

# 수중 LED 광통신에서 LDPC 부호화된 N-repetition 부호의 실험결과 분석

홍예권\*, 정현우\*, 정지원<sup>o</sup>

## Experiment Results Analysis of LDPC Coded N-Repetition Codes in Underwater LED Optical Communications

Ye-gwon Hong\*, Hyun-woo Jeong\*, Ji-won Jung<sup>o</sup>

### 요약

본 레터에서는 수중 매질에 의한 흡수 산란 등으로 거리에 따른 성능 열화를 극복하기 위해  $N$ -repetition 부호를 내부 부호로, LDPC 부호를 외부 부호로 사용하는 연판정 연접 부호를 적용하는 수중 광통신의 송수신 시스템 구성을 제안하였다. 제안된 모델은 탁도가 존재하는 바다의 수중에서 실험을 수행하였으며, 기존 방식과 성능 비교를 하였다.

**Key Words** : underwater optical wireless communications, LDPC, repetition code, soft decision.

### ABSTRACT

In order to overcome performance loss due to absorption and scattering in under optical channel, this letter proposed soft decision concatenated underwater optical transceiver model which employs LDPC codes as outer code and  $N$ -repetition codes

as inner code. The proposed model was tested in turbid coastal water, we analyzed error performance of proposed model compared to conventional methods.

### I. 서론

수중 광통신에서는 수중 매질에 의한 흡수 및 산란으로 인하여 전송 거리에 따른 손실이 매우 크므로 전송 거리 확장에 따른 수신 SNR(Signal to Noise Ratio)이 낮아져 통신의 신뢰성이 떨어진다. 이러한 수중 광 통신 환경에서 신뢰성 향상을 위해 채널 부호화 기법의 적용이 필수적이며, 광 통신의 전송 속도를 지원할 수 있는 convolutional 부호<sup>[1]</sup>와 LDPC(Low Density Parity Check)<sup>[2]</sup> 부호가 주로 적용되어 왔다. 또한 광신호의 빠른 전송 속도라는 특징을 이용하여, 동일한 데이터를  $N$ 번 반복하여 전송하는  $N$ -repetition 부호의 적용이 대두되었으며<sup>[3]</sup>, 참고 문헌[4]에서는 수중 광통신에서 적용될 수 있는 여러 채널 부호화 알고리즘을 제시하였으며, 최근에는 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기반의 LDPC 부호화 알고리즘이 적용되고 있다<sup>[5]</sup>. 그러나 대부분의 논문은 시뮬레이션 기반 성능 분석을 하였으며, 실제 해양 환경에서의 수중 광 전송 거리를 확장하기에는 여전히 성능을 보장하지 못한다는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 본 레터에서는  $N$ -repetition 부호를 내부 부호로, LDPC(Low Density Parity Check) 부호를 외부 부호로 사용하는 연접 부호를 적용하는 수중 광통신의 송수신 시스템 구성을 제안한다. 제안된 시스템을 실제 수중 환경에서 실험하여 기존의 방식과 거리 별 성능 비교 분석 하였다.

### II. 수중 광통신 시스템 모델

그림 1은 송수신 시스템 블록도를 나타낸다.  $r$ 의 부호화율을 가지는 LDPC 부호화기는  $k$  길이의 송신 메시지 비트열  $M$ 을 입력받아  $k/r$  길이의 심볼열  $C$ 를

\* 본 결과물은 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다.

• First Author : (0009-0003-1354-3709) Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, cl170625@g.kmou.ac.kr, 학생(석사), 정회원

o Corresponding Author : (0000-0002-9467-2478) Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, jwjung@kmou.ac.kr, 정교수, 정회원

\* (0000-0002-4955-2856) Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, gusdn0930@g.kmou.ac.kr, 학생(박사)

논문번호 : 202308-036-A-LU, Received August 4, 2023; Revised August 14, 2023; Accepted August 14, 2023

