

가시광통신 시스템에서 하이브리드 전송기법을 이용한 BER 성능향상 기법에 대한 연구

이규진*

세명대학교 전자공학과 교수

A Study on the BER Performance Improvement Method Using Hybrid Transmission Techniques in Visible Light Communication System

Kyu-Jin Lee*

Professor, Department of Electronic Engineering, Semyung University

요약 가시광을 이용하여 정보를 전송하는 가시광통신은 초고속, 초지연, 초연결등의 장점이 있어 6G 통신을 보완하기 위한 하나의 방안으로 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 가시광통신에서 RGB 혼합비율에 의하여 발생하는 성능 열화를 극복하기 위한 연구를 진행하였다. LED 조명을 이용한 가시광통신 시스템은 조명의 역할이 중요한 기능으로 통신을 위해 사용할 경우 RGB 혼합 비율에 따른 성능 차이는 필연적으로 발생한다. 특히, 일정 기준 이하의 빛의 강도를 갖는 경우 시스템 전체의 성능을 열화시키는 문제가 발생한다. 이 연구에서는 RGB 3개의 채널 중 혼합 비율의 차이로 발생하는 통신 시스템에서 일정 성능 이하가 발생할 때, 최고의 성능을 보이는 LED를 제외하고 나머지 2개의 신호를 STBC(Space-Time Block Coding)으로 전송하여 통신의 품질을 보장하는 하이브리드 시스템에 대해서 연구를 진행하였다. 제안 시스템의 성능을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였고, 제안 시스템의 성능이 기존 시스템과 비교하여 향상된 것을 볼 수 있다.

키워드 : 가시광통신, 조명, 백색 LED, 혼합비율, STBC, 무선광통신, 6G

Abstract Visible light communication, which transmits information using visible light, has advantages such as ultra-high speed, ultra-delay, and ultra-connectivity, so research is being conducted as a way to complement 6G communication. In this paper, a study was conducted to overcome the performance degradation caused by the RGB mixing ratio in visible light communication. In a visible light communication system using LED lighting, the role of lighting is an important function, and when used for communication, the performance difference according to the RGB mixing ratio inevitably occurs. In particular, if the intensity of light is below a certain standard, the problem of deteriorating the performance of the entire system occurs. In this study, when a certain performance or less occurs in the communication system caused by the difference in the mixing ratio among the three RGB channels, the remaining two signals except the LED with the best performance are transmitted to STBC (Space-Time Block Coding) to ensure the quality of communication. A computer simulation was performed to verify the performance of the proposed system, and it can be seen that the performance of the proposed system is improved compared to the existing system.

Key Words : Visible light communication, Lighting, white LED, Mixing ratio, STBC, Wireless light communication, 6G

This paper was supported by the Semyung University Research Grant of 2023.

*Corresponding Author : Kyu-Jin Lee(kyujin@semyung.ac.kr)

Received January 10, 2024

Accepted February 20, 2024

Revised January 18, 2024

Published February 28, 2024

1. 서론

가시광통신(VLC:Visible Light Communication)은 400~800 THz (780~375 nm)의 가시광선을 이용하여 정보를 전송하는 기술로 초 고대역폭, 무료 무선 주파수 스펙트럼, 높은 주파수 재사용등의 이점이 있다. 기존의 RF 통신은 주로 전자기파를 사용하여 데이터를 전송하기 때문에 주파수 대역 한계로 인하여 대역폭이 제한되고, 급속도로 증가하는 통신속도에 대응하기 위한 충분한 대역폭을 확보하기 어려울 뿐만 아니라 전자기파의 간섭으로 인한 통신 시스템의 신뢰성 및 안정성을 보장할 수 없다. 따라서, 빛을 이용하여통신을 하는 가시광통신은 통신 매체의 특성상 전자기파 간섭에 대한 문제가 없으며, 매우 넓은 대역폭을 무료로 제공할 수 있어 빠른 속도와 주파수 구매에 따른 추가 비용을 지불 할 필요 없이 시스템을 구축할 수 있는 장점이 있어 관련된 연구가 다양하게 진행되고 있다[1-3].

