

저궤도 위성 간 레이저 통신을 위한 직접수신 광수신기 구조 연구

최혁규*, 김승호*, 황기민*, 한주희^o

A Study on the Direct Detection Optical Receiver for Optical Inter-Satellite Link Over LEO

Hyeokgyu Choi*, Seung-ho kim*, Kimin Hwang*, Joohee Han^o

요 약

저궤도 위성 네트워크를 통해 전세계에 통신 서비스를 제공하는 방안에 대한 관심이 높아지고 있다. 저궤도 위성 네트워크에서 노드 간 데이터를 주고받기 위해서는 레이저 통신 기술이 필요하다. 위성 간 레이저 통신 링크는 전송 거리가 매우 길어서 링크 연결을 위해 광수신기의 수신 감도가 중요하다. 본 논문에서는 저궤도 위성 간 레이저 통신 링크 구현에 적합한 광수신기 구조를 제안한다. 저궤도 위성 간 레이저 링크 시스템의 특성을 고려하여 링크 버짓을 계산하고 요구되는 수신감도를 도출한다. 도출된 수신감도 충족을 위한 avalanche photodiode (APD) 기반 광수신기와 광섬유 전치증폭기 기반 광수신기의 성능을 평가하고 최대 전송 거리 분석을 통해 저궤도 위성 간 링크에 적용 가능성을 확인한다.

Key Words : Free-space optical communication, Satellite communication, Optical receiver, APD, Optical pre-amplifier

ABSTRACT

There is a growing interest in providing telecommunication services to the world through an low earth orbit (LEO) satellite network. In order to exchange data between nodes in an LEO satellite network, laser communication technology is required. Since the inter-satellite laser communication link has a very long transmission distance, the reception sensitivity of the optical receiver is important for link connection. In this paper, we propose an optical receiver structure suitable for implementing LEO inter-satellite laser communication links. Considering the characteristics of the LEO inter-satellite laser link system, the link budget is calculated and the required reception sensitivity is derived. We evaluate the performance of an avalanche photodiode (APD) based optical receiver and an optically pre-amplified receiver to satisfy the derived reception sensitivity, and confirm their applicability to low-orbit inter-satellite links by analyzing the maximum transmission distance.

※ 이 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 수행된 연구임(915003102).

• First Author : Agency for Defense Development, chg@add.re.kr, 정회원

o Corresponding Author : Agency for Defense Development, jhwill@add.re.kr, 정회원

* Agency for Defense Development, seunggho_kim@add.re.kr; kiminida@add.re.kr, 정회원

논문번호 : 202209-231-A-RE, Received September 30, 2022; Revised November 29, 2022; Accepted December 6, 2022

I. 서 론

지구 관측 영상이나 각종 센서데이터, 위성 인터넷 서비스 등 위성을 활용한 고속 데이터 통신에 대한 수요가 급격히 증가하고 있다. 초고속 데이터 전송이 가능한 위성 간 레이저 통신 기술은 위성 통신망의 전송 용량을 획기적으로 증가시킬 수 있는 기술로 주목받으며 연구·개발이 활발히 진행되고 있다¹⁾. 유럽에서는 정지궤도와 저궤도 위성 간 데이터 전송 시스템인 European Data Relay System (EDRS)를 통해 1.8 Gb/s 레이저 통신 서비스를 제공하고 있다²⁾. 일본 우주항공연구개발기구에서는 정지궤도와 저궤도 위성 간 레이저 통신을 시험할 예정이다³⁾. 또한 저궤도 위성 간 레이저 통신을 위한 단말이 개발되어 시연을 앞두고 있으며⁴⁾ SpaceX와 OneWeb과 같은 회사들은 저궤도 위성군을 구성하여 글로벌 레이저 통신망 서비스를 제공할 계획이다⁵⁾. 이러한 위성 간 레이저 링크는 전송거리가 매우 길어서 링크 마진을 확보하는 것이 중요하다.

