

## Subpulse-VPPM 변조를 이용한 잡음에 강한 가시광통신

김종훈\*, 이승우\*, 주민철\*, 박영일<sup>o</sup>

## Noise-Resistant Visible Light Communications Using Subpulse-VPPM

Jonghun Kim\*, Seungwoo Lee\*, MinChul Ju\*, Youngil Park<sup>o</sup>

## 요 약

배경 잡음이 강한 실내 환경에서 가시광통신을 이용하기 위해서는 저주파대역 잡음을 피해야 한다. 또한 통신을 하면서도 LED 조명의 장점을 유지하기 위해서는 조명등의 깜박임이 없어야 하며, 밝기를 조절할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 위 기능을 수행하기 위해 신호 스펙트럼을 고주파 영역으로 이동하여 전송을 수행하였다. 특히 송수신을 모두 디지털회로만으로 구현 가능하도록 Subpulse-VPPM 변조방법을 제안하고, 전송 성능 측정을 위해 테스트베드를 제작하였다.

**Key Words** : VLC, subpulse, VPPM, SP-VPPM, home networking

## ABSTRACT

If visible light communication is to be used against large background noise in indoor environment, low frequency noise should be avoided. To maintain the advantages of LED lighting while transmitting signals, LEDs should be dimmable and free from flickering effect. In this paper, the spectrum of transmission signal is shifted toward high frequency for this purpose. Specifically, we propose a subpulse-VPPM scheme, which can be designed using only digital components, and we implement a test-bed for performance measurement.

## 1. 서 론

가시광통신(VLC, Visible Light Communications)은 LED의 빠른 스위칭 속도를 이용하여 무선으로 데이터를 전송하는 통신기술이다. 전파와는 다른 주파수 영역을 사용하여 서로 간섭이 없으므로 전파 사용이 제한되는 특수한 지역에서 통신할 수 있으며, 보안성이 뛰어나고 LED가 설치된 어느 지역에서나 통신 환경을 구축할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 LED조명이 설치되어있는 실내 환경에서 가시광통신

을 이용한 홈네트워크 시스템을 구현하는데 매우 유용하다<sup>[1]</sup>.

한편, LED는 통신 용도와 함께 기본적으로 조명으로서 사용되어야 하므로 밝기를 조절할 수 있어야 하며 인체에 유해한 깜박임(flickering) 현상이 없어야 한다<sup>[2]</sup>. 따라서 위 두 조명 조건을 만족하면서 가시광통신을 하는 데에는 VPPM (Variable Pulse Position Modulation)이 매우 유용한 변조 방식이다. VPPM은 가시광통신 표준인 IEEE 802.15.7에 표준화된 방식으로 펄스폭을 변화함으로써 밝기를 조절할 수 있으며,

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구원진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업(2014-004-051-001)의 일환으로 수행하였음.

♦ First Author : Kookmin University Electronics Engineering Department kjhp2000@naver.com, 학생회원

° Corresponding Author : Kookmin University Electronics Engineering Department ypark@kookmin.ac.kr, 종신회원

\* Kookmin University Electronics Engineering Department

논문번호 : KICS2014-11-445, Received November 1, 2014; Revised January 9, 2015; Accepted January 9, 2015

데이터와 상관없이 일정한 밝기는 항상 유지하는 방식이므로 깜박임 현상을 피할 수 있다<sup>3)</sup>.