최근 가시광통신 연구는 고속 데이터 전송을 위한 시스템 모델링, 다중접속, 필터링 등의 신호 처리 및 디밍과 플리커를 줄이기 위한 조명제어 알고리즘에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 실내에서 정확도가 부족한 GPS를 대신한 초정밀 실내 위치 기반 서비스 연계 기술 등에 대한 연구 및 상용화 기술을 중심으로 연구가 진행되고 있다[4-6]. 특히, 인공지능의 발달로 인하여 인공지능 기술과의 통합을 통한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 가시광통신의 특성상 포토다이오드를 이용한 수신단은 다중 신호 수신 시 수신단에서 신호 분리가 거의 불가능하고, 실외에서 사용할 경우 외부의 태양광 등의 빛 간섭으로 인하여 사용이 불가능한 단점이 있어 이전에는 실내에서의 활용법을 중심으로 연구가 진행되었다[5]. 그러나, 최근에 간섭제거 기법, 다이버시티 기법, 채널 코딩 기법 등의 적용을 통하여 성능이 크게 향상 되고 있어 실외 환경에서의 적용 방안에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 특히, 수신단에 포토다이오드 대신 카메라 모듈을 이용하여 데이터를 분리하여 수신하는 가시광통신 시스템에 대한 연구가 집중적으로 진행되고 있다. 그러나 인공지능 기술 및 카메라 모듈을 이용한 가시광통신 시스템은 실시간 촬영 및 분석이 필수적이므로 설치 비용이 많이 들고, 시스템의 정확성을 높이기 위해서는 고성능의 시스템이 필요하다는 단점이 있다. 이로 인하여 확산에 어려운 문제가 있다[7-10].

본 연구에서는 실외 환경에서의 가시광통신 시스템의 성능 향상을 위한 기법에 대해서 연구한다. 가시광통신은 LED를 이용하여 데이터를 전송하는데, 백색 LED는 Red, Green, Blue의 세 가지 색상으로 구성되어 있어 LED의 혼합 비율에 따라서 색상 및 빛의 강도 즉, 송신 전력이 다르게 되어 통신에서의 성능이 열화되는 문제가 발생한다. 이 논문에서는 RGB 3개의 채널 중 혼합 비율의 차이로 발생하는 통신 시스템에서 일정 성능 이하가 발생할 때, 최고의 성능을 보이는 LED를 제외하고 나머지 2개의 신호를 STBC(Space-Time Block Coding)으로 전송하여 통신의 품질을 보장하는 시스템에 대한 연구를 진행한다. STBC기법은 다중 LED를 사용하는 기술로 데이터를 여러 LED를 통하여 동시에 전송하여 다중경로 페이딩(Multipath Fading) 효과로 인한 신호 감쇄 및 간섭을 효과적으로 극복하여 데이터의 신뢰성과 성능을 향상시킨다[11-13]. 다만, 기존의 STBC 시스템의 경우 데이터 전송 속도와 성능의 Trade-off로 이번 논문에서는 이를 보완하는 시스템에 대해서 연구한다.

즉, 성능이 보장되는 구간에서는 각 RGB 별로 서로 다른 데이터를 전송하는 SDM(Space Division Multiplex) 기법을 적용하여 속도를 향상시키고, 성능이 보장되지 않은 구간에서는 각 RGB에 서로 같은 데이터를 전송시켜 성능을 향상 시키지만 속도가 저하되는 다이버시티 기법을 사용하기보다 높은 데이터 전송속도 및 안정적인 성능을 만족하기 위하여 하이브리드 전송기법을 제안한다.

2. 가시광통신 시스템

2.1 6G에서의 가시광통신 활용

Fig. 1은 6G의 비전에 대해서 보여준다. 가시광통신 시스템은 높은 대역폭을 요구하는 6G에서 대역폭의 활용도가 매우 높아 초고속, 초지연, 초연결이 필요한 무선 통신 시스템의 단점을 보완하기 위하여 기존의 무선 통신 인프라에 추가적으로 설치가 될 것으로 예상된다. 또한, 6G에서는 보안 및 개인 정보가 중요한 이유로 도청이나 감청이 불가능하고, 초밀집 네트워크 구성이 단순하여 활용도가 매우 높을 것으로 판단된다.

특히, 실내의 조명등을 이용한 초정밀 위치 측량이 가능하고 위치기반 서비스에 대한 수요가 폭발적으로 증가할 것으로 예상되어 관련 연구의 고도화가 진행되고 있으며, 차량 간 통신, 도시의 조명, 가로등 및 신호등과의 데

이더 연동을 통한 V2X 네트워크 구성응용 분야에서의 연구가 진행되고 있다[14].

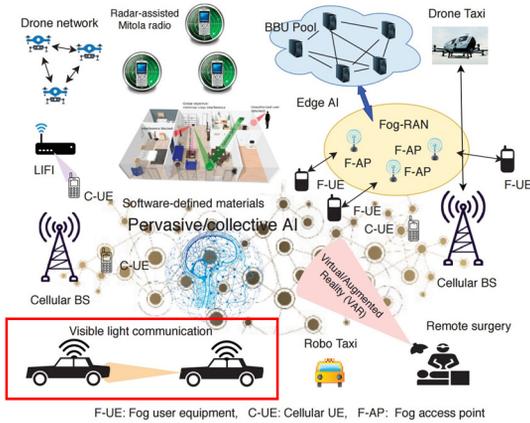


Fig. 1. The vision of 6G [14]

