

이동성이 큰 수중음파통신 시스템을 위한 시간 동기화 기법

조용호*, 김승근*, 김건우°

Synchronization Method for Underwater Acoustic Communications with High Mobility

Yong-Ho Cho*, Seung-Geun Kim*, Geonu Kim°

요약

본 논문은 이동성이 큰 수중음파통신 시스템을 위한 시간 동기화 기법을 제안한다. 큰 Doppler 효과를 보상하기 위해 두 개의 동일한 프리앰블을 연속적으로 전송하는 신호 구조를 고려한다. 프리앰블 전송 구조 및 프리앰블 신호의 작은 자기상관 특징을 활용한 새로운 시간 동기화 기법이 고안되었다. 제안된 기법은 시간 및 주파수 선택성이 큰 수중채널에서도 프리앰블의 시작점 검출시 높은 정확도를 가짐을 확인하였다.

Key Words : Underwater communications, Doppler shift, Timing synchronization, Preamble, Acoustic

ABSTRACT

This paper proposes a timing synchronization method for underwater acoustic communication systems with high mobility. In order to mitigate large Doppler effect, the signal structure transmitting two identical preambles consecutively is considered. By exploiting the preamble transmission structure and low autocorrelation property of the preamble, a new

method for timing synchronization is devised. It is verified that the proposed technique provides high accuracy on identification of the start of the preamble under doubly-selective underwater channels.

I. 서론

수중음파(underwater acoustic;UWA) 통신 시스템은 심한 시간 및 주파수 선택적 채널을 겪는다^[1]. 음파는 해수면이나 해저면에 의해 많은 반사파가 발생하기 때문에 긴 지연 시간을 갖는 다중경로가 많이 생성된다. 수중내 음파 전달 속도는 약 1,500m/s로 매우 느리기 때문에 큰 Doppler 현상을 겪는다. 특히 송수신기의 이동성이 큰 경우 Doppler 현상에 의한 큰 성능 열화를 겪는다.

본 논문은 Doppler 편이 추정이 용이한 구조를 갖고 작은 자기상관을 갖는 프리앰블을 이용하여 수중 채널에서 높은 정확도를 갖는 시간 동기화 기법을 제안한다. 모의 실험을 통해 제안된 기법이 낮은 signal-to-noise ratio (SNR) 환경에서도 프리앰블의 시작점을 정확히 검출할 수 있음을 확인하였다.

II. 시스템 모델

수중통신에서 발생하는 데이터는 크기가 작고 빈도도 낮기 때문에 일반적으로 burst type의 신호 구조를 채택한다. 또한 동기화뿐만 아니라 Doppler 편이 추정 및 보상을 위해 data burst 앞에 프리앰블이 전송된다. 프리앰블을 사용할 경우 전송물에 손실이 발생한다. 일반적으로 burst type의 신호 구조에서는 프리앰블 후에 많은 수의 심볼이 전송된다. 프리앰블은 시간, 주파수 동기화 및 Doppler 편이 추정 및 보상 등에 사용된다. 따라서 프리앰블에 의한 전송률 손실대비 프리앰블을 통한 검출 성능 향상 이득이 훨씬 크다고 할 수 있다.

본 논문에서는 프리앰블로 인한 오버헤드를 줄이면서 Doppler 편이를 효과적으로 추정하기 위해 동일한 프리앰블을 연속적으로 2번 전송하는 신호 구조를 가

* 본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “극지 빙하 탐사와 원격 모니터링을 위한 수중로봇 ICT원천기술 개발”에 의해 수행되었습니다.(PES4390)

• First Author : (ORCID:0000-0002-7550-206X) Mokpo National University, Department of Information and Communications Engineering, yonghocho@mnu.ac.kr, 부교수, 종신회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-9650-6644) Mokpo National University, Department of Information and Communications Engineering, geonukim@mnu.ac.kr, 조교수, 정회원

* (ORCID:0000-0002-5957-4055) Ocean System Engineering Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering(KRISO), sgkim@kriso.re.kr, 책임연구원, 종신회원

논문번호 : 202211-267-A-LU, Received November 2, 2022; Revised November 10, 2022; Accepted November 10, 2022

정한다². 프리엠블을 2번 반복하여 전송할 경우 Doppler 편이에 의해 각 프리엠블이 겪는 위상 변화가 다르고, 이를 이용하면 Doppler 편이를 효과적으로 추정할 수 있다³.

