

실시간 비디오 스트리밍을 위한 다중 모드 FSO 통신 플랫폼 개발

장시영, 윤창석, 안현석, 김영한

hygn@keti.re.kr, csyoon@keti.re.kr, hsahn@keti.re.kr, ekmyph@keti.re.kr

Development of Multi-Mode FSO Communication Platform for Real-time Video Streaming

Si-Young Chang, Chanseok Yoon, Hyun-Seok Ahn, Young-Han Kim
Korea Electronics Technology Institute

요약

최근 기술의 발전으로 레이저 광을 활용해 초고속 통신을 수행하는 FSO 통신 기술의 시장에 활발히 도입되고 있다. FSO 통신 기술은 기존의 RF 통신에 비해 전송 통신 채널 간 간섭이 적어 개별 채널마다 넓은 대역폭의 통신이 가능하다. 최근에는 FSO 통신 시스템 요구 대역폭의 증가로 개별 전송 채널의 성능을 끌어올리기 위하여 RF 통신과 같이 다중 레벨을 가지는 FSO 통신 시스템 구축의 요구가 높아지고 있다. 하지만 FSO 통신 시스템은 기존 RF 통신 시스템과 달리 전기 신호와 광 신호 간 상호 변환 작업이 요구되며 On/Off keying 방식의 변조 방식이 주류였기 때문에 이를 위한 다중 레벨을 갖는 시스템에 대한 적용 사례가 적었다. 본 논문에서는 기존 RF 통신 시스템 테스트를 위하여 사용되는 SDR 플랫폼을 이용하여 FSO 통신 시스템을 구축하고 고속 영상 데이터 전송을 위한 다중 변조 모드를 가지는 FSO 통신 스트리밍을 수행할 수 있는 테스트 플랫폼을 개발하였다. 이를 통하여 사용자는 다양한 모드의 FSO 통신을 실제 동작 환경에서 효과적으로 성능을 검증할 수 있다.

I. 서 론

자유공간 광통신 (Free space optical communication)는 Line-of-Sight (LOS)가 확보될 수 있는 광대역, 저지연, 높은 보안이 요구되는 분야에서 효과적으로 사용될 수 있다. 국방 안보 분야의 무인기와 지상 통제소 간 전술 영상 링크, 위성, 우주 분야에서 실시간 지구 관측 및 광대역 데이터 링크, 그리고 산업 시설의 안전 감시 및 원격 전송 등에 다양한 분야에 사용이 가능하다.

기존의 FSO 통신은 전류 크기 변화에 따른 광 신호의 세기 변화를 통하여 통신을 수행하게 된다. 이 방식은 Intensity Modulation/Direct Detection(IM/DD) 방식이라 한다. 송신 시에는 레이저 다이오드, 수신 시에는 포토 다이오드를 사용하여 광 신호와 전기 신호 간 상호 변환 작업이 이루어진다.

이 방식을 사용하는 변조 방식은 On/Off Keying (OOK)/Pulse Amplitude Modulation (PAM) 통신의 경우 FSO 통신에서 가장 널리 사용되는 변복조 방식으로 디지털 데이터를 비트 단위로 분리하고 이를 정해진 진폭에 매핑하여 이를 기준으로 통신을 수행한다.

기존의 IM/DD 방식이 아닌 I/Q 혹은 진폭과 위상을 변조에 활용하는 Coherent 방식의 변복조 방식이 제안되었다. [1] 이 방식의 경우 RF 시스템의 변복조 방식과 유사하며 진폭 외의 신호를 활용하여 높은 스펙트럼 효율을 달성할 수 있을 뿐 아니라 채널 왜곡을 수학적으로 역 보상할 수 있는 기능을 갖는다.

PSK 변조의 경우 신호의 위상을 통하여 Modulation 수행한다. PSK의 경우 모든 신호들이 동일한 파워를

갖기 때문에 전송 신호의 크기가 일정하게 유지되는 장점이 있다.

또한 Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) 방식의 경우 데이터를 다중의 Sub-Carrier로 나누어 전달하며 이는 전송 채널 간 발생할 수 있는 주파수 선택적 변화에 효과적으로 활용될 수 있다.

