

연집제로구간에서 발생하는 음영현상을 줄이기 위한 기법에서 신호지연이 미치는 영향 연구

한두희¹, 이규진^{2*}

¹경희대학교 전자전파공학과 강사, ²세명대학교 전자공학과 교수

A Study on the Effect of Signal Delay in Reduction Technique for Reducing Shading

Doo-Hee Han¹, Kyu-Jin Lee^{2*}

¹Lecturer, Department of Electronics and Radio Engineering, Kyung Hee University

²Professor, Department of Electronic Engineering, Semyung University

요 약 본 논문에서는 가시광 통신시스템의 변조 방식과 각 변조 방식이 Dimming level에 미치는 영향을 분석하고, 지연 신호로 인한 왜곡이 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 현재 가시광 통신에서 가장 많이 사용되는 변조 방식들은 통신 성능은 증가하나 전체 조명의 밝기를 감소시키는 결과를 나타낸다. 연속적인 Burst Zero Duration이 발생하면 조명 기능이 심각하게 저하된다. 이는 조명뿐만 아니라 전체 시스템의 성능저하 시키게 되며 Flicker 현상을 유발한다. 본 논문에서는 이러한 변조 기술과 조명-통신 성능의 관계를 분석하고, 신호지연으로 인한 왜곡이 발생하였을 경우에 가시광 통신 시스템에 미치는 영향을 연구하였다. 시뮬레이션을 통해 통신-조명성능이 가장 좋은 IPI-OOK의 성능을 분석하고 그에 따른 향후 연구 방향을 제안하였다.

주제어 : 가시광통신, 융합기술, 디밍레벨, 무선광통신, 지연신호

Abstract In this paper, we analyzed the effect of modulation scheme and modulation scheme on the dimming level of visible light communication system and studied the effect of distortion due to delayed signal. Currently, the modulation schemes most commonly used in visible light communication result in increasing the communication performance but reducing the brightness of the entire illumination. Continuous Burst Zero Duration will severely degrade lighting. This degrades not only the illumination but also the performance of the whole system and causes Flicker phenomenon. In this paper, we analyze the relationship between modulation technique and illumination - communication performance and investigate the effect of signal delay on visible light communication system. Through simulation, we analyze the performance of IPI-OOK which has the best communication-lighting performance and propose future research directions accordingly.

Key Words : Visible light communication, convergence technology, dimming level, wireless optical communication, delayed signal

1. 서론

최근, LED소자 기술이 빠른 속도로 발전하면서 조명

과 정보통신의 융합 기술로서 가시광 통신이 주목 받고 있다. 스마트 디바이스의 개발과 함께 가시광통신 기술은 뜨거운 주제가 되었고 많은 차세대 컨버전스 기술의

*This paper was supported by the Semyung University Research Grant of 2018.

*Corresponding Author : Kyu-Jin Lee(kyujin@semyung.ac.kr)

