

생체모방 은밀 수중 음향 통신 연구 동향

Research trends of biomimetic covert underwater acoustic communication

설승환,¹ 이호준,¹ 김용철,¹ 김완진,² 정재학[†]

(Seunghwan Seol,¹ Hojun Lee,¹ Yongcheol Kim,¹ Wanjin Kim,² and Jaehak Chung^{1†})

¹인하대학교, ²국방과학연구소

(Received January 13, 2022; revised February 18, 2022; accepted March 4, 2022)

초 록: 은밀 수중 통신은 수중에서 신호를 전송할 때 다른 대상이 감지하지 못하도록 보내는 통신 방법이다. 수중에서 정보를 은밀하게 보내는 방법은 Radio Frequency(RF)에서 사용되는 방법과 유사하게 Low Probability of Detection(LPD)와 Low Probability of Intercept(LPI)의 특성을 고려하여 설계된다. 그러나 수중에서 음향을 이용하여 통신하는 경우 협소한 주파수 대역폭으로 인해 은밀성을 확보하기 어렵다. 기존의 신호 전송 전력을 낮추거나 변조 대역폭을 늘리는 방법과는 다르게 수중 포유류의 음향 신호를 모방하여 신호를 보내는 방법이 연구되고 있다. 생체모방 은밀 수중음향통신은 주로 돌고래나 고래가 발생시키는 클릭음이나 휘슬음을 모방한다. 본 논문은 이러한 생체모방 은밀 수중음향통신의 발전 가능성과 향후 필요한 연구 분야를 파악하기 위해 생체모방 통신 기술들을 조사하고 이에 따른 연구 동향을 소개한다.

핵심용어: 수중 음향 통신, 생체모방 통신, 은밀 통신, 고래류 소리, 연구 동향

ABSTRACT: Covert Underwater Communication (CUC) signals should not be detected by other unintended users. Similar to the method used in Radio Frequency (RF), covert communication technique sending information underwater is designed in consideration of the characteristics of Low Probability of Detection (LPD) and Low Probability of Intercept (LPI). These conventional methods, however, are difficult to be used in the underwater communications because of the narrow frequency bandwidth. Unlike the conventional methods of reducing transmission power or increasing the modulation bandwidth, a method of mimicking the acoustic signal of an underwater mammal is being studied. The biomimetic underwater acoustic communication mainly mimics the click or whistle sound produced by dolphin or whale. This paper investigates biomimetic communication method and introduces research trends to understand the potential for the development of such biomimetic covert underwater acoustic communication and future research areas.

Keywords: Underwater acoustic communication, Biomimetic communication, Covert communication, Cetacean sound, Research trends

PACS numbers: 43.60.Dh, 43.80.Ka

1. 서 론

수중에서는 물의 매질 특성상 전자기파를 이용한 통신이 어려워 음향 통신을 이용한다. 수중음향통신의 경우 음파의 방향성으로 인해 송신된 신호가 의

도된 수신기 외에 다른 수신기로 전달될 수 있다. 이에 따라 군사 분야에서는 정보를 은밀하게 전송해야 하므로 은밀 수중 음향 통신에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^[1-3]

군용 은밀 수중음향통신의 경우 송신하는 신호가

†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)



Copyright©2022 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Table 1. Summary of modulation technique, pros and cons of biomimetic underwater communication method that mimicking the click and whistle sound.

Dolphin sound	Modulation technique	pros.	cons.
Click sound	Transmitting information in the click sound itself	• wide bandwidth	• short range communication
Whistle sound	Divide the whistle into multiple time slots and transmit with information in each slot	• long range communication • high data rate	• low mimicking performance
	Use each whistle as a symbol	• long range communication • high mimicking performance	• low data rate

