

수중 광-음파 하이브리드 통신 모델 연구

홍예권*, 정현우*, 이재훈*, 정지원**

Study on Underwater Optical-Acoustic Hybrid Communication Model

Jae-Hun Lee*, Hyun-Woo Jeong*, Ye-Gwon Hong*, Ji-Won Jung**

요약 수중 통신에서는 장거리 전송이 가능하지만 전송률이 낮은 음파 통신과, 대용량 전송이 가능하나 흡수 및 산란 등으로 인해 전송 거리가 제한적인 광 통신이 적용되고 있다. 본 논문에서는 두 가지 통신 수단의 장점을 이용하여 장거리에서는 음파 통신, 단거리에서는 광 통신을 적용하는 하이브리드 모델을 제시하였으며, 하이브리드 모델을 적용하기 위해서는 해양에서의 탁도를 고려한 광 전송 가능 거리, 음파를 이용한 거리 추정 방식을 제시하였다. 해양에서의 탁도를 고려할 때 약 10m 이내의 거리에서 광 전송이 가능함을 알 수 있으며, TDoA 기법을 이용한 음원 거리 추정 알고리즘에서 센서가 4개일 때 안정적으로 추정함을 알 수 있다.

Abstract In underwater communications, acoustic signals which have low transmission rate with long communication distance and optical signals which can achieve large-scale data transmission with short distance due to absorption and attenuation have been applied. This paper presents a hybrid optical-acoustic communication model that applies acoustic signals for long distance and optical signals for short distance. In order to apply hybrid model, available optical transmission distance considering ocean turbidity for reliable communication and distance estimation method using acoustic signals are presented. In simulation results, the reliable optical transmission distance in turbid ocean types is within 10m. To estimate distance for optical transmission using acoustic signals, four sensors are required to achieve stable estimation using TDoA method.

Key Words : Acoustic, Distance estimation, Hybrid optical-acoustic communication, Optical, TDoA

1. 서론

수중에서 무선으로 정보를 전송하는 수단으로는 주로 음향통신, 광 통신 알고리즘이 사용된다[1]. 수중 음향통신은 장거리 전송이 가능하나 고주파에 대한 페이딩 특성으로 인하여 저주파를 사용하므로 저속 통신이라는 단점이 존재한다. 수중 광 통신은 Gbps 단위의 높은 전송률을 달성 가능하나 통신 거리에 따른 전송 손실이 매우 커서 제한된

전송 거리를 가진다. 최근 수중에서 대용량의 정보 전송 요구가 커짐에 따라, 대용량의 정보를 전송하기 위해 본 논문에서는 두 가지 전송 매체를 통신 목적에 따라 효과적으로 사용하는 광 음파 하이브리드 통신 모델을 제시한다. 본 논문에서 제시하는 광 음파 하이브리드 모델은 대용량의 광 전송을 위해 음파를 이용하여 광 전송 가능 거리를 탐지하며, 탐지된 거리에서 수중에서 탐지된 대용량 정보

Following are results of a study on the "Leaders in INdustry-university Cooperation 3.0" Project, supported by the Ministry of Education and National Research Foundation of Korea

*Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University

**Corresponding Author : Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University (jwjung@kmou.ac.kr)

Received October 10, 2024

Revised October 15, 2024

Accepted October 28, 2024

를 광 전송하기 위해 다음과 같은 두 가지 관점에서 모의실험 하여 연구하였다. 첫째로, 수중에서 광 전송 가능 거리에 대한 성능 분석이다. 음파를 이용하여 광 전송 가능 거리를 추정하기 위해서는 전송 거리에 따른 성능 분석을 토대로 광 전송 가능 거리를 결정하여야 한다. 둘째로, 광 전송 가능 거리가 결정되면 음파를 이용한 탐지 거리 추정 방식에 대하여 연구한다. 고정된 기지국과 수중 이동체 간의 서로 알고 있는 주기적인 음파 신호를 전송하여 거리 추정 방식을 적용하여 거리 오차를 분석하였다.

