

심해 장거리 환경에서 시공간 다이버시티를 이용한 수중음향통신성능 향상

Performance improvement of long-range underwater acoustic communication in deep water using spatiotemporal diversity

박희진,¹ 김동현,¹ 김재수,^{2†} 한주영,³ 박정수³

(Heejin Park,¹ Donghyeon Kim,¹ J. S. Kim,^{2†} Joo Young Hahn,³ and Jung-Soo Park³)

¹한국해양과학기술원-한국해양대학교 해양과학기술전문대학원, ²한국해양대학교 해양공학과, ³국방과학연구소

(Received June 7, 2019; accepted July 31, 2019)

초 록: 수중음향통신에서 다중경로로 인한 인접 심볼 간 간섭은 통신 성능을 저하시킨다. 인접 심볼 간 간섭의 영향을 최소화하여 수중음향통신 성능을 향상시키기 위해 다이버시티 기법을 사용한다. 본 논문에서는 공간 다이버시티와 시간 다이버시티의 결합을 통해 수중음향통신 성능이 개선됨을 보인다. 시공간 다이버시티를 통해 제한적인 배열에서 수중통신 시스템의 효율성을 증대시켰다. 또한 2018년 10월 한국의 동쪽 해역에서 수행한 BLAC18(Biomimetic Long range Acoustic Communication 18) 실험 데이터와 비교하여 이를 검증하였다.

핵심용어: 장거리 수중음향통신, 다이버시티, TRM(Time Reversal Mirror), 비트 오류

ABSTRACT: ISI (Inter Symbol Interference) reduces the performance of UAComm (Underwater Acoustic Communication). This paper shows that the performance of UAComm can be improved through the spatiotemporal diversity method that is the combination of spatial diversity and temporal diversity methods. By using spatiotemporal diversity, the array aperture was reduced to increase the efficiency of the UAComm system. It is also verified using the experimental data of BLAC18 (Biomimetic Long range Acoustic Communication 18) conducted in October 2018.

Keywords: Long range UAComm (Underwater Acoustic Communication), Diversity, TRM (Time Reversal Mirror), BER (Bit Error Ratio)

PACS numbers: 43.60.Tj, 43.60.Dh

1. 서 론

국내외에서 수중음향통신 연구가 활발하게 이루어지고 있다.^[1-4] 효율적인 해양감시를 위해 수중음향통신의 범위가 단거리에서 장거리로 변화하고 있지만 국내의 연구는 단거리에 국한되어있다.^[5,6] 따라서 국내의 장거리 수중음향통신에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다.

장거리 수중음향통신은 길어진 전달 경로에 의해 증가하는 전달 손실과 다중경로 전파에 의한 인접 심볼 간 간섭에 의해 통신 성능이 저하된다. 인접 심볼 간 간섭은 페이딩 현상의 대표적인 예로, 페이딩 현상의 해결책으로는 다이버시티 기법이 있다. 다이버시티 기법은 다수의 독립적인 페이딩 현상을 갖는 여러 개의 신호를 수신하여, 결합을 통해 페이딩 현상을 완화시킨다. 신호를 수신하는 방법에 따라 시간 다이버시티와 공간 다이버시티, 빔 다이버시티 등이 있다. 본 논문에서는 제한된 공간 다이버시티에서 통신성능을 향상시키기 위한 방법으로 시간 다

†Corresponding author: J. S. Kim (jskim@kmou.ac.kr)
Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Youngdo-gu, Busan 49112, Republic of Korea

(Tel: 82-51-410-4325, Fax: 82-51-403-4320)

“이 논문은 2019년도 한국음향학회 춘계 학술대회에서 발표하였던 논문임.”

