가시광 통신 시스템에서 Optical Relay와 Optical Beamforming을 통한 간섭 완화 성능

황유민, 김윤현, 김진영

Performance of Interference Mitigation using Optical Relay and Optical Beamforming in Visible Light Communication Systems

Yu Min Hwang, Yoon Hyun Kim, and Jin Young Kim

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 가시광 통신 시스템에서 다수의 Tx가 인접해 있을 때 발생하는 송신기간 간섭 문제를 광 릴레이와 광 빔포밍 기법 적용을 통하여 효율적으로 간섭을 완화하고 그 성능을 평가한다. 제안하는 시스템의 결과로 사용하지 않는 기존 가시광 통신 시스템 대비 BER 측면과 채널 용량에서 모의실험을 통하여 향상된 성능을 보인다.

Key Words : Visible light communication, LED, Optical relay, Interference mitigation

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 relay and optical beamforming scheme in VLC systems, and evaluate the reception performance. For the system BER, the proposed system demonstrates the performance enhancement compared to the not using the optical relay and optical beamforming scheme, and SNR performance gain and higher channel capacity 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 아

※ 본 연구는 MKE/KEIT의 IT R&D 프로그램의 지원으로 만들어진 결과임(10035362, Development of Home Network Tech. based on LED-ID)
*광운대학교 전자융합공학과 유비쿼터스시스템연구실 (yumin@kw.ac.kr, ultrayh1873@kw.ac.kr, jinyoung@kw.ac.kr)
접수일자 : 2012년 11월 12일, 수정완료일자 : 2012년 11월 15일, 최종게재확정일자 : 2012년 12월 3일

날로그 조명에 비하여 기술 발전속도가 높고, 다양한 멀티미디어 조명 및 통신 서비스를 제공할 수 있다.

가시광 통신 시스템의 장점을 RF를 사용하는 다른 통신 시스템과 비교해보면 첫째, 주파수 할당의 문제가 없으므로 호환성이 좋으며, 둘 째, visible electromagnetic 스펙트럼의 사용에 대한 규정이 없다 [2-4]. 셋 째, 데이터의 전송가능범위를 인식하기 쉽고, 넷 째, 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 기술 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 음영지역 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[7-8].

본 논문에서는 실내 네트워크 용 가시광 통신시스템에서의 송신기 간 간섭 완화를 위하여 광 릴레이 (Optical Relay) 기법을 사용하는 송신기 간 간섭 완화 방식을 제안하고, 추가적으로 광 빔포밍(Optical Beamforming) 간섭 완화 기법을 적용한 시스템의 성능을 분석한다. 다시말하면, 광 릴레이와 광 빔포밍을 통해 원하는 신호를 수신기에게 전송파워를 높이고 집중적으로 전송함으로써 다른 송신기 간의 발행하는 간섭을 보완하는 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서는 가시광 통신 시스템 모델에 대하여 설명하고, Ⅲ장에서 본 논문에서 광 릴레이를 이용한 간섭 완화 알고리즘을 제안한다. Ⅳ장에서는 제안된 기법에 대한 성능 평가 및 분석을 하고, 마지막으로 Ⅴ장에서 결론으로 논문을 맺는다.

Property	RF-ID	LED-ID
Bandwidth Limitation	Regulatory	**No**
Electromagnetic Interference	Yes	**No**
Multipath fading	Yes	**Yes**
Security	Normal	**Good**
Infrastructure	Access Point	**LED**
Visibility	No	**Yes**

그림 1. Comparison of RF-ID and LED-ID systems

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 행성기로 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 감쇠 특성을 가진다. 이러한 특성은 광무선 통신 시스템의 통달거리를 짧게 하며, 송신 전력 요구량을 증가 시키는 주요인으로 적용한다[9]. 기본적인 가시광 통신 시스템에서의 블록도를 그림 1에서 나타내었다. 송신부는 데이터 전송의 비율로 LED 를 바꾸기에 변조기와 펄스 행성기로 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 감쇠 특성을 가진다. 이러한 특성은 광무선 통신 시스템의 통달거리를 짧게 하며, 송신 전력 요구량을 증가 시키는 주요인으로 적용한다.

