

비균일 심볼의 디밍 가시광통신을 위한 LLR 기반 터보 복호

김승현, 김정현, 류기훈, 한동헌*, 권재균#
영남대학교 전자공학과, *LIG 넥스원

tktekt0131@naver.com, acts000219@naver.com, rghun1004@gmail.com,
dongheon.han@lignex1.com, jack@yu.ac.kr

LLR-Based Turbo Decoding for Dimmable Visible Light Communications with Non-Uniform Symbols

Seung-hyun Kim, Jung-hyun Kim, Gi-hun Ryu, Dong-heon Han*, and Jae Kyun Kwon
Dept. of Electronic Engineering, Yeungnam Univ., *LIG Nex1

요 약

기존 채널 부호는 디밍 가시광통신에서 이론적인 성능 한계에 매우 못 미치는 성능을 보여준다. 본 논문은 이를 해결하기 위해 기존 터보 부호에 디밍 부호화를 통해 비균일 출력을 생성하고, 복호단에서는 LLR 기반 변환을 통해 기존 터보 복호가 동작할 수 있게 한다. 제안한 LLR 변환 기반 복호 방식은 이전 컨벌루션 부호 기반 방식[1]에 비해 1.0dB 우수한 성능을 보인다.

I. 서 론

가시광통신(VLC; visible light communication)은 조명을 주 기능으로, 통신을 부 기능으로 가진다. OOK(on-off keying) 변조 방식을 사용할 때, 심볼 '0'과 '1'의 확률은 반반인 것이 일반적이므로 평균 세기는 최대값의 50%가 되지만, 실제 조명 응용에서는 사용자가 지정한 디밍(dimming) 비율을 만족해야 하므로 이를 위한 다양한 방법이 제안되어 왔다[2]. 그 중 심볼 0 과 1 의 출현 비율을 조절하는 접근이 효과적이지만, 이 때 채널 부호 성능은 이론적 한계 성능과 큰 차이를 보인다[3]. 본 연구는 디밍 가시광통신에서 0/1 비율이 50%가 아닐 때의 채널 부호 성능 개선을 위해 터보 부호(turbo code)를 이용한다. 구체적으로 인코딩 단계에 디밍 인코더를 추가해 목표 디밍을 만족시키고, 디코딩 단계에서 먼저 LLR (log-likelihood ratio) 계산을 포함하는 터보 복호 과정을 적용한다.

II. 제안하는 방식

2.1 인코딩 방식

기본 터보 인코더는 2 개의 동일한 RSC 인코더와 인터리버를 포함하는 일반적인 방식을 사용하는데, 각 RSC 인코더는 각각 출력 x_1, z_1 과 x_2, z_2 를 가진다. 여기서 systematic bit 인 x_2 를 제거하지 않고 4 개 모두를 사용하기로 한다. 이렇게 얻은 비트 쌍 $(x_1, z_1), (x_2, z_2)$ 은 디밍 $d=0.25$ 를 만족시키기 위해 각각 4 비트로 맵핑되어 전송된다. 비트 쌍은 00/01/10/11 4 가지 상태(state)를

가지며 이는 각각 0001/0010/0100/1000 로 바뀌게 된다. 그 결과 정보 비트 한 비트당 4 비트의 터보 인코더 출력이 나오고, 4 비트 중 2 비트씩 각각 4 비트로 디밍 인코딩 되므로 총 8 비트가 되어, 최종 부호율은 1/8 이다. 광통신 신호는 non-negative 이나, 터보 디코딩에서는 unipolar 보다 polar 방식이 편리하므로, SNR 에 대해 충분히 고려한 다음 0/1 을 $-1/+1$ 로 바꾸어 생각한다. 그러면 디밍 인코딩 후 송신 심볼 벡터 s 는 식(1)과 같으며, 항상 동일한 심볼 에너지를 가진다.

