

VPPM 가시광통신에서 디밍에 따른 성능 보상

김정수*, 박인규*, 응웬 뒤 통*, 박영일*

Performance Compensation for Dimming of VPPM-Based Visible Light Communications

Jeongsu Kim*, Ingyu Park*, Duy Thong Nguyen*, Youngil Park*

요약

LED 조명의 디밍과 통신을 동시에 가능하게 하는 VPPM 변조방식은 밝기가 50%에서 멀어질수록 성능이 저하되는 특성이 있으며, 이는 LED 조명의 디밍에 따라 전송 가능한 거리 범위가 달라지는 문제를 일으킨다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 밝기에 따라 전송속도를 변화함으로써 밝기 변화에 따른 비트오율 변화를 최소화 하는 방식을 연구하였다. 또한 해밍코딩을 적용함으로써 열악한 환경에서의 성능 저하를 줄였다. 수신기에서는 입력 신호의 밝기를 실시간으로 측정하고, 이에 대응한 상관마스크를 생성함으로써 밝기와 전송속도가 실시간 변화 하더라도 동일 거리에서 안정적으로 데이터를 수신할 수 있도록 하였다.

Key Words : VPPM, Dimming, Hamming Coding, Correlation Receiver, Rolling Shutter

ABSTRACT

The VPPM modulation scheme, which is developed for LED data transmission while dimming, has a problem that its performance is degraded when the brightness deviates from 50%. Therefore, the possible transmission distance varies with dimming. In this paper, a variable data rate on dimming is proposed to minimize the performance variation. In addition, Hamming coding is applied to reduce the performance degradation. At the receiver side, the dimming level of input signal is measured in real time, and the corresponding correlation mask is generated to cope with the varying brightness and transmission rate.

1. 서론

LED 조명을 무선통신 광원으로 사용하는 통신기술인 가시광통신(Visible Light Communication)에서는 다양한 변조방식을 표준화에 반영하고 있는데, 그중 VPPM (Variable Pulse Position Modulation) 변조 방식은 아래 그림과 같이 비트 주기 내에서 신호 0과 신호 1의 위치를 다르게 하되 밝기에 따라 펄스의 폭을 변화함으로써, LED 조명의 디밍과 통신을 동시에

가능하도록 하는 방식이다^{1,2}. 그런데 VPPM 전송방식의 경우 50% 밝기, 즉 신호의 ON-OFF 길이가 동일할 경우에 통신성능이 가장 우수하고 이 차이가 커질수록 통신성능이 저하되는 문제점이 있다^{2,3}. 이는 밝기가 50%보다 줄어드는 경우 수신신호의 크기가 줄어들고, 밝기가 50%보다 큰 경우에는 신호 간섭이 커지기 때문이다. 가시광통신의 경우 천장에 설치된 LED 조명과 이동 중인 보행자와의 통신이 주요 적용 분야가 되고, 감성조명을 적용하는 경우 수시로 디밍

* 본 연구는 한국연구재단 기본연구지원사업(NRF-2015 RID1A1A01059416)의 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : School of Electrical Engineering, Kookmin University, jskkmu@gmail.com, 학생회원

◦ Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Kookmin University, ypark@kookmin.ac.kr, 중신회원

* Kookmin University

KICS2017-09-240, Received September 7, 2017; Revised November 4, 2017; Accepted November 6, 2017

이 달라질 수 있다. VPPM 전송과 함께 빠른 속도로 디밍을 하는 경우 데이터 손실을 최소화하는 수신 방식에 관한 연구는 있었으나^[4], 디밍에 따른 밝기 차이에 의한 통신 성능 차이 자체를 극복하는 방안에 대한 연구는 아직까지 없었다. 디밍과 상관없이 일정 거리에서는 어느 정도의 성능을 확보하기 위한 방법이 필요하며, 본 논문에서는 VPPM 신호의 밝기를 변화할 때 이에 대응하여 전송속도를 적절하게 변화하고, 또한 디밍으로 전송환경이 열악해 지더라도 성능을 어느 정도 유지하도록 해밍코딩을 적용함으로써 이 문제를 해결하는 것을 제안하였다. 해밍 코딩은 채널 코딩의 일종으로서 구현이 단순하며, 블록단위의 코딩을 하므로 빠른 조도변화에 쉽게 대처가 가능하므로 가시광통신에 적용하기에 좋은 방식이 될 수 있다. 제시한 알고리즘을 FPGA 보드에 구현하고 LED 램프를 이용한 테스트베드를 통해 성능을 확인하였다.

