

논문 2011-4-29

격자 구조의 실내 환경을 고려한 LED 무선 통신 채널 특성에 관한 연구

A Study of LED Wireless Communication Channel Characteristics considering Latticed Indoor Circumstance

이정훈*, 강장묵**, 조주필***, 김윤현****, 김진영****, 차재상*†

Junghoon Lee, Jangmook Kang, Juphil Cho, Yoonhyun Kim, Jinyoung Kim,
Jaesang Cha

요 약 LED(Lighting emitted diode)는 전기 에너지를 빛으로 변환하는 효율이 좋고 수명이 길어서 차세대 조명으로 관심 받고 있으며, 최근에 자동차의 후미등, 신호등, 실내등에 사용되고 있다. 부가적인 기능으로서 LED를 이용하여 데이터 정보를 조명과 동시에 전송하는 융합(Convergence) 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 실내 환경을 1mm 단위의 격자 형태로 분할하고 LED에서 출발한 광입자가 격자에 도달한 후에 반사되어 직선 운동을 하다가 포토다이오드(PD)에 도달하는 원리를 이용하여 LED 무선 채널의 특성을 연구한다.

Abstract LED is in the spotlight as next generation's lighting due to the fact that it has good efficiency on converting electricity to light and has long life time. Recently it expands the scope up to taillight of car, signal lamp and indoor light. Additionally it can send data information simultaneously with lighting, which is called lighting -communication convergence. In this paper, the channel characteristics of LED wireless communication is studied in the condition that indoor is latticed with 1mm span and photons started from LED are firstly arrived at each lattice after that these move as straight line before meeting photodiode(PD).

Key Words : LED, VLC, Channel, Communication

1. 서 론

최근에 기존 조명을 LED로 변경하는 움직임이 많다. 차량의 후미등 및 방향등, 교통 신호등, 실내 LED 광원 등이 그 주요한 사례이다. LED는 에너지/빛 전환 효율이 85%에 달해서 열을 거의 발생시키지 않으며, 수은

과 같은 가스를 사용하지 않고, 백열등에 비해서 수명이 훨씬 길다. 이와 같은 친화적인 저탄소 특성 때문에 그동안 새로운 조명으로 사용하기 위해 많은 연구가 진행되었다. LED는 반도체이기 때문에 응답 속도가 매우 빠르고 세기(intensity) 조절이 용이하다. LED 통신은 400nm 부터 700nm 사이의 파장 길이를 갖는 가시광 영역의 통신이며, 3000GHz 전파의 파장이 0.1mm 임을 감안하면, 굉장히 고대역을 사용한다고 볼 수 있다.

본 논문의 II 장에서 LED 무선 통신의 송신부, 채널, 수신부 특성에 대해서 나타나고, III 장에서는 II 장에서 제시한 방법으로 모의 실험을 수행하여, LED 무선 통신 채널의 특성을 추출하고 분석하고자 한다.

*정회원, 서울과학기술대학교 IT정책대학원

**정회원, 동국대학교 전자상거래연구소

***정회원, 군산대학교 전자공학과

****정회원, 광운대학교 전자공학과

*†정회원, 서울과학기술대학교 매체공학과(교신저자)

접수일자 2010.10.3, 수정일자 2011.6.29

게재확정일자 2011.8.12

II. 시스템 모델

본 논문에서는 LED 무선 통신 환경으로서 넓이 2m, 깊이 3m, 높이 2.2m 크기의 실내를 대상으로 하였으며, 천정에 LED가 있고 바닥에서 0.5m 떨어진 지점에 포토다이오드(PD)가 위치하여 LED에서 송신한 신호를 수신한다. 전체 구성도는 그림 1에 나타내었다.

