

가시광 통신 시스템의 간섭 완화 성능

박인환*, 김윤현*, 김진영* 정회원

Performance of Interference Mitigation for Visible Light Communication System

In Hwan Park*, Yoon Hyun Kim*, Jin Young Kim** *Regular Members*

요 약

가시광 통신 시스템은 LED를 통해 방사되는 가시광을 이용한 차세대 통신 시스템으로, 유비쿼터스 네트워크 서비스 구축 시 에너지 절감 효과를 가져 올 수 있다. 또한 기존 인프라를 활용하여 고출력 전송이 가능하며 유지 보수 비용을 절감할 수 있다. 하지만 가시광 통신 시스템에서는 인접 송신기 간섭 신호의 영향으로 네트워크 경계에 위치한 수신기의 신호 검출 성능은 급격히 열화되고 전송 효율은 감소하게 된다. 본 논문에서는 광 빔포밍을 활용하는 경우, 송신기 간 간섭 완화 방안을 제시하고 그 수신 성능을 평가한다. 제안하는 광 빔포밍 방식은 사용하지 않는 기존 가시광 통신 시스템 대비 BER 측면에서 향상된 성능을 보이며, 평균 5~7dB 성능 개선을 가져온다.

Key Words : visible light communication; optical beamforming; interference mitigation; field of view.

ABSTRACT

The VLC (visible light communication) system is communication technology using visible rays (RGB) that come out in LED device. It is energy curtailment effect and possible in ubiquitous network service applications. Also, VLC system has the above advantage about that the communication throughout the whole room is enabled by high power lighting and lighting equipment with white colored LED which are easy to install and have good outward appearance. However, the signal detection performance for the receiver near the network of transmitter boundary is severely degraded and the transmission efficiency decreased due to the influence of the interference signal from the adjacent networks. In this paper, we propose an interference mitigation method with optical beamforming in VLC systems, and evaluate the reception performance. For the system BER, the proposed optical beamforming transmission demonstrates the performance enhancement compared to the not using the optical beamforming scheme, and up to about 5-6dB SNR performance gain is achieved.

I. 서 론

최근에 들어 4세대 통신시스템에서 고속 데이터 전송이 우리의 생활속에서 중요한 역할이 되었다. 그리고 우리는 장소와 시간에 구애를 받지 않고 여러 종류의 멀티 미디어 정보를 전송 할 수 있다. 그러므로 가정이나 사무실과 같은 무선 실내 링크 기술이 계속 고려 되어져 왔다. 미래에는 가전제품들이 무선 홈 네트워크를 통해 서로 무선

링크로 정보를 교환하고, 실내 환경 어디에서도 가전제품들과 통신을 할 수 있을 것이다. 특히 LED를 기반으로 한 가시광 통신 시스템은 이러한 무선 실내 링크에 적합한 통신기술로 고려되어져 왔다 [1]. 가시광 통신 시스템은 조명 디바이스로 이미 설치되어 있는 LED를 사용하기 때문에 무선 실내 네트워크에 적합한 시스템이다. 또한 디지털 조명과 통신을 융합한 홈 네트워크 용 통신기술이기 때문에 통신여부를 눈으로 확인할 수 있다. LED는 디지털로 제어할 수 있기 때문에 기존의 아날로그 조명에 비

*광운대학교 전자융합공학과 유비쿼터스 연구실 (inhwan623@kw.ac.kr)

※ This research was supported by the MKE(The Ministry of Knowledge Economy), Korea, under the ITRC(Information Technology Research Center) support program supervised by the NIPA(National IT Industry Promotion Agency) (NIPA-2011-(C1090-1111-0005)) and, in part, by Korea Sanhak Foundation in 2010.

접수일자 : 2011년 3월 18일, 수정완료일자 : 2011년 4월 5일, 최종게재확정일자 : 2011년 4월 29일

하여 기술 발전속도가 높고, 다양한 멀티미디어 조명 및 통신 서비스를 제공할 수 있다.

