

자유 공간 광(FSO) 환경에서의 양자 키 분배(QKD) 적용 기술 발전 동향

차민선, 허준*

고려대학교, *고려대학교

alstjs9748@korea.ac.kr, *junheo@korea.ac.kr

Recent Advances in Quantum Key Distribution Technologies for Free-Space Optical Communication Environments

Cha Min Seon, Heo Jun*

Korea Univ., *Korea Univ.

요약

본 논문은 자유 공간 광(FSO) 환경에서 양자 키 분배(QKD) 기술의 발전 동향을 분석하고, 주요 기술 발전 사례와 남은 도전 과제들을 제시하였다. 초기 야간 및 단거리 중심에서 주간, 위성, 도심 기반 장거리로 확장되었으며, 1550nm 파장 최적화, 업컨버전 검출기, 적응광학, 자동 추적 기술 등이 도입되었다. 그러나 대기 난류, 태양광 배경 잡음, 시스템 복잡성, 비용, 표준화 등은 여전히 기술적 과제로 남아 있다. 최근 연구 동향을 바탕으로 UAV 및 WDM 등을 QKD와 기술 융합을 통해 향후 다양한 환경에서 FSO QKD 네트워크 확장이 가능할 것으로 전망하였다.

I. 서론

양자 키 분배(QKD)는 양자역학 원리에 기반한 도청 불가능한 암호화 방식으로 주목받고 있다. 현재 QKD 기술은 유선 광통신망을 중심으로 활발히 연구·개발되고 있으나, 유선 환경은 거리와 비용의 한계가 존재한다. 무선, 자유 공간 광(FSO), 위성 기반 QKD 연구도 진행되고 있으나, 유선에 비해 연구 및 실증 사례가 제한적이며 기술적 난제가 많다. 특히 FSO QKD는 기존 유선의 한계를 극복할 수 있는 유력한 대안으로, 이와 관련하여 기술 발전이 이루어지고 있는 추세이다. 본 논문에서는 FSO 환경에서의 QKD 기술 발전 흐름과 주요 연구들을 분석하고 향후 기술 과제를 제시한다.

II. 본론

FSO(Free Space Optics)는 광 파장을 이용하여 대기를 통해 직선 시야(Line-of-Sight, LOS) 경로로 광 빔을 전송하는 기술로, 고속(Gbps급) 데이터 전송이 가능하고 전파 간섭에 강한 연결 특성을 가진다[1]. 이러한 특성으로 FSO는 지상-지상뿐만 아니라 위성-지상, 위성-위성 통신에도 적용 가능하며, QKD 기술의 물리적 제약을 극복하는 수단으로 주목받고 있다[2]. 초기 FSO QKD 연구는 태양 광 배경잡음, 대기난류, 추적 안정성 문제로 인해 야간 중심의 통신

환경에서 제한적으로 진행되었다[3, 5]. 그러나 2017년 Liao et al.의 연구를 기점으로 주간 환경에서도 FSO QKD 통신이 가능하다는 것이 실험적으로 입증되었다[4]. 이후 다양한 기술이 도입되면서 FSO QKD의 적용 범위가 위성 환경으로 확장되었으며, 네트워크 아키텍처가 제안되기도 하였다. 이러한 FSO QKD 기술의 주요 발전 사례 및 기술 동향은 <표 1>과 같이 정리된다.

1) 초기 연구 : 야간 FSO QKD 한계

초기 FSO QKD 실험은 기술적 한계로 인해 야간에 이루어졌으며, 대부분 얹힘 기반 DV-QKD 프로토콜이 적용되었고, 주로 전송 거리에 초점을 두었다[3]. 이후 Steinlechner et al. (2017)은 세계 최초로 비엔나 도심 1.2km FSO 링크를 통해 고차원 양자 얹힘의 자유 공간 전송을 실증하였다[5]. 해당 연구는 편광과 시간-에너지 하이퍼 얹힘 상태를 안정적으로 검증하였으나, 태양광 배경잡음 문제로 인해 야간 환경에 한정되었으며, 도심에서의 난류와 산란으로 링크 안정성과 보안 키 생성률(Secure Key Rate, SKR) 확보에 한계가 있었다.