1. 송신부

LED에서 실내의 각 격자 지점으로 방사하는 전력은 다음의 식 (1)과 같이 표현된다.

$$P_{Trans} = A \cdot \sum_{i=0}^{i=n} |\overline{SD}_i|^2 \cdot f(\phi_i) \quad (1)$$

$f(\phi)$ 는 LED에서 방사하는 각도에 따른 강도(intensity)의 크기 함수이며, 근사적으로 코사인 함수의 값을 따른다. A는 각 격자 지점으로 방사하는 벡터의 크기이며, \overline{SD}_i 는 LED (Source)로부터 실내의 각 격자 지점(Destination)으로 향하는 단위 벡터이다. 따라서 LED 전체 전력은 LED에서 각 격자(n개)로 방사하는 벡터의 크기에 방사 각도에 따른 LED의 강도(intensity)의 크기를 곱한 값이 된다.

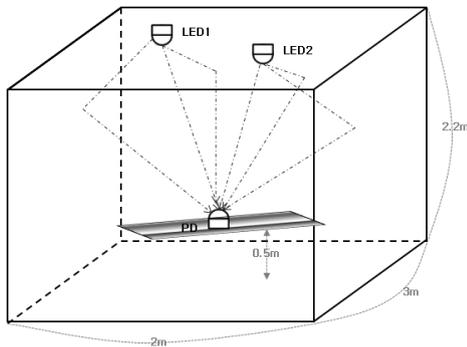


그림 1. LED 무선 통신 구성도
Fig. 1. Structure of LED wireless communication

2. 채널 특성

그림 1에서 보는 바와 같이 LED에서 출발한 광 입자는 직접 포토다이오드에 도달하는 직접파(LOS)와 적어도 한번 이상 벽에 반사된 후에 포토다이오드에 도달하는 반사파(NLOS)로 구분할 수 있다. 직접파는 거리 감쇠에 따른 크기 변화만 발생하지만, 반사파는 거리

감쇠와 벽 반사에 의한 감쇠를 겪게 된다. 벽 반사는 50% 감쇠를 가정한다. 직접파에 의한 수신 전력을 PLOS, 반사파에 의한 수신 전력을 PNLOS 라고 가정하고, 최종으로 포토다이오드에 수신되는 신호 전력을 PRECEIVE 라고 하면 식 (2)와 같이 표현된다. 여기서 d는 신호가 LED에서 포토다이오드까지 도달하는 거리이며, ϵ 은 벽에 의한 감쇠이다.

$$\begin{aligned} P_{Re\ ceive} &= P_{LOS} + P_{NLOS} \\ &= \frac{A}{4\pi} \left(\sum_{i=0}^{i=m} |\overline{SD}_i| \cdot f(\phi_i) \cdot \frac{1}{d_i^2} + \sum_{i=0}^{i=l} |\overline{SD}_i| \cdot f(\phi_i) \cdot \frac{1}{d_i^2} \cdot \epsilon_i \right) \end{aligned} \quad (2)$$

3. 수신부

수신부인 포토다이오드에서는 수신된 광 전력에 비례해서 전류가 생성되며, 그 반응도 R은 생성 전류/수신전력(A/W)로 표현 가능하다. 이때 수신된 광원의 입사 각도는 FOV(Field of View)라는 포토다이오드의 수신 가능 각도 보다 작은 값을 가져야 한다.^[1]

$$i_{Re\ ceive} = P_{Re\ ceive} \cdot R \quad (3)$$

포토다이오드는 수신회로에서 기본적으로 노이즈 전류를 갖게 되는데, 선트 저항에 의한 존슨 노이즈와 암전류에 의한 산탄 잡음이 있으며 다음과 같이 표현된다.^[2]

$$I_j = \left[\frac{4KT}{R} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

여기서 I_j 는 존슨 노이즈, K는 볼츠만 상수 ($1.33 \cdot 10^{-23} J/K$), T는 절대온도, R은 저항을 나타낸다.^[2]

$$I_s = \left[2e(I_d + I_p)B \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

여기서 I_s 는 산탄 잡음 전류이며, e는 electronic charge ($1.6 \cdot 10^{-19} coulomb$), I_d 는 암전류, I_p 는 형광등 또는 햇빛과 같은 잡음에 의한 전류, B는 대역폭이다. 이로부터 전체 노이즈 전력(NEP)은 아래와 같다.^[2]

$$NEP = \frac{I_{total}}{R(Sensitivit\ y)} \quad \text{단, } I_{total} = (I_s^2 + I_j^2)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

이론적으로 전체 노이즈 전력 보다 큰 신호 강도가 포토 다이오드에 도달하면, 광에 의한 신호 검출이 가능하다.

