

전치 등화기와 광학설계를 이용한 가시광통신 전송 용량 및 거리 향상 연구

권도훈*, 양세훈*, 김현승*, 손용환*, 한상국^o

Performance Improvement for Visible Light Communications Using Pre-Equalizer and Optical Design

Do-hoon Kwon*, Se-hoon Yang*, Hyun-seung Kim*, Yong-hwan Son*, Sang-kook Han^o

요약

본 논문에서는 가시광 통신의 광원으로 사용되는 백색 LED (Light Emitting Diode)의 변조 대역폭 확장을 위해 송신단에 전치 등화기 회로를 설계하였다. 또한 청색 광 필터를 이용하여 백색 LED의 주파수 응답을 저해하는 황색 형광물질의 영향을 제거하였고 이로 인해 발생하는 신호 세기의 저하를 광학 설계를 통해 극복하였다. 이 시스템을 통해 백색 LED의 변조 대역폭을 결정하는 3 dB 대역폭을 3 MHz에서 25 MHz이상으로 향상 시켰으며 광학 설계를 통해 추가적인 신호 세기를 확보하여 전송 거리를 증가시켰다. 통신 성능 확인을 위해 LED에 NRZ-OOK (신호를 변조시켜 전송하여, APD (Avalanche Photo Diode)를 통하여 수신하였고 이를 CSA (Communication System Analyzer)와 RFSA (Radio Frequency Spectrum Analyzer)를 통해 분석하였다. 이를 통해 전치 등화기와 광학 설계를 이용하여 전송거리 4.5 m에서 30 Mbps, 1.5 m에서 50 Mbps의 신호 전송이 가능함을 실험적으로 검증하였다.

Key Words : Blue filter, Optical design, Pre-equalizer, Visible Light Communication, White LED

ABSTRACT

In this paper, we design the pre-equalizer of transmitter circuit in order to enhancement modulation bandwidth of white LED which is light source of VLC (Visible Light Communication). Also, we eliminate yellow light component by optical filtering which mitigate frequency response of white LED. Power loss by optical filtering is overcome by using convex lens. By applying proposed system, 3 dB bandwidth deciding modulation bandwidth of white LED increases from 3 MHz to more than 25 MHz and the transmission distance increases by optical design which secure additional signal power. We optically modulate NRZ-OOK signal to LED and receive light signal using APD. We analyze received data using CSA and RFSA. As a result, we experimently demonstrate the possibility that transmits NRZ-OOK signal up to 30 Mbps in 4.5 m, 50 Mbps in 1.5 m through the pre-equalizer and optical design.

※ 이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2013R1A2A2A01008341).

♦ First Author : School of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University, ehgns222@yonsei.ac.kr, 정희원

° Corresponding Author : School of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University, skhan@yonsei.ac.kr, 종신회원

* School of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University, safracs@yonsei.ac.kr, atbulsa@yonsei.ac.kr

논문번호 : KICS2014-02-053, Received February 11, 2014; Revised April 23, 2014; Accepted May 29, 2014

I. 서론

최근 에너지 절약에 대한 관심이 높아짐에 따라 높은 효율과 긴 수명을 갖는 Light Emitting Diode (LED)가 조명으로 각광 받고 있다. 이는 기존의 조명과 달리 반도체 기반 광원으로 상대적으로 높은 주파수 응답을 가질 수 있기 때문에 조명뿐만 아니라 데이터 전송이 동시에 가능하다는 장점을 가지고 있다¹¹. 따라서 이를 이용한 LED기반 무선 가시광 통신에 대한 연구가 진행되어 왔다¹²⁻¹⁴. 조명용으로 쓰이는 백색 LED는 적색, 청색, 녹색 광원이 합쳐져 빛을 내는 RGB LED와 형광물질을 광원에 도포하는 LED로 나뉜다. 이 중에서 형광물질이 도포된 LED는 회로의 복잡도와 발광 효율에 있어 RGB LED보다 가시광 통신에 있어서 적합하다¹⁵. 형광물질이 도포된 LED는 기존 광원인 형광등, 백열등에 비해 주파수 응답이 높으나 변조 대역폭을 결정하는 3 dB 대역폭이 3 MHz 이하로 제한되어 있어 고속 데이터 전송의 한계로 작용해 왔다¹⁶. 이는 LED 소자의 특성뿐만 아니라 황색 형광물질에 의해 발생하는 것으로써, 수신단에 청색 광 필터를 사용하거나 시스템의 송, 수신단 구동 회로에 등화기를 구현함으로써 성능 개선이 가능하다¹⁷. 본 논문에서는 송수단의 구동 회로에 전치등화기를 구현하고 수신단에 청색 광 필터를 사용하여 LED의 주파수 응답의 한계를 극복한다. 또한, 청색 광 필터로 인한 광량의 저하를 광학 설계를 통해 극복하여 전송 거리를 확보한다. 그 결과 그림 1과 같이 3 dB 대역폭을 25 MHz까지 확장하였으며, 이를 통해 30 Mbps의 None Return to Zero-On Off Keing (NRZ-OOK) 신호를 4.5 m에서, 50 Mbps의

