

변형 Least Significant Bit 기반 생체모방 수중 은밀 통신 기법

이 용 욱*, 이 상 국*, 김 덕 경^o

Bio-Mimetic Underwater Covert Communication Technique Using Modified Least Significant Bit

Yongwuk Lee*, Sangkug Lee*,
Duk Kyung Kim^o

요 약

본 논문에서는 수중 음향 통신 기법 중에서 수중 생물의 소리를 모방하여 신호를 전송하는 생체 모방 통신 기법으로 Least Significant Bit (LSB) 기반 스테가노그래피 은밀 통신 기법을 제안한다. 해양채널 모델에서의 전산 모의실험 및 서해에서의 실험을 통해 기존 Chirp Spread Spectrum (CSS) 기반 통신 기법과 비트오류율 성능을 비교하고, 스펙트럼 상관도와 MOS 테스트를 통한 모방도 성능을 비교한다.

Key Words : Bio-mimetic communication, Underwater acoustic communication, LSB steganography

ABSTRACT

This paper proposes an underwater acoustic communication technique by mimicking a dolphin whistle based on modified LSB Steganography. The performance of the proposed technique is evaluated through simulations and experiments in the Yellow sea in terms of bit error rate, and compared with conventional chirp spread spectrum (CSS) technique. The degree of mimic is also compared by observing spectral correlation and MOS Test.

I. 서 론

수중 음향 통신 기법 중에는 아군의 신호를 적으로부터 은밀하게 전송하기 위한 방안으로 생체 모방 통신 기법이 있다. 이 기법은 수중 생물의 소리와 유사한 모방 신호를 생성하고, 모방 신호를 변조하여 전송하는 방법이다. 수중 생물의 소리에는 돌고래의 클릭음, 휘슬음 등 다양한 패턴이 존재하는데, 특히 휘슬음을 이용한 연구가 가장 활발하게 이루어지고 있다. 기존의 생체 모방 통신 기법에는 CSS (Chirp Spread Spectrum)을 기반으로 돌고래의 휘슬음을 모방하는 통신 기법이 대표적이다^{2,3}. 이 기법은 원본 휘슬을 시간단위 심볼로 나누어 중심 주파수를 기준으로 전송하고자하는 비트에 따라 상향 또는 하향 처프 심볼로 변조하는 방법이다. 이 방법은 다중 경로 페이딩 환경에 강인하며 구현이 간단한 장점이 있으나 원 신호에 대한 왜곡은 크다는 단점이 있다.

기존의 LSB 스테가노그래피 방식은 시간영역 신호의 진폭 값을 양자화 하여 그 최하위 비트에 전송하고자 하는 데이터로 변형하여 신호를 변조한다. 수중 환경에서는 페이딩에 의해 진폭의 왜곡이 커져 기존의 LSB 스테가노그래피 방식으로는 원활한 통신이 힘들다¹¹. 그러나 수신 신호의 스펙트로그램을 관찰해보면 시간-주파수 영역에서는 스펙트로그램 신호의 윤곽이 뚜렷하게 나타나며, 다중 경로 및 도플러에 의한 변형이 상대적으로 크지 않음을 알 수 있다. 본 논문에서는 높은 모방도와 전송률을 갖는 LSB (Least Significant Bit) 스테가노그래피 기반 통신 기법을 제안한다.

제안된 기법은 전산 모의실험 및 서해 앞바다에서의 해양 실험을 통해 비트오류율 성능을 분석하였으며, 모방도 평가는 주파수 성분 상호 상관도 비교 및 MOS (Mean Opinion Score) 테스트를 수행했다. 기존 CSS 방식과의 비교를 통해 제안된 방식이 비트오류율 및 모방도 양쪽 측면 모두에서 우수함을 보인다.

II. 제안하는 LSB 기반 생체 모방 통신 기법

2.1 기존의 생체 모방 통신 기법

수중 생물의 소리에는 대표적으로 돌고래의 휘슬음

* 본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(UD170022DD)

• First Author : Inha University, Information and Communication Engineering, iskhx201@gmail.com, Telit Wireless Solutions 정희원

◦ Corresponding Author : Inha University, Information and Communication Engineering, gdk@inha.ac.kr 종신회원

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

논문번호 : 201911-322-C-LU, Received November 25, 2019; Revised December 26, 2019; Accepted December 30, 2019