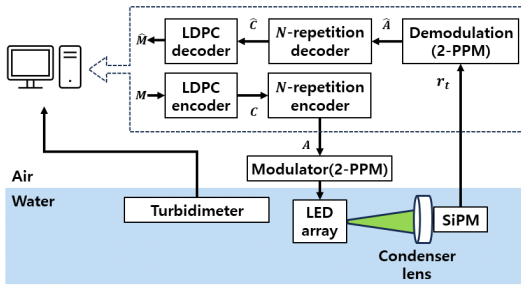


그림 1. 수중 무선 광통신 블록도  
Fig. 1. Communication system block diagram

출력한다.  $N$ -repetition 부호화기는  $C$ 를 심볼마다  $N$ 번 반복하여  $Nk/r$  길이의 송신 비트열  $A$ 를 출력한다. 출력된 비트열은 펄스의 위치에 따라 “0”과 “1”을 판정하는 2-PPM(Pulse Position Modulation) 방식을 변조 방식으로 적용하였으며,  $t$  시점에서의 수신신호는 식(1)과 같다.  $x_t$ 는 2-PPM 변조된 송신 신호,  $R$ 은 송수신 거리,  $k_a$ 는 흡수 및 산란 등으로 인한 감쇠 계수를 나타내며,  $n_t$ 는 가우시안 잡음을 나타낸다.

$$r_t = x_t e^{-k_a R} + n_t \quad (1)$$

수신 신호  $r_t$ 의 집합을 변조 심볼마다 구분지어  $\mathbf{r} = \{r_{1,1}, r_{1,2}, r_{1,3}, \dots, r_{Nk/r, N_s}\}$ 과 같이 나타낼 수 있다.  $r_{j,k}$ 는  $j$ 번째 변조 심볼의  $k$ 번째 샘플을 나타낸다.  $N_s$ 는 2-PPM 변조 시 심볼당 샘플 수이다. 2-PPM 복조 방식은 각 심볼마다 펄스가 처음 절반의 샘플 ( $1 \sim N_s/2$ )에 존재 시 “1”로 복조하며, 나머지 샘플 ( $(N_s/2) + 1 \sim N_s$ )에 존재 시 “-1”으로 복조한다. 복조 후의 심볼열  $\hat{A}$ 는 그림 2의 심볼열  $\hat{B}$ 와 같이  $N$ -repetition 복호를 위해  $N$ 개의 심볼마다 열을 나누어

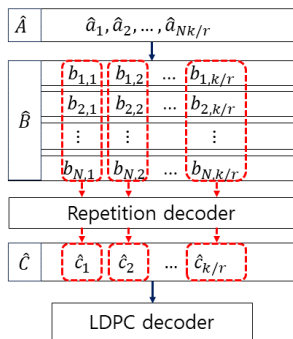


그림 2. N-repetition 복호 블록도  
Fig. 2. N-repetition decoding block diagram

배치한다.  $\hat{B}$ 행렬의  $b_{i,j}$ 는  $j$ 번째 심볼의  $i$ 번째 복조 심볼을 의미하며,  $N$ -repetition 부호의 복호 방식인 MV(Majority Voting) 알고리즘을 이용하여 복호한다. MV 방식은  $\hat{B}$ 의 각 열에서 강판정된 심볼의 대다수를 차지하는 심볼로 복호하는데, 따라서 “-1”과 “1”의 개수를 구하여 많은 개수로 복호된 심볼의 집합  $\hat{C}$ 를 LDPC 복호기로 입력하여 외부부호 복호를 행한다.

