

다중입출력 가시광통신에서 플리커 현상을 완화하기 위한 병렬 코딩 기법

Parallel Coding Scheme for Flicker Mitigation in MIMO-VLC

정진욱* 이계산** 서효덕*** 한두희*** 이규진****
(Jin-uk Jeong) (Kye-san Lee) (Hyo-duck Seo) (Doo-hee Han) (Kyu-jin Lee)
(Kyung Hee University) (Kyung Hee University) (Kyung Hee University) (Kyung Hee University) (Semyung University)

요약

본 논문에서는 다중입출력 가시광통신에서 플리커 현상을 완화하기 위한 방법에 대하여 연구하였다. LED 가시광통신은 LED의 광을 이용하여 데이터를 전송하는 기술로 조명의 역할과 동시에 네트워크 구축이 가능한 효과적인 방법이다. 최근에는 전송률 향상을 위해 다수의 송신 LED를 이용한 다중입출력 가시광통신에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 다중입출력 가시광통신은 송신 LED들 간의 광 간섭 문제와 수신부에서의 광 검출 문제, 서로 다른 데이터 비트를 전송하며 발생하는 플리커 문제점 등을 가지고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 전송률과 오류율 성능에 관한 광 간섭과 광 검출 문제는 많은 연구가 진행되고 있지만 조명의 역할을 위한 플리커 현상의 문제점에 관하여 많은 연구가 진행되지 않고 있다. 이러한 다중입출력 가시광통신에서의 플리커 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 전송 패턴의 변화를 이용한 PFM(Parallel Flicker Mitigation) 코드를 제안하고 시뮬레이션을 통해 제안하는 시스템의 플리커 완화 성능을 분석하였다.

핵심어 : 가시광통신, 플리커, 다중입출력, 패턴 코딩, 발광다이오드

ABSTRACT

Visible light communication using LED is a technique for transmitting digital data using the light of the LED. Recently, high-speed data rate plays an important role. Therefore, many scholars have researched the MIMO-VLC which is able to increase data rate using a lot of LED transmitters. However, it has problems such as light interference and flicker when transmitting different bit. Many researcher have focused on reduce interference. However it is not considered about flicker problem. Flicker is defined unstable brightness. It occurred the tired of human eyes, lowers eyesight and also decreases concentration.

In order to solve this flicker problem in MIMO-VLC, we propose the PFM(Parallel Flicker Mitigation) code. PFM code using combinatorial theory can maintain constant brightness the whole bit duration. Therefore, it is possible to assure the brightness by confirm simulation results.

Key words : Visible Light Communication, Flicker, MIMO, Pattern coding, LED

* 이 논문은 2015학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구임

* 주저자 : 경희대학교 전자정보대학 전자전파공학과 석사

** 공저자 : 경희대학교 전자정보대학 전자전파공학과 교수

*** 공저자 : 경희대학교 전자정보대학 전자전파공학과 박사과정

**** 교신저자 : 세명대학교 전자공학과 교수

† Corresponding author : Kyu-jin Lee(Semyung University), E-mail kyujin@semyung.ac.kr