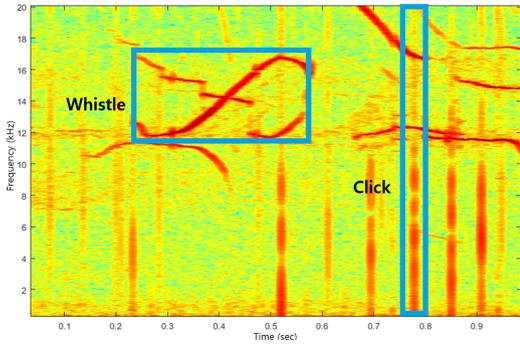


그림 1. 돌고래 신호의 스펙트로그램
Fig. 1. Spectrogram of Dolphin signal

과 클릭음이 있다. 생체 모방 통신에서는 그림 1의 돌고래 신호 중 휘슬음을 기반으로 신호를 변조하여 적외선 신호를 청취하더라도 돌고래 소리로 오인하여 적에게 들리지 않고 아군에게 은밀하게 신호를 전송할 수 있다.

대표적인 생체 모방 통신 방법으로는 CSS 기반 기법이 있다. 이 기법은 앞서 구한 생체 모방 신호를 동일한 시간 단위의 심볼로 나누어 각 심볼의 중심 주파수를 기준으로 변조하고자 하는 비트가 1이면 상향 처프, 0이면 하향 처프를 전송하는 기법이다. k -번째 심볼 구간의 CSS 기반 변조된 신호의 파형은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_{CSS}^k(t) = \cos\left(2\pi t\left(f_k - \frac{d_k L_f}{2}\right) + d_k \pi m t^2\right) \quad (1)$$

이 때 f_k 는 k 번째 심볼의 중심 주파수이며 d_k 는 변조하고자 하는 비트 b_k 를 $2b_k - 1$ 한 값이다. L_f 는 주파수 변조 대역을 의미하며 m 는 심볼의 시간 길이 동안의 주파수 변화량 L_f/τ 을 의미한다.

그림 2는 원본 신호와 CSS 기반 변조 신호의 스펙트로그램을 간단히 나타낸 것이다. 원 신호의 경우 스펙트로그램에서 보듯이 시간이 지남에 따라 주파수가 증가하는 형태를 보인다. 반면에, CSS 변조된 경우 각

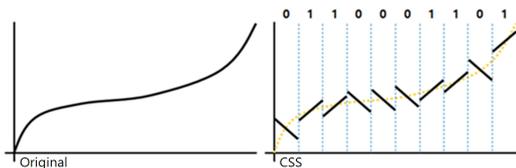


그림 2. 원본 신호, CSS 변조 신호의 스펙트로그램
Fig. 2. Spectrogram of original and CSS modulated signal

심볼에서 변조되는 비트에 따라 상향 또는 하향 처프로 전송됨에 따라 주파수가 증가하거나 감소되며 왜곡된 것을 볼 수 있다.

CSS 기반 생체 모방 통신 기법의 복조는 상향, 하향 처프와의 상호상관을 통해 이루어진다. 각 심볼에서 모방 신호의 중심 주파수를 기준으로 상향 처프 신호, 하향 처프 신호와 각각의 상호상관을 계산하여 상호상관도가 높은 신호가 전송된 것으로 판단한다. CSS 기반 생체 모방 통신 방법은 심볼 길이와 변조 대역에 따라 모방도와 전송률이 정해지는데, 심볼의 길이가 짧으면 심볼 간의 상호 상관도가 낮아 복조 성능이 좋지 않고, 심볼의 길이가 길어지면 원래의 휘슬에 대한 모방도가 낮아진다.

2.2 제안하는 LSB 기반 모방 통신 기법

제안하는 LSB 기반 휘슬 모방 통신 기법은 STFT(Short-Time Fourier Transform)한 시간-주파수 영역에서의 스펙트로그램을 심볼 단위로 구분하고, 각 심볼마다 스펙트럼 상의 최댓값을 갖는 위치의 LSB를 전송하고자 하는 데이터 값에 따라 변조하고 역 STFT하여 전송하는 방법이다.