LDPC 복호는 입력 심볼의 체크 노드 확률과 비트 노드 확률 간의 반복계산을 통하여 성능이 향상되는데, 입력 심볼의 형태가 연관정 값일 때, 강판정 값의 경우에 비하여 성능 개선이 효과적이다. 따라서 본 레터에서는 식 (2)과 같은 2-PPM의 연관정 복조 방식과 식 (3)의 LLR 계산을 통한 식 (4)와 같은 연관정  $N$ -repetition 복호 방식을 제안하여 LDPC 복호기의 입력 심볼로 연관정 값을 입력하도록 하였다.

$$\hat{a}_j = \left\{ \sum_{k=1}^{N_s/2} |r_{j,k}|^2 - \sum_{k=N_s/2+1}^{N_s} |r_{j,k}|^2 \right\} / (N_s/2) \quad (2)$$

$$p_{d,i,j} = \exp\left(-\frac{(b_{i,j} - d)^2}{\sigma^2}\right) / \sqrt{2\pi\sigma^2} \quad (3)$$

$$\hat{c}_j = \sum_{i=1}^N p_{-1,i,j} / \sum_{i=1}^N p_{1,i,j} \quad (4)$$

2-PPM 복조 시 각 심볼에서 처음 절반의 샘플의 평균 에너지와 나머지 샘플의 평균 에너지 차로 연관정 복조 값을 구하여 이를  $N$ -repetition 복호단에 입력한다.  $N$ -repetition 연관정 복호 방식은  $b_{i,j}$ 가 비트  $d$ (=  $\pm 1$ )일 LLR(Log Likelihood Ratio)확률  $p_{d,i,j}$ 를 식 (3)과 같이 구하여,  $N$ -repetition 복호기 출력  $\hat{c}_j$ 를 식 (4)과 같이 나타낸다.  $\sigma$ 는 잡음의 표준편차이다.

### III. 연안 해상실험 결과

2장에서 살펴본 내용을 기반으로 본 레터에서는 부산 연안에서 해상 실험을 하여 성능을 비교 분석하였다. LDPC 부호화 기법은 IEEE 802.11n 표준에 제시된 1944의 블록 길이 및 부호화율 1/2를 갖는 LDPC 부호를 사용하였다<sup>[2]</sup>. LDPC와 동일한 조건에서 비교 분석을 하기 위해 동일한 부호어 사이즈와 부호화 율을 가지는 구축장 수가 7인 convolutional 부호화 기법 또한 적용하였다. convolutional 부호의 복호 방식은 BCJR 복호기를 사용하였으며, repetition 부호가 적용되지 않

있을 때 각 부호화 방식의 복호기 입력은 강판정 복조 심볼이다. 변조 방식은 2-PPM 방식이며, repetition 부호의 반복 횟수인  $N$ 은 3, 5로 고정하여 실험하였으며, 변조 심볼당 샘플 수  $N_s$ 는 50으로 하였다. 해양 실험 환경으로는 광원으로 콜리메이트 렌즈가 장착된 녹색 LED를 사용하고 수신기에는 콘덴서 렌즈와 실리콘 광증배소자(silicon ohotomultiplier, SiPM)을 적용하였으며<sup>6)</sup>, LED 광신호의 정확한 송수신 점을 맞추기 위해 프레임으로 만든 구조물에 송수신기를 고정시켜 실험하였다. 데이터 속도는 1Mbps로 고정하여 수십 m에서 송수신 거리를 5~9m로 변경하면서 실험을 하였다. 해수의 탁도는 탁도계를 이용하여 측정하였으며, 실험 당시 연안의 부유물로 인해 약 3.3~3.6 NTU (Nephelometry Turbidity Unit)의 탁도를 보였다. 거리별 수신된 2-PPM 신호의 eye pattern은 그림 3과 같다. 거리가 증가할 수록 수중에서의 흡수 손실로 인하여 낮은 SNR을 가지는 수신신호가 수신됨을 알 수 있으며, 거리 9m일 때는 수신신호 “0”과 “1”을 나타내는 심볼 분간이 거의 어려움을 알 수 있다.