가시광통신은 빛을 이용한 통신 방식이므로 다른 광원으로부터 오는 빛은 성능을 저해하는 요인이 된다. 따라서 실내 네트워크 환경에서 다른 광원을 함께 사용하면서 가시광통신의 성능을 확보하기 위해서는 다른 광원이 포함하는 잡음을 피해야 한다. 기존의 실내 조명등으로 많이 사용되는 형광등은 형광 방전관에서 전기가 방전되기 위해 필요한 높은 전압을 만들어 내고 과전류가 흐르는 것을 방지하기 위해 안정기가 사용되므로, 저주파 대역의 잡음을 발생하며 이는 가시광통신의 성능을 떨어뜨린다<sup>4,5)</sup>. 따라서 이를 피하기 위해서 subcarrier-FSK, subcarrier-PPM과 같은 변조방법이 연구되었다<sup>6)</sup>. 이들은 잡음보다 상대적으로 훨씬 높은 서브캐리어를 변조에 이용함으로써 신호 스펙트럼을 고주파 영역으로 이동하여 저주파 잡음을 피하는 변조 방식들이다. 그런데 서브캐리어를 이용하기 위해서는 송수신부에 아날로그 회로가 필요하며 수신 회로의 복잡도 또한 높아진다. 또한 LED의 비선형성으로 인해 입력신호 크기가 제한되는 문제가 있다. 본 논문에서는 서브캐리어 대신 서브펄스를 이용함으로써 서브캐리어를 이용한 것과 동일한 성능개선 효과를 얻으면서 순수 디지털회로만을 이용하여 변조회로를 구성하는 방식을 제안하였다.

## II. 서브펄스 변조

그림 1은 가시광통신을 이용한 실내 네트워크 환경의 한 예를 보인다. 기존에 조명등으로 많이 사용되는 형광등은 안정기에 의해 그림 2와 같이 DC~수백 KHz 사이의 저주파대역 잡음을 발생함으로써 기저대역 스펙트럼을 갖는 가시광통신의 성능을 크게 저하시킨다. 따라서 가시광통신을 이용한 실내 네트워크 환경에서 배경 잡음이 큰 경우 통신성능을 유지하기

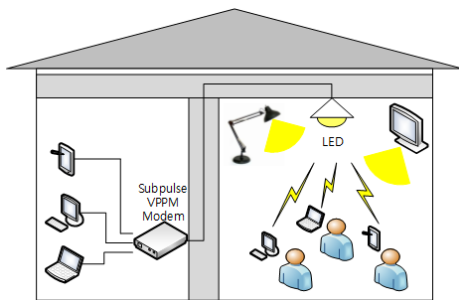


그림 1. 가시광통신을 이용한 홈네트워크  
Fig. 1. VLC-based homenetwork

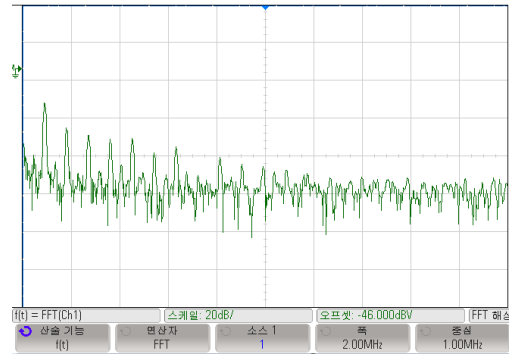


그림 2. 3파장 형광등의 전력스펙트럼밀도  
Fig. 2. PSD of 3-band fluorescent lamp

위해서는 저주파 대역에 존재하는 주변잡음을 제거해야 한다.

그림 3은 IEEE 802.15.7에 제시된 가시광통신 표준 변조 방법들이다. 그림 3(a)는 신호에 따라 밝기가 변하는 깜박임 현상을 없애기 위한 OOK 맨체스터 변조이고, 그림 3(b)는 위 변조방식의 장점을 이용하면서 동시에 펄스폭을 조절함으로써 조명의 밝기를 제어할 수 있는 VPPM 변조신호이다. 한편, 이들 신호들의 전력스펙트럼밀도(PSD)를 살펴보면 모두 저주파 기저대역에 에너지가 존재한다. OOK-NRZ 신호 및 OOK-맨체스터 신호의 PSD를 식 (1)에 의해 계산한 결과를 그림 4에 나타낸다.

$$S_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|X_T(f)|^2}{T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int |x_T(t)|^2 \quad (1)$$

이 그림에서는 OOK 펄스 신호들의 PSD를 보이며, 저주파대역에 신호가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

