

3-Level LED 변조를 이용한 동기식 가시광통신 시스템

이성호[†]

Synchronous Visible Light Communication Systems Using 3-Level LED Modulation

Seong-Ho Lee[†]

Abstract

In this paper, we introduce a new synchronous visible light communication system in which the synchronizing pulse and the data bits are simultaneously transmitted using a 3-level light signal. In the transmitter, the synchronizing pulse and the data bits modulate independently two identical visible LEDs, whose output lights add in free space, make 3-level optical signal. In the receiver, a photodiode detects the light and generates a 3-level output voltage, whose positive and negative part correspond to the synchronizing pulse and the data bits, respectively. The two signals are easily separated and recovered by a simple diode circuit. This configuration provides two independent VLC channels without any multiplexing technique, simplifies the circuit design and construction of synchronous VLC systems.

Keywords : Visible light communication, LED, Synchronizing pulse, 3-level modulation, Synchronous VLC

1. 서론

가시광통신(visible light communication; VLC)은 가시광을 발생하는 광원을 사용하여 조명과 통신을 겸하는 구조로서 조명이 도달하는 영역에서 무선으로 데이터를 전송할 수 있는 장점이 있어 이에 대한 원리연구 및 활용기술이 꾸준히 발전하고 있다.

VLC는 빛을 전송매체로 사용하는 무선광통신의 일종으로서, 기존의 적외선통신[1-3]과 달리 가시광을 전송매체로 사용한다. 이러한 VLC에 적합한 광원으로 가시광LED (Light Emitting Diode)가 많이 사용되고 있다[4-6]. 가시광LED는 기존의 조명광원에 비하여 크기가 작고 가벼우며, 전력소모가 적고, 수명이 길어 실내조명, 가로등 조명, 자동차 조명, 전광판 조명 등 다양한 활용분야에서 기존의 조명시설을 차츰 대체해가고 있는 추세이다.

VLC는 조명과 통신의 기능을 동시에 충족할 수 있도록 시스템의 설계와 구현 과정에서 충분히 고려하여야 한다. 특히, 데이터의 전송과정에서 깜박거림 현상이 발생하지 않고 안정된 조명상태를 지속적으로 유지할 수 있도록 잘 설계되어야 한다.

또한 VLC의 전송채널 관점에서 보면, 컴퓨터간의 UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)전송방식과 같이 비동기식으로 데이터를 전송하는 경우에는 별도의 동기신호가 필요하지 않기 때문에 1개의 VLC채널만으로도 데이터의 전송이 가능하다. 그러나 실시간 고속전송을 위하여 동기식으로 데이터를 전송하는 경우에는 데이터 비트와 함께 동기펄스도 수신부에 전송되어야 하므로, 이 2가지 신호를 동시에 보내기 위한 2개의 채널이 따로 마련되어야 한다.

이와 같이 동기식 VLC 시스템에서 동기펄스와 데이터 비트를 동시에 전송하기 위한 방법으로는 송신부에서 광원의 파장을 서로 다르게 선택하고 수신부에서 광필터를 사용하여 파장분할 전송함으로써 2가지 신호의 동시 전송이 가능하다. 또는 동일한 파장의 LED를 사용할 경우에는 기저대역의 데이터율에 비하여 훨씬 높은 주파수를 가지는 2개의 서로 다른 부반송파 주파수를 동기펄스와 데이터비트의 전송에 각각 할당하고 ASK (Amplitude Shift Keying) 혹은 FSK (Frequency Shift Keying) 방식의 반송파 변조를 실시함으로써 데이터와 동기신호를 동시에 전송할 수 있다. 그러나 이와

서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과(Department of Electronic & IT Media Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

[†]Corresponding author: shlee@seoultech.ac.kr

(Received : Aug. 10, 2013, Revised : Oct. 2, 2013, Accepted : Oct. 8, 2013)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

같은 파장분할 방식이나 주파수 분할방식의 VLC시스템은 기저대역의 전송방식에 비하여 시스템의 구조가 상대적으로 복잡해지는 부담이 있다.

본 논문에서는 동일한 종류의 가시광 LED를 사용하여, 반송파 변조를 하지 않고, 기저대역에서 3-level 광신호를 사용하여 데이터비트와 동기신호를 동시에 전송할 수 있는 새로운 동기식 VLC시스템을 개발하여 소개한다. 이 시스템의 송신부에서 동기펄스와 데이터비트로 각각 LED를 변조하여 전송하면 두 빛은 공간에서 혼합되어 3-level 광신호가 된다. 수신부에서 포토다이오드를 사용하여 이 빛을 AC검출하면 (+)전압은 동기신호이고, (-)전압은 데이터비트가 된다. 그 결과 이 전압의 (±)극성을 분리해줌으로써 동기신호와 데이터비트가 따로따로 검출되어 동기식 전송이 가능하게 된다.