휘슬음은 샘플링 주파수 f_s 로 샘플링하고, N 개의 샘플을 모아 하나의 심볼을 구성한 후 심볼 단위로 STFT를 취한다. 이때 심볼 단위 변조를 위해 윈도우 오버래핑은 적용하지 않는다. 매 심볼마다 총 N 개의 FFT 구간이 존재하고, 구간의 간격은 Δf 로 f_s/N 의 값을 가진다. 총 N 개의 주파수 구간 중 휘슬음이 존재하는 K 개의 구간을 관심영역이라고 한다. 임의의 k -번째 심볼에서 가장 큰 값을 갖는 주파수 구간의 값을 Q_k 로 한다. 이를 2진수로 바꾼 값을 B_k 로 하면, 전체 구간을 2진수로 표현하기 위해 $\lceil \log_2 N \rceil$ 개의 비트가 필요하다. 제안하는 변형 LSB 방식은 B_k 값에 상관없이 전송하고자 하는 데이터 비트 값으로 B_k 의

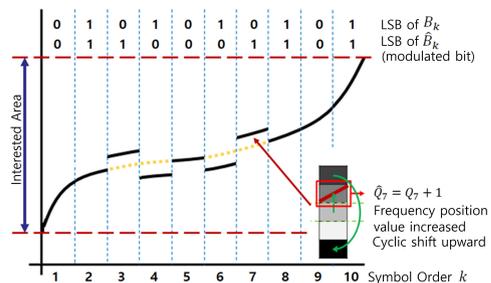


그림 3. LSB 변조 신호의 스펙트로그램
Fig. 3. Spectrogram of LSB modulated signal

LSB 값을 재설정한다. 이때의 LSB가 바뀐 2진수 값은 \hat{B}_k 로 나타내며, 변형된 후의 주파수 구간의 값은 \hat{Q}_k 로 한다. 그림 3에서 첫 번째 심볼의 경우 B_1 의 LSB가 0이고 이때 변조 비트가 0이면 $\hat{B}_1 = B_1$ 이다. 4번째 심볼에서는 변조 전 B_4 의 LSB가 1이므로, 변조 비트가 0일 경우 $\hat{B}_4 = B_4 - 1$ 로 값이 감소하며, 7번째 심볼의 경우는 B_7 의 LSB가 0일 때 변조 비트가 1인 경우로 LSB가 1로 바뀌어 $\hat{B}_7 = B_7 + 1$ 로 증가하게 된다. 따라서 제안하는 방법은 Q_k 를 기준으로 \hat{Q}_k 가 위치를 유지하거나 위 또는 아래로 이동하므로 -1, 0, 1로 3진 변조된다고 볼 수 있으며, 원본 신호가 변하는 경우의 비율은 50%로 제한되는 이점이 있다. 이때 그림 3에서 보듯이 \hat{Q}_k 값이 변경되는 경우 이웃한 주파수 구간 값만 교환하는 것이 아니라, 관심영역 내 주파수 구간 값을 위 또는 아래로 순환 이동시킨다. k -번째 변조된 심볼 구간에서의 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_{LSB}^k(t) = \cos(2\pi(f_k(t) + (\hat{B}_k - B_k)\Delta f)t) \quad (2)$$

LSB 기반 생체 모방 통신 기법의 복조 방법은 수신 신호를 변조 시와 동일한 샘플링 주파수 f_s 로 샘플링하여 FFT 크기 N 씩 나누어 STFT한 후, 각 심볼의 관심 영역 내에서 절댓값이 최댓값을 갖는 위치 Q_k^* 를 찾는다. Q_k^* 를 2진수로 변환하여 LSB를 추출하면 변조 비트를 복조 할 수 있다.

III. 비트오류율 성능 분석

3.1 AWGN 환경에서 이론적인 비트오류율 분석

제안하는 방법의 성능을 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 환경에서 수학적으로 분석한다. 샘플링된 수신 신호 $r[n]$ 은 푸리에 변환을 통해 k -번째 주파수 구간의 값 R_k 이 되며 신호 성분 S_k 와 잡음 성분 N_k 로 구분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_k = S_k + N_k = \sum_{n=0}^{N-1} r[n]e^{-j2\pi kn/N} \\ = \sum_{n=0}^{N-1} (s[n] + n[n])e^{-j2\pi kn/N} \quad (3)$$

N 은 FFT 크기이며, 주파수 영역의 구간수를 의미한다. 임의의 심볼에서 주파수 영역의 k -번째 구간에

위치한 신호에서 오류가 발생할 확률을 p_k 라 할 때, 오류가 발생하지 않을 확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$1 - p_k = \prod_{i \neq k} P(|R_k| \leq |R_i|) \quad (4)$$