이버시티와 공간 다이버시티 기법을 결합하여 시공간 다이버시티 기법을 제안한다. 또한 이를 검증하기 위해 2018년 10월 한국의 동쪽해역에서 수행한 BLAC18(Bionimetic Long range Acoustic Communication 18) 실험 데이터를 이용한다.^[7] 송신기와 수신기의 거리는 60 km로 장거리에 해당한다.^[8] 인접 심볼 간 간섭에 의한 영향을 최소화하기 위해 시공간 다이버시티를 사용하고 수동형 지역전 처리를 통해 등화기 처리를 수행하여 통신 성능을 비교 분석한다.

본 논문은 총 5개의 장으로 구성되며 논문의 구성은 다음과 같다. 제 1장에서는 연구 필요성과 연구 동향에 관하여 설명한다. 제 2장에서는 시공간 다이버시티 기법에 대한 이론적 배경을 설명한다. 제 3장에서는 BLAC18 해상실험의 실험 환경과 실험 구성에 대해 설명한다. 제 4장에서는 공간 다이버시티기법, 시간 다이버시티 기법, 시공간 다이버시티 기법을 BLAC18 해상 실험 데이터에 적용하여 통신 성능을 도출하여 비교하여 분석한다. 마지막 제 5장에서 결론을 맺는다.

II. 시공간 다이버시티

시공간 다이버시티 기법은 공간 다이버시티 기법과 시간 다이버시티 기법이 결합된 다이버시티 기법을 말한다.^[9-13] 동일한 신호를 시간차를 두고 반복적으로 송신할 때 여러 위치에서 수신하여 시공간 다이버시티를 구현한다. 시공간 다이버시티는 제한된 공간 다이버시티에서 시간 다이버시티와의 결합을 통해 다이버시티를 향상시켜 통신 성능을 향상한다.^[14]

Fig. 1은 시공간다이버시티를 구현하기 위해 수신 신호를 선택하는 것을 그림으로 나타낸 것이다. 가

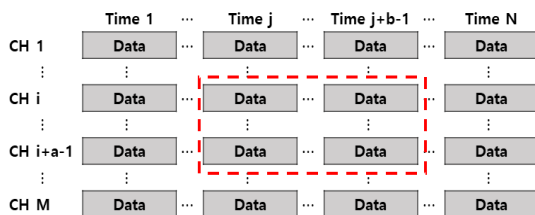


Fig. 1. Diagram of spatiotemporal diversity method.

로 방향은 시간별로 들어오는 신호를 의미하고 세로 방향은 수심별로 들어오는 신호를 의미한다. M 개의 수신채널에 N 번 반복해서 수신된 신호가 있을 때, M 개의 수신채널 중 i 번째부터 $i+a-1$ 번째까지의 수신채널에서 수신된 신호를 사용하여 a 개의 공간 다이버시티를 구현하고, N 번 반복해서 수신된 신호 중 j 번째부터 $j+b-1$ 번째까지의 수신신호를 사용하여 b 개의 시간 다이버시티를 구현한다.

시공간 다이버시티를 구현하여 통신 성능을 분석할 때, ab 개의 선택된 수신신호를 이용하여 시계열 반전처리를 통해 수치적 정합 필터를 수행하고, 재집속된 송신신호를 복조하여 통신 성능을 분석한다. 이를 수식으로 나타내면 Eqs. (1)~(4)와 같다.

$y(t)$ 는 등화 처리를 통해 재구성된 송신 신호, M 개의 수신채널 중 i 번째부터 $i+a-1$ 번째까지의 수신채널에서 수신된 신호 중 j 번째부터 $j+b-1$ 번째까지의 수신 신호는 $r_n^m(t)$ 이다. $s(t)$ 은 송신 신호, $r_n^m(t)$ 의 채널응답특성은 $g_n^m(t)$, 등화기 $E_n^m(t)$ 이며, $n(t)$ 는 시간영역에서의 노이즈, *은 컨볼루션을 의미한다.^[14]

$$y(t) = \sum_{m=i}^{i+a-1} \sum_{n=j}^{j+b-1} r_n^m(t) * E_n^m(t). \quad (1)$$

$$y(t) = \sum_{m=i}^{i+a-1} \sum_{n=j}^{j+b-1} s(t) * g_n^m(t) * E_n^m(t). \quad (2)$$

$$y(t) = \sum_{m=i}^{i+a-1} \sum_{n=j}^{j+b-1} s(t) * g_n^m(t) * g_n^m(-t). \quad (3)$$

$$Y(\omega) = \sum_{m=i}^{i+a-1} \sum_{n=j}^{j+b-1} S(\omega) \times G_n^m(\omega) \times G_n^{*m}(\omega). \quad (4)$$

