

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.2.73>

IIBC 2014-2-10

발광 각도 변화에 따른 MIMO-VLC 시스템의 성능 비교

Performance comparison of MIMO-VLC systems according to the change of an emission angle

이병진*, 김용원**, 김영근***, 김경석****

Byung-Jin Lee*, Yong-Won Kim**, Young-Keun Kim***, Kyung-Seok Kim****

요약 가시광 무선통신은 전송하고자 하는 데이터를 빠른 ON/OFF 속도를 갖는 LED를 이용해 고속의 무선 데이터 전송 수단으로 사용하는 통신 방식이다. VLC 시스템이 발전함에 따라 기본적인 연구 문제는 통신 신뢰성 확보와 성능을 향상시키는 것이다. 가시광 무선통신의 특성 상 빛의 도달 범위에만 통신이 이루어지며, 이는 빛의 발광각도에 따라서 큰 차이를 나타낸다. 이에 본 논문에서는 일반적인 실내 환경의 경우, 여러 개의 LED가 장착되어 있는 속성을 이용하여 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 통신 시스템 적용하였으며, 송신기의 발광각도를 변화시켜 수신단에서 얻는 총 전력과 SNR성능을 분석하였다. 이에 대해 시뮬레이션을 실행한 결과, 송신기의 발광 각도에 따라서 SNR 성능과 BER성능에 많은 영향을 끼침을 확인하였다.

Abstract Visible light communication is a communication method using an LED having a high-speed ON / OFF rate data to be transmitted, it is used as a wireless high speed data transmission. VLC system evolves, the problem of basic research is intended to improve performance and ensure reliability of the communication. The nature of the visible light communication, communication is performed only in the reach of the light, which indicates a big difference by the emission angle of the light. Therefore, in this paper, in the case of indoor environments generally, with the attributes of the multiple LED is equipped, was applied to a MIMO (Multiple Input Multiple Output) communication system. and analyzed SNR performance and total power can be obtained on the reception side by changing the emission angle of the transmitter. As a result of the simulation was run against this, it was confirmed that there is a significant impact on the performance of BER and SNR performance by the emission angle of the transmitter.

Key Words : VLC, Repetition code, Spatial Multiplexing, STBC, Zero forcing, MIMO

I. 서론

가시광 무선통신은 전송하고자 하는 데이터를 빠른

ON/OFF 속도를 갖는 LED를 이용해 고속의 무선 데이터 전송 수단으로 사용하는 통신방식이며, 빛을 내는 조명의 역할을 함께 겸하여 통신을 할 수 있다는 특징에 현

*준회원 충북대학교 전자통신공학과

**정회원 충청지역사업평가원

***정회원 ㈜넷커스터마이즈

****정회원 충북대학교 정보통신공학과 부교수(교신저자)

접수일: 2014년 3월 12일, 수정완료일: 2014년 4월 5일

게재확정일: 2014년 4월 11일

Received: 12 March, 2014/ Revised: 5 April, 2014

Accepted: 11 April, 2014

*Corresponding Author: kseokkim@cmbu.ac.kr

Department of Electrical and Electronic Engineering, Chungbuk National University, Korea

재 주목받고 있는 기술이다. 특히, 점멸이나 명암의 변화 주기가 짧을수록 고속의 데이터를 전송할 수 있다^[1].

가시광 매체를 사용하는 새로운 통신 기술은 IEEE 802.15.7 표준에 제안되어있다^[2]. 이 표준은 오디오 및 비디오 멀티미디어 서비스를 지원하기에 충분한 데이터 속도를 제공하기 위해 서로 데이터 통신 및 조명 용도를 병합하는 가시광 무선 통신 (VLC)의 사용을 기재 하고 있다. 현재 VLC는 모바일-단말기간의 통신, WPAN, 그리고 전자파의 간섭이 민감한 병원 및 항공기 등의 분야에서 많은 연구 활동을 통해 기반이 완성되어 가고 있다. VLC 시스템이 발전함에 따라서 서비스 영역에서의 통신 신뢰성 확보와 데이터 레이트를 증가시키는 것은 기본적인 연구 문제이다. 일반적인 실내 환경 의 경우, 충분한 조명을 제공하기 위해 일반적으로 여러 개의 LED가 장착되어 있다. 이 속성은 쉽게 광학 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 통신 시스템을 만드는 데 이용 될 수 있으며, 이 기술은 데이터 레이트를 향상시킬 수 있다. 또한 통신 신뢰성은 신호 대 잡음비 (Signal to Noise Ratio ; SNR)로 표현되고, 이는 송신기의 역할을 하는 LED의 개수, 전력, 발광각도 등이 통신 영역의 SNR을 결정하는 중요한 요소라 할 수 있다.