† Received 16 February 2016; reviewed 17 March 2016; Accepted 16 May 2016

1. 서 론

LED(Light Emitting Diode)를 이용한 가지광통신 VLC(Visible Light Communication) 시스템은 LED의 빠른 응답속도를 통해 조명의 역할을 하면서 동시에 데이터 전송을 가능하게 하는 융합 기술로 기존의 RF(Radio Frequency) 통신의 자원 부족 문제를 해결할 수 있는 차세대 정보통신 기술로 주목받고 있다[1]. 가지광통신은 LED조명을 사용하는 곳이면 어디든지 네트워크를 구축할 수 있으며, 전자파의 유해성이 없고 주파수 규제에서 자유로운 장점이 있다. 가지광통신의 연구는 한국과 일본, 미국 등 전 세계적으로 활발하게 진행 중이며[2], 2011년 IEEE 802.15.7 기술표준으로 표준화되었다[1]. 최근에는 데이터 전송률 향상과 오류율 감소를 위해 다수의 LED를 사용하는 다중입출력 가지광통신 기법이 활발히 연구되고 있다[3]. 그러나 다수의 LED를 이용한 다중 입출력 가지광통신은 송신 LED간의 광 간섭으로 인한 성능 저하와 다수의 LED들이 ON OFF를 반복하며 발생하는 밝기 변화에 따른 플리커 발생 문제점을 가지고 있다. 다중 LED 사용으로 인하여 발생하는 문제를 해결하기 위한 연구로서 수신 전력 차이를 이용한 LIC(Layed Interference Cancellation) 기법이나[4], 채널 상관을 줄이기 위해 angle diversity를 이용하여 공간 다중화 이득을 얻는 기법[5], 수신부에서 렌즈를 통해 다수의 송신 광을 분리하여 간섭을 최소화하는 기법들에 더해[6, 7], 다중 LED의 수신 경로 차이로 발생하는 심볼간 간섭을 완화시키기 위한 시간 동기화 기법 등이 연구되고 있다[8].

하지만 다중입출력 가지광통신에서 조명의 역할을 수행하기 위한 필수 조건인 플리커 문제는 많은 연구가 되고 있지 않다. 플리커란 인간의 눈이 감지할 수 있는 밝기 변화를 뜻하는 것으로, 기존에는 단일입출력 가지광통신을 기준으로 OOK-Manchester code, 라인 코딩, PPM(Pulse Position Modulation) 등의 변조기술을 통한 플리커 완화 기술이 활발히 연구되었지만[1], 이러한 기술들은 단일입출력 가지광통신에서 LED가 연속적으로 꺼지는 경우를 방지하는

플리커 완화 기법이기 때문에 다수의 송신 LED가 디지털 신호를 보내기 위해 같은 주기 내에서 서로 다른 ON OFF를 반복하는 다중입출력 가지광통신에서는 적합한 플리커 완화 기법이 될 수 없다. <Fig. 1>에서 2개의 LED가 OOK(On Off Keying) 변조방식을 이용하여 서로 다른 신호를 전송하며 나타나는 밝기 변화에 따른 플리커 현상을 나타내었다.



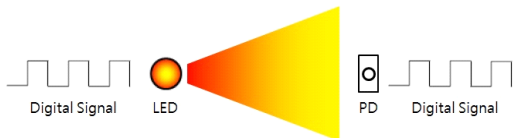
<Fig. 1> Example of Flicker

위 그림을 보면, 첫 번째 데이터 전송 주기에는 밝기가 0, 두 번째 데이터 전송 주기에는 밝기가 1, 마지막 데이터 전송 주기에는 밝기가 2인 것을 알 수 있는데, 데이터 전송 주기에 따라 밝기가 일정하지 않은 것을 알 수 있다. 전송에 사용되는 LED의 수를 N이라고 하면, 0~N까지의 밝기 변화가 발생한다. 즉, 고속 전송을 위해 송신 LED의 개수가 늘어날수록 밝기 변화의 변동 폭과 단계가 증가한다. 이러한 조명의 밝기 변화는 일반 환경에서 인간의 눈에 피로를 주고 시력을 저하시키며, 집중력 감소와 광과민성 발작, 두통 등 각종 질환의 원인이 되는 문제점을 가지기 때문에 가지광통신에서 플리커를 완화하는 기법은 꼭 고려되어야 한다. 가지광통신에서는 전송속도가 매우 빨라지면 플리커 현상은 인간의 눈으로 인식하기 어렵지만, 참고문헌 [9]에 따르면 인식되지 않는 플리커 현상도 두통이나 눈의 피로를 야기한다는 결과가 있어 고속 전송의 다중입출력 가지광통신에서도 플리커 완화 방법이 고려되어야 한다. 밝기의 변화 폭이 0~펄스의 진폭까지인 단일 입출력 가지광통신에 비해 다중 입출력 가지광통신에서의 밝기 변화 폭은 0~펄스의 진폭에 송신 LED의 개수를 곱한 값이 됨으로 다중입출력 가지광통신에서의 밝기 변화의 폭은 단일 입출력 가지광통신에 비해 송신 LED이 개수에 비례해 커지며 플리커 완화의 중요성은 더욱 커진다. 따라서