Received October 22, 2018

Accepted December 20, 2018

Revised November 23, 2018

Published December 31, 2018

출현과 함께 활발한 연구가 진행되고 있다. 가시광 통신은 LED를 사용하여 조명과 동시에 통신하는 기술로, 조명 인프라를 이용하여 무선 네트워크 환경을 쉽게 구축할 수 있어 활용 가치가 높은 기술이다. 앞으로 5G 네트워크는 초 고화질 (UHD) 비디오 스트리밍, 증강 및 가상 현실, 클라우드 게임, 스마트 홈, 커넥티드 카 및 원격 제어와 같은 첨단 요구 사항을 갖춘 광범위한 새로운 서비스를 제공할 것으로 예상된다. 이러한 요구 사항을 충족시키기 위해 가시광 통신은 고속 응답 특성을 갖는 LED를 사용한다. 따라서 RF가 사용되지 않아 주파수 허가가 필요 없으며, 가시 광 파장의 넓은 대역폭을 사용할 수 있어, 고속 멀티미디어 데이터 전송을 대체 할 수 있는 차세대 홈 네트워킹 시스템으로 주목 받는다[1,2]. 이러한 가시광 통신 시스템은 통신과 조명과 통신의 역할을 동시에 제공하기 때문에, 통신성능 뿐만 아니라 조명성능을 위한 방안이 필요하다. 통신시스템의 성능 향상을 위해서 다양한 변조기법들과 간섭제거 기술, Power control 기법들이 연구되고 있으나, 조명 성능 향상을 위한 Dimming control 기법은 상대적으로 연구가 더 필요한 분야다[3,4]. 특히 데이터 변복조 과정에서 일어나는 Flicker 현상은 가시광 통신 시스템에서 사용하는 거의 모든 변복조 기술에서 발생한다. 이러한 Flicker현상으로 인해 조명의 기능이 크게 저하된다. 특히 이진 데이터 셋의 연속된 0 데이터 구간에서는 Burst Zero Duration가 발생하여 조명 기능 저하가 심화된다. 이는 조명 뿐만 아니라 전체 시스템의 성능이 저하되는 문제를 야기한다. Flicker를 제거하기 위한 v-PPM등의 변조 기법이 연구되었지만, 기존 OOK에 비해 복잡도가 높고 전송속도가 느린 단점을 가진다. 본 논문에서는 가시광통신의 변복조 방식과, 기존에 변복조 방식이 조명 Dimming level에 미치는 영향에 대해서 알아보고, 이를 해결하기 위한 연구 사례에 대해서 분석하였다. 또한 이러한 변복조 기법에서 신호의 지연으로 인한 신호의 왜곡이 발생하였을 경우에 Dimming level과 시스템 성능에 미치는 영향에 대해서 분석하고 이를 해결하기 위한 연구방안을 제안하였다.

2. 시스템 모델

2.1 채널모델

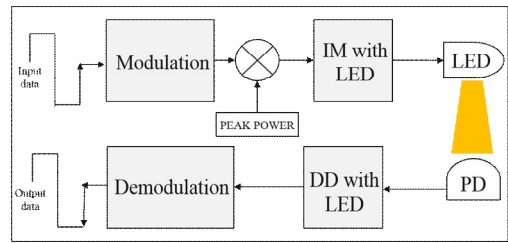


Fig. 1. VLC system structure diagram

Fig. 1. 에 가시광통신 전체 구조도를 나타내었다. 가시광 통신 시스템은 가시광 파장을 이용하여 통신을 수행한다. 송신기는 LED를 통해 광 파장을 발생시키며, 수신기는 포토다이오드를 통해 광 파장을 직접 수신하여 정보신호를 복원하는 IM-DD 변복조를 사용한다. LED에서 입력된 신호를 가시광 파장으로 발생시키는데 평균 120ns 정도가 걸리는데, 이러한 신호를 스위칭 회로를 통해 ON/OFF 데이터 송수신을 한다[5].

송수신 channel은 공기매질 공간인 Air surface이며, Line of Sight (LOS) channel과 None Line of Sight (NLOS) channel 및 주변 광원들의 간접 광 잡음으로 구성된다. 주변의 다른 광원들로부터 들어오는 잡음모델은 AWGN Channel 모델로 가정한다. 또한 실내 벽면이나 장애물에 반사되어 들어오는 신호는 램버시안 복사패턴으로 가정하고, PD에는 협대역 광학 필터를 사용한다. 광 채널에서의 전송 품질은 샷노이즈에 영향을 받는다. 시스템에서 주변 광원으로부터 들어오는 샷노이즈로 인한 영향은 Gaussian Noise Process로 무시할 수 있다. 따라서 가시광 통신에서 채널을 통과한 수신신호는 다음과 같다.

$$R(t) = \gamma S(t) * G(t) + N \quad (1)$$

$R(t)$ 수신신호이며, 이때 $S(t)$ 는 LED 송신신호이다. N 은 노이즈로 AWGN모델이며, $*$ 은 컨벌루션, γ 은 O/E 변환 효율이다[6].

2.2 LOS환경에서 광 수신 효율

가시광 통신 시스템에서 송수신기간 신호전달 모델은 LOS에 의한 신호와 램버시안 모델의 반사광 신호로 전달된다. 여기에서 LOS는 중간에 장애물이 없는 직선상의 광 파장 전달 경로이며, 반사광은 실내 장애물 및 벽면 등에 의해 반사된 신호 환경을 의미한다. 이러한 환

경에서 신호의 평균 세기와 수신신호는 다음과 같다.

