

Fig. 6. Sound speed profile.

Table 1. Underwater channel parameters.

Parameters	Values
Transmitter depth	200 m
Receiver depth	200 m
Distance	10 km
Sound speed at bottom	1457 m/s
Bottom density	1.48 g/cm ³
Attenuation coefficient	0.1 dB/

Fig. 7. Channel impulse response.

된 채널 이득이 -3.7 dB인 93 ms의 긴 지연시간을 갖는다. 이 CIR을 이용하여 Rician 채널을 생성하였고, 이때 모든 경로의 K-factor는 20 dB 그리고 도플러 천이(Doppler shift)는 4 Hz로 설정하였다.

전산 모의실험에 사용된 각 기법들의 변조 파라미터들을 Table 2에 나타내었다. CSS의 처프율은 심볼 길이인 4 ms와 심볼 대역폭인 250 Hz 간의 비율로 62.5 Hz/ms 이다.

실험에 사용된 돌고래 휘슬음과 주파수 윤곽 추출 과정 그리고 모방 신호의 스펙트로그램을 Fig. 8에

Table 2. Modulation parameters.

Scheme	Proposed	CSS	FSK
FFT size	192	-	-
Symbol duration	4 ms		
Symbol bandwidth	250 Hz		
Whistle duration	200 ms		
Sampling rate	192 kHz		

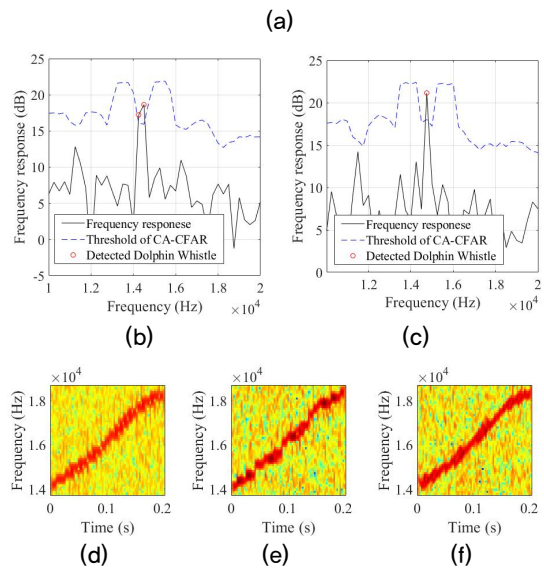


Fig. 8. (Color available online) Frequency contour extraction and modulation: (a) spectrogram of the original dolphin whistle; (b) and (c) extraction of the dolphin whistle by the CA-CFAR; (d), (e) and (f) modulated signal of the proposed method, FSK, and CSS, respectively.

나타내었다. Fig. 8(a)는 본래의 돌고래 휘슬음이고 모방하고자 하는 신호를 검은색 박스로 표시하였다. 돌고래 휘슬음의 주파수 윤곽을 추출하기 위해 CA-CFAR의 임계값을 0.005로 설정하였으며 훈련 셀과 보호 셀의 크기는 각각 8과 2로 설정하였다. 이를 통해 추출된 주파수 윤곽을 Fig. 8(b)와 (c)에 나타내었

