DOI: 10.5515/KJKIEES.2011.22.5.560

가시 광통신에서 직교 편광기를 이용한 잡음광의 영향 감소

Reducing the Effects of Noise Light in A Visible Light Communication System Using Orthogonal Polarizers

황 다 현 · 이 성 호*

Da-Hyun Hwang · Seong-Ho Lee*

요 약

본 논문에서는 가시 광통신 시스템에서 편광기를 사용하여 잡음광의 간섭을 소거하였다. 송신부에서는 전송 데이터의 원 신호와 반전 신호를 사용하여 2개의 LED를 동시에 변조한 후 서로 직교하는 편광기를 통하여 출력광을 방사하고, 수신부에서는 직교하는 편광기를 통하여 수신된 2개의 신호를 차동 증폭함으로써 잡음광의 간섭을 소거하였다. 조명용 LED의 신호광에 비하여 형광등으로부터의 잡음광의 세기가 더 강한 환경에서 직교 편광기를 부착한 수신부를 사용하여 120 Hz 잡음 성분을 소거하였으며, 2개의 LED를 사용하여 원 신호와 반전 신호를 동시 전송함으로써 1개의 LED를 사용하는 경우에 비하여 조명 상태의 깜박거림을 약 1/8배로 감소하였다.

Abstract

In this paper, we reduced the optical noise interference using polarizers in a visible light communication system. In a transmitter, two light-emitting diodes(LEDs) are modulated synchronously by the original and the reversed signals of the transmitted data, and the two LED lights are radiated through orthogonal polarizers. In a receiver, two optical signals are detected through orthogonal polarizers and differentially amplified to remove the optical noise. In an environment that noise light from a fluorescent lamp is much stronger than the signal, the receiver with orthogonal polarizers removed the 120 Hz noise, and synchronous light transmission of the original and the reversed signals using two LEDs reduced the illumination flickering to about one-eighth that using one LED.

Key words: Visible Light Communication, Optical Noise, Polarizer, LED, Noise Reduction

Ⅰ. 서 론

가시 광통신(visible light communication)은 가시광선 대역의 빛을 자유 공간에 방사하여 조명과 통신을 겸하는 방식으로서 하나의 시스템으로 조명과 통신의 2가지 기능을 동시에 수행하기 때문에 구성이 간편하고 사용하기에 편리한 장점이 있다. 가시광통신에서 사용하는 광원은 조명과 통신의 특성을 동시에 가져야 하기 때문에 가시 광선을 발생시켜야 하고, 빛의 강도를 빠른 속도로 변조할 수 있는 기능을 가져야 한다. 이러한 목적에 맞는 광원으로 최근에 들어 기술이 빠르게 발전하고 있는 조명용 발광

서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원(Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology)

*서울과학기술대학교 전자정보공학과(Department of Electronic & Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

· 논 문 번 호: 20110304-021

· 교 신 저 자: 이성호(e-mail: shlee@snut.ac.kr)

· 수정완료일자: 2011년 5월 11일

다이오드(LED: Light-Emitting Diode)가 있다. LED는 반도체의 PN 접합에서 자연 방출을 이용하여 빛을 생성하는 소자로서 크기가 작고 가벼우며, 기계적인 충격에 강하고 수명이 길어 기존의 조명 시설을 점차 대체해 가는 추세이며, 자동차 조명, 가로등 조명, 실내 조명, 식물재배용 조명 등 그 활용 범위가 계속 넓어지고 있다. 현재 많이 사용되고 있는 조명용 LED의 발광 파장은 대부분 400～700 nm 부근의 가시 광선의 영역에 해당한다.

조명용 LED를 사용하여 통신을 겸하는 시스템을 구성할 때 주변에 형광등이나 백열등과 같은 다른 조명 시설이 있는 환경에서는 이러한 조명 시설로부터 발생하는 빛 때문에 수신부에서 간섭이 나타날 수 있으며, 그 결과 전송 과정에 문제가 발생할 수 있다. 이와 같이 잡음광의 영향이 심한 환경에서는 잡음을 줄일 수 있는 방안도 함께 고려하여 시스템을 구성하여야 한다. 신호광과 잡음광의 파장이 다른 경우에는 광 필터를 이용하여 잡음광을 쉽게 차단할 수 있고[1],[2], 레이저와 같이 신호광에 편파 특성이 있는 경우에는 편광기를 사용하여 비교적 용이하게 잡음광을 소거할 수 있으나[3], 조명용 LED의 발광 파장은 형광등이나 백열등과 같이 가시 광선에 해당하며, 특정한 편파 방향이 없어 광 필터를 사용하여 간단히 잡음광을 소거하기 어려운 점이 있다. 따라서 잡음 주파수보다 높은 반송파를 사용하여 LED를 변조・전송하고 수신부에서 전기적 필터를 사용하여 잡음 성분을 차단하는 방식이 많이 이용되고 있다. 그러나 형광등의 경우 잡음의 스펙트럼이 LED의 변조대역폭에 근접하는 수백 kHz까지 분포하는 경우가 대부분이어서 이와 같은 반송파 변조 방식에서도 잡음광의 영향을 받는 경우가 있다.