이 구조에서는 VLC통신과정에서 발생할 수 있는 광원의 깜박거림 현상을 감소하고, 수신부에서 검출전압의 (±)극성에 따라 동기신호와 데이터비트가 구분될 수 있도록 만들어주기 위하여, 송신부에서 동기펄스의 펄스폭과 진폭을 각각 데이터비트의 2배로 정하고, 1개의 비트 시간을 절반으로 나누어 “0”은 “low-to-high”로, “1”은 “high-to-low” 형태로 LED의 출력광을 변조하였다.

이러한 전송방식을 사용하면 동기신호와 데이터비트의 동시전송을 위하여 동일한 파장의 가시광 LED를 사용하며, 별도의 반송파 변조를 하지 않기 때문에 시스템의 구성이 매우 간단해지는 장점이 있다.

본 논문의 제2절에서는 이러한3-level VLC 시스템의 구성과 동작원리에 대하여 알아보고, 제3절에서는 이에 대한 실험결과를 소개하는 순서로 진행하였다.

2. 시스템의 구성 및 동작 원리

2.1 송신부

3-Level 가시광을 이용하여 동기신호와 데이터를 동시에 전송하기 위한 VLC시스템의 송신부 구성도는 Fig. 1 과 같다.

송신부에서 사용되는 광원은 모두 동일한 특성을 가지는 가시광 LED이며, 이 중에서 LED1은 동기펄스를 전송하고 LED2는 데이터를 전송하는 데에 사용한다. 펄스 발생기에서는 일정한 주기로 펄스

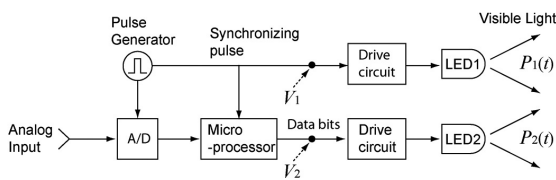


Fig. 1. VLC transmitter configuration.

를 생성하며, 이 펄스는 A/D (Analog-to-Digital) 변환기와 마이크로프로세서에 공급되어 동기펄스로 사용된다. 또한 이 동기펄스는 전류 구동회로를 통하여 LED1의 출력광을 변조함으로써 수신부로 전송된다.

A/D변환기에서는 전송하고자 하는 아날로그 입력신호를 받아 A/D 변환시키고 NRZ (Nonreturn-to-Zero)형태의 데이터 비트열을 발생하여 마이크로프로세서에 전달한다.

마이크로프로세서에서는 A/D변환기로부터 받은 NRZ 데이터를 사용하여 각 비트시간 내에서 “1”에 해당하는 신호는 “high-to-low”로 변환시키고, “0”은 “low-to-high”로 변환시킨 후 전류 구동회로를 통하여 LED2의 출력광을 변조하여 전송한다.

이와 같이 코드를 변환시킬 때 한 개의 비트시간 내에서 High상태가 차지하는 시간과 Low 상태가 차지하는 시간이 동일하게 각각 50%가 되도록 정하면, 데이터 비트열이 랜덤하게 변화하여도 LED2의 평균 광전력이 항상 일정한 상태를 유지하게 된다. 그 결과 LED2에서 깜박거림현상이 발생하지 않고 일정한 조명상태를 유지하게 된다. 송신부의 LED1과 LED2에서 출력되는 광신호를 도식적으로 나타내면 Fig. 2와 같다.

Fig. 2(a)는 동기펄스로 변조된 LED1의 광출력 $P_1(t)$ 를 나타낸다. 펄스의 주기가 T이고 펄스 폭을 τ_1 , 펄스의 진폭이 $P_{1,m}$ 일 때 LED1에서 방사되는 평균 광전력은

$$P_{1,avg} = \frac{1}{T} \int_0^T P_1(t) dt = \frac{P_{1,m} \tau_1}{T} \tag{1}$$

이다. Fig. 2(b)는 데이터비트로 변조된 LED2의 광출력 $P_2(t)$ 를 나타낸다.

한 주기 T 내에서 왼쪽부터 오른쪽 순서로 비트열이 순차적으로 전송되며, 8비트 전송데이터가 “00010001”일 때를 예로 나타낸 것이다. 각 비트시간 내에서 “0”은 “low-to-high”로 변화하고, “1”은 “high-to-low”로 변화하도록 구성하며, 1개의 비트시간을 τ_2

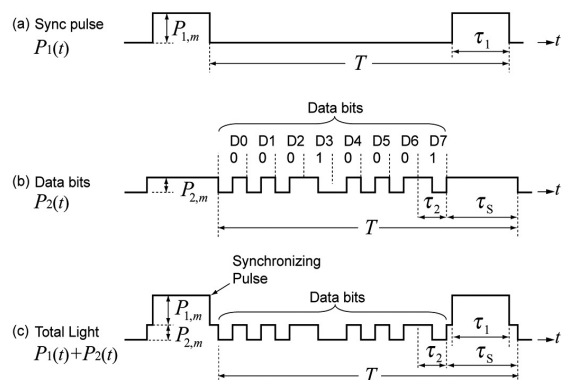


Fig. 2. Light signal from the VLC transmitter.