실험은 convolutional 부호와 LDPC 부호의 단독으로 적용할 때와 본 레터에서 제안한 N-Repetition 부호와 연결한 방식에서 강판정인 경우와 연판정인 경우를 거리별 성능 비교 분석 하였다. 오류율을 분석하기 위한 데이터는 1944 비트의 부호화어를 5번 반복하여 전송하였다.  $N=1$ 인 경우 convolutional 및 LDPC 부호의 오류율은 5번 반복한 수신 데이터의 평균 복호 오류율을 나타내었으며,  $N$ 이 3, 5인 경우 1~ $N$ 번째 반복데이터를 사용한 강판정 및 연판정 repetition 복호 후 LDPC 복호 오류율을 나타내었다. 거리가 5m 및 7m에서는 수신 신호의 오류는 존재하나 복호 후 오류율은 모든 방식이 정정됨을 알 수 있다. 그림 3의 9m에서는 eye pattern을 보면 알 수 있듯이 수신 신호의 분간이 어려

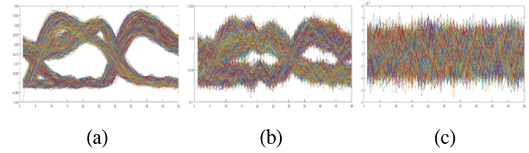


그림 3. 거리별 수신신호의 eye pattern, (a) R=5m (b) R=7m (c) R=9m  
 Fig. 3. Eye pattern of received signals for distances, (a) R=5m (b) R=7m (c) R=9m

우며, 기존 방식과 제안 방식의 강판정 경우 반복을 하였음에도 오류가 존재하나 식 (2)와 식 (4)을 적용한 연판정 기반의 제안 방식은 모두 오류가 정정됨을 알 수 있다.

#### IV. 결론

수중 광통신에서는 흡수, 산란 등으로 인하여 거리에 따라 낮은 SNR을 가지는 신호가 수신되며, 이를 보완하기 위해 본 레터에서는 N-repetition 부호와 LDPC 부호를 연결한 모델을 제안하였으며, 이를 녹색 LED를 이용하여 실제 연안에서 수중실험을 진행한 결과를 제시하였다. 거리가 증가할수록 본 레터에서 제안한 연판정 기반의 연결 모델이 우수한 성능을 가지고 있음을 확인하였다.

#### References

[1] C. Sanchez, B. Ortega, and J. Capmany, “OFDM - IDMA for uplink transmission in passive optical networks,” *IEEE Photonics J.*, vol. 4, no. 1, pp. 1-13, Feb. 2012. (<https://doi.org/10.1109/JPHOT.2011.2177450>)

[2] C.-U. Baek, A.-H. Lee, D.-H. Lee, and J.-W. Jung, “A soft decision decoding method of ldpc-coded m-ary pulse position modulated signals in underwater laser communication,” *J. KICS*, vol. 43, no. 11, pp. 1798-1801, Nov. 2018. (<https://doi.org/10.7840/kics.2018.43.11.1798>)

[3] M. Li and Y. Xiang, “A photon counting underwater noma wireless optical communication system,” *2019 7th ICICN, IEEE*, pp. 120-124, Macao, China, Apr. 2019. (<https://doi.org/10.1109/ICICN.2019.8834971>)

[4] P. A. Hoehner, J. Sticklus, and A. Harlakin, “Underwater optical wireless communications

표 1. 실험 결과 분석  
 Table 1. Analysis of experimental results

거리(m)		5	7	9
Convolutional 부호 오류율(%)		0	0	19
LDPC 부호 오류율(%)		0	0	20
제안 모델 + 강판정 오류율(%)	$N$	3	0	0
		5	0	0
제안 모델 + 연판정 오류율(%)	$N$	3	0	0
		5	0	0

in swarm robotics: A tutorial,” *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 23, no. 4, pp. 2630-2659, 2021.

(<https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3111984>)

- [5] J. Guo, et al., “Performance analysis of LDPC-Coded OFDM in underwater wireless optical communications,” *Photonics*, vol. 10, no. 3, p. 330, Mar. 2023.

(<https://doi.org/10.3390/photonics10030330>)

- [6] C. Youn, K. Lee, K. Kim, J. Kang, and H. Son, “Implementation of the underwater wireless optical communication system using green led array and silicon photomultiplier,” *J KICS*, vol. 47, no. 11, pp. 1895-1897, Nov. 2022.

(<https://doi.org/10.7840/kics.2022.47.11.1895>)