

실내 가시광 통신 시스템의 성능 분석

Performance Analysis of Indoor Visible Light Communication Systems

최재혁*, 김성일**, 김진영*
(Jae Hyuck Choi*, Sung Ill Kim**, and Jin Young Kim*)

Abstract : Future electric lights will be composed of white LEDs (Light Emitting Diodes). Indoor wireless optical communication systems utilizing white LED lights have been studying about it. Generally, plural lights are installed in room. Therefore, their optical path difference must be considered. In this paper, the influence of an optical path difference has been investigated and two approaches against this problem are introduced. One uses OOK-RZ (On-Off Keying, Return-to-Zero) coding and the other uses optical OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). From the results of computer simulations, we have found that these approaches are feasible for the wireless optical communication systems utilizing white LED lights.

Keywords: Visible-light communication, White LED, Lights layout, OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), OOK-RZ (On-Off Keying, Return-to-Zero)

I. 서론

가시광통신이란 우리 주위에 흔하게 존재하는 눈에 보이는 빛(가시광)을 사용하여 통신을 하는 최신 통신기술이다. 최근에 들어 실내 통신 시스템 필요성의 증가와 LEDs (Light Emitting Diode Technologies)의 개선을 통해 가시광 통신 시스템에 관심이 높아지고 있다. 고휘도의 LED를 사용하는 기기가 비약적으로 증가하고 있고, 가시광 통신의 발신 장치로 이용할 수 있는 조명기기가 도심에서 급속하게 정비되고 있기 때문이다. 가시광 통신의 보급은 발광소자의 성능에 크게 의존하며, 휘도가 높을수록 용도가 넓어질 수 있다 [1]. 실내에서의 무선 연결을 위해 백색 LED를 이용한 무선광학 통신망을 제시한다 [2, 3]. 시스템에서의 조명기구는 무선광통신을 위한 용량을 가지고 전체 공간을 통한 통신은 고성능 조명장치에 의해 가능하게 되고, 백색칼라의 LED 조명기구는 설치가 쉽고 보기가 편하다는 장점을 갖는다.

가시광통신은 3가지 형태로 생각할 수 있는데 그 첫째가 전광 표시판이나 디스플레이와 같이 표시기구나 조명기구를 이용해서 통신하는 유비쿼터스 가시광통신, 둘째로 교통신호기나 자동차 점등에 사용하는 LED를 이용해서 고속으로 통신기능을 갖도록 한 ITS 가시광통신, 셋째로 옥 내외의 조명기구를 송신기기로 사용하는 조명광통신을 들 수 있다.

가시광통신의 장점을 RF (radio frequency)와 IR (infra red)비교하면 첫째, 주파수 할당의 문제가 없으므로, 호환성이 좋으며 둘째, Visible EM (electromagnetic) 스펙트럼의 사용에 대한 규정이 없다. 셋째, 데이터의 전송가능범위를 인식하기 쉽고 넷째, 전자파가 나오지 않기 때문에 안전성에서 인체에 미치는 영향이 적어 병원, 집 등에서 사용 가능하다. 마지막으로 가시광의 파장을 주파수로 환산하면 대략 385THz ~ 789THz

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 20xx. x. x., 채택확정 : 200x. x. xx.

최재혁: 광운대학교 전자공학과

(jae0011@kw.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2007-S-029-02, 가정용/기업용 WiBro 시스템 기술개발]

에 해당되어 RF 기본시스템의 영향을 주지 않기에 비행기 등 초정밀 전자기기에서 쓰일 수 있다. 가시광선은 벽을 통과하지 못하므로, 벽으로 분리된 다른 사용자의 신호를 도청하기 어려워 보안성이 좋고, 가시광선의 주파수를 재사용할 수 있다. 상용화될 경우, 조명이 있는 곳엔 언제나 고속 데이터통신이 가능하게 되므로, 노트북뿐만 아니라 모든 가전제품과 연계되어 매우 큰 경제적 파급효과를 가져올 것으로 예상하므로 원천기술 확보가 매우 중요하다.

본 논문에서는 다수의 빛이 사용될 때 광로차 (Optical Path Difference)의 영향을 연구하고 문제에 대한 2가지 접근 방식으로 1과 0의 정보에 따라 반송파 신호를 단속적으로 보내는 OOK-RZ (On-Off Keying, Return-to-Zero)코딩과 상호 직교성을 갖는 복수의 반송파를 사용하여 주파수 이용 효율이 높은 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)을 사용한다 [4]. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 백색 LED를 이용하는 무선광학 통신을 가능하게는 접근방식을 찾아낸다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 실내 무선 광통신 링크를 소개하고 채널 시스템 모델을 제안한다. 3장은 전송방식에 대해 논의하고 채널 모델 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 4장에서 보여주고 마지막으로 5장에서 결론을 낸다.