수중 채널을 통과할 때 낮은 신호 대 잡음비 환경에서도 정보가 전달되도록 하여 채널 상에서 신호의 존재를 알기 어렵게 하는 Low Probability of Detection (LPD)와 적외 신호를 가로채더라고 신호를 복구하기 어렵게 만드는 Low Probability of Intercept(LPI)가 중요한 매개변수이다.^[4,9] 일반적으로 은밀 통신은 적외 존재 여부를 탐지하기 위해 수신 신호의 에너지를 측정하므로 송신 신호의 에너지를 넓은 대역폭에 걸쳐 분산시켜 전력 스펙트럼 밀도를 줄이기 위해 개발되었다.^[4,9] 그러나 수중음향통신에서는 사용이 가능한 대역폭이 너무 작아 신호 에너지를 분산시키기 어렵다.^[4,9] 이를 위해 좁은 대역폭의 저에너지 전송 방법이 개발되었으나 이러한 방식은 큰 Bit Error Rate(BER) 성능을 나타낸다. 대안으로 기존의 은밀 수중음향 통신의 문제점을 극복하기 위해 수중 동물의 생물학적 소리를 모방하는 생체모방 은밀 수중 통신방식이 개발되었다. 수중 동물의 생체 소리를 모방하여 적외 수중 동물의 소리와 통신 신호를 혼동하도록 한다. 모방된 신호는 전송 에너지를 줄일 필요가 없기 때문에 기존의 은밀 수중 통신 방식보다 더 나은 BER 성능을 얻을 수 있다. 이에 따라 생체모방 은밀 수중음향 통신방식이 새로운 은밀 통신방식 중 하나로서 연구가 수행되고 있다. 따라서 본 논문에서는 생체모방 은밀 수중 음향통신의 발전 가능성과 향후 필요한 연구 분야를 파악하기 위해 생체모방 은밀 수중 음향통신과 관련한 대표적인 연구 내용들을 조사하여 나타낸다.

II. 수중 생체모방 기술

생체모방 은밀 수중음향 통신은 주로 돌고래 또는 고래의 소리를 모방하여 통신 신호를 생성하는 변조

기법을 적용한다. 돌고래 소리는 크게 클릭음과 휘슬음으로 분류되며 이를 모방하여 통신 신호를 생성한다. 클릭음은 위치를 파악하거나 물체를 감지 및 식별하는 데 사용되는 신호로 시간 길이가 짧고 대역폭이 넓어 펄스 신호와 유사한 특징을 가지고 있다.^[10,11] 클릭음을 모방하는 통신 신호는 이러한 특성 때문에 은폐성이 좋고 다중 경로 분해능 측면에서 장점을 가지는 반면 넓은 대역폭과 짧은 시간 길이로 인해 통신 범위가 짧다는 단점이 있다. 휘슬음은 돌고래 간의 사회적 의사소통을 위해 사용되는 신호로 클릭음에 비해 시간 길이가 길고 시간-주파수 구조 및 대역폭이 다양한 특징을 가지고 있다.^[10,11] 휘슬음을 모방하는 방법에는 모방하고자 하는 휘슬음을 시간 영역에서 여러 개의 슬롯으로 나누어 슬롯마다 정보를 담아 전송하는 방법과 휘슬음 자체를 심볼로써 사용하는 방법이 연구되었다. 전자의 경우 전송률이 높은 반면 모방성이 떨어지고 후자의 경우 모방성이 높은 반면 전송률이 떨어지는 상반관계를 가진다. 클릭음과 휘슬음을 모방하는 생체모방 수중 통신 기법의 변조 방법 및 장단점을 Table 1에 나타내었다. 본 논문에서는 생체모방 은밀 수중음향통신 관련한 대표적인 연구 내용을 알아보기 위해 II장에서는 클릭음을 모방하는 통신 기술, III장에서는 휘슬음을 모방하는 통신 기술을 휘슬음을 시간 영역에서 나누어 모방하는 방법과 휘슬음 자체를 사용하는 방법으로 나누어 설명한다.

III. 클릭음 모방 기술

군사 목적의 수중 음향 통신 시 교환 되는 정보의 가로채기를 방지하기 위해 통신이 은밀하게 이루어져야 한다. 이러한 은밀 통신 방식으로 돌고래의 클

Table 2. Summary of major achievements for covert underwater communication methods that mimics the click sound of marine mammal.

Author	Contribution	Year
Dol <i>et al.</i>	First biomimetic covert underwater communication experiment using dolphin click sound. ^[12]	2008
Liu <i>et al.</i>	Transmits information in time intervals of dolphin click sound, lake experiment using dolphin click sound achieving 37 bps data rate with BER 10^{-4} . ^[13] Used M-ray method achieve 69 bps data rate with BER less than 10^{-4} . ^[14]	2013 ~ 2014
Liu <i>et al.</i>	Used TH-PPM method modulates the transmission frame contains bit within each dolphin click, computer simulation achieve BER 10^{-3} at 0 dB SNR. ^[15]	2013
Jia <i>et al.</i>	Used the sound of sea lions to implement biomimetic covert underwater communication with bipolar orthogonal modulation. ^[16]	2015
Jiajia <i>et al.</i>	Design a BBICCF to provide support for MUP formations, by using killer whales' call pulse and achieve BER 10^{-5} at 15 dB SNR. ^[17]	2020
Jiajia <i>et al.</i>	Proposal of bio-inspired covert underwater acoustic communication method based on the characteristics of sperm whale clicks and achieve BER less than 10^{-3} at 15 dB SNR. ^[18]	2021

