

Chirp 신호 기반 생체모방 통신 기법 및 호수 환경에서의 성능 분석

박재현*, 이상국*, 김덕경°

A Chirp-Based Bio-mimetic Communication Technique and Its Performance in a Lake Environment

Jae-hyun Park*, Sang Kug Lee*,
 Duk Kyung Kim°

요약

생체 음향신호를 모방한 통신 기법은 내재적인 은밀성으로 인해 최근 들어 군통신 분야에서 다양하게 연구되고 있다. 본 논문에서는 chirp 신호 기반의 생체 모방 통신 기법을 제안하고, 실제 호수에서의 실험을 통해 성능을 분석한다.

Key Words : Bio-mimetic communication, Chirp-based signal, Underwater acoustic communication

ABSTRACT

Recently, a variety of bio-mimetic communication techniques have been studied in military communications owing to its inherent covertness. In this paper, a chirp-based communication technique is proposed, and its performance is evaluated through actual experiments in Lake Geongchon.

I. 서론

최근 들어 생체음향을 모방한 통신 기법이 은밀성을 요구하는 군통신을 중심으로 다양하게 연구되고

있다. 이는 생체모방 통신 신호가 생물이 내는 음향과 유사하여, 신호가 탐지되었다 하더라도 생체 신호로 오인하게 되어 은밀성이 확보되기 때문이다.^[1] 대표적인 생체모방신호로는 Chirp기반 신호가 있으며, 해양 및 호수 등의 수중 환경에서 Chirp 신호 기반 통신에 대한 연구가 다수 이루어지고 있는 상황이다.

[2]에서는 선형 chirp 레이더 신호를 기반으로 생체 모방 RF 신호의 특성 및 성능을 분석하였다. 특히, 다양한 심볼 길이를 이용함으로써 주기적 정상성(cyclostationary)을 제거하여 통신 신호의 보안성을 더욱 강화하였다. [3]에서는 돌고래의 whistle를 모방한 chirp 신호의 심볼 길이와 심볼 대역에 따른 성능을 분석하고 해양에서의 실험을 통해 성능을 검증하였다.

실험에 의해 관찰된 호수 채널은 해양 채널과는 달리 다중 경로 지연이 길고 도플러 천이가 수 Hz이기 때문에, 추정된 채널을 기반으로 한 coherent 검출이 용이하지 않으며 주파수 대역이 겹친 심볼 간의 간섭 및 지연된 자기 심볼에 의한 간섭에 의한 성능 저하가 필연적으로 발생하게 된다. 본 논문에서는 호수 환경에 적합한 Chirp 기반 전송신호 프레임 구조를 제안하고 3가지 형태의 신호 검출 방법을 제시한다. 경천호에서의 실험을 통해 심볼 길이, 심볼 대역에 따른 비트 오류율 성능을 분석하며, chirp 기반 수중 통신 기법의 타당성을 검증한다.

II. 호수 실험 환경 및 제안된 chirp 기반 전송신호 프레임 구조

2.1 호수 실험 환경

호수 실험은 경북 문경시 경천호에서 8월달에 이루어졌다. 해당 실험에 사용된 장비는 192kHz의 샘플링 주파수를 갖는 AD 변환기, 12.5~19.5kHz (7kHz)의 주파수대역을 갖는 송수신기를 사용하였다. 송수신기 사이의 거리는 165~260m이었다. 데이터 심볼은 채널 부호화 과정을 거치지 않은 상태로 50bps의 전송률로 전송하였다. 실험 당시 경천호의 수심은 35m 미만으로 매우 얇고, 호수의 폭 또한 200m 미만으로 좁아 많은 다중경로가 발생하였다. 이와 같이 호수 채널은 상대적으로 수심이 깊고, 폭의 제한이 없는 해양

* 본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(UD170022DD)

• First Author : INHA University Department of Information and Communication, pakjjae@inha.edu, 정희원

° Corresponding Author : INHA University Department of Information and Communication, kdk@inha.edu, 종신회원

* Agency for Defense Development, sangkug.lee@add.re.kr

논문번호 : 201810-306-A-LU, Received October 2, 2018; Revised October 24, 2018; Accepted October 25, 2018