가시광 통신 시스템의 장점을 RF를 사용하는 다른 통신시스템과 비교해보면 첫째, 주파수 할당의 문제가 없으므로 호환성이 좋으며, 둘째, visible electromagnetic 스펙트럼의 사용에 대한 규정이 없다 [2-4]. 셋째, 데이터의 전송가능범위를 인식하기 쉽고, 넷째, 전자파가 나오지 않기 때문에 인체에 미치는 영향이 적어 병원, 집 등에서 사용이 가능하다. 마지막으로 RF 통신 시스템과의 간섭이 없기 때문에 비행기 등 초정밀 전자기기에 사용될 수 있다. 이 외에도 가시광선은 벽을 통과하지 못하기 때문에 벽으로 분리된 공간에서 신호 도청이 어려워 보안성이 좋으며 주파수의 재사용 등 많은 장점을 지니고 있다 [5-6].

그러나 홈네트워크를 위한 조명 통신 융합 기술인 가시광 통신 시스템은 이제 막 탄생한 기술인 만큼 앞으로 해결하여야 할 과제가 많이 있다. 주변 광 간섭에 의한 통신 장애, 송신기 간 또는 수신기 간 간섭, LOS로 인한 음영 지역 발생 등으로 통신 품질 저하가 그것이다. 특히 송신기 간 또는 수신기 간의 간섭으로 인한 시스템 열화는 효율적인 가시광 통신 시스템을 위해 반드시 해결해야 하는 문제점 중에 하나이다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 연구들이 진행되고 있긴 하지만 아직 개발 단계 중이라 미진한 단계이다.

본 논문에서는 실내 네트워크 용 가시광 통신시스템에서의 송신기 간 간섭 완화를 위하여 광 빔포밍 (Optical Beam-forming) 기법을 사용하는 송신기 간 간섭 완화 방식을 제안하고, 간섭 완화 기법을 적용한 시스템의 성능을 분석한다. 즉, 광 빔포밍을 통해 원하는 신호를 수신기에 전송파워를 높이고 집중적으로 전송함으로써 다른 송신기 간의 발행하는 간섭을 보완한다. 수신기의 위치 및 채널 상태에 따른 빔포밍 전송을 활용하여 성능 향상이 가능하며, 다양한 방식의 빔포밍 방안 및 그 성능에 관한 연구가 진행되었다[7-9].

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 가시광 통신 시스템 모델에 대하여 설명하고, III장에서 본 논문에서 빔포밍을 이용한 간섭 완화 알고리즘을 제안한다. IV장에서는 제안된 기법에 대한 성능 평가 및 분석을 하고, 마지막으로 V장에서 결론으로 논문을 맺는다.

II. 가시광 통신 시스템 모델

1. 가시광 통신 시스템

기본적인 가시광 통신 시스템에서의 블록도를 그림 1에서 나타내었다. 송신부는 데이터 전송의 비율로 LED 를 바꾸기에 변조기와 펄스 생성기로 이루어진다. 광원의 세기 변조(Optical Intensity Modulation : IM) 방식과 광검출 다이오드(Photodiode : PD) 를 이용한 광 세기 직접

