

DCO-OFDM 기반의 가시광 통신 테스트베드 구현

강 동 수*, 이 송*, 김 지 수*, 최 계 원°

Implementation of Visual Light Communication Testbed Based on DCO-OFDM

Dong Soo Kang*, Song Lee*, Ji Su Kim*, Kae Won Choi°

요 약

가시광 통신(VLC: Visible Light Communications)는 넓은 스펙트럼을 가지는 가시광을 활용함으로써 기존 RF 통신과 비교하여 높은 전송속도를 달성할 수 있으며 주파수에 대한 규제를 적용받지 않는 차세대 통신기술이다. 본 논문에서는 DCO-OFDM 기반의 가시광 통신 테스트베드 구현에 대해 다룬다. OFDM은 멀티 캐리어를 활용한 통신 방식으로 심볼 간 간섭(ISI)을 낮춰준다는 특징을 가져 이를 VLC 시스템에 적용함으로써 VLC의 고유한 문제인 반사로 인한 멀티패스의 간섭과 심볼 간 간섭을 완화할 수 있다. 하지만 OFDM은 최대 전력 대 평균 전력 비(PAPR)가 높으며 위상 잡음 및 주파수 오프셋에 취약하다는 단점이 있다. PAPR 문제는 서브캐리어의 수와 변조 차수를 조정하여 완화할 수 있으며, 광학을 이용한 OFDM 시스템에서는 DC 바이어싱과 결합한 선형 스케일링 기법을 사용함으로써 이를 추가적으로 완화시킬 수 있다. 본 논문에서는 OFDM을 VLC 시스템에 효율적으로 결합하기 위한 선형 스케일링 기법, 동기화 심볼을 이용한 시간 동기화 및 파일럿 심볼을 이용한 채널 추정 등의 기술이 모두 구현된 OFDM 기반의 VLC 시스템 테스트베드 구축에 대해 다룬다. 테스트베드를 통해 DCO-OFDM 기반의 VLC 시스템이 가지는 특성과 실제 성능을 확인하였고, 변조 차수, 거리, 전력 이득의 변화가 비트 오류율(BER)에 미치는 영향을 실험 결과로 확인하여 채널 특성에 따라 효율적인 통신을 위해 변조 차수, 전력 이득을 조절할 수 있도록 하였다.

Key Words : DCO-OFDM, Visible Light Communication, Channel Estimation, Synchronization, Wireless Communication

ABSTRACT

Visual Light Communication (VLC) is a next-generation communication technology that has high transmission speed with a wide spectrum through visual light and compared to RF communications, it has lower power consumption and less regulated for use. If the benefit of OFDM which lower inter-symbolic interference(ISI) in radio communication using multi-carrier is applied to VLC system, it has possibility to reduce interference of multi pass and ISI. However, OFDM has disadvantages of being vulnerable to maximum Peak to Average Power Ratio (PAPR), phase noise and frequency offset. PAPR can be changed by adjusting the number of sub carriers and modulation order. And in OFDM system using optics, PAPR can be reduced by using linear scaling techniques combined with DC biasing.

※ 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었습니다. (IITP-2019-2016-0-00311)

♦ First Author : Sungkyunkwan University, Department of Electrical and Computer Engineering, ds.kang@skku.edu, 학생회원

° Corresponding Author : Sungkyunkwan University, Department of Electrical and Computer Engineering, kaewonchoi@skku.edu, 종신회원

* Sungkyunkwan University, Department of Electrical and Computer Engineering

논문번호 : 201908-177-D-RN, Received August 29, 2019; Revised October 17, 2019; Accepted October 29, 2019

In this paper, the test bed was implemented to overcome the shortcomings of the OFDM-based VLC system using linear scaling technique, time synchronization using synchronizing symbol and channel estimation using pilot symbol. The characteristics and actual performance of the VLC system based on DCO-OFDM were verified through the test bed, and the effects of the variation in modulation frequency, distance, and power gain on bit error rate(BER) were verified by the experimental results.

I. 서 론

스마트폰이나 노트북 같은 모바일 기기들의 지속적인 정보전달 요구량이 늘어남에 따라 언제 어디서나 무선으로 인터넷에 접속해야 하는 환경이 나날이 중요해 지고 있다. 무선으로 데이터를 전송하는 방법으로 현재 널리 사용되고 있는 기술로는 RF(Radio Frequency) 통신이 있다. 최근 RF 통신의 단점을 극복할 수 있는 가시광 통신(VLC: Visible Light Communication) 기술이 주목받고 있다.

VLC는 눈에 보이는 전파라 할 수 있는 가시광을 이용하여 통신하는 기술로서, 정보를 담아 전송하는 송신단에는 LED등의 빛을 발할 수 있는 발광부가 있으며 발광부의 빛을 점멸시켜 정보를 전송한다. 수신단은 광검출기(PD: Photodetector), 카메라와 같이 빛의 차이를 검출할 수 있는 장비를 이용하여 on/off 펄스 등을 수신하고 내재된 정보를 추출하는 방식으로 정보를 수신한다. VLC는 400nm~700nm의 가시광을 이용하여 정보를 전달하는 통신기술로 매개로 하는 빛의 특성상 빛이 도달하는 제한된 공간 내에서만 통신할 수 있지만 넓은 영역의 스펙트럼을 사용하므로 간섭 없이 높은 전송 속도를 낼 수 있다. 이러한 제한된 영역 내의 통신은 높은 보안성을 유지해줄 수 있다.

VLC의 다른 특성으로는 가시광 파장 대역의 빛을 이용한다는 측면에서 적외선 파장 대역을 이용하는 기존의 유선 광통신 및 RF 통신 기술과 차이가 있는 것이다. 눈에 보이는 가시광선을 이용해서 정보를 전달하는 VLC는 광이 도달하는 장소나 진행하는 방향을 볼 수 있기 때문에 도청에서 안전하며 정보의 수신범위를 정확하게 알 수 있다는 장점이 있다. 전력소모 측면에서도 상대적으로 적은 전력으로 구동시킬 수 있기에 RF 통신이 제한된 병원, 비행기에서 사용이 가능하며, RF 통신과는 다르게 주파수 이용 측면에서 규제나 허가를 받지 않고 자유롭게 이용할 수 있다.

최근 들어, LED의 발광 효율이 개선되고 가격이 내려감에 따라 이를 이용한 조명기구와 디스플레이 장치들이 자동차, 신호등, 광고판, TV, 모니터, 휴대기기, 특수 조명 및 일반 조명 등의 다양한 일상생활

에 급속히 늘어나고 있다. 이는 LED 광원이 기존 광원들보다 수명이 길고, 전력 효율이 우수하며, 다양한 색을 구현할 수 있을 뿐만 아니라 디지털 제어가 쉽기 때문이다. 이와 더불어 LED 조명기구와 디스플레이 장치들에 통신 기능을 부가하여 LED 광원의 고유 목적과 통신 수단으로서의 목적을 동시에 달성하고자 하는 가시광 무선 통신 기술도 활발하게 연구되고 있다.

더 나아가 OFDM에 기반한 VLC 시스템이 연구되고 있다. 논문[1]에서 OFDM은 멀티 캐리어를 이용하는 무선 통신 시스템에서 심볼 간 간섭(ISI)을 효과적으로 줄여주며, 가시광, 광학에서 OFDM을 응용 가능성을 보여주었다.