릭음을 모방하는 생체모방 수중 통신 방식들에 대한 연구가 진행되었다. 클릭음을 모방한 은밀 수중 통신 방식들에 대한 주요 성과를 Table 2에 나타내었다.

Reference [12]에서는 미리 녹음된 고래 및 돌고래의 클릭음을 기본 반송파 신호로 사용하여 수상함과 잠수함 간에 정보를 교환하는 시험을 최초로 시행하여 생체모방 수중 통신의 타당성을 검증했다. 이 시험에서는 여러 수신기를 사용하여 신호를 수신하였으나 채널 등화 기술을 사용하지 않아 낮은 BER 성능을 나타내었다.

Reference [13]에서는 돌고래의 클릭음에 정보를 담아 전송하기 위해 각 소리 신호의 시간 간격에 정보를 변조하는 방법을 개발하였다. 클릭음 사이의 시간 간격에 6비트 정보를 매핑하여 데이터를 전달하고, 클릭음 사이에 시간 간격을 변경하여 정보를 변조되어 높은 은밀성을 나타냈다. 제안한 방법에서는 Matching Pursuit(MP)와 레이크 수신기를 이용하여 BER 성능 10^{-4} , 전송률 37 bps을 달성했다. 이후 동일한 원리에 M-ray 기술을 적용하여 전송률을 69 bps까지 향상했다.^[14]

Reference [15]에서는 돌고래의 고주파 클릭음을 이용한 통신방식을 제안하였다. 제안한 방법은 돌고래의 고주파 클릭음을 모방하여 짧은 시간 간격을 갖는 광대역 펄스를 이용하여 정보를 전달한다. 각 펄스마다 1비트의 정보를 포함하며 Time Hopping(TH) 코드에 의해 변조되고 전체 프레임은 Pulse Position Modulation(PPM)에 의해 변조된다. 수신된 TH-PPM 펄

스는 상관 방법을 통해 복조되며 전산 모의실험을 통해 20 dB 신호대잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR) 환경에서 BER 성능 10^{-3} 을 달성하였다.

Reference [16]에서는 기존의 돌고래의 소리를 모방하던 방식과 달리 바다사자의 소리를 이용하여 생체모방 통신방식을 제안하였다. 모방 통신 신호를 생성하기 위해 바다사자의 클릭음을 세그먼트로 분류하여 압축하고 양극성 직교 변조 방식을 적용하여 전산 모의실험을 통해 0에 가까운 BER 성능을 달성하였다.

Reference [17]에서는 범고래 간의 통신 프로세스가 수중의 여러 플랫폼 간의 데이터 상호 작용 프로세스와 유사한 특성에 착안하여 범고래의 클릭음을 이용하여 군사 수중 플랫폼 형성에 대한 지원을 제공하기 위한 Basic Bio-Inspired Camouflage Communication Frame(BBICCF)를 제안했다. BBICCF는 각 수중 플랫폼을 범고래로 간주하고 각 플랫폼에 주어진 실제 범고래의 휘슬음과 클릭음으로 이루어진 call pulse train에 속하지 않은 다른 고유한 범고래 휘슬음을 통신 주소 코드로 할당한다. 그리고 원래의 call pulse train에 속한 범고래 클릭음을 통신 코드로 사용하고, 통신코드 간 시간 지연차와 통신 코드 수를 사용하여 통신 정보를 전달한다. 그런 다음 선택된 휘슬음 및 클릭음을 활용하여 원래의 call pulse train의 특성을 완전히 모방한 통신 프레임을 구성한다. 주소 코드의 효율적인 분류 및 복조를 위해 범고래의 시간-주파수 윤곽 추출 방법도 제안하였다. 제안한

Table 3. Summary of major the biomimetic covert underwater communication methods using whistle sound of marine animals.

