

파장 분할 다중화 기반 500 m 야외 무선 광통신 성능 실험 연구

오태인, 고영채
고려대학교

<logan10, koyc>@korea.ac.kr

Experimental Study on the Performance of a 500 m Outdoor WDM-Based Free-Space Optical Communication Link

Tae-in Oh, Young-chai Ko

Korea Univ.

요약

본 논문은 500 m 야외 무선 광통신 테스트베드를 구축하고 파장 분할 다중화(WDM) 기술을 적용하여 통신 성능을 실험적으로 검증하였다. 두 개의 파장을 동시에 전송하는 환경에서 비트 에러율, 아이 다이어그램, 수신 전력을 측정하고, 송신 전력 증가에 따라 신호 품질이 개선되고 각 파장에서 10 Gbps 전송 속도를 안정적으로 달성하여 총 20Gbps의 전송 속도를 가지는 테스트베드를 구축하는데 성공하였다. 그리고 이 데이터를 토대로 다중 입출력 기술(MIMO)을 적용시 BER이 어떻게 달라지는지 시뮬레이션 하였다.

I. 서론

무선 광통신 (Free Space Optics, FSO)란 유선 광통신과 달리 광 섬유를 사용하지 않고 자유 공간 (free space)를 통해 통신하는 기술이다. 무선 광통신은 비면허 대역의 레이저를 사용하기 때문에 RF 통신에 비해 넓은 대역폭과 높은 채널 용량을 지니고 있으며 낮은 전력 소모, 작은 크기의 안테나 등의 장점이 있다[1].

무선 광통신 시스템에서는 레이저를 이용하는 특성 때문에 여러 파장의 신호를 한 렌즈를 통해 송수신하는 것이 가능하다. 이를 파장 분할 다중화방식(WDM, Wavelength Division Multiplexing) 기술이라고 한다. 또한 다중 입력 다중 출력 (multiple-input and multiple-output, MIMO)을 적용할 경우 여러 렌즈를 통해 한 번에 여러 데이터를 전송하는 것이 가능하다.

본 논문에서는 고려대학교 신공학관에 500m 야외 무선 광통신 테스트베드에서 통신 속도 향상을 위해 WDM 기술을 적용한 뒤 비트 에러율(bit error rate, BER) 과 수신 전력을 측정해 통신 성능을 비교한다. 그 후, 측정 자료를 토대로 MIMO 를 적용했을 경우 BER 결과가 어떻게 달라지는지 시뮬레이션을 통해 확인한다.

II. 본론

1. 파장 분할 다중화 송수신기 설계

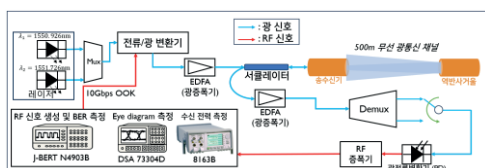


그림 1 WDM 기술을 이용한 무선 광통신 테스트베드

그림 1 은 본 논문의 무선 광통신 테스트베드를 블록 다이어그램으로 나타낸 그림이다. 본 논문에서는 2 개의 서로 다른 파장을 사용하는 WDM 무선 광통신 시스템을 구축하고, 그 성능을 분석하기

위해 구현 실험을 진행한다. 본 무선 광통신 시스템 구현을 위해 고려대학교 신공학관에 송수신기를 비롯한 장비들을 설치하였고, 500 m 의 통신 거리를 확보하기 위해 신공학관으로부터 약 250 m 떨어져 있는 환경실험관에 역반사거울 (Thorlabs PS976M-C)을 설치했다. 통신에 사용한 두 파장은 각각 $\lambda_1 = 1550.926 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1551.726 \text{ nm}$ 로 각 파장의 레이저는 MUX 를 통해 한 광 케이블로 합쳐서 Mach-Zehnder 모듈레이터 (E/O Converter)로 들어가 10Gbps 의 On-Off Keying (OOK) 신호로 변환된다. 이 신호는 광증폭기 (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)를 거친 뒤 서큘레이터를 통해 송신기 (Thorlabs C40APC-C)로 입력되어 대기중으로 송신된다. 송신된 신호는 역반사 거울에 도달한 뒤 다시 반사되어 수신기에 도착하고 서큘레이터를 통해 EDFA를 거쳐 Demux를 통해 각 파장별로 분리된다. 송수신기 사이 정밀한 빔 정렬을 위하여 근적외선 카메라 (Ozray PAs320F100 NCL)와 4 축 스테이지가 사용되었다. 분리된 신호는 광학 파워미터 (Keysight 8163B)를 활용해 수신 전력을 측정하였으며, 각각 광전류변환기 (Optilab PR-12-B-M)를 통해 RF 신호로 복원하여 비트 에러율 측정 장비 (bit error rate tester, BERT)를 통해 비트 에러율(bit error rate, BER)을 확인하거나 오실로스코프를 통해 아이 다이어그램을 확인한다.