그러나 OFDM의 가장 큰 단점으로 최대 전력 대 평균 전력비(PAPR)과 위상 잡음 및 주파수 오프셋에 대한 취약함이 있다. 본 논문에서는 VLC 송신단과 수신단을 DCO-OFDM 기반으로 구성된 실제 테스트베드를 구현하며 OFDM의 단점을 극복하는 방법에 대해 알아본다. 실험을 통하여 VLC 시스템의 구현 가능성을 확인하고 DCO-OFDM 기반의 VLC 채널 특성과 구현된 테스트베드의 성능을 측정할 것이다.

II. OFDM에 기반한 VLC 구현 기술 배경

2.1 OFDM

논문[1]에서 설명하는 OFDM의 기본적인 아이디어는 데이터를 많은 서브 스트림으로 나누어 여러 서브 채널들을 통하여 전송하는 것이다. 각각의 서브 채널들은 주파수 대역에서 직교성(orthogonality)을 가지고 있어야 한다. 서브 채널의 데이터 전송 속도는 전체 데이터 전송 속도보다 훨씬 작으나 데이터를 전송하기 위한 대역폭도 전체 대역폭보다 훨씬 작다. 이를 바탕으로 전체의 대역폭을 병렬의 서브 채널로 나누어 멀티 캐리어를 이용함으로써 데이터를 전송하는 것이다.

2.2 동기화(Synchronization)

무선 통신환경에서 데이터 오류율을 낮추기 위해 시간, 샘플링 클럭, 주파수 동기화가 되어야 한다. 본

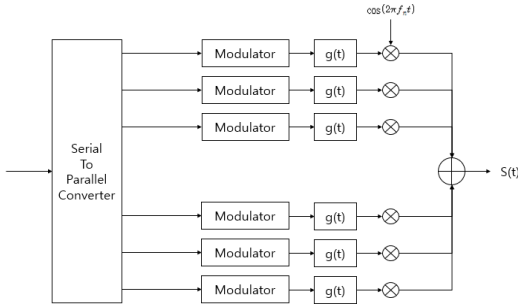


그림 1. 멀티 캐리어를 이용한 데이터 전송 방법
Fig. 1. Transferring data with multi-carrier

논문의 테스트베드에서는 논문[2]에서 제시하는 동기화 심볼(synchronization symbol)을 이용한 동기화 기술을 이용한다. OFDM 시스템을 통하여 전송되는 모든 프레임 앞에 동기화 심볼을 추가하여 시간 및 주파수 동기화를 가능하게 한다.

2.3 채널 추정(Channel estimation)

무선 채널은 주파수에 따른 딜레이가 시간에 따라 지속해서 변하기 때문에 광대역 이동 통신 시스템을 위한 OFDM 신호의 복조(demodulation)를 수행하기 전 각각의 서브 채널의 동적 추정(dynamic estimation)이 필요하다^[3]. 채널 추정은 OFDM의 모든 서브 채널에 파일럿 심볼을 삽입함으로써 수행할 수 있다.

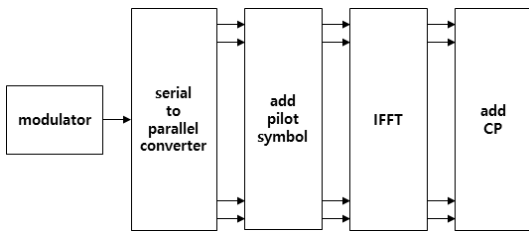


그림 2. 파일럿 심볼이 추가된 서브 채널
Fig. 2. Subchannel with pilot symbol added

2.4 VLC(Visible Light Communication)

가시광 통신은 LOS(Line-of-Sight)를 기반으로 통신하기 때문에 제한된 거리(1~100m) 및 공간에서만 통신할 수 있으며 장애물에 취약하다는 단점을 가지고 있다. LED 조명기구에 의해 송신된 신호를 수신하기 위해 두 가지 유형의 VLC 수신기를 사용할 수 있다.

① PD(Photo Detector)는 수신된 광을 전류로 변환하는 장치로 수십 MHz의 속도로의 가시광을 샘플링

할 수 있다. ② 이미지 센서 또는 카메라 센서를 이용하여 대부분의 모바일 기기에서 쉽게 VLC 수신기를 구현할 수 있다. 그러나 카메라 센서의 프레임 처리속도가 현저히 낮아 데이터 전송 속도에 한계가 있으므로 VLC에서 높은 데이터 속도를 얻기 위해서는 PD를 이용한 수신단을 구현해야 한다^[4]. 무선 통신에서 심볼 간 간섭은 송신단 및 수신단의 데이터 속도 및 FOV(Field of View)의 영향을 받는다. 빛을 이용한 VLC 시스템에서는 기본적으로 송신기가 조명의 기능을 포함하고 있기에 송신단의 LED는 정보를 제공하는 송신기의 역할 뿐만 아니라 조명의 기능으로써의 광광을 가져야 하므로 데이터 속도 및 FOV는 수신단의 성능을 따른다^[5].

VLC는 무제한 대역폭과 이중 용도로 인해 무선 통신 네트워크를 위한 솔루션으로 떠올랐다. 그러나 우수한 특성에도 불구하고 VLC는 독립형 전이중 통신에는 적합하지 않다. VLC 송신기의 작은 커버리지 영역 및 LED 센서의 방사각은 VLC 성능에 심각한 영향을 미치므로 수신기 노드로부터의 약간의 움직임으로도 신호 대비 잡음 비(SNR: signal-to-noise ratio)가 매우 불안정하기 때문이다. LED를 이용한 VLC에서의 광학 조명 및 광 전송에 대한 기본 요구사항을 바탕으로, 실내에서 사용되는 VLC 시스템의 반사로 인한 멀티패스 및 심볼 간의 간섭이 통신 성능에 미치는 영향에 관한 연구들이 있다. 만약 VLC가 가지고 있는 심볼간의 간섭 및 멀티패스에 의한 간섭을 완화한다면 효율적인 VLC 통신이 가능해질 것이다.

2.5 DCO-OFDM 기반 VLC 시스템

OFDM 기반 VLC 시스템에서는 비선형성의 정도가 감소할수록, LED 동작이 선형 모델에 가까워질수록 더 낮은 비트 오류율을 얻을 수 있다. 변조 차수를 변경할 때, 차수를 감소시키거나 서브캐리어의 수를 감소시키는 것으로 LED의 비선형성의 효과를 감소시켜 비트 오류율을 낮출 수 있다. 또한, LED와 같이 빛을 이용한 광학 OFDM 시스템의 PAPR은 서브캐리어들의 수 및 변조 차수에 의해 결정되므로 DC 바이어싱과 결합된 선형 스케일링을 사용함으로써 PAPR을 상당히 감소시킬 수 있다^[6].

DC 바이어싱 방식의 광학 직교주파수 분할 멀티플렉싱(DCO-OFDM)은 고속 데이터 전송을 제공하기 위해 가시광 통신(VLC) 시스템에서 널리 사용된다. 직접 검출을 이용한 강도 변조가 OFDM 신호를 변조하는 데 사용됨에 따라 신호의 진폭을 확대하면 유효 전송 전력이 증가시킬 수 있지만, LED의 동적 범위가

제한되어 많은 신호가 잘리므로 심각한 클리핑 (clipping) 왜곡을 발생시킬 수 있다. 따라서 유효 전력과 클리핑 왜곡 간의 균형을 찾기 위해 신호를 스케일링하는 것이 중요하다. 원하는 디밍 레벨에 DC 바이어스가 고정된 실제 시나리오에서 LED 출력의 제약으로 수신 신호 대비 잡음-왜곡 비(SNDR)를 최대화하기 위한 스케일링 기법을 이용하여 시뮬레이션한 결과, 최적의 스케일링 계수를 갖는 시스템이 비트 오류율에서 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다 [7].