II. 광 채널 (Optical Channel)

실내 LED빛을 사용한 무선광통신시스템을 구현하고 연구를 위해 그림1과 같은 시스템을 나타내었다. 실내에 정보가 홈 네트워크에서 흐르고 각 공간에 광학 액세스 지점에 접근한다. 이 액세스 지점은 백색 LED로 구성되고 동시에 빛의 기능을 갖는다. 액세스 포인트의 백색 LED는 발광뿐만 아니라 가시광 신호가 변조되어 공기 중에 방출된다. 변조된 광전파의 점멸은 매우 빠르고 시각으로 느낄 수 없으며 조명의 기능은 무선 광 통신에 의한 변함은 없다.

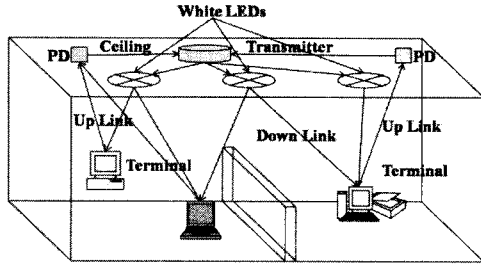


그림1. 실내에서의 무선 광통신 시스템과 조명기기
Fig.1. Schematic structure of a visible light communication system

가시광 통신 시스템에서 변복조의 방법으로는 송신기는 전기적 신호를 출력 광파로 변조하여 세기 변조 (IM: intensity modulation)된 신호를 전송하고, 수신기는 수신된 광 신호를 광 다이오드 (PD: photodiode)에 직접 조사하여 전류 크기의 변화로써 검출 (DD: direct detection)한다. 이러한 전송방식을 세기변조/직접검출 (IM-DD) 방식이라고 한다. 백색 LED 전구에서 전송된 광 펄스는 사용자의 단말에 수신된다. 단말은 PDs(Photo Diodes)로 구성되고 전기적 신호의 광 펄스를 변환시킬 수 있다.

제안된 시스템은 LED 빛의 조도를 위한 고려사항이 요구된다. 일반적으로, 빛의 조도는 ISO(International Organization for Standardization)의 규격을 따른다. 200~1000[lx]의 조도는 보통 작업환경에서 요구되는 밝기이다. 수치 해석의 결과에서[3,4], 충분한 통신과 조도는 600~1000[lx] LEDs에서 가능하다.

전송 신호의 광 파워를 $x(t)$ 라 하고, 검출된 광 전류를 $y(t)$ 라 하면, 다음과 같이 기저대역 등가 채널 모델로 표현할 수 있다.

$$Y(t) = X(t) \otimes h(t) + N(t), \quad (1)$$

이때, $h(t)$ 는 채널 임펄스 응답이고, \otimes 는 convolution 연산이다. 잡음 $n(t)$ 는 additive white Gaussian으로 모델링하며, 광 파워 $x(t)$ 는 채널 입력은 non-negative를 가져야 하며,

$$X(t) \geq 0, \quad (2)$$

분산은 다음과 같이 정의한다[7].

$$\sigma^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2. \quad (3)$$

산탄잡음(shot noise)분산과 열 잡음(thermal noise)분산은 다음과 같이 정의 된다[4,5].

$$\sigma_{shot}^2 = 2q\gamma P_r B + 2qI_{bg} I_2 B, \quad (4)$$

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{8\pi k T_k}{G} \eta A I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 k T_k \Gamma}{g_m} \eta^2 A^2 I_3 B^3$$

(5)

표 1. 파라미터

Table 1. Parameters

q = electronic charge	1.6×10^{-19}
γ = detector responsivity	0.53[A/W]
B = equivalent noise bandwidth	300[Mbps]
I_{bg} = background light current	5100 [μA]
I_2 = noise bandwidth factor	0.562
P_r = received signal power	
k = Boltzman's constant	$1.38 \times 10^{-23} [J / K]$
T_k = absolute temperature	295[K]
G = open loop voltage gain	10
η = fixed capacitance of PD	$0.1 [pF / cm^2]$
A = physical area of PD	$1 cm^2$
g_m = FET transconductance	30[mS]
Γ = FET channel noise factor	1.5
I_3	0.0868

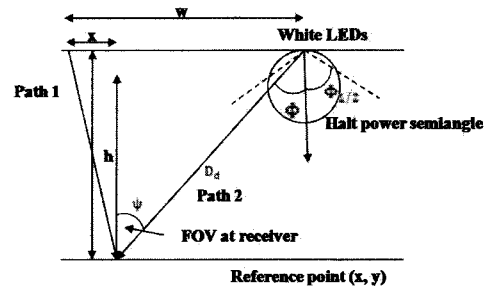


그림2. 입사각/ 발광각

Fig.2. Launch angle/ luminescence angle

발광각(ϕ)과, 입사각(ψ)의 관계는 그림 2와 같이 정의된다.