링크 마진은 수신기의 수신 감도에 영향을 받으므로 레이저 통신 단말 설계 시 수신 감도를 높이기 위한 수신기 설계가 고려되어야 한다. 레이저 통신을 위한 수신기 구조는 크게 코히어런트 수신 방식과 직접 수신 방식으로 나뉜다. 코히어런트 수신 방식은 수신단에서 신호를 로컬 오실레이터 (local oscillator, LO)와 믹싱한 후 검출하는 방식으로 신호의 위상과 진폭을 모두 수신함으로써 직접 수신 방식 대비 수신 감도가 우수하고 전송속도를 높일 수 있다. 이러한 이점으로 우주 공간에서 레이저 통신 링크의 시연은 주로 코히어런트 수신 방식을 이용하여 이루어졌으며 저궤도 위성 간 5.6 Gbps 통신이 시연된 바 있다⁶⁾. 그러나 코히어런트 수신 방식은 수신 레이저와 LO 레이저 간 정교한 위상 고정 루프와 광하이브리드가 요구됨에 따라 구현이 복잡하고 비용이 많이 드는 단점이 있다.

반면에 직접 수신 방식은 코히어런트 방식보다 수신감도는 다소 낮지만, 수신기 구현이 쉽고 비용이 저렴하다. 뉴스페이스 시대의 도래로 저궤도 위성군은 SpaceX와 OneWeb과 같이 민간의 주도로 이루어지고 있으며 수천 개 이상의 레이저 통신 단말을 운용하는 저궤도 위성망에서 가격경쟁력이 중요한 사안이 되고 있다. 또한 직접 수신 방식의 수신기는 저궤도 위성의 특성인 크기, 무게, 전력 소모(Size, Weight, and Power, SWaP)에 대한 요구사항을 충족시키기에 유리하다⁴⁾. 본 논문에서는 가격경쟁력이 뛰어난 직접 수신 광수신기 구조의 저궤도 위성 간 레이저 통신 링

크 적용 가능성을 분석한다. 이를 위해 저궤도 위성 간 레이저 통신의 링크 요구사항을 정의하고 이러한 요구사항을 충족시키기에 적합한 직접 수신 방식 수신기 구조에 대해 제안하며 시뮬레이션을 통해 성능을 검증한다.

II. 저궤도 위성 간 레이저 링크 시스템

레이저 통신 단말의 수신기 구조 설계를 위해 저궤도 위성 간 레이저 링크의 주요 요구사항을 설정하였다. 먼저 저궤도 위성 간 레이저 링크의 요구 전송거리를 설정하기 위해 OneWeb의 저궤도 위성군을 참고하였다. 그림 1은 OneWeb의 저궤도 군집위성의 배치로 극궤도의 형태이며 18개의 궤도면과 궤도면 당 40개의 위성으로 이루어져 있다. 이때 위성 간 레이저 링크는 동일 궤도면에 위치한 위성 간 링크와 서로 다른 궤도면에 위치한 위성 간 링크로 구분되며 각각의 최대 거리는 약 1,190 km와 1,450 km이다⁴⁾. 이를 바탕으로 최대 요구 전송거리를 2,000 km로 설정하였다. 레이저 링크의 전송속도는 미군 우주청 표준인 2.5 Gb/s로 설정하였다⁷⁾.

표 1은 위성 간 전송거리 2,000 km를 고려한 레이저 통신 링크의 버짓 계산 결과이다. 레이저 출력은 1 W, 발산각은 40 μ rad 이하이고 송수신을 위한 광학계의 안테나 구경은 100 mm로 가정하였다. 또한 레이저 통신 단말 간 시선 일치를 위한 Pointing, Acquisition, Tracking (PAT) 손실은 송신단과 수신단에서 각각 1.5 dB로 가정하였다. 렌즈와 빔결합분배기 등에 따른 광학 손실은 송수신 각 6 dB로 가정하였으며 추가적인 구형 손실 6 dB는 자유 공간의 레이저를 광섬유에 결합하기 위한 손실과 모뎀 구현 시 양자화 및 동기여 따른 손실을 고려하였다. 따라서 링크 버짓 분석 결과 광수신기에 인가되는 전력은 -42.9