III. 해상실험

3.1 해상실험 환경

본 논문에서는 BLAC18 데이터를 적용하여 검증하였다. 송신기와 수신기 배치와 음속구조는 Fig. 2와 같다. 송신기는 수심 200 m의 깊이에 1 채널이 배치된다. 수신기는 수심 201.4 m~221 m 사이에 2.8 m

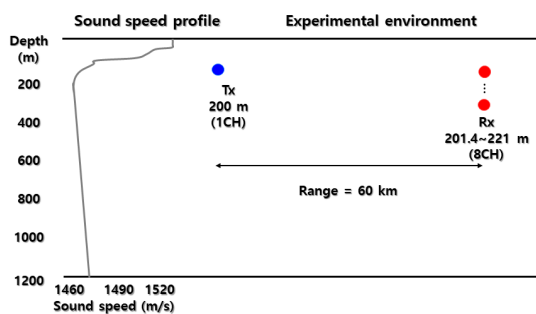


Fig. 2. Sound speed profile and experimental environment of BLAC18.

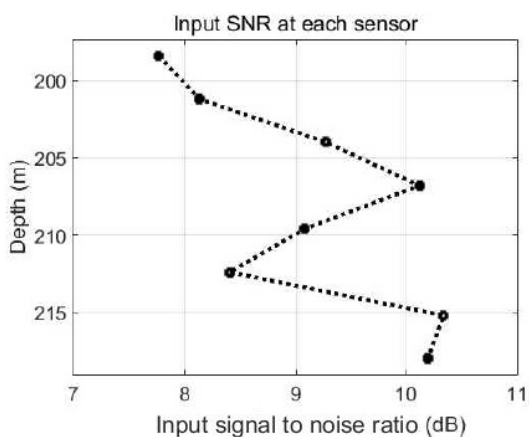


Fig. 3. Transmitted signal packet structure.

간격으로 8 채널이 배치된다. 송신기와 수신기 사이의 거리는 60 km이며, 수심은 최대 1200 m이다. 송신기와 수신기는 정지 상태이다.^[7]

3.2 전송 신호

전송 신호의 구성은 Fig. 3과 같다. 전송 신호는 탐침음원으로 사용할 LFM(Linear Frequency Modulation) 신호와 통신용 데이터 신호로 구성된다. 샘플링 주파수는 16384 Hz이며 전송 신호의 중심주파수는 2560 Hz이다. Chirp 신호는 640 Hz의 밴드 폭을 가진다. 데이터 신호는 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 변조방식을 사용하며 전송률은 512 bps이다. 인접 심볼 간 간섭을 줄이기 위해 roll-off factor가 0.25인 RRC(Root Raised Cosine) 필터를 변조와 복조 과정에서 정합 필터로 사용하였다. 데이터 신호는 255개의 심볼을 가지는 m-sequence 신호를 프리앰블로 사용한다.

Fig. 4는 시간 영역에서 송신 신호를 나타내며 LFM

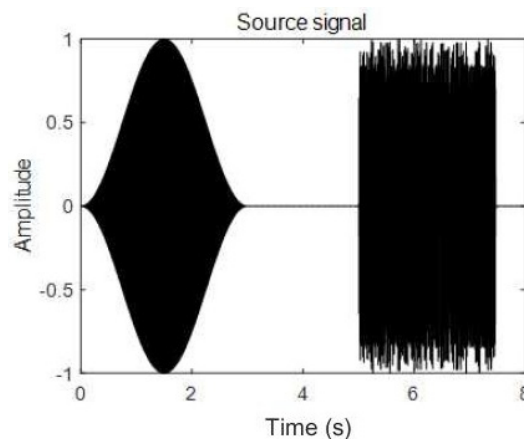


Fig. 4. Time series of source signal.