하고 할 때 각 비트에서 High 상태와 Low 상태는 각각 $0.5 \times \tau_2$ 의 시간을 차지한다. Fig. 2(b)에서 τ_s 는 송신부에서 A/D 변환과정과 수신부에서 D/A 변환과정을 실행하기 위하여 데이터 전송이 중지되는 시간이며, 이 시간 내에서 동기펄스가 전송될 수 있도록 동기펄스의 지속시간을 이 시간보다 짧게 정한다.

데이터 비트의 진폭을 $P_{2,m}$ 이라고 할 때 LED2에서 방사되는 평균 광전력은

$$P_{2,avg} = \frac{1}{T} \int_0^T P_2(t) dt = \frac{P_{2,m}}{T} \left(8 \times \frac{1}{2} \tau_2 + \tau_s \right) \quad (2)$$

이다. Fig. 2(c)는 LED1과 LED2의 출력광이 혼합된 상태의 광전력으로서 3-level 광신호가 된다. 빛의 세기가 제일 높은 상태는 동기신호와 데이터가 모두 High 인 상태로서 $P_{1,m} + P_{2,m}$ 에 해당한다. 두 번째로 높은 상태는 동기펄스가 Low 이고 데이터가 High 인 상태로서 그 세기는 $P_{2,m}$ 에 해당하고, 제일 낮은 상태는 동기펄스와 데이터가 모두 Low 상태로서 그 세기는 0에 해당한다. 송신부에서 방사되는 Total 광전력의 평균치는 LED1과 LED2의 평균 광전력의 합과 같다. 즉,

$$\begin{aligned} P_{t,avg} &= \frac{1}{T} \int_0^T P_1(t) + P_2(t) dt = P_{1,avg} + P_{2,avg} \\ &= \frac{1}{T} [P_{1,m} \tau_1 + P_{2,m} (4\tau_2 + \tau_s)] \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서, 동기펄스의 폭이 데이터비트시간의 2배가 되도록 정하고($\tau_1 = 2\tau_2$), 동기펄스의 진폭이 데이터비트 진폭의 2배와 같도록($P_{1,m} = 2P_{2,m}$) 변조파형을 구성하면, Total 광전력의 평균치는

$$\begin{aligned} P_{t,avg} &= \frac{1}{T} [4P_{2,m} \tau_2 + P_{2,m} (4\tau_2 + \tau_s)] \\ &= \frac{1}{T} P_{2,m} (8\tau_2 + \tau_s) = P_{2,m} \end{aligned} \quad (4)$$

이 되어 Total 광전력의 평균치가 LED2로부터 방사되는 데이터 비트의 진폭 $P_{2,m}$ 과 같아지게 된다. 여기에서 주기 $T = 8\tau_2 + \tau_s$ 이다. 시스템을 구성할 때 동기펄스의 진폭이 데이터비트 진폭의 2배가 되도록 하기 위해서는 LED 구동회로의 부하저항을 조절하여 LED1의 공급전류를 LED2의 2배가 되도록 한다.

2.2 수신부

3-Level 광신호를 받아 동기신호와 데이터비트를 복구하기 위한 수신부의 구성도는 Fig. 3과 같다.

송신부의 LED1과 LED2의 출력광이 혼합된 상태에서 PD

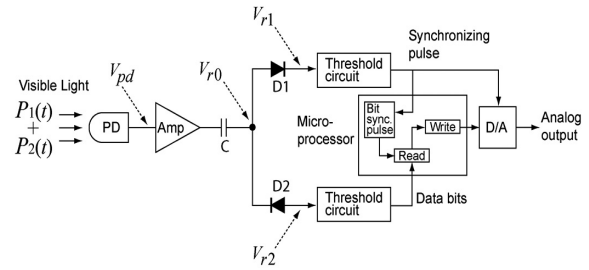


Fig. 3. VLC receiver configuration.

(photodiode)의 검출전압은

$$\begin{aligned} V_{pd}(t) &= \rho R_L [k_1 P_1(t) + k_2 P_2(t)] \\ &\cong \rho R_L k [P_1(t) + P_2(t)] \end{aligned} \quad (5)$$

이 된다. 여기에서 ρ 는 광검출기의 응답도, R_L 은 부하저항을 나타낸다. $P_1(t)$ 과 $P_2(t)$ 는 각각 LED1과 LED2의 순간 광전력을 나타내며, k_1 과 k_2 는 각각 LED1과 LED2로부터 PD로의 광결합계수를 나타낸다. 송신부와 수신부 사이의 거리에 비하여 LED1과 LED2 사이의 거리가 매우 작은 경우에는 k_1 과 k_2 가 거의 동일하여 $k_1 \cong k_2 \cong k$ 로 나타낼 수 있다.