본 논문에서는 다중 입출력 가시광통신 환경에서 PFM(Parallel Flicker Mitigation) 코딩을 통하여 데이터 전송 주기에 따라 일정한 밝기를 유지하여 플리커 현상을 완화할 수 있는 방법을 제안한다. 제안하는 병렬 패턴 코딩은 일정한 밝기를 유지할 수 있음과 동시에 오류 검출 능력을 가진다.

II. 가시광 통신 시스템

가시광 통신 시스템은 LED 발광 장치로 이루어진 송신부와 빛 에너지를 전기 에너지로 바꾸는 소자인 광전 다이오드 PD(Photo Diode)로 이루어진 수신부로 구성되어 있으며 <Fig. 2>와 같이 표현된다.



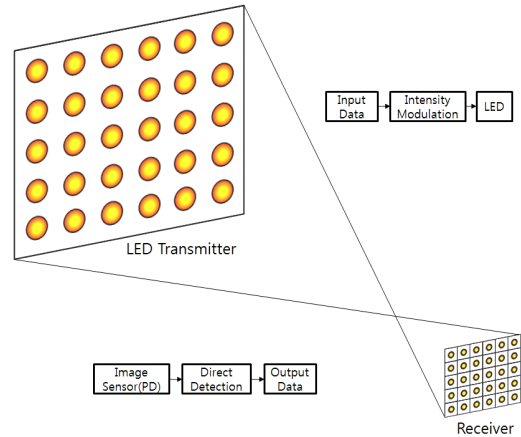
<Fig. 2> Single Input Single Output-VLC

송신부인 LED에서는 광원의 세기변조 IM(Intensity Modulation)을 통하여 광의 세기를 변화시켜 디지털 신호를 전송하며, 수신부에서는 광전 다이오드 PD가 직접 검출 DD(Direct Detection) 방식으로 광의 세기를 직접 전기신호로 검출하여 데이터를 수신한다. 디지털 신호는 1과 0으로 이루어진 정보로 디지털 신호의 1과 0이 LED의 ON과 OFF에 대응되어 전송된다. 사람의 눈은 초당 100번 이상으로 빛이 점멸할 경우 조명이 연속적으로 켜져 있는 것으로 인식하기 때문에 LED의 빠른 응답 속도를 이용하여 1과 0의 디지털 신호를 ON과 OFF를 반복하여 전송한다.

최근에는 고속 전송률을 요구하는 콘텐츠가 많이 생성됨에 따라, RF 통신에서와 같이 가시광 통신에서도 전송률 향상을 위한 다중 입출력(Multi Input Multi Output) 기법이 활발히 연구, 적용되고 있다.[3]

다중 입출력 가시광통신은 다수의 송신 LED와 다수의 수신 PD로 이루어진 이미지센서를 사용하

는 것으로 각각의 송신 LED에서 다른 데이터를 전송하여 데이터 전송률을 높이는 기술로 다음 <Fig. 3>과 같이 표현된다.