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t) dt \quad (2)$$

또한, LED조명에서 송신된 평균 수신 광 파장은 LED 송신신호의 세기에 채널환경이 곱해진 형태로 다음과 같다.

$$P_r = H(0)P_t \quad (3)$$

이때, $H(0)$ 는 Channel DC gain으로 다음과 같다.

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi \geq \psi_c \end{cases} \quad (4)$$

여기서, $T_s(\psi)$ 는 optical filter gain 이고 ψ_c 는 수신 PD의 FOV(Field of View)이다. A 는 PD에서 검출되는 물리적인 지역, d 는 송수신기 사이의 거리를 나타낸다[7,8].

반사광에 따른 수신 광 신호 세기에 대한 환경의 경우 LED 조명의 방사되는 평균 광 신호 세기와 채널 이득은 직사광의 경우와 동일하다. 하지만 수신되는 광 신호 세기 경우는 직사광과 반사광의 신호 모두를 고려해야 하는 점이 직사광에 의한 수신 광 신호 세기와 다르다. 그러므로 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$P_r = \sum_{\leq D_s} \left\{ P_t H_d(0) + \int P_t dH_{ref}(0) \right\} \quad (5)$$

광 무선 링크에서 첫 번째 반사에 따른 채널 이득(Channel DC gain)은 $dH_{ref}(0)$ 이고 다음과 같이 정의된다.

$$dH_{ref}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi^2 D_1^2 D_2^2} \rho d A \cos^m(\phi) \cos(\alpha) \cos(\beta) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi \geq \psi_c \end{cases} \quad (6)$$

여기서 D_1 는 송수신기 사이의 거리이며, D_2 는 PD와 반사신호의 반사위치 거리이다. ϕ 는 반사지점의 방사각, β 는 PD의 방사각, ψ 는 입사각, ρ 는 반사계수, dA 는 실내의 반사 지역이다[9].

3. 가시광 통신 시스템의 변조 방식에 따른 Dimming level 분석

가시광 통신에 대한 기술 개발은 LED 소자의 발전과 함께 2000년경에 일본 게이오 대학에서 가시광을 이용한 통신에 대한 논문을 발표하면서 시작되었다. LED 조명 인프라가 널리 확산되면서 가시광 통신의 관심도가 증가함에 따라 가시 광 무선통신 표준화 컨소시엄인 VLC가 일본에서 결성되었다. 가시광통신의 변조에는은 VLOC에서 정의한 n-PPM, I-PPM, OOK, RZ-OOK 등이 있다.

3.1 OOK(On-Off keying)

Fig. 2.에 OOK 변조모형을 나타내었다. OOK는 송신 데이터에 대응한 송신 펄스를 온(on)과 오프(off)로 매칭하여 LED의 ON/OFF로 변조하는 일반적으로 가장 간단한 방식이다. 가시광 통신은 IM-DD 시스템을 사용하기 때문에 OOK 변조 방식이 전체 시스템 성능이 가장 좋다. OOK에서 Dimming level은 평균 50%로 유지된다. 그러나 데이터 0이 상대적으로 많아지면 Dimming level이 떨어진다. 특히 아스키코드, 바이너리 코드 사용 시 연속된 0 구간에서 OFF 시퀀스가 지속되면 Dimming level이 급감하고, Flicker 현상이 발생한다.

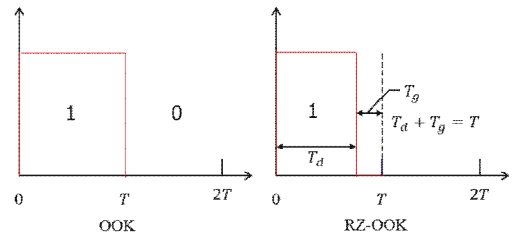


Fig. 2. OOK / RZ-OOK sequence

3.2 RZ-OOK(Return-to-zero OOK)

Fig. 2.에 RZ-OOK 변조모형을 나타내었다. RZ-OOK

변조방식은 슬롯구간 내에 비트정보가 1일 때 Zero 구간으로 귀환하는 변조방식으로 가시광의 반사나 광원간의 간섭에 강하다.[3] RZ-OOK에서 Dimming level은 T_g or G_I 에 영향을 받는다. 그림 1 RZ-OOK sequence에서 T_d 와 T_g 는 트레이드오프 관계로, 각각의 증감에 따라 Dimming level이 0 ~ 50% 까지 변화한다. $T_d + T_g = T$ 에서 $T_g = 0, T_d = T$ 일 때 최대 Dimming level 50%를 가지며, 이때 OOK와 동일한 밝기를 가진다.