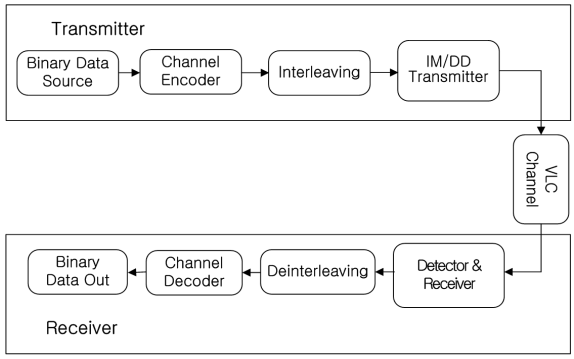

그림 2. 가시광 통신 시스템의 블록 다이어그램

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 복사패턴으로 모델링 될 수 있다 [10-12]. 이를 수식으로 표현하면

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

이 된다.

여기서 n은 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 기준시간에 단위 임펄스로 표시되는 빛의 강도를 방출하는 송신기의 점소스 S 를 다음과 같은 순서로 된 세 개의 요소로 표시할 수 있다.

$$S=\left\{r_S,\hat{n}_S,n\right\} \tag{2}$$

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

$$R=\left\{r_R,\hat{n}_R,A_R,FOV\right\} \tag{3}$$

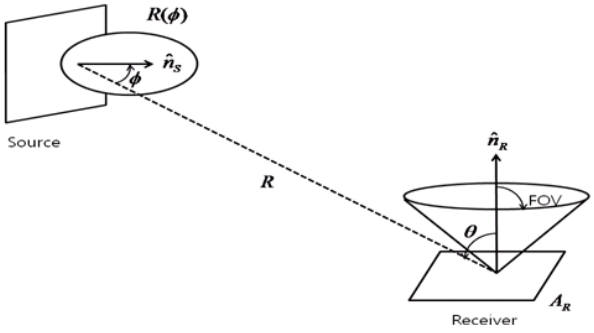

그림 3. Geometry of transmitter and receiver

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 송·수신단의 거리 R 에 비해 상당히 작다고 가정한다. 채널 임펄스 응답은 Dirac delta function으로 간략히 표현할 수 있다.

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

여기서, $d\Omega$은 수신단의 미소 면적의 입체각이다.

$$d\Omega\approx\cos(\theta)A_R/R^2 \tag{5}$$

θ는 $\hat{n}_r$과 (r_S-r_R)사이의 각도로

$$\cos\phi\approx\hat{n}_R(r_S-r_R)/R \tag{6}$$

ϕ는 $\hat{n}_S$와 (r_S-r_R) 사이의 각도로

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

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

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

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 무시 할 수 있다. 따라서 무선 광 통신 채널 모델은 다음과 같이 표현한다.

$$y(t)=r\bullet x(t)\otimes h(t)+n(t) \tag{9}$$

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

Ⅲ. 빔포밍을 이용한 간섭 완화 기법

본 장에서는 그림 2와 같이 다수의 Tx 가 존재하여 Rx 에서 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.

1. Tx 간 간섭 모델

그림 4는 홈 네트워크를 위한 가시광 통신 시스템에서 두 개의 Tx와 하나의 Rx가 존재하는 간섭 네트워크 시나리오를 나타낸 것이다. Rx 가 Tx1 의 네트워크와 Tx2 의 네트워크가 인접해 있는 곳에 위치할 경우 원하는 정보인 Tx1 의 신호뿐만이 아니라 원하지 않는 정보인 Tx 2의 신호까지 함께 수신하게 된다. 이는 LED의 특성상 Rx 의 수신기가 FOV (Field of View)를 지니고 있기 때문에 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 릴레이 & 광 빔포밍

