 통신 신호와 CSS기반 생체 모방 통신 신호의 모방도를 비교하기 위해 돌고래 신호와 시간-주파수의 평균 상호 상관 값을 구하였다. Table 2에 실험에 사용된 변조 대역과 심볼 길이에 따른 평균 상호 상관 값을 나타내었다.

Table 2에서 같은 변조대역과 심볼 길이를 갖는 경

우 CSS기반 생체 모방 통신 신호에 비해 FSK 기반 생체 모방 통신 신호가 더 높은 모방도를 갖는 것을 확인할 수 있다. 변조 대역과 심볼 길이가 커지면 돌고래 신호와 다른 시간-주파수 성분을 갖게 되어 평균 상호 상관 값이 낮아지고 모방도가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이 경우 신호 전력이 증가하여 BER 성능이 좋아진다. 따라서 요구되는 BER을 만족하는 변조대역과 심볼 길이에서 모방도가 가장 높은 경우를 선택하는 것이 좋다.

V. 결 론

본 논문은 돌고래 휘슬음을 모방하는 FSK 전송방법과 수신단에서 다중경로 결합 이득을 얻는 방법을 제안하였다. 전산모의 실험에서 제안한 FSK 방법이 기존의 CSS 보다 좋은 성능을 보였고 다중경로 결합 이득으로 20 msec 300 Hz 경우 SNR 25 dB에서 BER이 2배 감소함을 보였다. 호수실험에서도 제안한 방법이 기존의 CSS의 BER보다 성능이 좋았고 다중경로 결합 이득을 사용할 경우에는 그렇지 않은 경우에 비해 최대 4배의 BER 성능이 향상 되고 같은 심볼 대역과 길이에서 더 높은 모방도를 보였다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음(UD170022DD 및 저주파수중음향연구실험소).

References

1. S. Liu, G. Qiao and A. Ismail, "Covert underwater acoustic communication using dolphin sounds," *J. Acoust. Soc. Am.* **133**, EL300 (2013).
2. S. Liu, T. Ma, G. Qiao, L. Ma, and Y. Yin, "Biologically inspired covert underwater acoustic communication by mimicking dolphin whistles," *J. Appl. Acoust.*, **120**, 120-128 (2017).
3. G. Qiao, Y. Zhao, S. Liu, and M. Bilal, "Dolphin sounds inspired covert underwater acoustic communication and micro modem," *J. Sensors*, **17**, 2447 (2017).
4. V. M. Janik and L. S. Sayigh, "Communication in bottlenose dolphins: 50 years of signature whistle

research,” J. Comparative Physiology A. **6**, 479-489 (2013).

5. D. K. Mellinger, S. W. Martin, R. P. Morrissey, L. Thomas, and J. J. Yosco, “A method for detecting whistles, moans and other frequency contour sounds,” J. Acoust. Soc. Am., **129**, 4055-4061 (2011).
6. T. H. Lin, L. S. Chou, T. Akamatsu, H. C. Chan, and C. F. Chen, “An automatic detection algorithm for extracting the representative frequency of cetacean tonal sounds,” J. Acoust. Soc. Am. **134**, 2477-2485 (2013).
7. D. Gillespie, M. Caillat, J. Gordon, and P. White, “Automatic detection and classification of odontocete whistles,” J. Acoust. Soc. Am. **134**, 2427-2437 (2013).
8. X. Wang, M. Fei, and X. Li, “Performance of chirp spread spectrum in wireless communication systems,” Proc. IEEE Communication Systems, Singapore, (2008).
9. W. R. Bennet and S. O. Rice, “Spectral density and autocorrelation functions associated with binary frequency shift keying,” J. Bell Labs Technical, **42**, 2355-2385 (1963).
10. G. E. Bottomley, T. Ottosson, and Y. P. E. Wang, “A generalized RAKE receiver for interference suppression,” J. IEEE Selected Areas in Communication, **18**, 1536-1545 (2000).
11. U. Gorb, A. L. Welti, E. Zollinger, R. Kung, and H. Kaufmann, “Microcellular direct-sequence spread spectrum radio system using N-path RAKE receiver,” J. IEEE selected Areas in Communication, **8**, 772-780 (1990).
12. B. M. Seo and H. S. Cho, “Performance evaluation of diversity reception of underwater acoustic code division multiple access using lake experiment” (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **36**, 39-48 (2017).

저자 약력

▶ 안 종 민 (JongMin Ahn)



2015년 2월 :인하대학교 전자공학과 학사
 2017년 2월 :인하대학교 전자공학과 석사
 2017년 3월 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 박사과정
 <관심분야> 수중통신, OFDM시스템, 5G 이동통신

▶ 이 호 준 (HoJun Lee)



2016년 2월 :인하대학교 전자공학과 학사
 2018년 2월 :인하대학교 전자공학과 석사
 2018년 3월 ~ 현재 인하대학교 전자공학과 박사과정
 <관심분야> 수중통신, 5G 이동통신

▶ 김 용 철 (YongChul Kim)



2018년 2월 :인하대학교 전자공학과 학사
 2018년 3월 ~ 현재 인하대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> Cognitive radio, 차세대 무선 이동 통신, MIMO-OFDM, UWB

▶ 김 완 진 (WanJin Kim)



2005년 2월 :부산대학교 전자전기통신공학과 학사
 2005년 2월 :부산대학교 전자공학과 석사
 2011년 3월 :부산대학교 전자공학과 박사
 2011년 11월 ~ 현재 국방과학연구소 선임연구원
 <관심분야> 적응신호처리, 레이더 및 소나시스템, 디지털 통신

▶ 정 재 학 (JaeHak Chung)



1988년 2월 :연세대학교 전자공학과 학사
 1990년 2월 :연세대학교 전자공학과 석사
 2000년 : University of Texas at Austin 전기전산학과 박사
 2001년 ~ 2005년 : 삼성중기원 수석연구원
 2005년 ~ 현재 : 인하대학교 전자공학과 정교수
 <관심분야> 수중통신, 수중신호처리