2) 주간 통신 실현 사례

Liao et al. (2017)은 FSO QKD 기술에서 최초로 주간 환경 통신을

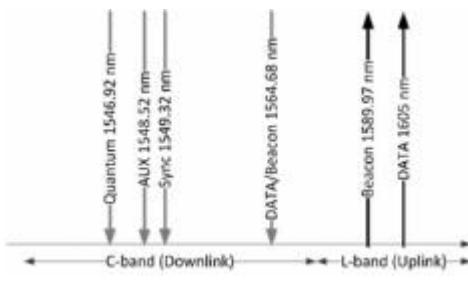
연도	저자	핵심 내용	적용 기술	기술 진화 포인트
2017	Steinlechner et al.[5]	최초 도심 환경 FSO QKD, 고차원 얹힘 실증	Hyperentanglement, Franson interferometry	얽힘 → 고차원, 편광+에너지-시간 DOF
2017	Liao et al. [4]	1550nm 파장 기반 주간 53km FSO QKD 실증	Upconversion SPD, SMF coupling, narrowband filtering	야간 → 주간 통신 실현
2022	Moll et al. [6]	위성 C/L-band FSO QKD 기술 제안	Link budget 최적화, C/L band 적용	C-band 기반 양자-고전 채널 통합 실현
2023	Kržić et al. [7]	대도시 순수 FSO QKD 네트워크 제안	Beacon laser, Temporal filtering, Fast Steering Mirrors	주·야간 속도 kbps 입증 및 네트워크 아키텍처 제안

< 표 1. 자유 공간 광(FSO) 양자 키 분배(QKD) 기술 발전 사례 및 적용 기술 동향 >

실현한 사례를 보고하였다[4]. 1550nm 파장의 광 신호와 업컨버전 단일광자 검출기, 싱글모드 파이버 커플링 기술을 적용하여 낮 동안에도 안정적인 QKD 링크 구축에 성공하였다. 실험은 총 53km의 링크에서 진행되었으며, 총 채널 손실이 48dB에 달하는 환경에서도 SKR 확보가 가능함을 증명하였다. 본 연구는 야간에서만 운용이 가능했던 FSO QKD의 한계를 극복하였으며, 향후 지상-위성 링크 및 상용 광통신망과의 호환 가능성을 보여주는 전환점이 되었다. 이는 FSO QKD 기술의 실질적인 상시 운용 가능성을 입증했다는 점에서 기술적 의의가 크다.

3) 위성 FSO QKD 기술 최적화

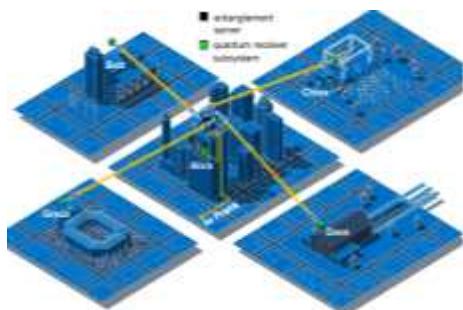
Moll et al. (2022)은 C-/L-band 파장 대역을 활용한 전광학 기반(all-optical) 위성 QKD 시스템을 제안하였으며, 지상에서의 실험을 통해 고전 채널과 QKD의 동시 운용 가능성을 입증하였다[6]. <그림 1>의 C-/L-band 파장 구조를 바탕으로 300m 거리의 FSO 링크를 통해 실험을 진행하였으며, 주간·야간 모두 안정적인 QKD 전송과 키 분배가 가능함을 확인하였다. 또한, 약 50dB의 채널 손실에서도 운용 가능성을 제시하였으며, 광 링크 성능 최적화, 고감도 검출기, 정밀 추적 시스템을 통해 링크 최적화를 실현하고 양자비트 오류율(Quantum Bit Error Rate, QBER)을 분석하였다. 그러나 궤도 불안정, 대기 배경광 등으로 인한 링크 안정성 확보는 여전히 주요 기술적 도전 과제로 남아 있으며, 대규모 위성 네트워크에서의 키 분배 구성, 비용 효율성, 표준화 이슈 등이 향후 연구 과제로 제시되었다.