본 논문에서는 LED를 이용한 가시 광통신에서 잡음광의 간섭을 보다 쉽게 소거할 수 있는 방법으로서 서로 직교하는 2개의 편광기를 사용한 잡음 소거방식을 새로이 제안하고, 이에 대한 실험 결과를 소개한다. 이 구조는 송신부에서 2개의 LED를 사용하여 원 신호와 반전 신호의 신호광을 동시에 발생시켜 서로 직교하는 편광기를 통과하여 방사하고, 수신부에서 직교 편광기를 통하여 수신된 2개의 검출 전압을 차동 증폭함으로써 전송 과정에 유입되는 잡음광을 소거하는 전송 방식이다. 실험에서는 조명용 LED의 신호광에 비하여 형광등으로부터의 잡음광의 세기가 더 강한 환경에서 이 방식을 사용하여 120 Hz의 잡음 성분을 소거하는 효과를 얻었다. 이와 같은 잡음 소거 효과 이외에도 이 구조가 가지는 부수적인 장점은 송신부에서 원 신호와 반전 신호를 동시에 전송함으로써 빛의 강도 변화가 상호 보완되므로 LED 변조 과정에 발생할 수 있는 조명의 깜박거림 현상을 감소하여 사용자의 시야를 편하게 해준다.

이 시스템의 활용 분야로는 톨게이트에서 사용하는 차량의 자동 인식 시스템을 들 수 있으며, 자동차의 LED 조명을 이용하여 차량 정보를 수신할 때 다른 조명 시설로부터의 간섭을 받지 않고 안전하게 시스템을 구성할 수 있다. 본 논문에서는 제Ⅱ절에서 직교 편광기를 이용한 가시 광통신의 구조와 동작 원리에 대하여 소개하고, 제Ⅲ절에서는 직교 편광기를 사용한 경우에 발생하는 잡음 소거 효과를 측정하였으며, 제Ⅳ절에서는 LED 변조 과정에서 발생할 수 있는 조명의 반짝거림 현상을 줄이는 효과에 대하여 관측하였다.

Ⅱ. 직교 편광기를 이용한 가시 광통신 시스템의 구성

가시 광통신에서 직교 편광기를 이용하여 잡음광의 영향을 소거하기 위한 시스템의 구성은 그림 1과 같다.

송신부에서 전송 데이터에 해당하는 신호 전압 v_s가 입력단에 가해지면 버퍼 회로와 반전 회로를 통하여 LED 1과 LED 2의 구동 회로에 각각 입력 신호v_s와 반전 신호 $-v_s$가 인가되고, 2개의 LED는 각각의 입력 전압에 따라 강도 변조(Intensity modulation)되어 신호광을 발생한다. LED 1과 LED 2 앞에

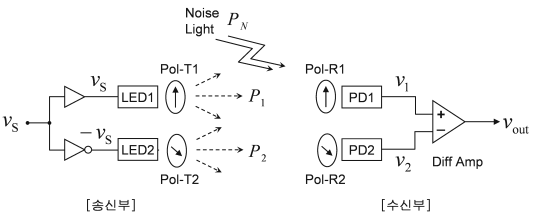


그림 1. 직교 편광기를 이용한 가시 광통신 시스템
Fig. 1. A visible light communication system using orthogonal polarizers.

는 각각 편광기 Pol-T1과 Pol-T2가 설치되어 있으며, Pol-T1의 통과축은 수직 방향이고, Pol-T2의 통과축은 수평 방향이다. 따라서 Pol-T1을 통과하여 방사되는 신호광 P_1의 편파는 수직 방향, Pol-T2를 통과하여 방사되는 신호광 P_2의 편파는 수평 방향을 유지한다. 2개의 LED가 동일한 특성을 가질 때 각각의 LED로부터 출력되는 광전력을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_1 = T_L(P_0 + P_S) \simeq \frac{1}{2}(P_0 + kv_S) \tag{1}$$

$$P_2 = T_L(P_0 - P_S) \simeq \frac{1}{2}(P_0 - kv_S) \tag{2}$$

여기에서 P_1과 P_2는 각각 LED 1과 LED 2로부터 발생하여 편광기를 통과한 후 자유 공간으로 방사되는 광전력이며, T_L은 LED의 빛이 편광기를 통과할 때 발생하는 투과계수를 나타낸다. LED는 자연 방출의 원리로 빛을 발생하는 소자이며, 출력광에 편파 특성이 없으므로 편광기를 통과할 때 $T \simeq 1/2$의 투과계수를 가진다. P_0는 LED의 바이어스 상태에 따라 결정되는 DC 광출력을 나타내고, P_S는 변조 신호 v_S에 비례하는 AC 광출력으로서 $P_S = kv_S$의 관계를 가진다. 여기에서 k는 비례상수이며, LED의 P-I 곡선의 기울기에 해당한다.