$|R_i|$ 는 심볼에서 수신 신호의 주파수 성분이 존재하는 구간의 절댓값이며, $|R_k|$ 는 수신 신호의 주파수 성분이 존재하지 않는 구간의 절댓값이다. $|R_k|$ 는 신호를 포함하지 않는 경우 잡음 성분의 크기인 $|N_k|$ 가 되며, 신호를 포함하는 경우는 계산의 편의상 $|S_k| + |N_k|$ 로 근사화한다. AWGN 가정에 의해 신호 $|S_k|$ 는 E_b/N_o 에 의해 결정되는 상수 값으로 취급할 수 있으므로, 식 (4)에서 $P(|R_k| \leq |R_i|)$ 는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$P_r(|R_k| \leq |R_i|) = P_r(|N_k| \leq |S_i| + |N_i|) \\ = \int_0^{INF} P_r(|N_k| \leq |S_i| + \tau |N_i| = \tau) P_r(|N_i| = \tau) d\tau \quad (5)$$

이때, 잡음의 절댓값은 레일리 분포를 따르므로 아래와 같이 정리된다.

$$p_k = 1 - \frac{1}{4} e^{-\frac{E}{N_o}} \left[2 - \sqrt{2\pi} e^{\frac{E}{2N_o}} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E}{2N_o}} \right) \sqrt{\frac{E}{N_o}} \right] \quad (6)$$

최종적으로 비트오류율은 다음과 같이 구해진다.

$$BER = (1 - p_k^K) / 2 \quad (7)$$

이 때 K 은 관심영역 내 구간의 수이며, 1/2을 취한 것은 Q_k^* 에 오류가 발생한 경우에도 변조된 LSB에는 50%의 확률로 오류가 발생하지 않기 때문이다. 상기 이론적인 비트오류율은 모의실험을 통해 관찰된 값과 거의 차이가 없이 일치함을 확인하였다.

3.2 전산 모의실험

실험을 위한 채널은 Bellhop 모델링^[4]을 통해 생성하였으며 서해 당진 앞바다에서 송수신단 사이의 거리 1km와 수심 50m를 가진다. 적용된 채널의 딜레이 프로파일은 0.0132초까지 9개의 딜레이가 있고 0초,

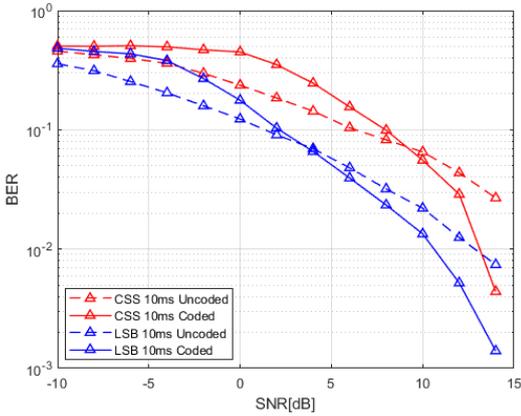


그림 4. CSS기반 및 제안된 휘슬 모방 통신 기법들의 비트 오류율 성능 분석 (심볼 길이=10ms)
Fig. 4. BER Performance of CSS-based and proposed techniques (Symbol length=10ms)

0.0039초의 첫 두 path 이후로는 임펄스의 크기가 아주 작은 Rician Channel을 사용했다. 부호화율 0.5, 구속장 길이가 7인 길쌈부호를 적용했다.

그림 4는 심볼 길이 10ms인 경우 대표적인 기준 방식인 CSS와 제안하는 방법의 비트오류율 결과이다. 제안하는 LSB 기반 생체 모방 통신 기법이 CSS 기반 기법에 비해 모든 SNR (Signal-to-Noise Ratio) 값에 대해 좋은 성능을 보였다. 수신 SNR이 12dB에서 대략 CSS 4.5%, LSB 1.2%의 uncoded 비트오류율을 가지며, coded 비트오류율 10⁻²을 기준으로 비교하면 약 3dB의 SNR 이득을 가지는 것을 관찰할 수 있다.

3.3 해양 실험

해양 실험은 2019년 10월 20일 충청남도 태안 신진도 인근 5km 근방 해역에서 진행되었다. 실험에 사용된 장비는 192kHz의 샘플링 주파수를 갖는 DAC (Digital-to-Analog Converter)와 13.5-19.5kHz의 주파수 대역을 갖는 송수신기를 사용하였다. 송수신기는 약 1km의 거리를 두고 설치하였으며 실험 해역의 수심은 약 15m 로 송수신기는 수면으로부터 10m 아래에 설치하였다. 심볼 길이 10ms, 20ms로 각각 6000, 3000비트를 전송하였다. 프레임 동기를 위해 2초 간격으로 0.5초 길이의 LFM (Linear Frequency Modulation) 신호를 전송하고 수신측에서는 상호상관이 가장 큰 시점으로 동기를 맞추었다. 실험 당시 해역의 환경은 파고가 낮고 풍속이 느려 신호 수신에 잘 되었으며 수신 SNR은 약 13dB로 계산되었다. 실험 환경에서 측정된 채널의 전달 특성은 그림 5와 같이 나타났다.