< 그림 1. C-/L-Band 파장 운영 계획 [6] >

4) 네트워크형 FSO QKD로 진화 제안

Kržić et al. (2023)**은 도심 FSO 환경에서 주야 구분 없이 24시간 상시 운용이 가능한, 중앙 얹힘 서버 기반 네트워크 아키텍처를 <그림 2>와 같이 제안하였다[7]. 제안된 전체 구조를 구현한 것은 아니며, 일부 구간에 한정된 실험을 통해 구조의 실현 가능성을 검증하였고, 비콘레이저와 자동 조향 미러, 시간 필터링 기술을 적용하였다. 주간과 야간 모두에서 1.7km 자유 공간 링크에 대해 보안 키 생성(SKR)을 성공적으로 확보하였다. 주간에는 2.5 kbps급 속도, 야간은 5.4 kbps급의 속도를 확인하였으며, 특히 직사광선 등 외부 간섭 요



< 그림 2. 도심 얹힘 기반 FSO 네트워크 [7] >

인으로 인해 주간 성능이 저하되는 문제는 여전히 극복해야 할 과제로 논의되고 있다.

III. 결 론

FSO QKD 기술은 초기 야간 환경에 한정된 실험에서 출발하여 주간 통신, 위성 링크, 도심 네트워크 등으로 영역으로 확장되었으며, 1550nm 파장 최적화, 업컨버전 검출, 적응광학, 자동 빔 정렬 등의 기술 도입으로 km급 링크에서 주간 kbps급 성능이 실현되었다. 그러나 태양광 배경광, 대기 난류, 링크 신뢰성 확보, 시스템 복잡성 등 기술적 한계는 여전히 상용화를 위한 주요 과제로 남아 있다. 향후 FSO QKD 기술은 UAV, HAP, 드론 등 이동 플랫폼과의 융합, WDM·SDM 다중화 기술 접목, 자유공간-광섬유 네트워크 연동을 통해 다양한 지형·환경에서의 네트워크 확장이 가능할 것으로 기대된다. 또한 실시간 키 관리 시스템의 구축, 상용 통신망과의 연계, 국제 표준 마련을 위한 적극적인 참여가 요구되며, 국내 기술력 강화를 위해서는 장거리 실증, 이동 환경 적용, 기술의 소형화 및 자동화 등 실제 네트워크 환경을 기반으로 한 검증이 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원(RS-2021-II211810)을 받아 수행된 연구임.

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. R2212284)을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] Khalighi, M. A., and M. Uysal, Survey on free space optical communication: a communication theory perspective, *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, Vol. 16, No. 4, 22312258, 2014.
- [2] Bedington, R., J. M. Arrazola, and A. Ling, Progress in satellite quantum key distribution, *npj Quantum Inf.*, Vol. 3, No. 30, 113, 2017.
- [3] Trinh, P. V., et al., "Quantum key distribution over FSO: Current development and future perspectives," in *Proc. Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Toyama, Japan, Aug. 2018, pp. 1 - 4.
- [4] Liao, S.-K., et al., "Long-distance free-space quantum key distribution in daylight towards inter-satellite communication," *Nature Photonics*, vol. 11, no. 8, pp. 509 - 513, Jul. 2017.
- [5] Steinlechner, F., et al., Distribution of high-dimensional entanglement via an intra city free-space link. *Nature Communications*, 8(1):15971, July 2017.
- [6] Moll, F., et al., Link technology for all-optical satellite-based quantum key distribution system in C-/L-band. In 2022 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), pages 275 - 280, Kyoto City, Japan, March 2022. IEEE.
- [7] Kržić, A., et al., Towards metropolitan free-space quantum networks. *npj Quantum Information*, 9(1):95, September 2023.