

# 양자 인터넷을 위한 양자 네트워크 스택 및 프로토콜 연구 동향

한솔, 김희원, 백상현  
고려대학교

{hs1087, harry0475, shpack}@korea.ac.kr

## A Study on the quantum network stack and protocols for a quantum internet

Sol Han, Heewon Kim, Sangheon Pack  
Korea Univ.

### 요 약

양자 정보 통신 기술은 양자의 물리학적 특성을 활용하여 기존 정보통신기술의 한계를 극복할 수 있는 차세대 정보 기술이다. 최근 양자 정보 통신 기술의 발전으로 인해 장거리 양자 정보 전송이 가능해졌고, 이로 인해 보안과 처리 성능이 뛰어난 양자 인터넷을 구성하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 단대단 양자통신을 벗어나 복잡한 양자 인터넷 상에서 양자 통신을 지원하기 위해서 통일된 참조 모델이 우선적으로 정의되어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 양자 인터넷을 위한 참조 모델에 대한 연구들과 그 세부 기술들에 대해 살펴본다.

### I. 서 론

정보통신기술의 한계가 눈앞으로 다가온 시점에서 양자통신기술은 양자의 물리학적 특성을 활용하여 기존 정보통신기술의 처리 속도, 보안 등 다양한 측면에서의 한계를 극복할 수 있는 차세대 정보기술로 각광받고 있다.

양자통신기술은 다음 패러다임의 핵심기술로 국가적인 차원에서의 지원과 연구가 진행되고 있다. 이에 힘입어 양자통신기술의 요소기술들의 빠른 발전이 이루어지고 있다. 최근에는 장거리 양자 얽힘을 만들 수 있는 양자 리피터를 구축하여 장거리 양자 얽힘을 만들어 낼 수 있게 되면서 단거리 직접 통신 방식에서 벗어나 양자 얽힘을 활용한 대규모 양자 네트워크의 현실화가 가시권으로 들어오게 되었다.

현재 단계에서는 다대다의 복잡한 통신을 지원하지 않지만 궁극적인 양자 인터넷을 현실화하기 위해 통합된 프레임워크는 필수적이다. 이를 위해, 최근 양자 인터넷을 위한 참조 모델을 제안하고 모델의 각 계층에 필요한 기능들을 제안하는 연구들이 지속되고 있다. 이러한 연구들은 기존 인터넷의 OSI 7 계층 및 TCP/IP 5 계층을 기반으로 양자 인터넷에 적용한다. 하지만, 양자의 특성으로 인해 기존 인터넷에 사용된 기술들의 대부분은 적용이 불가능하기 때문에 양자 특성에 맞는 프로토콜 설계와 새로운 참조 모델의 정의가 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 기본적인 양자 인터넷의 구조와 기술에 대해 살펴보고, 양자 인터넷을 위한 참조 모델 관련 연구동향에 대해 기술한다. 특히, 제안한 모델의 각 계층의 핵심 기술들에 대해 자세히 살펴본다.

### II. 양자 얽힘 기반 양자 통신

양자 얽힘은 상호작용하는 양자가 거리와 무관하게 특별한 관계를 유지하는 것을 말한다. 얽힌 양자들은

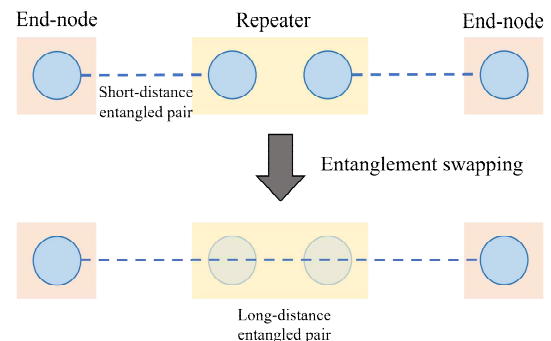


그림 1. 양자 교환을 통한 장거리 양자 얽힘 생성

어느 한 쪽의 상태가 정해지면 다른 한 쪽의 상태는 거리와 무관하게 즉시 결정된다. 이러한 특성을 활용해 양자 통신에서는 얽힌 큐비트 쌍을 임의의 데이터 큐비트를 전송하는데 사용한다.