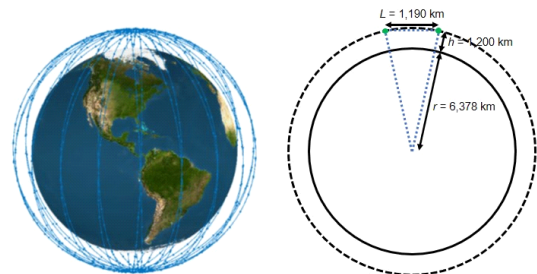


그림 1. OneWeb의 저궤도 군집 위성(좌) 동일 궤도면 내 위성 간 최대 거리(우)
Fig. 1. Satellite constellation of OneWeb (left) and the maximum OISL range of an intra orbital plane (right)

표 1. 위성 간 레이저 통신 링크 버짓
Table 1. Link budget for OISL

Item	Unit	Value
TX power	dBm	30.0
TX antenna gain	dB	106.1
TX optics loss	dB	-6.0
TX pointing loss	dB	-1.5
Space loss	dB	-264.2
RX antenna gain	dB	106.1
RX optics loss	dB	-6.0
RX tracking loss	dB	-1.5
Implementation loss	dB	-6.0
RX power	dBm	-42.9
Link margin	dB	3.0
Required receiver sensitivity	dBm	-45.9

dBm이었고 레이저 링크의 안정적인 유지를 위한 마진 3 dB를 고려하여 요구되는 수신감도는 -46 dBm임을 확인하였다. 이러한 링크 버짓 계산을 바탕으로 저궤도 위성 간 레이저 통신에 적합한 광송수신기 구조를 논의한다.

III. 광송수신기 구조

전송 거리가 긴 위성 간 레이저 통신 시스템에서 충분한 마진을 확보하기 위해서는 에너지 효율이 높은 변조 방식을 사용해야 한다. 에너지 효율이 높은 변조방식으로는 On-off keying (OOK), Pulse-position modulation (PPM), Binary phase shift keying (BPSK)과 같은 2진(binary) 변조방식이 대표적이다⁸⁾. 그 중에서도 OOK 변조방식은 송수신기 구조가 매우 간단하여 우주 광통신에 널리 사용되며 우주데이터시스템자문위원회(CCSDS)와 미군 우주청의 우주 광통신을 위한 표준 변조방식으로 정의되어 있다^{7,9)}.

그림 2는 본 논문에서 고려한 OOK 변조 방식을 사용하는 레이저 통신 광송수신기 구조 및 시물레이션 구성도이다. 시물레이션은 VPI Transmission Maker를 이용하였으며 레이저통신 단말 송신단을 모의하기 위해 continuous wave (CW) 레이저를 Mach-Zehnder 변조기로 변조하여 2.5-Gb/s OOK 신호를 생성하였다. 이때 데이터는 길이가 $2^{15}-1$ 인 Pseudo random binary sequence (PRBS)를 사용하였으며, 수신 감도 향상을 위해 Low-density

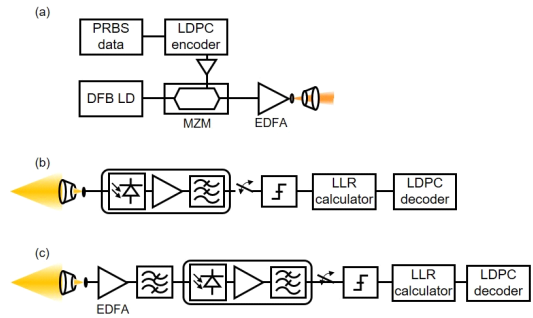


그림 2. 레이저 통신 광송수신기 구조 (a) 광송수신기 구조, (b) APD 기반의 광수신기 구조, (c) 광섬유 전치증폭기 기반의 수신기 구조간 레이저 통신 링크 버짓
Fig. 2. Configuration of the proposed optical transceiver for OISL. (a) OOK optical transmitter (b) APD based optical receiver (C) Optical pre-amplified receiver

parity-check (LDPC) 코드를 적용하였다. LDPC 코드는 DVB-S2 (Digital Video Broadcast - satellite) 표준을 적용하였고 프레임 길이는 64,800이며 코드율은 4/5, 2/3, 1/2이었다¹⁰⁾. 생성된 광신호를 광섬유 증폭기(Erbium-doped fiber amplifier, EDFA)를 이용하여 1 W 신호로 증폭하였다. 이 때, 광섬유 증폭기의 잡음 지수는 5 dB로 설정하였다. 증폭된 광신호는 자유 공간을 거쳐 상대 단말의 수신단에 입력되며 자유 공간에 의한 손실을 모의하기 위해 광감쇠기를 사용하였다.