식(5)의 PD전압을 증폭한 후 커패시터 C를 통하게 되면 평균전압이 Ground 레벨로 이동하게 된다. 따라서 Fig. 3에서 전압 V_{r0} 를 수식적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{r0}(t) &= \rho R_L k G [P_1(t) + P_2(t) - P_{t,avg}] \\ &= \rho R_L k G [P_1(t) + P_2(t) - P_{2,m}] \\ &= \rho R_L k G [P_1(t) + P_2(t)] - V_{2,m} \end{aligned} \quad (6)$$

이다. 여기에서 $V_{2,m} = \rho R_L k G \times P_{2,m}$ 이며, G는 증폭기의 전압이득이고, $P_{2,m}$ 은 앞의 식(4)에서와 같이 송신부로부터 방사되는 Total 평균 광전력 $P_{t,avg} = P_{2,m}$ 이다. 식(6)의 전압을 사용하여 동기펄스와 데이터 비트를 복구하는 과정을 도식적으로 나타내면 Fig. 4와 같다.

Fig. 4에서 보인 파형 (a), (b) (c)는 각각 Fig. 3의 수신부에 표기된 전압 V_{r0} , V_{r1} , V_{r2} 에 해당한다. Fig. 4(a)는 식(6)의 $V_{r0}(t)$ 를 도식적으로 나타낸 것이며, GND를 중심으로 (+)전압부분은 동기펄스, (-)전압부분은 데이터 비트에 해당한다. 이와 같이 (+)극성이 서로 다른 2개의 파형으로 중첩된 전압은 다이오드를 사용하여 (+)전압과 (-)전압을 따로 분리할 수 있으며, 이들이 각각 동기신호와 데이터 비트가 된다.

Fig. 4(b)는 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 $V_{r0}(t)$ 가 순방향 다이오드(D1)를 통과한 후 검출되는 전압 $V_{r1}(t)$ 을 도식적으로 나타낸다. 이

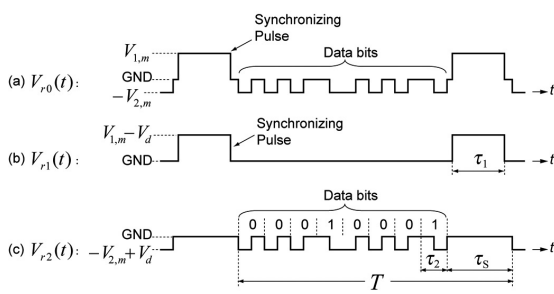


Fig. 4. Waveforms in the VLC receiver.

전압을 수식적으로 표현하면

$$V_{r1}(t) = \begin{cases} V_{1,m} - V_d, & \text{when } V_{r0}(t) \geq V_d \\ 0, & \text{when } V_{r0}(t) < V_d \end{cases} \quad (7)$$

이 된다. 여기에서 $V_{1,m} = \rho R_L kG \times P_{1,m}$ 이며, V_d 는 다이오드의 순방향 전압강하를 나타낸다. 식(7)에서 $V_{r1}(t)$ 는 송신부의 동기펄스와 데이터 비트가 모두 High 상태일 때, 즉 $P_1(t) = P_{1,m}$ 이고 $P_2(t) = P_{2,m}$ 일 때는 이 값을 식(6)에 대입하면 $V_{r0}(t) = V_{1,m}$ 이 되며, 이 값이 V_d 보다 큰 상태, 즉 $V_{r0}(t) \geq V_d$ 인 상태에서는 진폭이 $V_{1,m} - V_d$ 인 동기펄스가 나타난다. 반면에 송신부에서 동기펄스가 Low 상태일 때, 즉 $P_1(t) = 0$ 일 때는 식(6)에서 $V_{r0}(t)$ 가 0 이하다 되어 $V_{r0}(t) < V_d$ 인 상태가 되므로 $V_{r1}(t) = 0$ 이 된다.

Fig. 4(c)는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 $V_{r0}(t)$ 가 역방향 다이오드(D2)를 통과한 후 검출되는 전압인 $V_{r2}(t)$ 을 도식적으로 나타낸다. 이 전압을 수식적으로 표현하면

$$V_{r2}(t) = \begin{cases} 0, & \text{when } V_{r0}(t) \geq -V_d \\ -V_{2,m} + V_d, & \text{when } V_{r0}(t) < -V_d \end{cases} \quad (8)$$

이다. 여기에서 $V_{2,m} = \rho R_L kG \times P_{2,m}$ 이며, V_d 는 다이오드의 순방향 전압강하를 나타낸다. 식(8)에서 $V_{r2}(t)$ 는 송신부의 데이터 비트가 High 상태일 때, 즉 $P_2(t) = P_{2,m}$ 일 때는 이 값을 식(6)에 대입하면 $V_{r0}(t)$ 가 (+)전압이 되므로, $V_{r0}(t) \geq -V_d$ 이 되어 $V_{r2}(t) = 0$ 이 된다. 반면에 송신부의 동기펄스와 데이터 비트가 모두 Low 인 상태, 즉 $P_1(t) = 0$ 이고 $P_2(t) = 0$ 일 때는 이 값을 식(6)에 대입하면 $V_{r0}(t) = -V_{2,m}$ 이 되며, 이 값이 $-V_d$ 보다 작은 상태, 즉 $V_{r0}(t) < -V_d$ 인 상태에서는 진폭이 $-V_{2,m} + V_d$ 인 데이터 비트가 나타난다. 식(7)의 동기펄스와 식(8)의 데이터비트는 각각 임계치가 진폭의 1/2이 되는 판별회로를 통과함으로써 송신부에서 보낸 동기펄스와 데이터 비트가 수신부에서 최종적으로 복구된다.

