

# LED 가시광통신 디밍 변조 기술 동향

권재균 / 영남대학교 전자공학과

## 1. 서론

가시광통신 (VLC; visible light communication) 또는 LED 통신 기술은 LED 조명을 이용하여 사람의 눈이 감지하지 못하는 빛의 변화를 통해 정보를 전송하는 것이다. 이는 LED 조명을 통신용으로 재활용하는 것에 착안하였으며, 따라서 LED 조명의 보급이 기술의 확산에 긍정적인 효과를 준다. 반도체 기술의 발전과 환경에 대한 관심 및 규제는 차츰 친환경 LED 조명의 확산을 이끌고 있다. 이에 가시광통신 기술은 그린 IT 기술, IT 융합 기술로 분류된다. 또한 5G 통신을 위한 disruptive technology의 하나로서 기존 통신 방식들에 대한 보완재로 이용될 수 있다. 국제 표준화도 이루어졌는데, IEEE 802.15.7을 통해 PHY/MAC에 대한 첫 표준화를 완료하였다 [1].

LED 조명은 기본적으로 반도체 소자이므로 빠른 스위칭이 가능하여 기존 조명과는 달리 빠른 빈도의 변화를 통한 고속 데이터 전송이 가능하다. 사람의 눈은 200Hz 이상의 변화는 거의 감지하지 못하고 평균값만을 감지하는 특성이 있으므로, 이러한 빠른 변화는 PD (photo-detector) 또는 이미지 센서인 통신의 수신기만이 감지할 뿐이다. 따라서 평균적으로는 조명의 특성을 유지하면서 순간적인 변화를 통해 통신을 수행하는 것이다. 가장

생각하기 간단한 방법은 빈번한 ON/OFF를 통해 1과 0의 이진 데이터를 전송하는 NRZ-OOK (non-return-to-zero on-off keying) 이고, 이 때 평균 밝기는 50%가 된다.

가시광통신은 무선광통신 (optical wireless communication) 에 속한다. 초기에 가시광통신을 구현함에 있어서 레퍼런스는 기존에 구현된 적외선통신이었다. 이에 대한 연구는 일본에서 많이 이루어졌다. 가시광통신과 적외선통신의 차이는 소자, 전력 제한 등 물리적인 차이도 있겠으나 가장 중요한 것은 조명 기능의 유무이다. 가시광통신은, 일차적으로 조명의 기능을 만족하면서 이차적으로 통신 기능을 수행해야 하는 것이다. 이러한 특징은 무선광통신 중 가시광통신만이 가진다. 조명의 기능을 위해 사람의 눈이 안정적인 밝기를 감지해야 하는데, 이 조건은 디밍 (dimming) 과 플리커 (flicker) 의 두 가지로 요약된다. 플리커는 밝기가 흔들리는 깜박임으로서 200Hz 이상의 충분히 빠른 빈도로 변조를 수행하면 보통 해결이 가능하다. 디밍은 사용자가 요구하는 평균 밝기를 맞추는 것이다. 최소 밝기 0와 최대 밝기 A 사이에서 요구 디밍이 d라면, 평균적으로 dA의 밝기를 만족하는 효율적인 변조 방식을 고안할 필요가 있다. 디밍 개념을 확장하면 컬러 조명에서는 요구 밝기와 색을 만족하는 것으로 볼 수 있다.

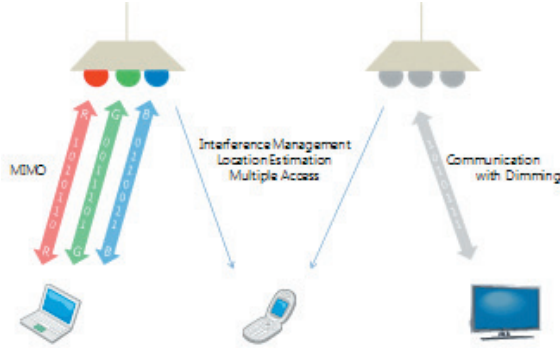


그림 1 가시광통신 실내 환경 개념도

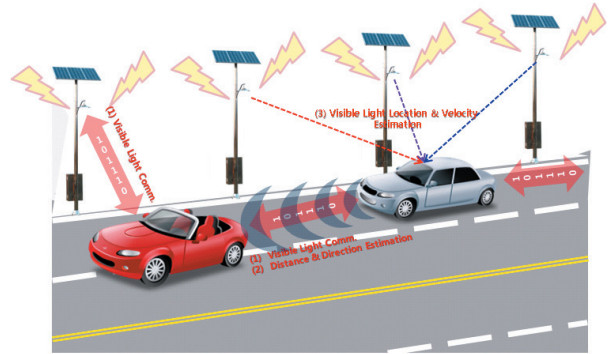


그림 2 가시광통신 차량 환경 개념도

가시광통신의 연구 분야는 다음과 같이 다양하다.