본 논문에서는 LED 패널을 고정하고, Photo Diode를 가진 단말기를 움직여 발광각도에 따른 채널 품질 영향을 분석하였으며, MIMO전송 기술을 이용해 발광각도에 따른 BER성능 변화를 분석하였다. MIMO 전송 기술 중 하나는 송신 다이버시티를 위해 Alamouti가 제안한 space-time code에 기초한다^[3]. 다른 하나는 두 개의 독립적인 데이터 스트림들을 전송하기 위해 2개 이상의 송신 안테나를 사용하는 Spatial Multiplexing 과 동일한 정보를 동시에 다수의 송신기로부터 전송되는 방법을 적용한 Repetition code이다. Repetition code는 송신 다이버시티로 인해 좋은 성능을 발휘하는 것으로 알려져 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 MIMO-VLC 시스템 모델을 분석하고, 3장에서는 MIMO 기반의 전송기법을 분석한다. 4장에서는 송신기의 발광각도 변화에 따른 SNR을 분석하였으며, 5장에서 시뮬레이션 결과를 분석하고 6장에서는 결론을 맺는다.

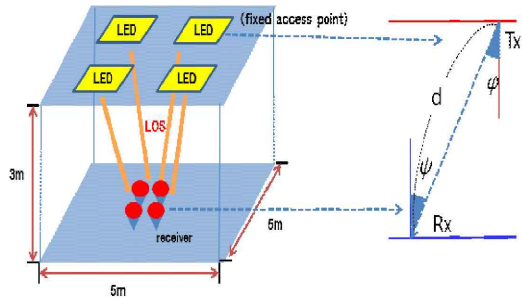
II. MIMO-VLC 시스템

본 논문은 MIMO환경의 IM/DD(Intensity Modulated

Direct Detection) 시스템을 고려한다. 그림 1과 같이, N_t 개의 송신기와 N_r 개의 광 검출기를 구성하였으며, 송신기에서 OOK(On-Off keying), 또는 VPPM (Variable Pulse Position Modulation)으로 변조된 펄스를 검출기로 송신하며, 수신된 신호벡터는 다음과 같다.

$$= s + n \quad (1)$$

여기서 n 은 주위 총 광 잡음 및 증폭기 잡음의 합이며, 결과적으로 평균이 0 분산이 $\sigma_{total}^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{amplifier}^2$ 인 백색 가우시안 확률 변수로 구성된다. 여기서 σ_{shot}^2 은 shot noise variance이며 $\sigma_{amplifier}^2$ 은 amplifier noise variance이다^[4].



1. MIMO-VLC의 시스템 모델

Fig. 1. Model of the MIMO-VLC system.

는 $N_T \times N_R$ 의 채널 행렬이다. 여기서 N_T 는 송신기의 수를 나타내며, N_R 은 수신기의 수를 나타낸다. 각 송신기와 수신기의 DC gain은 행렬 H 로 표현할 수 있다.

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{1j} & \cdots & h_{1N_T} \\ h_{i1} & h_{ij} & \cdots & h_{iN_T} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N_R1} & \cdots & \cdots & h_{N_RN_T} \end{bmatrix} \quad (2)$$

N_T 번째의 송신기와 N_R 번째의 수신기의 DC gain은 h_{NRNT} 로 표현할 수 있고, 그것은 N_R 번째의 수신기에 도달하는 N_T 번째 송신기의 모든 전력을 합산하여 추정할 수 있다^[4].

$$h_{N_r, N_t} = \begin{cases} \frac{(k+1)A}{2\pi d^2} \cos^k(\phi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi_{ij} \leq \psi_c \\ 0, & \psi_{ij} > \psi_c \end{cases} \quad (3)$$

여기서 A는 수신기의 수신범위이고 d는 송신기와 수신기 사이의 거리이다. ϕ 는 방사각이고 ψ 는 수신기에서 빛의 입사각이다. ψ_c 는 수신기의 FOV(field of view) 이다.