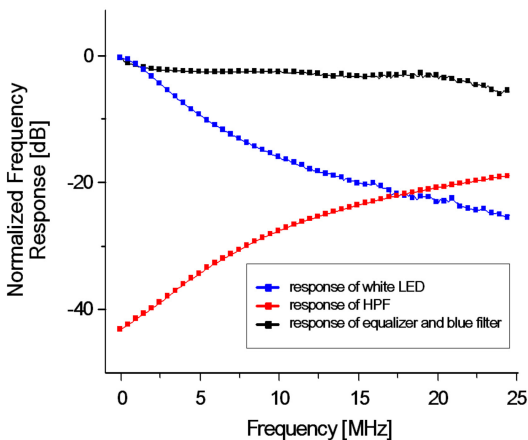


Fig. 1. Frequency response of white LED, HPF and proposed system

NRZ-OOK 신호를 1.5 m에서 전송하여 Forward Error Correction (FEC)의 기준인 $BER \leq 2 \times 10^{-3}$ 을 만족하였다¹⁸.

II. 본론

2.1 LED 구동회로

전류 구동 방식의 LED로 조명과 통신의 역할을 동시에 수행하기 위해서는 밝기 제어와 신호 인가가 모두 가능해야 한다. 그러므로 LED에 신호를 변조하기 위해서는 밝기 제어를 위한 직류 전류와 신호를 동시에 인가 할 수 있는 bias-tee 구조가 필요하다. 이 때, 직류 전류는 최대의 신호를 왜곡 없이 확보하기 위해 동작 지점을 LED의 L-I 곡선의 선형 구간 내에 위치시켜야 한다. 또한, 신호의 세기는 LED의 선형 구간을 벗어나지 않는 범위에서 동작 하여야 한다. 이를 위한 LED 전단의 bias-tee 구조는 그림 2와 같다.

그림 2 equalizer 부분에서 볼 수 있듯이 LED 구동 회로는 High-Pass Filter (HPF)와 반전 증폭기로 구성된다. LED에서 송신하는 신호의 주파수 응답을 균일하게 하기 위해 청색 광 필터를 통과하여 수신된 LED

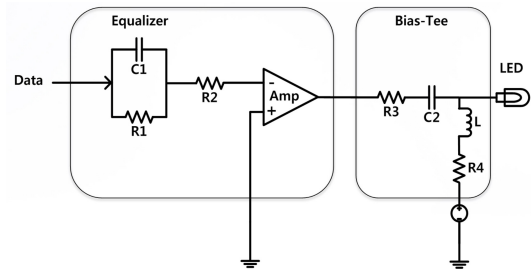


Fig. 2. LED driving circuit in order to improve frequency response

표 1. 실험 매개변수

Table 1. Experimental Parameters

Parameters	Values
LED drive current	80mA
Pre-Equalizer	$R_1 = 580 \Omega, R_2 = 5 K\Omega, C_1 = 100 pF$
Bias-Tee	$C_2 = 22 \mu F, L = 40 mH$
3 dB Bandwidth of Avalanche	40 MHz when $V_B = 5 V$
Photo Diode	
Photo Sensitivity of Avalanche	12A/W at 450 nm
Photo Diode	

의 주파수 응답을 측정하고 HPF가 주파수 응답 기울기의 역에 해당하는 값을 갖도록 설계하였다. 이 회로의 주파수 응답 특성은 그림 1의 response of HPF와 같다. 신호가 HPF를 통과하는 과정에서 생기는 주파수 영역에서의 신호 감쇄를 보상하고 LED에 인가 가능한 신호 세기의 크기를 최적화하기 위해 반전 증폭기를 설계 한다. 이 때, HPF의 전달 함수와 그 기울기의 전달 함수는 다음과 같다.

$$H_1(w) = \frac{R_2 + jwR_1R_2C_1}{(R_1 + R_2) + jw(R_1 + R_2)C_1} \quad (1)$$

$$H'_1(w) = \frac{j(R_1 - 1)(R_1 + R_2)R_2}{\{(R_1 + R_2) + jw(R_1 + R_2)C_1\}^2} \quad (2)$$