DCO-OFDM 시스템을 기존의 OFDM 시스템과 비교하여 차이점을 표 1로 정리하였다[1].

표 1. OFDM과 DCO-OFDM 시스템의 차이점
Table 1. Different between OFDM/DCO-OFDM system

	신호 특성	전달 매체	검출 방법
OFDM	양극 신호 (Bipolar)	마이크로/밀리미터파	Local Oscillator/Mixer
DCO-OFDM	단극 신호 (Unipolar)	광 수신전력 세기	Photo Diode

일반적인 OFDM 시스템에서는 수신된 RF 신호에서 정보를 해석하지만, DCO-OFDM 기반의 시스템에서는 수신된 빛의 세기를 통해 정보를 읽어내므로 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform)을 통하여 시간 영역으로 변환된 신호의 실수 부분만을 이용하게 된다.

그림 3과 같이 Hermitian 대칭을 이용하면 시간 영역 신호의 실숫값을 얻을 수 있다. 테스트베드에서도 변조된 신호에 Hermitian 대칭을 이용하여 FFT를 구성하였다.

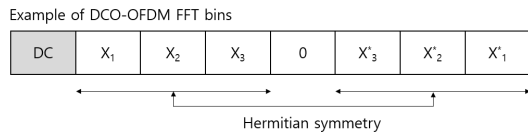


그림 3. Hermitian 대칭을 이용한 DCO-OFDM 예시
Fig. 3. Example of DCO-OFDM using Hermitian Symmetry

III. DCO-OFDM 기반의 VLC 테스트베드 구현

본 테스트베드는 DCO-OFDM 기반의 VLC 시스템과 기존 VLC 시스템과의 차이점을 분석하고, 측정

된 성능을 바탕으로 새로운 시스템에 응용하기 위해 구현되었다. 테스트베드는 송신단과 수신단으로 이루어져 있으며, 송신단의 LED를 이용하여 빛으로 신호를 보내고 수신단의 PD를 통하여 빛을 받아들여 송신단의 정보를 추출한다. 송신단의 디지털 회로는 FPGA로 구현되며 비트 스트림(bit stream)을 입력하여 S/P(Serial to Parallel)를 통과하기 전 QAM 변조를 수행한다. QAM의 차수에 따른 변화를 관찰하기 위해 차수가 조절 가능한 변조기를 구현하였다. QAM 변조된 비트 스트림의 값들을 IFFT로 변환하여 OFDM 신호를 생성한다. 송신단에서는 VLC 링크 상황에 따라 QAM의 차수를 변경해가며 링크의 상태에 따라 한 번에 전송하는 데이터의 양을 늘려 전송속도를 올릴 것인지, 차수를 낮추어 BPSK 또는 QPSK로 안정적인 데이터 전송을 할 것인지 선택할 수 있도록 구현하였다. IFFT 변환 시 CP(cyclic prefix)를 추가하여 수신단과의 동기화를 용이하게 하며 ISI를 줄일 수 있도록 구현하였다.

3.1 하드웨어 구성

그림 4에 구현된 OFDM 기반의 VLC 시스템 테스트베드 하드웨어의 구성도를 나타내었다. 하드웨어의 각 구성요소의 역할은 다음과 같다.

- DAC(digital to analog convertor): IFFT를 통과한 시간 영역의 이산 디지털 신호를 연속적인 아날로그 신호로 변환한다.
- Amplifier: DAC로부터 변환된 신호를 증폭시켜 Bias Tee로 전달한다.
- Bias Tee: DAC를 통하여 출력된 아날로그 RF신호는 LED에서 동작시키기 위한 충분한 DC 레벨을 가지고 있지 않기 때문에, DC 레벨을 추가하여 LED에 충분한 DC를 공급해 주기 위한 장치이다.

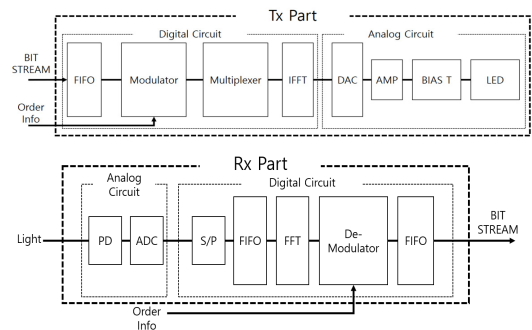


그림 4. 테스트베드 하드웨어 구성
Fig. 4. Testbed hardware configuration

- LED: VLC 시스템에서는 가시광을 이용하기 때문에 송신단에서 구성된 신호를 빛으로 변환하기 위하여 이용한다.
- Photo Diode: 수신단에서 빛의 세기를 전기적인 신호로 변환시켜주는 역할을 한다.
- ADC(analog to digital convertor): ADC에서는 DAC와 반대로 PD로부터 측정된 연속적인 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환해주는 역할을 한다.
- DC Block: PD로 받은 신호는 DC 커플링이 적용되어 출력되거나 ADC를 비롯한 수신단의 S/W 처리 과정에선 DC 레벨이 0이라는 전제하에 신호를 처리하게 되어있다. DC Block은 DC 레벨을 제거하여 수신된 신호를 원활히 처리할 수 있도록 한다.

3.2 DCO-OFDM 기반 VLC 프레임 구조

테스트베드에서는 그림 5와 같은 OFDM 프레임 구조를 사용한다. 하나의 프레임은 여러 개의 심볼로 구성되어 있으며 동기화를 위한 동기화 심볼, 채널 추정을 위한 파일럿 심볼, 각각의 프레임 구분을 위한 Frame ID, 변조 차수, 전력 이득으로 이루어진 제어 심볼 및 전송하려는 데이터로 구성된 여러 개의 데이터 심볼이 하나의 프레임으로 구성된다. 프레임의 각 심볼의 기능은 아래와 같다.

- 동기화 심볼(sync symbol): 프레임의 제일 앞부분에 위치하는 심볼로써, 프레임의 시작 지점을 찾아 시간 동기화를 하기 위한 심볼이다. 시간에 따른 에러가 발생한다면 ISI가 일어나기 때문에 제일 처음으로 삽입된 동기화 심볼을 이용하여 시간 동기화를 수행한다.
- 파일럿 심볼(pilot symbol): 동기화 심볼 이후에 삽입되어 수신단에서 채널 추정을 하는 데 도움을 준다. 무선 채널을 통하여 신호가 전달될 때 여러 요인에 의하여 왜곡된다. 이 왜곡된 신호로 인하여 수신단에서 오류가 발생하는 것을 방지하기 위해 파일럿 심볼을 이용하여 원래의 신호로 최대한 보

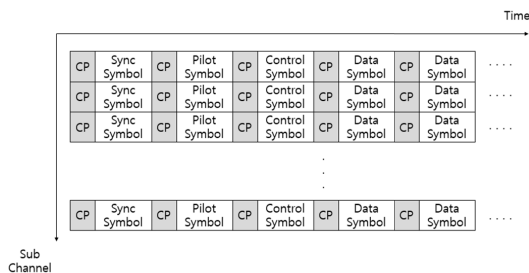


그림 5. 프레임 구조
Fig. 5. Structure of Frame

정한다.