2. 시스템 모델

본 논문의 전체적인 모델은 그림 1과 같이 음파를 이용하여 음원의 위치를 추적한 후 광 전송이 가능한 거리를 탐지하여 수중에서 수집된 영상 등의 광대역 대용량의 데이터를 전송하기 위한 광 전송 기술이 협력하는 광-음파 하이브리드 모델이다. 이는 광 통신 범위를 벗어난 거리에서 음파를 이용하여 광 전송이 가능한 거리를 탐지하여 광 전송 가능 거리에 오면 고속 대용량의 데이터를 광 전송하는 모델이다. 이를 위해 결정해야할 요소로는 광 전송 가능 거리, 즉 요구되는 성능에서 광 전송 가능한 최적의 거리, 그리고 광 전송 가능 거리까지의 음향을 이용한 거리 추정 시 오차의 최소화로 두 가지로 결정해야할 요소이다.

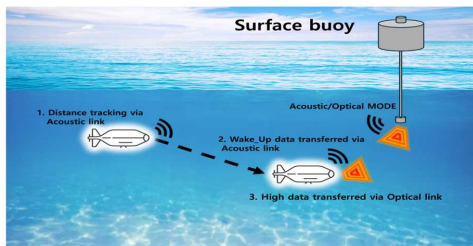


그림 1. 광 음파 하이브리드 모델
Fig. 1. Optical-acoustic hybrid model

본 논문에서는 첫째로 광 전송 가능 거리를

결정하기 위해 수중에서 적용되는 광 전송 시 송수신부인 채널 부호화, 변복조를 적용하여 탁도가 존재하는 수중 환경에서 모의 실험하여 수중에서 요구되는 성능에서 광 전송 가능 거리를 결정한다. 수중에서 광 전송 알고리즘으로는 가장 널리 적용되고 있는 채널 부호화 알고리즘으로는 1/2 부호화율을 가지는 LDPC (Low Density Parity Check) 부호, 변조 알고리즘으로는 2-PPM(2 dimension Pulse Position Modulation)을 적용하였다[2]. 이에 대해 수중 탁도를 고려하여 거리별 성능 분석하였다. 둘째로, 수중에서 광 전송 가능 거리가 결정되면 광 전송 가능 거리를 탐지하기 위한 음원의 위치를 추적하기 위해 음파를 이용하여 음원의 위치를 파악하는 수중 거리 추정 알고리즘을 적용하여 실제 거리와의 거리 오차를 분석한다. 고정된 기지국과 수중 이동체 간의 주기적인 LFM(Linear Frequency Modulation)신호를 음향으로 전송하며 이동체는 다중 센서를 통해 LFM 신호를 수신하여 기지국의 위치를 추정한다. 음파를 이용한 거리 추정 방식은 ToA(Time of Arrival), TDoA(Time Difference of Arrival) 방식이 주로 적용되는데 본 논문에서는 TDoA 방식을 적용하였다[3]. 거리 100m에서 10m로 이동체가 기지국으로 접근하면서 이에 대한 추정 거리 오차를 분석하였다. 이동체가 추정된 거리에 도달하면 기지국과 이동체는 광 전송 준비를 위한 데이터를 주고받아 광 통신으로 전환하여 데이터를 송수신한다.

3. 광 전송 거리별 성능 분석

그림 2는 거리에 따른 광 전송 성능 분석을 위한 모델이다. 송신 메시지 비트열 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ 은 r 의 부호화율을 가지는 LDPC 부호화기에 입력되어 N 개의 부호화된 비트열 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}$ 이 출력된다.