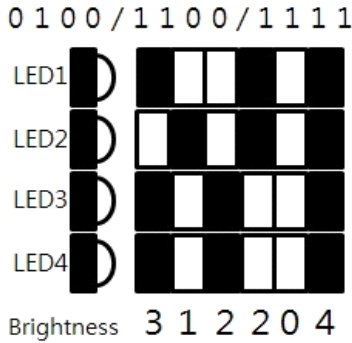


<Fig. 3> Multiple Input Multiple Output-VLC

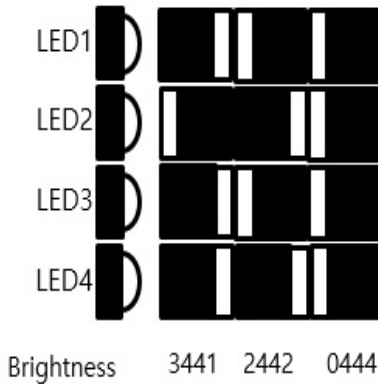
다수의 LED로 구성된 송신부에서 광의 세기를 직접 변조하여 각각 다른 디지털 신호를 전송하게 되고, 다수의 PD로 구성된 수신부에서 전송된 광의 세기에 따라 디지털 신호의 1과 0을 전기신호로 광전 변환하여 데이터를 수신한다. 이러한 다중입출력 가시광통신은 전송률을 높일 수 있지만, 송신 공간의 간섭 문제와 플리커 현상이 발생하는 문제를 가진다.

III. 다중입출력 가시광 통신의 플리커 현상

다음 <Fig. 4, 5>는 단일 입출력 가시광통신에서의 플리커 완화 기술인 Manchester code와 밝기 조절(Dimming Control) 기술인 VPPM(Variable Pulse Position Modulation)이 적용된 다중 입출력 가시광 통신에서 밝기의 변화가 발생하는 것을 나타낸다.



<Fig. 4> Brightness change about time in OOK-Manchester MIMO-VLC

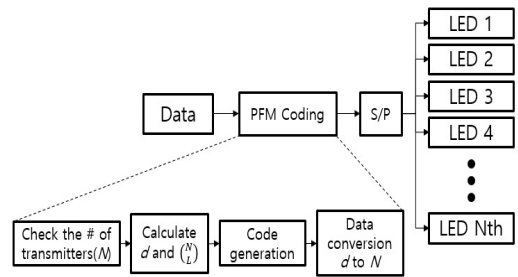


<Fig. 5> Brightness change about time in VPPM MIMO-VLC

단일 입출력 가지광통신의 플리커 방지 기술 또는 디밍 제어 기술을 적용하더라도 다중 입출력 가지광통신에서는 시간에 따라 밝기가 일정하지 않다는 것을 알 수 있다. Manchester code 뿐만이 아닌 4B6B, 8B10B, OPPM, VPPM과 같은 플리커 완화, 밝기 제어 기술을 적용하더라도 여전히 다중 입출력 전송에서는 데이터 전송 주기에 따른 밝기의 변화가 발생하게 된다[10, 11]. 특히 이러한 문제점은 긴 전송거리와 낮은 전송률을 가지는 환경에서는 더욱 큰 문제를 가져온다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 다중 입출력 가지광통신에서 병렬 패턴 코딩 방식을 이용한 플리커 완화 기법을 제안한다.

IV. PFM(Parallel Flicker Mitigation) 코딩 기법

본 논문에서 제안하는 PFM 코딩 기법은 조합 이론을 이용하여 패턴을 구성하는 것으로, 송신 LED의 개수에 관계없이 항상 일정한 밝기를 유지할 수 있어 다중 입출력 가지광통신에서 플리커 현상을 완화할 수 있다.



<Fig. 6> Structure of transmitter of MIMO-VLC with PFM coding scheme

<Fig. 6>은 제안하는 PFM 코딩 다중입출력 가지광통신 송신기의 구조를 나타낸다. 송신하려는 데이터의 비트열은 송신기의 개수에 따라 조합을 이용하여 PFM코딩되고, 직병렬 변환된 후 각 LED를 통하여 항상 일정한 밝기로 전송된다. 먼저 조합을 이용하여 송신기의 개수에 따라 코드를 정하는 방법을 알아보면 다음과 같다[12].

