가시광 통신 시스템에서 광 빔포밍 전송을 위한 유저 단말 추적 방법

황유민*, 김경호*, 송유찬*, 이상운**, 김진영*

A UE Position Tracking Method for Optical Beamforming Transmission in Visible Light Communications

Yu Min Hwang*, Kyung Ho Kim*, Yu Chan Song*, Sang Woon Lee**, Jin Young Kim*

요 약

본 논문은 가시광 통신 시스템에서 시스템 성능 향상 위해 광 빔포밍 전송기법을 적용할 때 광 신호 방사 범위 내에 단일 또는 다수의 접속 유저 단말(Rx)을 추적하는 방법에 관한 것 이다. 광 빔포밍 전송기법은 RF에서 빔 형성 전송 방법과 매우 유사하여 가시광 통신 시스템의 통신 신호인 가시 광 신호를 유저 단말에게 전송할 때 빔 형성 벡터를 곱하여 특정 유저에게 질 좋은 가시 광 채널을 형성해 주는 기법이다. 이러한 광 빔포밍 전송을 적용하기 위해서는 먼저 가시 광 셀 내에 이동성을 가진 단말을 포함해 접속해 있는 유저 단말의 위치 추적이 필요하다. 따라서 본 논문에서 하나의 가시 광 셀 내에 접속해 있는 유저 단말 추적 방법을 광 AP(Access Point)와 UE(User Equipment) 1:1 샘플을 취하여 기술하였고 이러한 UE 추적 방법을 통해 광 빔포밍 전송 기법을 적용했을 때 얻을 수 있는 5~6dB 정도의 SNR 성능 이득을 모의실험을 통하여 확인하였다.

Key Words : VLC, UE tracking, positioning, optical beamforming, RSSI

ABSTRACT

In this paper, we propose a novel UE(User Equipment) position tracking algorithm of visible light signals, and analyze BER performance when optical beamforming scheme is applied in VLC(Visible Light Communications) system. The optical beamforming scheme as an interference mitigation method provides good optical channel conditions between UE(Rx) and LED light(Tx), and lead to better BER performance because UE is able to get a better RSSI(Received Signal strength indication) value. For the system BER, the proposed UE position tracking method for optical beamforming transmission demonstrates the performance enhancement compared to a system not applied the optical beamforming transmission scheme, and up to about 5~6dB SNR performance gain is achieved. The results of the paper can be applied to design of various VLC and LBS applications for ubiquitous home network systems.

I. 서 론

최근에 들어 4세대 통신시스템에서 고속 데이터 전송이 우리의 생활속에서 중요한 역할이 되었다. 그리고 우리는 장소와 시간에 구애를 받지 않고 여러 종류의 멀티미디어 정보를 전송 할 수 있다. 그러므로 가정이나 사무실과 같은 무선 실내 링크 기술이 지속적으로 고려 되어왔다. 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 비하여 기술 발전 속도가 높고, 다양한 멀티미디어 조명 및 통신 서비스를 제공할 수 있다.

"본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2013년도 산학연협력 기술개발사업(No. C0141891)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다."
*광운대학교 전자융합공학과 유비쿼터스 통신 연구실 (yumin@kw.ac.kr, gentle@kw.ac.kr, yuchan@kw.ac.kr, jinyoung@kw.ac.kr)
**남서울대학교 멀티미디어학과 (Quattro@nsu.ac.kr)
접수일자 : 2014년 5월 17일, 수정완료일자 : 2014년 5월 29일, 최종게재확정일자 : 2014년 6월 2일