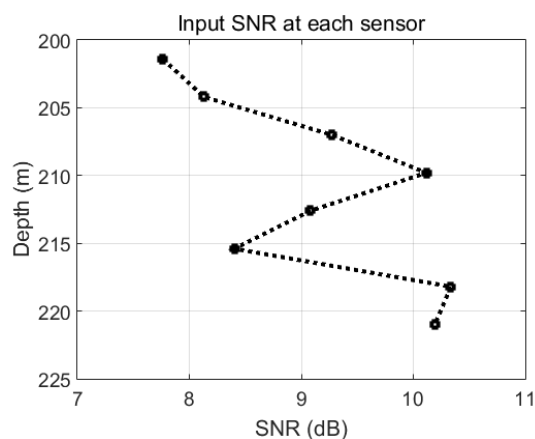


Fig. 5. Input signal to noise ratio of BLAC18.

신호의 길이는 0.3 s, 데이터 신호의 길이는 2.47 s이다. 전송 신호는 3분 간격으로 3번 반복해서 송신하고, 1시간 후에 3분 간격으로 다시 3번 반복해서 송신하는 것을 3번 반복한다.

3.3 입력 신호 대 잡음비

본 논문에서는 통신 시스템의 성능을 수치화시키기 위해 입력 신호 대 잡음비를 사용하였다.^[7,8] Fig. 5는 각 수신 채널 수심에 따른 입력 신호 대 잡음비를 나타낸 것이다. 음속구조에 의해 수심 220 m 부근에서 음향 축이 형성되었으며, 음향 축 근처에서 음선이 밀집되어 입력 신호 대 잡음비가 높아지는 것을 확인할 수 있다.^[11,15]

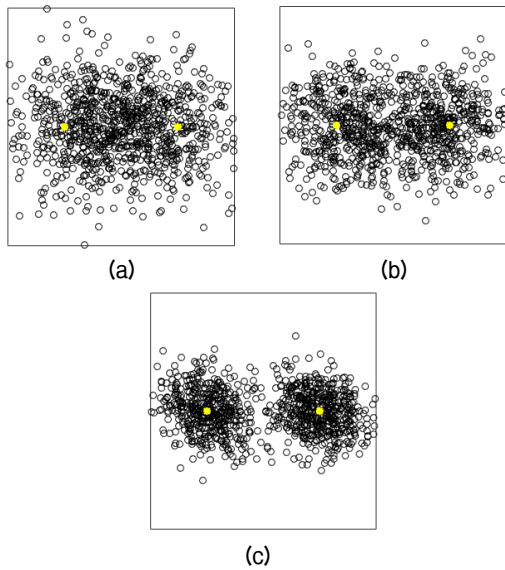


Fig. 6. Constellations for comparing the performance of spatiotemporal diversity.

- (a) Constellation w/o diversity ($D = 1$)
 (b) Constellation w/o spatial diversity
 w/ temporal diversity ($D = 9$)
 (c) Constellation w/ spatiotemporal diversity ($D = 18$)

Table 1. BER for comparing the performance of spatiotemporal diversity.