Author	Contribution	Year
EIMoslimany <i>et al.</i>	Proposal of covert underwater communication method that mimic dolphin whistle using GFM, ocean experiment using mimics dolphin whistle achieving 127 bps data rate with BER 10^{-1} . ^[19] Achieved 69 bps data rate utilizing M-ray technique. ^[20]	2013 ~ 2016
Liu <i>et al.</i>	Mimicked dolphin whistles in DSSS signal and achieved BER 2×10^{-4} for 40 km distance. ^[21] Hides the modulated MSK signal in the spectral profile of the original dolphin whistles and achieved BER 10^{-3} with 10 bps data rate. ^[22]	2013 ~ 2017
Xiao <i>et al.</i>	Mimic dolphin whistle using differential pattern time delay shift coding, conducted an experiment in the tank and achieve 67 bps data rate at 0 dB SNR. ^[23]	2013
Bilal <i>et al.</i>	Compile humpback whale whistle into bionic Morse code and achieved BER less than 10^{-3} at -7 dB SNR for 5 km distance. ^[24]	2017
Ahn <i>et al.</i> Lee <i>et al.</i>	Developed Time-Frequency Shift Keying (TFSK) that assigns bit to time-frequency position where dolphin whistle is present, conducted an ocean experiment and achieve BER 3.5×10^{-4} at -10.5 dB SNR. ^[25] Used orthogonal code to reduce ambiguity between whistle pattern. ^[26]	2018
Ahn <i>et al.</i>	Proposal of machine learning based biomimetic covert underwater communication using various dolphin whistle patterns and achieve BER 2×10^{-3} in ocean experiment. ^[27]	2019

방법에 대해 전산 모의실험을 시행하여 신호대잡음 비 15 dB 이상 환경에서 BER 성능 10^{-5} 이하를 달성하였다.

Reference [18]에서는 향유고래 클릭음의 시간-주파수 특성의 결합 인코딩을 기반으로 한 생체모방 수중 음향 통신 기술을 제안하였다. 제안한 방법에서는 향유고래의 시간-주파수 윤곽 형태와 주파수 대역 분포의 특성을 분류하여 두 가지 특성을 기반으로 통신 코드를 구성한다. 향유고래 클릭음 간격 특성에 따른 서로 다른 통신 코드 간의 차등 시간 지연 차이 인코딩을 통해 생체 공학 통신 시퀀스가 구성된다. 제안한 방법을 검증하기 위해 얇은 해상 채널, 깊은 해상 채널 그리고 Additive White Gaussian Noise(AWGN) 환경에 대해 전산 모의실험을 시행하여 신호대잡음비 15 dB 이상 환경에서 BER 성능 10^{-3} 이하를 달성하였다.

IV. 휘슬음 모방 기술

휘슬음은 시간-주파수 영역에서 비선형 처프와 유사한 패턴을 가지며 이를 주파수 윤곽이라 한다. 휘슬음을 모방하는 방식은 휘슬음의 주파수 윤곽과 유사한 패턴을 갖도록 생성하여 사람이 듣기에 고래의 휘슬음과 유사해지도록 한다.^[19] 본 절에서는 휘슬음 자체를 이용하는 은밀 통신 방법을 적용한 연구와 휘슬음을 시간 영역에서 나누어 정보를 담아

전송하는 은밀 통신 방법을 적용한 연구들로 나누어 설명한다. 휘슬음 자체를 이용한 생체모방 통신 기법들에 대한 주요 성과를 Table 3에 나타내었다.

• 휘슬음 자체를 이용한 생체모방 통신 기법

Reference [19]에서는 돌고래의 휘슬음이 Frequency Modulation(FM) 신호와 비슷하지만 주파수와 주기가 돌고래의 종 및 서식 지역에 따라 달라지는 특성을 이용하여 휘슬음의 위상과 주파수를 변화시켜 다양화하기 위해 Generalized Frequency Modulation(GFM)을 공식화하여 신호를 모델링했다. Reference [20]에서 GFM 기술을 사용하는 은밀 통신을 위해 수신기를 개발하여 하와이에서의 KAMI1 실험을 통해 검증하였다. 제안한 수신기는 채널을 MP 알고리즘으로 추정하고 수신기에서 Maximum Likelihood Estimator(MLE)를 사용하여 각 수신 신호에서 신호 매개변수의 추정치를 찾는다. 그런 다음 휘슬음에 정보를 담기 위해 송신기에서 사용하는 신호 매핑 규칙에 따라 이러한 매개변수를 비트로 복조한다. 실험 결과 BER 성능이 0인 경우 127 bps를 달성하였고 전송률이 증가함에 따라 BER 성능이 낮아졌다. 실험 결과에서 최대 전송률은 BER 성능 10^{-1} 기준 전송률 227 bps를 달성하여 높은 전송률을 보였다.