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

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 네트워크용 가시 광 통신시스템에서 적용 가능한 광 빔포밍 기법을 적용하여 가시 광 신호를 전송하기 위한 전 단계로 유저 단말의 위치를 트레킹하는 방법에 관한 것이다. 광 빔포밍 전송 기법은 간섭 완화 기법으로서 시스템 성능 향상에 크게 기여가 가능하다. 유저 단말에게 원하는 신호에 대해 높은 수신파워(RSSI)를 제공할 수 있기 때문이다. 유저 단말에게 광 빔포밍 기법을 전송하기 위해선 먼저 유저 단말의 위치 정보를 획득해야 하는데, 본 논문에서는 하나의 가시 광 셀 내에 위치한 하나의 유저 단말을 시스템 모델의 샘플로서 내용을 구성하였다. 제안한 방법을 통해 가시광 통신 시스템에서 사용자 단말이 AP에 접속해 있을 때, AP의 광 신호 방사 범위 내에 사용자 단말 위치 정보를 탐색하고 추적하여 이후 광 빔포밍 전송을 수행하는데 필수 요소로서 작동하고 광 빔포밍 전송의 장점인 채널 SNR의 이득과 이를 통한 고속 데이터 전송 및 시스템 성능 향상을 이루고자 한다.

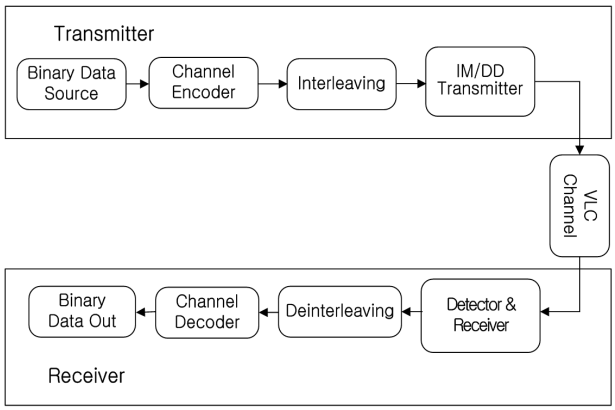

그림 2. 가시광 통신 시스템의 블록 다이어그램

본 논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서는 일반적 가시광 통신 시스템 모델에 대하여 설명하고, Ⅲ장에서 본 논문에서 유저 단말 위치 추적 방법에 대한 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 2에서 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].

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.

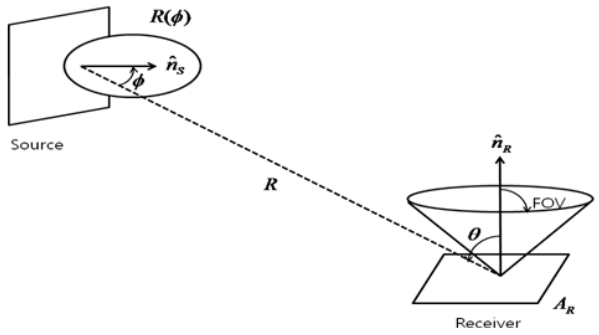

그림 3. Geometry of transmitter and receiver.

소스는 θ에 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 기준 시간에 단위 임펄스로 표시되는 빛의 강도를 방출하는 송신기의 점소스 S 를 다음과 같은 순서로 된 세 개의 요소로 표시할 수 있다.

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

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.

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

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

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

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 협 대역 광필터를 사용하기 때문에 높은 차수를 가지는 산탄 잡음을 무시 할 수 있다. 따라서 무선 광 통신 채널 모델은 다음과 같이 표현한다.

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

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. 유저 단말 위치 추적 방법

본 장에서는 가시광 통신 시스템에서 광 송수신기 AP의 LED 광 방사 범위 내에 위치하는 사용자 단말이 있을 때 그 단말기의 위치 정보를 획득하는 방법에 관한 것을 기술하였다. 이 전 사용자 단말의 위치 정보를 획득하는 방법의 논문들은 LED내에 사용자 단말의 유무를 가리거나 RSSI값을 이용하여 측위 하는 방법이 있었지만 본 논문은 빔 방사 공간을 분할하여 각 분할한 공간에 위치하는 사용자 단말을 추적하기 때문에 공간을 많이 분할할수록 단일 LED 광 방사 범위 내에 사용자 단말을 정확하게 추적할 수 있다. 또한 이 방법을 이용하여 사용자 단말의 위치를 알아냈을 때 광 빔포밍

전송 기법을 순차적으로 적용하고 사용자 단말에게 좋은 채널을 제공하여 효율적으로 시스템 성능을 높이는데 크게 기여할 수 있다.

