

위성 광통신 기반 시스템의 처리량 최적화 연구 동향

김주영, 이동현, 오준석, Hao Hoang Tran, 이승찬, 조성래

중앙대학교 컴퓨터공학과

{jykim, dhlee, jsoh, hhtran, sclee}@uclab.re.kr, srcho@cau.ac.kr

Recent Advances in Throughput Optimization of Optical Communications based System

Juyoung Kim, Donghyun Lee, Junsuk Oh,
Hao Hoang Tran, Seungchan Lee, and Sungrae Cho

Department of Computer Science and Engineering
Chung-Ang University

요약

위성 광통신은 레이저 기반의 빔을 이용해 RF (Radio Frequency) 대비 매우 높은 데이터율을 제공할 수 있지만, 대기 난류·구름·안개 등 기상 요인과 지향·추적 오차, 가시 시간 제약으로 인해 링크 품질과 가용성이 크게 변동한다. 본 논문은 위성 광통신 기반 시스템에서 처리량을 제한하는 요소를 정리하고, 기상·채널 예측 기반 자원 할당, 학습 기반 (ML) 제어 등 처리량 최적화 연구 동향을 조사한다.

I. 서론

저궤도 (Low Earth Orbit, LEO) 위성 기반 지구관측 및 통신 서비스 등의 고도화로 인해, 위성- 지상 간 다운 링크에서 요구되는 데이터 전송률은 지속적으로 증가하고 있다. 전통적인 RF (Radio Frequency) 통신은 주파수 자원과 안테나 크기, 규제 측면에서 확장에 한계를 보이며, 이를 보완하기 위한 대안으로 위성 광통신 (Free-Space Optical, FSO)이 활발히 연구되고 있다. FSO는 넓은 대역폭, 높은 지향성, 낮은 간섭 특성을 바탕으로 매우 높은 이론적 전송률을 제공한다 [1]. 또한 FSO 전반에 대한 통신이론 관점의 동향 정리와 우주 FSO 시스템 관점의 정리 역시 조사되어 왔다 [2], [3].

그러나 위성 FSO의 실제 처리량은 이상적인 채널 용량과 큰 괴리를 보인다. 지구 대기를 통과하는 링크에서는 대기 난류에 의한 강도 변동, 포인팅 및 추적 오차에 따른 정렬 손실, 배경광 및 샷잡음이 중첩되며, 이로 인해 수신 신호는 강한 확률적 변동성을 갖는다 [1], [2]. 이러한 환경에서는 평균 SNR (Signal to Noise Ratio) 기반 설계가 유효하지 않으며, 링크 성능은 임계 수신 품질 미만으로 떨어지는 단절 구간의 발생 빈도와 지속 특성에 의해 지배된다.

본 논문은 위성 FSO 시스템에서 링크 물리 계층의 처리량을 제한하는 근본 요인을 채널 관점에서 정리하고, 이를 극복하기 위한 물리 계층 최적화 기법의 연구 동향을 조사한다. 특히 IM/DD (Intensity Modulation/Direct Detection) 구조, 빔 폭·포인팅 지터·수신 구경 (Aperture)의 결합 최적화, 구경 평균화 및 공간 다이버시티 등 FSO 물리 계층 기법을 조사하며, 단절이 빈번한 환경에서 목표 함수를 비트 오류에서 의미 보존으로 확장하는 시멘틱 통신 기반 FSO 물리 계층 접근을 포함하여 최근 흐름을 조사한다.

II. 본론

1. 위성 FSO 링크의 물리 계층 채널 특성

대기 난류는 굴절률 변동을 통해 수신 광전력의 확률적 변동을 유발하며, 약·중 난류 환경에서 로그정규, 보다 일반적으로는 감마-감마 분포 기반 모델이 널리 사용된다 [4], [5]. 난류로 인한 변동은 단순한 평균 감쇠가 아니라 순간적으로 강한 페이딩을 유발하며, 이 구간에서 오류율이 급증한다.

포인팅/추적 오차는 빔이 수신 구경에서 벗어나거나 부분적으로만 수신되는 정렬 실패를 의미하며, 위성 제어 오차, 미세진동, 추적 오차 등 다양한 원인에 의해 발생한다 [1]. 포인팅 손실이 난류와 결합되면 임계 품질 미만 구간 (단절) 발생 확률이 증가한다. 특히 포인팅 오차가 포함된 FSO 링크의 단절 제약 하에서 전송률의 최적화 문제는 대표적으로 다루어져 왔다 [6].

2. 전통적 물리 계층 최적화 기법

위성 FSO 링크의 물리 계층 최적화는 RF 와 달리 IM/DD, 대기 난류, 포인팅/정렬 손실, 배경광·샷잡음이 동시에 성능을 저해한다 [1], [2]. 따라서 최적화의 중심은 일반적인 링크 적응 자체가 아니라, 난류- 포인팅 결합 채널에서 단절 지배 성능을 낮추는 FSO 고유 설계 변수에 맞춰진다.

변조는 IM/DD에 적합한 OOK (On Off Keying)/PPM (Pulse Position Modulation) 계열이 주류이며, PPM은 평균 전력 제약 하에서 높은 전력 효율을 제공해 난류 및 배경광 환경에서 유리하다 [2]. 이때 핵심은 단순 BER (Bit Error Rate) 최소화가 아니라, 단절 제약 하에서 유효 처리량을 최대화하도록 변조 차수 및 심볼 구조를 선택하는 것이다.