III. MIMO 기반의 전송기법

1. MSTBC(Modified Space-Time Block Code)^[5]

MSTBC는 각 송신 안테나를 통해 전송되는 송신 신호들이 시간, 공간적으로 서로 상관관계를 갖도록 설계하여 다이버시티 이득을 얻게 된다. 가시광 통신에 적용된 OOK나 VPPM변조방식의 경우, 실제 신호를 처리하고 있다. 따라서 기존의 Alamouti code 에서처럼 어떤 복소수 표기법을 연결할 필요가 없다. 이를 위해 Simon과 Vlnrotter는 IM/DD링크에서 Alamouti code의 수정된 버전을 제안하였다.

입력 심벌 시퀀스는 $S=[S_1, S_2 \dots S_{N_t}]$, $s_i \in \{0,1\}$ 이며, 수정된 Alamouti code는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} s & s_2 \\ -s_2 & s_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

복호는 첫 번째 심벌 구간에 수신되는 신호를 r_1 이라 하고 두 번째 심벌 구간에 수신되는 신호를 r_2 라 하면 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} r_1(t) &= h_{11}s_1 - h_{12}s_2 + n_1(t) \\ r_2(t+T) &= h_{11}s_2 + h_{12}s_1 + n_1(t+T) \\ r_3(t) &= h_{21}s_1 - h_{22}s_2 + n_2(t) \\ r_4(t+T) &= h_{21}s_2 + h_{22}s_1 + n_2(t+T) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $n_0(t), n_0(t+T), n_1(t), n_1(t+T)$ 는 각각 안테나 1과 2에서의 시간 t와 t+T에 대한 노이즈이다. 이를 행렬식으로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} r(t) \\ r_1^*(t+T) \\ r_2(t) \\ r_2^*(t+T) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ -h_{21} & h_{22} \\ h_{11} & h_{12} \\ -h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1(t) \\ n_1(t+T) \\ n_2(t) \\ n_2(t+T) \end{pmatrix} \quad (6)$$

2. SM(Spatial Multiplexing)^[6]

공간 다중화(spatial multiplexing) 방식은 다중 안테나 환경에 의해 제공되는 독립적인 부 채널들을 이용하여 서로 다른 신호를 전송함으로써 신호 대 잡음비가 높을 경우 스펙트럼 효율이 우수한 장점을 갖는다. 전송 신호의 벡터는 $S=[S_1, S_2 \dots S_{N_t}]^T$ 로 나타낼 수 있으며, s의 요소들은 각각 광 송신기에 의해 전송된 신호를 나타내며, S_{N_t} 는 N_t 번째의 송신기에서 전송된 신호이다. 수신된 신호벡터는 $r=[r_1, r_2, \dots, r_{N_r}]^T$ 로 표현되며 수식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

3. RC(Repetition Code)^[7]

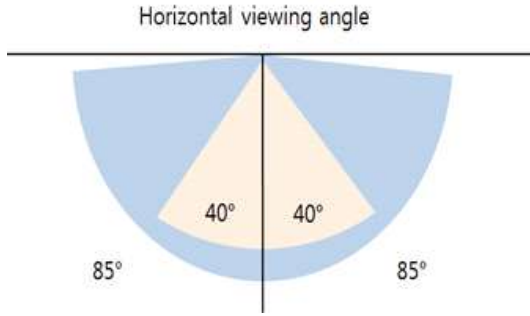
RC는 최대 다이버시티 이득을 얻으며 자유공간 무선 광 채널에서 좋은 성능을 나타낸다고 잘 알려져 있으며, 동일한 심벌은 연속 타임 슬롯에서 동시에 여러 개의 송신안테나를 통해 전송된다. 광 송신 전력은 모든 송신기에 걸쳐 동일하게 분산된다.

$$x_i = x_n \quad (7)$$

여기서 x_n 은 전송할 신호, x_i 는 i번째 안테나에서 전송할 신호이며, $i = 1, 2, \dots, N_t$ 이다. 예를 들면, 첫 번째 시간 슬롯에서 s_1 이 제 1 송신 안테나를 통해 송신되고, 이는 이득 h_{11} 및 h_{21} 을 가진 두 개의 채널을 통해 수신기에 수신된다. 두 번째 타임 슬롯에서, 동일한 심벌 s_1 은 제 2 송신 안테나를 통해 송신되고, 이는 이득 h_{12} 및 h_{22} 을 가진 두 개의 채널을 통해 수신기에 수신된다. 그 다음, 수신 신호는 EGC(Equal Gain Combining)에 의해 결합되며 각각의 수신기는 동일한 이득으로 적용되어 처리된다.