$$2^d \leq {}_N C_L = \frac{N!}{(N-L)! \times L!} \begin{cases} L = \frac{N}{2} & (N = \text{even}) \\ L = \frac{N+1}{2} & (N = \text{odd}) \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)은 송신기의 개수와 ON LED의 개수 및 데이터 전송률과의 관계를 표현한 식으로, d 는 한 비트주기에 전송되는 비트의 개수이며 N 은 전체 송신 LED의 개수를 뜻하고 L 은 한 비트주기 내에서 ON 상태의 LED 개수, 즉 전체 밝기를 뜻한다. 6개의 송신 LED로 한 비트주기에 최대한의 비트를 전송하는 예를 살펴보면, 조합에서는 N 이 짝수일 경우 $L = \frac{N}{2}$, N 이 홀수일 경우 $L = \frac{N+1}{2}$ 의 경우가

항상 조합의 최댓값을 가지므로, $N=6$ 이면 $L=3$ 일 때 조합은 최댓값을 가지게 되고 $d=4$ 가 되며 한 비트주기에 4비트의 데이터 전송이 가능하다. 위의 예에서 6개의 송신 LED를 이용하여 한 비트 주기에 전송할 수 있는 최대 비트수는 4비트이며, 4비트로 이루어진 비트열의 개수는 0000~1111까지 16개이고, 이 16개의 비트열을 ${}^6C_3=20$ 개의 전송에 사용 가능한 패턴 코드 중 16개로 변환하여 전송하게 된다. 총 20개의 사용 가능한 PFM 코드를 <Table 1>에 나타내었다.

<Table 1> PFM code when number of transmitter N is 6

| | LED 1 | LED 2 | LED 3 | LED 4 | LED 5 | LED 6 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 6 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 7 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 8 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 9 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 10 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 11 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 12 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 13 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 14 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 15 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 16 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 17 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 18 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 19 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 20 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

전송에 사용가능한 패턴은 항상 L 개의 '1'과 $N-L$ 개의 '0'을 가진다. 송신 LED의 개수가 6인 위의 예에서는 항상 3개의 1과 3개의 0을 가진 코드로 변환되어 전송되기 때문에 항상 일정한 밝기를 유지할 수 있게 된다. 패턴을 선택하는 과정에서 다중입출력 가시광통신의 간섭에 따른 성능을 고려한다. 위의 20가지의 패턴 코드에서 1, 4, 10, 20번

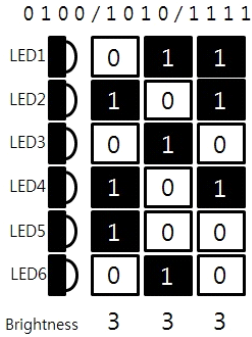
패턴 코드를 제외한 16가지의 패턴 코드를 이용하여 데이터를 전송하게 되는데 1, 4, 10, 20번 패턴 코드는 연이어 있는 LED의 거리가 가깝기 때문에 서로 간섭을 많이 줄 수 있고, 이는 전체 가시광통신 시스템의 오류율 증가를 가져오기 때문에 전송 코드에서 제외한다[6, 7]. 따라서 간섭이 큰 패턴 코드를 제외하면 전송에 사용할 패턴 코드는 다음 <Table 2>와 같이 구성된다.

<Table 2> PFM table

| Original Data | PFM Code | Original Data | PFM Code |
|---------------|----------|---------------|----------|
| 0000 | 001011 | 1000 | 100101 |
| 0001 | 001101 | 1001 | 100110 |
| 0010 | 010011 | 1010 | 101001 |
| 0011 | 010101 | 1011 | 101010 |
| 0100 | 010110 | 1100 | 101100 |
| 0101 | 011001 | 1101 | 110001 |
| 0110 | 011010 | 1110 | 110010 |
| 0111 | 100011 | 1111 | 110100 |

위 <Table 2>에 따라 본 데이터를 코드 변환한 후 송신 LED를 통해 병렬 전송한다. 항상 정해진 코드를 이용하여 전송하기 때문에 사용될 코드 이외의 데이터가 나올시 오류로 추정이 가능하여 오류 검출도 가능하다. 위의 예를 들어 보면 전송에 사용되지 않는 111000이 전송 시 오류 검출이 가능해진다. 한 비트주기에 홀수 개의 비트가 오류가 날 시 100% 오류검출 능력을 가지지만, 짝수개의 비트 오류가 나면 전송에 쓰이는 다른 코드로의 오류가 생길 수도 있기 때문에 완벽한 오류 검출은 가능하지 않다. 하지만 가시광통신의 특성상 2비트 이상의 오류가 날 확률이 매우 작기 때문에 1비트의 오류 검출 능력도 유용하게 쓰일 수 있다.