- 소자, 회로 등의 구현 분야
- 실내, 실외, 수중 등의 채널
- OFDM, MIMO를 포함하는 변복조 및 부호화
- 여러 개의 LED 조명을 가정한 무선 시스템 레벨
- LED 조명까지의 유선 조명 네트워크
- 자동차, 선박, 실내 등의 응용 연구

본 고에서는 특히 이 중에서 변조 기술들에 대해 소개 하며, 가시광통신에서 새로이 나타난 디밍 조건을 만족 하는 변조 기술을 다룬다.

## 2. 디밍 변조 기술들

### (1) 시간적 보상 기법들

변조 방식을 간단한 NRZ-OOK로 하든, 0와 A 사이에서 M개의 레벨을 가지는 M-ary PAM (pulse amplitude modulation)으로 하든, A/2를 중심으로 정현파가 중첩된 MSM (multiple-subcarrier modulation) 또는 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 을 하든, 엔트로피가 큰 충분히 랜덤한 데이터를 전송한다면 평균적인 밝기는 50%가 된다 ( $d=0.5$ ). 그런데 조명은 통신 이전의 우선적인 기능이므로, 사용자 요구에 의해 요구 디밍  $d$ 가 우선적으로 주어지게 된다.  $d$ 가 0.5보다 크거나 작을 때, 이 문제를 해결하는 손쉬운 방법은 시간축 상에 추가적인 ON이나 OFF 구간을 넣는 것이다. 통신에 의한 평균 밝기가 0.5이므로,  $d$ 가 0.5보다 크면 ON이 추가되고,  $d$ 가 0.5보다 작으면 OFF가 추가된다. InterDigital사의 시간다중화 기법 [2] 이 이것으로, 간단

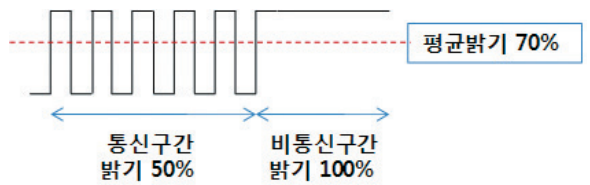


그림 3 시간다중화 기법

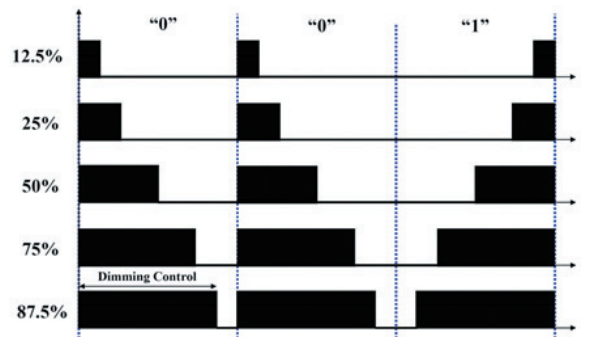


그림 4 VPPM 기법

하게 구현될 수 있는 장점이 있으나 데이터율 측면에서의 성능은 최적의 그것과는 거리가 좀 있다.

같은 방식을 한 심볼 또는 펄스 내에 적용하는 것이 PWM (pulse width modulation) 에 기반한 방식이다. 펄스의 폭을 조절함으로써 디밍을 맞추게 된다. PWM 기반 디밍은 OFDM을 포함한 다양한 변조 방식에 쉽게 적용 가능하다. 이 방식도 간단하게 고려될 수 있으나 역시 데이터율 측면에서 성능이 우수하진 못하다. 왜냐하면 낮거나 높은 요구 디밍에 대해, 구현되어야 할 펄스 폭이 매우 좁아져서, 오히려 심볼율을 떨어뜨릴 수 있기 때문이다. 이 분류의 새로운 방식으로 ETRI의 VPPM

(variable pulse position modulation) [2] 이 있는데, 이는 2-PPM과 PWM을 결합한 방식으로, 2-PPM이 데이터 변조를 맡고 PWM이 디밍을 맞춘다. PDSM (pulse dual slope modulation) [3] 은 VPPM의 변형으로, 플리커 완화에 더 강점이 있다.