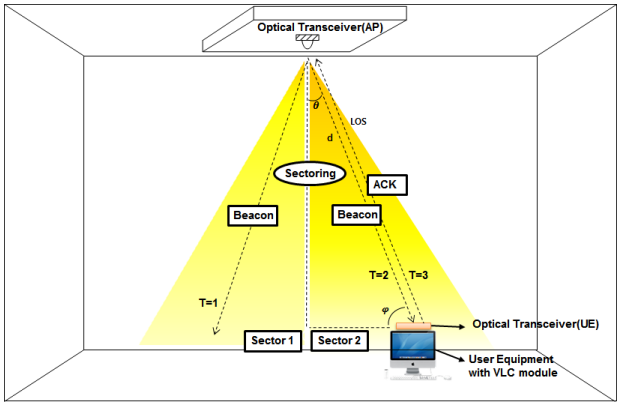

그림 4. A example of UE tracking method using beam sectoring – 2 parts sectoring.

그림 4는 본 논문의 시스템 모델이며 AP(Access Point)가 UE(User Equipment)의 위치를 추적하는 방법에 관한 모식도이다. AP와 UE는 가시광 데이터를 송수신할 수 있는 광송수신기 이며, AP는 UE의 위치를 추적하기 위해 광 신호를 전송할 때 그림 4와같이 섹터 1과 섹터 2를 구분하여 섹터 1에만 광 데이터를 전송하거나, 섹터 2에만 광 신호를 전송하는 방법을 이용한다. 현재 그림 4의 상황은 섹터 2에 UE가 존재하고 AP는 순차적으로 섹터 1에 광 데이터를 먼저 전송한다. 섹터 1에 전송한 광 데이터는 UE의 존재 유무를 판별하기 위한 신호 전송의 개념으로 Beacon을 전송하고 Beacon의 구조는 그림 5에서 보여주는 프레임 구조를 통해 설명하도록 한다. AP는 섹터 1에 Beacon을 송신한 후 섹터 2에 Beacon을 순서대로 전송하는데 각 섹터에 전송되는 Beacon은 각 섹터에 대한 정보를 담고 있다. 섹터 2에 전송된 Beacon은 UE가 수신하여 AP에게 ACK신호를 반송하게 되는데 ACK신호에는 수신받은 Beacon의 섹터 정보를 포함한다. 상기 내용을 통해 ACK신호를 수신한 AP는 UE의 위치를 추적할 수 있다.

그림 5는 제안한 시스템 모델이 적용되는 각 섹터에 광신호를 전송할 때 사용되는 프레임 구조이다. 광 신호를 전송할 때 섹터 정보를 프레임 내에 담아서 해당하는 섹터에만 순차적으로 그림 5와 같은 프레임을 전송한다. 전송한 프레임을 수신한 UE는 수신한 프레임 내의 섹터 정보를 확인하고 그 섹터 정보를 광 송수신기(AP)로 반송한다. 위와같은 절차를 통해 광 송수신기(AP)는 사용자 단말의 위치를 섹터 단위로 추적할 수 있다. 그 후 광 빔포밍 전송 유무를 결정한다.

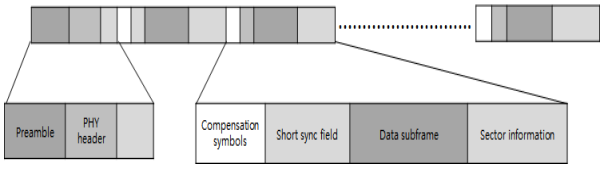

그림 5. Downlink and uplink frame structures.