그림 2(b)와 2(c)는 위성 간 레이저 통신을 위한 광수신기 구조로 저궤도 위성 간 레이저 통신 시스템의 가격경쟁력을 제고하기 위해 직접 수신 방식의 수신기를 고려하였다. OOK로 변조된 신호를 수신하기 위한 직접 수신 방식의 수신기 구조는 크게 PIN 다이오드 기반의 수신기와 APD 기반의 수신기, 광섬유 전치증폭기(Optical pre-amplifier) 기반의 수신기로 나뉘는데 PIN 다이오드 기반의 수신기는 낮은 수신 감도로 인해 최대 전송 거리가 수백 km 이상인 위성 간 레이저 통신에 사용이 부적합하다. 따라서 APD 수신기와 광섬유 전치증폭기 수신기를 구성하고 시물레이션을 통해 두 수신기 구조의 성능을 평가하였다.

먼저 APD 수신기의 경우, 수신된 광신호는 감도 (Responsivity)가 9 A/W인 APD를 통해 전기 신호로 변환되고 low noise amplifier (LNA)로 증폭된 후 복조 및 복호된다. LDPC 코드의 복호를 위해 normalized min-sum algorithm을 사용하였다. 광섬유 전치증폭기 기반의 수신기의 경우, 수신된 광신호가 먼저 광섬유 전치증폭기를 통해 증폭된 후 PIN 다이오드로 검출되며 이후의 과정은 APD 수신기와 동일하다. 광섬유 전치증폭기의 잡음지수는 4 dB로 설정하

였다. 각각의 수신기 구조 및 LDPC 코드 사용 여부에 따른 비트오류율(bit error rate, BER)을 계산하였다.

IV. 시뮬레이션 결과

그림 3은 APD 수신기와 광섬유 전치증폭기 수신기의 성능을 분석하기 위해 수신세기에 따른 2.5-Gb/s OOK 신호의 비트오류율을 측정된 결과이다. 먼저 오류정정코드를 사용하지 않은 경우 수신감도는 비트오류율 10^{-9} 기준 APD 수신기와 광섬유 전치증폭기 수신기에 대해 각각 -33.2 dBm과 -43.6 dBm이었다. 광섬유 전치증폭기 수신기를 사용하는 경우 APD 수신기 대비 수신 감도가 약 10 dB 우수하였다. 그러나 두 수신기 구조 모두 수신 감도 요구사항인 -46 dBm 을 만족하지 못했다.

반면, LDPC 오류정정코드를 사용하는 경우 수신 감도를 더 낮출 수 있었다. 광섬유 전치증폭기 수신기에 LDPC 4/5의 오류정정코드를 적용하는 경우 수신 감도는 -48 dBm 이었고, 코드율을 1/2로 변경하면 수신 감도는 -50 dBm 이하였다. APD 수신기의 경우 오류정정코드를 사용한 경우에도 수신감도는 -40 dBm 이상이였다. 시뮬레이션 결과 광섬유 전치증폭기 수신기와 오류정정코드를 사용하여 링크 버짓으로부터 도출한 요구 수신 감도를 충족 가능성을 확인하였다.

또한 저궤도 위성 네트워크를 구성하기 위해 위성 간 레이저 링크의 최대 전송 거리를 분석하였다. 그림 4는 수신감도 시뮬레이션 결과와 링크 버짓을 바탕으로 계산한 광수신기 구조에 따른 링크 마진을 나타낸