이외에 디밍 지원을 위해 PWM을 OOK 또는 PPM과 겹친 (superpose) 방식 [4,5] 이 있는데, 데이터율을 유지하기 위해 심볼 레벨간 간격이 줄어들어서 노이즈에 취약해진 측면이 있다.

(2) 아날로그 디밍 기법

요구 디밍  $d$ 가 0.5가 아닌데 통신에 의한 평균 디밍이 0.5일 때, 이를 해결하는 또 다른 간단한 생각은 밝기를 조정하는 것이다. 즉, 최소 0와 최대 A인 밝기에 대해 평균 디밍이 0.5라면 평균 밝기는 0.5A가 되겠지만, 최대를 0.5A로 낮추면 평균 밝기는 0.25A가 되고, 반대로 최소를 0.5A로 올리면 평균 밝기는 0.75A가 되는 것이다. 하지만 생각하기에는 매우 간단하지만 이를 구현하는 데에는 어려움이 따른다. LED 방사의 비선형성으로 인한 진폭 제어의 어려움, 입력 전류 변화에 따른 백색 LED의 색온도 변화 문제가 있다. 또한 심볼 레벨간 간격 감소로 인한 에러율 증가의 문제도 겪는다.

(3) 역소스부호화 기법

역소스부호화 (ISC; inverse source coding) [6,7] 기법은 디밍을 만족하는 상황에서의 최대 통신 속도를 엔트로피 개념의 이론적인 한계로 접근한다. 최대 엔트로피를 위해 데이터가 심볼별로 균일하게 분포되었을 때 통신 구간의 평균 디밍은 0.5이다. 이상의 기법들은 이 상황에서 0.5인 디밍을 0.5가 아닌 디밍으로 바꾸려고 했지만, 역소스부호화 기법은 심볼들의 분포를 변화시켜서 평균 디밍이 0.5가 아닌  $d$ 가 되도록 한다. 가장 쉬운 예로 그림 5의 NRZ-OOK 경우를 보면, 요구 디밍이 0.7 일 때, ON 심볼은 70%, OFF 심볼은 30%가 나와야 한다. 통상적인 데이터는 각각 50%, 50%를 가지므로, 역소스부호화는 이를 70%, 30%가 되도록 변환하는 것이며, 이 과정에서 심볼의 개수가 늘어난다. 늘어나는 비율은 70%, 30%에 대한 이진 엔트로피와 관련되며, 데이터 압축의 역과정이므로 역소스부호화라 한다. 이론적인 한