다음 <Fig. 7>은 0100/1010/1111 비트열을 패턴 코딩을 적용하여 전송하는 예로, <Table 2>와 같이 데이터들이 PFM 코딩되어 매 비트주기마다 밝기가 일정하게 유지되어 전송되는 것을 보인다.

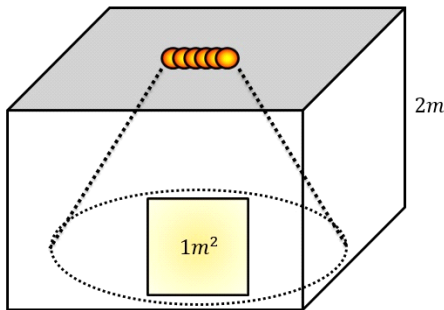


<Fig. 7> Brightness change about time with PFM coding scheme in MIMO-VLC

<Table 2>의 코드에 따라 0100은 010110으로, 1010은 101001로, 1111은 110100으로 PFM 코딩되어 매 비트주기마다 L개의 LED만 ON상태가 되기 때문에, 전체적으로 일정한 밝기를 지속적으로 유지할 수 있게 된다. PFM 코딩 전송의 경우 송신측에서의 코드 변환과 수신측에서의 코드 분석이 필요하기 때문에, 실시간 전송에 바로 적용하기에는 추가적인 연구가 더 필요하며, OOK-Manchester coding, VPPM 다중입출력 가지광통신과 비교하면 $N-d$ 개의 송신 LED의 추가가 필요하다는 단점을 가지지만, 다중입출력 가지광 통신에서 플리커 현상이 발생하지 않아 조명으로서의 필수 기능인 일정한 밝기 유지가 가능해 플리커 현상을 완화할 수 있다.

V. 시뮬레이션 파라미터 및 결과

본 논문에서 다음 <Fig. 8>과 <Table 3>은 시간에 따른 밝기 변화 측정에 필요한 매개 변수를 도식과 표로 나타낸 것이다.

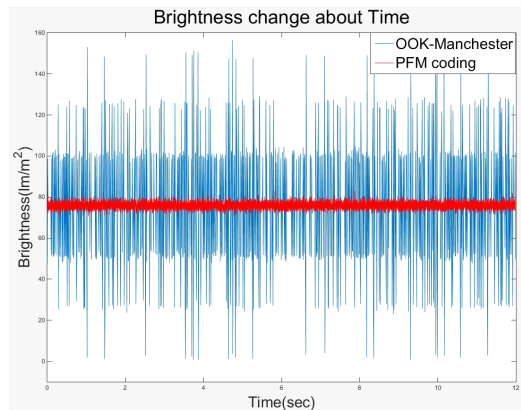


<Fig. 8> Simulation diagram

<Table 3> Simulation parameter

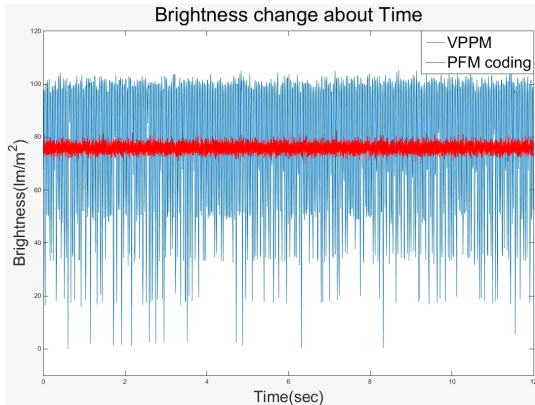
| | |
|--------------------------|--------------------|
| Number of LEDs | 6 |
| LED light efficiency | 100lm/W |
| Distance between the LED | 5cm |
| Transmission distance | 2m |
| Light measured area | 1m x 1m |
| Modulation scheme | PFM coding |
| | NRZ-OOK-Manchester |
| | VPPM |