- 제어 심볼(control symbol): 수신단에서 프레임 및 심볼을 제어하기 위한 정보들이 담겨있다. 프레임을 구분하기 위한 ID가 담긴 프레임 ID, 각 서브 채널의 변조 차수 및 전력 이득에 대한 정보가 담겨있다.
- 데이터 심볼(data symbol): 송신단에서 전송하려는 데이터는 설정된 값에 맞추어 변조기에서 각각의 데이터로 변조된다. 변조되어 출력된 데이터들은 각각 변조 차수에 해당하는 심볼을 가지고 있다. 본 논문의 테스트베드에서는 프레임을 구성하는 심볼을 각각 IFFT를 이용하여 시간 영역으로 변경 후 그림 6과 같은 코드를 이용해 하나의 배열로 병합하여 프레임을 구성한다.

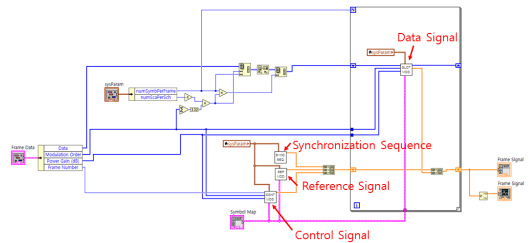


그림 6. DCO-OFDM에 기반한 VLC 프레임 생성
Fig. 6. DCO-OFDM based VLC Frame Generation

3.3 소프트웨어 구성

OFDM 기반의 VLC 시스템의 소프트웨어를 구성하여 원하는 정보를 전송 및 수신하기 위한 기본적인 처리 과정을 수행한다. 시스템은 랩뷰(LabVIEW) 소프트웨어를 이용하여 구성되어 처리 과정을 다음과 같은 블록으로 구분할 수 있다.

- Configure Block: NI5782의 기본 sampling clock 및 데이터를 처리하기 위한 대기열 및 FIFO의 크기를 설정한다.
- Frame Block: 동기화 및 채널 추정을 위한 심볼을 추가하여 하나의 프레임을 만든다.
- Synchronization block: 동기화 심볼을 이용한 채널 동기화를 위한 블록이다. 이 블록에서는 PD로부터 수신한 신호들에 대해 시간 동기화를 시켜 프레임의 시작점을 찾고 구성되어 있는 프레임에 대해 동기화 심볼 및 채널 추정을 위한 파일럿 심볼 그리고 데이터 심볼을 분리한다.
- Channel Estimation block: 동기화 블록으로부터 추출된 파일럿 심볼을 분석하여 채널 추정을 한다. 추정된 채널 딜레이를 기반으로 각각의 서브 채널

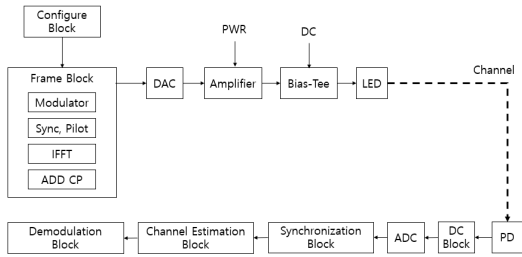


그림 7. 테스트베드 구성도
Fig. 7. Testbed Architecture

의 심볼들을 보정하기 위한 값을 산출한다.

- Demodulation block: 프레임으로부터 분리된 서브 캐리어들의 데이터 심볼에 대해 채널 추정 블록으로부터 채널 추정값을 전달 받아 설정해둔 심볼 맵에 따라 변조되어있는 심볼들을 복조하여 송신단으로부터 데이터를 전달받는 최종 블록이다.

그림 7은 테스트베드의 소프트웨어와 하드웨어를 포함한 전체적인 구성도이다. 송신단에서부터 수신단까지의 데이터 전송을 나타낸다.

그림 8은 송신단의 데이터를 변조하여 IFFT로 시간 영역으로 변환하는 과정을 나타낸 것이다. 데이터를 받으면 서브 채널과 서브캐리어의 수만큼 데이터를 추출하여 설정된 세기와 변조 차수에 따라 변조하고, 변조된 데이터에 전력 이득이 합쳐진 값을 배열에 저장한다. 이렇게 저장된 배열을 반으로 나누어 중간에 PN(pseudo noise) 신호를 삽입한다. PN 신호는 파일럿 심볼의 역할을 하게 된다. 주파수 응답은 일반적인 가우시안 잡음에 비해 시간에 따른 변화가 느리므로 파일럿 심볼을 이용해 이를 보정할 수 있다.

시스템 매개 변수에서 설정된 서브 채널의 수만큼 반복하여 각 서브 채널에 변조된 데이터들이 저장된 배열이 완성되면 IFFT를 통하여 시간 영역으로 변환한다. 이때, 낮은 주파수를 사용하는 서브캐리어와 높

은 주파수를 사용하는 서브캐리어에는 아무 정보를 전송하지 않는 가드 밴드를 준다. 이 캐리어들은 VLC 시스템에서 주파수 응답이 좋지 못하기 때문에 사용하지 않고 대신 다른 주파수 대역에서 받는 영향을 줄이는 가드 밴드로써의 역할을 한다.

DCO-OFDM 기반의 VLC 시스템에서 FFT 서브 캐리어의 첫 번째 배열이 DC 성분으로 사용되기 때문에, 저장된 배열의 맨 앞에 빈 배열을 추가하여 DC 성분으로 사용한다. 이후 Hermitian 대칭을 이용한 DCO-OFDM FFT 서브캐리어를 IFFT를 통하여 시간 영역으로 변환한다. 변환된 시간 영역에 CP를 추가하고, 시스템 매개 변수에서 설정해둔 CP의 길이에 해당하는 만큼 배열의 뒷부분을 잘라 앞부분에 추가하면 최종적으로 전송하기 위한 데이터 신호가 포함된 배열이 완성된다.

수신단에서는 동기화 심볼을 이용하여 프레임의 시작점을 찾아내어 프레임 단위로 수신된 신호를 구분하여 다음 블록으로 전달한다. 프레임의 파일럿 심볼을 통해 채널 추정된 딜레이 정보를 전달받아 복조하

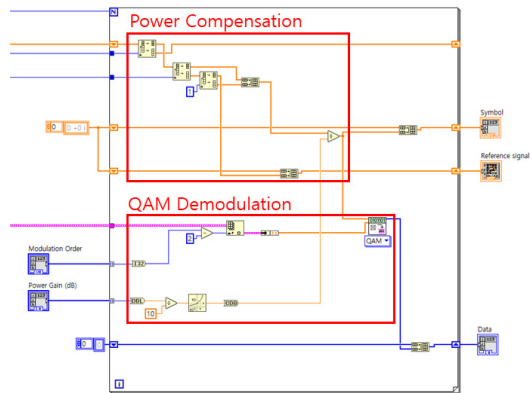


그림 9. Demodulation.vi
Fig. 9. Demodulation.vi

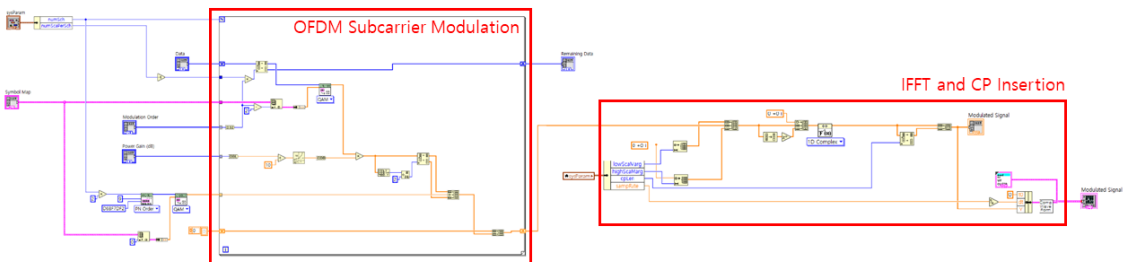


그림 8. Slot_modulation.vi
Fig. 8. Slot_modulation.vi

기 위한 블록은 그림 9과 같은 램블루 코드로 구현된다.