위와 같은 과정을 통하여 복구된 동기신호와 데이터를 마이크로

프로세서를 경유하여 D/A 변환기에 전달하면 D/A 변환기의 출력 단에는 송신부의 입력단에 가해진 아날로그 입력신호와 동일한 신호가 생성되어 출력된다.

3. 실험

3.1 송신부 구성 및 파형관측

제2절에서 소개한 3-Level VLC 시스템의 동작과정을 실험적으로 확인해보기 위하여 앞의 Fig. 1과 같이 VLC 송신부를 구성하였다. 송신부에서 사용한 A/D 변환기는 Analog devices 사의 8비트 A/D 변환기인 AD7822를 사용하였고, 마이크로프로세서는 Atmel 사의 Atmega32를 사용하였다. 실험에 사용한 LED는 모두 동일하게 1 W의 백색광을 출력하는 HELIO Opto-electronics사의 HMHP-E1LW를 사용하였다. LED1과 LED2를 사용하여 실내 조명등의 형태로 만들기 위하여 원형의 PCB기판 위에 총 12개의 LED를 배열하여 LED-array를 구성하고, 이중 6개의 LED를 병렬로 연결하여 동기신호의 전송을 위한 LED1으로 사용하고, 나머지 6개를 병렬로 연결하여 데이터 전송을 위한 LED2로 사용하였다. 이 LED-array를 수직의 지지대에 부착하여 실내의 천정 가까이 설치하였으며, 그 외관은 3.3절의 Fig. 10와 같다. Fig. 5는 송신부에서 발생한 동기펄스와 데이터 비트의 전압을 오실로스코프 상에서 관측한 파형이다.

Fig. 5 (a)는 송신부의 펄스발생기에서 생성한 동기펄스의 파형으로서 Fig. 1의 구성도에서 전압 V_1 을 나타낸다. 동기펄스의 주기는 $T = 64 \mu s$, 펄스폭은 $\tau_1 = 12 \mu s$ 이었다. 송신부에서 이 동기펄스를 사용하여 마이크로프로세서의 인터럽트 루틴을 수행하고, A/D 변환기를 구동하였다. 또한 이 동기펄스를 사용하여 LED1의 출력광을 변조하여 수신부로 전송하였다.

이 동기펄스에 따라 송신부의 A/D 변환기에서는 아날로그 입력 신호를 주기 $64 \mu s$ 에 해당하는 15.6 kHz 주파수로 샘플링하여 A/D 변환하고 8비트의 NRZ 데이터를 발생하여 마이크로프로세서에

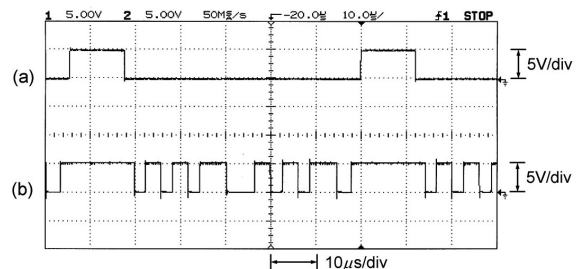


Fig. 5. Observed waveforms in the VLC transmitter; (a) Synchronizing pulse; V_1 and (b) data bits; V_2 .

전달하였다. 이 상태에서의 전송 데이터율은 $15.6k \text{ sample/s} \times 8\text{bits/sample}=124.8 \text{ kbps}$ 에 해당한다.

Fig. 5 (b)는 Fig. 1 구성도에서 전압 V_2 를 나타내며, A/D 변환기에서 발생한 NRZ 데이터를 마이크로프로세서에서 받아 “1”은 high-to-low 신호로, “0”은 low-to-high 신호로 변환한 후의 전압파형을 보여준다. 이 파형은 8비트 binary 데이터가 “00010001”인 순간에 전송되는 비트열을 나타내며, 왼쪽의 LSB로부터 오른쪽의 MSB까지 순서대로 LED2를 통하여 전송되었다.

한 개의 비트가 차지하는 시간은 $\tau_2=6 \text{ us}$ 이고, 한 개의 비트 시간 내에서 High 상태와 Low 상태가 각각 3 us 씩 유지하도록 하였으며, A/D 변환과 D/A 변환에 필요한 수행시간을 주기 위하여 $\tau_s=16 \text{ us}$ 로 정하여 사용하였다.

LED를 변조할 때 NRZ 형태의 데이터를 곧바로 사용하면 랜덤하게 변화하는 각 비트의 변화에 따라 LED의 평균 광출력이 매 순간 계속 변화하여 깜박거림 현상이 나타나게 되어 조명상태에 영향을 주게 된다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 데이터 1개가 차지하는 시간을 2등분하고 데이터의 각 비트에서 “1”은 high-to-low 신호로, “0”은 low-to-high 신호로 변환하여 LED를 구동하면 전송 데이터의 비트열이 어떤 방식으로 배열되어도 평균 광출력이 항상 일정한 상태를 유지하게 되므로 깜박거림이 사라지고 안정된 조명 상태를 유지하게 된다. 이러한 변조방법은 현재 VLC에서 문제가 되고 있는 깜박거림 현상을 해결하기 위하여 본 논문에서 새로이 고안하여 실험한 것이다.

