

녹색 LED 어레이와 실리콘 광증배소자를 이용한 수중 무선 광통신 시스템 구현

윤창현*, 이경원*, 김기만°,
 강진일**, 손현중**

Implementation of the Underwater Wireless Optical Communication System Using Green LED Array and Silicon Photomultiplier

Chang-hyun Youn*, Kyung-won Lee*,
 Ki-man Kim°, Jin-il Kang**,
 Hyun-joong Son**

요약

이 레터에서는 송신단에 녹색 LED 어레이를 광원으로 사용하고, 수신단에서는 집광렌즈와 실리콘 광증배소자를 적용한 수중 무선 광통신 시스템을 구현한 내용을 소개한다. 구현된 시스템은 실제 연안의 탁도가 있는 바다의 수중에서 실험을 수행하였으며, 전송율 500 kbps에서 측정된 비트 오류율을 제시하였다.

Key Words : Underwater Wireless Optical Communication, Green LED Array, Silicon Photomultiplier, Turbid Coastal Water

ABSTRACT

This letter introduces the implementation of an underwater wireless optical communication system in

which a green LED array is used as a light source at the transmitting end, and a condenser lens and silicon photomultiplier element are applied at the receiving end. The implemented system was tested in the turbid coastal water, and the BER(bit error rate) measured at a data rate of 500 kbps are presented.

I. 서론

수중에서의 통신은 그동안 음향통신을 중심으로 많은 발전이 있었지만 좁은 변조 대역폭, 긴 지연 시간 및 심각한 다중 경로 전달 효과 등에 의해 그 성능이 제한된다. 그에 따라 음향이 아닌 비음향 통신이 관심을 받게 되었으며, 특히 최근 수중 무선 광통신에 대한 연구와 시스템 구현이 활발하게 이루어지고 있다. 수중 무선 광통신은 비록 단거리 전송에 유효하지만 기존의 음향통신보다 높은 데이터 전송 속도를 제공하고, 경우에 따라 지향성에 의한 보안성을 갖게 할 수 있는 장점이 있다. 수중 광통신 시스템은 일반적으로 광원에 따라 레이저 기반과 LED(light emitting diode) 기반의 두 가지 형태로 나눌 수 있는데 레이저는 1 GHz 이상의 큰 변조 대역폭으로 인해 높은 데이터 전송 속도를 지원할 수 있지만 광원의 제작이 어렵고 가격이 비교적 높은 단점을 갖고 있다. 이에 비해 LED는 좁은 변조 대역폭을 갖기 때문에 레이저 보다 보통 상대적으로 낮은 전송 속도를 갖지만 비교적 광원의 가격이 저렴하여 일반 상업용으로 적합하다. 이에 미국의 우즈 홀 해양 연구소가 3.7 m 거리에서 청색 LED 어레이를 사용하여 해수에서 115 kbps의 수중 광통신을 달성한 이래 수영장에서 2.28 Mbps의 전송 속도를 보인 AquaOptical II라는 시스템이 소개되었다^{1,2)}. 최근에는 영국의 Sonardyne 사가 BlueComm 200이라는 모델명의 제품을 출시하고 있고, 스위스의 Hydroma사는 수중 드론에 적용하기 위하여 LUMA 시리즈로 명명된 관련 제품을 소개하고 있다.

※ 본 결과물은 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학연협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다.

• First Author : (ORCID:0000-0002-5655-9095) Korea Maritime and Ocean University Department of Radio Communication Engineering, yoonch265@naver.com, 학생(석사과정), 학생회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-1138-4121) Korea Maritime and Ocean University Department of Radio Communication Engineering, kimkim@kmou.ac.kr, 정교수, 정회원

* (ORCID:0000-0001-5088-3241) Korea Maritime and Ocean University Department of Radio Communication Engineering, dino1324@naver.com

** Borsys Co., (ORCID:0000-0002-8951-079X) contact@borsys.com; (ORCID:0000-0003-2605-9740) rovson90@gmail.com
 논문번호 : 202208-192-D-LU, Received August 29, 2022; Revised September 13, 2022; Accepted September 13, 2022

국내에서는 주파수 변조 방법을 이용하여 35 cm 거리에서 오디오 신호를 전송한 사례와 수중 음성통신을 위하여 가시광과 펄스 폭 변조 전송 방식을 이용하여 구현한 사례가 있다. 또한 수중에서 블랙박스 데이터 회수 등을 위하여 디지털 데이터 전송 시스템이 구현되었는데 RZ-OOK (return-to-zero on-off-keying) 전송 방식을 채택하였다³⁾. 하지만 OOK 계열의 전송 방식에 있어서 펄스 탐지를 위한 문턱값이 필요하고, 이는 수시로 변하는 태양광에 의한 잡음을 포함한 주변 잡음 환경에 따라 가변되어야 하는 문제점을 갖고 있기에 이러한 가변 문턱값이 필요하지 않은 펄스 위치 변조 전송과 같은 방식에서의 전환이 필요하다. 이 레터에서는 기존의 RZ-OOK 방식 대신 펄스 위치 변조 방식을 채택하여 광원으로 녹색 LED 어레이를 사용하고, 수신기에는 실리콘 광증배소자 (silicon photomultiplier, SiPM)를 적용한 수중 무선 광통신 시스템을 구현하고, 실제 탁도가 있는 연안의 수중에서 진행된 실험 결과를 제시한다.