Reference [21]에서는 장거리 통신을 위한 저주파의 돌고래 휘슬음을 모방하는 방법을 제안하였다. 제안

한 방법에서는 송신하려는 정보를 Direct Sequence Spread Spectrum(DSSS)로 변조하고 시간 및 주파수 영역에서 돌고래 소리로 마스킹하여 신호를 전송한다. 이미 알고 있는 고유 주파수 및 휘슬음의 진폭을 기반으로 수신된 휘슬음이 동기화 역할을 하여 수신기에서 돌고래의 실제 휘슬음을 필터링한다. 제안한 방법을 검증하기 위해 해상 실험을 시행하였으며 이를 통해 40 km 거리 기준 BER 성능 2×10^{-4} 을 달성하였다. 이와 유사하게 Reference [22]에서는 Minimum Shift Keying(MSK) 변조된 신호를 돌고래 휘슬음으로 마스킹하는 방법을 제안했다. 이 방법은 휘슬음을 모방한 신호 위상의 연속성을 보장해주었다. 채널 추정을 위해 MP 알고리즘을 사용하고 다중 경로 간섭을 줄이기 위해 Virtual Time Reversal Mirror(VTRM) 기술을 적용하였다. 제안한 방법의 성능 검증을 위한 전산 모의실험을 통해 BER 성능 10^{-3} , 전송률 10 bps를 달성하며 전송률은 낮은 반면 높은 은밀성을 달성하였다.

Reference [23]에서는 Differential Pattern Time Delay Shift Coding(DPTDS) 방식을 적용하여 돌고래의 휘슬음을 모방하였다. 제안한 방법에서는 돌고래의 휘슬음은 동기화를 위해 사용하고, 휘슬음 사이의 간격을 이용하여 정보를 전달하는 방식을 적용하였다. 모방된 신호에 대한 DPTDS 방식을 통해 모방 신호의 은밀성을 높이고 심볼간 간섭 및 도플러 효과에 강인한 성능을 보였다. 성능 검증을 위해 수중 탱크에서 실험을 시행했으며 신호대잡음비 0 dB 환경에서 BER이 0이고 유효 전송률 67 bps를 달성하였다.

Reference [24]에서는 정보 엔트로피를 기반으로 흑돌고래의 휘슬음을 모방하여 모스 부호와 유사한 표준 모방 부호를 개발하였다. 기존의 모스 부호는 적에 의해 감지 되어 해독되기 쉬우므로 제안하는 방법에서는 흑돌고래의 휘슬음을 이용하여 정보를 전송한다. 주파수와 진폭이 변조된 여러 세그먼트로 구성된 흑돌고래의 휘슬음을 영어 문자에 대한 정보 엔트로피를 사용하여 생체 공학 모스 부호로 모방한다. 제안한 생체 공학 모스 부호는 기존의 모스 부호와 달리 club, diamond, heart, 그리고 spade 요소로 구성되어 감지 가능성이 낮아 Low Probability Recognition(LPR) 제약 은밀 통신이 가능하다. 전산 모의실험을 통해 5 km 거리 기준으로 신호대잡음비 -7 dB 환경에서 초

당 한 문자의 전송률과 10^{-3} 미만의 BER 성능을 달성하였다. 또한 MP 알고리즘과 VTRM 기술을 적용하여 BER 0을 달성하였다.

Reference [25]에서는 돌고래 휘슬음을 왜곡하지 않고 그대로 활용하기 위해 돌고래 휘슬음이 존재하는 시간-주파수 위치에 비트를 할당하는 Time Frequency Shift Keying(TFSK) 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 돌고래 휘슬의 주파수 윤곽을 갖는 반송파를 생성하고, 시간 및 주파수 위치를 이용하여 비트를 할당하여 전송한다. 수신기에서는 수신된 신호와 원래의 휘슬 패턴에 대해 모든 시간 및 주파수 위치의 경우의 수를 비교하여 Maximum Likelihood(ML)을 통해 복조한다. 제안한 방법 검증을 위한 해상 실험을 통해 신호대잡음비 -10.5 dB 환경에서 BER 성능 3.5×10^{-4} 를 달성하였다. 그러나 기울기가 작은 휘슬 패턴의 경우 시간 위치를 이동하여도 모호 영역이 생겨 BER 성능이 감소하는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 Reference [26]에서는 변조 가능한 최소 기울기 및 시간-주파수 변조 파라미터를 산출하고 직교 코드를 사용하여 휘슬 패턴 간 모호성을 완화하였다.