2.2 LED 혼합 비율에 따른 성능

Table 1은 백색 LED를 구성하는 RGB의 혼합 비율을 나타낸다. 본 논문에서는 4가지의 백색 LED 혼합 비율을 이용하여 실험을 수행하였다. Table. 1의 데이터와 같이 혼합 타입에 따라서 각 RGB의 빛의 강도가 다르게 되어 조명으로 사용할 경우에는 특별한 문제가 없지만 조명과 통신을 동시에 사용할 경우에는 수신단에서 검출된 값의 차이가 발생하여 성능이 다르게 나타나는 문제가 발생한다. 특히, RGB 혼합비에 따른 전력 차가 크면 클수록 성능 차이가 많이 발생하고, 이로 인하여 가시광통신 시스템 전체 비트오율(Bit Error Rate)의 성능이 저하된다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위하여, 각 RGB의 혼합 비율에 따른 성능을 예측하고, 3개의 채널 중 최상의 채널을 제외한 나머지 2개의 채널의 값들을 STBC를 통하여 전송함으로써 전송속도 및 성능을 향상시키는 기법을 제안한다.

Table 1. RGB Mixing ratio according to 4 type[15]

Mixing Type	White LED			Efficiency (1m/W)
	Red	Green	Blue	
1	1	0.89	2.51	291
2	1	1.43	2.29	317
3	1	2.63	1.96	391
4	1	11.17	7.19	413

2.3 가시광통신 시스템 개요

Fig. 2는 일반적인 가시광 통신 시스템 구조를 나타낸

다. 가시광통신 시스템은 송신부에서 데이터를 발생시키고, 발생된 입력 데이터는 펄스로 변조된 후 광원의 세기 변조 (IM : Intensity Modulation)를 통하여 '0'과 '1'을 LED의 On-Off를 통하여 제어하며 데이터를 전송한다. 전송된 데이터는 수신부에서 포토다이오드를 통하여 직접 검출(Direct Dection) 통하여 전기 신호로 변환하고, 변환된 값의 임계치 비교를 통하여 임계치 이하일 경우 '0', 임계치 이상일 경우 '1'로 데이터를 검출한다.

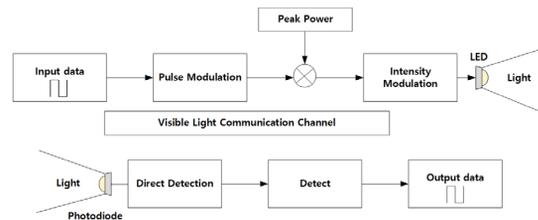


Fig. 2. VLC system structure

2.4 가시광통신 시스템 채널

무선 광통신 신호는 일반적으로 두 가지의 경로를 통해서 전파가 된다. 첫 번째는 송신기와 수신기 사이의 장애물이 없어 직접적으로 데이터가 전송되는 D-LOS(Directed-Line of sight) 채널 경로이고, 두 번째는 전송된 빛이 표면의 반사로 인하여 발생하는 채널 경로입니다. 일반적으로 광통신은 D-LOS 경로에서 수신된 광신호의 전력이 가장 강하기 때문에, 빛의 반사로 인하여 들어오는 신호를 무시할 수 있어 대략적으로 D-LOS 경로 손실 채널로 가정한다. Fig. 3과 같이 조명등을 이용한 가시광통신은

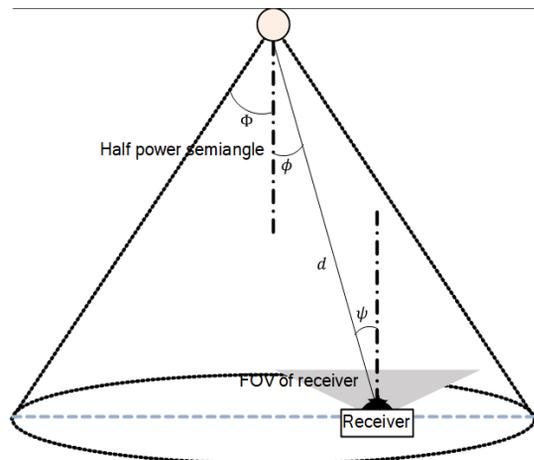


Fig. 3. Schematic diagram of VLC system channel

LED 조명이 천장에 위치하고, 수신단은 천장 아래에 위치하여 빛의 방향이 아래 방향으로 향한다. 송신기와 수신기 사이의 장애물에 의해 유발되는 음영 효과를 무시하면 D-LOS 경로 손실 채널로 가정된다.