II. 구현 내용

그림 1은 구현된 LED 어레이 기반의 수중 무선 광통신 시스템의 블록도를 보여준다. 송신단은 변조기, 구동 드라이버 및 광원으로 구성되었으며, 수신단은 집광렌즈(condenser lens), 실리콘 광증배소자 모듈 및 복조기로 구성되었다. 광원으로써 520 nm 파장의 녹색 LED 어레이를 사용하였으며, LED로는 광속 (luminous flux)이 약 2,000 lm인 오스람사의 LE CG POAQ 모델을 사용하였다. 이 파장을 사용한 이유는 수중에서는 보통 450~530 nm 사이의 청록색 대역이 가장 낮은 흡수 손실을 갖기 때문이다. 컴퓨터에서 비동기식 통신 방식으로 보내어진 이진 비트열은 변조기에서 적절한 펄스 생성 과정을 거친 뒤 자체적으로 설계 제작된 구동 드라이버를 거쳐 LED 어레이로 전달된다. 수신단에서는 에드몬드 옵틱스 사의 AR (anti-reflected) 코팅된 Plano-Convex 40 mm 집광렌

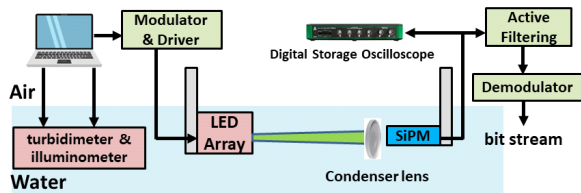


그림 1. LED 어레이 기반 수중 무선 광통신 구성도
Fig. 1. Block diagram of underwater wireless optical communication based on LED array

를 사용하여 빛을 집중하고, 실리콘 광증배소자 모듈에서 수신한다. 사용된 모듈은 KETEK-PE3315-WB-TIA-SP이며, 3 mm X 3 mm 수광 면적을 갖는다. 이는 청록색 대역에서 높은 민감도를 갖고, 회로 구성에 있어서 소형화 시킬 수 있는 장점이 있다. 이후 수신된 신호는 능동 필터링과 복조 과정을 거치게 된다. 이 레터에서는 신호 분석을 위하여 디지털 스토리지 오실로스코프를 사용하여 50 MHz의 샘플링 속도로 데이터를 수집하였다. 또한 해수 및 주변 광 환경 정보를 수집하기 위해 탁도계(turbidimeter)와 조도계 (illuminometer)가 포함되었다.

III. 연안 해상실험 결과

구현된 수중 무선 광통신 시스템의 성능을 확인하기 위한 해상실험은 부산 연안에서 수행되었다. 프레임으로 만든 구조물에 송수신 시스템을 수평 방향으로 장착하여 수중으로 내렸는데 수심 1 m 이내에서 송수신 거리 3~5 m로 설정하였다. 실험 과정에 광 신호 전달에 큰 영향을 미치는 해수의 탁도를 탁도계를 이용하여 지속적으로 측정하였으며, 그 결과 연안의 부유 물질로 인하여 약 3.3~3.6 NTU (Nephelometry Turbidity Unit)의 탁도를 보였다. 또한 실험은 낮 시간대인 대략 16시 전후에 진행되었는데 수신단 근처에 조도계를 부착하여 수중에서의 주변광을 측정하였으며, 그 결과 평균 약 480 lux를 나타내었다. 실험 당일 날씨는 양호하였으나 해양 기후의 특성상 불규칙한 풍속이 있었다.

실험은 송수신 거리 3 m에서 집광렌즈가 있는 경우(case 1)와 없는 경우(case 2), 그리고 집광렌즈가 있으면서 거리가 5 m인 경우(case 3)의 3가지로 구분하여 진행하였다. 데이터는 500 kbps의 펄스 위치 변조 방식으로 10^5 개 이상의 비트를 전송하였으며, 이에 별도의 채널 부호화 기법을 적용하지 않아 결과는 비부호화된 오류율(bit error rate)로 표현하였다. 다음의 표 1에는 복조 처리한 후의 비트 오류율을 나타내었는데 비트 오류율 10^{-5} 이하는 0으로 표현하였다. 집

표 1. 실험 결과
Table 1. Experimental results

Case	Distance (m)	Condenser lens	Bit error rate
1	3	○	0
2	3	×	0.0823
3	5	○	0.0049

광렌즈가 장착된 경우 오류가 발생하지 않거나 5 m 거리에서는 낮은 수준이었으며, 3 m 거리에서 집광렌즈가 없는 경우에는 0.0823의 결과를 보였다. 하지만 이 같은 오류율은 향후 적절한 채널 부호화 기법이 적용될 경우 오류 정정을 통해 복구가 가능할 것으로 보인다.