$H_1(w)$ 에 따라 R_1 의 값이 증가하면 저주파 대역의 주파수 응답이 감소하고, $H'_1(w)$ 에 따라 C_1 의 값이 증가하면 저주파 대역의 주파수 응답의 기울기가 감소한다. 이를 기반으로 전치 등화기의 주파수 응답이 실험적으로 측정된 LED주파수 응답의 값과 기울기의 음의 값이 되도록 R_1, C_1 값을 설정한다. 또한, LED의 주파수 응답에서 저주파 대역 신호 성분이 가장 큰 신호 성분과 3 dB 이상 차이 나는 것을 방지하기 위해 R_2 를 가상 접지 역할을 하는 반전 입력 단자에 연결 하여 저주파 대역에 영점을 설정한다.

Bias-tee는 LED를 구동 및 밝기 제어를 위한 전압과 신호를 동시에 전송할 수 있도록 한다. 그림 2는 캐패시터를 달아 원하지 않는 직류 성분을 차단하며, 구동 및 밝기 제어를 위한 전압이 인가되는 부분에는 인덕터를 달아 원하지 않는 교류 신호를 제어 한다. 이 때, bias-tee의 회로 또한 HPF와 유사한 특성을 보이며 이는 다음과 같이 표현 된다.

$$H_2(w) = \frac{jwR_4C_2 - w^2LC_2}{jwC_2(R_3 + R_4) - w^2LC_2} \quad (3)$$

위 식에서 볼 수 있듯이 $H_2(w)$ 는 HPF의 특성을 가지며 저주파 대역에서 추가적인 신호 손실이 발생된다. 전치등화기 외의 추가적인 손실을 막기 위해 매우 높은 C_2 와 L 값을 사용하여 3 dB 지점을 최대한 저주파 대역 근처에 위치하도록 설정한다.

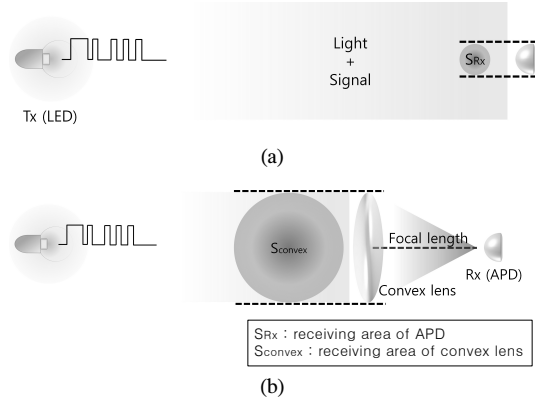


Fig. 3. (a) Receiving area of VLC without convex lens and (b) Optical design for light concentration based on convex lens

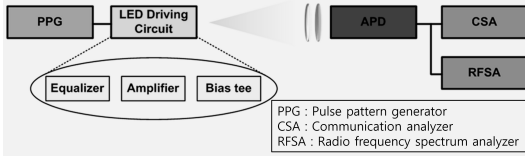
2.2 광학 설계

백색 LED는 도포된 황색 형광 물질의 특성에 의하여 주파수 응답이 낮아진다⁷⁾. 그러므로 광수신기에 신호가 수신되기 전 450 nm 대역의 청색 광 필터를 통하여 황색 형광 물질의 영향을 제거 한 후 수신하여 가시광 통신 시스템의 주파수 응답 속도 향상을 기대할 수 있다. 이 때, 450 nm 대역이외의 신호는 광 필터를 통과할 수 없으므로 수신기에 입사되는 광량이 감소하게 되어 수신 감도를 만족하지 못하고 신호의 세기 또한 감소한다. 그러므로 광량확보를 위한 광학 설계가 요구된다. 수신기를 볼록 렌즈의 초점 거리에 위치 시켜 볼록 렌즈의 표면에 해당하는 만큼의 광량을 추가적으로 확보하였으며, 이는 수신기의 단면적에 비해 넓은 영역을 가지게 되므로, 추가 광량에 따른 신호 세기 확보가 가능하다.