3.2 수신부 구성 및 파형관측

3-Level VLC 시스템에서 LED신호광을 받아 동기신호와 데이터를 복구하기 위한 수신부를 앞의 Fig. 3 과 같이 구성하였다. 수신부에 사용한 포토다이오드는 응답도가 약 0.6 A/W인 PIN 포토다이오드를 사용하였으며, 천정부근에 설치된 LED-array와 테이블 위에 설치된 PD 사이의 거리는 약 1.5 m 이었다. Fig. 6는 수신부에서 동기신호와 데이터가 복구되는 과정을 오실로스코프 상에서 관측한 파형이다.

Fig. 6(a)의 파형은 앞의 Fig. 3 수신부에서 전압 V_{r0} 를 관측한 파형으로서 PD 전압이 증폭기와 커패시터C를 통과한 후에 나타나는 파형이다. 이 파형을 보면 송신부에서 동기펄스로 변조된 LED1의 출력광과 데이터로 변조된 LED2의 출력광이 혼합되어 있음을 볼 수 있다. 이 파형은 앞의 Fig. 4(a)에서 설명한 바와 같이 평균전압이 GND레벨이 되며, GND로부터 +5 V 사이의 전압은 동기펄스에 해당하고, GND로부터 -2 V 사이의 전압은 데이터 비트에 해당한다

Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)의 V_{r0} 전압이 순방향 다이오드를 통과한 후에 나타나는 동기펄스 파형으로서, 최대전압은 약 +4.4 V이고,

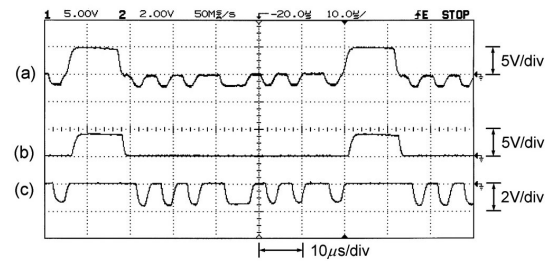


Fig. 6. Observed waveforms in the VLC receiver; (a) The detected voltage: V_{r0} , (b) synchronizing pulse: V_{r1} , and (c) data bits: V_{r2} .

최소전압은 0 V이었다. 이 전압의 진폭은 앞의 식(7)에서 보인 바와 같이 V_{r0} 의 최대전압 +5 V로부터 순방향 다이오드 전압강하인 0.6 V만큼 감소하여 약 +4.4 V가 된 것이다.

Fig. 6(c)는 Fig. 6(a)의 V_{r0} 전압이 역방향 다이오드를 통과한 후에 나타난 데이터 비트의 파형으로서, 최대전압은 0 V이고, 최소전압은 약 -1.4 V이었다. 이 전압의 최소값은 앞의 식(8)과 같이, V_{r0} 의 최소전압 -2 V로부터 순방향 다이오드 전압강하인 0.6 V만큼 증가하여 약 -1.4 V가 된 것이다. 본 시스템의 송신부에서 수신부까지의 전송대역폭은 약 300 kHz이며 rise time이 약 1.2 us이다. 유한한 전송대역폭으로 인하여 Fig. 6과 같이 신호의 edge 부분에서 rounding 현상이 나타나며 원신호를 복구하기 위하여 판별회로를 사용하였다.

Fig. 6(b)의 동기펄스와 Fig. 6(c)의 데이터 비트 전압이 판별회로(threshold circuit)를 통과한 후에 관측된 파형은 Fig. 7과 같다. 이들은 수신부에서 최종적으로 복구된 파형에 해당한다.

Fig. 7(a)는 앞의 Fig. 6(b)의 동기펄스 전압이 임계치가 최대진폭의 1/2인 판별회로를 통과한 후에 나타난 파형으로서 앞의 Fig. 5(a)에서 보인 송신부의 동기펄스 V_1 과 동일한 형태임을 알 수 있다. Fig. 7(b)는 앞의 Fig. 6(c)의 데이터 비트 전압이 판별회로를 통과한 후에 관측된 파형으로서 앞의 Fig. 5(b)에서 보인 송신부의 데이터 비트 V_2 와 동일한 형태의 파형임을 알 수 있다.

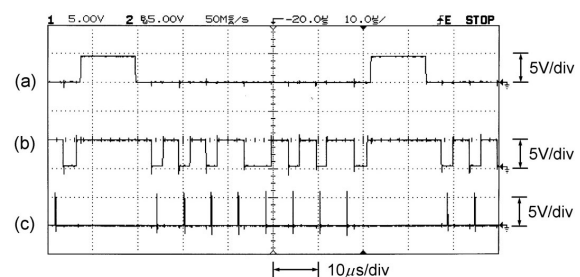


Fig. 7. The recovered signals in the VLC receiver; (a) The recovered synchronizing pulse, (b) the recovered data bits, and (c) the bit synchronizing signal.