평균 광 파워 P_t 는 다음과 같이 주어진다.

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t) dt. \quad (6)$$

평균 수신된 광 파워는 다음과 같다[8].

$$P_r = H(0)P_t. \quad (7)$$

여기서 채널 DC gain은 $H(0)$ 이고 광 무선 링크에서 채널 이득 (channel DC gain)은 다음과 같이 정의 된다[5,6].

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases}, \quad (8)$$

이때, $T_s(\psi)$ 는 optical filter gain이고, Ψ_c 는 수신 PD의 FOV (field of view)이다. A는 PD 검출되는 물리적인 지역, d 는 전송단과 수신단 사이의 거리를 나타낸다. m은 order of Lambertian emission이고, $g(\psi)$ 는 optical concentrator gain으로 다음과 같이 정의 된다.

$$m = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos \Phi_{1/2})}. \quad (9)$$

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \Psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \Psi_c; \\ 0, & \psi > \Psi_c. \end{cases} \quad (10)$$

이때, n은 reflecting index이다. 비율(SNR)은 다음과 같이 정의된다.

$$SNR = \frac{\gamma^2 P_r^2}{\sigma^2 B}. \quad (11)$$

III. 광로차 (Influence of an optical path difference)

다중빛을 이용하는 시스템에서 광로차를 고려되어야 한다. 그림 3 에서 다수의 전송단 때문에 지연시간이 발생한다.

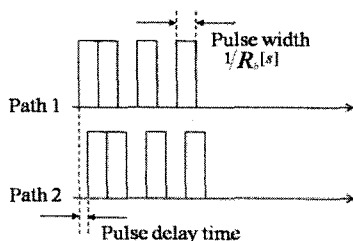


그림 3. 광로차에 의한 펄스 지연
Fig.3. Pulse delay due to an optical path difference

C 는 빛의 속도이고 R_b [bps]은 광펄스율을 나타낸다. 표 1 의 파라미터 목록을 적용한다. 광학 신호는 2 개의 LOS 경로를 통해서 수신단에 도착한다. 두 전송단 사이의 폭은 10.0[m]이고 실내 높이 h 는 3.0[m]이다. 종단 위치 x 는 7.5, 6, 5.0[m]이다.

A. OOK-RZ

OOK-RZ (On-Off Keying, Return-to-Zero)코딩은 광로 지연을 완화시키기 위해 사용된다. 보통의 OOK 는 연속의 펄스를 이용하고 반면에 “1” 펄스는 OOK-RZ 코딩에서 제로(0) 주기를 갖는다. 그림 4 에서 비율 r 은 다음과 같이 정의된다 [9].

$$r = \frac{\text{"1" period}}{\text{symbol_duration}}. \quad (11)$$

OOK-RZ코딩은 보호시간을 갖고 지연 효과를 완화시킨다. 이러한 펄스는 넓은 전송 대역을 요구한다. 그러나, 광 반송파는 가능한 넓은 대역폭을 가지기 때문에 중요하지 않다.

