

# 장거리 양자 통신을 위한 양자 라우팅 연구 동향

윤성연, 이호찬, 김희원, 배찬빈, 이주희, 백상현  
고려대학교

{ysy0326, ghcks1000, harry0475, bin6050, jhlee0, shpack}@korea.ac.kr

## A Survey on Quantum Routing Research for Long-Distance Quantum Communication

Seongyeon Yoon, Hochan Lee, Heewon Kim, Chanbin Bae, Juhee Lee, Sangheon Pack  
Korea Univ.

### 요약

최근 양자 통신 기술의 발달로 양자 얽힘과 중첩을 활용한 데이터 전송 방식을 통해 기존 고전 통신보다 높은 보안성과 효율을 제공한다. 따라서 보다 많은 노드를 참여시키고 여러 홉을 걸쳐 장거리 통신이 가능한 양자 네트워킹 기술이 주목받고 있다. 본 논문에서는 이러한 장거리 양자 통신의 안정성을 높이기 위해 고충실도를 유지하면서도 네트워크 성능은 유지 또는 향상시킬 수 있는 양자 얽힘 상태를 효율적으로 관리하고 분배하는 양자 라우터 구조의 개선 및 새로운 라우팅 기법을 소개한다. 이를 통해 향후 연구 방향을 제시한다.

### I. 서론

최근 양자 컴퓨팅과 양자 통신 기술의 발전으로 양자 얽힘과 중첩을 활용한 데이터 전송 방식이 기존 고전 통신보다 높은 보안성과 효율을 제공할 수 있게 되었다. 이러한 장점은 더 많은 노드가 참여하여 크고 복잡한 네트워크에서도 빠르고 손실이 적은 통신을 가능하게 한다. 따라서 장거리 통신이 가능한 양자 네트워킹이 주목받고 있다.

양자 통신에서는 주로 양자 전송과 양자 얽힘 교환이라는 두 가지 주요 메커니즘이 사용된다. 먼저, 양자 얽힘 상태가 되면 한 노드의 큐비트 값이 0 이면 다른 큐비트 값은 1 로 유지되어 즉시 정보를 확인할 수 있다. 양자 전송은 이러한 얽힘 상태에 있을 때, 한 쪽에 정보를 가진 데이터가 추가되면 즉시 전송되는 방법으로, 이를 통해 양자 데이터를 물리적으로 이동시키는 것이 가능하다. 그리고 양자 얽힘 교환은 사이에 중계기를 통해 두 양자 입자 간의 얽힘 상태를 생성하고 유지하는 과정으로, 얽힘을 연장할 수 있다. 이를 통해 양자 정보를 원격으로 교환할 수 있어 물리적으로 멀리 떨어져 있더라도 서로의 상태에 즉시 영향을 줄 수 있다. 따라서 양자 얽힘 교환은 장거리 양자 통신을 가능하게 하는 필수적인 기법이다.

양자 라우팅은 이러한 장거리 양자 통신을 용이하게 하는 양자 네트워크의 구성요소로, 장거리 양자 통신의 발전을 위해 최근 크게 주목받고 있다. 양자 라우팅은 양자 네트워크 상에서 정보의 경로를 최적화하고, 양자 얽힘 상태를 효과적으로 관리함으로써 데이터 전송의 신뢰성과 효율성을 높인다. 또한, 양자 네트워크의 서로 다른 노드들 간에 얽힘을 유지하고, 노드 간 물리적 거리에 상관없이 안정적인 정보 교환을 가능하게 한다. 이는 복잡한 양자 네트워크 환경에서도 잘 동작할 수 있다. 따라서 본 논문은 장거리 양자 통신의 안정성 및

효율성을 높이고 글로벌 양자 인터넷 구축의 발판이 될 양자 라우팅 연구 동향을 소개한다.

### II. 장거리 양자 통신을 위한 양자 라우팅

본 장에서는 장거리 양자 통신을 위한 양자 라우팅 기법에 대한 설명과 이를 보다 효율적으로 활용할 수 있는 향상된 라우터 구조 [1] 및 새로운 라우팅 기법 [2, 3]에 대해 설명한다.