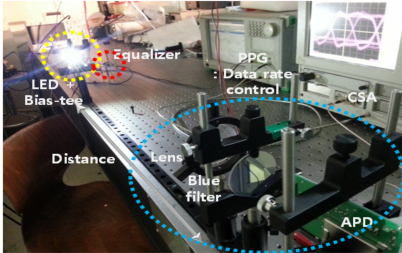
III. 실험

3.1 실험 환경

전치등화기와 광학 설계를 기반으로 한 가시광 통신 전송 실험 환경은 그림 4와 같다. 신호 발생기로부터 생성된 NRZ-OOK 신호는 LED 구동 회로를 거쳐 LED에서 변조되며, 무선 채널을 통해 볼록 렌즈와 청색 광 필터를 거쳐 APD를 통해 수신한다. 전치 등화기와 광학 설계를 통해 응답 속도 및 전송 거리의 개선 여부를 Radio Frequency Spectrum Analyzer (RFSA)와 Communication System Analyzer (CSA)로 확인하였으며, 수신된 신호는 각각 주파수와 시간 측면에서 분석을 진행하였다.



(a)



(b)

Fig. 4. Experimental setup for verifying proposed system (a) block diagram of proposed system (b) experimental environment

3.2 실험 결과

상용화된 백색 LED의 3 dB 대역폭은 3 MHz로 이하로 나타나며 고속 전송 시스템의 제한 요소로 이를 통해 작용한다.

따라서 본 논문에서는 제안된 전치 등화기와 청색 광 필터를 사용한 가시광 통신 시스템의 주파수 응답을 그림 1과 같이 25 MHz 이상으로 향상시켰다. 제안된 가시광 통신 시스템의 실험적 검증을 위해 1.5 m 거리에서 30 Mbps 와 50 Mbps NRZ-OOK 신호를 전송하였으며 이 때, 광학 설계를 통해 최적화된 eye pattern은 그림 5와 같다. CSA로 통신 성능을 확인한 결과, 수신된 30 Mbps NRZ-OOK 신호의 Signal to Noise Ratio (SNR)은 23.4 dB, Q-factor는 6.3이었으며, 50 Mbps 의 경우 SNR은 13.5 dB, Q-factor는 5.3 으로 두 신호 모두 통신 가능 기준인 FEC limit인 $BER \leq 2 \times 10^{-3}$ 을 만족하였다^[8-9]. 하지만 50 Mbps NRZ-OOK 신호의 경우 가시광 통신 시스템의 주파수 응답의 한계로 고주파 신호가 저하되어 30 Mbps NRZ-OOK 신호보다 timing jitter 및 intensity noise

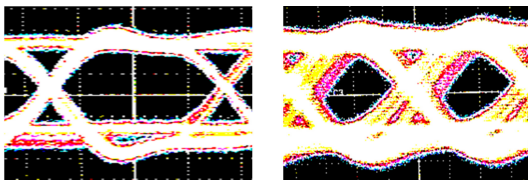


Fig. 5. Eye pattern of VLC link based on proposed pre-equalizer when transmission distance is 1.5 m and data rate is (a) 30 Mbps and (b) 50 Mbps, respectively

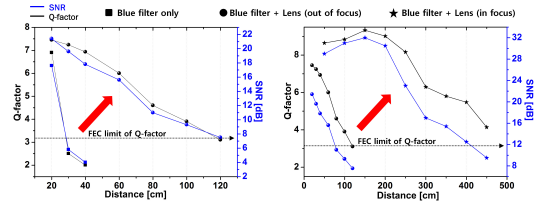


Fig. 6. Measured Q-factor and SNR performance variation according to transmission distance and optical design. Transmission distance is (a) 20 cm ~ 120 cm and (b) 0 cm ~ 500 cm