그림 6. Downlink and uplink frame structures.

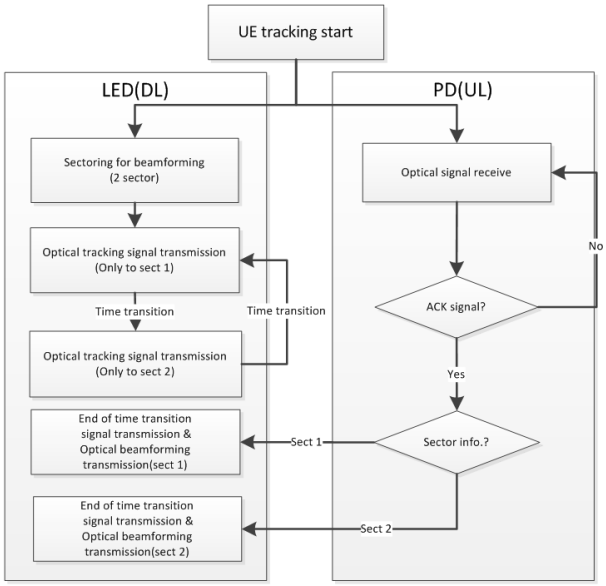

그림 7. A UE tracking algorithm.

그림 6은 AP가 UE를 찾는 과정에서 각 섹터에 해당하는 정보를 담은 광 신호를 전송할 때 섹터당 할당되는 전송 시간을 나타낸 것이다. Down link에서 섹터 1부터 순차적으로 MFTP(Maximum Flickering Time Period)에 근거하여 5ms 이하로 시간을 할당하여 광 신호를 전송한다. 5ms 이하로 전송시간을 할당하면 사람의 눈이 빛의 깜박거림을 감지할 수 없어 항상 모든 섹터에 빛이 방사되는 것처럼 보여 플리커 방지를 할 수 있다. 그 후 광 송수신기(AP)가 특정 섹터(섹터 1 혹은 섹터 2에 대한 ACK 신호를 수신하면 이로써 해당하는 섹터에 광 빔포밍 전송을 수행하게 된다.

그림 7는 상기 내용들을 포함하는 AP가 수행하는 UE 위치 추적 블록도이다. 처음 UE tracking start로부터 다운 링크로서 LED를 통해 구분된 두 섹터에 대해 시간순으로 광 추적 신호를 전송하며 동시에 업링크로서 UE로부터 전송된 광 신호를 PD(Photo diode)를 통해 수신한다. 이 때에 PD에서 ACK신호가 수신되기 전까지 LED는 두 섹터에 UE위치 추적을 위한 광 신호를 지속적으로 전송하고 ACK신호를 수신받으면 이후 섹터 정보를 확인하여 해당 섹터에 광 빔포밍 전송을 하게 된다.

Ⅳ. 모의실험

이 장에서는 제안한 유저 단말 위치 추적 방법을 적용하여 광 빔포밍 전송을 하였을 때 가시광 통신 시스템의 성능을 비교 분석하였으며, 모의실험을 조건 표 1에 정리하였다. 여기서 변조기법은 BPSK를 사용하였고, 채널은 다중 반사 환경을 고려하였다.

그림 8은 사용자 단말 추적 광 빔포밍 기법을 적용한 가시광 통신 시스템의 거리에 따른 BER 성능을 비교하였다. 모의실험에서 가시광 통신 시스템에서 Tx 와 Rx 사이의 거리는 실제 가정에서 쓰이는 조명의 높이를 가정하여 2m와 3m로 가정을 하였다. 그리고 정보를 송신하는 Tx의 LED 수를 2개로 가정하였다. 모의실험 결과를 살펴보면 거리가 3m 일 때, 광 빔포밍 기법을 적용한 가시광 통신 시스템의 경우가 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.