기존의 양자 얽힘 상태 전송에는 환경적 요인의 간섭 등으로 인해 거리가 멀어질수록 불안정할 수 있다는 한계가 있다. 따라서 양자 네트워크는 장거리 링크에서 원래의 양자 얽힘이 잘 유지되는 고충실도를 만족해야 한다. 이를 유지하면서 리소스 최적화 및 여러가지 네트워크 요구사항에도 최적의 라우팅 결정을 내리도록 하여 큰 규모의 네트워크에서도 효율적인 네트워킹을 가능하게 하는 것이 궁극적인 목표이다.

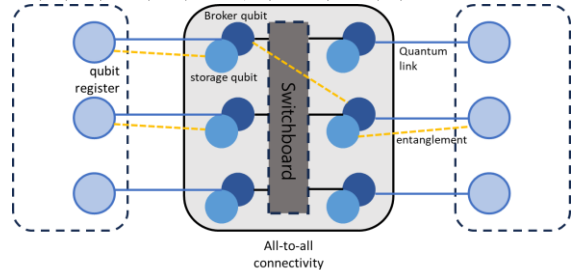


그림 1. [1]이 제안하는 양자 라우터의 구조

[1]은 양자 얽힘의 효율적인 관리와 분배를 가능하게 하는 새로운 양자 라우터 구조를 제안하였다. 이 구조는 그림 1 과 같이 중앙 집중형 라우팅 메커니즘으로 양자 네트워크 내에서 양자 얽힘 상태를 중앙에서 효율적으로 관리하고 분배할 수 있도록 한다. 또한, 다중 얽힘 채널을 지원하여 다양한 양자 통신 경로를 활성화하고

관리한다. 그리고 향상된 양자 메모리 기술과 통합되어 양자 얽힘 상태의 저장 및 전송을 최적화한다. 이러한 구조적인 특징으로 양자 네트워크 전반의 효율성과 확장성을 크게 향상시켰다. 이러한 새로운 라우터 구조의 적용은, 양자 얽힘 상태의 관리와 분배를 기존 방식보다 더 효율적으로 수행함으로써, 전송률의 향상뿐만 아니라 효율성과 충실도를 모두 유지하는 결과를 보여준다. 이러한 결과는 양자 네트워크의 성능을 높이는 데 기여할 수 있다.

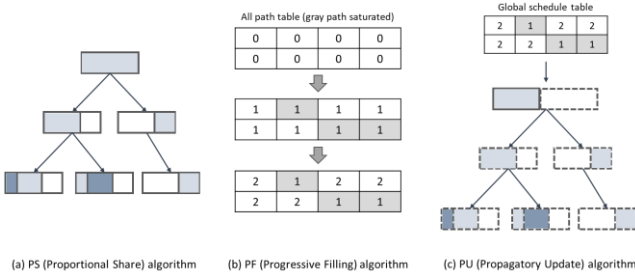


그림 2. [2]가 제안하는 세 가지 알고리즘 (a. PS, b. PF, c. PU)에 따른 용량 할당 방식

한편 [2]는 양자 네트워크의 제한된 양자 메모리를 가지고 있으며, 연결 요청에 대해 효율적으로 얽힘 쌍을 생성해야 한다는 것에 초점을 두고, 전송률이 향상된 라우팅 기법을 제안한다. 해당 라우팅 절차는 물리적 단계와 알고리즘 단계로 나눌 수 있는데, 먼저 물리적 단계에서, 네트워크가 초기화되고, 다양한 연결 요청이 처리된다. 이후, 각 요청에 대해 여러 경로가 식별되고, 각 경로에 대한 양자 자원의 할당이 이루어진다. 알고리즘 단계에서는 세 가지 알고리즘으로 네트워크 간선 용량 할당을 스케줄링한다. 제안된 세 알고리즘은 제한된 양자 메모리 상황에서 다수의 연결 요청에 효과적으로 응답할 수 있도록 상황에 맞게 선택적으로 적용된다.