Fig. 7(c)는 수신부의 마이크로프로세서에서 Fig. 7(a)의 동기신호의 하강지점을 기준으로 하여 일정한 간격으로 생성된 비트 동기신호로서 앞의 Fig. 3의 수신부 구성도에서 마이크로프로세서 내부의 비트동기펄스(bit sync. pulse)를 포트를 통하여 관측한 것이다.

이 비트 동기신호가 발생하는 순간에 Fig. 7(b)의 8비트 데이터로부터 '1'과 '0'의 상태를 판별하고 그 결과를 D/A 변환기에 전달한다. D/A 변환기에서는 이 데이터를 받아 송신부의 입력신호에 해당하는 아날로그 신호를 생성하였다. 수신부에 사용된 D/A 변환기는 Analog devices 사의 8bit D/A Converter AD557을 사용하였다.

3.3 실시간 음성전송에 활용

본 논문에서 제안한 3-level 동기식 VLC시스템을 활용하기 위한 하나의 예로서 LED 조명을 이용하여 실시간 음성신호를 전송하였다. 이는 실내의 LED 조명을 이용한 무선 방송시스템 또는 센서 네트워크의 구축에 활용 가능성을 고려하여 실험한 것이다.

Fig. 1의 Analog input에 컴퓨터의 오디오출력 단자를 연결하고, Fig. 3의 Analog output에 스피커를 연결하여 신호의 전송상태를 관측하였다. Fig. 8은 송신부의 입력 신호와 수신부의 출력 신호를 오실로스코프 상에서 관측한 파형이다.

Fig. 8(a)는 VLC 송신부의 입력 단에 가해진 임의의 아날로그 음성신호이며, 이 신호를 64 us 주기(15.6 kHz)로 샘플링하고 샘플당 8비트에 해당하는 124.8 kbps의 전송 데이터율로 LED 빛을 변조하여 전송하였다. Fig. 8(b)는 앞의 3.1절~3.2절에서 소개한 전송과정을 거쳐 VLC 수신부의 출력 단에 나타난 파형을 나타낸다. Fig. 8(c)는 Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)의 차이를 관찰한 파형이다. 이 차이전압은 주로 송신부로부터 수신부까지 전송 및 복구되는 과정에서 약0.2 ms 정도의 시간지연으로 인하여 발생하였다.

이 두 신호의 파형을 관찰하고 소리를 들어서 비교한 결과 본 논문의 3-level 동기식 VLC시스템이 4 kHz의 음성대역의 전송에서 원신호 파형을 충실히 복구하고 있음을 확인하였다. Fig. 9는 동기펄스를 제외한 데이터비트의 변조과정에서 NRZ 변조방식과 본

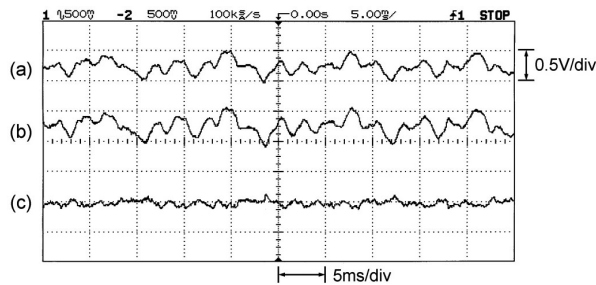


Fig. 8. Analog signals observed on an oscilloscope; (a) The input signal to the VLC transmitter, (b) the output signal from the VLC receiver, and (c) the error signal : (a)-(b).

논문의 3-level 변조방식을 사용한 경우에 발생하는 깜박거림 현상을 관측하여 비교한 것이다.

Fig. 9에서 파형(a)와 (c)는 각각 NRZ 형식의 변조방식과 본 논문의 변조방식을 사용한 경우의 수신파형이다. 파형(b)와 (d)는 각각 파형(a)와 (c)에서의 데이터비트에 의한 평균전압의 변동을 관찰하기 위하여 약 200 Hz의 차단주파수를 가지는 저역통과회로를 통과한 후에 약 10초 동안 중첩하여 기록한 파형이다. 이 상태에서는 상하로 평균전압의 변동이 심할수록 관측파형이 굵어지며, 육안으로 느끼는 깜박거림 현상이 심한 상태를 나타낸다. 파형(b)에 비하여 파형(d)에서는 평균전압의 변동이 약 1/10 이하로 줄어들어 깜박거림 현상이 크게 감소하였다.

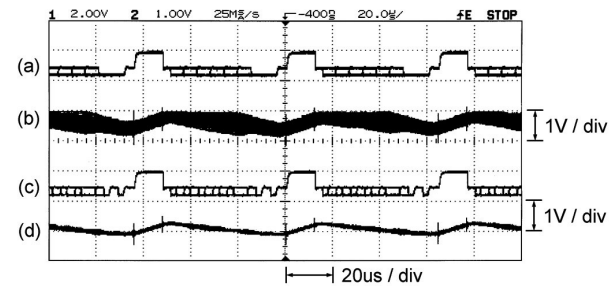


Fig. 9. The detected signal waveform and flickering; (a) The PD voltage with NRZ modulation, (b) the voltage fluctuation with NRZ modulation, (c) the PD voltage with 3-level modulation, and (d) the voltage fluctuation with 3-level modulation.