검출 (Direct Detection : DD) 방식으로 신호를 변복조한다. IM/DD 방식은 기간망 및 액세스망 용 유선 광통신 장치에 널리 적용되어 운용되고 있으며, IM/DD 방식은 고성능 저가격 시스템을 지향하는 광무선 통신 시스템에서 우선적으로 검토되고 있는 변복조 방식이다. IM/DD 변복조 방식을 사용하는 광무선 채널의 전파 감쇄는 전파 거리의 제곱에 비례한다. IM/DD를 사용하는 광무선 통신 채널은 전파거리의 4제곱에 반비례하는 높은 감쇄 특성을 가진다. 이러한 특성은 광무선 통신 시스템의 통달거리를 짧게 하며, 송신 전력 요구량을 증가 시키는 주요인으로 적용한다. 기본적인 가시광 통신 시스템에서의 블록도를 그림 1에서 나타내었다. 송신부는 데이터 전송의 비율로 LED 를 바꾸기에 변조기와 펄스 생성기로 이루어진다. 광원의 세기 변조(Optical Intensity Modulation : IM) 방식과 광검출 다이오드 (Photodiode : PD) 를 이용한 광 세기 직접 검출 (Direct Detection : DD) 방식으로 신호를 변복조 한다. IM/DD 방식은 기간망 및 액세스망 용 유선 광통신 장치에 널리 적용되어 운용되고 있으며, IM/DD 방식은 고성능 저가격 시스템을 지향하는 광무선 통신 시스템에서 우선적으로 검토되고 있는 변복조 방식이다. IM/DD 변복조 방식을 사용하는 광무선 채널의 전파 감쇄는 전파 거리의 제곱에 비례한다. IM/DD를 사용하는 광무선 통신채널은 전파거리의 4제곱에 반비례하는 높은 감쇄 특성을 가진다. 이러한 특성은 광무선 통신 시스템의 통달거리를 짧게 하며, 송신 전력 요구량을 증가 시키는 주요인으로 적용한다.

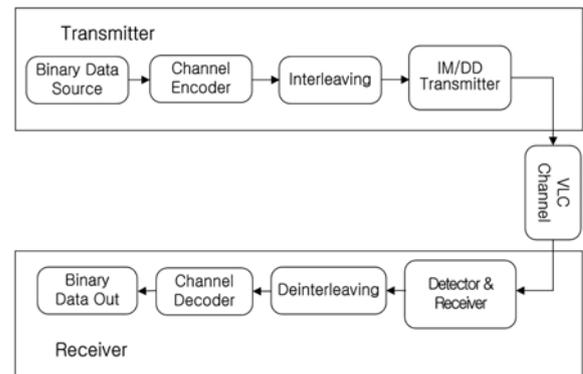


그림 1. 가시광 통신 시스템의 블로 다이어그램

2. 가시광 통신 시스템

넓게 퍼지는 광원은 위치벡터 r_s , 단위길이 방향벡터 \hat{n}_s , 전력 P_s 그리고 복사강도 패턴(radiation intensity pattern) $R(\phi\theta)$ 로 나타내어진다. 여기서 복사 강도패턴 $R(\phi\theta)$ 는 \hat{n}_s 를 기준으로 $(\phi\theta)$ 방향으로 단위 입체각당 소스로부터 방출되는 광전력으로 정의된다. 소스는 θ 에 무관하고 ϕ 방향으로 대칭인 일반적인 Lambertian 복사 패턴으로 모델링 될 수 있다 [10-12]. 이를 수식으로 표현하면

$$R(\phi) = \frac{n+1}{2\pi} P_S \cos^n(\phi), \text{ for } \phi \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right], \quad (1)$$

이 된다.

여기서 n 은 소스의 방향성을 결정하는 복사로브 (radiation lobe)의 모드 수이다. 모드 번호가 증가할수록 방향성이 커지게 된다. 계수 $(n+1)/2\pi$ 는 $R(\phi)$ 를 모든 각도에 대하여 적분하면 그 결과가 소스전력 P_S 가 되도록 해주기 위하여 필요한 계수이다. 모드번호 $n=1$ 인 경우가 전통적인 Lambertian 소스이다. 표기를 간단히 하기 위하여 기준 시간에 단위 임펄스로 표시되는 빛의 강도를 방출하는 송신기의 점소스 S 를 다음과 같은 순서로 된 세 개의 요소로 표시할 수 있다.

$$S = \{r_S, \hat{n}_S, n\}, \quad (2)$$

여기서 r_S 는 소스의 위치벡터, \hat{n}_S 는 소스의 단위방향이며 n 은 모드 수이다. 비슷한 방법으로 Rx의 R 은 위치벡터 r_R 과 방향벡터 \hat{n}_R 과 수신면적 A_R , 그리고 FOV (field of view)로 다음식과 같이 표현된다.