Doppler에 강인하면서 작은 자기상관을 갖는 프리엠블 신호로는 linear frequency modulation (LFM), hyperbolic frequency modulation 등이 있다⁴. 본 논문에서는 LFM을 가정한다. 제안된 기법은 프리엠블 신호에 국한되지 않기 때문에 다른 신호에도 바로 적용 가능하다.

대역폭 B 를 갖는 LFM 신호는 다음과 같다.

$$s_p(t) = e^{j\left(2\pi f_{\min}t + \pi \frac{B}{T_{LFM}}t^2\right)} \quad (1)$$

위에서 $f_{\min} = f_c - B/2$ 이고, T_{LFM} 은 LFM 신호의 길이이다. 채널을 거친 수신 신호는 다음과 같다.

$$y(t) = \sum_{l=0}^{L_h-1} c_l x(t - \tau_l + \alpha_l t) + w(t) \quad (2)$$

위에서 $x(t)$ 는 passband에서의 송신 신호이며, $w(t)$ 는 가산성 백색 가우시안 잡음이다. L_h 는 채널탭의 개수이고, c_l , τ_l , α_l 는 각각 l 번째 탭의 이득, 지연 시간, Doppler rate이다. 상기 수신 신호 모델에서는 프리엠블 구간 동안 채널 탭의 이득이 변하지 않는다고 가정하였다. 한 심볼이 M 개의 샘플로 구성될 때, down-conversion된 수신 신호는 $y[n] = LPF\{y(t)e^{j2\pi f_c t}\}_{t=kT_c}$ 이다. 이 때 $T_c = T/M = 1/BM$ 는 샘플시간이다.

III. 제안된 시간 동기화 기법

수신 신호 $y[n]$ 과 송신 프리엠블간의 상관(correlation)식은 다음과 같다.

$$u[n] = \sum_{k=0}^{N-1} s^* [k] y[n+k] \quad (3)$$

위에서 $s_p[k]$ 는 기저대역에서의 송신 프리엠블 신호이며, $N(= T_{LFM}/T_c)$ 은 송신 프리엠블의 칩 개수이다. 프리엠블의 시작점은 $u[n]$ 이 최대가 되는 지점이다.

그림 1은 채널을 거치지 않고 잡음도 없는 이상적인

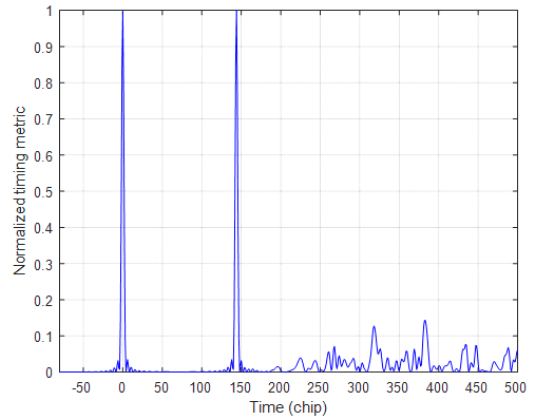


그림 1. 이상적인 환경에서의 기준 시간 metric
Fig. 1. Conventional timing metric for ideal environment

환경에서의 $u[n]$ 이다. 상관값은 최대값으로 정규화하였다. 그림에서 각 프리엠블의 시작점에 위치한 2개의 큰 피크가 존재한다. 이는 동일한 프리엠블을 두 번 전송하기 때문이다. 첫 번째 피크 앞에는 아무런 신호도 전송하지 않기 때문에 상관값이 매우 작다. 또한 2개의 피크 사이의 상관값 역시 매우 작다. 이는 프리엠블로 사용한 LFM의 자기상관 성질 때문이다. 반면 두 번째 피크 뒤의 상관값은 작지 않은 값들이 존재한다. 이는 프리엠블과 데이터 신호간의 상관값이 0이 아니기 때문이다. 첫 번째 피크의 앞부분 영역과 2개의 피크 사이의 영역이 매우 작은 상관값을 갖는 것은 송신 신호 구조 및 프리엠블 특성에 기인한 것이다. 따라서 본 논문에서는 상관값이 매우 큰 2개의 피크와 상관값이 매우 작은 2개의 구역을 사용하여 아래의 수중 채널에 강인한 시간 동기화 metric을 제안한다.