송신부의 LED 1과 LED 2로부터 방사된 신호광은 자유 공간을 따라 진행하고 수신부에 설치된 2개의 광검출기(PD: Photodetector)의 표면에 흡수되어 광전류를 생성하며, 이 전류가 부하 저항을 통과하면서 검출 전압 v_1과 v_2를 생성한다. 2개의 광검출기 PD 1과 PD 2 앞에는 각각 편광기 Pol-R1과 Pol-R2가 설치되어 있다. 이 상태에서 PD 1과 PD 2의 검출 전압을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_1 = \rho R_L(T_{11}C_{11}P_1 + T_{12}C_{12}P_2 + T_{1n}C_{1n}P_N) \tag{3}$$

$$v_2 = \rho R_L(T_{21}C_{21}P_1 + T_{22}C_{22}P_2 + T_{2n}C_{2n}P_N) \tag{4}$$

여기에서 v_1과 v_2는 각각 PD 1과 PD 2의 검출 전압이며, ρ는 PD의 응답도, R_L은 PD의 부하 저항이다. T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}는 모두 편광기의 통과 계수로서, T_{11}은 광출력 P_1이 편광기 Pol-R1을 통과할 때, T_{12}는 P_2가 Pol-R1를 통과할 때, T_{21}은 P_1이 Pol-R2를 통과할 때, T_{22}는 P_2가 Pol-R2를 통과할 때 발생하는 통과계수를 나타낸다. 편광기의 통계계수는 입사광의 편파와 통과축 사이의 각도가 θ일 경우 Malus의 법칙에 따라 $T = \cos^2\theta$로 정해진다[4]. LED 1의 광출력 P_1의 편파와 편광기 Pol-R1의 통과축이 둘 다 수직 방향이고, LED 2의 광출력 P_2의 편파와 편광기 Pol-R2의 통과축이 둘 다 수평 방향을 유지할 때 통과 계수를 계산하면,

$$T_{11} = (\overline{a_v} \cdot \overline{a_v})^2 = 1,\ T_{12} = (\overline{a_v} \cdot \overline{a_h})^2 = 0,$$
$$T_{21} = (\overline{a_h} \cdot \overline{a_v})^2 = 0,\ T_{22} = (\overline{a_h} \cdot \overline{a_h})^2 = 1 \tag{5}$$

이 된다. 여기에서 $\overline{a_v}$는 수직 방향, $\overline{a_h}$는 수평 방향의 단위 벡터를 나타낸다. 또한, 형광등이나 백열등과 같은 잡음광은 일반적으로 편파 특성이 없으므로 잡음광 P_N이 두 개의 편광기 Pol-R1과 Pol-R2를 통과하면서 발생하는 통과계수는 각각 $T_{1n} = T_{2n} \simeq 1/2$이다.

식 (3)과 (4)에서 C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}는 모두 광결합 계수로서, C_{11}는 광출력 P1이 광검출기 PD 1으로, C_{12}는 P2가 PD 1으로, C_{21}는 P1이 PD 2로, C_{22}는 P2가 PD 2로 전달되는 광결합 계수이며, 이들은 모두 수신부에 편광기가 없는 상태에서의 광결합 계수를 나타낸다. 만일 LED 1과 LED 2의 위치가 서로 근접하고, PD 1과 PD 2의 위치가 서로 근접하여, 두 LED 사이의 거리와 두 PD 사이의 거리가 모두 송·수신부 간 전송거리에 비하여 훨씬 작으며, PD 1과 PD 2가 동일한 특성을 가진 광검출기라고 할 때, 4개의 광결합 계수는 모두 동일한 값에 근접한다. 이 광결합 계수를 C_s라고 나타낼 때

$$C_{11} \simeq C_{12} \simeq C_{21} \simeq C_{22} = C_s \tag{6}$$

의 관계를 가진다.

앞의 식 (3)과 (4)에서 P_N은 형광등이나 백열등과 같은 주변의 조명 시설로부터 발생하는 잡음광 전력을 나타내며, C_{1n}과 C_{2n}은 각각 잡음광으로부터 광검출기 PD 1과 PD 2로의 광결합 계수를 나타낸다. PD 1과 PD 2 사이의 거리가 잡음광으로부터 수신부까지의 거리에 비하여 훨씬 작은 경우에는 잡음광으

로부터 PD 1과 PD 2로의 광결합 계수가 거의 동일하며, $C_{n1} \simeq C_{n2} = C_n$으로 쓸 수 있다. 이러한 관계를 고려하여 식 (1), (2), (5), (6)을 식 (3)과 (4)에 대입하여 광검출기 PD 1과 PD 2의 검출 전압을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_1 &\simeq \rho R_L (C_s P_1 + C_n P_N/2) \\ &= \frac{\rho R_L}{2}[C_s(P_0 + kv_s) + C_n P_N] \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} v_2 &\simeq \rho R_L (C_s P_2 + C_n P_N/2) \\ &= \frac{\rho R_L}{2}[C_s(P_0 - kv_s) + C_n P_N] \end{aligned} \tag{8}$$