3.3 PPM(PulsePositionModulation)

Fig. 3.에 PPM 변조모형을 나타내었다. PPM 변조는 펄스 변조중 하나로 아날로그의 신호 폭에 따라 펄스의 위치가 바뀌는 형태의 변조기법이다.

그림 2는 PPM의 변조 구조 및 과형을 나타낸다. n-PPM은 펄스 위치 변조이기 때문에 비트가 0인 구간에서도 ON상태를 유지할 수 있어, 0이 연속으로 존재하는 구간에서도 균등한 Dimming level을 가진다. 그러나 구간 T 에서 n 만큼의 슬롯으로 나뉘지기 때문에, 전체 Dimming 성능은 $\frac{1}{n}$ 만큼 감소하게 된다.

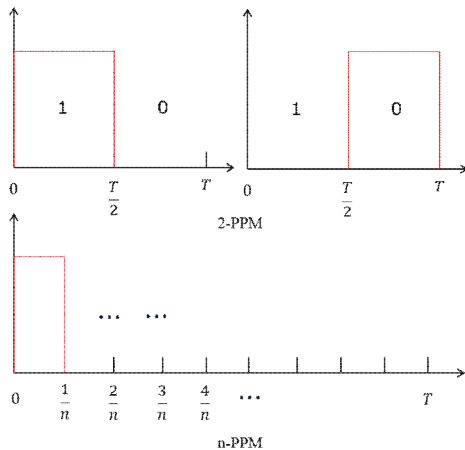


Fig. 3. N-PPM sequence

3.4 IPI-OOK(Illegal Pulse Insertion OOK)

가시광 통신 시스템에서 OOK와 RZ-OOK 변조를 사용하여 이진코드와 ASCII코드로 송신할 때, 특정 데이터 시퀀스에서 Dimming level이 급감하는 현상이 나타난다.

Fig. 4. 에서 보여 지는 바와 같이, 데이터 0이 연속적으로 이어지면 Burst Zero Duration(BZD)이 발생하여 Dimming level에 심각한 영향을 미친다. 이를 해결하기 위한 새로운 변조 방법을 Fig.5.에 나타내었다. IPI-OOK는 데이터 0이 연속적으로 발생할 때, 연속된 0 사이에 Pulse Insertion을 통해 데이터를 0'으로 변조하는 Illegal Pulse Insertion(IPI) 기법이다. RZ-OOK 변조 기법은 2장에서 보인바와 같이 보호구간 T_g 를 가진다. 이러한 보호구간을 이용하여 데이터 0이 연속적으로 발생할 시, 데이터 주기 T 구간에서 보호구간으로 사용되는 T_g 를 임의로 1신호로 변조해 LED ON신호를 발생시킨다. 이렇게 변조되는 신호를 Illegal Pulse Insertion(IPI)라고 하며 0'으로 나타낸다. 따라서 데이터 시퀀스에 연속적으로 "000" 데이터가 발생한다면, "00'0"을 전송한다. 이러한 기법으로 보호구간 T_g 에 따라 Dimming level이 최대 8.53%까지 향상된다. 또한 기존 시스템에 대비 약 119.31% Dimming level이 증가한다[10].

Table 1.에 각각의 변조기법과 Dimming level의 관계를 정리하였다.

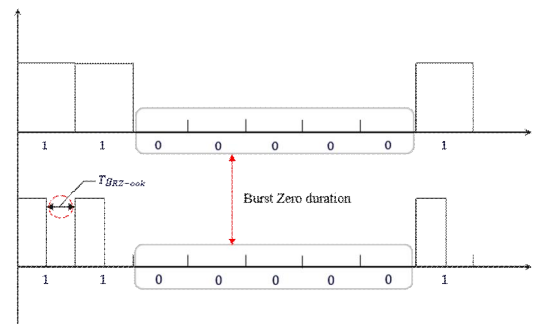


Fig. 4. Burst Zero Duration in OOK/RZ-OOK [10]