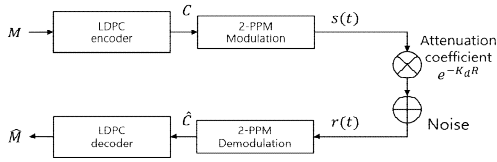


그림 2. 수중 광 전송 시스템 모델
Fig. 2. Underwater optical transmission system model

채널 부호화 방식으로는 1944비트 크기를 가지는 부호화율 1/2의 LDPC 부호화 방식을 고려하였다. 변조 방식으로는 2-PPM 변조 방식을 적용하였으며, 그림 3과 같이 각 부호화된 비트를 over-sampling하여 각 비트당 N_s 개의 샘플을 할당하여 심볼이 “0”인 경우에는 앞의 $N_s/2$ 샘플에 1을 할당하고 심볼이 “1”인 경우에는 뒤의 $N_s/2$ 샘플에 “1”을 할당하여 전송한다[2].

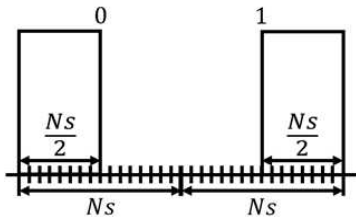


그림 3. 2-PPM 신호
Fig. 3. 2-PPM signal

수신부는 탁도로 인한 감쇠 및 잡음이 첨가된 수신 신호는 2-PPM 복조를 수행한다. 수신된 N_s 샘플 중 전단의 $N_s/2$ 샘플과 후단의 $N_s/2$ 샘플의 적분값을 비교하여 “0”과 “1”을 판정한다. 판정된 비트열은 LDPC 복호 후 성능을 분석한다. j 시점에서 2-PPM 된 s_j 가 전송하였을 때, 수신된 광 신호 r_j 는 다음 식 (1)과 같다.

$$r_j = s_j e^{-k_d R} + n_j \quad (1)$$

식 (1)에서 R 은 송수신 거리, K_d 는 흡수 산란 등으로 인한 감쇠 계수를 나타내며 이는 지수 함수적으

로 송신 신호가 감쇠되며, n_j 는 j 시점에서의 가우시안 잡음을 나타낸다. K_d 는 그림 4와 같은 Jerlov 모델에 따라 분류하였다[4].

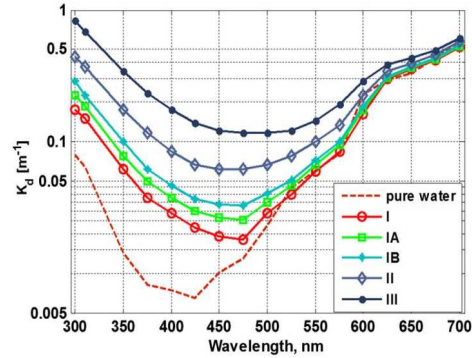


그림 4. 물 유형에 따른 광 감쇠 계수
Fig. 4. Optical attenuation coefficient based on water type

그림 4에서 수중에서 물 유형에 따라 pure water를 포함한 6가지를 분류하였으며, 이는 해양 수중 환경에서 탁도에 따라 분류한 것이다[4]. 일반적으로 해상에서는 pure water는 고려하지 않으며, 나머지 다섯 가지 분류의 탁도를 가지는 수중 형태가 해양에서 존재하며, 한국의 해양 수중 탁도는 동해안과 서해안에 따라 다르며 또한 계절에 따라 다르다. 가로축은 광 신호의 파장을 나타내며, 세로축은 1m 당 감쇠계수 K_d 를 나타낸다. 본 논문에서는 수중에서 일반적으로 적용하고 있는 청색 파장(450nm)을 고려하였으며, pure water를 제외한 다섯 가지 분류의 K_d 에서 0.01~0.3까지 거리에 따라 성능 분석한 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5는 그림 2의 모델에서 LDPC 복호 후 오류를 정정한 결과를 감쇠 및 거리 별로 성능을 나타내었다. 수중에서의 음성 및 영상 데이터의 오류율은 10^{-3} 을 기준으로 하고 있어 거리가 탁도에 따라 다르지만 pure water에서는 약 100m까지 가능하며 본 논문에서 기준으로 하는 청색 파장에서 K_d 는 0.1이 최고값이므로 약 10m까지는 가능함을 알 수 있다[1].