빛이 외부로 전파되는 방식을 나타내는 램버트 복사 모델의 D-LOS의 채널 직류(DC) 이득은 다음과 같이 주어진다.

$$H(0)_{LOS} = \left(\frac{m+1}{2\pi d^2} \right) A \cos^m \phi \cos \psi \quad (1)$$

여기서, A는 포토다이오드의 노출 영역, d는 송수신기 사이의 전송거리, θ 와 ϕ 는 Fig.3의 VLC 시스템의 채널에 나타나 있으며 각각 조도각과 입사각을 나타내고, m은 송수신기 사이의 반각을 나타낸다.

또한, 가시광통신은 빛을 이용하여 데이터를 송수신하기 때문에 배경 잡음으로 인하여 발생하는 간섭으로 인한 고속 데이터 전송에 큰 제한을 나타낸다.

왜냐하면, 가시광통신 수신측에서는 데이터를 수신하기 위하여 포토다이오드를 사용하는데, 희망신호와 배경 잡음으로부터 발생하는 원치 않는 신호가 간섭으로 취급되기 때문이다. 가시광통신의 무선 광 채널은 다음과 같이 모델링 된다[16].

$$r(t) = \gamma \cdot s(t) \otimes h(t) + n(t) \quad (2)$$

여기서, s(t)는 송신 신호, r(t)는 수신 신호를 각각 나타내고, γ 은 광신호와 전기 신호 간 변환 효율, h(t)는 채널 임펄스 응답(Channel Impulse Response), \otimes 는 컨볼루션, n(t)는 AWGN(Additive White Gaussian Noise)을 나타낸다.

3. 하이브리드 전송기법

VLC-OFDM는 통신의 속도를 향상시키고 다중 경로로 인하여 발생하는 ISI(Inter-Symbol interference)를

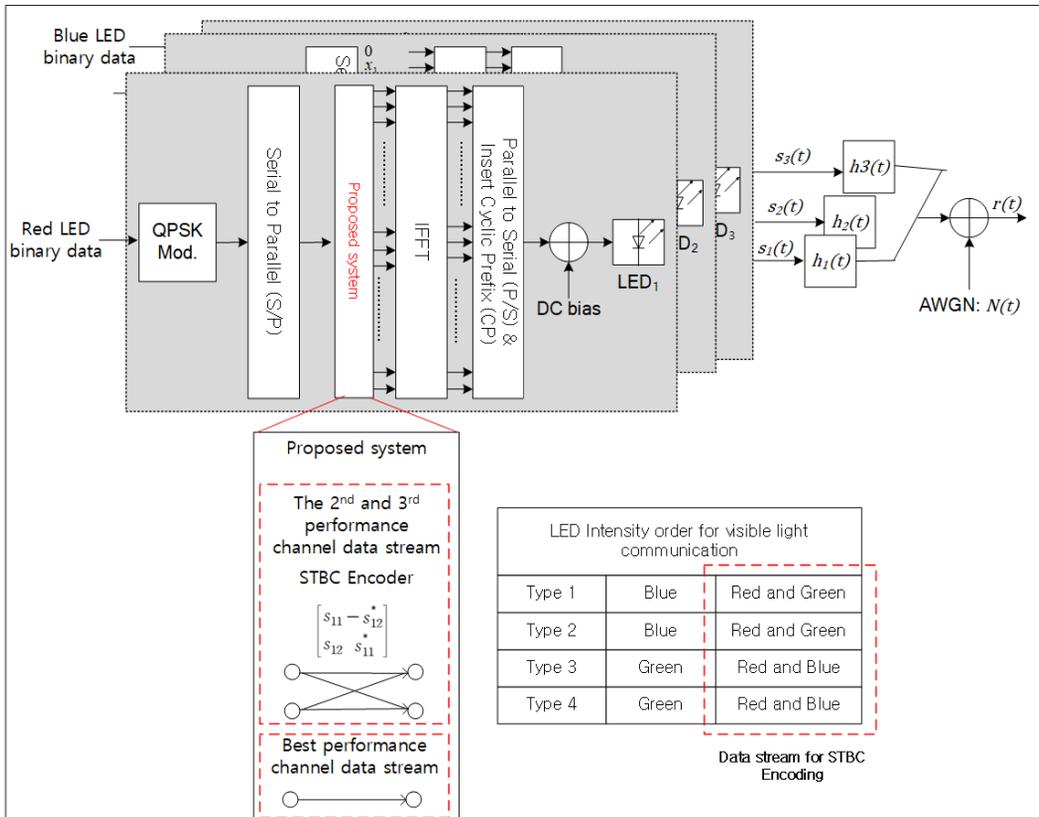


Fig. 4. Schematic diagram of transmitter of the proposed system

효과적으로 제거하는 기술이다. VLC-OFDM의 변조 신호는 신호는 빛을 강도로 표현되며, 이는 변조된 신호가 양수이며 실수여야 한다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 제안시스템의 송신단을 보여준다. 송신단에서는 RGB LED별로 데이터를 이진 데이터를 발생시키고, 이 신호는 QPSK 변조기를 변조된다. 변조된 심볼은 직렬 변환기에 의하여 직렬에서 병렬로 변환되고, 제안 기법에 의해서 STBC 부호화를 한다.