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	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)

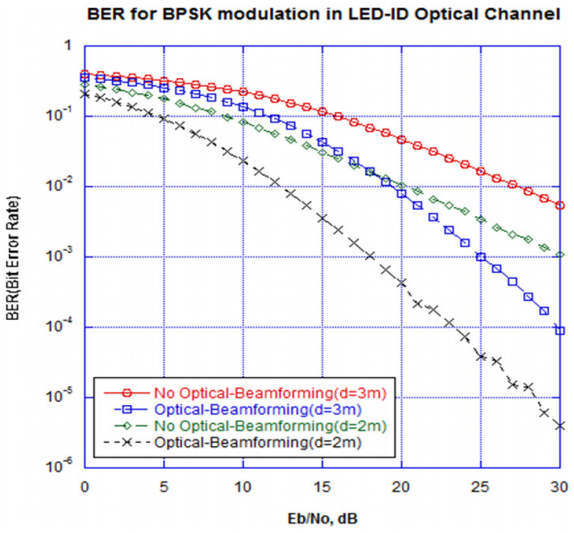

그림 8. Comparison of proposed system and no optical beamforming system performance when distance is 2m, 3m between Tx and Rx.

Ⅴ. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 가시광 통신 시스템에서 단일 LED 빔 방사 범위 내에 위치하는 사용자 단말을 빔 방사 공간을 분할하는 방법을 이용하여 사용자 위치 정보를 획득하는 방법을 제안하였다. 이후 제안한 방법을 통해 사용자 단말의 위치를 분할한 섹터 단위로 추적한 후 광 빔포밍 전송 기법을 적용하여, 이에 따른 성능 향상 효과를 분석하였다. 우리는 AP와 UE 간의 거리에 따른 시스템의 BER 성능을 모의실험 결과를 통하여 분석하였는데, 광 빔포밍을 적용한 경우가 적용하지 않은 경우보다 약 5~7dB 정도의 평균 SNR을 향상 시킬 수 있음을 보였다. 또한 본 모의실험은 LED의 기본 특성인 조명의 역할과 LOS 채널 환경을 고려하여 진행하였다. 하지만 LOS 채널 환경뿐만 아니라 NLOS 환경을 동시에 고려하여 성능을 실험하는 것이 더욱 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있기 때문에 NLOS환경이 고려된 추가적인 연구가 필요하다.

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.

저자

황 유 민(Yu Min Hwang) **준회원**

· 2012년 2월 : 광운대학교 전파공학 학사졸업
· 2012년 3월~현재 : 광운대학교 전파공학과 석박사통합과정

<관심분야> : 5G 이동통신, 협력통신, 인지무선통신

김 경 호(Kyung Ho Kim) **준회원**

· 2013년 2월 : 광운대학교 전파공학과 학사졸업
· 2013년 3월~현재 : 광운대학교 전파공학과 석박사통합과정

<관심분야> : WBAN, 가시광 통신, 디지털통신, 5G 이동통신

송 유 찬(Yu Chan Song)

· 2014년 2월 : 광운대학교 전자융합공학과 학사졸업
· 2014년 3월~현재 : 광운대학교 전파공학과 석박사통합과정

<관심분야> : WBAN, 가시광 통신, 5G 이동통신

이 상 운(Sang Woon Lee) **종신회원**

· 1987년 2월 : 연세대학교 전기공학과 학사졸업
· 1989년 2월 : 연세대학교 전기공학과 석사졸업
· 2005년 2월 : 연세대학교 전기전자공학 과 박사졸업
· 1991년~2005년 : MBC 기술연구소 팀장
· 2005년~2009년 : 연세대학교 차세대방송기술연구소 연구교수
· 2009년~현재 : 남서울대학교 멀티미디어학과 교수

<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> : 디지털통신, 가시광통신, UWB, 부호화, 인지무선통신, 5G 이동통신