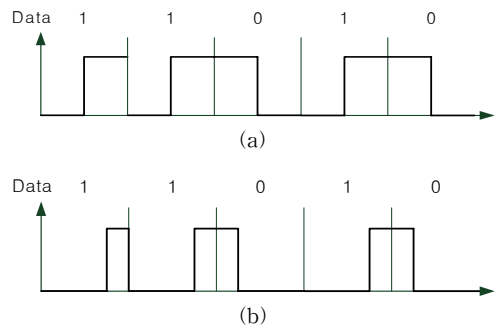


그림 3. 가시광통신을 위한 펄스 변조 신호들  
Fig. 3. Pulse modulation signals for VLC (a) OOK-Manchester (b) VPPM

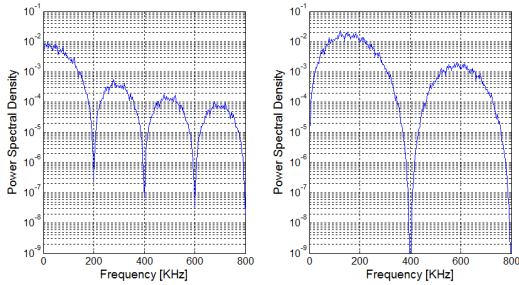


그림 4. 펄스 변조된 신호의 전력스펙트럼밀도  
Fig. 4. PSD of pulse modulated signals (a) OOK-NRZ (b) OOK-Manchester

이 경우는 데이터 속도 200 kbps에 대해 계산하였지만, OOK 변조의 경우에는 전송속도와는 상관없이 저대역에 큰 PSD 성분이 존재한다. 또한 밝기 50% VPPM의 PSD는 OOK-맨체스터와 동일하며 밝기가 변하면 PSD의 폭만 달라진다. 따라서 OOK-맨체스터 및 VPPM 변조를 이용하는 경우 저주파잡음의 영향을 피할 수 없다.

이런 저주파대역의 잡음을 제거하여 통신성능을 향상시키기 위해 그림 5와 같이 서브캐리어를 이용할 수 있다. 서브캐리어를 이용한 변조는 송신 에너지를 서브캐리어 주파수로 이동하기 때문에 저주파대역의 잡음을 피할 수 있게 된다는 장점이 있지만, 아날로그 서브캐리어를 발생하고, 수신 및 동기화 등의 과정에서 디지털 회로만을 이용하는 경우에 비해 구현 복잡도 및 비용이 높아진다. 또한 LED 소자는 입력 전류와 출력 광세기 사이에 비선형성이 존재하는데, 밝기 조절을 위해 서브캐리어를 크게 할 경우 LED 광세기 출력은 왜곡되며 이는 전송성능에 악영향을 미치게 된다. 따라서 본 논문에서는 고주파의 서브펄스를 이

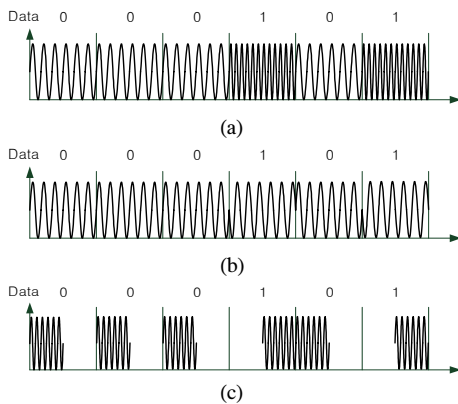


그림 5. 서브캐리어 변조된 신호  
Fig. 5. Subcarrier modulated signals (a) SC-FSK (b) SC-PSK (c) SC-PPM

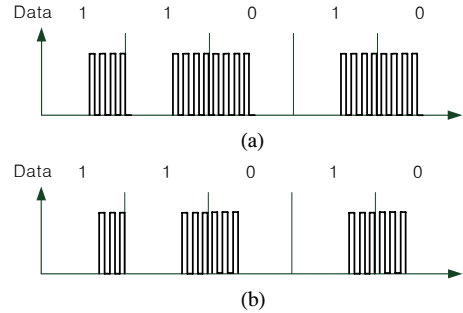


그림 6. 밝기에 따른 서브펄스 VPPM 신호들  
Fig. 6. Subpulse-VPPM signals for different brightness (a) 50% brightness (b) 30% brightness

용함으로써 위 문제들을 해결하는 방안을 살펴보았다.

