

OAM 기반 공간다중화를 통한 우주광통신 기술의 활용 가능성 분석

이지용, 백지연*, 김준수, 박승룡, 전현채
인천대학교

qorwldusdl@inu.ac.kr

Exploring the Potential of Space Optical Communication through OAM based Spatial Division

Ji-Yung Lee, Jiyeon Baek*, Junsu Kim, Seung Ryong Park, Hyunchoe Chun

Incheon National Univ.

요 약

OAM은 직교성으로 인해 다중화 및 역다중화가 가능하여 여러 개의 직교 OAM 빔을 사용하여 대용량 광통신 시스템을 구현할 수 있다. 본 연구에서는 OAM 기반의 공간 다중화 기술이 우주광통신 시스템에서 가지는 활용 가능성과 기술적 도전과제를 종합적으로 분석하고자 한다.

I. 서론

우주 통신 기술은 인공위성, 우주 탐사선, 지구 간 통신 등 다양한 분야에서 역할을 수행하고 있으며 전송 거리의 증가와 함께 대역폭, 안정성, 데이터 처리 속도 등에서 끊임없는 기술적 진보가 요구되고 있다. 기존의 무선 주파수 기반 통신은 대역폭의 한계와 간섭 문제로 인해 점차 한계를 드러내고 있으며, 이를 극복하기 위한 대안으로 무선광통신 기술이 있다. 무선광통신은 높은 데이터 전송률과 낮은 지연 특성을 기반으로 우주 환경에 적합한 솔루션으로 주목받고 있으며, 그 중에서도 SDM (Space Division Multiplexing)은 통신 채널 용량을 확장할 수 있는 핵심 기술이다.

공간 다중화 기법 중 하나로 제안된 OAM (Orbital Angular Momentum)은 광자가 고유의 위상 나선을 통해 서로 독립적인 모드로 존재할 수 있게 하여, 동일한 주파수에서 다중 신호를 전송할 수 있는 물리적 기반을 제공한다. 이론적으로 OAM 모드는 무한한 개수로 생성 가능하며, 각 모드는 서로 직교하므로 다중화 효율을 극대화 할 수 있다. OAM 기반 통신은 광대역 고속 통신이 필수적인 우주 통신 환경에서 높은 용량과 향상된 채널 분리를 제공하며, 각각의 모드가 고유한 위상 나선을 갖는다는 특성을 바탕으로 다중화가 가능하다.

[1]에서는 OAM 모드들을 효과적으로 분리하기 위한 광-전자 하이브리드 합성곱 신경망을 제안함으로써 인공신경망 기반의 인식 기술을 통해 복잡한 OAM 빔 패턴을 실시간으로 분류할 수 있음을 보였다. 이는 OAM 기반 다중화 시스템의 실용적 구현 가능성을 높였다. [2]에서는 전자빔의 OAM 스펙트럼을 측정하는 새로운 방법을 제시함으로써 OAM의 물리적 정량성과 제어 가능성을 입증했다. 이는 궁극적으로 우주환경에서의 다양한 파동 기반 매체를 활용한 OAM 통신 기술의 물리적 기반을 확장시킬 수 있는 가능성을 나타낸다.

II. 본론

대표적 OAM은 Laguerre-Gaussian (LG) 모드로 전개된 wave function을 이용하여 구현할 수 있다. LG 모드 wave function에서 vortex rotation 모드를 나타내는 위상 요소는 $e^{il\phi}$ 형태의 지수 함수로 표현된다[3]. 여기서 l 은 방위각 위상 분포를 일으키는 OAM Topological Charge (TC)를 나타낸다. OAM 상태를 가지는 LG 모드는 이 TC 값에 의해 정의된다.

OAM 빔의 Topological Charge Conversion (TCC) 과정은 다중화 및 복조 과정에서 필수적이며, 이 변환의 정확도와 잡음 억제는 실용적인 응용을 위해 극복해야 할 기술적 과제이다. Computer Generated Holography (CGH) 기반의 Spatial Light Modulator (SLM) 시스템을 활용하면 공간 역 다중화 구조를 구현하고, 복잡한 회절 격자 표면을 통해 OAM 빔의 제어를 수행할 수 있다. 기존 TCC 방식에서 자주 발생하는 신호 간섭과 잡음을 해결하기 위해 Spatial filtering과 beam-controlling lens system을 최적화 하면 서로다른 OAM 모드(l)를 갖는 레이저로 변조된 신호를 구별 가능하며, 이를 통해 공간 다중화가 가능해진다.

III. 결론

본 연구에서는 우주광통신을 위한 OAM의 광학적 최적화 기법을 살펴본다. 본 기술이 우주광통신 시스템에서 활용하기 위해서 통신채널분석, 대기영향분석, 주변광간섭 회피기술 개발 및 CGH 및 CNN 기술의 적용에 관한 연구가 필요하다. 이를 통해 위상적으로 직교하는 특성을 바탕으로 다중 신호를 동일한 주파수 대역에서 전송할 수 있는 물리적 기반을 제공하며, 이는 우주 환경과 같은 조건에서도 높은 데이터 전송률과 채널 용량 확보를 가능하게 한다. 향후, 위상 보정 기술, 실시간 모드 인식 알고리즘, 그리고 우주 환경 내 광학 소자의 안정성에 대한 추가 연구를 통해 더욱 실용적인 시스템 구현으로 확장할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by the MSIT, Korea, under the ITRC support program (IITP-2025-RS-2023-00259061) supervised by the IITP.

참 고 문 헌

- [1] Ye, J., Kang, H., Cai, Q. et al. Multiplexed orbital angular momentum beams demultiplexing using hybrid optical-electronic convolutional neural network. *Commun Phys* 7, 105 (2024).
- [2] Grillo, V., Tavabi, A., Venturi, F. et al. Measuring the orbital angular momentum spectrum of an electron beam. *Nat Commun* 8, 15536 (2017).
- [3] M. Krenn and A. Zeilinger, "On small beams with large topological charge: II. Photons, electrons and gravitational waves," *New Journal of Physics*, vol. 20, no. 6. IOP Publishing, p. 063006, 07-Jun-2018.