Reference [27]에서는 돌고래의 휘슬 패턴을 활용하여 기계학습을 통해 각 패턴에 비트를 할당하고 복원하는 기법을 제안하였다. 패턴이 유사한 휘슬들을 동일한 그룹으로 분류하고 이진 비트를 할당하고 그룹에서 무작위로 선택한 휘슬 패턴 중 하나를 전송하여 은밀성을 향상시켰다. 분류된 휘슬 패턴들을 제안하는 Directional Acyclic Graph Network(DAG-net)과 LSTM을 통해 학습하여 높은 검출 성능을 가지는 기계학습 기반 검출기를 제안하였다. 제안하는 방법의 성능을 검증하기 위해 해상 실험을 진행하였으며 BER 성능 2×10^{-3} 을 달성하였다.

• 분할 시간 슬롯 기반 생체모방 통신 기법

휘슬음 자체를 사용하는 방법의 경우 휘슬음을 모방할 때 휘슬 패턴의 왜곡이 적어 모방성이 높은 반면 전송률이 낮다는 단점이 존재한다. 전송률을 향상하기 위해 모방하고자 하는 휘슬음을 시간 영역에서 나누어 정보를 담아 전송하는 방법들이 연구되었다. 이러한 방법들은 전송률이 높은 반면 모방성이 떨어지는 단점이 존재한다. 분할 시간 슬롯 기반 생체모방 통신

Table 4. Summary of the split time slot-based biomimetic covert underwater communication methods that mimics the whistle sound of marine animals.

Author	Contribution	Year
Liu <i>et al.</i>	Modulated by CSS with a different carrier frequency which is obtained from the frequency contour of the dolphin whistle and achieve BER 10^{-3} for 5.5 km distance in the experiment. ^[28]	2017
Ahn <i>et al.</i>	Modulated by FSK according to the center frequency of multiple slots of the whistle divided in the time domain and achieve BER 8×10^{-3} in lake experiment. ^[9]	2018
Ahn <i>et al.</i>	Proposal CVCFM allocates the frequency according to the time of the whistle as the transmission frequency of the DPSK symbol and achieve BER 0 at 400 Hz bandwidth. ^[29]	2019
Lee <i>et al.</i>	Developed OFDM based biomimetic covert underwater communication to avoid interference and achieve 3 dB SNR gain in BER performance compared to FSK. ^[30]	2021

신 기법들에 대한 주요 성과를 Table 4에 나타내었다.

References [28]에서는 실제 소래 휘슬음의 주파수 윤곽과 유사한 패턴을 갖도록 통신 신호를 설계하기 위해 모방하고자 하는 돌고래 휘슬음을 시간 영역에서 여러 개의 슬롯으로 나눈 후 매 슬롯에 상향 및 하향 처프를 할당하는 방법인 Chirp Spread Spectrum(CSS) 변조 기법을 제안하였다. 제안하는 방법은 원래의 돌고래 휘슬음으로부터 주파수 윤곽을 추출하여 각 처프의 중심 주파수로 할당하여 정보를 전달하고 원래의 휘슬음은 동기화 신호로 활용하였다. 또한 수중 채널의 효과를 완화하기 위해 VTRM 기술을 적용하고 Fractional Fourier Transform(FrFT) 및 상관 방법으로 수신 신호를 복조하였다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위한 해상 실험에서 5.5 km 거리, 처프의 시간 길이 20 ms 기준 BER 성능 10^{-3} 을 달성하였다.

Reference [9]에서는 Reference [28]에서 제안한 CSS와 유사하게 모방하고자 하는 휘슬음을 시간 영역에서 여러 개의 슬롯으로 나눈 후 매 슬롯의 중심 주파수에 따라 FSK로 변조하여 모방 신호를 생성하는 방법을 제안하였다. CSS와 달리 주파수 상에서 심볼 간의 직교성을 이용하기 때문에 BER 성능이 3 dB 만큼 신호대잡음비 이득을 가졌다. 돌고래 휘슬음을 모방한 변조 신호는 매 심볼의 반송 주파수가 변화하기 때문에 채널 지연에 의한 심볼 간 간섭이 발생하지 않는다. 제안하는 방법은 이러한 특성을 이용하여 레이크 수신기를 통한 다중 경로에 대한 이득을 얻었다. 제안한 방법의 성능을 보이기 위한 호수 실험에서 BER 성능 8×10^{-3} 을 달성하였다.