$$z[n] = \frac{\frac{1}{L_2} \sum_{k \in R_2} u[n+k] + \frac{1}{L_4} \sum_{k \in R_4} u[n+k]}{\frac{1}{L_1} \sum_{k \in R_1} u[n+k] + \frac{1}{L_3} \sum_{k \in R_3} u[n+k]} \quad (4)$$

여기서 $R_1 = [-(r_1 + L_1 - 1), \dots, -r_1]$,

$R_2 = [-(L_2 - 1)/2, \dots, (L_2 - 1)/2 - 1]$,

$R_3 = [r_3, \dots, (r_3 + L_3 - 1)]$,

$R_4 = [-(L_4 - 1)/2, \dots, (L_4 - 1)/2 - 1]$

는 각각 상관값 $u[n]$ 의 구역을 정의한다. R_1 은 첫 번째 피크의 앞부분 영역을, R_2 와 R_4 는 첫 번째와 두 번째 피크 영역을, R_3 는 2개의 피크 사이의 영역에 해당한다. L_1, L_2, L_3, L_4 는 각 영역의 길이를 결정한다. r_1 과

r_3 는 구역 R_1 과 R_3 의 시작 위치를 결정한다. 첫 번째 프리앰블의 시작점은 제안된 시간 동기화 metric $z[n]$ 이 최대가 되는 지점이다.

제안된 시간 동기화의 분자에는 상관값이 큰 구역 R_2 와 R_4 의 상관값이, 분자는 상관값이 작은 구역 R_1 과 R_3 의 상관값을 취하기 때문에 상기 특징을 갖는 첫 번째 프리앰블의 시작점에서 매우 큰 값을 갖는다.

그림 2는 SNR이 0dB에서 수중채널환경에서의 상관값 $u[n]$ 과 제안된 시간 동기화 metric $z[n]$ 의 예를 나타내었다. 그리고 구역 R_1, R_2, R_3, R_4 를 표시하였다. 수중채널에 의해 기존 상관값 $u[n]$ 의 두 번째 피크가 첫 번째 피크보다 큰 것을 알 수 있다. 따라서 기존 기법은 가장 크기가 큰 두 번째 피크의 시작점을 결정한다. 두 번째 피크의 시작점은 시간 동기화의 목적인 첫 번째 피크의 시작점과 차이가 매우 크기 때문에 송신 데이터 검출을 포함한 시간 동기화 이후의 모든 작업이 실패할 가능성이 매우 높다. 반면 제안된 시간 동기화 metric은 첫 번째 프리앰블에 해당하는 첫 번째 피크가 가장 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 첫 번째 프리앰블의 시작점을 찾을 수 있다.

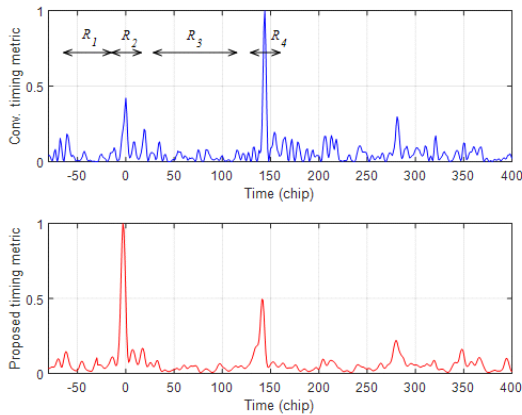


그림 2. 수중채널에서의 기존 및 제안된 시간 metric
Fig. 2. Conv. and proposed timing metrics for underwater channel

IV. 성능 분석

본 장에서는 모의실험을 통해 수중채널에서 제안된 기법의 성능을 확인한다. 표 1에 모의 실험에 사용한 수중 통신 시스템 및 제안된 시간 동기화 metric의 파라미터를 정리하였다. 모의실험에는 각 지연 시간이 랜덤인 5개의 탭을 갖는 수중채널을 고려하였다. 채널의 최대 지연 시간은 10ms이며, 각 탭은 최소 1ms 간격

표 1. 수중통신 시스템 및 제안된 시간 동기화 파라미터
Table 1. Parameters of UWA system and the proposed timing synchronization metric

Parameter		Value
Carrier frequency		10kHz
Bandwidth (B)		2kHz
Symbol duration (T)		0.5us
Number of chips per symbol (M)		4
Preamble length (T_{LFM})		18ms
Proposed timing metric	L_1, L_2, L_3, L_4	50, 5, 50, 5
	r_1, r_3	0, 60

을 갖는다. 각 탭의 분산은 지수적으로 감소하며, 처음과 마지막 탭의 분산은 20dB 차이를 갖는다. 송수신기간 상대적인 속도 차이는 $\pm 3m/s$ 내에서 균일분포를 갖는다고 가정하였다.