가시광통신용 LED를 조명으로 사용하기 위해서는 LED의 중요 장점 중 하나인 밝기를 조절할 수 있어야 한다. 따라서 펄스의 넓이를 조절함으로써 밝기를 조절할 수 있는 VPPM 변조방법을 적용하되, 이를 서브펄스와 곱함으로써 그림 6과 같은 Subpulse(SP)-VPPM 신호를 발생한다. 그림에서는 밝기 50% 및 밝기 30%인 두 종류의 SP-VPPM 신호를 보이고 있다.

그림 7은 그림 4에 이용한 200 kbps 데이터에 2 MHz 서브펄스를 곱한 SP-VPPM 신호의 PSD를 나타낸다. 그림 (a)는 50% VPPM, 그림 (b)는 30% VPPM에 대한 PSD를 각각 나타낸다. 변조된 신호의 주 스펙트럼 성분은 그림과 같이 서브펄스 주파수인 2 MHz 부근에 존재하는 것을 볼 수 있다. DC영역 저주파대역은 SP-VPPM 신호의 DC 오프셋에 해당하며, AC 커플링에 의해 제거하더라도 신호 파형에는 영향이 없다. 따라서 SP-VPPM 변조 방식을 전송에 이용할 경우 수신부에서는 잡음이 존재할 수 있는 저주파대역은 고역통과필터를 이용하여 차단함으로써 가시광통신의 성능을 향상시킬 수 있다.

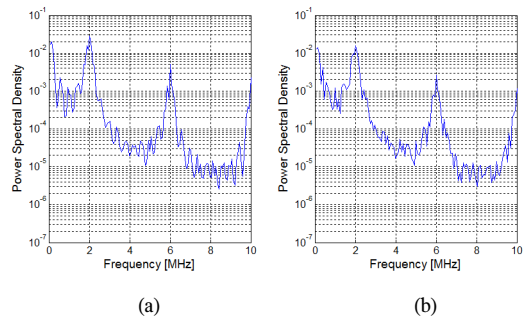


그림 7. 서브펄스 VPPM 신호의 전력스펙트럼밀도  
Fig. 7. PSD of SP-VPPM signals (a) 50% SP-VPPM (b) 30% SP-VPPM

### III. 전송 시험 및 성능 비교

본 논문에서 제안한 SP-VPPM 방식의 전송 성능을 시험하기 위해 그림 8과 같이 테스트베드를 구성하였다. 송수신부에 SP-VPPM 신호 생성 및 복구를 위해 Vertex-5 FPGA 보드를 이용하였으며, 데이터 전송을 위한 LED 조명에는 60 mW 백색 LED를 6×5 배열로 이용하였다. 데이터 전송 속도는 IEEE 802.15.7에 채택하고 있는 200 kbps를 사용하며, 서브필스로는 2 MHz 디지털 신호를 이용하였다. 변조된 광신호는 수신부의 광다이오드(PD)에 의해 전기신호로 변환되고, 고역통과필터를 거치면서 저주파 대역의 주변잡음은 제거된다. 이후 서브필스 제거를 위해 포락선검파(Envelope Detection)를 사용하여 VPPM 신호를 복원한다.

VPPM 신호로부터 데이터의 복원을 위해서는 그림 9에 제시하는 VPPM 마스크 기반 상관기(correlator)를 이용하였다. 광신호를 수신하면 빛의 세기를 먼저 측정하여 이로부터 VPPM 마스크를 생성하고, 이를 수신신호와 곱하고 적분하며 샘플링을 통해 데이터를 복원하는 방식이다.