위성 FSO에서 대표적 설계는 빔 폭·포인팅 지터·수신 구경의 결합 최적화이다. 좁은 빔은 높은 이득으로 평균 수신 전력을 높이지만 지터에 취약해 단절을 증가시킬 수 있고, 넓은 빔은 정렬 강건성을 제공하는 대신 기하

손실을 증가시킨다. 따라서 포인팅 오차 통계가 주어질 때 단절 확률(단절 제약 하에서 전송률) 관점에서 최적 빔 폭이 존재하며, 이는 포인팅 오차를 포함한 FSO 링크 성능 최적화의 핵심 결과로 알려져 있다 [6].

난류로 인한 수신 강도 변동을 완화하기 위해 수신 구경을 키우는 구경 평균화와 다중 수신 구경을 이용한 공간 다이버시티가 널리 활용된다. 구경을 확대하면 난류에 의해 발생하는 강도 변동이 수신 구경에서 평균화되어 변동 폭(분산)이 감소하고, 다중 구경 결합은 독립적인 수신 신호를 결합함으로써 강한 페이딩이 나타날 확률을 낮춰 단절 발생을 줄이는 데 기여한다 [4], [5]. 결과적으로 위성 FSO 물리 계층 최적화는 평균 성능을 최대화 하기보다, 단절을 유발하는 낮은 수신 품질 구간의 빈도를 줄이도록 빔·구경·변조 구조를 결합 설계하는 데 초점을 둔다.

3. 시맨틱 통신 기반 FSO 물리 계층

위성 FSO는 링크 단절/급감쇠가 잦아 비트 오류 최소화만으로는 실제 임무 성능을 보장하기 어렵다. 이에 따라 최근 시맨틱 통신 [7]은 목표 함수를 데이터율/비트 중심 지표에서 의미 보존(복원 품질)으로 전환함으로써, 불안정한 광 채널에서 유용한 정보를 최대화하는 최적화 측으로 제안된다.

[8]의 저자는 위성 원격탐사 영상 전송을 대상으로 FSO 채널을 고려한 시맨틱 통신 프레임워크를 제시하고, 딥러닝 기반 의미 인코더/디코더를 통해 전송 자원을 꾀셀 비트가 아니라 의미 특징에 집중해 복원 품질을 최적화하였다. 이 접근은 난류·포인팅 손실로 인해 프레임 오류/재전송이 증가하는 상황에서, 동일한 물리 자원 조건에서도 의미 품질 기준 유효 처리량을 개선할 수 있음을 보여준다.

무선 비디오 캐싱·스트리밍 분야에서도 재생 지역 제약 하에서 비디오를 다중 품질 레벨로 모델링하고, 사용자가 체감하는 품질(Peak SNR, PSNR) 지표를 목적함수로 두는 최적화가 제안되어 왔다 [9]. 따라서 위성 FSO에서도 의미/복원 품질 기반 목적함수 설계가 유의미한 확장 측이 된다.

III. 결론

본 논문은 위성 FSO 링크에서 물리 계층 처리량을 제한하는 핵심 요인을 난류·포인팅 손실·배경광 잡음에 따른 단절 특성으로 정리하고, 이를 완화하기 위한 물리 계층 최적화 기법의 연구 동향을 조사하였다. 전통적 접근은 IM/DD에서 변조 구조 선택, 빔 폭·포인팅 지터·수신 구경의 결합 최적화, 구경 평균화 및 공간 다이버시티를 통해 단절 확률을 낮추고 유효 처리량을 개선하는 데 초점을 둔다.

또한 시맨틱 통신은 단절이 빈번한 환경에서 목표 함수를 비트 정확도에서 의미 보존으로 확장함으로써, 제한된 광 자원 조건에서도 임무 성능을 유지·향상할 수 있는 새로운 물리 계층 최적화 방향을 제시한다. 향후에는 단절 통계와 의미 품질 지표 간 정량적 관계 모델링, 채널 불확실성 및 환경 변화(계절·지역) 하에서 시맨틱 인코더 강건성, 위성 탑재체 제약(연산·전력·지연)을 고려한 경량 구현이 핵심 과제일 것으로 보인다.

더 나아가 비지상 네트워크(Non-Terrestrial Network, NTN)에서의 자원 조정·스케줄링 문제는 다중 에이전트 학습 기반으로도 활발히 연구되고 있다 [10].

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2026-RS-2022-00156353, 50%)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. RS-2023-00209125)을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 57–96, Firstquarter 2017.
- [2] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258, Fourthquarter 2014.
- [3] H. Hemmati, Ed., *Deep Space Optical Communications*, NJ, USA: Wiley, 2006.
- [4] L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser Beam Propagation through Random Media*, 2nd ed. Bellingham, WA, USA: SPIE Press, 2005.
- [5] Xiaoming Zhu and J. M. Kahn, "Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 8, pp. 1293–1300, Aug. 2002.
- [6] A. A. Farid and S. Hranilovic, "Outage Capacity Optimization for Free-Space Optical Links With Pointing Errors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 7, pp. 1702–1710, Jul. 2007.
- [7] G. Shi, Y. Xiao, Y. Li and X. Xie, "From Semantic Communication to Semantic-Aware Networking: Model, Architecture, and Open Problems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 8, pp. 44–50, Aug. 2021.
- [8] W. Chen, C. Ju, T. Yuan, Y. Zhan, M. Zhang and D. Wang, "Free Space Optical Semantic Communication for Satellite Remote Sensing Image Transmission," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 73, no. 10, pp. 9168–9183, Oct. 2025.
- [9] M. Choi, J. Kim and J. Moon, "Wireless Video Caching and Dynamic Streaming Under Differentiated Quality Requirements," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 6, pp. 1245–1257, Jun. 2018.
- [10] S. Park, G. S. Kim, Z. Han and J. Kim, "Quantum Multi-Agent Reinforcement Learning is All You Need: Coordinated Global Access in Integrated TN/NTN Cube-Satellite Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 62, no. 10, pp. 86–92, Oct. 2024.