Fig. 10은 본 논문의 실험에 사용한 VLC 회로의 외관을 나타낸다. Fig. 10(a)는 실험에 사용한 LED-array로서 12개의 LED를 원형의 PCB상에 배열하여 실내에서 조명등 겸 VLC통신용으로 사용할 수 있는 형태로 제작하였으며, 이중에서 6개 LED는 동기신호의

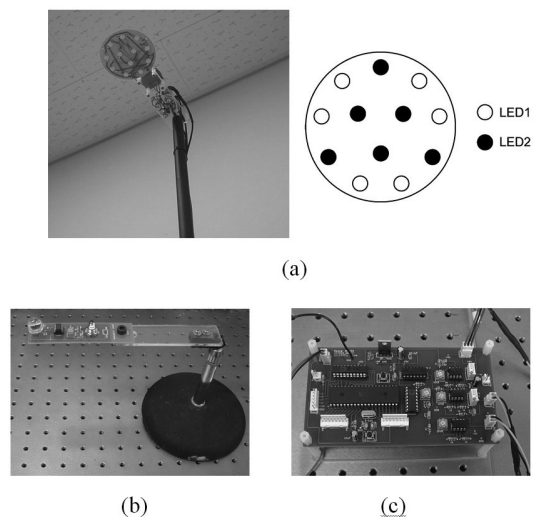


Fig. 10. VLC circuits used in experiments; (a) LED-array, (b) photodetector circuit, and (c) A/D, D/A circuit.

전송을 위한 LED1이고, 6개의 LED는 데이터 전송을 위한 LED2로 사용하였다. Fig. 10(b)는 수신부에 사용한 포토다이오드 및 증폭기 회로이며 천정 부근에 설치된 LED-array로부터 빛을 받을 수 있도록 실험테이블 상에 평면방향으로 배치하였다.

Fig. 10(c)는 마이크로프로세서와 A/D 변환기 및 D/A 변환기 회로이며, 동일한 PCB 회로 2개를 만들어 송신부에서는 A/D 변환기 회로를 사용하고, 수신부에서는 D/A 변환기 회로를 사용하였다.

4. 결론

본 논문에서는 3-level LED 광변조를 이용하여 동기펄스와 데이터 비트를 동시에 전송할 수 있는 동기식 VLC 시스템의 구조를 새로이 제안하고 실험하였다. 먼저 3-level 동기식 VLC 전송을 위한 시스템의 구성 및 동작원리에 대하여 소개하였고, 이어서 실험결과를 통하여 동작과정을 확인하였다.

송신부에서는 동기펄스와 데이터 비트를 이용하여 각각 별도의 LED를 구동하며, 데이터의 전송과정에 깜박거림 현상이 발생하지 않고 일정한 밝기를 유지할 수 있도록 데이터비트를 변환하고, 동기펄스의 펄스폭과 진폭을 각각 데이터의 비트시간과 진폭의 2배로 정하여 LED를 변조하였다. 수신부에서는 두 LED의 혼합된 빛을 수신하여 (+)전압의 동기펄스와 (-)전압의 데이터비트를 분리하여 복구함으로써 동기펄스와 데이터 비트를 동시에 전송하는 구조로 이루어져 있다.

이와 같은 3-level 동기식 VLC 시스템에서는 동기펄스와 데이터비트를 동시에 전송하기 위하여 별도의 서로 다른 파장의 광원을 사용하거나 서로 다른 반송파를 사용하여 변조할 필요가 없기 때문에 VLC 시스템의 설계와 제작과정이 매우 간편해지는 이점이 있다. 이 방식은 LED 조명을 이용한 실내의 방송이나 가로등 조명을 이용한 위치 안내시스템, LED 무선인식장치와 같은 광센서 시스템, LED 조명을 이용한 센서네트워크의 구축 등에 많이 활용될 수 있다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] A. M. Street, P. N. Stavrinou, D. C. O'Brien, and D. J. Edwards, "Indoor optical wireless systems-a review", *Opt. Quantum Electron.*, Vol. 29, pp. 349-378, 1997.
- [2] J. M. Kahn and J. R. Barry, "Wireless infrared communications", *Proc. IEEE*, Vol. 85, No.2, pp. 265-298, 1997.
- [3] S. H. Lee, "Reducing the effects of ambient noise light in an indoor optical wireless system using polarizers", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 40, No. 3, pp. 228-231, 2004.
- [4] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 50, No. 1, pp. 100-107, 2004.
- [5] S. H. Lee, "Visible light identification system using optoelectronic feedback of a lighting LED", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 20, No. 3, pp. 193-198, 2011.
- [6] Y. K. Cheong, X. W. Ng, and W. Y. Chung, "Hazardless biomedical sensing data transmission using VLC", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 13, No. 9, pp. 3347-3348, 2013.