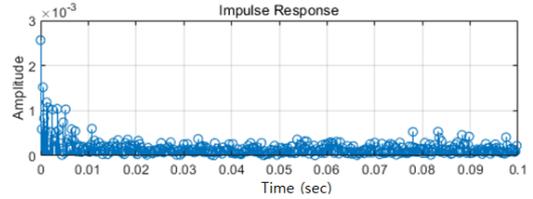


그림 5. 해양 실험의 채널 전달 특성
Fig. 5. Channel impulse response through Ocean Experiments

Uncoded 비트오류율의 경우, 심볼 길이 10ms에서 CSS기반 기법은 0.0620, 제안된 기법은 0.0117이 관측되었는데 이는 모의실험 결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 심볼 길이를 20ms로 늘린 경우 CSS기반 기법과 제안된 기법의 uncoded 비트오류율은 각각 0.0078, 0.0048로 줄어들었다. 채널 복호 후의 비트오류율의 경우 해양 실험에서는 모두 0으로 관측되었다.

IV. 모방도 분석

변조된 모방신호와 변조 전 휘슬의 모방도를 측정하기 위해 주파수 상관도와 MOS 테스트를 수행했다. 주파수 영역에서의 파형 상관도는 다음 식을 통해 구한다.

$$r = \frac{\sum_{k=1}^K (f_k - \bar{f})(f_{mimic,k} - \overline{f_{mimic}})}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (f_k - \bar{f})^2 \sum_{k=1}^K (f_{mimic,k} - \overline{f_{mimic}})^2}} \quad (4)$$

이 때 f_k 는 원본 신호 k 번째 심볼의 중심 주파수, \bar{f} 는 K 개의 심볼들이 가지는 중심 주파수 값들의 평균이다. 유사하게 $f_{mimic,k}$ 는 모방 신호의 k -번째 심볼의 중심 주파수이며, $\overline{f_{mimic}}$ 는 모방신호의 K 심볼들이 가지는 중심 주파수의 평균이다.

MOS 테스트는 본래 신호와 모방신호를 번갈아 청취한 후 실험 대상자의 주관적 모방도를 최고 5점, 최저 1점으로 평가하였다. 23~39세의 성인을 대상으로 36회 실험을 진행하여 평균값을 구했다. 표 2의 결과

표 1. 모방도 비교
Table 1. Comparison of degree of mimic

| Modulation technique | Spectral Correlation | | MOS Score | |
|----------------------|----------------------|-------|-----------|------|
| | 10ms | 20ms | 10ms | 20ms |
| CSS-based | 0.837 | 0.878 | 2.34 | 2.45 |
| Proposed | 0.933 | 0.969 | 4.01 | 3.97 |

에서 보듯이, 제안된 기법이 CSS에 비해 주파수 상관도와 MOS 점수 모두 월등히 좋은 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 생체 모방 수중 음향 통신을 위해 돌고래 휘슬을 모방한 음향 신호의 스펙트로그램을 구한 후, 변형된 LSB 방식을 적용하는 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 기존 CSS 기법에 비하여 비트 오류율 성능과 모방도 측면 모두에서 월등한 성능을 보이므로, 잠수함과 같이 은밀성이 요구되는 수중 통신에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] W. Bender, D. Gruhl, N. Morimoto, and A. Lu, "Techniques for data hiding," *IBM Systems J.*, vol. 35, no. 3-4, pp. 313-336, Feb. 1996.
- [2] J. Park, S. Lee, and D. K. Kim, "A chirp-based bio-mimetic communication technique and its performance in a lake environment," *J. KICS*, vol. 43, no. 11, pp. 1809-1812, Nov. 2018.
- [3] 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.*, vol. 58, no. SGGF05, Jun. 2019.
- [4] M. B. Porter, *The BELLHOP Manual and User's Guide: PRELIMINARY DRAFT*, Heat, Light, and Sound Research, Inc. 2011.