$$R = \{r_R, \hat{n}_R, A_R, FOV\}. \quad (3)$$

3. 무선 광 채널

가시광 통신 시스템은 가시광을 이용하여 통신을 하기 때문에 무선 광 채널을 고려한다. 채널 모델은 Barry에 의해서 제안된 채널 모델을 적용한다 [11]. LOS 인 경우에는 반사가 없으며 수신단의 면적 A_r 은 송수신단의 거리 R 에 비해 상당히 작다고 가정한다. 채널 임펄스 응답은 Dirac delta function으로 간략히 표현할 수 있다.

$$h(t; S, R) = \frac{n+1}{2\pi} \cos^n(\phi) d\Omega \text{rect}(\theta/FOV) \delta(t - R/c), \quad (4)$$

여기서, $d\Omega$ 은 수신단의 미소 면적의 입체각이다.

$$d\Omega \approx \cos(\theta) A_R / R^2, \quad (5)$$

θ 는 \hat{n}_r 과 $(r_S - r_R)$ 사이의 각도로

$$\cos \theta \approx \hat{n}_R (r_S - r_R) / R, \quad (6)$$

ϕ 는 \hat{n}_S 와 $(r_S - r_R)$ 사이의 각도로

$$\cos \phi \approx \hat{n}_S (r_R - r_S) / R, \quad (7)$$

은 모드 넘버로 송신단의 half-angle α_H 로 계산할 수 있다.

$$\alpha_H = \cos^{-1}(0.5)^{\frac{1}{n}} \\ \rightarrow n = \frac{\log 0.5}{\log(\cos \alpha_H)}. \quad (8)$$

본 논문에서 잡음 모델은 AWGN(Adaptive White Gaussian Noise)으로 가정한다. 일반적으로 무선 광 채널에서는 전송 품질은 산탄 잡음에 의존한다. 하지만, 수신단에서 협대역 광필터를 사용하기 때문에 높은 차수를 가지는 산탄 잡음을 무시할 수 있다. 따라서 무선 광 통신 채널 모델은 다음과 같이 표현한다.

$$y(t) = r \cdot x(t) \otimes h(t) + n(t), \quad (9)$$

여기서, $y(t)$ 는 수신된 신호, $x(t)$ 는 입력 신호, $n(t)$ 는 AWGN, r 은 optical/electric (O/E) 변환 효율, \otimes 은 컨볼루션 연산이다.

III. 빔포밍을 이용한 간섭 완화 기법

본 장에서는 그림 2와 같이 다수의 Tx가 존재하여 Rx에서 Tx 간 간섭이 발생할 때, 이러한 간섭을 완화하기 위한 광 빔포밍 기법을 설명하였다. 본 모의실험에서는 Tx 개수가 2개, Rx 개수가 1개인 가시광 통신 시스템을 고려하였고, 각 Tx는 2개의 LED를 가지며 Rx는 1개의 LED를 가진다고 가정하였다.

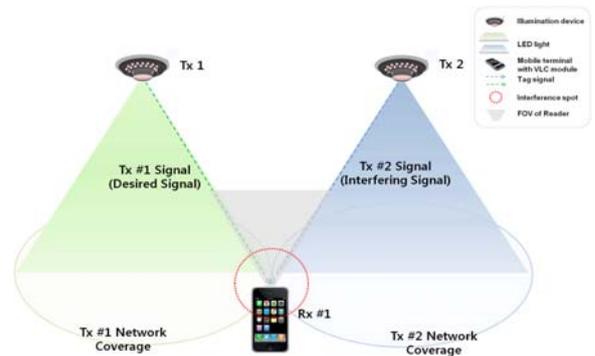


그림 2. 가시광 통신 시스템에서 Tx 간 간섭 모델

1. Tx 간 간섭 모델

그림 2는 홈 네트워크를 위한 가시광 통신 시스템에서 두개의 Tx와 하나의 Rx가 존재하는 간섭 네트워크 시나리오를 나타낸 것이다. Rx가 Tx1의 네트워크와 Tx2의 네트워크가 인접해 있는 곳에 위치할 경우 원하는 정보인 Tx1의 신호뿐만 아니라 원하지 않는 정보인 Tx2의 신호까지 함께 수신하게 된다. 이는 LED의 특성상 Rx의 수신기가 FOV (Field of View)를 지니고 있기 때