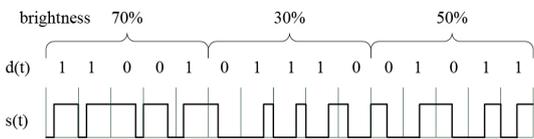


Fig. 1. VPPM-based data transmission

II. 가변 속도 VPPM 변조

VPPM 신호의 상관수신기는 아래 그림과 같이 신호의 밝기 측정, 상관마스크 생성, 그리고 데이터 복구의 세 블록으로 구성된다^[2]. 즉, 신호 밝기로부터 송신부 전송 신호 1과 0에 대응하는 상관마스크를 각각 생성하고, 이를 수신 신호와 동기를 맞추고 곱하여 적분한 후, 두 상관기 출력을 비교함으로써 데이터를 판단할 수 있다.

그런데 이 방식에서는 아래 식 (1)~(5)에서 확인할 수 있듯이 VPPM 신호의 밝기가 50%에서는 신호 0과 1이 서로 적교하지만, 밝기가 50%에서 멀어질수록

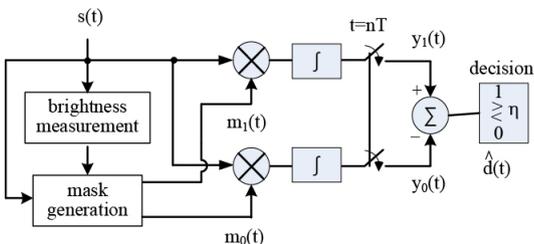


Fig. 2. VPPM detection using correlation receiver

두 신호는 간섭이 커지므로 전송성능이 나빠진다. 식 (1)~(2)에서 Y_1 은 신호 1 입력 시 마스크 1의 상관수신기에 의한 출력, Y_0 은 신호 0 입력 시 마스크 0의 상관수신기에 의한 출력을 각각 의미한다. 이 때 T_B 는 비트 주기, $s(t)$ 는 수신 신호, $M(t)$ 는 수신부 상관 마스크에 해당하며, b 는 한 주기에서 High가 차지하는 비율(0~1.0)로서 LED 밝기를 결정하고, A 는 VPPM 파형의 진폭을 의미한다. 또한 식 (3)에서 γ 는 입력된 신호가 다른 마스크에 의해 출력되는 상관값이며 이때의 상관계수(ρ)는 식 (4)와 같이 정의된다. 따라서 수식 (1)~(4)를 고려한 VPPM 비트오율은 식 (5)와 같이 정의된다. 식에서 N_0 는 수신기 백색잡음의 전력 스펙트럼 밀도 (PSD)를 의미한다.

$$Y_1(t) = \int_0^{T_B} s(t)M_1(t)dt = bA^2T_B \quad (1)$$

$$Y_0(t) = \int_0^{T_B} s(t)M_0(t)dt = bA^2T_B \quad (2)$$

$$\gamma = A^2\rho T_B \quad (3)$$

$$\rho = \begin{cases} 0 & \text{for } b \leq 0.5 \\ 2(b-0.5) & \text{for } 0.5 < b \leq 1.0 \end{cases} \quad (4)$$

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{Y_1 + Y_0 - 2\gamma}{2N_0}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{A^2(b-\rho)T_B}{N_0}}\right) \quad (5)$$

$$= \begin{cases} Q\left(\sqrt{\frac{A^2bT_B}{N_0}}\right) & \text{for } b \leq 0.5 \\ Q\left(\sqrt{\frac{A^2(1-b)T_B}{N_0}}\right) & \text{for } 0.5 < b \leq 1.0 \end{cases}$$

위 식에 따르면 밝기(b) 0.5에서 전송성능이 가장

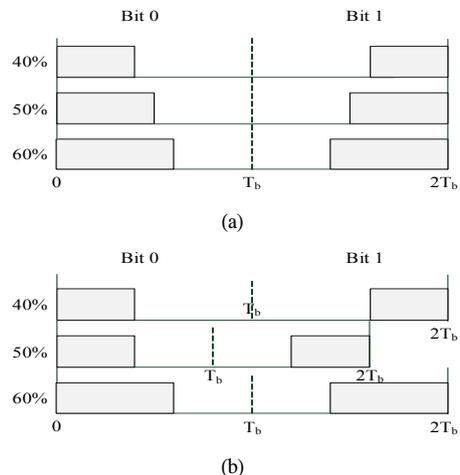


Fig. 3. VPPM format for different brightness (a) existing VPPM (b) variable-rate VPPM