이 알고리즘은 네트워크의 요구사항에 맞추어 얽힘 생성 요청에 대응하는 방식으로 양자 네트워크의 효율적인 운영을 지원하며, Proportional Share (PS), Progressive Filling (PF), Propagatory Update (PU)로 구분한다. 그림 2의 a,b,c는 각 알고리즘에 따른 용량 할당 방식을 도식화한 것이다. 먼저, PS 알고리즘은 각 연결 경로에 대한 네트워크 엣지의 용량을 비례적으로 할당한다. 각 엣지에서 사용 가능한 용량을 그 엣지를 사용하는 모든 경로들에게 공평하게 분배하는 방식이다. PF 알고리즘은 모든 경로들에 대해 균등하게 용량을 증가시키는 방식을 사용한다. 이 방식은 네트워크의 엣지들이 점차 포화상태에 도달할 때까지 각 경로의 용량을 일정하게 증가시킨다. 그리고 PU 알고리즘은 전역 스케줄 테이블을 사용하여 각 엣지에 대한 용량 할당을 결정한다. 이 방식은 전체 네트워크의 상태를 고려하여 각 경로에 대한 용량을 할당하고, 필요에 따라 이를 조정한다. 이 세 알고리즘은 각각 다른 방식으로 자원을 할당하고 관리하기 때문에, 특정 네트워크 상황에 가장 적합한 알고리즘을 선택하여 사용한다. 제안된 세 가지 라우팅 알고리즘들은 특정 조건에서 각기 다른 장점을 가진다. 예를 들어, PF 알고리즘은 공정성 측면에서 가장 뛰어난 반면, PU 알고리즘이 시스템 처리량과 용량 활용 측면에서 두드러지게 높은 성능을 보였다. 그러나 PU는 공정성이 낮고, PS는 가장 낮은 처리량을 보이지만, 엣지 활용의 분산이 작고 네트워크 실패에 대한 견고성이 가장 높게 나타났다.

DQRA [3]는 양자 네트워크를 위한 기계학습 기반 양자 라우팅 모델을 제안한다. 이는 양자 네트워크의 얽힘 상태 유지 및 각 위치로 효율적으로 전송하는

과정에 관한 문제인 얽힘 라우팅 문제를 다루고 있다. 리소스 최적화 및 네트워크 상태의 동적인 변화에 대응할 수 있어야 하며, 동시에 여러 요청에 대해 어떻게 스케줄링하여 처리할지 결정하는 것도 이러한 문제에 해당한다. 이 문제에 대응하여, 양자 비트와 중계기의 할당을 최적화하는 기존 모델은 계산 복잡성에 대한 한계가 존재한다. 따라서 이를 해결하기 위해 DQRA는 심층 강화학습을 활용하여 더 나은 라우팅 결정을 내릴 수 있도록 한다. 심층 신경망을 활용하여 현재 네트워크 상태를 분석하고, 큐러닝 알고리즘을 기반으로 성공적으로 해결된 요청의 수를 최대화하는 라우팅 경로를 생성한다. 이 기법은 네트워크 보안 및 효율성을 향상시키며, 기존 방식보다 더 높은 성능을 제공한다.

### III. 결론

본 논문은 장거리 양자 통신을 위한 양자 라우팅 연구 동향을 분석하였다. 양자 라우터 구조에 대한 개선을 기반으로 장거리 링크에도 얽힘 충실도를 유지할 수 있는 방법을 제안한 연구를 분석하였다. 그리고 양자 얽힘 생성 라우팅 기법으로 제한된 자원에서 복수의 요청을 효율적으로 처리하는 알고리즘을 제안하고, 엣지 용량 할당 및 경로 설정의 스케줄링을 최적화한 연구를 분석하였다. 또한 양자 네트워크의 중첩 라우팅 문제에 대한 강화학습을 적용하는 등의 새로운 관점을 제시하는 DQRA를 분석하였다. 이러한 연구들은 장거리 양자 통신의 고충실도를 유지하며 안정성과 효율성을 높이는 하나의 목적을 가지고 각기 다른 접근을 통해 성능 향상을 보여주었다. 이를 기반으로 향후 공개된 코드를 사용해 테스트베드를 구축하고 고도화할 계획이다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(중견과제)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터육성지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1A2C3006786, IITP-2024-2021-0-01810)

### 참고 문헌

- [1] Lee, Yuan, *et al.* "A quantum router architecture for high-fidelity entanglement flows in quantum networks," *npj Quantum Information*, Vol. 8, no. 75, 2022.
- [2] Li, Changhao, *et al.* "Effective routing design for remote entanglement generation on quantum networks," *npj Quantum Information*, Vol. 7, no. 10, 2021.
- [3] Le, Linh, and Tu N. Nguyen., "DQRA: Deep Quantum Routing Agent for Entanglement Routing in Quantum Networks," *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, Vol. 3, pp. 2689-1808, 2022.