문에 두 개의 Tx 신호 모두 수신하기 때문이다. 게다가 Tx의 네트워크의 끝에 Rx가 존재할 경우 송신파워가 미약하기 때문에 간섭신호에 취약하다. 따라서 이를 해결하기 위한 Tx 간 간섭 완화 기술이 필요하다.

2. 광 빔포밍 기법

그림 3은 본 논문에서 제안한 광 빔포밍을 이용한 Tx 간 간섭 완화 기법을 도식화 한 것이다. Rx가 Tx1과 Tx2의 인접 네트워크에 존재할 경우 Tx1은 Rx로부터 피드백되는 채널 정보를 통해 빔을 형성한다. 전송파워를 높임과 동시에 직진성을 통해 간섭신호로 인식되는 Tx2의 신호를 완화할 수 있다.

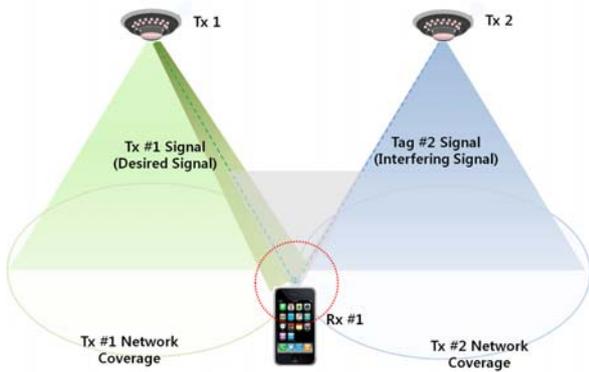


그림 3. Optical Beamforming을 이용한 하향 링크 전송 모델

Tx와 Rx사이의 채널 환경에 적합한 송수신 빔포밍 벡터를 이용하여 신호처리를 수행하는 광 빔포밍 전송은 다수개의 송수신 LED를 사용하는 가시광 통신 시스템에 적용하는 것이 가능하다. 광 빔포밍을 적용할 경우, 단일 입출력 시스템 대비 높은 유효 신호 대 간섭 잡음비 값을 빔포밍 이득을 통하여 얻을 수 있다. Txk와 Rx 사이의 $N_R \times N_T$ MIMO 채널 행렬 H_k 는 서로 독립적인 평균이 0, 분산이 1인 복소 가우시안 변수로 구성되며, 빔포밍 송수신을 위하여 다음과 같이 채널 분해가 가능하다.

$$H_k = U_k \sum_k V_k^H \quad (10)$$

$$= [u_{k,1}, \dots, u_{k,N_R}] \begin{bmatrix} \sigma_{k,1} & 0 & \dots \\ 0 & \sigma_{k,2} & \dots \\ \vdots & & \ddots \end{bmatrix} [v_{k,1}, \dots, v_{k,N_T}]^H.$$

이때 U_k 와 V_k 는 각각 $N_R \times N_R$, $N_T \times N_T$ 의 단위행렬이고, \sum_k 는 $N_R \times N_T$ 의 대각 행렬로, 0이상의 실수 값을 갖는 대각 성분 특이값 $\sigma_{k,1}, \sigma_{k,2}, \dots$ 를 갖고 비대각 성분은 모두 0이다. 특이값은 크기에 따라 $\sigma_{\max} = \sigma_{k,1} > \sigma_{k,2} > \dots$ 와 같이 내림차순으로 정렬되어 갖는다.