위 송수신 테스트베드를 이용하여 전송시험을 한 결과 그림 10과 같은 송수신 파형을 관측하였다. 그림에서는 서브필스 변조된 VPPM 신호와 이를 PD에서

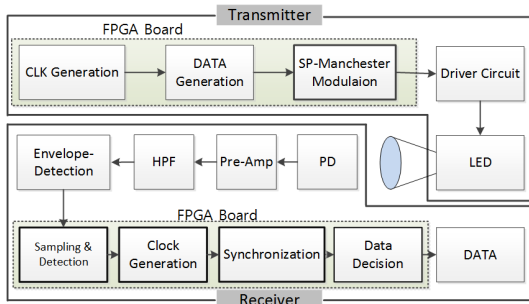


그림 8. 서브필스 VPPM 전송 블록다이어그램  
Fig. 8. Transmission block diagrams of SP-VPPM

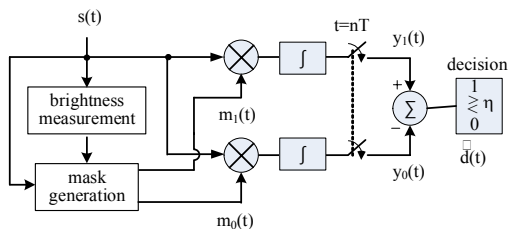


그림 9. 상관기를 이용한 VPPM 수신  
Fig. 9. Correlator-based VPPM reception

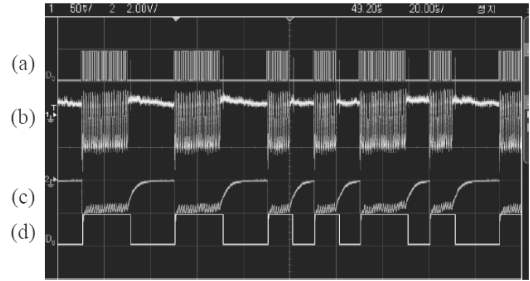


그림 10. 서브필스 VPPM 전송 파형들  
Fig. 10. Transmission waveforms of SP-VPPM (a) transmitted (b) received (c) envelope detected (d) recovered

수신했을 때의 파형, 포락선 검파 후 파형, 그리고 복조된 파형 등을 순서대로 나타내고 있으며, 이를 통해 원 신호가 제대로 복원되고 있는 과정을 볼 수 있다. 그림 11은 잡음이 있을 경우 VPPM 신호와 SP-VPPM 신호의 성능을 비교한 결과를 보이고 있다. 이 때 잡음 광원으로는 27 watt 형광등(FPL27EX-N)을 PD와 1 미터 거리에 설치하였다. 그림과 같이 VPPM 신호는 잡음이 없는 환경에서는 성능이 가장 좋지만 형광등 잡음이 존재하는 경우 성능이 급격히 나빠져서 비트오율  $10^{-6}$ 을 기준으로 할 경우 거리가 5.75 미터에서 2.25 미터로 3.5 미터나 단축되는 것을 보았다. 그러나 SP-VPPM의 경우 잡음이 성능에 큰 영향을 미치지 않았으며, 위 형광등 잡음이 존재하는 환경에서 전송거리 4.5 미터 이상에서도 비트오율  $10^{-6}$ 을 만족할 수 있었다.