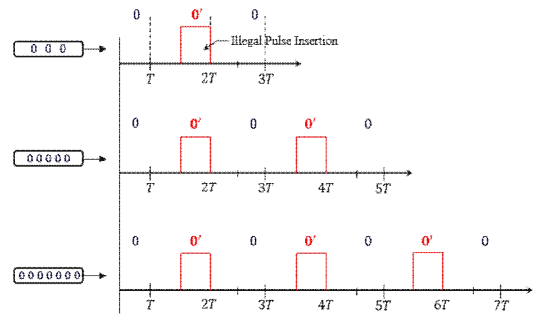


Fig. 5. Illegal Pulse Insertion (IPI) algorithm[10]

Table 1. Dimming level according to modulation method

Modulation	Dimming level
OOK	$D_{OOK} = 50\%$
RZ-OOK	$D_{RZ-OOK} = \begin{cases} 0 & T_g = T, T_d = 0 \\ 50\% & T_g = 0, T_d = T \end{cases}$
n-PPM	$D_{PPM} = \frac{1}{n}\%$
IPI-OOK	Up to 119% higher than existing systems, depending on frequency of BZD

4. 지연신호로 인한 신호왜곡이 시스템에 미치는 영향

3장에서 가시광 통신 시스템의 변조기법인 OOK와 RZ-OOK, n-PPM, IPI-OOK의 특징과 Dimming level에 미치는 영향에 대해서 알아보았다. 하지만 이러한 특성은 수신된 신호가 지연되거나 왜곡되지 않는다는 가정하에 최대 성능을 만족한다. 그러나 실제 통신 환경에서는 수신기의 거리차로 인한 약간의 지연시간 t_d 초 이후에 신호가 수신되고, 지연된 신호인 $R(t-t_d)$ 신호가 수신되게 된다. 신호가 전파되는 동안 변조된 파형의 변화는 복원된 신호 품질에 상당한 영향을 미친다.

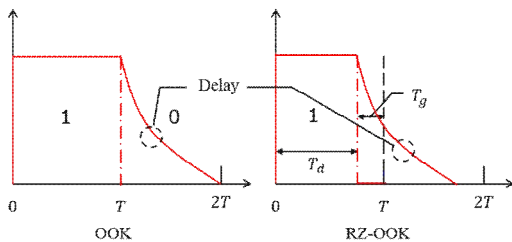


Fig. 6. Signal distortion due to delay in OOK / RZ-OOK

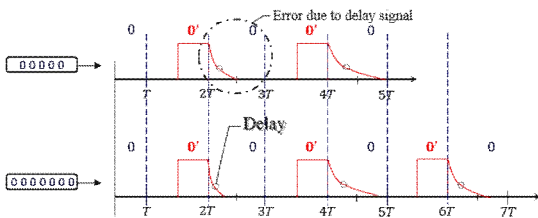


Fig. 7. Signal distortion due to delay in IPI-OOK

Fig. 6과 7에 이러한 수신지연으로 인해 발생하는 지연신호를 나타내었다. 그림에서 보이는 것처럼 수신 지연된 신호로 인해 신호가 왜곡되어 다음 주기에 까지 신호가 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 신호로 인해 원 신호를 정확하게 복원 할 수 없게 되고, Dimming level이 일정하지 못하게 된다. 이러한 현상은, IM-DD 베이스 변복조 방식을 사용하는 가시광 통신에서 더욱 큰 영향을 미친다. 특히 Dimming level 효율 개선을 위한 IPI-OOK에서 가장 큰 문제가 생긴다. 그림7에 도시된 바와 같이 연속된 0 구간이 5개 이상 발생하는 Burst Zero Duration 구간에 적용된 IPI-OOK에서, 각각의 삽입된 0' 펄스 신호가 인접한 다음 시퀀스에 모두 영향을 주게 되면 원래의 신호를 복원하기가 어렵게 된다.

5. 시뮬레이션 및 파라미터

컴퓨터 시뮬레이션을 통해 IPI-OOK에서 수신지연 신호로 인해 발생하는 신호 왜곡이 시스템에 주는 영향을 분석하였다. 또한, Burst Zero Duration이 발생할 확률에 따른 Dimming level을 분석하고 IPI-OOK와 OOK의 성능을 비교하였다.