우수하고, 이에서 멀어지면 성능이 점차 나빠짐을 알 수 있다. 또한 디밍에 의해 밝기가 변하더라도 이에 대응하여 T_B 를 조절함으로써 bT_B 혹은 $(1-b)T_B$ 값을 일정하게 한다면 밝기에 상관없이 성능을 일정하게 유지할 수 있음을 예측할 수 있다⁵⁾. 예를 들어 밝기가 50%에서 멀어지면 이에 비례하여 비트 주기를 길게 한다면 비록 전송 속도는 줄어들지만 비트 오류는 유지하기 때문에 전송거리 또한 유지할 수 있게 된다. 그림 3에서는 밝기가 변화할 때 기존 방식과 본 논문에서 제안하는 방식의 VPPM 신호 포맷을 비교하여 보이고 있다.

III. 해밍 코딩을 이용한 성능 개선

LED 조명의 디밍에 의해 광원이 어두워질 때 수신부의 SNR은 점차 나빠지며, 디밍에도 불구하고 일정 성능을 확보하기 위해서는 비트 오류를 보상할 수 있는 채널 코딩이 필요하다. 블록코딩, 컨벌루션 코딩 등 다양한 채널코딩을 고려할 수 있지만, 본 논문에서 제안한 가변속도 VPPM을 적용할 경우 조도 변화에 따라 송수신 클럭 속도가 변화하며, 이에 지연 없이 대응하기 위해서는 짧은 길이의 블록 코딩이 유리하다. 이를 고려하여 본 연구에서는 4비트의 정보 데이터에 3비트 부호어를 더함으로써 1개의 블록을 만들어 전송하는 (7,4) 해밍 코딩을 이용하였다⁶⁾. 이 경우 총 7비트로 구성된 블록에서는 2비트의 오류를 검출할 수 있고, 1비트의 오류를 수정할 수 있다. 따라서 7비트 블록 내에서 2비트 이상의 오류가 발생하는 경우 비트 오류를 일으키며, 이를 고려하면 AWGN 채널 환경에서 OOK 신호의 (7,4) 해밍코딩 전후의 비트오율은 각각 식 (6), (7)과 같이 나타낼 수 있다. 이 식에서 비트 에너지에 해당하는 E_b 값은 디밍에 따라 달라지며, 위 식 (5)에서 제시하는 비트 에너지가 적용된다.

$$P_b^{un} = Q\left(\sqrt{E_b / N_0}\right) \tag{6}$$

$$P_b^{coded} = \binom{6}{1} \left[Q\left(\sqrt{\frac{0.57 E_b}{N_0}}\right) \right]^2 \tag{7}$$

IV. 실험 환경 및 결과

위에서 제시한 가변속도 VPPM 및 해밍코딩 적용을 위해 아래 그림 4와 같은 실험 환경을 구성하였다.

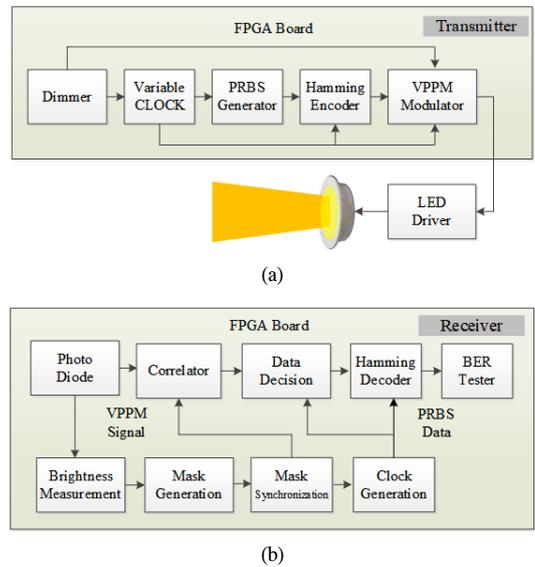


Fig. 4. Block diagram of variable-rate VPPM system (a) transmitter (b) receiver

즉, LED 송신부에서는 디밍에 따라 데이터 속도를 다르게 하여 PRBS (유사랜덤신호)를 발생하고, 이를 해밍 코딩한 후 VPPM 신호로 바꾼다. 이후 LED 구동회로를 거쳐 LED 조명을 변조하였다. 또한 수신부에서는 밝기를 측정하고 이에 대응하는 클럭 속도를 갖는 상관마스크를 생성하여 수신에 이용함으로써 데이터를 판단하며, 해밍 디코딩을 통해 최종 데이터를 복원하였다.