이 섹션에서는 광 릴레이를 통한 협력 신호 전송 방법을 이용하여 터미널 노드에서 상대적 간섭 완화 효과를 얻는 것을 목표로 한다. 그림 5는 기존의 가시광 통신 시스템에 광 릴레이를 적용하여 SNR에서 이득을 얻을 수 있는 시나리오를 구성한 것이다. 그림과 같이 다수의 Tx에 의해 신호의 간섭이 발생할 때 인접 relay node의 relay를 통하여 터미널 노드에서 높은 진폭으로 광 데이터를 수신할 수 있다. 그림 6은 그림 5의 시나리오인 광 릴레이를 적용한 시스템에서 효율적 데이터 전송을 위한 광 빔포밍 기법을 적용하여 FOV를 60[deg]에서 30[deg]로 빔포밍하고 있는 시나리오이다. 우리가 제안한 시나리오에 따르면 광 릴레이를 통하여 터미널 노드가 Tx의 신호보다 높은 진폭으로 광 데이터를 수신하여 간섭 완화의 효과를 기대하는 것이 첫 번째이고 두 번째로 릴레이 노드에서 빔포밍 기법을 적용하여 더 높은 간섭 완화 효과를 얻게 되는 것이 제안한 시나리오가 되겠다. 다음은 협력 통신 기법으로서 전형적으로 잘 알려진 amplify-and-forward (AF)기법과 decoded-and-forward (DF) 기법이 있다. AF는 릴레이 노드가 base station에서 수신받은 신호를 선형연산하여 터미널 노드로 전달하는 기법이고, DF는 릴레이 노드가 base station의 신호를 디코딩하고 터미널 노드로 신호를 전송할 때 다시 인코딩하여 보내는 방식이다. 하지만 우리는 AF방식이 구현에 있어서 단순하기 때문에 AF방식에 대해서만 고려한다. 이 방식에서 릴레이 노드는 노이즈를 포함한 신호를 수신한다고 가정하고 송신하는 신호도 마찬가지로 노이즈를 포함하여 증폭된 신호를 재전송하는 것으로 설정한다. 결론적으로 릴레이 노드로부터 증폭된 신호를 수신한 터미널 노드는 간섭신호로부터 상대적으로 간섭이 완화된 상태를 갖게 되고 이 증폭된 신호를 가지고 원래의 데이터를 디코딩하여 얻는다. 그리고 릴레이를 통해 협력 전송할 때 증폭된 노이즈를 수신하게 되는데 이것은 간섭신호가 노이즈 레벨이 증폭에 의해서 높아짐에 따라 그 영향력이 적어져 데이터 구분에 있어서 도움이 된다.

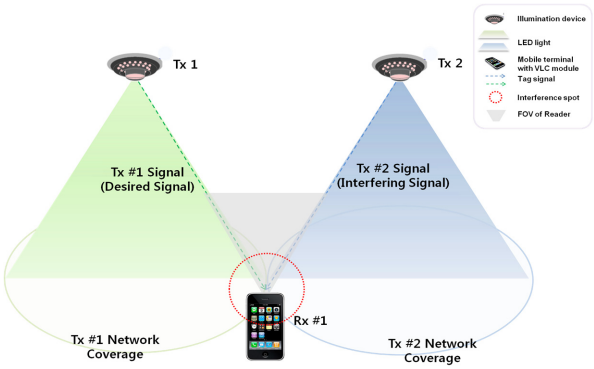

그림 4. 가시광 통신 시스템에서 Tx 간 간섭 모델

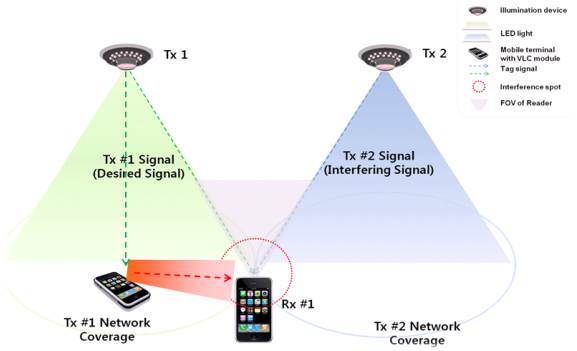

그림 5. Optical Relay를 이용한 간섭 완화 모델(FOV 60°)