$$\begin{bmatrix} S_{11} - S_{12}^* \\ S_{12} \ S_{11}^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

제안 기법은 LED 혼합비율에 따라서 RGB의 빛의 강도가 달라지는 것에 따라서 성능의 차이가 발생하여 전체적인 통신 시스템의 성능이 열화되는 문제를 해결하는 방법이다. MIMO(Multiple Input Multiple Output) 기법은 데이터의 전송속도를 높이는 SDM기법과 공간 및 시간 다이버시티 이득을 얻어 통신 성능을 향상시키는 STC(Space Time Coding) 기법으로 나누어진다. 본 연구에서는 STC 기법 중에 하나인 STBC 부호화를 이용하여 진행한다. RGB 별로 SDM 기법을 이용하여 데이터를 전송할 경우 데이터 전송속도는 높일 수 있지만 데이터의 신뢰성을 보장할 없어 수신단에서의 수율이 낮아지는 문제가 발생한다. 특히, 백색 LED로 통신을 할 경우 조명과의 기능을 중복 구현하기 위하여 필수적으로 RGB를 다른 비율로 혼합해야 한다. 이는 RGB LED 별로 빛의 강도가 다르게 되어 수신단에서 포토다이오드를 통하여 데이터를 검출 할 때 성능의 차이를 발생시킨다. 특히, 특정 값 이하의 빛의 강도로 전송된 데이터 때문에 시스템 전체의

성능이 나빠지는 문제가 발생한다. 제안 시스템은 RGB의 혼합 비율에서 가장 높은 빛의 강도를 갖는 신호는 SDM 기법을 통하여 전송하고, 2번째 및 3번째 빛의 강도를 갖는 LED는 STBC 기법을 통하여 전송하는 방법이다. 예를 들어, Table 1 RGB Mixing ratio according to 4 type 에서 Type 3의 경우 Green이 가장 높은 빛의 강도를 갖고, Blue 와 Red는 2번째 3번째의 빛의 강도를 갖는다. 따라서, Green의 경우 SDM기법을 사용하여 전송하고 Blue 와 Red는 2개의 송신 LED와 1개의 포토다이오드를 갖는 2×1 MIMO STBC 기법을 이용하여 전송함으로써 전체 시스템의 성능을 향상시킨다. 이후, IFFT 및 다중경로 페이딩에 의해서 발생하는 ISI와 ICI의 영향을 최소화하기 위하여 보호구간 및 CP(cyclic prefix)를 OFDM 심볼의 앞부분에 추가한다. 이후 OFDM 심볼은 각 LED를 통하여 데이터를 송신한다. 송신된 신호는 무선 광채널을 통하여 수신단의 포토다이오드를 통하여 수신되고, 수신된 신호 $r(t)$ 는 다음과 같다.

$$r(t) = \gamma \sum_{i=1}^L s_i(t) \otimes h_i(t) + n(t) \quad (4)$$

여기서 $s_i(t)$ 는 i 번째 LED로부터 송신된 광신호이고, γ 및 \otimes 는 각각 컨볼루션 및 광-전기(O/E) 변환 효율, $n(t)$ 는 백색가우시안 잡음(AWGN)을 나타낸다.

Fig. 5는 제안하는 시스템의 수신단을 보여준다. 포토다이오드를 통하여 수신된 신호는 광전변환를 통하여 전기 신호로 변환된 후 CP를 제거하고, FFT를 수행한다. 이러한 과정 후 MRC를 이용하여 전체 수신된 신호를 각 LED로부터 신호를 분리하고, 분리된 신호는 STBC 역부

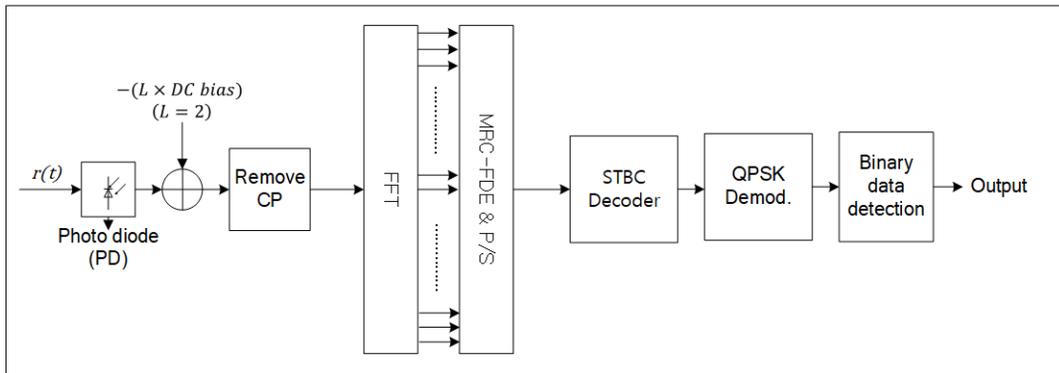


Fig. 5. Schematic diagram of receiver of the proposed system

호화를 및 QPSK 복조를 통하여 데이터를 검출한다.