Table 2. Simulation parameter

Number of LED	1
Subcarrier	128
Number of data symbol in one frame	64
Number of pilot symbol	4
Primary modulation	IPI-OOK
Modulation Scheme	IM-DD
Symbol rate	400 Mbps
Optical channel	AWGN channel
Number of multipath	4
FEC	Convolutional R=1/2
Background light noise	0 dBm
O/E convert efficiency	0.52[A/W]

Table 2에 시뮬레이션 파라미터를 나타내었다. 광원에 관한 변조 기법은 IM-DD 기법을 사용하고 Primary modulation으로 IPI-OOK를 사용하였다. 부호화율은 1/2, 잡음 모델은 실내에서 LED-ID 통신 시스템을 사용하기 때문에 AWGN으로 모델링 한다.

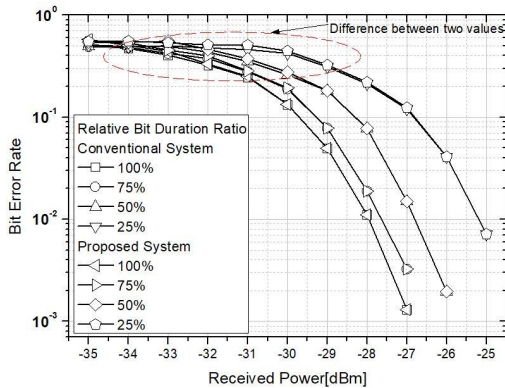


Fig. 8. BER performance of delayed IPI-OOK signal and general signal

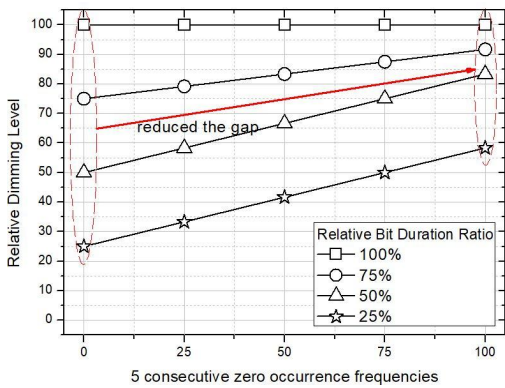


Fig. 9. When the probability of occurrence of the BZD interval is [0%, 25%, 50%, 75%, 100%], IPI-OOK Dimming level

Fig. 8. 에는 IPI-OOK에서 수신지연 신호로 인해 IPI가 삽입된 ZBD구간에서 신호 왜곡이 발생한 경우와 수신지연 없는 정상 수신 BER을 비교하여 나타내었다. 그림에서 보이는 것처럼 수신 지연신호로 인해 왜곡된 신호의 성능이 저하되는 것을 확인 할 수 있다. 기존의 0데이터 열에 특정 포지션으로 IPI를 삽입하는 형태인 IPI-OOK에서는 전체 비트 중 소수의 비트에 지연이 발생하더라도, 연속되는 0 데이터 비트 5개가 오류가 발생하게 된다. 그러나 높은 수신 전력으로 갈수록 이러한 왜곡으로 인한 성능차이가 점차 감소함을 보인다.

Fig. 9. 에는 0비트 데이터가 연속 5개가 발생하는 BZD구간이 발생할 확률이 [0%, 25%, 50%, 75%, 100%] 일 때, 기존 시스템인 OOK대비 IPI-OOK의 Dimming level을 나타내었다. BZD가 발생할 확률이 0%인 구간에서는 OOK와 동일한 최대 50%의 밝기를 가진다. 또한 각

각 발생확률이 증가함에 따라서, Dimming level또한 발생확률에 비례해서 증가함을 알 수 있다.

이러한 분석 결과를 통해, IPI-OOK는 기존의 OOK보다 BZD에 따른 Dimming level의 개선효과는 확실히 있으나, 지연 신호로 인해 발생하는 왜곡에 취약하다는 것을 알 수 있다. 따라서 이를 보완할 신호동기화 기법이나 잡음제거 기법이 필요하다.