Reference [29]에서는 전송률을 높이기 위해 Phase Shift Keying(PSK) 기반의 휘슬음을 모방하는 은밀 수

중 통신 기법을 제안하였다. PSK 기반 휘슬음 모방 은밀 수중 통신 기법은 모방하는 휘슬음의 주파수 윤곽과 유사한 형태를 갖도록 PSK 심볼에 전송주파수를 할당하는 방법이다. 시간에 따라 휘슬음의 주파수가 변화하기 때문에 각 심볼이 겪는 채널이 다르다는 문제점을 해결하기 위해 Reference [30]에서는 채널 추정 및 등화가 필요하지 않은 Differential PSK(DPSK) 심볼을 전송주파수로 할당하는 Continuously Varying Carrier Frequency Modulation(CV-CFM) 기법을 제안하였다. CV-CFM 방법은 기존 CSS, FSK 기반 방식보다 주파수 성분 간의 불연속성이 줄어들어 모방성이 우수한 특징을 가졌다. 제안하는 방법의 성능을 검증하기 위한 해상 실험에서 대역폭 400 Hz 기준 BER 성능 0을 달성하였다.

Reference [30]에서는 PSK 기반의 휘슬음 모방 기법으로서 Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) 기반 휘슬음 모방 기법을 제안하였다. 제안하는 방법은 모방하고자 하는 휘슬음을 시간-주파수 영역에서 여러 개의 자원 요소로 나누고, 휘슬음이 위치한 자원 요소에 DPSK 심볼을 할당하여 모방한다. OFDM 기반 휘슬음 모방 기법은 기존의 CSS, FSK 기반 방식과 달리 OFDM 부반송파 마다 에너지가 존재하여 주파수 성분 간의 불연속성이 감소하여 모방성이 증가하였다. 전산 모의실험 결과 OFDM 기반 휘슬음 모방 기법이 FSK에 비해 BER 성능이 3dB 만큼 신호대잡음비 이득을 보였다.

V. 결 론

본 논문에서는 생체모방 은밀 수중 음향 통신과

관련한 연구 동향들을 소개하였다. 수중 환경 특성상 나타나는 은밀 수중 통신의 단점을 극복하기 위해 수중 동물의 생체 소리를 모방하여 적의 수중 동물의 소리와 통신 신호를 혼동하도록 하는 생체모방 통신 기법으로서 주로 돌고래 또는 고래의 소리를 모방하는 방법들에 대해 연구되고 있다. 고래류의 클릭음과 휘슬음이 가지는 소리 특성 차이에 따라 모방 신호의 통신 범위가 달라지며, 휘슬음을 모방하는 경우에도 휘슬 패턴 자체를 이용하는 방법이나 휘슬 패턴을 시간 영역에서 나누어 정보를 전송하는 방법에 따라 전송률과 모방성 측면에서 상반관계를 가진다. 이에 따라 생체모방 기술의 적용 분야 및 범위에 따른 적용적으로 사용할 수 있는 생체모방 기술에 대한 연구가 필요하다. 또한 생체모방 기술의 적용 범위를 증대하기 위해 고래류의 종별 소리 특성 및 서식지, 패턴 등에 대한 추가적인 연구가 필요하며 나아가 다른 수중 생체에 대한 연구를 통해 생체모방 기술의 최적화 방안에 대한 연구도 필요하다. 또한 본 논문에서 조사한 연구들에 따르면 고래류의 소리를 모방한 신호를 실제 해역에서 실험적으로 검증한 작업은 소수에 불과하다. 따라서 생체모방 은밀 수중 음향 통신 분야의 현재 연구들은 많은 결과를 나타내고 있지만 실제 해역에서의 사용 가능성에 대한 검증이 더 이루어져야 하며, 이에 수반하는 수중 생체에 대한 지속적이고 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음(UD200010DD).