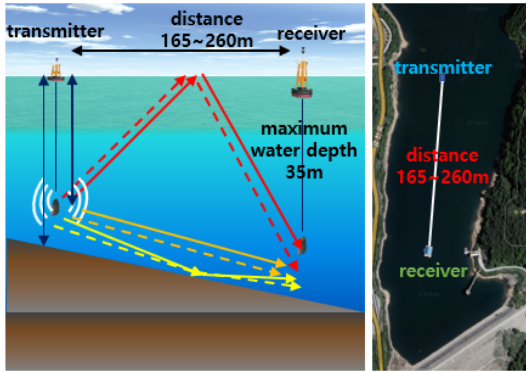


그림 1. 경천호 호수 실험 환경
Fig. 1. Environment of lake experiment at Lake Kyungcheon

실험 환경과는 다른 채널 특성을 갖는다. 측정 결과, 호수 실험의 다중 경로 최대 초과 지연이 200 ms 이고, 이는 [3]에서의 80 ms보다 2배 이상 큰 것을 확인할 수 있었다.

2.2 제안된 chirp 기반 전송신호 프레임 구조

전송신호의 프레임의 구조는 그림 2와 같이 신호의 시작부에는 전체 주파수 대역에 걸쳐 주파수가 선형적으로 변화하는 선형 chirp 신호를 이용한 LFM(Linear Frequency Modulation) 신호를 전송하고, 보호시간(t_G) 이후 t_{sig} 길이의 선형 chirp 기반 생체 모방신호를 4번에 걸쳐 전송한다. 이를 하나의 프레임으로 모든 데이터가 전송할 때까지 반복해서 전송한다.

프레임 내의 LFM 신호는 자기상관을 통해서 LFM 신호가 시작되는 위치를 알아내고 이를 동기시간 \tilde{t}_{sync} 로 나타낸다. 추정된 동기 시작 지점으로부터 찾고자하는 심볼이 j 번째 모방신호의 i 번째 심볼이라면, 심볼 시작 시간 $\tilde{t}_{i,j}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{t}_{i,j} = \tilde{t}_{sync} + (j)(t_{sig} + t_G) + \Delta T(i-1). \quad (1)$$

이때 ΔT 는 데이터 심볼 길이를 나타낸다.

하나의 데이터 심볼이 사용하는 주파수 대역의 크기를 ΔF 라고 했을 때, 해당 대역을 이웃 심볼과 겹쳐서 사용하는 경우, 다중 경로에 의해서 지연된 심볼이 ISI (inter-symbol interference)로 작용하여 검출 성능을 감소시킨다. 이에 심볼 간 주파수 대역의 중첩(overlap)이 없이 전송을 하려고 하면 전체 주파수 대역의 크기가 제한된 상황에서 하나의 모방신호에 전

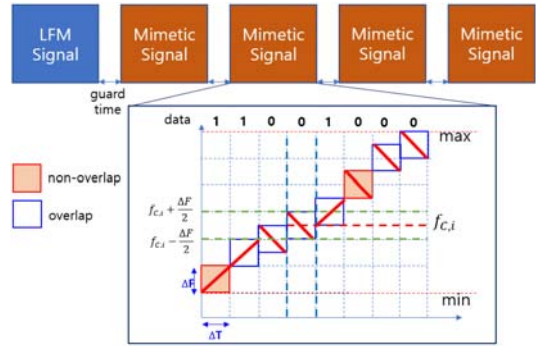


그림 4. 제안하는 전송신호의 프레임구조
Fig. 2. Frame structure of the proposed transmitting signal

송할 수 있는 데이터의 양이 감소한다.

본 논문에서는 이웃 심볼과의 주파수 중첩이 없는 심볼(non-overlap)과 주파수 중첩이 있는 심볼(overlap)을 적절하게 배치하여 검출 성능과 데이터 전송률을 높이는 방법을 제안하였다. 그림 2의 모방신호는 하나의 non-overlap 심볼 뒤에 4개의 overlap 심볼들을 배치하는 방식의 예시이다.