IV. 송신기의 발광각도 변화에 따른 SNR 분석

LED의 발광각도의 변화는 다음과 같다. LED는 실내 방안의 천장에 위치하고 수평하며, 똑바로 아래쪽을 지향한다고 가정한다.



2. 발광 각도 변화 모델

Fig. 2. Model of the emitting angle

발광각도 모델은 그림 2와 같으며, 바닥과의 수직선을 기준으로 발광각도 85°와 40°를 나타낸다. SNR 성능을 분석하기 위해 사용된 식은 다음과 같다^[4].

$$NR = \frac{\gamma^2 P_{rx}^2}{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{amplifier}^2} \quad (8)$$

여기서 γ 는 photodiode responsivity(A/W)이며, P_{rx} 는 수신된 신호의 세기를 나타낸다. σ_{shot}^2 은 LED에서 발생하는 산탄잡음을 나타내고 $\sigma_{amplifier}^2$ 는 증폭기 잡음을 나타낸다. σ_{shot}^2 과 $\sigma_{amplifier}^2$ 는 식(9)~(10)과 같다.

$$\sigma_{shot}^2 = 2q\gamma(P_{rx} + P_n)B_n \quad (9)$$

$$\sigma_{amplifier}^2 = i_{amplifier}^2 B_a \quad (10)$$

여기서 B_n 은 the noise-bandwidth이고 P_n 은 외부광원의 전력이다. q 는 electronic charge 이고 $B_n = I_2 R_b$ 이며, R_b 는 data rate, I_2 는 the noise-bandwidth factor이다^[8]. $i_{amplifier}$ 는 amplifier noise current를 나타내고 B_a 는 amplifier bandwidth이다.

V. 시뮬레이션 결과 및 분석

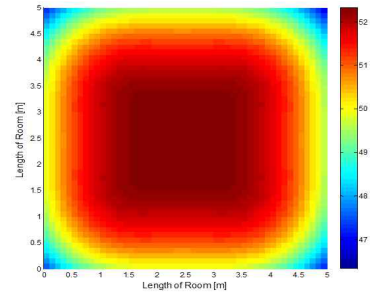
발광각도 변화에 따라서 SNR 성능에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해 모의실험을 수행하였다. 5.0m × 5.0m × 3.0m의 방에서 4x4 실내 시나리오를 가정하였으며, 송신기와 수신기는 각각 방의 천장과 바닥에 배치하고 똑바로 아래쪽과 위를 지향한다고 가정한다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. VLC 채널 파라미터

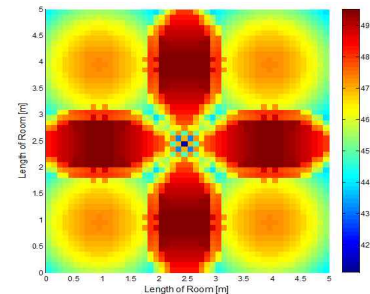
Table. 1. VLC channel parameter

ROOM size		5x5x3m
PLED		20mW
LED array Location	LED 1	[1m 4m 3m]
	LED 2	[4m 4m 3m]
	LED 3	[1m 1m 3m]
	LED 4	[4m 1m 3m]
Number of LED per array		49 (7x7)
Photodiode responsivity(γ)		0.4 (A/W)
Amplifier bandwidth (B_a)		50 MHz
Amplifier noise current ($i_{amplifier}$)		5pA /
Noise power of ambient light (P_n)		0
Noise bandwidth factor (I_2)		0.562

그림 3은 표 1의 파라미터를 이용하여 발광각도를 70°와 35°로 변화 시켜 SNR 성능을 나타내었다. 발광각도가 70°일 때, 빛이 넓게 퍼짐으로 인해 방안에 고른 성능분포를 볼 수 있다. 방의 중심부분으로 갈수록 점차 모든 LED로부터 빛을 받아 수신 전력이 증가하므로 SNR이 가장 높게 나타난다. 반면에 발광각도가 35°일 때는 각 LED가 빛이 퍼지는 각도가 좁다. 따라서 방의 가장자리로 갈수록 모든 LED로부터는 빛을 수신할 수가 없으며 인접한 위치의 LED에서만 영향을 받는다. 때문에 그림 3의 (a)와 비교했을 때, SNR 성능은 낮게 분포됨을 알 수 있다.