References

1. H. Lee, J. Ahn, Y. Kim, S. Lee, and J. Chung, "A biomimetic communication method based on time shift using dolphin whistle," *J. Acoust. Soc. Kr.* **38**, 580-586 (2019).
2. S. Liu, M. Wang, T. Ma, G. Qiao, and M. Bilal, "Covert underwater communication by camouflaging sea piling sounds," *Appl. Acoust.* **142**, 29-35 (2018).
3. G. Qiao, T. Ma, S. Liu, and M. Bilal, "A frequency hopping pattern inspired bionic underwater acoustic communication," *Phys. Commun.* **46**, 101288 (2021).
4. J. Ling, H. He, J. Li, and W. Roberts, "Covert underwater acoustic communications," *J. Acoust. Soc. Am.* **128**, 2898-2909 (2010).
5. 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).
6. 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).
7. 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).
8. 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).
9. 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).
10. W. W. L. Au, *The Sonar of Dolphins* (Springer-Verlag, New York, 1993), pp. 277.
11. J. E. Reymolds and S. A. Rommel, *Biology of Marine Mammals* (Smithsonian Inst, Washington, 1999), pp. 287.
12. H. S. Dol, B. A. J. Quesson, and F. P. A. Benders, "Covert underwater communication with marine mammal sounds," *Proc. UDT Europe*, 1-7 (2008).
13. S. Liu, G. Qiao, and A. Ismail, "Covert underwater acoustic communication using dolphin sounds," *J. Acoust. Soc. Am.* **133**, EL300-EL306 (2013).
14. S. Liu, B. Liu, Y. Yin, and G. Qiao, "M-ray covert underwater acoustic communication by mimicking dolphin sounds," *J. Harbin Eng. Univ.* **35**, 119-125 (2014).
15. S. Liu, G. Qiao, and L. Zhang, "Biologically inspired covert underwater acoustic communication using high frequency dolphin clicks," *Proc. IEEE OCEANS*, 1-5 (2013).
16. Y. Jia, G. Liu, and L. Zhang, "Bionic camouflage underwater acoustic communication based on sea lion sounds," *Proc. ICCAIS*. 332-336 (2015).
17. J. Jiajia, W. Xianquan, D. Fajie, F. Xiao, L. Chunyue, and S. Zhongbo, "A basic bio-inspired camouflage communication frame design and applications for secure underwater communication among military

- underwater platforms,” IEEE Access, **8**, 24927-24940 (2020).
18. J. Jiang, C. Li, X. Wang, Z. Sun, X. Fu, and F. Duan, “Covert underwater communication based on combined encoding of diverse time-frequency characteristics of sperm whale clicks,” Appl. Acoust. **171**, 107660 (2021).
 19. A. ElMoslimany, M. Zhou, T. M. Duman, and P. S. Antonia, “A new signaling scheme for underwater acoustic communications,” Proc. IEEE OCEANS, 1-5 (2013).
 20. A. Elmosilmy, M. Zhou, T. M. Duman, and P. S. Antonia, “An underwater acoustic communication scheme exploiting biological sounds,” Wirel. Commun. Mob. Comput. **16**, 2194-2211 (2016).
 21. S. Liu, G. Qiao, A. Ismail, B. Liu, and L. Zhang, “Covert underwater acoustic communication using whale noise masking on DSSS signal,” Proc. IEEE OCEANS, 1-6 (2013).
 22. S. Liu, T. Ma, G. Qiao, and B. Kuang, “Bionic communication by dolphin whistle with continuous-phase based on MSK modulation,” Proc. IEEE ICSPCC. 1-5 (2016).
 23. X. Han, J. Yin, P. Du, and X. Zhang, “Experimental demonstration of underwater acoustic communication using bionic signals,” Appl. Acoust. **78**, 7-10 (2014).
 24. M. Bilal, S. Liu, G. Qiao, L. Wan, and Y. Yao, “Bionic Morse coding mimicking Humpback whale song for covert underwater communication,” Appl. Sci. **10**, 186 (2019).
 25. 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).
 26. J. Ahn, H. Lee, Y. Kim, W. Kim, and J. Chung, “Bio-mimicking covert communication by time-frequency shift modulation for increasing mimicking and BER performance,” Sensors, **21**, 2184 (2021).
 27. 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).
 28. 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).
 29. 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).
 30. H. Lee, J. Ahn, Y. Kim, S. Seol, W. Kim, and J. Chung, “OFDM based mimicking dolphin whistle for

covert underwater communications” (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **40**, 219-227 (2021).

저자 약력

▶ 설 승 환 (Seunghwan Seol)



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

▶ 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

▶ 김 용 철 (Yongcheol Kim)



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

▶ 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