의 영향이 크게 나타나 상대적으로 낮은 통신 품질을 가짐을 eye pattern을 통해 확인하였다. 30 Mbps 의 NRZ-OOK 신호 전송 시 광학 설계 및 전송 거리에 따른 통신 성능은 그림 6과 같다. 먼저 청색 광 필터만 사용 하였을 경우에는 광량의 저하로 신호 세기가 감소하여 그림 6(a)의 그래프와 같이 전송 거리 30 cm 이상에서 FEC limit를 만족하는 Q-factor인 2.9 이상을 만족하지 못하였다^[8-9]. 이를 보완하기 위해 블록 렌즈로 광량을 확보 하였을 경우 전송 거리 30 cm 에서 추가적으로 14 dB의 SNR을 확보할 수 있었으며 이를 통해 전송 가능 거리가 120 cm 까지 증가하였다. 블록 렌즈와 광 수신기 사이에 초점 거리를 확보 하여 집광 할 경우 추가적인 이득에 의한 전송 거리가 최대 5 m 까지 가능함을 그림 6(b)로부터 확인할 수 있다. 전송 거리가 150 cm 이하일 경우, 과도한 광량으로 인하여 광 수신기의 비선형 영역에 도달하게 되며, 그에 따른 성능 열화가 발생함을 확인하였으나 안정적 통신이 가능함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 전치 등화기와 청색 광 필터를 통해 백색 LED의 물리적 3 dB 대역폭을 3 MHz에서 25 MHz이상으로 향상시켰고 최대 50 Mbps의 NRZ-OOK 신호 전송이 가능함을 보였다. 이로 인해 가시광 통신을 통한 고속 데이터 전송의 가능성을 보였다. 블록 렌즈를 통한 광학 설계로 청색 광 필터의 영향과 송신 거리 증가에 따른 신호 세기 감소를 보완하여 최대 5 m에서 전송이 가능함을 실험적으로 검증하였다. 또한, 본 논문의 전치 등화기 설계의 한계점으로 작용한 HPF와 증폭기의 고주파 대역 성능 열화를 해결한다면 LED의 3 dB 대역폭을 추가적으로 확장할 수 있을 것이다. 본 논문의 결과 전치 등화기 및 광학 설계를 통해 개선된 전송 용량과 전송 거리로 보다 넓은 분야에서 가시광 통신이 응용이 가능할 것

로 기대된다.

References

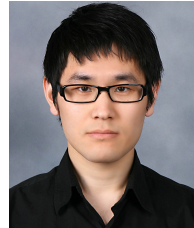
- [1] M. Akanegawa, Y. Tanaka, and M. Nakagawa, "Basic study on traffic information system using LED traffic lights," *IEEE Trans. ITS*, vol. 2, no. 4, pp. 197-203, 2001.
- [2] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," *IEEE Trans. Consumer Electron.*, vol. 50, no. 1, pp. 100-107, Feb. 2004.
- [3] R. Perez-Jimenez, J. Rufo, C. Quintana, J. Rabadan, and F. J. Lopez-Hernandez, "Visible light communication systems for passenger in-flight data networking," in *Proc. ICCE*, pp. 445-446, Las Vegas, NV, Jan. 2011.
- [4] T. Hara, S. Iwasaki, T. Yendo, T. Fujii, and M. Tanimoto, "A new receiving system of visible light for ITS," *IEEE Intelligent Veh. Symp.*, Istanbul, Turkey, pp. 474-479, Jun. 2007.
- [5] H. Li, "High bandwidth visible light communications based on a post-equalization circuit," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 26, no. 2, pp. 119-122, Jan. 2014.
- [6] H. Kim, D. Kim, S. Yang, Y. Son, and S. Han, "Transmission performance investigation by received optical power in RF carrier allocation visible light communication," in *Proc. COOC 2012*, pp. 276-277, May 2012.
- [7] D. O'Brien, et al., "Indoor visible light communications: Challenges and prospects," in *Proc. SPIE*, vol. 7091, Aug. 2008.
- [8] ITU-T Recommendation G.975.1 (02/2004)
- [9] N. S. Bergano, F. W. Kerfoot, and C. R. Davidsion, "Margin measurements in optical amplifier system," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 5, no. 3, pp. 304-306, Mar. 1993.

권도훈 (Do-hoon Kwon)



2014년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 졸업(공학사)
 2014년 3월~현재 : 연세대학교 대학원 전기전자공학과 석·박사통합과정
 <관심분야> 가시광통신, 광통신, 광네트워킹

양세훈 (Se-hoon Yang)



2010년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 졸업(공학사)
 2010년 3월~현재 : 연세대학교 대학원 전기전자공학과 석·박사통합과정
 <관심분야> 가시광통신, 광통신, 광네트워킹

김현승 (Hyun-seung Kim)



2007년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 졸업(공학사)
 2007년 3월~현재 : 연세대학교 대학원 전기전자공학과 석·박사통합과정
 <관심분야> Radio over fiber, 가시광통신, optical OFDM, WDM-PON

손용환 (Yong-hwan Son)



1999년 2월 : 호서대학교 전자공학과 졸업
 2001년 2월 : 호서대학교 대학원 전자공과 (공학석사)
 2008년 2월 : 호서대학교 대학원 전자공과 (공학박사)
 2008년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 Post-Doc.

<관심분야> 가시광통신, WDM 광통신, 집적광학

한 상 국 (Sang-kook Han)



1986년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 졸업

1988년 2월 : University of
Florida (공학석사)

1994년 2월 : University of
Florida (공학박사)

1996년~현재 : 연세대학교 전기
전자공학과 교수

<관심분야> Optical communication device &
system, Microwave Photonics, Optical access
networks