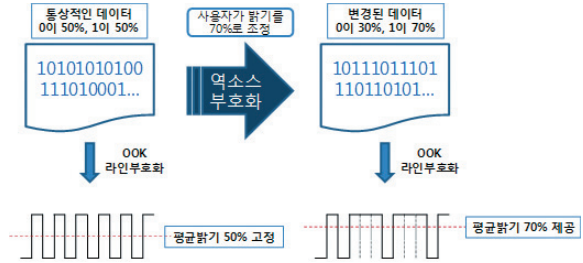


그림 5 역소스부호화 기법

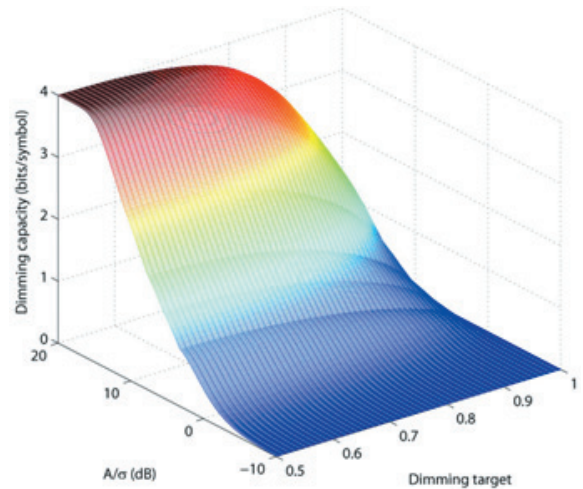


그림 6 최대 용량

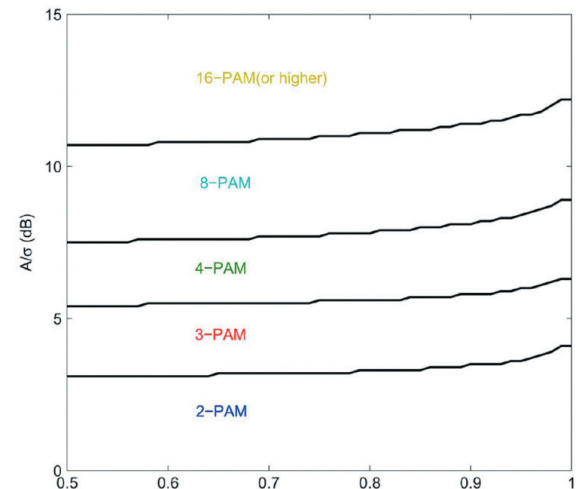


그림 7 적응 변조

계 성능을 제시하므로 데이터율 측면에서는 매우 우수하다. 채널 부호화가 별로 필요 없는 낮은 잡음 환경에서는 역 Huffman 부호로 구현하는 방법 [6] 과 MPPM



(multiple-PPM) 을 충분히 긴 블록에서 구현하는 방법 [8] 이 있다. 채널 부호화가 필요한 높은 잡음 환경에 대해서는 연구가 더 필요하다.

역소스부호화는 이진 환경뿐만 아니라 M진 환경 (M-ary PAM) 에 대해서도 연구 [7] 가 되었으며, AWGN 채널에서 상호정보량 (mutual information) 을 통한 용량 연구도 이루어졌다. 여러 M 값과 잡음 전력, 디밍 조건들에 대한 용량 분석을 통해, 상황별로 어느 M 값이 최적인지를 결정하는 적응변조 (adaptive modulation) 도 가능하다.

#### (4) 다차원에서의 확장

이상의 방법들은 일차원 송신과 일차원 수신에 대해 평균 밝기로서의 디밍을 맞추는 기법들이다. 일차원 송신이라 함은 통상적인 PC (phosphor-converted) white LED, 즉 청색 LED와 황색 형광체를 조합하여 이용하는 경우이다. 이에 비해 다차원 송신은 두 가지 경우로 생각될 수 있다. 첫번째는 MIMO (multiple input multiple output) 처럼 여러 개의 송신 LED를 이용하는 것이다. 한 곳에서 발광되는 동일한 종류의 LED들은 수신기가 구별하기가 쉽지 않으니, 동일한 종류의 LED들은 서로 다른 곳에 distributed MIMO처럼 배치되는 게 더 유용하다고 생각된다. 두번째는 TV, 감성조명, 고연색성 조명 등을 위해 다중색상 LED를 이용하는 것이다. 기본 색상들을 구현하기 위해 LED가 여러 개 갖춰지므로 다차원 송신이 가능하다.

다중색상 LED 환경에 대한 첫번째 변조 기법으로 삼성전자와 CSUS 대학의 CSK (color shift keying) 기법 [2] 이 있다. CSK 기법은 빛의 색깔에 따라 전송 데이터가 바뀌는 방식이다. 순간적으로는 색깔이 달라지지만 빠르게 변하므로 사람의 눈은 평균 색만을 인지하게 된다. 그림 8은 CIE xyY 색공간 (color space) 상에 CSK의 예를 나타낸 것이다. LED1, LED2, LED3의 3개의 LED가 주어졌으며, 3개의 LED를 조합하여 만들 수 있는 영역은 3개의 LED를 꼭지점으로 하는 삼각형 및 내부이다. 변조는 심볼들의 평균이 목표 색을 만족하도록 설계된다. 밝기는 항상 주어진 요구 밝기 그대로이며, 순간적인 밝기의 변화도 없다. 밝기를 조절하는 변조를 이용하지 않으므로 용량 증대가 제한적이다.