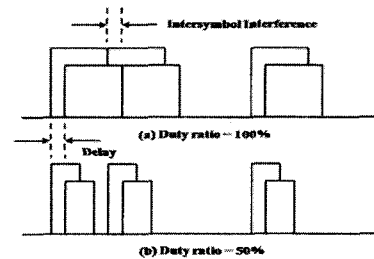


그림 4. OOK-RZ코딩
Fig.4. OOK-RZ coding

B. OFDM

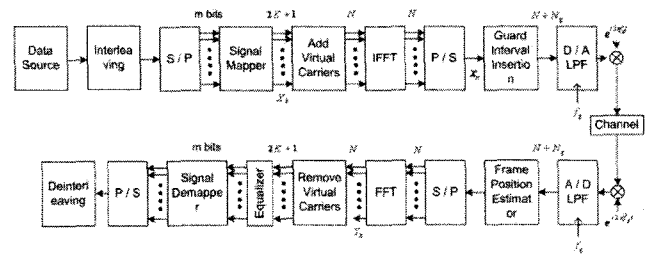


그림 5. OFDM 시스템 블록도
Fig.5. OFDM system block structure

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)를 사용하여 지연은 OFDM심볼의 보호대역에 의해 병합된다. 그림 5 에서 발신 데이터 비트는 각 전송단에 복제되어지고, LED의 합성된다. 각 전송단에서 데이터 순차는 S/P (Serial to Parallel) 변환과 각 단의 변조에 N 평행한 심볼을 변환된다. 변조된 평행한 심볼은 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform)에 의해 N 다른 부반송파의 합에 변환하고 보호대역이 삽입되어 OFDM 신호가 발생된다. 이러한 신호들은 O/E (Optical to electrical) 변조에 의해 광 휘도 변조되어 방출한다. 수신된 광파는 PD에 의해 전기적 파형으로 변조한다. OFDM 변조된 신호 파형은 OFDM 복조기에서 원래의 디지털 신호로 복조하고 원래의 신호가 검색된다[9].

IV. 실험 결과

표 2. 시뮬레이션 파라미터

Table 2. Simulation parameters

구분	심볼	값
FOV at a receiver	Ψ_c	60°
Semi angle at half power	$\Phi_{1/2}$	50°
Transmitted power / a LED chip	P_t	20mW
Physical area of PD	A	$1cm^2$
Optical filter gain	$T_s(\psi)$	1
Reflective index	N	1.5

TABLE II에 준하여 실험하였으며 수신단과 송신단의 거리 x 에 따른 입사각과 발광각에 변화에 따라 다음과 같은 실험 결과를 얻었다. 또한 OOK-RZ코딩과 OFDM변조를 사용하여 수신단의 거리에 따른 BER을 비교하였다.

그림 6은 송신단의 거리(x)가 5m값이 주어질 때 송수신단의 거리(d)는 5.83m와 입사각(ψ) 59.0° 을 갖고 OOK-RZ코딩과 OFDM변조에 따른 BER을 비교할 수 있다. 그림 7에서는 송신단의 거리(x)가 6m값이 주어질 때 송수신단의 거리(d)는 5m와 입사각(ψ) 53.1° 을 갖고 그림 8에서는 송신단의 거리(x)가 7.5m값이 주어질 때 송수신단의 거리(d)는 3.90m와 입사각(ψ) 39.8° 을 갖고 OOK-RZ코딩과 OFDM변조에 따른 BER을 비교를 나타낸다.

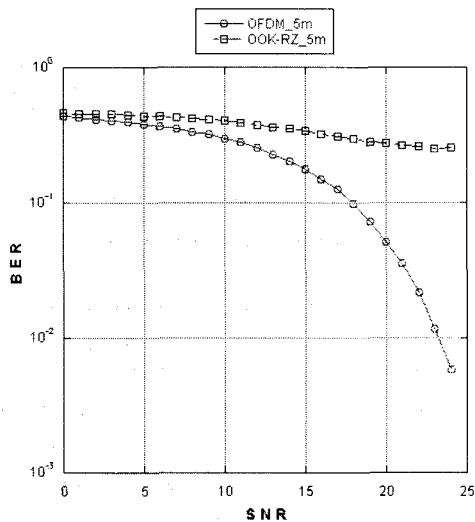


그림 6. 송신단의 거리(x)가 5m값에 따른 BER 성능 비교
Fig. 6. Comparison of BER performance with 5m distance of terminal

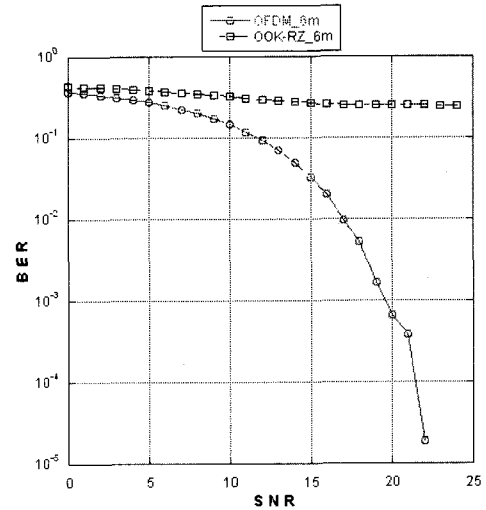


그림 7. 송신단의 거리(x)가 6m값에 따른 BER 성능 비교
Fig. 7. Comparison of BER performance with 6m distance of terminal