수신된 신호는 프레임으로 분리된 데이터로 시스템 매개 변수에 맞추어 원래의 데이터로 복원되는 처리 과정을 거친다. 수신된 신호가 담겨있는 배열은 FFT로 원래의 주파수 도메인으로 변환된다. 시스템 매개 변수로부터 얻은 기본적인 채널 정보를 통하여 제어 심볼로부터 복조를 위한 각 서브 채널의 정보를 얻어낸다. 각 서브 채널에 해당하는 변조 차수를 통하여 송신단에서 전송한 원래의 데이터를 얻을 수 있다.

동기화를 위한 동기화 심볼은 시스템 매개 변수로부터 서브 채널의 수, 각 서브 채널의 서브캐리어의 수, 가드밴드의 마진을 받아와 구성한다. 그림 10과 같이 각 서브 채널에서 주파수 대역의 서브캐리어를 마진으로 제외하고 첫 심볼을 동기화 심볼로 삽입한다. PN sequence의 값을 미리 설정해둔 변조 차수에 따라 변조하여 동기화 심볼의 배열을 구성한다. DCO-OFDM 기반의 VLC 시스템의 첫 번째 FFT 서브캐리어 값은 DC 성분으로 사용되기 때문에 빈 배열을 앞에 추가한다. 동기화 심볼의 배열을 뒤집은 값을 추가하고 IFFT를 통하여 시간 영역으로 변환하고 CP를 붙여 최종적으로 동기화 심볼을 완성한다.

그림 11는 수신단에서 동기화 심볼을 이용하여 시간 동기화를 하는 과정이다. 송신단으로부터 신호를 받게 되면 동기화 심볼을 통해 프레임의 시작점을 찾

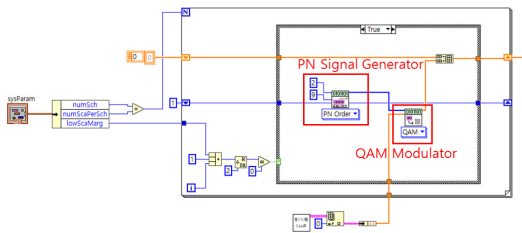


그림 10. Sync_symbol.vi
Fig. 10. Sync_symbol.vi

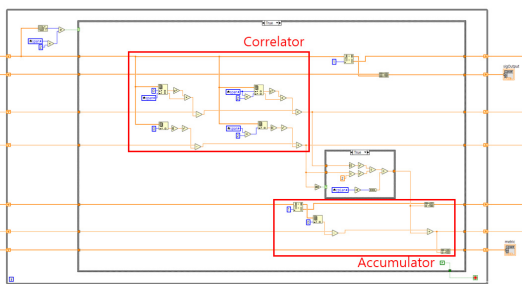


그림 11. Sync_Symbol_Metric.vi
Fig. 11. Sync_Symbol_Metric.vi

아 프레임 단위로 분리하게 된다. ADC로부터 수신된 신호를 불러와 송신단에서 설정한 프레임의 2배 이상의 신호를 받게 되면, 동기화 심볼을 이용하여 타이밍 매트릭의 값을 추출하여 프레임의 시작점을 찾는다. 동기화 심볼에 들어있는 샘플 절반의 개수 L 개라고 가정했을 때 타이밍 매트릭인 $P(d)$ 값은 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$P(d+1) = P(d) + (r_{d+L}^* r_{d+2L}) - (r_d^* r_{d+L}) \quad (1)$$

d 는 신호의 시간 영역에서 일정 위치의 인덱스를 의미하며, r 은 수신 신호를 의미한다. 이 과정으로부터 출력되는 신호는 프레임 길이만큼의 타이밍 매트릭 $P(d)$ 값이다. 정점 탐지기(peak detector)를 이용하여 $P(d)$ 신호의 정점을 찾아내어 프레임의 시작점을 찾는다.

마지막으로 무선 채널에서 주파수에 의한 채널 딜레이로 인해 신호가 왜곡되는 현상을 방지하는 방법을 설명한다. 파일럿 심볼을 이용하여 채널 추정을 하게 되면 수신단에서 본래의 신호에 가깝게 수신된 신호를 보정할 수 있다. 채널 추정에 쓰일 데이터는 정점 탐지기를 통해 프레임의 시작점이 확인된 상태로 들어오게 된다. 본 테스트베드에서는 MMSE를 통하여 채널 추정을 구현한다.

신호를 전달하는 채널에 대한 주파수에 의한 딜레이를 h 라고 했을 때, h 는 시간에 따라 계속 변하지만 잡음에 비해 상대적으로 천천히 변한다. 그러나 이러한 변화를 예측할 수 없기 때문에 파일럿 심볼을 주기적으로 전송하여 각 서브 채널에 대하여 h 를 지속적으로 확인한다. 파일럿 심볼에 대하여 수신한 신호를 식으로 표현하면, $Y_p(k) = X_p(k)H(k) + N$ 으로 표현 가능하며, N 은 잡음을 의미한다. 잡음의 영향을 무시했을 때는 $H(k) = Y_p(k)/X_p(k)$ 를 통하여 구할 수 있다. 같은 서브 채널에서 전송된 데이터 심볼들은 $Y_d(k) = X_d(k)H(k) + N$ 으로 나타낼 수 있다. 파일럿 심볼을 이용하여 구한 $H(k)$ 를 이용하여 추정된 $\hat{X}_d(k)$ 는 $\hat{X}_d = \frac{Y_d}{H} + \frac{N}{H}$ 를 이용하여 얻을 수 있다.

$H(k)$ 를 구하기 위한 채널 추정을 위하여 Least square(LS)를 이용한 채널 추정 기법과 Minimum Mean Square Error(MMSE)를 이용한 채널 추정 기법을 이용할 수 있다. 수신된 파일럿 심볼은

$Y_p(k) = X_p(k)H(k) + N$ 로 나타낼 수 있으며, X 는 앞서 언급한 송신단과 수신단 모두 알고 있는 값이며 $h(k)$ 는 시변하는 채널 특성을 의미하는 주파수에 의한 딜레이다. W 는 잡음을 의미한다. 위의 식을 전체 서브 채널에 해당하는 벡터로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다³⁾.

$$Y = XFh + W \quad (2)$$

이때, 각각의 벡터는 다음을 의미한다.

$$X = \text{diag}\{X(0), X(1), \dots, X(N-1)\} \quad (3)$$

$$Y = [Y(0), Y(1), \dots, Y(N-1)]^T \quad (4)$$

$$W = [W(0), W(1), \dots, W(N-1)]^T \quad (5)$$

F 는 DFT를 벡터로써 표현한 것이다. 이 벡터들을 이용하여, MMSE를 기반으로 채널 추정을 하게 되면 다음과 같은 벡터를 구할 수 있다.

$$H_{MMSE} = FR_{hY}R_{YY}^{-1}Y \quad (6)$$

$$R_{hY} = E\{hY\} = R_{hh}F^H X^H \quad (7)$$

$$R_{YY} = E\{YY\} = XFR_{hh}F^H X^H + \sigma^2 I_N \quad (8)$$

R_{hh} 는 auto-covariance 행렬을 의미하고, σ^2 는 $E\{|W(k)|^2\}$ 를 의미한다. 또한, LS를 이용하여 H_{LS} 를 구할 수 있는데 $(Y - XFh)^H(Y - XFh)$ 의 값을 최소화하는 $H_{LS} = X^{-1}Y$ 를 계산함으로써 구할 수 있다. 파일럿 심볼을 이용한 채널 추정 방법이란 $H(k)$ 를 구하여 채널의 페이딩과 잡음에 따른 왜곡된 신호를 복구하여 각각의 서브 채널의 심볼들의 $H_e(k)$ 를 원래의 신호로 교정하여 시스템의 오류율을 줄이는 것을 말한다.