4. 제안시스템의 성능 실험 및 분석

4.1 모의 실험 환경

제안시스템의 성능을 효과적으로 평가하기 위하여 컴

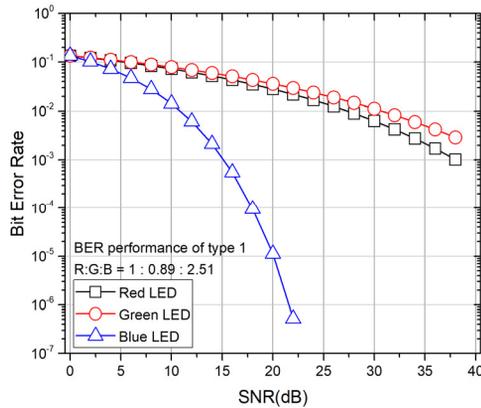
퓨터 시뮬레이션을 사용하였다. LED의 혼합 비율을 Table 2에 있는 4가지 방법을 사용하였으며, 기존의 시스템과 제안시스템의 비트오율 성능을 비교하였다. 주요 시뮬레이션에 위한 파라미터는 Table에 요약되어 있다.

4.2 모의 실험 결과

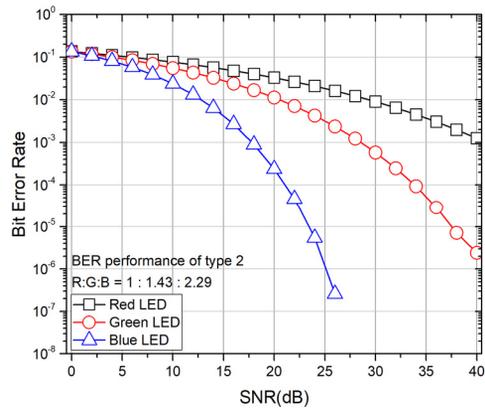
Fig. 6은 Table 2의 RGB 혼합비율에 따른 BER 대 SNR(dB)의 그래프를 나타낸다. RGB LED의 각각 혼합 비율에 따른 성능으로 비율값이 높으면 성능이 향상하고 낮으면 성능이 열화하는 것을 공통적으로 볼 수 있다. 대표적으로 TYPE 1의 상황에 대해서 분석해 보면, R:G:B의 상대적 비율이 1:0.89:2.51로 Blue LED의 빛의 강도는 다른 LED와 비교하여 상대적으로 빛의 강도가 가장 강하고, Green LED의 값이 가장 약한 것을 알 수 있다. 또한, Blue LED는 Red LED와 Green LED에 비하여 큰 값을 가지는 반면에 Red LED와 Green LED는 약간의 값

Table 2. Simulation parameters

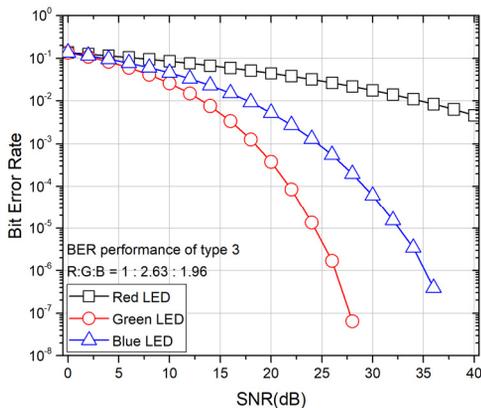
Devices for SDM	2×1
Devices for STBC	1×1
Electrical modulation	OFDM-QPSK
Optical modulation	IM-DD
# of subcarriers	128
IFFT/FFT size	128
Transmission bit rate	100Mbps
# of data symbols	64
Length of guard interval	32
O/E conversion efficiency	0.53 [A/W]
Ambient light noise	0.0 [dBm]
FOV of a receive	74.0 [deg.]
Optical channel model	Directed LOS path