PD 1과 PD 2의 검출 전압 v_1과 v_2를 전압 이득 G인 차동 증폭기의 입력단에 가할 때 출력 전압 v_{out}은

$$v_{out} = G(v_1 - v_2) = G\rho R_L C_s\, k \times v_s \tag{9}$$

이 된다. 이 식에서 보면 잡음광 P_N과 LED 출력광의 DC성분 P_0에 비례한 전압이 모두 소거되어 사라지고, 송신부의 입력 신호 v_S만에 비례하는 출력 전압이 검출됨을 알 수 있다. 이 출력 전압은 잡음광이 전혀 없는 환경에서 단일의 LED와 단일의 PD를 사용하여 직접 검출하는 경우에 얻을 수 있는 신호 전압의 크기와 같다. 이와 같이 수신부에서 직교 편광기를 사용하여 수신하면 잡음 성분을 소거하고, 신호 성분만 검출하게 된다.

반면에 사람이 육안으로 느끼는 조명 상태는 수신부에 편광기와 차동 증폭 과정이 없는 광검출기로 간주할 수 있다. 앞의 그림 1의 시스템 구성도에서 수신부에 편광기를 사용하지 않고 한 개의 광검출기 PD 1만을 사용하여 직접 검출하는 경우에는 LED 1과 LED 2에서 방사된 빛이 혼합되어 검출된다. 이 때에는 앞의 식 (3)에서 편광기의 통과 계수가 모두 1이며($T_{11} = T_{12} = T_{1n} = 1$), 신호광 결합 계수 $C_{11} \simeq C_{12} = C_s$, 잡음광 결합 계수 $C_{n1} = C_n$을 대입하여 검출 전압을 구할 수 있다. 이러한 관계를 식 (3)에 대입하여 PD 1의 전압을 계산하면,

$$\begin{aligned} v_1 &= \rho R_L (C_{11} P_1 + C_{12} P_2 + C_{1n} P_N) \\ &\simeq \rho R_L (C_s P_1 + C_s P_2 + C_n P_N) \\ &\simeq \rho R_L (C_s P_0 + C_n P_N) \\ &\quad \textit{without polarizer} \end{aligned} \tag{10}$$

이 된다. 이와 같이 PD 1 앞에 편광기를 사용하지 않는 경우에는 신호 성분 P_S가 사라지고 LED 출력광의 DC성분 P_0와 잡음광 P_N에 비례한 전압만 검출된다. LED의 DC 출력광 P_0 는 일정한 밝기를 나타내며, 형광등이나 백열등과 같은 조명 시설에서 발생하는 잡음광 P_N의 120 Hz 변화는 사람의 육안으로 감지하지 못한다. 따라서 LED를 변조하는 과정에서 발생하는 조명 상태에는 변함이 없으므로 깜박거림 현상이 줄어들어 사용자의 시야에 불편을 주지 않는다.

제Ⅱ절의 내용을 다시 정리하면, 송신부에 2개의 LED와 2개의 편광기를 사용하여 원 신호와 반전 신호를 동시에 변조하여 전송하는 경우에, 수신부에서 직교 편광기를 사용하여 수신하면 잡음을 소거하고 신호 성분만 검출하지만, 편광기를 사용하지 않는 단일의 PD나 사람의 육안으로 관찰하면 LED 변조 과정에서 발생하는 조명의 변화가 거의 사라지고 일정한 조명 상태로 인식하게 된다.

Ⅲ. 직교 편광기를 사용한 잡음광 소거

직교 편광기를 이용한 가시 광통신 시스템의 잡음 소거능력을 확인해 보기 위하여 잡음광이 존재하는 환경에서 2개의 PC 간에 직렬 포트를 사용하여 데이터를 전송하고 수신 상태를 관찰하였다. LED의 변조 신호는 NRZ(Non-Return-to-Zero) 방식의 디지털 부호이며, 데이터 전송률은 UART의 표준 속도인 9.6 kbps를 사용하였다. 송신부에서는 PC의 UART로부터 발생한 디지털 부호를 사용하여 LED 1을 변조하고, 이와 반전된 신호로 LED 2를 변조하여 동시에 두 신호광을 자유 공간으로 방사하였다. 실험에서 사용한 2개의 LED는 모두 Moksan Electronics사의 MS-HPL812CWP로서 출력광의 중심 파장이 약 600 nm이고, 400～700 nm 파장 대역에서 발광하는 백색의 조명용 LED이며, 3 dB 변조 대역폭은 약 150 kHz 이다. LED 1과 LED 2 사이의 거리는 약 3 cm 정도로 근접하도록 설치하였으며, 각각의 LED 앞에는 편광기를 한 개씩 부착하였다. 이 두 개의 편광기는 앞의 그림 1에서 Pol-T1과 Pol-T2에 해당하며, Pol-T1의 통과축은 수직 방향, Pol-T2의 통과축은 수평 방향을 유지하도록 설치하였다. 실험에 사용한 편광기

는 RAYNOX사의 PLF-052를 직경 2.5 cm 크기의 원형으로 가공하여 사용하였다.