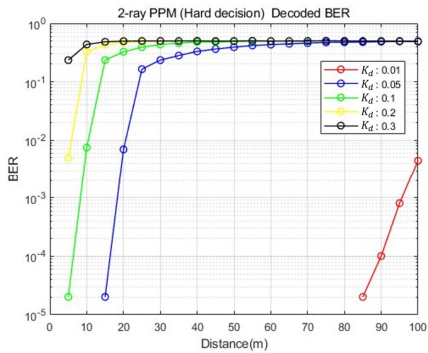


그림 5. 거리 및 감쇠 계수에 따른 성능
Fig. 5. Performance based on distance and attenuation coefficient

4. TDoA 기반 거리 추정 알고리즘 및 오차 분석

3장에서 제시된 국내의 해양 환경에서의 광전송 거리는 10m 이내이며, 이를 음향 신호를 이용하여 거리 추정하는 방식을 본 절에서 논한다. 본 절에서는 그림 1의 시스템 모델에서 광전송 가능 거리를 탐지하기 위한 음원의 위치를 추적하기 위한 개요도는 그림 6과 같다. 그림에서 왼쪽의 배 모형은 정지상태의 음원 송신부인 기지국을 의미하며, 이의 위치 좌표는 센서에서 추정하는 음원의 좌표 $P_s = \{x_s, y_s, z_s\}$ 라 두고 음원 주위의 구체 모형은 광 통신 가능 거리인 10m의 영역을 나타낸다. 오른쪽 이동체 주변의 노란색 점은 세 개의 수신 센서를 의미하며, i 번째 센서의 3차원 좌표를 $P_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ 라 두며, 이는 음원까지의 거리, 음원과의 수심 차이 그리고 수심을 나타내는 3차원 좌표이다. 빨간색 화살표는 이동체의 운동 시나리오를 의미하며, 빨간색 선의 시작 위치는 이동체의 초기 위치인 100m에서 10m로 이동하면서 거리를 추정한다. 음원의 센서 위치는 초기에 $P_s = \{0, 0, 0\}$ 을 할당하며, 본 논문에서는 직선 등속 운동 시나리오를 고려하였다. 거리 추정 알고리즘은 TDoA 알고리즘을 적용하였으며, 각 수신기에 도착하는

신호의 도착 시간 차이인 상대적 시간 지연 값을 기반으로 작동하며, 이 값을 사용하여 신호원의 위치를 추정한다. ToA와 달리, TDoA는 각 수신기 간의 상대적인 시간 차이만이 필요하므로 기지국과의 동기화가 필요하지 않다. 대부분의 연구에서는 송수신간의 시간 동기화가 필요하지 않는 TDoA 알고리즘을 적용시키며, 본 논문에서도 TDoA 알고리즘에 대해 거리 추정 방식에 대해 논한다. 이동체에 부착된 센서는 3개로 간주하였으며, 기지국은 1초를 주기로 0.2초 길이의 LFM 음향 신호를 송신한다.

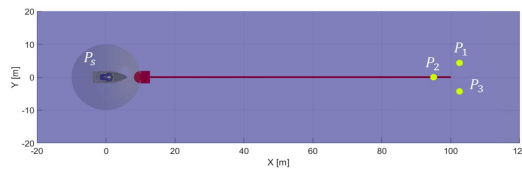
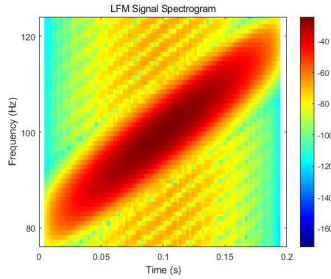