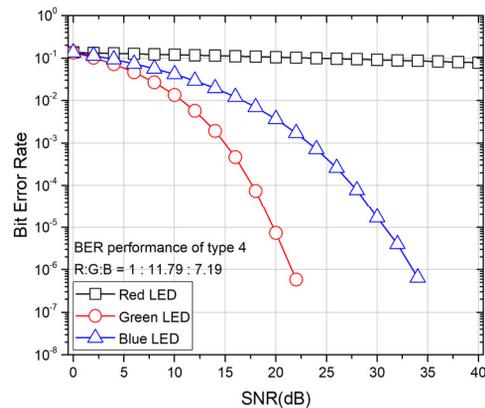
(a) The LED mixing ratio of TYPE1



(b) The LED mixing ratio of TYPE2

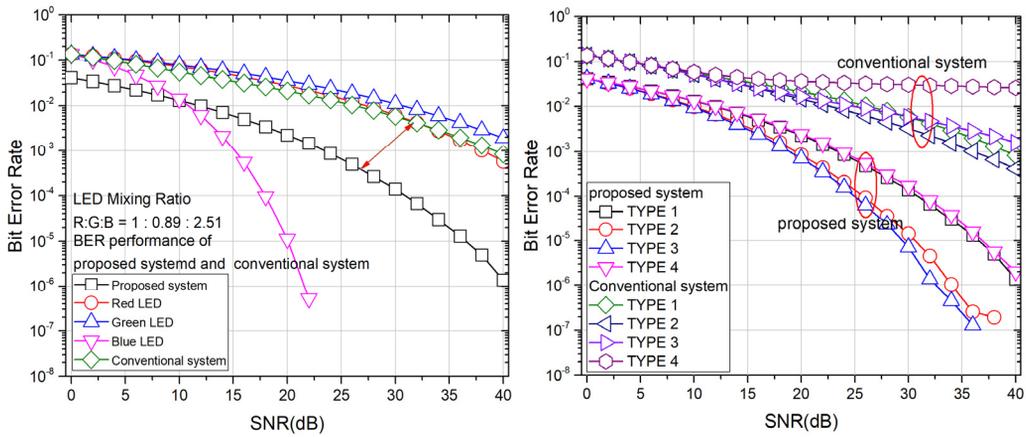


(c) The LED mixing ratio of TYPE3



(d) The LED mixing ratio of TYPE4

Fig. 6. The BER performance according to LED mixing ratio



(a) The BER performance of proposed system and conventional system according to LED mixing ratio of TYPE1
 (b) The BER performance of proposed system and conventional system according to LED mixing ratio

Fig. 7. The BER performance of proposed system and conventional system

의 차이가 있는 것을 알 수 있다. 그래프를 분석해 보면 RGB LED 모두 SNR이 증가할수록 성능이 증가하고 있는 것을 볼 수 있으며, 빛의 강도의 차이에 대응하여 시스템의 성능이 나오는 것을 알 수 있다. type 1의 경우는 Red LED와 Green LED의 송신 전력이 낮아 AWGN 채널을 통과 한 후 수신단에서 잡음에 의한 성능열화로 RGB 전체 시스템의 성능이 떨어진다.

Fig. 7 (a)는 LED 혼합 비율 중 TYPE 1에서 제안 시스템과 기존 시스템, 각 RGB의 BER 성능을 나타낸다. 결과를 보면 각 RGB의 경우 개별 데이터를 전송하여 수신하는 경우는 RGB 혼합비율에 따라서 성능이 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나, 기존시스템의 성능은 RGB 전송 데이터 전체의 성능을 분석한 것으로 Blue LED를 제외한 나머지 LED의 성능이 매우 나빠 전체적인 시스템 성능이 열화하는 것을 볼 수 있다. 이에 반하여 제안시스템은 가장 좋은 채널은 SDM 기법을 이용하여 전송하고, 열화하는 채널 2개를 STBC 기법을 이용하여 전송함으로써 기존 시스템에 비하여 성능이 향상되는 것을 알 수 있다. 왜냐하면, STBC 시스템의 경우 서로 다른 LED와 시간을 사용하여 전송함으로써 다이버시티 이득을 얻을 수 있기 때문이다.

Fig. 7 (b)는 4가지의 LED 혼합비율에 따른 BER 성능을 나타낸다. BER 성능을 보면 TYPE3, TYPE2, TYPE1, TYPE4의 순으로 우수한 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 RGB의 혼합비율에서 각 RGB의 혼합비율의 차이가 발생하는 채널이 있을 때, 수신 단에서 수신전력의 차