인접한 네트워크의 가시광 통신 환경에서 N_T 개의 송

신 LED를 이용하여 광 빔포밍 전송을 적용할 경우 N_R 개의 수신 LED를 가진 Rx에서의 수신 신호 벡터는 $r = [r_1, \dots, r_{N_R}]^T$ 로 나타내며, 수신 신호는 통신하고 있는 Tx 신호와 간섭으로 작용하는 인접 Tx의 간섭 신호 및 열잡음으로 구성되어 있다.

$$r = \sqrt{P_1} H_1 x_1 + \sum_{k=2}^K \sqrt{P_k} H_k x_k + n. \quad (11)$$

x_k 는 Txk에서 전송되는 심볼 s_k 에 송신 빔포밍 벡터 $v_{k,1}$ 가 적용된 $x_k = v_{k,1} s_k$ 이고, $n = [n_1, \dots, n_{N_R}]^T$ 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 원소 n_i 로 구성된 Rx에서의 잡음 벡터이다. Rx에서 각 LED의 수신 신호를 결합하는 수신기의 출력 신호 y_{OB} 는 수신 빔포밍 벡터 $w = u_{1,1}^H$ 를 이용하여

$$y_{OB} = wr = \sqrt{P_1} \sigma_{1,1} s_1 + u_{1,1}^H \left(\sum_{k=2}^K \sqrt{P_k} H_k v_{k,1} s_k + n \right). \quad (12)$$

와 같은 수신 신호 처리 결과로 얻을 수 있다.

IV. 모의실험

이 장에서는 모의실험을 통하여 제안한 광 빔포밍 기법을 적용한 가시광 통신 시스템과 적용하지 않은 가시광 통신 시스템의 성능을 비교 분석하였으며, 모의실험 조건을 표 1에 정리하였다. 여기서 변조기법은 BPSK를 사용하였고, 채널은 다중 반사 환경을 고려하였다.

표 1. 모의실험 파라미터

The receiver O/E conversion efficiency	0.53[A/W]
Detector physical area of photo detector	1.0[cm ²]
Transmitted optical power	200[mW]
Distance of between Tx & Rx	2, 3[m]
FOV at the receiver	60[deg.]
Channel	Indoor VLC channel

그림 4는 광 빔포밍 기법을 적용한 가시광 통신 시스템의 거리에 따른 BER 성능을 비교하였다. 모의실험에서 가시광 통신 시스템에서 Tx와 Rx사이의 거리는 실제 가정에서 쓰이는 조명의 높이를 가정하여 2m와 3m로 가정을 하였다. 그리고 정보를 송신하는 Tx의 LED 수를 2개로 가정하였다. 모의실험 결과를 살펴보면 거리가 3m일 때, 광 빔포밍 기법을 적용한 가시광 통신 시스템의 경

우가 적용하지 않은 가시광 통신 시스템의 경우보다 약 5dB SNR 이득이 있었으며, 2m 일 때, 약 7dB SNR 이득을 얻을 수 있음을 확인 할 수 있다.

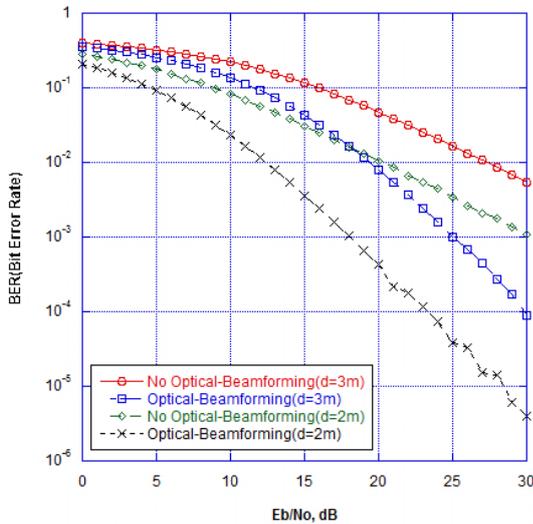


그림 4. OB를 적용한 VLC 시스템의 성능 비교(d=2)

을 때는 SNR이 20dB일 때, 약 만큼 우수한 성능을 보였다. 이는 MISO 시스템처럼 송신안테나의 수가 증가함에 따라 LED의 광이 해당 Rx에게만 국한되어 비추기 때문에 송신 다이버시티 효과를 얻을 수 있기 때문이다.