LED로부터 약 2 m의 거리에 직교 편광기를 부착한 광검출기를 설치하였다. 2개의 PD앞에 각각 설치된 편광기는 앞의 그림 1에서 Pol-R1과 Pol-R2에 해당하며, Pol-R1의 통과축은 수직 방향, Pol-R2의 통과축은 수평 방향이 되도록 정렬하였다. 2개의 광검출기 PD 1과 PD 2는 모두 Kodenshi사의 Si 포토트랜지스터 ST1-ML로서, 반응 파장 범위는 500～1,050 nm이고, 부하 저항 50 Ω에서 3 dB 수신 대역폭은 약 80 kHz이다. PD 1과 PD 2 사이의 거리는 약 3 cm 정도로 근접하도록 설치하였으며, 각각의 부하 저항에서 검출된 전압 v_1과 v_2를 차동 증폭기의 입력 단자에 연결하였다. 차동 증폭기는 연산증폭기를 사용하여 제작한 것이며, 전압 이득 G=100에서 3 dB 대역폭이 약 80 kHz이다.

직교 편광기를 이용한 광검출기의 잡음 소거능력을 실험해 보기 위하여 LED의 옆에 100 W의 형광등 1개를 설치하여 잡음 광원으로 사용하였다. 그림 2는 9.6 kbps의 변조 속도로 문자열 “Link test”에 해당하는 디지털 데이터를 1 ms 간격으로 반복하여 전송하는 경우에 수신부의 검출 전압을 오실로스코프로 관측한 것이다.

파형 (a)와 (b)는 각각 수신부에 설치된 포토트랜지스터 PD 1과 PD 2의 검출 전압 v_1과 v_2를 나타낸다. 여기에서 보면 디지털 부호에 해당하는 신호 성분에 비하여 120 Hz의 잡음 성분이 훨씬 큰 진폭으로 파형 (a)와 (b)에 동일하게 혼합되어 검출되며, 디지털 부호의 high와 low 상태는 파형 (a)와 (b)에서 서로 반전된 형태를 보이고 있다. 파형 (a)의 v_1은 원신호로 변조된 LED 1의 출력광 P_1을 편광기 Pol-R1을 통하여 검출하고, 파형 (b)의 v_2는 반전된 신호로 변조된 LED 2의 출력광 P_2를 편광기 Pol-R2를 통하여 검출하므로 디지털 신호 성분의 파형이 서로 반전되어 나타나는 것이다. 파형 (a)와 (b)에서 보면 신호 성분에 비하여 잡음 성분의 크기가 너무 커서 한 개의 PD만을 사용하여 신호를 직접 검출하기는 매우 어려운 상태임을 알 수 있다.

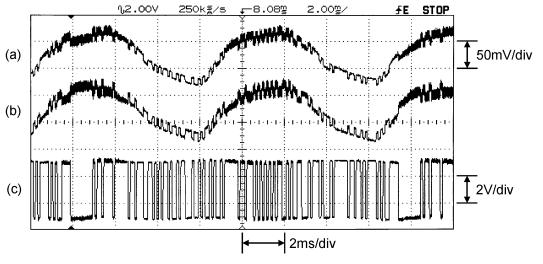


그림 2. 오실로스코프로 관측한 전압 파형, (a) PD 1의 전압, (b) PD 2의 전압, (c) 출력 전압

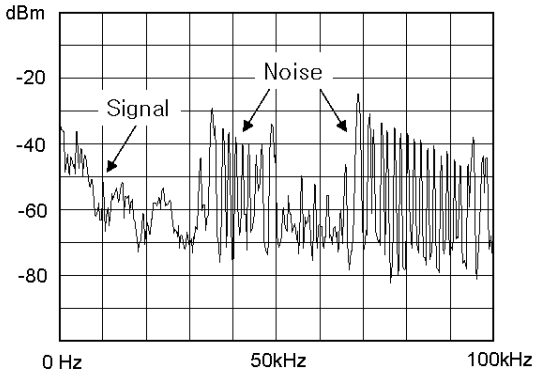
Fig. 2. Voltage waveforms observed on an oscilloscope. (a) The voltage of PD 1, (b) The voltage of PD 2, (c) Output voltage.

파형 (c)는 차동 증폭기의 출력 전압 v_{out}을 나타낸다. PD 1과 PD 2의 검출 전압 v_1과 v_2에 포함된 잡음 성분은 차동 증폭기를 통과하면서 상쇄되어 거의 사라지고 디지털 부호에 해당하는 신호 성분이 잡음 성분에 비하여 훨씬 증가한 상태로 출력됨을 보이고 있다. 미약하게 남아 있는 잡음 성분은 형광등으로부터 PD 1과 PD 2 사이의 작은 거리 차로 인하여 발생하는 것이다.