송신 LED의 개수가 6이며 광 효율은 100lm/W로 설정하였다. 송신 LED 간의 거리는 5cm이며 변조 방식으로 OOK-Manchester, VPPM, PFM coding을 사용하여 2m 거리에서 모의 조도측정 실험을 진행하였다. 다음 <Fig. 9>는 OOK-Manchester를 사용하여 다중입출력 전송을 할 때와 PFM 코딩을 한 후 전송을 할 때의 시간에 따른 밝기 변화 그래프를 나타낸 것이다.



<Fig. 9> Brightness comparison of OOK-Manchester and PFM Coding

OOK-Manchester 전송에서 1과 0의 확률은 1/2이며, 6개의 전송LED를 사용한 PFM 코딩도 항상 3개의 ON LED를 갖기 때문에, 두 전송 모두 밝기의 평균값은 비슷하게 측정되지만, PFM 코딩 전송이 OOK-Manchester 전송에 비해 밝기의 표준편차가 약 19배 정도 작게 측정된다.



〈Fig. 10〉 Brightness comparison of VPPM and PFM Coding

〈Fig. 10〉은 제안하는 시스템과 VPPM 전송의 밝기 변화 비교를 나타낸 것이다. 75%의 Duty cycle을 가지는 VPPM 변조방식을 사용한 전송에서는 항상 비트 주기의 25% ~ 75%의 펄스에서는 모든 LED가 ON 상태를 유지하기 때문에 위의 두 방식과는 다른 밝기 변화를 가진다. 일정한 전력을 기준으로, VPPM 변조방식을 통한 전송은 다른 변조방식의 전송들과 비슷한 평균의 밝기를 가지지만 OOK-Manchester 전송에 비해 낮은 표준편차를 가질 뿐 여전히 PFM 코딩 전송에 비해 전송 비트에 따라 높은 표준편차의 밝기 변화값을 지니며 플리커 현상을 가진다. 이 경우에도, PFM 코딩 전송이 VPPM 전송에 비해 밝기의 표준편차가 약 17배 감소하였다. 이 시뮬레이션 결과들은 밝기의 변동이 줄어들어 PFM코딩 전송을 하였을 시 플리커 현상이 많이 완화된다는 것을 뜻한다.

VI. 결 론

다중입출력 가지광통신은 여러 개의 송신 LED를 사용하기 때문에 밝기의 변동 폭이 크고, 밝기 값이 LED의 수에 비례하여 커져 플리커에 매우 취약한 특성을 가진다. 이 문제를 해결하기 위해 본 논문은 다중입출력 가지광통신 시스템에서 PFM 코드를 이용한 플리커 완화 기법을 제안하였다. 제안된 시스템은 조합 이론을 사용하여 매 비트주기마다 같은

수의 LED만 켜 지기 때문에 일정한 밝기를 유지할 수 있다. 또한 사용되는 코드 이외의 것은 에러로 추정이 가능하기 때문에 오류 검출 능력도 가져 기존 시스템 보다 안정적인 QoS를 제공한다.