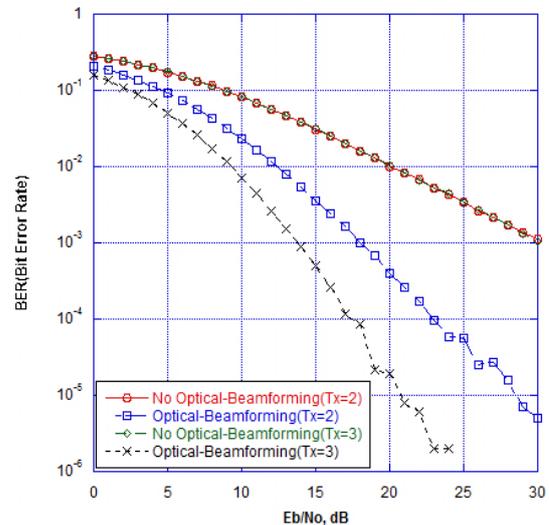


그림 6. OB를 적용한 VLC 시스템의 송신 LED 수에 따른 성능

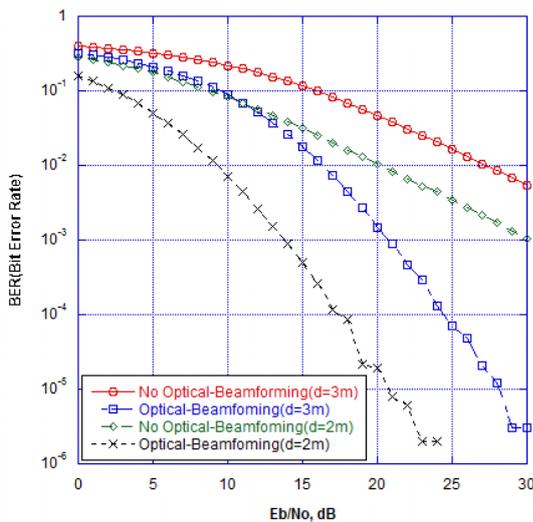


그림 5. OB를 적용한 VLC 시스템의 성능 비교(d=3)

그림 5는 그림 4와 마찬가지로 거리에 따른 광 빔포밍 기법을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 BER 성능을 비교하였다. 대신 정보를 송신하는 Tx의 LED 수를 3개로 증가시켜서 모의실험을 하였다. 그 결과 거리가 3m 일 때 약 8dB SNR 이득을 보였으며, 2m 일 때 약 15dB SNR 이득을 보였다. 이를 통해 Tx 와 Rx 의 거리가 가까워 질수록 광 빔포밍을 적용한 경우가 더 우수한 성능을 보임을 확인 할 수 있다.

그림 6은 Tx의 LED 수에 따른 광 빔포밍을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 BER 성능을 비교하였다. 이때 거리는 확실한 성능 비교를 위하여 2m로 가정을 하였다. 광 빔포밍을 적용하지 않은 경우는 LED의 수와 관계 없이 비슷한 성능을 보였으며, 광 빔포밍 기법을 적용하였

V. 결론

본 논문에서는 홈네트워크를 위한 가시광 통신 시스템에서 발생 할 수 있는 Tx 간 간섭 완화를 위하여 광 빔포밍 기법을 제안하고, 이에 따른 성능 향상 효과를 분석하였다. 또한 Tx와 Rx 간의 거리 및 Tx의 LED 수에 따른 시스템의 BER 성능을 비교 분석하였다. 우리는 모의 실험 결과를 통하여 광 빔포밍을 적용한 경우가 적용하지 않은 경우보다 약 5~7dB 정도의 평균 SNR을 향상 시킬 수 있음을 보였다. 그렇지만 본 모의실험은 LED의 기본 특성인 조명의 역할을 고려하지 않고 단순히 통신만을 위한 환경을 가정하였다. 그렇기 때문에 조명의 역할까지 고려된 시스템 모델 환경에서 추가적인 연구가 필요하다. 따라서, 앞으로 LED의 기본 역할인 조명에 고려되어야 할 조건이 가정되어 진다면 본 논문에서 제안한 광 빔포밍 기법은 추후에 Tx 간 간섭 뿐만이 아니라 Rx 간 간섭을 완화하는데 많은 도움이 될 것이라 여겨진다.