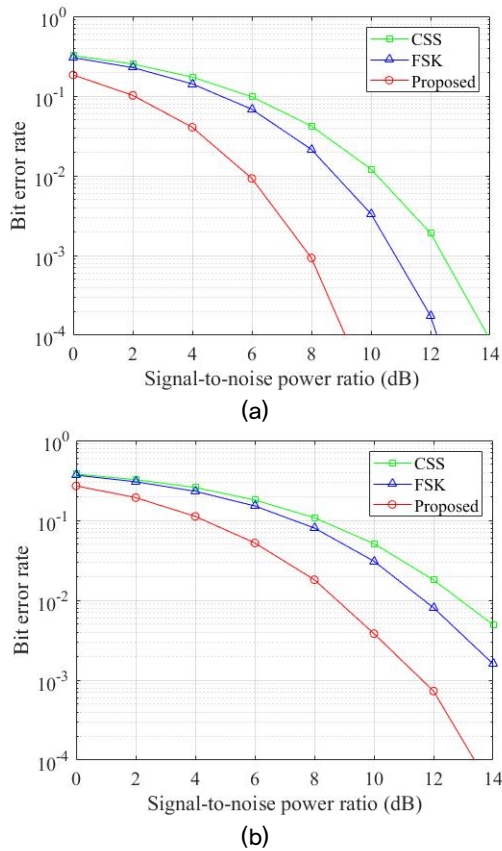


Fig. 9. (Color available online) BER results: (a) AWGN; (b) Rician channel.

다. 검은색 실선은 실제 휘슬음의 주파수 응답이고 파란색 파선은 CA-CFAR의 임계 값, 그리고 빨간색 원형 마커는 검출된 돌고래 휘슬음이다. 그리고 Fig. 8(d)~8(f)에 제안 방법, FSK, 그리고 CSS로 모방 변조된 통신 신호의 스펙트로그램을 각각 나타내었다. Fig. 8에서 보는바와 같이 돌고래 휘슬음의 주파수 윤곽을 추출하고, 이를 통해 모방된 변조 신호들의 주파수 윤곽이 원래의 돌고래 휘슬음의 주파수 윤곽과 유사함을 알 수 있다.

Fig. 9에 제안 방법과 기존의 기법들의 AWGN과 Rician 채널에서의 BER 결과들을 나타내었다. CSS와 FSK의 BER은 각각 녹색 사각형 마커와 파란색 삼각형 마커로 나타내었고 제안 방법은 빨간색 원형 마커로 나타내었다.

Fig. 9(a)의 AWGN에서의 BER 결과에서 알 수 있듯이, 심볼 간의 유사직교성을 이용하는 CSS에 비해 심볼 간의 주파수 직교성을 이용하는 FSK의 BER이

Table 3. Mimicking performances.

Scheme	Modulation order (mean/ variance)		
	2	4	8
Proposed	0.97/ 0.2×10^{-4}	0.97/ 0.2×10^{-4}	0.96/ 0.4×10^{-4}
FSK	0.91/ 1.3×10^{-4}	0.88/ 4.0×10^{-4}	0.82/ 9.1×10^{-4}
CSS	0.95/ 0.2×10^{-4}	-	-

우수한 것을 알 수 있다. 그리고 이론적으로 DPSK기반 OFDM은 비상관(noncoherent) FSK에 비해 BER 성능이 SNR에서 3 dB 우수하다. Fig. 9(a)에서도 제안 방법의 BER 성능이 FSK에 비해 SNR에서 3 dB 우수한 것을 볼 수 있다.

Fig. 9(b)의 Rician 채널의 BER 결과도 AWGN에서의 결과와 같이 제안 방법의 FSK의 성능이 CSS보다 우수한 것을 알 수 있다. 시간에 따라 주파수의 변화율이 큰 휘슬음을 모방한 통신 신호의 경우, 동일한 주파수에서 연속된 시간에 자원요소들이 위치하지 않기 때문에 심볼 길이보다 지연시간이 긴 경우에는 심볼간 간섭(Inter-Symbol Interference, ISI)이 발생하지 않는다. 본 전산 모의실험에서도 시간에 따른 주파수 변화가 큰 휘슬음을 모방하였고, OFDM 심볼 길이보다 두 번째 경로의 지연시간이 93 ms로 길기 때문에 ISI 발생하지 않는다. 그러나 다중 경로로 인해 발생하는 주파수 선택적 페이딩의 영향으로 일부 자원요소들의 채널 이득이 낮아져 오류가 증가하게 된다. 따라서, Rician 채널에 대한 세 기법들의 BER들은 AWGN에 비해 4 dB 만큼씩 성능 감소가 발생하였다.