본 논문에서는 IM/DD 기반의 하드웨어 구성에서 위의 변복조 기술을 활용하여 데이터를 송수신할 수 있도록 USRP 와 GNURADIO 를 이용하여 사용성을 높인 핵심 플랫폼을 구성하였다. 또한 실시간 영상 스트리밍이 가능하도록 시스템을 구성하였다.

II. FSO 통신 테스트베드 하드웨어 구성

본 FSO 통신 테스트베드는 영상 신호의 소스 코딩/디코딩 및 신호 파형 생성 및 분석을 수행하는 호스트 컴퓨터와 신호의 전송 및 수집을 수행하는 USRP 디바이스와 전송된 신호를 광전 변환을 수행하는 광 프론트엔드 단으로 나눌 수 있다. USRP 장치는 X310 베이스 보드와 Basic TX/RX 확장 모듈로 이루어지는데 확장 모듈은 아날로그 신호를 ADC/DAC 에 활용하기 적합하도록 변형한다. 베이스 보드는 신호 변환을 직접적으로 수행하여 800MSps DAC 4 채널, 200MSps ADC 4 채널이며 확장 모듈은 1-250MHz 대역 필터링 작업을 수행한다.

광 프론트엔드 단의 송신단에서 USRP에서 생성된 신호는 레이저 드라이버의 내장된 바이어스 티를 통해 DC 바이어스 전류 (55 mA)와 결합하고 레이저 다이오드로 전달되어 변조된 광 신호로 변환한다. 15 mW 출력(85 mA 기준)으로 450 nm 파장의 레이저를

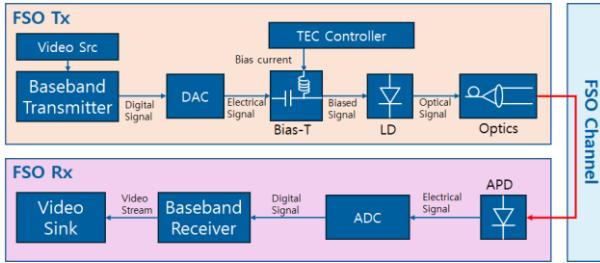


그림 1. 다중 모드 자유공간 무선 광통신 테스트베드

방출하며, 콜리메이팅 렌즈를 통해 빔 확산을 최소화하여 무선으로 전송된다.

수신단에서는 Avalanche Photodiode (APD)를 사용하여 수신된 광 신호를 전기 신호로 변환한다. APD는 1000 MHz의 대역폭을 지원하는 제품을 적용하여 전송신호의 대역폭을 충분히 수용할 수 있도록 하였다. APD 출력 신호는 50 Ω의 임피던스 매칭을 통해 왜곡 없이 전송되며, 출력 전압은 1 Vpp의 전압을 유지한다. APD를 통해 수신된 신호는 USRP X310 베이스보드와 Basic Rx 인터페이스 보드를 연결한 장치를 통하여 디지털 신호로 변환된 후 호스트 PC로 전송된다.

III. FSO 플랫폼 소프트웨어 구성

송신단의 소프트웨어는 우선 호스트 PC에서 영상 소스 데이터 처리를 진행 후 패킷 생성 및 신호 파형 생성 작업을 수행한 후 광신호로의 변환을 진행한다. 입력 비디오 데이터는 FFMPEG 인코더를 사용하여 HEVC(High Efficiency Video Coding) 코덱을 기반으로 압축한다. HEVC 코덱은 4k 3840(H) x 2160(V) 30 FPS의 비디오 품질을 유지하면서 전송 데이터 양을 최소화하여 대역폭에 맞는 효율적인 데이터 전송을 가능하게 한다. 압축된 비디오 데이터는 UDP 프로토콜을 통하여 내부 소켓으로 전달된다. 전달된 소스 데이터는 스크램블링, FEC 및 인터리빙을 통하여 변환되고 이를 다중 모드 변조기로 전달된다. 이를 OFDM, MPSK, OOK/PAM 동작을 수행하며 이를 기반으로 신호 파형을 생성하여 최종적으로 USRP 장치로 전달되어 광 신호로 변환되어 수신단으로 전달된다.