2. 파장 분할 다중화 기반 무선광통신 실험 결과

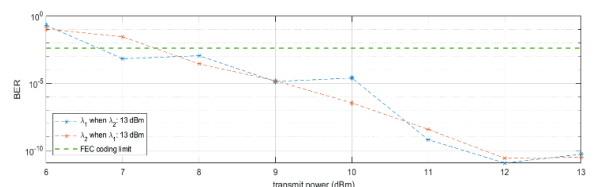


그림 2 송신 광 전력에 따른 BER

그림 2 는 송신 두 파장 중 한 파장의 세기를 13 dBm 으로 고정한 뒤, 다른 파장의 세기를 조절하면서 BER 을 측정한 결과와 전진 에러 수정 (FEC) 기법을 사용할 경우 부호화 가능한 요구치(3.8×10^{-3}) [2]이다. 본 테스트베드에서는 송신 광 전력인 8 dBm 이상일 경우 FEC 의

요구치를 만족하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 각 파장의 세기가 8 dBm 이상이라면 두 파장 모두 10 Gbps 급의 통신 속도를 보장하고 있다는 의미이므로 총 20 Gbps의 통신 속도를 달성했다고 할 수 있다.

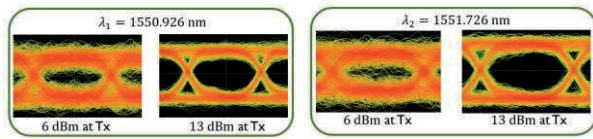


그림 3 송신 광 전력에 따른 아이 다이어그램

그림 3은 송신 광 전력에 따라 측정된 각 파장의 아이 다이어그램이다. 두 채널에 대해, 송신 전력이 6 dBm일 때는 아이 개구가 상대적으로 좁고 노이즈 성분이 두드러져 전송 품질이 저하됨을 확인할 수 있다. 반면 송신 전력을 13 dBm으로 증가시키면 두 파장 모두에서 아이 다이어그램의 개구가 넓어지고 파형의 왜곡이 감소하여 수신 신호의 품질이 향상됨을 확인할 수 있다. 이는 송신 전력의 증가가 신호 대 잡음비(SNR)를 개선하여 링크의 전송 성능을 향상시킴을 보여주며, WDM 기반 무선 광통신 시스템에서 파장에 관계없이 공통적으로 나타나는 특성임 확인할 수 있다.

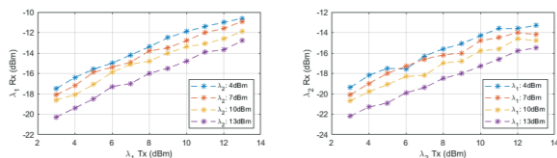


그림 4 송신 광 전력에 따른 수신 광 전력

그림 4는 두 파장의 송신 전력을 모두 변화시키면서 한 파장의 수신 전력을 측정된 그래프이다. 왼쪽 그래프는 λ_2 의 송신 전력이 4, 7, 10, 13 dBm일 때 λ_1 의 송신 전력 변화에 따른 λ_1 의 수신 전력을 보여주며 오른쪽 그래프는 그 반대에 해당한다. 두 그래프 모두 다른 파장에서 측정된 곡선의 기울기가 유사하게 나타나 WDM 전송 시 채널 간 간섭이나 파장에 의한 손실이 크지 않음을 알 수 있다. 다만, λ_i 의 송신 전력이 증가할 때 λ_j 의 수신 전력이 감소하는 것으로 보아 EDFA에서 증폭하는 과정에서 불균형이 발생한 것으로 보인다.