제안한 방법과 기존 기법들의 모방 성능을 Table 3에 나타내었다. 모방 성능은 References [7]과 [8]에서 사용한 상호 상관도를 이용하였다. 상호 상관도의 평균이 1에 가까울수록, 그리고 분산이 0에 가까울수록 모방 성능이 우수한 것을 의미한다. Table 3에서 보는바와 같이 변조 차수가 2일 때 제안 방법의 상호 상관도의 평균이 0.97로 기존의 CSS와 FSK에 비해 우수한 모방 성능을 가지며, 변조 차수가 2, 4, 그리고 8로 증가함에 따라, 제안 방법의 모방 성능은 0.97, 0.97, 그리고 0.96으로 변화가 작지만 FSK의 경우에는 0.91, 0.88, 그리고 0.82로 열화량이 큰 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

기존의 CSS와 FSK 기반 생체 음향 모방 통신 기법들은 주파수 윤곽이 불연속성이 크고 변조 차수를 조정함에 따라 모방 성능의 차이가 크다. 본 논문에서는 이러한 문제들을 해결하기 위해 OFDM을 기반으로 하는 돌고래 휘슬음 모방 통신 기법을 제안하였다. 제안한 방법은 돌고래 휘슬음을 여러 개의 OFDM 심볼과 대응되는 시간 슬롯들로 나눈 후, 매 슬롯에서 돌고래 휘슬음이 위치한 주파수 대역을 갖는 부반송파에 DPSK 심볼을 매핑하여 변조한다. 부반송파의 주파수 대역폭에 의해 기존 기법과는 달리 불연속성이 줄어들고 변조 차수를 증가시켜도 모방 성능에 변화가 작다. 전산 모의실험을 통해 제안 방법의 BER과 모방 성능이 기존의 CSS와 FSK에 비해 우수함을 보였다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음(UD200010DD).

References

1. J. Ling, H. He, J. Li, and W. Roberts, "Covert underwater acoustic communications," *J. Acoust. Soc. Am.* **128**, 2898-2909 (2010).
2. R. Diamant, L. Lampe, and E. Gamroth, "Bounds for low probability of detection for underwater acoustic communication," *IEEE J. Oceanic Eng.* **42**, 143-155 (2016).
3. F. Qu, X. Qin, L. Yang, and T. C. Yang, "Spread-spectrum method using multiple sequences for underwater acoustic communications," *IEEE J. Oceanic Eng.* **43**, 1215-1226 (2018).
4. X. Shu, J. Wang, H. Wang, and X. Yang, "Chaotic direct sequence spread spectrum for secure underwater acoustic communication," *Applied Acoustics*, **104**, 57-66 (2016).
5. T. C. Yang and W. B. Yang, "Low probability of detection underwater acoustic communications using direct-sequence spread spectrum," *J. Acoust. Soc. Am.* **124**, 3632-3647 (2008).
6. S. Liu, T. Ma, G. Qiao, L. Ma, and Y. Yin, "Biologically inspired covert underwater acoustic communication by mimicking dolphin whistles," *Applied Acoustics*, **120**, 120-128 (2017).
7. J. Ahn, H. Lee, Y. Kim, W. Kim, and J. Chung, "Multipath combining method for frequency shift keying underwater communications mimicking dolphin whistle" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **37**, 404-411 (2018).
8. J. Ahn, H. Lee, Y. Kim, S. Lee, and J. Chung, "Mimicking dolphin whistles with continuously varying carrier frequency modulation for covert underwater acoustic communication," *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, SGGF05 (2019).
9. J. Ahn, H. Lee, Y. Kim, W. Kim, and J. Chung, "Machine learning based biomimetic underwater covert acoustic communication method using dolphin whistle contours," *Sensors*, **20**, 6166 (2020).
10. A. Elmosilmy, M. Zhou, T. M. Duman, and P. S. Antonia, "An underwater acoustic communication scheme exploiting biological sounds," *Wireless Communications and Mobile Computing*, **16**, 2194-2211 (2016).
11. X. Han, J. Yin, P. Du, and X. Zhang, "Experimental demonstration of underwater acoustic communication using bionic signals," *Applied Acoustics*, **78**, 7-10 (2014).
12. S. Liu, M. Wang, T. Ma, G. Qiao, and M. Bilal, "Covert underwater communication by camouflaging sea piling sounds," *Applied Acoustics*, **142**, 29-35 (2018).
13. H. Lee, J. Ahn, Y. Kim, S. Lee, and J. Chung, "Time-frequency modulation based mimicking dolphin whistle for covert underwater acoustic communication," *Jpn. J. Appl. Phys.* **59**, SKKF03 (2020).
14. H. Lee, J. Ahn, Y. Kim, S. Lee, and J. Chung, "A biomimetic communication method based on time shift using dolphin whistle" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **38**, 580-586 (2019).
15. G. V. Trunk, "Range resolution of targets using automatic detectors," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*, **5**, 750-755 (1978).
16. H. Lee, S. Kim, and J. Chung, "Performance analysis of anti-jamming by CFAR detector in frequency-hopping spread spectrum systems" (in Korean), *JKICS*. **42**, 2069-2078 (2017).
17. H. Kim, J. Seo, J. Ahn, and J. Chung, "Snapping shrimp noise mitigation based on statistical detection in underwater acoustic orthogonal frequency division multiplexing systems," *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 07JG02 (2017).
18. Z. Messali, F. Soltani, and M. Sahmoudi, "Robust radar detection of CA, GO and SO CFAR in Pearson measurements based on a non linear compression procedure for clutter reduction," *Signal, Image, and Video Processing*, **2**, 169-176 (2008).