III. 선형 chirp기반 생체 모방신호

3.1 chirp 기반 생체 모방신호 변조 기법

선형 chirp 기반의 생체 모방신호의 i 번째 심볼은 중심 주파수 $f_{c,i}$ 를 중심으로 $f_{c,i} - \frac{\Delta F}{2}$ 와 $f_{c,i} + \frac{\Delta F}{2}$ 의 범위 내에서 주파수가 변하는 chirp 신호를 생성한다. 시간 $\tilde{t}_{i,j}$ 부터 $\tilde{t}_{i,j} + \Delta T$ 까지 전송되는 j 번째의 모방신호의 i 번째 심볼의 chirp 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{i,j}(t) = \cos(2\pi t(f_{c,i} - d_{i,j} \frac{\Delta F \Delta T}{2}) + d_{i,j} \pi \Delta F t^2). \quad (2)$$

이 때, 전송하고자하는 데이터가 “1”이면 $d_i = 1$ 이고 해당 심볼은 $x_{i,j}^+(t)$ 으로 나타내고, “0”이면 $d_i = -1$ 으로 해당 심볼은 $x_{i,j}^-(t)$ 로 표시한다. 하나의 모방신호에는 L 개의 심볼들이 생성된다.

3.2 chirp 기반 전송신호 복조 기법

j 번째 수신 모방신호는 식 (2)에 의해 생성된 L 개의 심볼들이 다중경로를 거쳐 수신된 신호로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_j(t) = h(t) * x_{i,j}(t). \quad (3)$$

이때, $h(t)$ 는 호수 실험 환경에서 Chirp 신호에 대한 채널 응답이며, 일반적으로 다중 경로 및 도플러 천이를 겪는다. 추출하는 신호의 길이는 검출된 신호 동기의 정확성과 다중 경로 특성을 고려하여 결정할 수 있으며, 본 논문에서는 수신신호 $y_j(t)$ 에서 $y_j(t)$ 의 길이 t_{sig} 만큼을 그대로 이용하는($k=0$), ΔT 만큼 추출하는($k=1$), $2\Delta T$ 만큼 추출하여($k=2$) 상관 기법을 통해 데이터 $d_{i,j}$ 를 검출하는 방법을 제시한다. 이때의 추출한 신호는 다음과 같이 나타낸다.

$$y_{i,j}^{(k)} = y_j(t), \quad t_1^{(k)} \leq t < t_2^{(k)}. \quad (4)$$

3가지 검출 방법에 이용되는 신호의 추출범위는 식 (1)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

j 번째 모방신호의 i 번째 심볼에 대한 $d_{i,j} = 1$ 인 경우에 대한 상관값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_{i,j}^{(k)+} = \max_{\tau} |R_{i,j}^{(k)+}(\tau)|, \quad (5)$$

$$\text{where } R_{i,j}^{(k)+}(\tau) = \int_{t_1^{(k)}}^{t_2^{(k)}} y_{i,j}^{(k)}(t) x_{i,j}^{+}(t-\tau) dt.$$

식(5)와 마찬가지로 데이터 $d_{i,j} = -1$ 에 대한 상관값 $R_{i,j}^{(k)-}$ 를 구하기 위해서는 $x_{i,j}^{-}(t)$ 를 이용한다. 두 상관값 $R_{i,j}^{(k)+}$ 와 $R_{i,j}^{(k)-}$ 를 비교해 더 큰 자기상관값을 갖는 경우의 데이터가 송신되었다고 판정한다.

표 1. 3가지 검출 방법에 이용되는 신호의 범위
Table 1. The range of signals used for the 3 detection methods

	k=0	k=1	k=2
$t_1^{(k)}$	$\tilde{t}_{0,j}$	$\tilde{t}_{i,j}$	$\tilde{t}_{i,j} - \Delta T/2$
$t_2^{(k)}$	$t_1^{(0)} + t_{sig}$	$t_1^{(1)} + \Delta T$	$t_1^{(2)} + 2\Delta T$

IV. chirp 신호의 상관 성능 및 호수 실험

4.1 chirp 신호를 이용한 상관 성능

chirp 신호의 상관 성능은 자기상관과 상호상관의 최댓값의 차이에 의해 결정된다. 다음의 그림은 chirp의 심볼 길이 10ms, 20ms와 심볼 대역 100Hz, 200Hz의 상관 성능을 비교한 것이다.