CH	BER w/o diversity ($D = 1$)	BER w/o spatial diversity w/ temporal diversity ($D = 9$)	CH	BER w/ spatiotemporal diversity ($D = 18$)
1	0.494	0.497	1, 2	0.071
2	0.493	0.251	2, 3	0.054
3	0.487	0.085	3, 4	0.011
4	0.498	0.075	4, 5	0.033
5	0.101	0.265	5, 6	0.033
6	0.490	0.431	6, 7	0.044
7	0.487	0.097	7, 8	0.051
8	0.420	0.132		

IV. 분석결과

본 절에서는 시공간 다이버시티 기법을 BLAC18 데이터에 적용하여 검증한다. 공간 다이버시티를 제한하기 위하여 인접한 2개의 수신채널을 이용한다. Fig. 6은 3번 수신 채널에서 분석한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 단일 채널에서 1개의 수신신호의 정상도이며 비트오율은 0.487[487/1000]이다. Fig. 6(b)

는 단일 채널에서 다른 시간대에 들어오는 9개의 신호를 이용해 시간 다이버시티 기법만을 적용한 정상도로 0.085[85/1000]의 비트 오율을 가진다. (a)와 비교했을 때, 통신성능은 5배 이상 향상됨을 보인다. Fig. 6(c)는 2개의 채널에서 각 9번 반복된 신호를 사용하여 18개의 시공간 다이버시티를 이용한 결과로 0.011[11/1000]의 비트 오율을 가진다. 시간 다이버시티 기법을 단독으로 사용했을 때보다 시공간 다이버시티 기법을 사용했을 때 통신 성능이 월등히 향상됨을 확인했다.

Table 1은 단일 채널에서 시간 다이버시티 기법을 사용하지 않을 때, 9개의 반복 수신된 신호 중 첫 번째 신호를 분석한 경우의 비트오율, 단일 채널에서 시간 다이버시티 기법을 사용한 경우의 비트오율, 시공간 다이버시티 기법을 사용한 경우의 비트오율을 나타낸다. 시간 다이버시티 기법을 적용했을 때 통신 성능이 저하되는 1, 6번 채널의 경우 BLAC18 데이터의 돌고래 클릭음에 영향을 받은 것으로 추정된다.^[16] 반복적으로 수신된 강한 임펄스 신호의 형태를 갖는 클릭음은 시변동성이 큰 채널을 형성하여 통신 성능을 저하시킨다. 시공간 다이버시티 기법을 적용하여 다이버시티 개수를 증가시켜 통신 성능의 향상됨을 보였다.

V. 결론

본 논문에서는 송신기와 수신기 사이의 거리가 60 km이고 수심이 1200 m인 심해 장거리 환경에서 배열의 길이가 제한될 때 통신 성능을 향상시키기 위해 시공간 다이버시티 기법을 제안하였다. 또한 국방과학연구소의 지원으로 2018년 10월 수행된 BLAC18 해상 실험 데이터를 통해 이를 검증하였다.

시간 다이버시티 기법을 단독으로 적용시켰을 때보다 시공간 다이버시티를 기법을 적용했을 때 비트 오율이 평균 0.210에서 0.043로 5배 이상 감소하는 것을 확인하였다. 이를 통해 제한된 배열에서 통신 성능 저하의 해결책으로 시공간 다이버시티를 제안한다.

감사의 글

본 논문은 국방과학연구소의 지원으로 수행되었

습니다(UD170022DD).