그림 6. 음원 거리 추정 모델
Fig. 6. Sound source distance estimation model

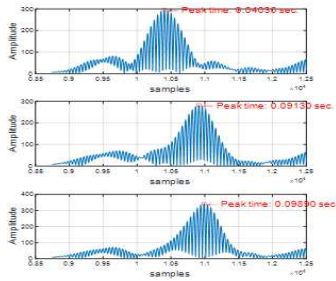
LFM 신호는 시간에 따라 주파수가 증가하는 Blackman 윈도우를 적용하였다. 각 센서에서는 수신 LFM 신호에 대한 상관 특성을 이용하여 최대치를 가지는 시간을 통해 시간 지연 값을 획득한다. 그림 7(a)는 송신부에서 전송하는 LFM 신호이며 이는 송수신자가 서로 알고 있는 음원 데이터이다. 그림 7(b)는 세 개의 센서에서 수신된 LFM 신호를 correlation 하였을 때, 상관도를 나타내며, 최대치가 도달한 신호의 시간이다. 세 개의 센서가 위치가 다르게 있으므로 도달하는 시간 또한 다르다. 이때 센서의 개수만큼 방정식이 주어지며, TDoA 알고리즘에서 3차원 좌표에 해당하는 3개의 해를 구하게 된다. 선택된 센서 조합 i 번째 센서와 j 번째 센서의 상대적 시간 지연 값을 d_{ij} 라고 했을 때, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{ij} = t_i - t_j \quad (2)$$

t_i 는 그림 7의 i 번째 센서에서 최대치의 시간 값이다.



(a) LFM 신호의 시간-주파수 영역
(a) Time-frequency domain of a LFM signal



(b) 수신 LFM 신호의 상관특성
(b) Correlation characteristics of received LFM signals

그림 7. 송수신 LFM 신호
Fig. 7. Transmitted and received LFM signal

$$\sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2 + (z_s - z_i)^2} - \sqrt{(x_s - x_j)^2 + (y_s - y_j)^2 + (z_s - z_j)^2} = c \cdot d_{ij} \quad (3)$$

식 (3)은 i, j 번째 센서 조합에 대한 방정식을 나타낸다. 여기서 c 는 수중에서 음파의 속도를 나타내며, $c = 1500 \text{ m/s}$ 이다. 세 방정식에 대한 교점, 곧 해는 존재하지 않으며, 따라서 각 방정식에 대하여 최소의 오차를 보이는 음원의 위치를 추정하여야 한다. 최소 제곱 해법을 사용하여 위치를 추정하며, 다음과 같은 과정을 통하여 이루어진다. 3차원 좌표계에서 각 센서의 위치를 나타내는 점 P_i 와 점 P_j 에 대하여 두 점의 차이를 $|P_i - P_j|$ 와 같이 나타낼 때 식 (3)은 식 (4)

과 같이 표현할 수 있다.

$$|P_s - P_i| - |P_s - P_j| = c \cdot d_{ij} \quad (4)$$

식 (4)의 양 변을 제곱하면 식 (5)과 같다.

$$|P_s - P_i|^2 - 2|P_s - P_j| \cdot |P_s - P_i| + |P_s - P_j|^2 = c^2 \cdot d_{ij}^2 \quad (5)$$

$-2|P_s - P_j| \cdot |P_s - P_i|$ 항과 같은 비선형 항에 대하여 가우스-뉴턴 방정식 기반 최적화 알고리즘을 적용하여 최소 제곱 해법을 사용하였다[5]. 최적화 알고리즘은 반복 계산을 통하여 최소 제곱 값을 가지는 비선형 항의 값을 추정하며, 송신기 추정 위치 P_s 에 대해 위치를 추정한다.