$$\begin{aligned} 00 \rightarrow s &= (-1, -1, -1, +1), \\ 01 \rightarrow s &= (-1, -1, +1, -1), \\ 10 \rightarrow s &= (-1, +1, -1, -1), \\ 11 \rightarrow s &= (+1, -1, -1, -1) \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 디코딩 방식

가우시안 잡음 채널을 지나 수신한 값을 y 라고 하자. 수신 벡터 $y = (y_1, y_2, y_3, y_4)$ 는 식(2)와 같다.

$$y = s + w \quad (2)$$

w 는 가우시안 잡음 벡터로 각 원소가 독립이고 각 원소의 평균은 0 이며 분산이 σ^2 이다. 따라서 조건부 확률은 식(3)과 같다.

$$p(y|s) \propto \exp\left(-\frac{\|y - s\|^2}{2\sigma^2}\right) = c(y) \exp\left(\frac{y \cdot s}{\sigma^2}\right) \quad (3)$$

비트 쌍 (x_1, z_1) 또는 (x_2, z_2) 를 (b_1, b_2) 라고 하자. 각 비트 b_i 의 LLR 은 식(4)와 같다.

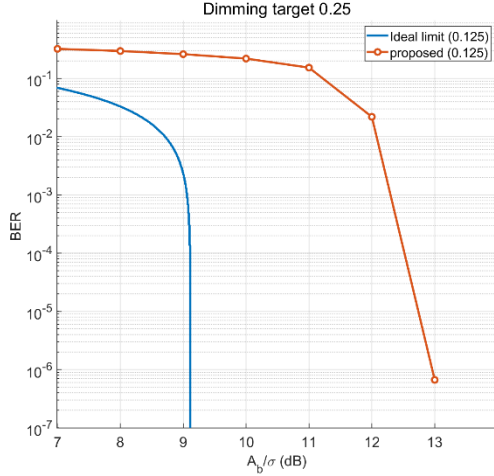


그림 1 LLR 변환 방식의 에러 성능

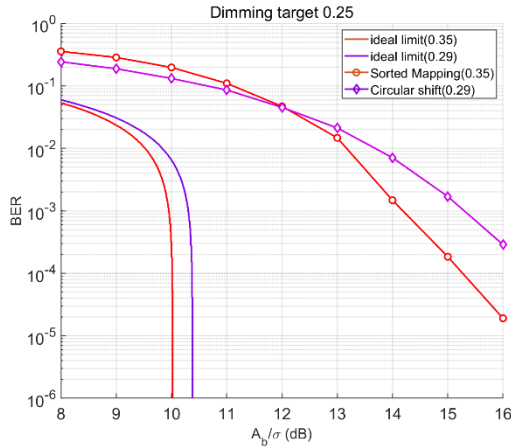


그림 2 Convolutional code 방식의 에러 성능 [1]

$$L(b_i) = \ln \frac{P(y|b_i = 1)}{P(y|b_i = 0)} = \ln \frac{\sum_{S \in S_{b_i=1}} \exp\left(\frac{y \cdot S}{\sigma^2}\right)}{\sum_{S \in S_{b_i=0}} \exp\left(\frac{y \cdot S}{\sigma^2}\right)} \quad (4)$$

여기서 $S_{b_i=1}$, $S_{b_i=0}$ 는 수식(1)의 매핑에서 해당 비트가 1 또는 0이 되는 심볼의 집합이다. 예를 들어 두 비트 중 앞 비트인 b_1 에 대해 생각하여 보면, b_1 이 1인 경우 디밍 인코딩 전 심볼은 11 또는 10, 0인 경우 01 또는 00이다. 이후 계산 복잡도를 줄이기 위해 LLR의 log-sum-exp를 max-log로 근사하면 b_1, b_2 의 LLR에 대한 식(5)와 식(6)을 얻을 수 있다.