수신된 신호는 송신단에서 추가된 DC 오프셋이 포함되어 있는데 이를 위해 수신된 신호의 평균값을 계산하여 DC 성분을 추출하고, 이를 전체 신호에서

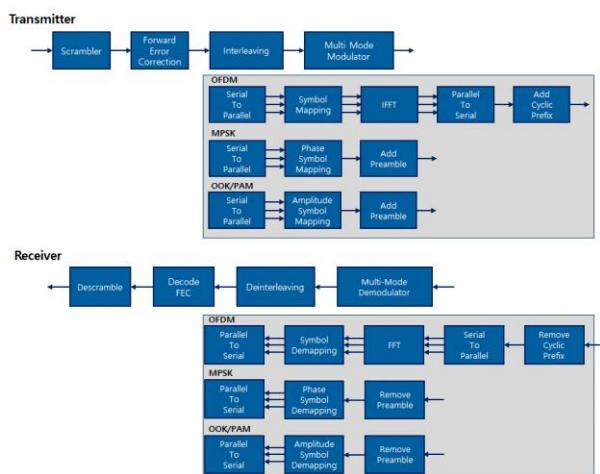


그림 2. 다중 모드 FSO 동작 소프트웨어

제거하여 순수한 변조 신호를 복원한다. 이후 동기화 과정을 거친 신호는 다중 복조기로 전달된다. 다중 복조기로 전달된 신호들은 다중 캐리어 OFDM의 경우는 FFT를 통하여 원심볼 신호를 복원하며, MPSK, OOK/PAM의 경우에는 추출된 심볼마다 디매핑 작업을 통하여 데이터 스트림을 뽑아낸다. 디인터리빙을 진행 후 Reed Solomon 및 Convolutional Code를 결합한 FEC 알고리즘을 통하여 Convolutional Code 디코딩과 Reed Solomon 디코딩 단계를 순차적으로 거쳐 전송 중 발생한 오류를 보정한다. FEC 알고리즘을 통해 보정을 거친 데이터는 HEVC 코덱을 통해 4K 30FPS 영상 데이터로 변환된다.

송수신 시스템 및 구동중인 송수신단 시스템의 PC 화면은 그림 2, 3 그리고 4과 같이 구성되어 있다. 수신기의 화면은 수신기 상태, EVM, Data Rate 정보와, Time Domain 신호, 신호의 스펙트럼, 등화 이전 신호의 Constellation Diagram, 그리고 등화 및 파일럿 신호 제거과정 이후 Constellation Diagram을 표시한다. 송신기의 화면은 송신 신호의 스펙트럼, 송신 신호의 성상도, Time Domain 송신 신호를 표시한다.

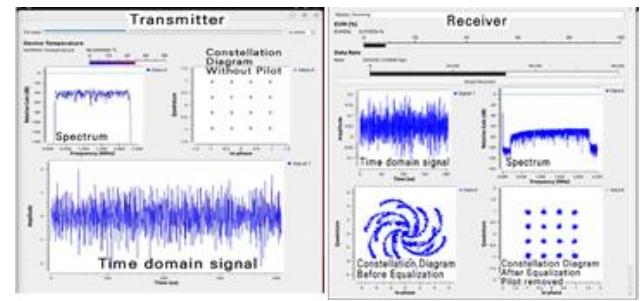


그림 3. 다중 모드 자유공간 무선 광통신 동작 GUI

IV. 결론

본 논문에서는 RF 통신 시스템 구축에서 활용되는 USRP 장치를 활용하여 IM/DD 기반의 FSO 통신 플랫폼과 이를 이용한 비디오 전송 시스템을 구성하였다. 이를 기반으로 사용자는 실제 동작 환경에서 효과적으로 성능을 검증할 수 있을 뿐 아니라 이를 실시간 비디오 전송 시스템에 적용하였을 시에 실제 동작을 확인하여 동작의 실효성을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025/2026년도 한국전자기술연구원의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 401C5941, 미래 전파 기반 Over-the-Air 전파빔 무선충전기술)

참고 문헌

- [1] K. Kikuchi, "Fundamentals of Coherent Optical Fiber Communications," in Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 1, pp. 157-179, 1 Jan. 1, 2016, doi: 10.1109/JLT.2015.2463719.