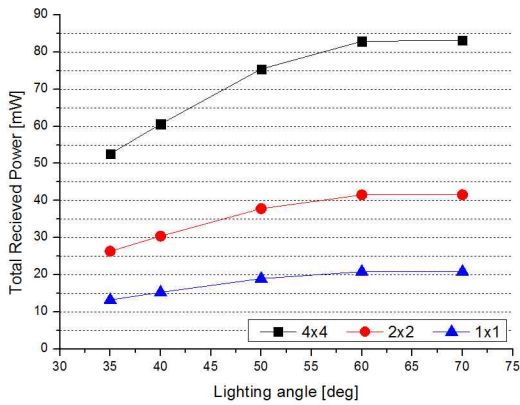
(a) 발광각도 70°



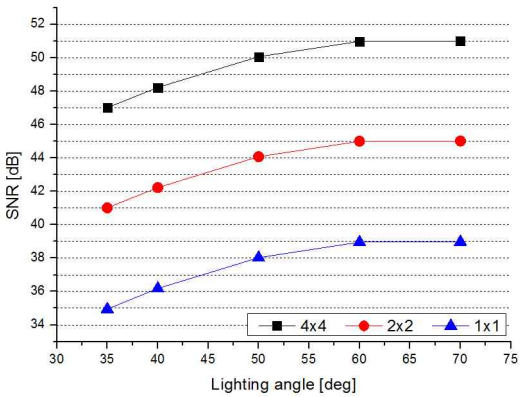
(b) 발광각도 35°

그림 3. 발광 각도에 따른 SNR 성능

Fig. 3. SNR performance comparison associated with the change in the emission angle



(a) 총 수신 전력



(b) 평균 SNR

4. 발광 각도 변화에 따른 평균 SNR과 총 수신전력 변화 결과

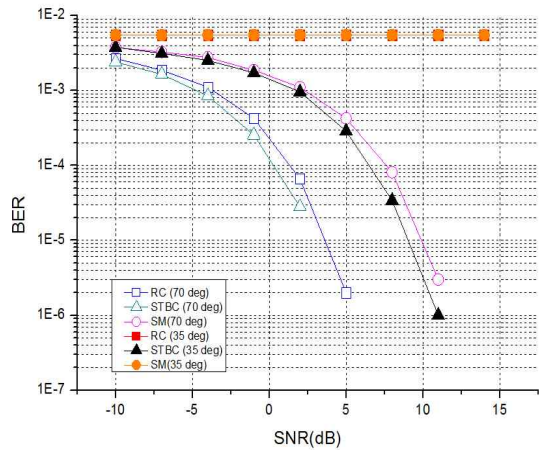
Fig. 4. Result of the change in the total received power and average SNR associated with changes of the emission angle

그림 4는 발광 각도 변화에 따른 평균 SNR 성능 변화와 총 수신전력의 변화를 나타낸다. 총 수신 전력과 SNR은 65도에서부터 서서히 변화를 보이며 감소하기 시작한다. 이는 모델링한 방안에서 송신기와 수신기 사이의 각도 변화는 최대 70도 이상 변화하지 않음을 의미한다. 발광 각도가 70도에서 35도로 변화는 동안 총 수신전력은 4x4는 36.7%, 2x2는 36.6%, 1x1은 36.8% 감소하였으며 SNR은 7.8%, 8.9% 10.3% 감소하였다. 발광 각도가 작아지면서 각 LED로부터 빛을 받는 영역 또한 작아지므로 수신되는 전력 역시 감소함을 볼 수 있으며, 수신되는 전력이 감소함에 따라 노이즈의 영향이 증가해 SNR이 감소한다.

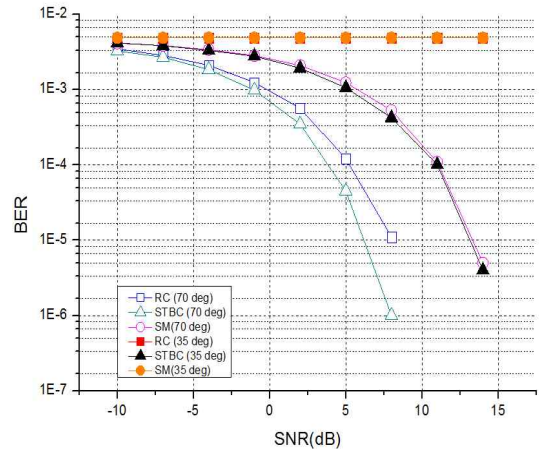
표 2. 변조방식에 따른 Optical clock rate와 Data rate
 Table. 2. Data rate and Optical clock rate depending on the modulation scheme