수신단에서의 채널 추정은 동기화된 하나의 프레임을 FFT를 통해 주파수 영역으로 변환한 후 곱해져 있는 PN sequence를 나눈 뒤 FFT 서브캐리어로 변환된 파일럿 심볼에 대해 H_{MMSE} 를 이용하여 주파수 응답을 구하고, 이렇게 얻은 $H_{e(k)}$ 로 $X(k) = \frac{Y(k)}{H_{e(k)}}$ 를 구하여 왜곡 받지 않은 신호로 복원하는 것이다.

그림 12는 채널 추정으로 얻은 $H_{e(k)}$ 의 값이 복조 블록으로 전달되어 FFT를 통하여 주파수 도메인으로 변환된 값에 대하여 $H_{e(k)}$ 로 나누어 원래의 신호로 보정하는 과정을 나타낸다.

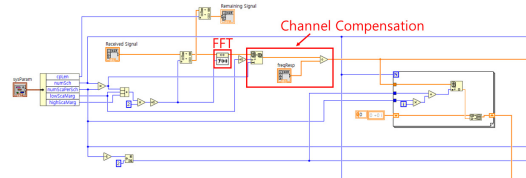


그림 12. Slot_demod.vi
Fig. 12. Slot_demod.vi

IV. 실험 결과

본 실험에서는 그림 13과 같이 구성된 테스트베드를 통해 VLC 시스템의 채널 특성을 살펴보고 앞서 LabVIEW에서 제작한 프레임 전송하는 것으로 실제 성능을 측정하여 VLC 시스템의 가능성을 확인한다.

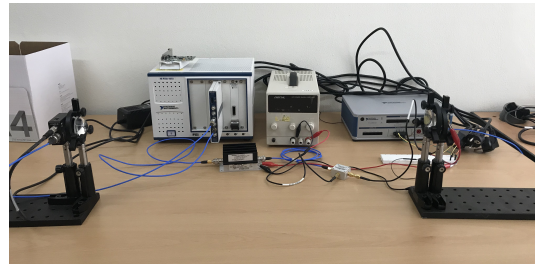


그림 13. 테스트베드 하드웨어 배치
Fig. 13. Testbed hardware arrangement

4.1 VLC 채널 측정

본 테스트에서는 구현된 테스트베드의 송신단에서 아무런 정보를 실지 않는 단순한 사인파를 전송하였다. 사인파의 주파수와 송신단과 수신단의 거리를 변경해가며 VLC 시스템의 채널 특성에 대해 알아본다.

FFT 서브캐리어에 하나의 주파수 성분에만 값을 넣고 다른 모든 주파수 성분들에는 0을 넣어 각각의 주파수 성분에 따른 특성과 송신단과 수신단의 거리를 늘려가며 사인파를 정확히 수신하였는지를 확인한다. 또한, 소프트웨어로 일정 시간에 따라 주파수를 변화시켜가며 결과를 확인하였다. 거리는 10 cm씩 늘어가며 테스트를 진행하였으며, 송신단과 수신단의 거리가 90 cm 이상일 때 수신이 제대로 되지 않는 경우도 확인하였다.

그림 14는 거리와 주파수에 따른 수신 신호에 대한 결과이다. FFT의 크기는 4000으로 설정하였으며 FFT 서브캐리어 간의 주파수 차는 125 MHz의 샘플링 클럭을 사용했을 경우 31.25 kHz 이다. 예를 들어, 4번째 FFT 서브캐리어는 125 kHz의 주파수를 가진다.

주파수가 높아질수록(높은 주파수의 서브캐리어를 사용) 수신단에서 수신하는 전력의 크기가 낮아진다. 즉, 송신단에서 높은 서브캐리어의 주파수에는 전력이득을 낮은 주파수보다 높게 설정하여 수신단에서 올바르게 데이터를 수신하여 효율적인 시스템을 갖출 수 있도록 해야 한다. 단일 사인 파형을 이용하여 VLC 채널 특성을 확인해 본 결과, 10 MHz 이상에서의 주파수에서는 2 MHz의 사인 파형을 전송할 때와 비교하여 20%의 효율밖에 내지 못하는 것을 확인할 수 있다. 10 MHz 이상에서의 주파수에서는 전송하는 전력에 대한 효율성이 급감하여 효율적인 통신을 이루어 낼 수 없다.

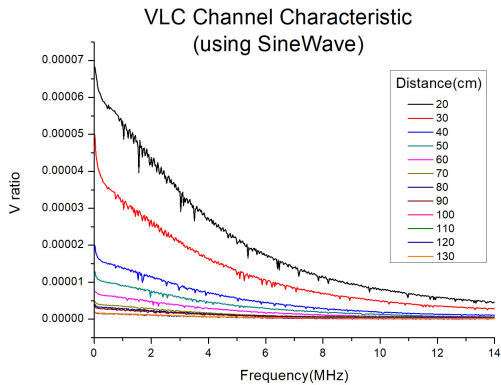


그림 14. 주파수 및 거리에 따른 수신 신호의 세기
Fig. 14. Received signal strength by frequency and distance

4.2 프레임 탐지 성능 시험

본 실험에서는 실제로 프레임을 전송하여 수신단에서 프레임을 찾아낼 수 있는지에 대해 확인해 보았다. 모든 서브 채널의 변조 차수를 2(QPSK)로 설정하였다. 채널에 대한 설정은 16개의 서브 채널과 16개의 서브캐리어를 이용하였다. 그림 15는 송신단에서 전송하는 신호의 파형으로 LED를 통하여 빛으로 변환되는 신호를 의미한다.

수신단에서는 PD를 통하여 빛의 세기를 감지한 뒤, ADC를 통하여 그림 16과 같이 디지털 신호로 변환한다.

수신된 신호에서 그림 17과 같이 타이밍 메트릭의 값을 통하여 프레임의 시작점을 확인할 수 있었다.