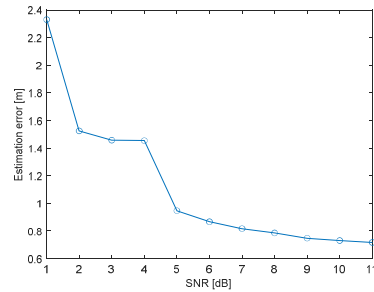


그림 8. 송신 전력에 따른 거리 오차
Fig. 8. Distance error based on transmission power

그림 8은 거리 50m에서 SNR(Signal to Noise Ratio)에 따른 거리 오차를 나타낸다. 송신 전력이 높을수록 거리 오차는 줄어들음을 알 수 있으며, 그림 9는 SNR = -5 dB에서 센서가 3개일 때와 4개일 때 추정 거리를 나타낸다. 그림 9는 직선 운동 시나리오에서는 초기 위치 100m에서 최종 위치 센서 음원과 5m 거리로 100초간 직선 운동하면서 거리 추정 오차를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타내는 검은 원은 송신부 추정 위치를 고려한 상대적인 이동체의 위치를 나타낸 것이다.

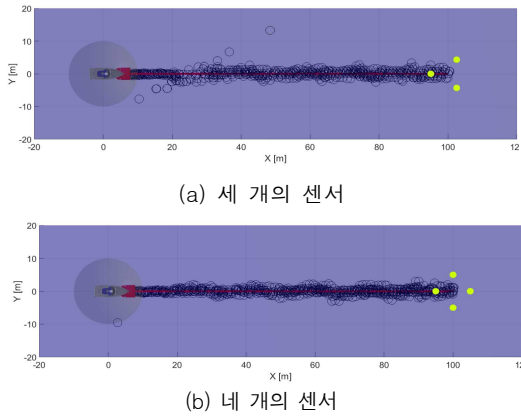


그림 9. 센서 수에 따른 음원 거리 추정 성능
Fig. 9. Sound source distance estimation performance based on the number of sensors

센서가 3개일 경우 24m 근처의 위치에서 추정 정확도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 음원 추정이 불가능한 위치에 3개의 수신 센서가 배치되어 있기 때문이다. 따라서 센서는 모든 위치에 대하여 음원을 추정할 수 있는 위치로 선정하여야 하며, 3차원 좌표상에서 3개의 센서로 모든 위치의 음원을 추적 가능한 최적의 센서 배치는 존재하지 않는다. 이는 식 (5)의 비선형 방정식에서 증근이 발생할 수 있는 위치에 음원이 존재할 때, 방정식의 개수와 구하고자 하는 해의 개수가 동일하면 추정하지 못하는 문제이다. 따라서 추가적인 센서를 배치하여 센서가 네 개 이상 존재할 때, 모든 음원 위치에 대하여 추정할 수 있다. 그림 9(a)와 그림 9(b)에는 각각 센서가 3개일 때와 센서가 4개일 때 거리 추정 성능을 나타내었다. 그림 9(a)와 비교해 보면 그림 9(b)는 가까운 거리에서 올바르게 추정이 됨을 알 수 있다. 그림 10은 그림 9의 음원 거리 추정 오차를 나타낸 그림이다. 센서가 4개일 때 약 2m 이내의 추정 오차를 가짐을 알 수 있으며 안정적인 거리 추정을 할 수 있음을 알 수 있다.