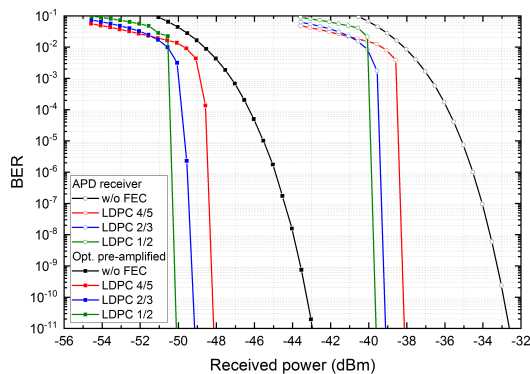


그림 3. 2.5-Gb/s OOK 신호의 APD 수신기와 광섬유 전치증폭기 수신기의 BER 성능 비교
Fig. 3. Receiver sensitivity of an APD receiver and an optically pre-amplified receiver for 2.5-Gb/s OOK signal transmitter

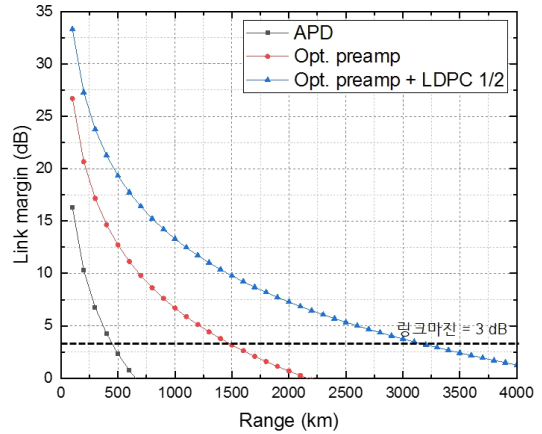


그림 4. 수신기 구조에 따른 최대 전송 거리
Fig. 4. Maximum achievable OISL range for the APD receiver and the optical pre-amplified receiver

다. 안정적인 링크 유지를 위한 링크 마진 3 dB를 고려하면, APD 수신기와 광섬유 전치증폭기 수신기의 최대 전송 거리는 각각 460 km와 1,530 km이며, 광섬유 전치증폭기 수신기에 LDPC 1/2 코드를 적용 시 최대 전송 거리는 3,280 km이었다. 이 결과로부터 광섬유 전치증폭기 수신기는 오류정정코드를 사용하지 않은 경우에도 OneWeb 시스템에 적용 가능한 수신기 구조이며, 오류정정코드를 사용하는 경우 앞서 정의한 요구 전송 거리 2,000 km 충족이 가능하여 위성 간 레이저 통신에 적합한 수신기 구조임을 확인하였다.

다만 본 논문에서 분석한 최대 전송 거리는 2장에서 고려한 링크 버짓 분석을 바탕으로 도출한 결과이며 링크 버짓은 레이저 출력, 안테나 직경, 전송 속도 등의 시스템 설계에 따라 달라지므로 시스템 특성에 따른 적용이 요구된다.

V. 결론

본 논문에서는 저궤도 위성 간 레이저 통신 링크 구현을 위한 광수신기 구조를 분석하였다. 저궤도 위성 간 레이저 통신 네트워크 구성을 위해 레이저 링크의 요구사항을 정의하고 링크 버짓 분석을 통해 요구 수신 감도를 도출하였다. 이러한 요구 수신 감도를 충족하기 위해 APD 기반의 광수신기와 광섬유 전치증폭기 기반의 광수신기 구조를 제안하고 광수신기 구조에 따른 2.5-Gb/s OOK 신호의 수신 성능을 평가하였다. 시뮬레이션 결과 광섬유 전치증폭기 수신기와 LDPC 코드를 사용하여 2,000 km 이상 전송 가능하였고 저궤도 위성 간 레이저 통신에 적합한 광수신기

구조임을 확인하였다. 향후 제안된 광수신기 구조를 바탕으로 레이저 통신 단말 프로토타입을 제작하여 광송수신기 성능을 평가하고 전송 거리를 증가할 수 있는 방안에 대해 연구할 계획이다.