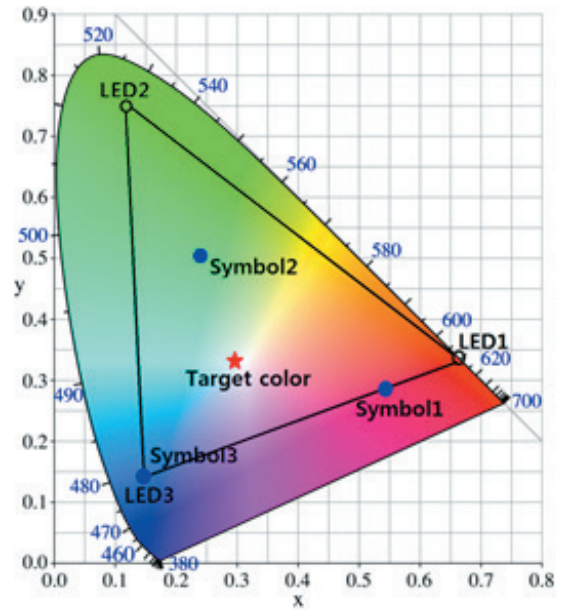


그림 8 CSK의 예

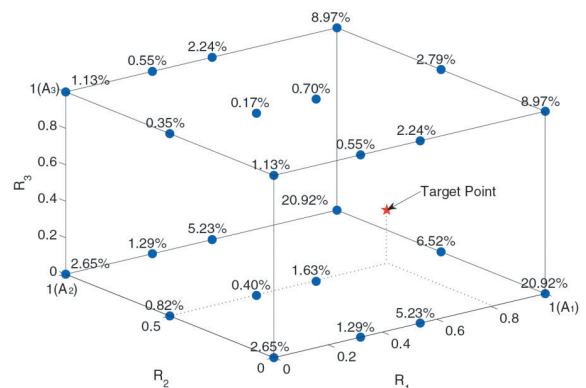


그림 9 3차원 직교 채널에서 CIM의 예

반면 CIM 기법 [9] 은 색깔과 밝기가 변할 수 있는 전 영역을 이용하여 변조함으로써 용량 증대를 추구한다. 조명의 요구 조건인 색과 밝기를 만족하도록 색공간 상에서 송신 가능한 평균점의 집합인 부집합 (subspace) S1을 결정한다. S1을 통신의 신호공간 (signal space) 으로 매핑하여 부집합 S2를 생성하고, 신호공간 전체에 대해 역소스부호화를 적용하여, 평균점이 S2에 존재하는 조건으로 용량 한계와 신호 성상도를 구한다. 그림 9의 신호공간에서 S2는 target point 한 점이고, 신호 성상도는 24개의 심볼로 구성된다.



### 3. 결 론

본 고에서는 우선 가시광통신이 무엇이고, 무선광통신 중 어떤 특이점을 가지며, 그리고 가시광통신의 연구 분야들을 살펴보았다. 특히 그 중에서 디밍 변조 기술들에 대해 자세히 살펴보았는데, 간단한 시간적 보상 기법들과 아날로그 디밍 기법 외에 역소스부호화 기법 및 CIM 기법에 대해 소개하였다. 본 분야는 아직 연구가 많이 필요한 분야이며, 추후 LED 조명의 보급 및 가시광통신의 활성화에 따라 산업에 크게 기여할 수 있을 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light, IEEE Standard 802.15.7-2011, Sep. 2011.
- [2] S. Rajagopal, R. D. Roberts, and S.-K. Lim, "IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support," IEEE Commun. Mag., vol. 50, no. 3, pp. 72-82, Mar. 2012.
- [3] M. Anand and P. Mishra, "A novel modulation scheme for visible light communication," presented at the 2010 Annu. IEEE India Conf., Kolkata, India, Dec. 2010.
- [4] E. Cho, J.-H. Choi, C. Park, M. Kang, S. Shin, Z. Ghassemlooy, and C. G. Lee, "NRZ-OOK signaling with LED dimming for visible light communication link," in Proc. 16th Eur. Conf. Netw. Opt. Commun., Newcastle-Upon-Tyne, U.K., Jul. 2011, pp. 32-35.
- [5] H.-J. Jang, J.-H. Choi, Z. Ghassemlooy, and C. G. Lee, "PWM-based PPM format for dimming control in visible light communication system," presented at the 8th Int. Symp. Commun. Syst., Netw. Digital Signal Process., Poznan, Poland, Jul. 2012.
- [6] J. K. Kwon, "Inverse source coding for dimming in visible light communications using NRZ-OOK on reliable links," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 22, no. 19, pp. 1455-1457, Oct. 1, 2010.
- [7] K.-I. Ahn and J. K. Kwon, "Capacity analysis of M-PAM inverse source coding in visible light communications," J. Lightw. Technol., vol. 30, no. 10, pp. 1399-1404, May 15, 2012.
- [8] K. Lee and H. Park, "Modulations for visible light communications with dimming control," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 23, no. 16, pp. 1136-1138, Aug. 15, 2011.
- [9] K.-I. Ahn and J. K. Kwon, "Color intensity modulation for multicolored visible light communications," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 24, no. 24, pp. 2254-2257, Dec. 15, 2012.