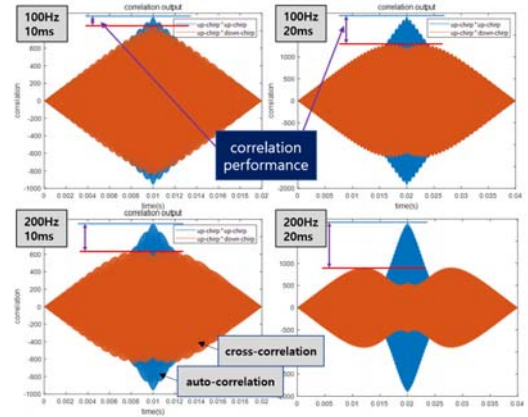


그림 3. 심볼 길이 ΔT 와 심볼 대역 ΔF 에 따른 상관 성능
Fig. 3. Performance of correlation according to symbol length ΔT and symbol bandwidth ΔF

chirp 신호의 길이와 주파수 대역이 클수록 좋은 상관 성능을 갖는 것을 확인하였다. 하지만 신호의 길이와 주파수 대역이 클수록 생체 모방신호의 모방도와 데이터 전송률이 감소하기 때문에 무조건 큰 값을 사용할 수 없다. 모방도, 데이터 전송률, 상관 성능을 고려한 적절한 신호의 길이와 주파수 대역의 결정이 필요하다.

4.2 호수 실험을 통한 성능 비교

호수 실험에서는 12.5~19.5kHz 주파수대역에서 심볼길이(ΔT) 20ms, 심볼대역(ΔF) 200Hz, 주파수 중첩도 50%를 사용하여 신호를 생성하고, 제안하는 프레임을 이용하여 신호를 구성하였다. 중첩도 50%는 연속적으로 심볼이 중첩되는 경우 ($P=1$), 바로 다음 심볼에만 다중 경로 지연에 의한 심볼 간 간섭이 발생되도록 하기 위한 최대 중첩도이다. 수신기에서는 프레임 내의 LFM 신호를 이용하여 동기시간 \tilde{t}_{sync} 를 추정하였고, 그 정확도는 1ms 미만의 오차를 보임을 확인하였다.

제안하는 프레임에서 P 는 non-overlap 심볼 하나 이후에 전송되는 overlap 심볼의 수로 정의하며, P 값이 작을수록 non-overlap 심볼의 수가 증가한다. 본 논문에서는 P 의 값 2, 4, 8의 경우에 대해서 3가지 검출 방법의 비트오류율 성능을 비교하였다.

\tilde{t}_{sync} 가 정확히 추정될 수 있다면 한 심볼 구간 상관값 기반의 신호 검출이 가장 우수함을 알 수 있었으며, P 가 가장 작은 2의 경우 비트오류율 2.6%로 우수하나 상대적으로 중첩되는 심볼 비율이 낮아서 전송 속도는 낮을 수밖에 없다. 제안된 chirp 기반 통신 기

표 2 제안하는 프레임 구조의 적용에 따른 비트오류율
Table 2. The bit error rate according to the proposed frame structure

	k=0	k=1	k=2
P=2	0.262	0.095	0.026
P=4	0.341	0.139	0.038
P=8	0.405	0.164	0.047

범에서는 심볼 길이(ΔT), 심볼대역(ΔF)과 더불어, 주파수 중첩도를 변화시킴으로써 비트오류율 성능과 데이터 전송률을 다양한 통신 환경에 적응적으로 적용할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 호수 환경에서 chirp기반 생체모방 통신을 위한 전송 프레임 구조를 제안하였고, 실제 호수 실험에서 성능을 검증하였다. 실험 결과, 동기의 추정이 정확하다면 한 심볼 구간 상관값 기반의 신호 검출이 가장 높은 성능을 보였으며, 제안한 chirp 기반 신호 전송 프레임은 주파수 중첩도와 중첩된 심볼의 비율을 조절함으로써 심볼 전송률과 비트 오류율을 상황에 맞게 유연하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 제안된 통신 기법은 해상 및 호수 등 다양한 수중통신 환경에서의 은밀통신 신호 설계에 활용될 수 있다.

References

- [1] S. Liu, G. Qiao, A. Isamil, B. Liu, and L. Zhang, "Covert underwater acoustic communication using whale noise masking on DSSS signal," in *Proc. MTS/IEEE Oceans Conf.*, pp.1-6, Bergen, Norway, Jun. 2013.
- [2] Z. Zhang, M. J. Nowak, M. Wicks, and Z. Wu, "Bio-inspired RF steganography via linear chirp radar signals," *IEEE Commun. Mag.*, vol.54, no. 6, pp. 82-86, June 2016.
- [3] S. Liu, T. Ma, G. Qiao, L. Ma, and Y. Yin, "Biologically inspired covert underwater acoustic communication by mimicking dolphin whistles," *Applied Acoustics*, vol. 120, pp. 120-128, May 2017.