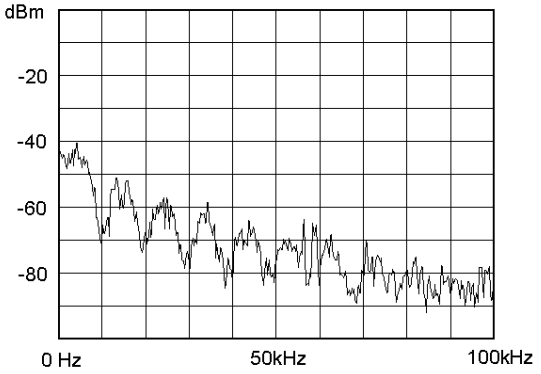
한 개의 LED와 한 개의 PD를 사용한 직접 검출 방식에 비하여 직교 편광기를 사용한 검출방식에서 어느 정도의 잡음 소거 효과가 있는지 알아보기 위하여 두 경우에 신호 전압과 잡음 전압의 진폭을 비교하였다. 그림 2의 파형 (a)와 파형 (b)는 앞의 식 (7), (8)에서 보는 바와 같이 신호광과 잡음광이 편광기를 통과하면서 강도가 동일하게 1/2배로 줄어드는 상태이므로, 한 개의 LED와 한 개의 PD만을 사용하여 전송하는 상태와 동일한 신호대 잡음비를 가진다.

그림 2의 파형 (a)에서 보면 신호 성분의 피크간 전압이 약 15 mV일 때 120 Hz에 근접하는 잡음 성분의 피크간 전압은 약 95 mV이었다. 이에 비하여 파형 (c)에서 보면 직교 편광기를 이용한 광검출기의 출력 전압 v_{out}에서 신호 전압의 크기가 약 4 V일 때 잡음 전압의 크기가 약 0.4 V가 되어 120 Hz 부근의 잡음 성분이 대부분 소거되고, 신호 성분이 양호하게 검출되고 있음을 볼 수 있다.

형광등의 잡음은 제품에 따라 다르지만 일반적으로 DC로부터 수백 kHz 정도까지 넓은 주파 범위에 걸쳐 분포한다. 수신 대역폭 10 MHz를 가진 별도의 APD 광검출기를 사용하여 실험에서 사용한 형광등의 스펙트럼을 관찰하니 잡음이 DC～400 kHz 정도까지 불규칙하게 분포하였다. 본 실험에 사용한 포토트랜지스터는 80 kHz 정도의 대역폭을 가지므로



(a) 한 개의 광검출기
(a) A single detector



(b) 직교 편광기를 이용한 차동검출기
(b) Differential detection with orthogonal polarizers

그림 3. 검출 전압의 스펙트럼
Fig. 3. Spectrum of the detected voltages using.

한 개의 포토트랜지스터를 사용하여 한 개의 LED 출력광을 직접 검출하는 경우에는 DC～80 kHz 부근의 주파 범위에 속하는 잡음 성분이 유입될 수 있다. 직교 편광기를 사용한 차동검출기에서 이러한 고주파 성분의 잡음이 소거되는 효과를 확인해 보기 위하여 검출 전압의 스펙트럼을 관찰하였다. 그림 3은 수신부로부터 약 2 m의 거리에 LED와 형광등이 존재하는 환경에서 한 개의 포토트랜지스터로 검출한 경우와 직교 편광기를 사용하여 검출한 경우에 수신 신호의 스펙트럼을 DC-100 kHz까지 관측한 것이다.

그림 3(a)는 송신부에서 한 개의 LED를 사용하여 9.6 kbps의 NRZ 광신호를 전송하고, 수신부에서 한 개의 포토트랜지스터를 사용하여 직접 검출한 경우에 관측된 스펙트럼을 나타낸다. 이 상태에서는 9.6 kbps의 NRZ 디지털 신호의 스펙트럼에 해당하는 sinc 함수[5] 형태의 신호 성분과 약 30～100 kHz 대역에 걸쳐 넓게 분포하는 잡음 성분이 혼합되어 수신됨을 볼 수 있다. 약 100 kHz 이상의 높은 주파 범위에 해당하는 형광등 잡음은 포토트랜지스터의 대역폭 80 kHz를 초과하기 때문에 거의 수신되지 않으므로 스펙트럼의 관측 범위를 100 kHz까지 제한하여 비교하였다.