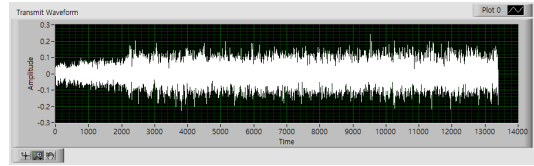


그림 15. 전송 신호
Fig. 15. Transmit waveform

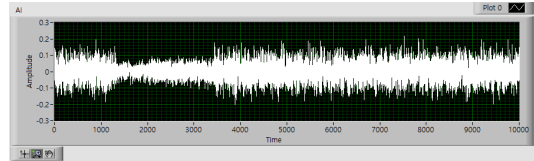


그림 16. 수신 신호
Fig. 16. Received signal

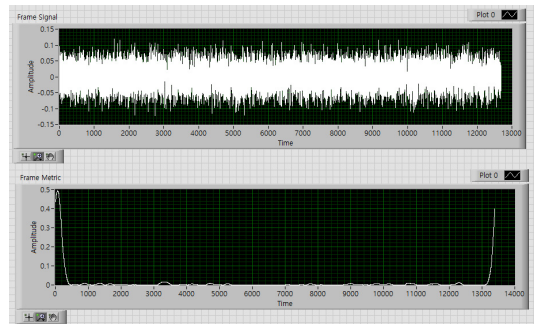


그림 17. 프레임 신호 및 프레임 메트릭
Fig. 17. Frame Signal and Frame Metric

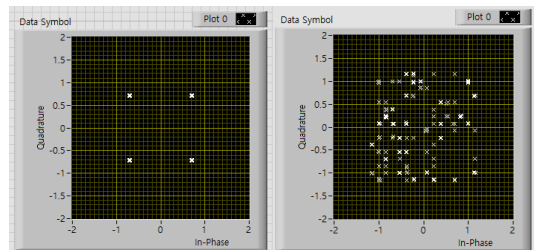


그림 18. QPSK 성상도
Fig. 18. Constellation map of QPSK

그림 18의 왼쪽 그림은 위 실험을 통한 데이터 심볼들에 대한 성상도(constellation map)을 나타낸 것이다. 만약, 데이터가 올바르게 보정되지 않았다면 오른쪽 그림과 같이 정확하지 않은 성상도를 얻게 된다. 차수를 4, 8로 올리게 되면 그림 19과 같은 성상도를 얻을 수 있다.

4.3 전력 이득과 거리에 따른 비트 오류율

DCO-OFDM 기반의 VLC 테스트베드에서 앞서

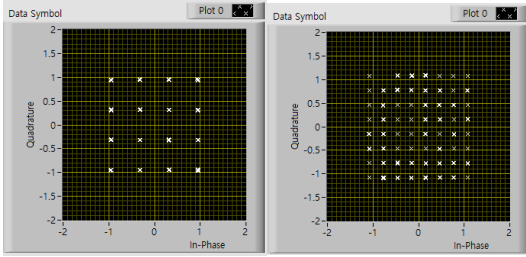


그림 19. 16QAM, 64QAM 성상도
Fig. 19. Constellation map of 16QAM, 64QAM

제한한 프레임을 이용하여 테스트베드의 성능을 평가하고, 데이터 전송률에 대해 살펴본다.

송신단과 수신단의 거리에 따른 각 서브 채널의 비트 오류율을 측정하기 위하여 송신단의 발광부와 수신단의 수광부를 일직선으로 유지한 후 송신단과 수신단의 거리를 조절한다. 그림 20, 21, 22, 23에서 보이는 4개의 성상도는 각각 좌측 상단부터 20cm, 40cm, 60cm, 80cm 거리에서 측정한 성상도를 나타낸다.

거리가 멀어질수록 흐릿해지는 성상도를 확인할 수 있다. 이는 수신단에서 비트 오류율이 거리에 따라 증가한다는 것을 의미한다.

16QAM과 64QAM의 경우 20cm에서 40cm까지의 비트 오류율은 0에 가까운 결과를 나타냈지만 그 이상의 거리에서는 급격하게 증가하여 90cm 이상의 거리에서는 높은 비트 오류율로 프레임을 인식하지 못

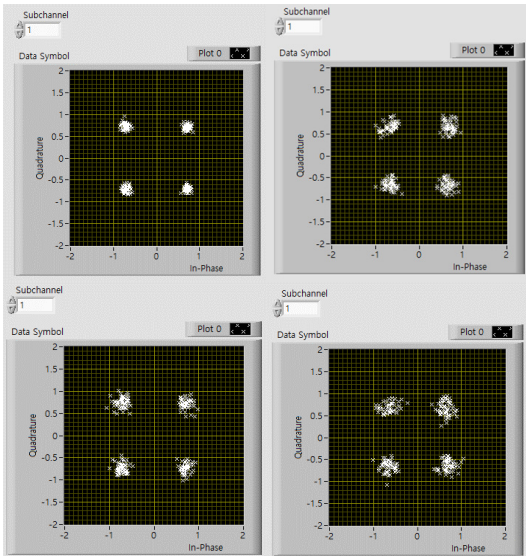


그림 20. 거리에 따른 QPSK 성상도
Fig. 20. Constellation map of QPSK according to the distance

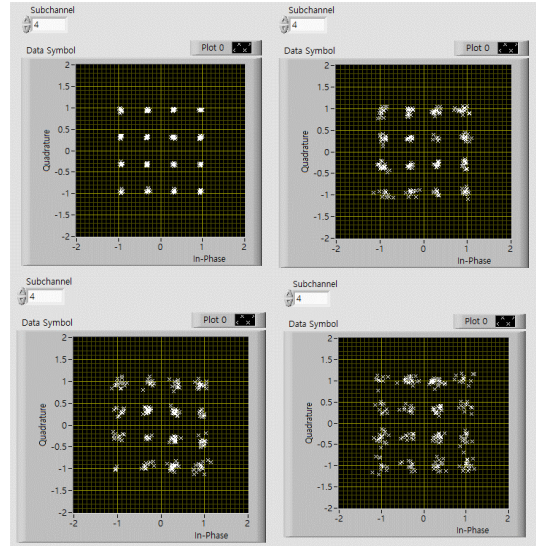


그림 21. 거리에 따른 16QAM 성상도
Fig. 21. Constellation map of 16QAM according to the distance

할 때도 있었다.

256QAM의 경우 다른 변조 차수의 constellation map 보다 확연히 흐려보이며, 20cm에서도 비트 오류율로 인한 심볼간 간섭이 심하게 일어났다.

그림 24, 25, 26은 거리와 전력 이득에 따른 비트 오류율의 변화를 측정한 것이다. 위의 성상도를 그래프로 분석하여 변조 차수와 거리 그리고 전력 이득이

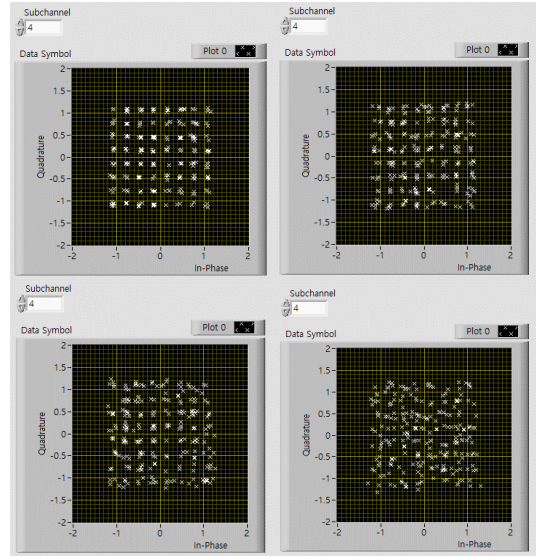


그림 22. 거리에 따른 64QAM 성상도
Fig. 22. Constellation map of 64QAM according to the distance