$$L(b_1) \approx \frac{2}{\sigma^2} (\max(y_1, y_2) - \max(y_3, y_4)) \quad (5)$$

$$L(b_2) \approx \frac{2}{\sigma^2} (\max(y_1, y_3) - \max(y_2, y_4)) \quad (6)$$

식(5), (6)을 통해 4비트로 맵핑되었던 비트를 다시 2비트로 복구할 수 있다. 얻은 비트는 (x_1, z_1) , (x_2, z_2) 에 대해 동일하게 계산이 가능하며 이를 이용하여 터보 디코딩을 수행한다. 그 결과, 기본 부호율 $R=1/8$ 이며 디밍 $d=0.25$ 인 LLR 변환을 이용한 디밍 가능 터보 부호가 된다.

III. 성능 결과

먼저 LLR 변환 방식의 결과는 그림 1과 같다. 파라미터는 디밍 $d=0.25$, 정보 길이 $k=2048$, 최종 부호율 $R=0.125$ 이다. 그림에서 가로축 파라미터는 채널의 품질로, 기존 무선 통신에서 일반적인 E_b/N_0 가 아닌, 디밍 가시광통신에 적합한 A_b/σ [4]이다. 그림 1의

왼쪽 곡선은 이론적인 성능 한계[3]이며 오른쪽 곡선은 제안하는 LLR 변환 방식으로 8번 반복 디코딩한 결과이다. 범례에서 괄호 안은 부호율을 의미한다. 비트에러율(BER) 10^{-3} 기준으로 제안 방식은 성능 한계에 비해 3.24dB 부족하다. 그림 2는 기존 방식인 convolutional code 기반의 Sorted Mapping 방식과 Circular Shift 방식 결과[1]이다. 비트에러율(BER) 10^{-3} 기준으로 각 방식은 왼쪽의 이론 성능 한계에 비해 각각 4.24dB, 5dB 부족하다. 이 수치로 비교해보면, 제안하는 LLR 변환 방식은 기존 Sorted Mapping 방식에 비해 1.0dB 우수하다고 볼 수 있다.

IV. 결론

본 논문은 터보 코드를 이용한 디밍 가시광통신에서 오류 정정 성능을 확보하기 위해 LLR 변환 방식을 제안하였다. 수식(1)과 같은 방식으로 심볼 에너지를 균등화하여 간단한 최대값 연산만으로 계산이 가능하였으며 반복 디코딩을 통해 오류 성능을 향상시켰다. 결과적으로 기존 Sorted Mapping 대비 1.0dB의 이득을 보였으며, 이론적 한계 대비 3.24dB의 차이를 보였다. 이는 LLR 변환 방식이 디밍 제약 하에서도 효율적으로 비교적 좋은 성능을 낸다는 점을 보여준다. 하지만 이론적 한계 성능과 차이가 크기 때문에 더 개선할 여지가 많이 남아있다. 또한 본문에서는 x_1, x_2, z_1, z_2 전부를 전송하였으나 표준 터보 부호 구조는 x_1, z_1, z_2 만 전송한다는 점에서 재설계를 통한 개선 가능성이 남아 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임

(No. 2017R1D1A3B05032756).

(#) 교신저자.

참고 문헌

- [1] 임효석, 한동현, 박정석, 조재상, 권재균, “디밍 가시광통신을 위한 비균일 이진 출력의 컨벌루션 부호,” 한국통신학회 추계종합학술발표회, 경주, 대한민국, 24B-P-4, Nov. 2024.
- [2] S. H. Lee, S.-Y. Jung, and J. K. Kwon, “Modulation and coding for dimmable visible light communication,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 2, pp. 136–143, Feb. 2015.
- [3] S. H. Lee, M. Zhang, and J. K. Kwon, “Bit error probability performance of binary dimmable visible light communication systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 9, pp. 9118–9131, Sep. 2021.
- [4] S. H. Lee and J. K. Kwon, “On signal quality measures in dimmable visible light communications: definitions and conversions,” *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 10, no. 10, pp. 2220–2224, Oct. 2021.