	Modulation	Optical clock rate	Data rate
Type 1	OOK	200 kHz	73.3 kb/s
Type 2	VPPM	400 kHz	71.1 kb/s

그림 5와 6은 발광 각도 변화에 따라서 각 전송기별 BER 성능을 나타낸다. 시뮬레이션을 위해 사용된 파라미터는 IEEE 802.15.7 표준^[2]에 근거하였으며, 표 2와 같다.



(a) Type 1

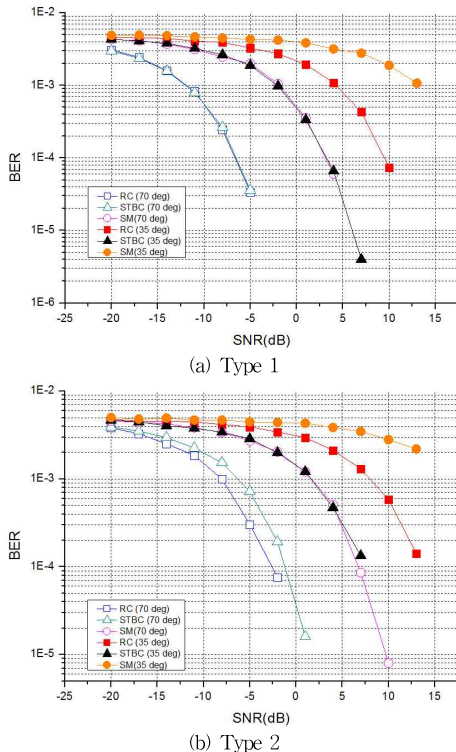


(b) Type 2

그림 5. 2x2 MIMO 환경에서 발광각도 변화에 따른 BER 성능 비교

Fig. 5. BER performance comparison associated with the change in the angle of emission in the 2x2 MIMO environment

그림 5는 2x2 MIMO 환경에서 각각의 변조방식에 따라서 발광각도를 변화시켜서 BER 성능을 비교하였으며, Zero-forcing(ZF) 등화기를 사용하여 신호를 검출하였다. 발광각도가 70도 일 때, LED로부터 수신 받는 영역이 늘어나 수신 전력이 증가한다. 따라서 발광각도가 35도에 비해 채널 이득 값이 증가해 노이즈의 영향을 적게 받는다. STBC 방식을 기준으로 35도와 비교해서 약 6dB정도 좋은 성능을 나타낸다. VLC채널에서 상대적인 성능 향상은 다이버시티 효과에 의해 나타남을 보여주며, 전송 방식에 따라서 STBC, RC, SM순으로 BER성능이 좋음을 확인하였다. 발광각도가 35도 일 때는 다른 LED로부터 데이터 수신을 하지 못하는 곳이 존재한다. 따라서 그 공간의 채널 이득값은 0이 된다. 따라서 추정된 채널의 역행렬을 이용하는 ZF등화기를 적용했을 때 성능이 다소 저하될 수 있다. Type 1 보다 Type 2가 전체적인 성능이 낮게 나오는 것은 Optical clock rate가 2배로 증가하면서 채널 분산으로 인해 잡음 대역폭이 증가함으로 성능 열화가 나타난다.



6. 4x4 MIMO 환경에서 발광각도 변화에 따른 BER 성능 비교

Fig. 6. BER performance comparison associated with the change in the angle of emission in the 4x4 MIMO environment

그림 6는 4x4 MIMO 환경에서 각각의 변조방식에 따라서 발광각도를 변화시켜서 BER 성능을 비교하였으며, ZF 등화기를 사용하여 신호를 검출하였다. 마찬가지로 발광각도가 70도 일 때, LED로부터 수신 받는 영역이 늘어나 수신 전력이 증가한다. STBC 방식을 기준으로 약 8dB정도 좋은 성능을 나타내며, 발광각도가 변함에 따라 변하는 채널 이득값에 의해서 성능차이를 나타내고 있다. 또한 다수의 송신기와 수신기의 개수 증가에 따라 성능이 개선됨으로 인해, 2x2 MIMO 환경과 비교해 볼 때, RC방식이 STBC보다 좋은 성능을 나타냄을 볼 수 있다.