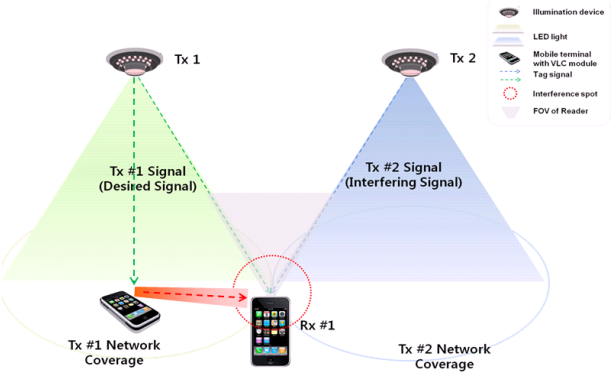

그림 6. Optical Relay와 optical beamforming을 이용한 간섭 완화 모델(FOV 30°)

Ⅳ. 모의실험

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

표 1. 모의실험 파라미터

The receiver O/E conversion effciency	0.53[A/W]
Detector physical area of photo detector	1.0[cm^2]
Transmitted optical power	200[mW]
Distance of between Tx & Rx	2m
Distance of between Relay & Rx	1m
FOV at the receiver	60[deg.], 30[deg.]
Channel	Indoor VLC channel
Optical relay method	AF(Amplify-and-forward)