기존 및 제안된 시간 동기화 metric $u[n]$ 과 $z[n]$ 의 성능을 측정하기 위해 첫 번째 프리앰블의 시작점 검출(± 12 chip 이내)에 실패할 확률을 그림 3에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 제안된 시간 동기화 metric이 기존 metric에 비해 첫 번째 프리앰블의 시작점을 훨씬 높은 확률로 검출하는 것을 볼 수 있다. 그림 4는 SNR이 0dB일 때 각 시간 metric에 기반하여 검출한 시작점의 분포를 나타낸다. 기존 시간 동기화 metric의 경우 첫 번째 프리앰블의 시작점과 두 번째 프리앰블의 시작점을 유사한 확률로 검출한다. 하지만 제안된 시간 동기화 metric은 거의 모든 경우 첫 번째 프리앰블의 시작점 근처값을 시작점으로 검출하고 있음을 확인할 수 있다.

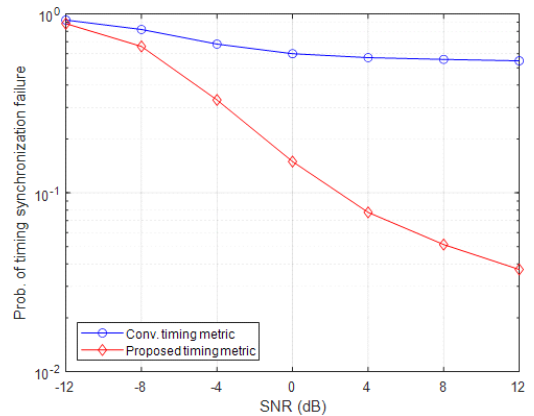


그림 3. 시간 동기화 성능
Fig. 3. Performance of timing synchronization

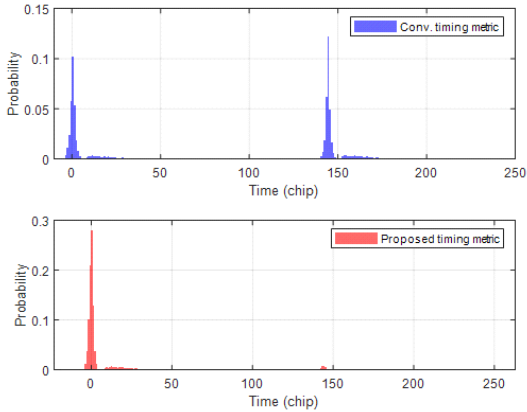


그림 4. 검출한 시간 동기화 분포 (SNR = 0dB)
 Fig. 4. Distribution of identified timing (SNR = 0dB)

V. 결론

본 논문에서는 두 번 반복되는 프리앰블 구조 및 프리앰블의 자기 상관 특성을 기반으로 수중채널에 강인한 시간 동기화 metric을 제안하였다. 제안된 시간 동기화 metric은 시간 및 주파수 선택성이 심한 채널 환경에서도 프리앰블의 시작점을 정확히 찾을 수 있다.

References

- [1] M. Stojanovic and J. Preisig, "Underwater acoustic communication channels : Propagation models and statistical characterization," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, pp. 84-89, Jan. 2009. (<https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.4752682>)
- [2] S.-G. Kim, "Underwater mobile communication scheme based on the direct sequence spread spectrum transmission using Doppler estimation and its sea trial results with the pseudo-moving transmission," *J. Acoustical Soc. Korea*, vol. 41, no. 1, pp. 16-29, Jan. 2022. (<https://doi.org/10.7776/ASK.2022.41.1.016>)
- [3] S. F. Mason, C. R. Berger, S. Zhou, and P. Willett, "Detection, synchronization, and Doppler scale estimation with multicarrier waveforms in underwater acoustic communication," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 26, no. 9, pp. 1638-1649, Dec. 2008. (<https://doi.org/10.1109/JSAC.2008.081204>)
- [4] F. Yuan, Z. Jia, J. Li, and E. Cheng, "STLFM signal based adaptive synchronization for underwater acoustic communications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 28734-28748, Feb. 2019. (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2901357>)