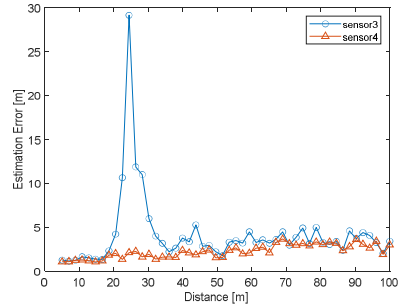


그림 10. 거리에 따른 추정 오차
Fig. 10. Estimation Error Based on Distance

5. 결론

수중에서는 전송률이 낮고 장거리 전송이 가능한 음파, 거리는 짧으나 광대역 대용량 전송이 가능한 광 통신의 장점을 이용하여 장거리에서는 음파 통신, 단거리에서는 광 통신을 적용하는 하이브리드 모델이 제시되고 있으며, 본 논문에서는 이러한 하이브리드 모델에서 수중에서 광 전송 가능 거리, 이에 따른 음파를 이용한 거리 추정 방식을 제시하였다. 광 전송 모델에서 해양에서의 탁도를 고려할 때 약 10m 이내의 거리에서 광 전송이 가능함을 알 수 있으며, TDoA 기법을 이용한 음원 추정 알고리즘에서 센서가 4개일 때 안정적으로 추정함을 알 수 있다. 본 논문에서 제시하는 광 음파 하이브리드 모델은 수중 통신의 시공간적 변동성으로 인한 통신 한계를 극복하고, 다양한 수중 환경에서의 안정적인 데이터 전송을 가능하게 하며, 해양 탐사 및 모니터링 등의 다양한 분야에 적용될 수 있어 광 전송 성능, 거리 추정은 국내에서 향후 적용하기 위한 중요한 표본이 될 수 있으리라 사료된다.

REFERENCES

[1] M. Z. Chowdhury, Moh. K. Hasan, Md. Shahjalal, Md. T. Hossan, and Y. M. Jang, "Optical Wireless Hybrid Networks: Trends, Opportunities, Challenges, and Research

Directions,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 2. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 930-966, 2020.

[2] Y. Hong, H. Jeong, and J. Jung, “Experiment Results Analysis of LDPC Coded N-Repetition Codes in Underwater LED Optical Communications,” The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, vol. 48, no. 10. Korea Information and Communications Society, pp. 1223-1226, 31-Oct-2023.

[3] S. Li, H. Sun, and H. Esmail, “Underwater TDoA Acoustical Location Based on Majorization-Minimization Optimization,” Sensors, vol. 20, no. 16. MDPI AG, p. 4457, 10-Aug-2020.

[4] B. Neuner, B. M. Pascoguin, A. Hening, and B. Dick, “Deployable wavelength optimization for free-space communication undersea,” OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, vol. 9224. IEEE, pp. 1-5, Sep-2016.

[5] H. Mohammad and S. A. Santos, “A structured diagonal Hessian approximation method with evaluation complexity analysis for nonlinear least squares,” Computational and Applied Mathematics, vol. 37, no. 5. Springer Science and Business Media LLC, pp. 6619-6653, 31-Aug-2018.

저자약력

홍 예 권 (Ye-Gwon Hong)

[준회원]



- 2023.02: 한국해양대학교 전파공학과 공학사 취득
- 2023.03 ~ 현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정

〈관심분야〉 위성통신, 수중통신, 광통신, 채널 코딩, 신호처리

정 현 우 (Hyun-Woo Jeong)

[정회원]



- 2020.08: 한국해양대학교 전파공학과 공학사 취득
- 2022.02: 한국해양대학교 전파공학과 석사 취득
- 2022.03 ~ 현재: 한국해양대학교 전파공학과 박사과정

〈관심분야〉 위성통신, 수중통신, 광통신, 채널 코딩, 신호처리

이 재 훈 (Jae-Hun Lee)

[준회원]



- 2024.02: 한국해양대학교 전파공학과 공학사 취득
- 2024.03 ~ 현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정

〈관심분야〉 위성통신, 수중통신, 광통신, 채널 코딩, 신호처리

정 지 원 (Ji-Won Jung)

[정회원]



- 1995.02: 성균관대학교 통신공학과 박사 취득
- 1991 ~ 1992: LG 정보통신 연구소 연구원
- 1995 ~ 1996: 한국통신 위성통신연구소 선임연구원
- 1997 ~ 1998: 한국전자 통신연구원 위성단 초빙연구원
- 2001 ~ 2002: 캐나다 CRC(Communication Research Center) NSERC Fellowship(국외 초청연구원)
- 1996 ~ 현재: 한국해양대학교 전파공학전공 교수

〈관심분야〉 위성통신, 수중통신, 광통신, 채널 부호화 및 모뎀, FPGA 설계