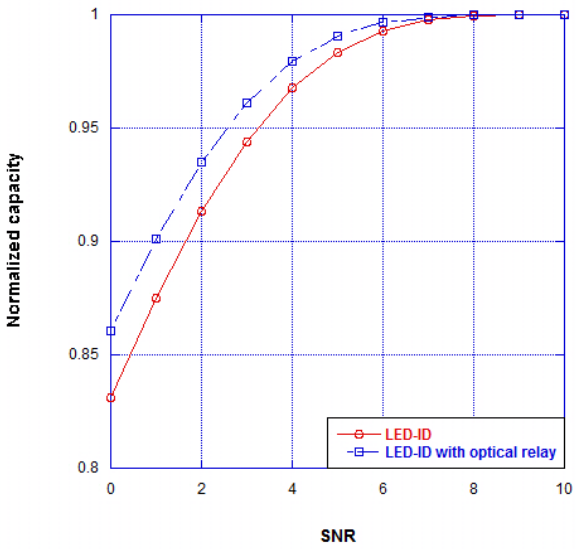

그림 7. Normalized capacity of LED-ID optical relay

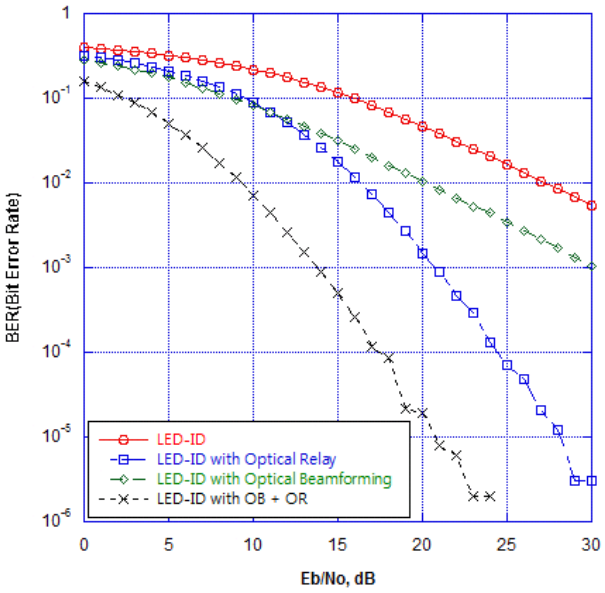

그림 8. BER performance for the proposed system

제안한 광 릴레이 기법을 적용한 시스템의 성능을 확인하기 위해서 채널 용량과 bit error rate를 가시광 통신 채널에서 시뮬레이션 하였다. 그리고 선형 연산하는 AF기법을 협력 릴레이 노드에 적용시켰고 릴레이 노드는 base station으로부터 수신한 신호를 증폭하여 터미널 노드에 재전송 한다.

그림 7은 LED-ID 시스템에서 제안한 광 릴레이 기법을 적용했을 때와 그렇지 않았을 때 정규화된 채널 용량 그래프이다. 이 두 그래프를 서로 비교하면 광 릴레이 기법을 적용한 시스템이 그렇지 않은 시스템보다 SNR이 8dB 미만에서 항시 이득이 있음을 알 수 있다. 이것은 광 릴레이 기법을 적용했을 때 LED-ID 시스템에서 기존의 시스템보다 고속 데이터 처리율을 얻을 수 있는 효과적인 방법임을 나타낸다.

그림 8은 광 릴레이 기법과 광 빔포밍 기법을 순차적으로 적용하고 둘 다 적용한 시스템과 그렇지 않은 시스템 네 가지 경우에 대해 BER 성능을 비교한 그래프로서 광 릴레이 기법을 적용했을 때 우리가 기대한 것과 같이 BER 성능에 이득이 있었고 그 상태에서 광 빔포밍 기법을 적용했을 때 더 우수한 성능을 보였다. 이것은 그림 5의 시나리오와 그림 6의 시나리오에 상응하는 결과라고 할 수 있다.

Ⅴ. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 홈 네트워크를 위한 가시광 통신 시스템에서 발생할 수 있는 Tx 간 간섭 완화를 위하여 광 릴레이 기법과 광 빔포밍 기법을 제안하고, 이에 따른 성능 향상 효과를 분석하였다. 우리는 모의실험 결과를 통하여 광 릴레이 기법과 광 빔포밍 기법을 LED-ID 시스템에 적용했을 때 그렇지 않은 경우보다 채널 용량과 BER성능 모두에서 이득이 있음을 보였다. 그렇지만 본 모의실험은 LED의 기본 특성인 조명의 역할을 고려하지 않고 순수하게 통신만을 위한 환경을 가정하여 실험하였기 때문에 이 후 연구에서 LED 발광을 조명과 광 데이터 전송 두가지를 융합한 환경을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것이다. 따라서 앞으로 LED의 기본 역할인 조명에 고려되어야 할 조건이 가정되어 진다면 본 논문에서 제안한 광 릴레이 기법은 추후에 Tx 간 간섭 뿐만 아니라 Rx간 간섭을 완화하는데 많은 도움이 될 것이라 여겨진다.

참 고 문 헌

[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.

저자

황 유 민(Yu Min Hwang) **준회원**

· 2012년 2월 : 광운대학교 전파공학과 졸업
· 2012년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전파공학과 석사과정

<관심분야> : VLC, 재난 통신, 디지털통신

김 윤 현(Yoon Hyun Kim) **정회원**

· 2006년 2월 : 광운대학교 전파공학과 졸업
· 2008년 2월 : 광운대학교 전파공학과 석사
· 2008년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전파공학과 박사과정

<관심분야> : 가시광 통신, 협력통신, 인지무선통신

김 진 영(Jin Young Kim) **종신회원**

· 1998년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학박사
· 2001년 2월 : SK텔레콤 네트웍연구소 책임연구원
· 2001년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

<관심분야> : 다지털통신, 가시광통신, UWB, 부호화, 인지무선통신, 4G 이동통신