그림 5는 디밍과 상관없이 200 kbps 로 고정된 갖는 VPPM 방식을 이용해 전송을 하면서 거리에 따른 비트오율을 측정된 결과이다. 식 (5)의 분석과 같이 밝기가 50%에서 가장 좋은 전송 성능을 보이고 있으며, 50%에서 멀어질수록 거의 대칭적으로 성능이 나빠지는 현상을 확인할 수 있었다. 예로써, 전송거리 5미터에서 밝기를 50%로 하면 비트오율은 10^{-6} 정도인

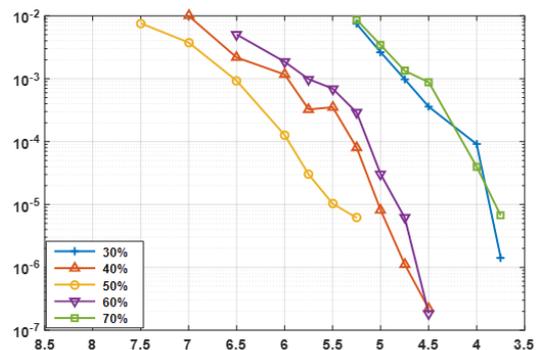


Fig. 5. BER measurement of fixed-rate VPPM

데, 밝기를 40% 혹은 60%로 변화하는 경우 비트오율은 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 정도로 나빠지는 것을 측정할 수 있었고, 밝기를 30% 혹은 70%로 변화하는 경우에는 비트오율 5×10^{-3} 정도로 더욱 나빠지는 것을 볼 수 있었다.

그림 6에서는 밝기에 따라 전송속도를 변화하는 경우를 시험한 결과이다. 이때 전송 속도는 식 (5) 및 그림 3의 원리에 따라 변경하였다. 즉, 50% 밝기에서 200 kbps를 적용하고, 30% 및 70% 밝기에는 125 kbps를, 또한 40% 및 60% 밝기에는 160 kbps를 적용하였다. 전송거리 5 미터에서 50% 밝기에 비해 70% 밝기에서의 비트오율은 위 그림 5의 고정 속도 VPPM 경우 500배 이상 나빠졌는데, 그림 6의 가변 속도에서는 그 차이가 10배 이내로 줄어든 것을 볼 수 있다.

또한 60% 및 40% 밝기의 경우 50% 성능에 비해 오히려 좋아졌으나 50%와의 성능 차이는 10배 이내로 근접한 것을 볼 수 있다. 따라서 일정한 거리에서 통신을 할 경우 디밍제어를 하더라도 성능차이가 크게 발생하지 않으므로 응용범위가 다양해질 수 있을 것이다.