References

- [1] 임형철, “위성 레이저통신의 기술 동향 및 발전 전망,” *KICS Inf. and Commun. Mag.*, vol. 39, no. 1, pp. 17-26, Dec. 2021.
- [2] F. Heine, A. Sanchez-Tercero, P. Martin-Pimentel, N. Hopcke, D. Hasler, T. Marynowski, H. Zech, L. Alber, and J. Klement, “Status of Tesat laser communication activities,” in *Proc. Free-Space Laser Commun. XXXII*, vol. 11272, pp. 19-25, Mar. 2020. (<https://doi.org/10.1117/12.2545095>)
- [3] S. Yamakawa, Y. Chishiki, Y. Sasaki, Y. Miyamoto, and H. Kohata, “JAXA’s optical data relay satellite programme,” *2015 IEEE ICSSOS*, pp. 1-3, Orleans, LA, USA, Oct. 2015. (<https://doi.org/10.1109/ICSSOS.2015.7425056>)
- [4] C. Carrizo, M. Knapke, J. Horwath, D. Diaz Gonzalez, and P. Cornwell, “Optical inter-satellite link terminals for next generation satellite constellations,” in *Proc. SPIE, Free-Space Laser Commun. XXXII*, vol. 11272, Mar. 2020. (<https://doi.org/10.1117/12.2545629>)
- [5] S. Munchenberg, C. Gal, J. Horwath, H. Kinter, L. Martin Navajas, and M. Soutullo, “Development status and breadboard results of a laser communication terminal for large LEO constellations,” in *Proc. ICSSO 2018*, vol. 11180, pp. 1180-1182, Jul. 2019. (<https://doi.org/10.1117/12.2536031>)
- [6] B. Smutny, H. Kaempfer, G. Muehlnikel, U. Sterr, B. Wandernoth, F. Heine, U. Hildebrand, D. Dallmann, M. Reinhardt, A. Freier, R. Lange, K. Boehmer, T. Feldhaus, J. Mueller, A. Weichert, P. Greulich, S. Seel, R. Meyer, and R. Czichy, “5.6 Gbps optical intersatellite communication link,” in *Proc. Free-Space Laser Commun. Technol. XXI*, vol. 7199, pp. 38-45, Feb. 2009. (<https://doi.org/10.1117/12.812209>)
- [7] Space Development Agency, Office of the Under Secretary of Defense For Research and Engineering, “Optical Communication Terminal (OCT) Standard Version 3.0,” *SDA*, 2022. (sda.mil/wp-content/uploads/2022/04/SDA-OC-T-Standard-v3.0.pdf)
- [8] H. Kaushal and G. Kaddoum, “Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques,” in *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 19, no. 1, pp. 57-96, Aug. 2017. (<https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2603518>)
- [9] CCSDS, *CCSDS Blue Book 141.0-B-1 “Optical communications physical layer,”* Consultative Committee on Space Data Systems, 2019. (<https://public.ccsds.org/Pubs/141x0b1.pdf>)
- [10] ETSI, “*Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2),*” EN 302 307 V1.4.1, 2014. (https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/30230701/01.04.01_60/en_30230701v01_0401p.pdf)

최혁규 (Hyeokgyu Choi)



2007년 2월: KAIST 전기 및
전자공학과 졸업
2009년 1월: KAIST 전기 및
전자공학과 석사
2015년 2월: KAIST 전기 및
전자공학과 박사
2015년 3월~현재: 국방과학연
구소 선임연구원

<관심분야> 위성통신, 광통신
[ORCID:0009-0006-5585-8719]

황기민 (Kimin Hwang)



2000년 2월: 경북대학교 전자
공학과 졸업
2002년 2월: 경북대학교 전자
공학과 석사
2002년 1월~현재: 국방과학연
구소 책임연구원

<관심분야> 위성통신, 이동통신, 광통신 공학
[ORCID:0009-0001-5614-8579]

김승호 (Seung-ho Kim)



2013년 2월: 충북대학교 전자
공학과 졸업
2015년 2월: 광주과학기술원 정
보통신학과 석사
2015년 3월~현재: 국방과학연
구소 선임연구원

<관심분야> 위성통신, 광통신
[ORCID:0009-0002-5452-3774]

한주희 (Joohee Han)



1999년 2월: 충남대학교 컴퓨
터과학과 졸업
2001년 2월: 충남대학교 컴퓨
터과학과 석사
2002년 1월~현재: 국방과학연
구소 책임연구원

<관심분야> 위성통신, 광통신
[ORCID:0009-0003-2985-0324]