III. 모의 실험

두 개의 LED가 송신부로서 천정에 위치하고 포토다이오드는 수신부로서 바닥으로부터 0.5m 떨어진 곳에 있다. LED를 출발한 광 입자는 천정을 제외한 바닥 및 벽의 1mm 간격으로 분할된 격자를 향해서 직선 운동을 시작하게 되며, 이들 중 일부는 실내의 육면체 내부를 직선 운동하다가 포토다이오드에 도달하고 나머지 광 입자는 감쇠되어 사라지게 된다. 상세 변수는 아래 표 1과 같다.

표 1. LED 무선 통신 시스템 모의 실험 변수
Table 1. Parameter of LED wireless communication

항목	값
실내 크기	2m*3m*2.2m
LED 송신전력	1Watt
LED1 위치	(0.7m, 1m, 2.2m)
LED2 위치	(1.4m, 2m, 2.2m)
PD 위치	(1.5m, 2.7m, 0.5m)
PD 크기	1cm ²
FOV	70°
벽 반사계수	50%

모의 실험한 결과, 포토다이오드에 수신된 전력은 LED1과 LED2에 의해 수신된 신호의 전력 합과 같으며 그림 2에 표현되어 있다. LED1로 부터 수신된 신호는 약 8ns에서 직접파에 의한 수신 신호가 $2.4 \cdot 10^{-10}$ W 크기로 밀집해 있으며, 반사파에 의한 수신 신호는 약 21ns 근처에 $1.3 \cdot 10^{-11}$ W의 크기로 밀집되어 있다. LED2로부터 수신된 신호는 약 6.1ns 근처에 직접파에 의한 수신 신호가 $6.3 \cdot 10^{-10}$ W의 신호 크기로 위치해 있으며, 7.1ns 근처에 1 반사파에 의하여 $2 \cdot 10^{-10}$ W 크기의 신호가 밀집해 있으며, 2 반사파는 8ns 위치에 $7 \cdot 10^{-11}$ W의 크기로 위치해 있다. 3 반사파 이상 되는 신호는 20ns 이후에 $7 \cdot 10^{-12}$ W 이하의 값을 가지고 위치해 있다. 이 수신된

신호는 그림 2의 점선 그래프와 같으며, 이를 수식으로 근사시키면 식 (7)과 같다.

$$f(x) = \sum_{i=1}^7 a_i \cdot \exp\left(-\left(\frac{x-b_i}{c_i}\right)^2\right) \quad (7)$$

a1 = 6.241e-010, b1 = 6.131e-009, c1 = 2.693e-010,
a2 = 2.332e-010, b2 = 8.432e-009, c2 = 3.46e-010,
a3 = 1.933e-010, b3 = 7.129e-009, c3 = 4.626e-010,
a4 = 1.42e-011, b4 = 2.047e-008, c4 = 3.586e-010,
a5 = 7.662e-012, b5 = 2.127e-008, c5 = 3.887e-010,
a6 = 8.139e-012, b6 = 2.195e-008, c6 = 5.268e-010,
a7 = 8.58e-012, b7 = 8.008e-009, c7 = 1.395e-009

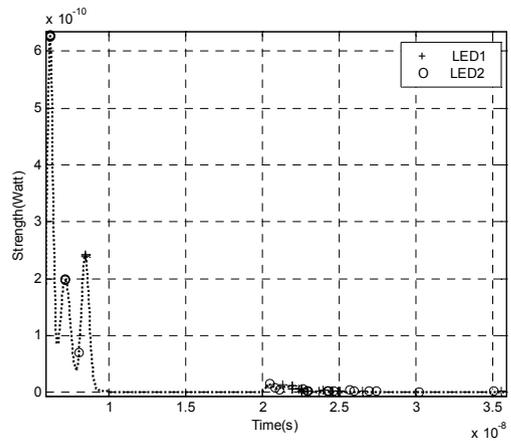


그림 2. LED 1, 2에 의한 포토다이오드 수신 전력
Fig. 2. Received power on PD from LED 1 and 2

모의 실험한 실내 환경의 크기를 고려할 때, 수신 전력의 크기가 비교적 큰 신호들은 10ns 이내에 모두 위치하며, 비교적 크기가 작은 신호들은 20ns 이후에 모두 위치했다.