그림 7은 전송속도 가변 후 해밍코딩을 추가한

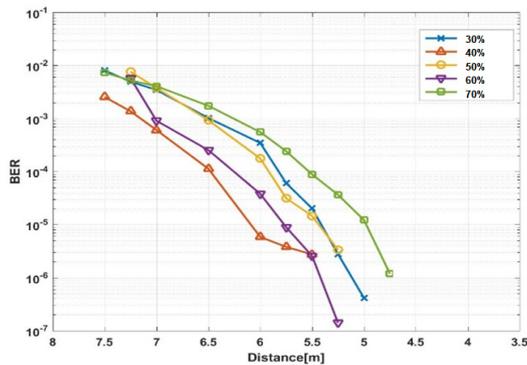


Fig. 6. BER measurement of variable-rate VPPM

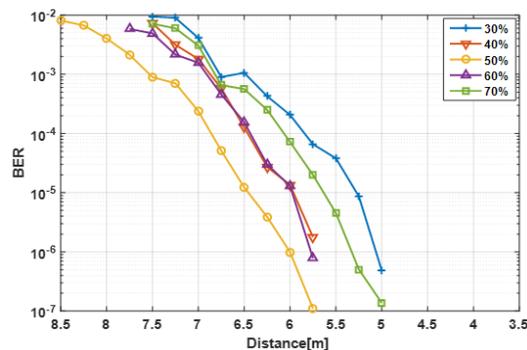


Fig. 7. BER measurement of variable-rate VPPM with Hamming

VPPM 전송 결과를 보여준다. 해밍코딩으로 인해 그림 6의 해밍코딩 전에 비해 전체적으로 전송성능이 개선된 것을 확인할 수 있었다. 즉, 밝기 50% 및 전송속도 200 kbps를 유지할 경우에 해밍코딩을 이용하면 비트오율 10^{-5} 기준으로 1 미터 정도 향상된 전송 거리를 얻을 수 있었으며, 다른 밝기에서도 정도의 차이는 있지만 전반적인 성능 향상을 확인할 수 있었다. 밝기에 따른 성능 분포는 그림 5 고정 속도의 경우와 비슷해졌으나, 밝기에 따른 성능 차이는 많이 줄어든 것을 볼 수 있다.

V. 결론

가시광통신에서 VPPM 변조를 통해 디밍과 동시에 데이터를 전송할 때 디밍에 따라 성능차이가 많이 발생하는 문제점을 실험을 통해 확인하였다. 본 논문에서는 밝기가 50%에서 벗어날수록 이에 비례하여 더 낮은 전송속도를 이용함으로써 디밍에 따른 성능 변화를 많이 줄일 수 있었다. 또한 해밍코딩을 적용함으로써 전반적인 성능 향상을 얻을 수 있었다. 가시광통신의 3~5 미터 높이의 특성상 천장에 설치된 LED 조명을 통해 수신한 신호의 비트오류를 디밍과 상관없이 10^{-4} 이하로 유지하는 것이 필요한데, 본 논문에서 제안한 방식들을 이용해서 이 정도의 성능을 확보할 수 있었다. 디밍에 따라 전송속도가 달라지는 단점은 있으나 통신 가능한 일정 거리를 확보해야 하는 가시광통신의 요구조건을 만족하기 위한 좋은 방안이 될 것으로 기대한다.

References

- [1] IEEE 802.15.7, *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification for Visible Light Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, Jul. 20, 2011.
- [2] J. Noh, S. Lee, J. Kim, M.-C. Ju, and Y. Park, "A dimming controllable VPPM-Based VLC system and its implementation," *Optics Commun.*, vol. 343, pp. 34-37, May 2015.
- [3] J.-H. Yoo and S.-Y. Jung, "Modeling and analysis of variable PPM for visible light communications," *EURASIP J. Wireless Commun. and Netw.*, vol. 134, pp. 1-6, 2013.
- [4] S. Lee, B. Ahn, M.-C. Ju, and Y. Park, "A

modified VPPM algorithm of VLC systems suitable for fast dimming environment,” *Optics Commun.*, vol. 365, pp. 43-48, Apr. 2016.

- [5] I. Park, J. Kim, Y. Chae, and Y. Park, “Performance enhancement of VPPM using adaptive transmission rate on brightness,” in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 1310-1311, Jun. 2017.
- [6] J. Kim, I. Park, D. T. Nguyen, and Y. Park, “Performance improvement of VPPM using hamming coding in visible light communications,” in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 1308-1309, Jun. 2017.

김 정 수 (Jeongsu Kim)



2012년~현재: 국민대학교 전자공학부 재학 중
<관심분야> 가시광통신, 무선네트워크, 실내측위시스템

박 인 규 (Ingyu Park)



2012년~현재: 국민대학교 전자공학부 재학 중
<관심분야> 가시광통신, 사물인터넷

응웬뒤통 (Duy Thong Nguyen)



2011년: Hanoi Univ of science and Technology 공학사
2015년: Hanoi Univ of science and Technology 전자공학과 석사
2016년~현재: 국민대학교 대학원 전자공학과 박사과정
<관심분야> 가시광통신, 광학 카메라 통신, 무선네트워크

박 영 일 (Youngil Park)



1987년: 서울대학교 공학사
1989년: 서울대학교 공학석사
1995년: Texas A&M Univ. 공학박사
1995년~1999년: KT 연구개발본부
1999년~현재: 국민대학교 전자공학부 교수
<관심분야> 광통신시스템, 광가입자망, 가시광통신, 광학카메라통신, 실내위치인식