참고 문헌

[1] J. Y. Kim, LED Visible Light Communication Systems, Hongreung Science Publishers, Seoul, Korea, 2009.
 [2] S. Nakamura, "Present performance of InGaN based blue / green /yellow LEDs," Proc. of SPIE Conf. on Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications, vol. 3002, San Jose, CA, pp. 24-29, 1992.

[3] T. Mukai and S. Nakamura, "White and W LEDs," OYO BUTURI, vol.68, no. 2, pp. 152-155, 1999.

[4] T. Tamura, T. Setomoto and T. Taguchi, "Fundamental characteristics of the illuminating light source using white LED based on InGaNse miconductors," Trans. IEE Japan, vol. 120-4 no. 2, pp. 244-249, 2000.

[5] T. Taguchi, "Technological innovation of high-brightness light emitting diodes (LEDs) and a view of white LED lighting system," OPTRONICS, vol. 19, no. 228, pp. 113-119, 2000.

[6] M. Ishida, "InGaN based LEDs and their application," OPTRONICS, vol.19, no.228, pp. 120-125, 2000.

[7] L. C. Godara, "Application of antenna arrays to mobile communications: Part II. Beam-forming and direction-of-arrival considerations", in Proc. IEEE, vol. 85, no. 8, pp. 1195-1245, Aug. 1997.

[8] D. P. Palomar, J. M. Cioffi, and M. A. Laqunas, "Joint Tx-Rx beamforming design for multicarrier MIMO channels: A unified framework for convex optimi-zation", IEEE Trans. Signal Process, vol. 51, no. 9, pp. 2381-2401, Sep. 2003.

[9] J. Chang, G. Jin, and W. Sung, "An interference cancellation method for eigen-beamforming transmission", IEICE Trans. Commun., vol. E92-B, no. 2, Feb. 2009.

[10] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Indoor visible communication utilizing plural white LEDs as lighting," in Proc. of IEEE PIMRC '01, vol. 2, pp. F81-85, Oct. 2001.

[11] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-Light communication system using LED lights," IEEE Trans. on Consumer Elec., vol. 50, pp. 100-107, Feb. 2004.

[12] T. Komine, Y. Tanaka, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Basic study on visible-light communication using light emitting diode illumination," in Proc. of 8th International Symposium on Microwave and Optical Technology (ISMOT 2001), pp. 4548, 2001.

저 자

박 인 환 (In Hwan Park) 정회원



2010년 2월 : 광운대학교 전파공학과
학사졸업

2010년 3월~현재 : 광운대학교
전파공학과 석사과정

<관심분야> 디지털 통신, 협력통신,
가시광통신

김 윤 현 (Yoon Hyun Kim) 정회원



2006년 2월 : 광운대학교 전파공학과
학사졸업

2008년 2월 : 광운대학교 전파공학과
석사졸업

2008년 3월~현재 : 광운대학교
전파공학과 박사과정

<관심분야> 디지털 통신, 협력통신, 가시광통신, 인지무선
통신

김 진 영 (Jin Young Kim) 정회원



1991년 2월 : 서울대학교 전자공학과
학사졸업

1993년 2월 : 서울대학교 전자공학과
석사졸업

1998년 2월 : 서울대학교 전자공학과
박사졸업

2001년 3월~현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

<관심분야> 디지털 통신, 무선통신, 채널부호화, 가시광
통신