포토다이오드에서 응답도 R을 0.5, 대역폭을 1 Hz, 암전류(I_d)는 2nA, 선트 저항은 $5 \cdot 10^8$ ohm으로 가정하고 형광등, 백열등, 햇빛으로 인해서 포토다이오드에 발생하는 산탄 잡음 전류를 39.5uA로 가정하면 식 (5)에 의해서 I_p와 I_{total}는 각각 $3.5 \cdot 10^{-12}$ A, $3.5 \cdot 10^{-12}$ A로서 같은 값을 갖게 된다.^[3] 즉, 주변 광 잡음에 의해서 총 산탄 잡음이 좌우되며, 전체 노이즈 전력(NEP)은 식 (6)에 의해서 $7 \cdot 10^{-12}$ W가 된다. OnOff-Keying의 변조 방식에서 BER은 $erfc(\sqrt{SNR})/2$ 와 같으므로, 데이터 통신을 위해

10^{-6} 의 BER을 얻기 위해서는 15.6dB의 신호 대 잡음비 (SNR)가 필요하다.^[4] 전체 노이즈 전력(NEP)가 $7 \cdot 10^{-12}$ W인 상황에서 신호 대 잡음비 15.6dB를 얻기 위해서는 포토다이오드에 수신되는 전력이 $2.5 \cdot 10^{-10}$ W 이상이 되면 가능하다.

모의 실험 결과에 의하면 LED1에서 8ns에 위치한 직접파 수신 신호 세기를 고려하면 전력이 $3.15 \cdot 10^{-8}$ W 이므로 신호 대 잡음비가 35.5dB 이고, 반사파를 고려한 22 ~ 36ns의 시간에 수신된 신호의 전력이 $7.8 \cdot 10^{-10}$ W 이므로 신호 대 잡음비가 20.46dB 이다. 따라서 직접파 신호를 받지 못하더라도 반사파 신호만을 가지고도 데이터 통신이 가능한 신호 대 잡음비 확보가 가능하다. LED2도 유사한 패턴을 보였는데, 6.1, 7.1, 8ns에 위치한 수신 신호군의 전력 $1.33 \cdot 10^{-7}$ W, 20ns 이후의 반사파에 의한 수신 전력이 $6.54 \cdot 10^{-10}$ W으로서 각각 32.7dB, 19.7dB의 신호 대 잡음비를 가지며, 어느 신호 군에서나 데이터 통신이 가능하다.

IV. 결론

본 논문에서는 실내 환경에서의 LED 통신 채널에 대하여 연구하였다. LED 송신부를 LED에서 각 격자의 지점을 잇는 벡터의 개념으로 모델링 하였으며, LED의 방사 각도에 따른 강도(intensity)를 적용하여 벡터에 가중치를 적용했다. 채널은 방사된 LED 벡터가 실내의 각 지점에서 반사되는 모든 움직임을 추적해서 포토다이오드에 도달하는 유효 강도와 도달 지연 시간을 측정했다. 수신부에서는 형광등, 백열등, 햇빛 등과 같은 주변 잡음을 고려하여 수신 성능을 측정하였다.