그림 3(b)는 앞의 그림 1에서와 같이 송신부에서 2개의 LED를 사용하여 원 신호와 반전 신호를 동시에 전송하고, 수신부에서는 직교 편광기를 사용하여 차동 검출한 경우에 관측된 스펙트럼을 나타낸다. 여기에서 보면 그림(a)에 존재하는 잡음 성분이 거의 사라지고 sinc 함수 형태의 신호 성분만 검출되고 있음을 볼 수 있다. 위의 그림(a)와 그림(b)를 비교할 때, 직교 편광기를 사용하면 30～100 kHz의 높은 주파대역에서도 잡음의 소거 상태가 매우 양호함을 알 수 있다. 이와 같이 가시 광통신 시스템에서 직교 편광기를 이용하면 잡음광의 간섭이 줄어드는 효과를 실험적으로 확인하였다.

Ⅳ. 원 신호와 반전 신호의 동시 전송에 의한 LED 조명의 변동 감소

사람에 따라 다소 차이가 있지만 대략 40～50 Hz 보다 높은 속도로 빛의 강도가 변화하는 경우에는 육안으로 조명 상태의 변화를 거의 감지하지 못한다. 따라서 가시 광통신에서 수백 bps 이상의 데이터율로 연속하여 신호가 전송되는 경우에는 사람의 육안으로 깜박거림 현상을 거의 느끼지 않는다. 그러나 정지 상태에 있다가 데이터가 갑자기 전송되거나 연속적인 전송상태가 갑자기 끊기는 경우에는 조명 상태의 변화가 감지될 수 있으며, 이러한 상태가 지속되면 사용자의 시야에 불편함을 줄 수 있다.

앞의 그림 1에서와 같이 2개의 LED를 사용하여 원 신호와 반전 신호를 동시에 전송하면 2개의 LED로부터 방사된 빛의 강도 변화가 서로 보완되어 거의 일정한 밝기를 유지하므로 이러한 깜박거림 현상이 감소한다. 한 개의 LED를 사용한 경우와 두 개의 LED를 사용하여 원 신호와 반전 신호를 동시에 전송하는 경우에 조명 상태의 변화를 비교하기 위하여 한 개의 PD를 사용하여 광검출기를 구성하고, 조명

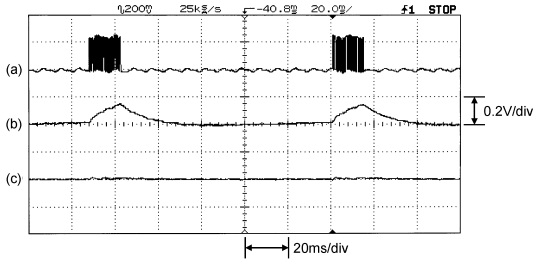


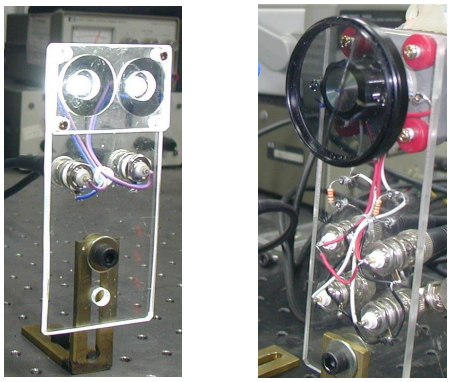
그림 4. LED 변조에 의한 검출 전압의 변화, (a) 1개 LED 변조, 1개 PD 검출(수신 대역폭: 80 kHz), (b) 1개 LED 변조, 1개 PD 검출(수신 대역폭: 40 Hz), (c) 2개 LED 반전 비반전 변조, 1개 PD 검출(수신 대역폭: 40 Hz)

Fig. 4. Detected voltage variations when modulating LEDs. (a) Modulating one LED, detecting with one PD(BW: 80 kHz), (b) Modulating one LED, detecting with one PD(BW: 40 Hz), (c) Modulating two LEDs with inverting and non-inverting signals, detecting with one PD(BW: 40 Hz).

의 변동을 검출하였다. 육안의 인식 속도는 사람에 따라 다소 차이가 있지만 실험자가 인식 가능한 최대속도가 약 40 Hz로 측정되어 이 속도에 근접하는 약 40 Hz의 저역 통과 필터를 통과하여 검출 전압의 변동을 비교하였다. 그림 4는 실내의 약 2 m의 높이에 형광등이 존재하는 일반적인 조명 상태에서 LED를 변조하여 문자열 “Link test”에 해당하는 데이터를 0.1 sec 간격으로 반복하여 전송하는 경우에 검출 전압의 변화를 나타낸다.

파형 (a)는 수신 대역폭이 약 80 kHz인 한 개의 PD를 사용하여 LED의 신호광을 직접 수신한 파형이며, 파형 (b)는 파형 (a)를 육안의 인식 속도와 비슷한 약 40 Hz의 저역 통과 필터를 통하여 검출한 전압으로서 이 상태에서 검출 전압의 변동은 약 160 mV이었다.