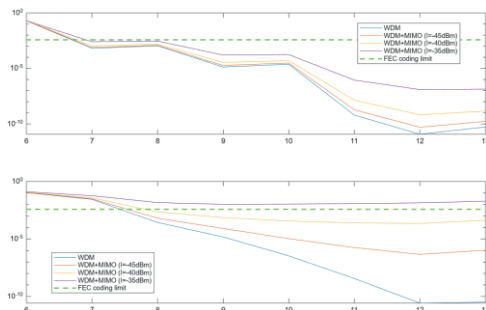


그림 5 MIMO 간섭에 따른 성능 변화

그림 5는 측정된 BER과 수신 광 전력 데이터를 토대로 하여 MIMO를 적용할 경우 발생할 수 있는 각 간섭에 따른 BER의 변화를 나타낸 그림이다. MIMO를 적용할 경우 서로 다른 렌즈에서

송·수신하는 신호가 간섭으로 발생할 수 있기 때문에 이 점을 고려하여 시뮬레이션을 진행한다. 그림 5의 위쪽 그래프는 λ_1 의 BER 그래프이며 아래쪽 그래프는 λ_2 의 BER 그래프이다. λ_2 의 경우 MIMO의 간섭이 -35 dBm일 경우 모든 영역에서 FEC coding limit을 만족하지 못하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 MIMO 간섭이 약 -40 dBm이라면 지금의 테스트베드를 복사해 두 번째 렌즈를 사용한다면 MIMO 기술을 적용해 40 Gbps의 통신 속도를 달성할 수 있을 것으로 보인다.

본 논문은 400m 거리의 야외 환경에서 20 Gbps 급의 무선 광통신이 구현 가능함을 실험적으로 입증하였다. 또한 WDM을 적용하였을 때 파장 간 간섭이 발생하지 않음을 확인하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 MIMO를 적용해 약 -40 dBm의 간섭이 발생할 경우 무리 없이 통신할 수 있을 것으로 보인다. 즉, 현재 사용한 장비와 동일한 장비가 한 세트 더 주어진다면, MIMO 기술과 WDM 기술을 활용해 40 Gbps 급의 테스트베드 또한 구현이 가능함을 알 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 500 m 야외 무선 광통신 테스트베드를 구축하고, WDM 기술을 적용하여 통신 성능을 실험적으로 분석하였다. 두 개의 파장을 동시에 전송하는 환경에서 BER, 아이 다이어그램, 그리고 수신 전력 변화를 측정된 결과, 송신 전력이 증가할수록 SNR이 개선되어 아이 다이어그램의 개구가 넓어지고 BER이 FEC 기준 이하로 감소함을 확인하였다. 이를 통해 두 파장 모두에서 10 Gbps 급 전송 속도를 안정적으로 달성할 수 있었으며, 시스템 전체적으로는 총 20 Gbps의 데이터 전송이 가능함을 입증하였다. 수신 전력 분석 결과 파장 간 간섭이나 파장 의존 손실은 크지 않았으며, EDFA 증폭 과정에서 일부 불균형이 발생함을 확인하였다. BER 결과와 수신 전력 결과를 활용해 현재 테스트베드에서 MIMO 기술을 적용할 경우 40 Gbps 이상의 통신 속도가 확보 가능함을 시뮬레이션으로 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021-0-00260, 저궤도 군집 소형 위성 간 통신 기술 개발)

참고 문헌

- [1] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 19, no. 1, pp. 57–96, 2016.
- [2] M. A. Esmail, A. Ragheb, H. Fathallah, and M.-S. Alouini, "Investigation and Demonstration of High Speed Full-Optical Hybrid FSO/Fiber Communication System Under Light Sand Storm Condition," *IEEE Photonics J.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–12, Feb. 2017