이에 의하여 성능의 열화가 발생하고, 이로 인하여 전체적인 BER 성능이 나빠지는 것을 나타낸다. 특히, TYPE 4의 경우 혼합비율(R:G:B = 1:11.79: 7.19) 중 R의 경우 G와 B와 비교하여 상대적으로 매우 작은 값을 가지고 있어 데이터 전송 시 수신전력이 매우 낮아지게 되고, 이로 인하여 4가지 타입 중 가장 성능이 좋지 않을 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 조명과 통신을 동시에 이용하는 가시광통신 시스템에서 백색 LED를 구성하는 RGB 혼합 비율에 따른 성능 열화를 극복하기 위한 하이브리드 전송기법을 제안하였다. 제안 기법은 혼합 비율의 차이로 송신 데이터의 빛의 강도가 다르게 되고, RGB LED 중 상대적으로 약한 빛의 강도를 갖는 LED의 경우 성능이 열화되어 전체 시스템 성능에 악영향을 미친다. 제안 시스템은 RGB LED 중 빛의 강도가 상대적으로 약한 2개의 신호를 STBC 기법으로 가장 좋은 값을 가지는 신호는 SDM으로 전송함으로써 전체적인 성능을 향상시키는 기법으로 매우 효과적이다. 컴퓨터 시뮬레이션의 결과 통하여 제안 시스템이 기존 시스템에 비교하여 성능이 향상된 것을 확인하였다. 후속연구에서는 다중 LED 환경에서 혼합비율을 조절하여 사용자 모두가 공평한 성능을 가지는 방안에 대한 연구가 필요하다.

REFERENCES

- [1] S. S. Oyewobi & K. Djouani & A.M. Kurien (2022), Visible light communications for internet of things: Prospects and approaches, challenges, solutions and future directions. *Technologies* 10, 28.
- [2] W. Chuxian & X. Ning & L. Zhiyong(2022). A High-performance MIMO-OFDM VLC System Based on OCT Precoding. 2022 2nd International Conference on Frontiers of Electronics, Information and Computation Technologies, 188-192. DOI : 10.1109/ICFEICT57213.2022.00042
- [3] Mir. M.S. & B. Majlesein & B.G. Guzman & J. Rufo & D. Giustiniano(2021),LED-to-LED based VLC Systems: Developments and open problems. In Proceedings of the Workshop on Internet of Lights, Virtual Event, 1-6.
- [4] M. Figueiredo, & L.N. Alves & C. Ribeiro(2017), Lighting the wireless world: The promise and challenges of visible light communication. *IEEE Consum. Electron. Mag.* 6, 28-37.
- [5] Lee, K.; Park, H.; Barry, J.R (2011). Indoor channel characteristics for visible light communications. *IEEE Commun. Lett.* 15, 217-219.
- [6] F. Wang & F. Yang & J. Song & Z. Han(2022). Access frameworks and application scenarios for hybrid VLC and RF systems: State of the art, challenges, and trends. *IEEE Commun. Mag.* 60, 55-61.
- [7] L. B. Alvarez & S. M. Sánchez & L. R López & C. A. Meza & G. Saavedra (2023). A Review of Hybrid VLC/RF Networks: Features, Applications, and Future Directions, *Sensors*, 23(17), 7545. DOI : 10.3390/s23177545
- [8] K. J. Lee (2018), Dimming Level Control Technique for Lighting / Communication Functions in Visible Light Communication Systems. *Journal of Convergence for Information Technology*, 8(5), 153-158.
- [9] M. Obeed & S. A.M. & A. M.S. & S.A. Zummo(2019). On optimizing VLC networks for downlink multi-user transmission: A survey. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 21, 2947-2976.
- [10] S. Rajagopal & R.D. Roberts & L. S(2012). IEEE 802.15. 7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support. *IEEE Commun. Mag.* 50, 72-82.
- [11] K. Jia & L. Hao(2019). Modeling of multipath channel and performance analysis of MIMO-DCO-OFDM system in visible light communications. *Chin. J. Electron.* 28, 630-639.
- [12] T. Fath & H. Haas(2012). Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments. *IEEE Trans. Commun.* 61, 733-742.
- [13] F. Dong & D. O'Brien (2022), High-Speed Adaptive MIMO-VLC System With Neural Network, *Journal of Lightwave Technology*, 40 (16), 5530-5540.
- [14] Y. Zhao & W. Zhai & J. Zhao & T. Zhang & S. Sun & D. Niyato & K. Y. Lam(2021). A Comprehensive Survey of 6G Wireless Communications. *Electrical Engineering and Systems Science*. DOI : 10.48550/arXiv.2101.03889
- [15] M. J. Kahn & J.R. Barry(1997). Wireless infrared communications. *Proceedings of the IEEE*, 85 (2), 265-298.

이 규 진(Kyu-Jin Lee)

[정회원]



- 2005년 2월 : 경희대학교 전자공학과(공학사)
- 2007년 2월 : 경희대학교 전파공학과(공학석사)
- 20011년 2월 : 경희대학교 전자전파공학과(공학박사)

- 2011년 3월~2013년 2월 : 경희대학교 전자전파공학과 학술연구 교수
- 2013년 3월~현재 : 세명대학교 전자공학과 교수
- 관심분야 : 6G, Deep learning based communication, VLC
- E-Mail : kyujin@semyung.ac.kr