6. 결론

본 논문에서는 가시광 통신시스템의 변조 방식과 변조 방식이 Dimming level에 미치는 영향을 분석하고, 지연 신호로 인한 왜곡이 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 현재 가시광 통신에서 가장 많이 사용되는 변복조 방식들은 통신 성능은 증가하나 전체 조명의 밝기를 감소시키는 결과를 나타낸다. 이를 해결하기 위한 방법 중 하나인 IPI-OOK의 경우 통신의 성능과 조명의 성능 양쪽 모두를 만족하는 변조 기법이다. 그러나 이상적인 신호 환경과 다르게, 실제 통신환경에서는 신호 지연으로 인한 왜곡이 발생한다. 분석결과 이러한 왜곡은 IM-DD 방식을 사용하는 가시광 통신에 큰 영향을 주었으며, 특히 IPI-OOK방식에서 사용하는 IPI삽입 데이터열 오류발생 확률이 매우 높았다. 따라서 이러한 신호 지연을 보정할 보완 기법이 반드시 필요하다. 시뮬레이션을 통해 보인 것처럼 낮은 수신 전력으로 갈수록 이러한 왜곡현상이 심화되기 때문에, 이러한 특성에 맞는 잡음제거 필터링 기법 등이 다각도로 연구되어야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] A. Z. Suriza, Sharmin Akter & M. Shahnan (2017). Preliminary analysis of dimming property for visible light communication. *IEEE 4th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (ICSIMA)*, 1-5
- [2] Y. Tanaka, T. Komine, S.Haruyama & M. Nakagawa. (2003). Indoor visible light data transmission system utilizing white LED lights. *IEICE TRANS. COMMUN, E86B(8)*, 2440-2454.
- [3] D. G. Kim (2014). *Current status and direction of 5G modile communication R&D Information and*

Communication, 23-28.

- [4] K. T. Kim & K. J. Lee. (2017). Performance Evaluation and Analysis of Zero Reduction Codes for Effective Dimming Control in Optical Wireless Communications using LED Lightings. *Journal of Convergence for Information Technology*, 7(3), 97-103.
- [5] S. Shao, A. Khreishah & I. Khalil. (2016). Joint link scheduling and brightness control for greening VLC-based indoor access networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 8(3), 148.
- [6] J. S. Cha, J. Y. Kim, Y. M. Jang, J. T. Kim, K. G. Lee & K. H. Moon. (2010). A Study of applying Method of Unipolar -ZCD Spreading Code for LED-ID in Interference Environment. *Applied IIBC*, 10(6), 275-280.
- [7] I. H. Park, Y. H. Kim, J. S. Cha, K. S. Lee, Y. M. Jang & J. Y. Kim. (2010). Scalable optical relay for LED-ID system. *International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 415-420.
- [8] Z. Feng, C. Guo, Z. Ghassemlooy & Y. Yang (2018), The Spatial Dimming Scheme for the MU-MIMO-OFDM VLC System. *IEEE Photonics Journal*, 10(5), Article Sequence Number: 7907013
- [9] E. Ip & J. M. Kahn. (2006). Power spectra of return-to-zero optical signals. *Journal of Light wave technology*, 24(3), 1610.
- [10] K. J. Lee. (2018), Dimming Level Control Technique for Lighting / Communication Functions in Visible Light Communication Systems. *Journal of Convergence for Information Technology*, 8(5), 153-158.

이 규 진(KyuJin Lee)

[정회원]



- 2005년 : 경희대학교 전자공학과 공학사 (전자공학전공)
- 2007년 : 경희대학교 전파통신공학과 공학석사 (전파통신공학전공)
- 2011년 : 경희대학교 전자·전파공학과 공학박사 (전자·전파공학전공)
- 2012년 : 경희대학교 전자·전파공학과 학술연구교수
- 2013년 3월 ~ 현재 : 세명대학교 전자공학과 교수
- 관심분야 : OFDM, MC-CDMA, VLC, MIMO
- E-Mail : kyujin@semyung.ac.kr

한 두 희(Han, Doo-hee)

[정회원]



- 2011년 : 경기대학교 전자공학과 공학사 (전자공학전공)
- 2013년 : 경희대학교 전파통신공학과 공학석사 (전파통신공학전공)
- 2015년 : 경희대학교 전자·전파공학과 공학박사수료 (전자·전파공학전공)
- 관심분야 : OFDM, MC-CDMA, VLC, MIMO
- E-Mail : hdh9038@khu.ac.kr