파형 (c)는 2개의 LED를 사용하여 원 신호와 반전 신호를 동시에 전송할 때 파형 (b)에서와 같이 한 개의 PD로 검출한 후 40 Hz 저역 통과 필터를 통하여 출력된 전압으로서 검출 전압의 변동이 약 20 mV 이하로 감소하였다. 미약하게 남아 있는 전압 변화는 2개의 LED로부터 광검출기까지의 미세한 거리 차에 의하여 발생한다. 여기에서는 2개의 LED가 서로 반전된 신호로 변조되어 광출력을 방사하므로 2



(a) 송신부에 사용한 직교 편광기 (b) 수신부에 사용한 직교 편광기

(a) Orthogonal polarizers in a transmitter (b) Orthogonal polarizers in a receiver

그림 5. 실험에 사용한 직교 편광기

Fig. 5. Orthogonal polarizers used in experiments.

개의 LED로부터 방사된 광출력이 공간에서 강도 변화를 서로 상쇄하고, 앞의 식 (10)에서와 보는 같이 한 개의 PD로 검출하는 경우에 신호 전압의 변동이 사라져 육안으로 조명 상태의 변화를 거의 느끼지 못하게 된다. 이와 같이 2개의 LED를 사용하여 원 신호와 반전 신호를 동시에 전송하면 조명 상태가 깜박거리는 현상을 줄일 수 있는 이점이 있다.

그림 5는 본 논문의 Ⅲ절과 Ⅳ절의 실험에서 사용한 직교 편광기의 구조를 나타낸다.

그림 5(a)는 송신부에 사용한 직교 편광기를 나타낸다. 직경이 약 2.5 cm의 크기인 2개의 편광기가 2개의 LED 앞에 부착되어 있으며, 통과축이 서로 수직하도록 고정하여 부착한 것이다. 그림 5(b)는 수신부의 PD 앞에 설치된 직교 편광기를 나타내며, 통과 특성이 서로 직교하는 2개의 편광기를 각각 반원의 형태로 가공한 후 2개를 부착하여 직경이 5 cm인 원형을 만들고 그 중심에 회전축을 부착하여 수신광의 편파에 쉽게 일치시킬 수 있도록 제작한 것이다. 차량 자동 인식 시스템이나 실내의 조명 통신 시스템을 구성하는 경우에는 두 편광기의 통과 특성이 서로 수직한 상태를 확인한 후 고정하여 부착하면 된다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 LED를 이용한 가시 광통신에서

직교 편광기를 사용하여 잡음광을 소거하는 방법을 새로이 제안하고 실험하였다. 먼저 직교 편광기를 이용한 가시 광통신 시스템의 구성 방안과 동작 원리에 대하여 소개하고 이어서 잡음 소거 특성을 관측하였다. 송신부에서는 전송 데이터의 원 신호와 반전 신호를 사용하여 2개의 LED를 동시에 변조함으로써 2개의 신호광을 발생시키고 각각의 신호광이 서로 수직한 2개의 편광기를 통과하면서 원 신호는 수직 편파, 반전 신호는 수평 편파의 특성을 가지고 자유 공간으로 방사된다. 수신부에서는 서로 수직한 2개의 편광기를 사용하여 수직 편파와 수평 편파의 신호광을 분리한 후, 2개의 PD를 사용하여 검출된 전압을 차동 증폭함으로써 잡음 성분을 감소하고 신호 성분을 검출하였다.

실험에서는 형광등으로부터 발생한 강한 잡음광이 존재하는 환경에서 직교 편광기를 이용한 송·수신 방법을 사용하여 120 Hz 잡음 성분을 소거하는 효과를 얻었으며, 이와 별도로 수신 파형의 스펙트럼을 관측하여 포토트랜지스터의 수신 대역폭인 약 80 kHz 정도까지 잡음 소거 상태가 양호함을 관측하였다. 이와 같이 가시 광통신에 직교 편광기를 사용하면 비교적 간단한 방법으로 높은 잡음 소거 효과를 얻을 수 있기 때문에, LED 조명을 이용한 차량자동 인식 시스템이나 실내의 조명 통신 시스템 등을 구축하는 경우에 이 방법을 활용하면 잡음광에 강한 가시 광통신 시스템을 구축할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Joseph M. Kahn, John R. Barry, "Wireless infrared communications", *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265-298, 1997.

[2] 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.

[3] Seong-Ho 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, Feb. 2004.

[4] Eugene Hecht, *Optics*, 2nd Ed., p. 278, Addison Wesley, 1987.

[5] Joseph C. Papais, *Fiber Optic Communications*, 5th Ed., p. 75, Prentice Hall, 2005.

황 다 현

2004년 2월: 대진대학교 통신공학과 (공학사)
2010년 8월: 서울과학기술대학교 산업대학원 전자공학과 (공학석사)
2011년 3월~현재: 서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원, 방송·통신융합프로그램 박사과정
[주 관심분야] 광통신, RFID, 안테나

이 성 호

1980년 2월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학사)
1989년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1993년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1995년 3월~현재: 서울과학기술대학교 전자정보공학과 교수
[주 관심분야] 광통신, RFID, 안테나