실험 결과 LED1, 2에서 직접파 신호 군과 반사파 신호 군의 특징이 명확히 드러났다. 직접파 신호는 주로 10ns 이내에 존재하고, 반사파는 20ns 이후에 위치했으며, 직접파의 신호 수신 강도는 반사파 수신 신호에 비해서 약 3~20배에 달했다. 주변 잡음으로 설정한 햇빛에 의한 산탄 잡음 전류가 PD 회로에 의한 노이즈 전류보다 월등히 큰 값을 갖기 때문에 전체 노이즈 전력(NEP)의 대부분을 햇빛 잡음이 차지했다. LED 송신 전력으로 설정한 1W를 사용하면, LED 한 개만을 가지고도 On/Off-Keying방식의 10^{-6} 의 BER을 가지는 통신이 가

능했다.

참고 문헌

- [1] STEVE HRANILOVIC, "Wireless Optical Communication Systems", Springer, 2005.
- [2] "Photodiode Characteristics", OSI Optoelectronics.
- [3] Antonio M. R. Tavares, Andriano J. C. Moreira, Cipriano R. A. T. Lomba, Luis M. V. Moreira, Rui J. M. T. Valadas, A. M. de Oliveira Duarte, "Experimental Results of a 1Mbps IR Transceiver for Indoor Wireless Local Area Networks", International Conference on Advances in Communication & Control, Crete, Greece, 26-30 June, 1995.
- [4] B. SKLAR, "DIGITAL COMMUNICATIONS", Prentice-Hall International, Inc., 1988.

※ 본 연구는 방송통신위원회/한국방송통신전파진흥원 '방송통신기술개발사업'(No.11911-01111)의 지원을 받아 수행 되었습니다.

저자 소개

이 정 훈(정회원)



- 1999년: 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 공학사
- 2001년: 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 공학석사
- 2007년~현재: 서울과학기술대학교 IT 정책대학원 박사과정

<주관심분야: 디지털통신, 무선통신, LED통신>

강 장 목(정회원)



- 1997년 2월 : 고려대학교대학원 무역학과 (경영학석사)
- 2005년 8월 : 고려대학교정보보호 대학원 정보보호전공 (공학박사)
- 1996년 1월 ~ 1997년 8월 : 쌍용 정보통신 시스템사업본부 컨설팅팀 담당
- 2010년 9월 ~ 현재 : 동국대학교 전자상

거래연구소 초빙연구교수

<주관심분야: 스마트폰, 소셜 네트워크 서비스, 증강현실, 웹 2.0, UCC, 평판시스템>

조 주 필(정회원)



- 2001년: 전북대학교 전자공학과 공학박사
- 2000년~2005년: 한국전자통신연구원 (ETRI) 이동통신연구단 선임연구원
- 2006년~2007년: ETRI 초빙연구원
- 2011년 ~ : 미국 USF, Visiting

Researcher

• 2005년~ 현재 : 군산대학교 전파공학과 부교수

<주관심분야: Cognitive-Radio, 주파수 융합기술, LTE>

김 윤 현(정회원)



- 2006년: 광운대학교 전파공학과 공학사
- 2008년: 광운대학교 전파공학과 공학석사
- 2008년 ~ 현재 : 광운대학교 전파공학과 박사과정

<주관심분야: 디지털 통신, MIMO-OFDM, VLC, 협력통신, 채널 모델링, 채널 부호화>

김 진 영(정회원)



- 1998년: 서울대학교 전자공학과 공학박사
- 2000년: 미국 Princeton University, Research Associate
- 2001년: SK 텔레콤 네트워크 연구소 책임연구원
- 2009년~2010년: 미국 MIT 공대 Visiting Scientist

• 2001년~현재: 광운대학교 전자융합공학과 부교수

<주관심분야: 디지털통신, 무선통신, 채널부호화>

차 재 상(정회원)



- 2000년: 일본 東北(Tohoku)대학교 전자공학과 (공학박사)
- 2000년~2002년: 한국전자통신연구원 (ETRI) 무선방송 기술연구소 선임연구원
- 2002년~2005년: 서경대학교 정보통신 공학과 전임강사

• 2008년: 미국 Florida University, Visiting Professor

• 2005년~ 현재 : 서울과학기술대학교 매체공학과 부교수

<주관심분야: LED-ID, 조명IT융합신기술, LBS, ITS, UWB, 무선홈네트워크, DMB 및 디지털 방송 등>