19. H. Lee, J. Ahn, Y. Kim, and J. Chung, "Antijamming improvement for frequency hopping using noise-jammer power estimator," *Applied Sciences*, **10**, 1733 (2020).
20. J. Chung, E. J. Powers, W. M. Grady, and S. C. Bhatt, "Adaptive power-line disturbance detection scheme using a prediction error filter and a stop-and-go CA CFAR detector," *Proc. IEEE ICASSP*. 1533-1536 (1999).
21. H. Sohn, K. J. Park, Y. R. An, S. G. Choi, Z. G. Kim, H. W. Kim, D. H. An, Y. R. Lee, and T. G. Park, "Distribution of Whales and Dolphins in Korean Waters Based on a Sighting Survey from 2000 to 2010," *Korean J. Fish Aquat Sci.* **45**, 486-492 (2012).
22. Y. C. Jung, K. H. Lee, W. Seong, and S. Kim, "Ocean bottom reverberation and its statistical characteristics in the East Sea," *J. Acoust. Soc. Kr.* **38**, 82-95, (2019).

▶ 설 승 환 (Seunghwan Seol)



2020년 2월: 인하대학교 전자공학과 학사
2020년 3월 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 통합과정
<관심분야> 수중통신, 머신 러닝, 통신 네트워크 등

▶ 김 완 진 (Wanjin Kim)



2005년 2월: 부산대학교 전자전기통신공학과 학사
2007년 2월: 부산대학교 전자공학과 석사
2011년 8월: 부산대학교 전자공학과 박사
2011년 11월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임연구원
<관심분야> 적응신호처리, 레이더 및 소나 시스템, 디지털 통신 등

저자 약력

▶ 이 호 준 (Hojun Lee)



2016년 2월: 인하대학교 전자공학과 학사
2018년 2월: 인하대학교 전자공학과 석사
2018년 3월 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 박사과정
<관심분야> 수중통신, 생체 모방 통신, 소나 신호처리, 머신 러닝 등

▶ 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 정교수
<관심분야> 수중통신, 수중신호처리, 머신 러닝 등

▶ 안 종 민 (Jongmin Ahn)



2015년 2월: 인하대학교 전자공학과 학사
2017년 2월: 인하대학교 전자공학과 석사
2017년 3월 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 박사과정
<관심분야> 수중통신, 생체 모방 통신, 머신 러닝 등

▶ 김 용 철 (Yongcheol Kim)



2018년 2월: 인하대학교 전자공학과 학사
2018년 3월 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 통합과정
<관심분야> 수중통신, 통신 네트워크, 머신 러닝 등