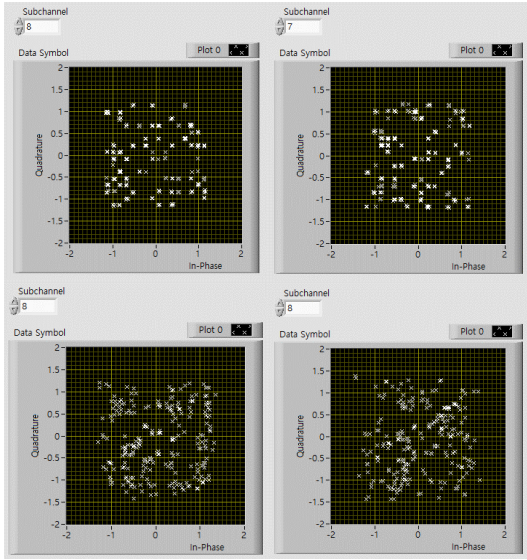


그림 23. 256QAM 성상도
Fig. 23. Constellation map of 256QAM according to the distance

비트 오류율에 미치는 영향을 살펴보았다. 본 실험을 통하여 거리가 가까울수록 낮은 비트 오류율을 얻을 수 있으며, 같은 송신단과 수신단의 거리라도 전력 이득이 높을수록 더 낮은 비트 오류율을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 하지만 높은 전력 이득으로 정보를 전송하는 것은 무선 통신에서 전력 낭비로 이어질 수 있다. 따라서 효율적인 VLC 통신을 위해선 채널 상황에 따라 가장 효율적인 변조 차수와 전력 이득을 선택하여야 한다.

16 QAM

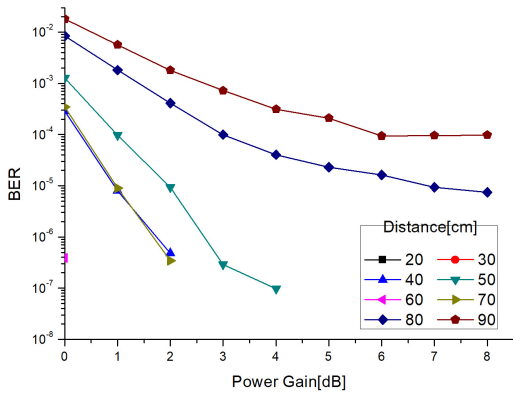


그림 24. 16QAM 비트 오류율
Fig. 24. BER of 16QAM

64 QAM

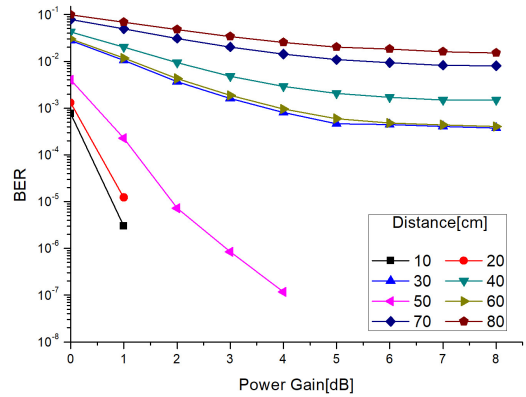


그림 25. 64QAM 비트 오류율
Fig. 25. BER of 64QAM

256 QAM

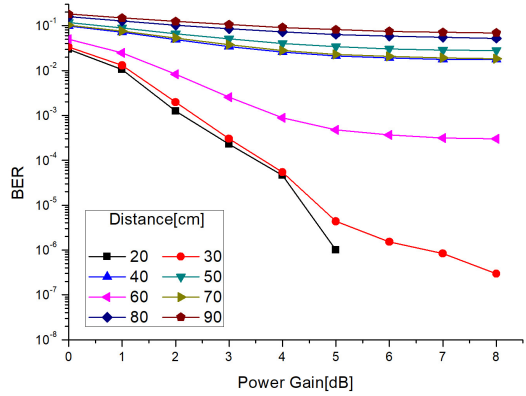


그림 26. 256QAM 비트 오류율
Fig. 26. BER of 256QAM

V. 결론

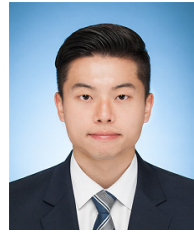
DCO-OFDM 기반의 VLC 시스템은 기존의 VLC 시스템보다 비트 오류율이나 PAPR을 크게 낮출 수 있는 기술이다. 본 논문에서는 VLC 시스템의 테스트베드를 구현하여 이의 특성과 실제 성능을 확인하였다. 테스트베드는 VLC 채널 특성을 기반으로 하여 변조 차수 및 전력 이득을 조절할 수 있도록 구현하였다. 또한 OFDM 프레임에 동기화 심볼과 파일럿 심볼을 삽입하여 시간 동기화 및 채널 추정 기능을 구현함으로써 실시간으로 통신 시스템 구동이 가능하도록 하였다. 특히, 이번 논문에서는 기존 VLC 시스템 구현 연구에서 주로 다루지 않던 프로토콜 부분을 중점으로 구현하여, 다른 상위 계층 기술과의 융합에도 큰

도움을 줄 것이다. 추후에는 본 논문의 테스트베드를 확장하여 하이브리드 RF-VLC의 테스트베드를 구축할 예정이다.

References

- [1] J. Armstrong, "OFDM for optical communications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 189-204, Feb. 2009.
- [2] T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 12, pp. 1613-1621, Dec. 1997.
- [3] S. Coleri, M. Ergen, and A. Puri, "Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems," *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 48, no. 3, pp. 223-229, Sep. 2002.
- [4] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra, "Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2047-2077, Sep. 2015.
- [5] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," *IEEE Trans. Consumer Electron.*, vol. 50, no. 1, pp. 100-107, Feb. 2004.
- [6] A. A. Abdulkafi, M. Y. Alias, and Y. S. Hussein, "Performance analysis of DCO-OFDM in VLC system," *2015 IEEE 12th MICC*, pp. 163-168, Kuching, Malaysia, Nov. 2015.
- [7] R. Jiang, Q. Wang, F. Wang, L. Dai, and Z. Wang, "An optimal scaling scheme for DCO-OFDM based visible light communications," *Optics Commun.*, vol. 356, pp. 136-140, Dec. 2015.
- [8] M. Z. Afgani, H. Haas, H. Elgala, and D. Knipp, "Visible light communication using OFDM," *2nd Int. Conf. TRIDENTCOM 2006*, pp. 129-134, Barcelona, Spain, Mar. 2006.

강 동 수 (Dong Soo Kang)



2018년 2월 : 가천대학교 전자공학과 졸업
 2018년 3월~현재 : 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과 석사과정
 <관심분야> Ultra-Dense Networks, MU-MIMO

[ORCID:0000-0003-3157-4966]

이 송 (Song Lee)



20016년 9월 : 서울과학기술대학교 컴퓨터공학과 학사 졸업
 2019년 2월 : 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과 석사 졸업
 <관심분야> 무선통신, VLC
 [ORCID:0000-0002-7173-5069]

김 지 수 (Ji Su Kim)



20019년 2월 : 성균관대 컴퓨터공학과 학사 졸업
 2019년 3월~현재 : 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과 석사과정
 <관심분야> 무선통신, 머신러닝

[ORCID:0000-0002-0182-6125]

최 계 원 (Kae Won Choi)



2007년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
 2010년 9월~2016년 8월 : 서울과학기술대학교 컴퓨터공학과 조교수
 2016년 9월~현재 : 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과 부교수

<관심분야> 무선통신, 무선전력전송

[ORCID:0000-0002-3680-1403]