References

1. A. Plaisant, "Long range acoustic communications," Proc. IEEE OCEANS'98 Conf. 472-476 (1998).
2. T. Shimura, H. Ochi, and Y. Watanabe, "Time-reversal communication with moving source-receiver in shallow water," Jpn. J. Appl. Phys. **45**, 4847-4852 (2006).
3. Y. -S. L. Chiu, Y. -Y. A. Chan, and C. -F. Chen, C. -W. Wang, "Long-range communication performance based on passive phase conjugation impacted by internal waves in the south china sea," OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean. 1-8 (2008).
4. H. C. Song and W. S. Hodgkiss, "Diversity combining for long-range acoustic communication in deep water," J. Acoust. Soc. Am. **132**, EL68-EL73 (2012).
5. S. H. Oh, G. H. Byun, and J. S. Kim, "Performance improvement of underwater acoustic communication using ray-based blind deconvolution in passive time reversal mirror" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **35**, 375-382 (2016).
6. M. J. Eom, S. Oh, J. S. Kim, and S. M. Kim, "Algorithm and experimental verification of underwater acoustic communication based on passive time reversal mirror in multiuser environment" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **35**, 167-174 (2016).
7. J. S. Kim, K. M. Kim, J. H. Chung, J. W. Choi, D. H. Kim, H. J. Park, J. Y. Hahn, S. S. Park, S. H. Cho, J. S. Park, D. W. Do, and J. S. Park, "Overview of the biomimetic long range acoustic communication experiment 2018 (BLAC18)" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. Suppl. 1(s) **38**, 16 (2019).
8. F. Mosca and T. Shimura, "Low-frequency acoustic source for AUV long-range communication," Mast Europe, **1**, 1-9 (2011).
9. M. Fink, "Time-reversal mirrors," J. Phys. D: Appl. Phys. **26**, 1333-1350 (1993).
10. W. A. Kuperman, W. S. Hodgkiss, H. C. Song, T. Akal, C. Ferla, and D. R. Jackson, "Phase conjugation in the ocean : Experimental demonstration of an acoustic time-reversal mirror," J. Acoust. Soc. Am. **103**, 25-40 (1998).
11. H. C. Song, W. S. Hodgkiss, W. A. Kuperman, W. J. Higley, K. Raghukumar, T. Akal, and M. Stevenson, "Spatial diversity in passive time reversal communications," J. Acoust. Soc. Am. **120**, 2067-2076 (2006).
12. M. J. Eom, J. S. Kim, J. H. Cho, H. Y. Kim, and I. Sung, "Algorithm and experimental verification of underwater acoustic communication based on passive time-reversal mirror" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **33**, 392-399 (2014).
13. G. Vazquez, F. Ray, M. Lamarca, and J. R. Fonollosa, "Diversity in mobile communications for blind detection of block-coded modulations," Proc. IEEE 49th Vehicular Technology Conf. 1105-1101 (1999).
14. H. Hourani, "An overview of diversity techniques in wireless communication systems," Postgraduate course in radio communications, **4**, 144-160 (2004/2005).
15. K. H. Choi, S. H. Kim, J. W. Choi, H. S. Kim, and B. N. Kim, "Analysis of passive time-reversal communication performance in shallow water with underwater sound channel" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **37**, 21-30 (2018).
16. J. Y. Song, D. H. Kim, Y. H. Choi, and J. S. Kim, "Study of acoustic characteristics of east sea dolphin in BLAC18" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. Suppl. 1(s) **38**, 232 (2019).

저자 약력

▶ 박 희 진 (Heejin Park)



2017년 2월 : 한국해양대학교 해양공학과 공학사
2017년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원-한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 석사과정

▶ 김 동 현 (Donghyeon Kim)



2013년 2월 : 한국해양대학교 해양공학과 공학사
2015년 2월 : 한국해양대학교 해양공학과 공학석사
2017년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원-한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 박사과정

▶ 김 재 수 (J. S. Kim)



1981년 : 서울대학교 조선공학과 공학사
1984년 : 미국 University of Florida, 해양공학 공학석사
1989년 : 미국 MIT, 해양공학, 수중음향 공학박사
1990년 ~ 1991년 : 국방과학연구소 선임 연구원
1999년 ~ 2001년 : 미국 Scripps 해양연구소 Visiting Scientist
2009년 ~ 2010년 : 미국 Scripps 해양연구소 Visiting Scientist
1991년 ~ 현재 : 한국해양대학교 해양공학과 교수

▶ 한 주 영 (Joo Young Hahn)



1997년 2월 : 한양대학교 지구해양과학과
학사
2000년 2월 : 한양대학교 지구해양과학과
석사
2004년 8월 : 한양대학교 지구해양과학과
박사
2005년 8월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임
연구원

▶ 박 정 수 (Joung-Soo Park)



1988년 2월 : 한양대학교 지구해양과학과
학사
1990년 2월 : 한양대학교 지구해양과학과
석사
2006년 8월 : 한국해양대학교 해양개발공
학과 박사
1990년 3월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임
연구원