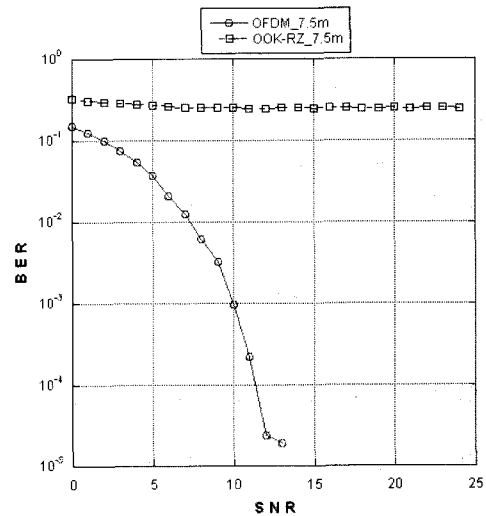


그림 8. 송신단의 거리(x)가 7.5m값에 따른 BER 성능 비교
Fig. 8. Comparison of BER performance with 7.5m distance of terminal

V. 결론

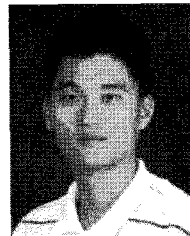
실내 가시광 무선 통신 시스템에 대한 분석을 통하여 시스템에서 송신단과의 거리(x)에 따른 조건에 따른 발광각(ϕ)과, 입사각(ψ)의 영향과 성능 분석을 위해 OOK-RZ와 OFDM 변조를 이용하여 성능 비교하였다. 실험결과에서 보듯이 OFDM에서의 성능 우월을 보이고 송수신단의 거리(d)가 가까울수록 수신률이 좋을 보인다. 가시광 통신의 연구는 데이터 전송 속도와 수신단의 FOV에 영향과 관계에 대한 연구와 LED의 성능에 따른 연구도 필요하며 차세대 실내 통신 시스템으로서의 역할로 주목할 만하다.

참고문헌

- [1] C. P. Kuo, R. M. Fletcher, T. D. Osentowski, M. C. Lardizabal, and M. G. Craford, "High performance AlGaInP visible light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.* vol. 57, no. 27, pp. 2937-2939, Dec. 1990.
- [2] Y. Tanaka, S. Haruyama and M. Nakagawa, "Wireless optical transmission with the white colored LED for the wireless home links," in *proc. of the 11th Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2000)*, London, UK, pp. 1325-1329, Sep. 2000.
- [3] T. Komine, Y. Tanaka, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Basic study on visible-light communication using light emitting diode illumination," in *proc. of 8th Int. Symp. on Microwave and Optical Technology (ISMOT 2001)*, Montreal, Canada, pp. 4548, Dec. 2001.
- [4] R. van Nee and R. h d , *OFDM for Mobile Multimedia Communications*, Artech House, London, UK, Dec. 2000.
- [5] J. M. Kahn and J. R. Bany, "Wireless infrared communications," in *proc. of IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265-298, Feb. 1997.
- [6] F. R. Gfeller and U. Bapst, "Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation," in *proc. of IEEE*, vol. 67, no. 11, pp. 1474-1486, Nov. 1979.
- [7] R. M. Gagliardi and S. Karp, *Optical Communications*, McGraw-Hill, Dec. 1983.
- [8] H. Sugiyama, S. Haruyama, M. Nakagawa, "Experimental Investigation of Modulation Method for Visible-Light Communications," *IEICE Trans. on Commun.*, vol. E89-B, no.12, pp.3393-3400, Dec. 2006.
- [9] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Indoor visible communication utilizing plural white LEDs as lighting," in *proc. of the 12th IEEE Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2001)*, San Diego, CA, pp. 81-85, Sep. 2001.



최재혁
2008년 광운대학교 전파공학과 (공학사).
2008년 ~ 현재 광운대학교 전파공학과 석사과정. 관심분야는 디지털통신, VLC, MIMO



김성일
2002년 고려대학교 전기공학과(공학사) 2007년 고려대학교 전자컴퓨터공학과 (공학석사) 2004년~현재 KT 인프라 연구소 선임연구원 관심분야는 WiBro 망구조 연구 등임



김진영
1998년 서울대 전자공학과 (공학박사).
1998년 ~ 2000년 미국 Princeton University, Research Associate. 2000년 ~ 2001년 SK텔레콤 네트워크 연구원 책임연구원. 2001년 ~ 현재 광운대학교 전파공학과 교수. 관심분야는 디지털 통신, 신호처리, 채널 부호화.