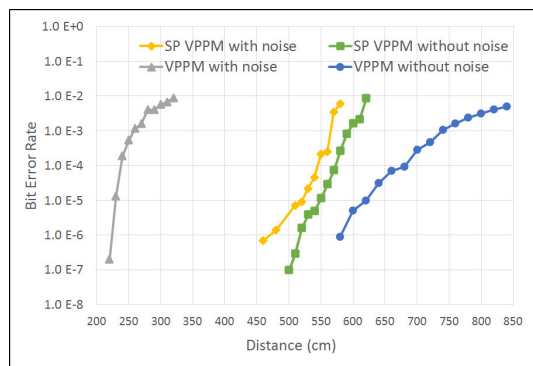


그림 11. 잡음에 따른 서브필스 VPPM 전송의 비트오율  
Fig. 11. BER of SP-VPPM depending on noise

### IV. 결론

저주파대역의 배경 잡음이 강한 실내 가시광통신 환경에서 변조 신호의 주파수를 이동함으로써 잡음

성능을 개선할 수 있었다. 특히 디지털 소자만으로 회로를 구성할 경우 회로의 복잡도나 경제성 측면에서 유리하므로 본 논문에서는 서브캐리어 대신 디지털 신호인 서브펄스를 적용하여 변조 신호의 주파수를 이동하는 방법을 제안하였다. 또한 조명으로서의 장점을 유지하기 위해 VPPM 변조를 이용하였다. 따라서 서브펄스와 VPPM을 결합한 형태인 SP-VPPM 변조 방식을 이용하여 데이터를 전송하였으며, 테스트베드를 이용하여 잡음 상황에서도 전송성능에 거의 변화가 없음을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제안한 SP-VPPM의 구현 및 성능 측정을 통해 기존의 조명, 디스플레이 등 여러 배경 잡음이 존재하는 실내 환경에서 가시광통신을 이용한 홈네트워크 구성 가능성을 확인할 수 있었다.

### References

- [1] S. Dan, J. Noh, S. Lee, K. Choi, M. Ju, and Y. Park "Home networking system employing power line and LED lighting," *J. KICS*, vol. 38C, no. 8, pp. 700-705, Aug. 2013.
- [2] R. Kueller and T. Laike, "The impact of flicker from fluorescent lighting on well-being, performance and physiological arousal," *Ergonomics*, vol. 41, no. 4, pp. 433-447, 1998.
- [3] IEEE 802.15.7, *IEEE Standard for Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification for Visible Light Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, IEEE, 2011.
- [4] A. Boucouvalas, "Indoor ambient light noise and its effect on wireless optical links," *IEE Proc. Optoelectronics*, vol. 143, no. 6, pp. 334-338, Dec. 1996.
- [5] A. Moreira, R. Valadas, and A. Duarte, "Characterization and modelling of artificial light interference in optical wireless communication systems," *IEEE Pers. Indoor and Mob. Radio Commun.*, 1995.
- [6] H. Sugiyama, "Experimental investigation of modulation method for visible-light communications," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E89-B, no. 12, pp. 3393-3400, Dec. 2006.

#### 김 종 훈 (Jonghun Kim)



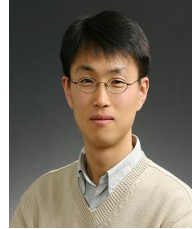
2013년: 국민대학교 공학사  
 2013년~현재: 국민대학교 대학원 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 가시광통신, 무선 네트워크, 차량 제어, 전력선통신

#### 이 승 우 (Seungwoo Lee)



2014년: 국민대학교 공학사  
 2014년~현재: 국민대학교 대학원 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 가시광통신, 이동통신, 무선네트워크, 양방향통신

#### 주 민 철 (MinChul Ju)



1997년: 포항공과대학교 공학사  
 1999년: 한국과학기술원 공학석사  
 2010년: Queen's Univ. 공학박사  
 1999년~2011년: 전자부품연구원 선임연구원  
 2011년~현재 국민대학교 전자공학부 교수

<관심분야> 협동통신, 다중안테나 시스템, 물리계층 보안

#### 박 영 일 (Youngil Park)



1987년: 서울대학교 공학사  
 1989년: 서울대학교 공학석사  
 1995년: Texas A&M Univ. 공학박사  
 1995년~1999년: KT 연구개발본부 선임연구원  
 1999년~현재: 국민대학교 전자공학부 교수

<관심분야> 광통신시스템, 광대역 통합망, 가시광통신