그림 2에는 수집된 신호의 파형을 나타내었다. 송수신 3 m 거리에서 집광렌즈가 장착된 경우 수신 신호가 잘 구분되어 나타났으나 집광렌즈가 없는 경우에는 신호와 배경 잡음 레벨이 큰 차이를 보이지 않아 구분이 어려웠다. 또한 각 실험마다 잡음 레벨이 다른 것을 볼 수 있는데 이는 태양광에 의한 배경 잡음 레벨이 계속 변화하기 때문이다.

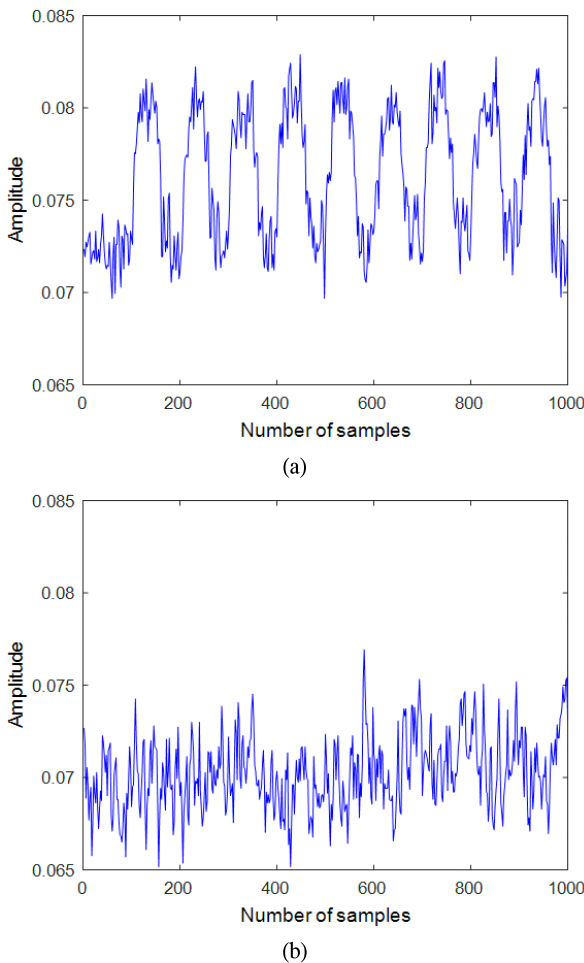


그림 2. 수신된 신호, (a) 경우 1, (b) 경우 2
 Fig. 2. The received signals, (a) case 1, (b) case 2

IV. 결 론

일반적으로 수중에서는 음향통신 모뎀이 사용되어 왔지만 낮은 전송율과 함께 다중경로 전달 및 도플러 확산 등에 기인한 시변동성이 높은 수중 채널에 의해 발생하는 문제들을 극복하여야 한다. 하지만 광통신은 비록 전달 거리는 짧지만 음향통신에 비해 상대적으로 높은 전송율을 가지며, 동시에 시야각 조절에 따라 보안성도 갖추어 최근 해외에서 관련 제품들이 소개되고 있다. 이 레터에서는 펄스 위치 변조 방식을 적용한 녹색 LED 어레이 기반의 수중 무선 광통신 시스템을 구현하여 실제 연안 수중에서 실험을 진행한 결과를 제시하였다. 향후 전송율 향상과 함께 채널 부호화 기법의 적용 및 주변광 세기의 변화에 대응할 수 있는 환경 적응형 시스템에 대한 연구가 필요하다.

References

- [1] M. Doniec and D. Rus, "BiDirectional optical communication with AquaOptical II," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Syst.*, pp. 390-394, Singapore, Nov. 2010. (<https://doi.org/10.1109/ICCS.2010.5686513>)
- [2] W. Wei, C. Zhang, W. Zhang, W. Jiang, C. Shu, and Q. Xiaorui, "LED-based underwater wireless optical communication for small mobile platforms : Experimental channel study in highly-turbid lake water," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 169304-169313, Sep. 2020. (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3020947>)
- [3] H. Son, H. Choi, J. Kang, J. Sur, S. Jeong, J. Lee, and S. Kim, "Study on underwater black box recovery system using optical wireless communication," *J. Advanced Navig. Technol.*, vol. 23, no. 1, pp. 61-68, Feb. 2019. (<https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.1.61>)