REFERENCES

- [1] IEEE 802.15.7 WPAN Task Group 7 (TG7) Visible Light Communication, <http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>, 2016.6.22.
- [2] Tanaka Y.(2002), "A Study on Optical Wireless Communication Systems and Their Applications," ph.D dissertation, Keio University.
- [3] Lubin Z., Dominic C. O., Hoa M. L., Grahame E. F., Kyungwoo L., YunJe O. and Eun T. W.(2009), "High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting," *IEEE J. Selected Areas In Communications*, vol. 27, no. 9. pp.1-2.
- [4] Kim K. T.(2013), "An Iterative Layered Interference Cancellation Approach for Improving the Performance of BER in VLC-OFDM system," MS. dissertation, Kyung Hee University.
- [5] Nuwanpriya A., Ho S. -W. and Chen C. S.(2014), "Angle diversity receiver for indoor MIMO visible light communications," in Proc. *IEEE Globecom Workshops (Optical Wireless Communications)*, pp. 529-534.
- [6] Wang T. Q., Sekercioglu Y. A. and Armstrong J.(2013), "Analysis of an Optical Wireless Receiver Using a Hemispherical Lens with Application in MIMO Visible Light Communications," *J. Lightwave Tech.*, vol. 31, pp.1744-54.
- [7] Chen T., Liu L., Tu B., Zheng Z. and Hu W. (2014), "High-Spatial-Diversity Imaging Receiver Using Fisheye Lens for Indoor MIMO VLCs," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no.

- 22, November 15, pp.1-2.
- [8] Seo H. D.(2013), "Performance Evaluation of the Time Synchronization Delay Diversity in Indoor Optical OFDM system using LEDs," MS. dissertation, Kyung Hee University.
- [9] Wilkins A. Veitch J. and Lehman B.(2010), "LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE Standard PAR1789 Update," *in Proc. IEEE Energy Conv. Congress Expo.*, pp.171-178.
- [10] Bai B. Xu Z. and Fan Y.(2010), "Joint LED Dimming and High Capacity Visible Light Communication by Overlapping PPM," in Proc. 19th Annu. Wireless Opt. Commun. Conf., Shanghai, China, pp.71-75.
- [11] Roberts R. D., Rajagopal S. and Lim S. K.(2011), "IEEE 802.15.7 Physical Layer Summary," GLOBECOM Workshops, 2nd IEEE Workshop on Optical Wireless Communications, Houston, USA, pp.772-776.
- [12] Hall M.(1980), *Combinatorial Theory*, Wiley, New York.

저자소개



정 진 욱 (Jeong, Jin-uk)
2012년 : 경희대학교 전자전파공학과 공학사 (전자전파공학전공)
2012년 ~ 2015년 : 경희대학교 전자전파공학과 공학석사 (전자전파공학전공)
2016년 ~ : 한국기계전기전자시험연구원 연구원
e-mail : likemoviez@khu.ac.kr



이 계 산 (Lee, Kye-san)
2002년 : 게이오대학교 전자공학과 공학박사 (정보통신전공)
2002년 ~ 2003년 : 일본 KDDI 연구원
2003년 ~ 2003년 : 일본 게이오대학교 교수
2003년 ~ : 경희대학교 전자전파공학과 교수
e-mail : kyesan@khu.ac.kr



서 효 덕 (Seo, Hyo-duck)
2011년 : 경희대학교 전자공학과 공학사 (전자공학전공)
2011년 ~ 2013년 : 경희대학교 전자전파공학과 공학석사 (전자전파공학전공)
2013년 ~ : 경희대학교 전자전파공학과 박사과정 (전자전파공학전공)
e-mail : masa0486@khu.ac.kr



한 두 희 (Han, Doo-hee)
2011년 : 경기대학교 전자공학과 공학사 (전자공학전공)
2011년 ~ 2013년 : 경희대학교 전자전파공학과 공학석사 (전자전파공학전공)
2013년 ~ : 경희대학교 전자전파공학과 박사과정 (전자전파공학전공)
e-mail : hdh9038@khu.ac.kr



이 규 진 (Lee, Kyu-jin)
2005년 : 경희대학교 전자공학과 공학사 (전자공학전공)
2007년 : 경희대학교 전파통신공학과 공학석사 (전파통신공학전공)
2011년 : 경희대학교 전자전파공학과 공학박사 (전자전파공학전공)
2011년 ~ 2013년 : 경희대학교 전자전파공학과 학술연구교수
2013년 ~ : 세명대학교 전자공학과 교수
e-mail : kyujin@semyung.ac.kr