V. 결론

VLC 시스템이 발전함에 따라서 서비스 영역에서의 통신 신뢰성 확보와 데이터 레이트를 증가시키는 것은 기본적인 연구 문제이다. 이에 LED 패널을 고정하고, Photo Diode를 가진 단말기를 움직여 송신기의 발광각도에 따른 SNR 성능을 분석하였으며, MIMO전송 기술을 이용해 발광각도에 따른 BER성능 변화를 분석하였다. 그 결과 발광 각도가 변함에 따라 4x4 MIMO 환경을 기준으로 총 수신전력은 26.9% 감소하였으며 SNR은 5.8% 감소하였다. 또한, BER성능도 MIMO환경에 따라서 각각 7dB, 9dB의 성능하락에 영향을 끼침을 확인하였다. 전송 방식별로는 다수의 송신기와 수신기의 개수 증가에 따라 성능이 개선됨으로 인해 RC, STBC, SM순으로 BER성능이 좋음을 확인하였다. Type 2는 Type 1에 비해서 Optical clock rate가 2배로 증가하면서 채널 분산으로 인해 잡음 대역폭이 증가함으로 성능 열화가 나타난다.

이와 같은 연구는 가시광 무선 통신 시스템의 통신 영역에 따라 적응적으로 성능을 높이기 위해 발광 각도를 결정하고 MIMO 기술을 적용하여 성능을 향상시킬 수 있는 기술로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama and M.Nakagawa, "Indoor Visible Light Data Transmission System Utilizing White LED Lights,"

IEICE Trans. Communication, E86-B, pp.2440-2454, 2003.

- [2] IEEE Std 802.15.7, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks -Part 15.7, Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light (IEEE, Piscataway, 2011)
- [3] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 16, no. 8, pp. 1451 - 1458, Oct. 1998.
- [4] L. Zeng, D. C. O'Brien, H. Le-Minh, K. Lee, D. Jung and Y. Oh, "Improvement of Data Rate by Using Equalization in an Indoor VLC System", IEEE ICCSC 2008, Shanghai, China, May 2008.
- [5] M. Simon and V. Vilnrotter, "Alamouti-type space-time coding for freespace optical communication with direct detection," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 4, no. 1, pp. 35 - 39, 2005.
- [6] G. I. Foschini and M. J. Gans. "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," wireless Personal Communicarions. vol. 6, pp. 31 1-335. 1998.
- [7] S. Navidpour, M. Uysal, and M. Kavehrad, "BER performance of freespace optical transmission with spatial diversity," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 6, no. 8, pp. 2813 - 2819, Aug. 2007.
- [8] S.B.Alexander, Optical Communication Receiver Design, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Wash, 1997.

김 용 원(정회원)



- 2004년 4월 ~ 2007년 5월 : 한국전자통신연구원 초고주파소자팀 연구원
- 2012년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전파통신공학과 대학원(박사 과정)
- 주관심분야 : 가시광 통신, Cognitive Radio, 전력선 통신

김 영 근(정회원)



- 2003년 2월 : 전남대학교 전자공학과 학사
- 2007년 2월 : 전남대학교 전자공학과 석사
- 2008년 2월 ~ 현재 : (주)넷커스터마이즈
- 주관심분야 : 가시광 통신, 위성 통신

김 경 석(정회원)



- 1989년 1월 ~ 1998년 12월 : 한국전자통신연구원 무선통신연구단 선임연구원
- 1999년 1월 ~ 2002년 3월 : University of Surrey(영국) 전기전자공학과 대학원 졸업(공학박사)
- 2002년 2월 ~ 2004년 8월 : 한국전자통신연구원 이동통신연구단 책임연구원
- 2004년 9월 ~ 2005년 2월 : 전북대학교 생체정보공학부 전임강사
- 2005년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 정보통신공학과 부교수
- 주관심분야 : SDR, Cognitive Radio, MIMO-OFDM, 전력선 통신, 가시광통신, 디지털라디오, 전파채널분석, 전파감시/관리시스템, 전파신호처리

소개

병 진(준회원)



- 2013년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 졸업
- 2013년 3월~현재 : 충북대학교 전파공학과 석박사 통합과정
- 주관심분야 : 가시광 통신, Cognitive Radio, 전력선 통신