한편, 양자 정보는 양자 채널의 노이즈, 양자 메모리의 짧은 수명 등으로 인해 쉽게 손상될 수 있다. 기존 인터넷에서는 이러한 손실 및 에러를 증폭기 또는 재전송기법을 활용하여 극복 가능하지만 양자는 그 복제불가능성으로 인해 기존 기법의 활용이 불가능하다. 이러한 특성은 장거리 양자 정보 전송을 어렵게 만든다. 따라서, 양자 얽힘 기반 양자 통신에서는 일반적으로 양자 리피터를 사용하여 양자의 특성으로 인한 문제를 회피함으로써 장거리 정보 전송을 가능하게 한다. 양자 리피터에서 양자 교환은 장거리 정보 전송을 위한 핵심 기술이다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 양자 교환을 통해 중단 노드-리피터 간 단거리 얽힘들을 소모하여 중단 간 장거리 얽힘을 생성할 수 있다. 다수의 양자 노드가 있는 환경에서 리피터-리피터 간 얽힘을 소모하여 장거리

양자 인터넷에서는 일반적으로 양자 프로세서들과 양자 리피터 혹은 양자 라우터들이 기존 인터넷을 강화하는 방식으로 공존하는 모델을 가정한다. 다수의 노드를 거쳐 중단 간 통신을 지원하기 위해 제어 메시지를 교환해야 한다. 앞서 언급했듯이, 양자 메모리는 짧은 수명을 갖고 있기 때문에 이를 교환하기 위해 기존 통신 채널이 활용된다. 즉, 양자 채널을 통해 양자 정보를 전송하며 양자 프로토콜(예, 오류 수정, 경로 설정 등)의 실행을 위한 제어 메시지 교환은 기존 채널을 사용한다.

## II. 양자 인터넷을 위한 참조 모델

본 장에서는 양자 인터넷을 위한 프로토콜 스택을 제안한 연구들과 각 스택에서의 핵심 기술에 대해 살펴본다.

### 1) 양자간 양자 얽힘 기반 프로토콜 스택

[1]과 [2]의 프로토콜 스택 계층은 물리 계층, 링크 계층, 네트워크 계층, 전송 계층, 그리고 애플리케이션 계층으로 나뉜다. 물리 계층은 특정 타임 슬롯 내에 두 양자 프로세서 간 얽힘을 생성하는 역할을 한다. 각 프로세서는 자동화 노드로 주어진 시간마다 스스로 얽힘 생성을 시도하게 된다. 두 프로세서에서 생성된 얽힘 생성을 위한 광자는 양자 중계기로 전달된다. 양자들이 양자 중계기에 도착하면 얽힘 교환을 수행하여 최종적으로 단일 홉 간 얽힌 양자 쌍을 생성하게 된다. 이 때, 양자 중계기에 거의 동시에 광자가 도착해야 양자 교환을 성공할 수 있다. 따라서, 시도 시간을 조절하기 위한 MHP 프로토콜을 제안한다. MHP는 일정 시간마다 상위 계층(즉, 링크 계층)으로부터 얽힘 생성의 필요성을 폴링하고 그 결과에 따라 양자 얽힘을 시도한다.

다음으로 링크 계층은 노드 간 양자 얽힘 생성을 확인하는 역할을 한다. 이를 위해, QEGP 프로토콜을 제안한다. QEGP는 상위 계층으로부터 얽힘 요청과 그와 관련된 정보(최소 요구 신뢰도, 노드 ID, 얽힌 양자 쌍의 수 등)를 받는다. 이를 기반으로 연결의 신뢰도를 평가하고, 얽힘 생성 요청의 스케줄링을 지원한다.

네트워크 계층에서는 장거리 얽힘 생성을 지원한다. 즉, 직접적으로 연결되어 있지 않은 노드 간의 얽힘 생성과 양자 중계기 간 얽힘을 생성한다. 또한, 네트워크 계층은 네트워크의 양자 자원을 트래킹하고 상위 계층에서의 얽힘 요청을 처리하는 얽힘 관리 서비스를 제공한다.

마지막으로, 전송 계층은 양자 순간이동을 수행하여 양자 정보의 전달을 담당한다.

### 2) 다자간 양자 얽힘 기반 프로토콜 스택

다자간 양자 얽힘은 여러 개의 노드들이 공유하는 얽힘을 의미한다. 요청이 발생하면 중단 간 양자 얽힘을 설정하는 양자간 양자 얽힘 기반 모델과 다르게 다자간 양자 얽힘 기반 모델은 요청이 들어올 시 필요에 따라 다자간 양자 얽힘의 연결을 선택적으로 사용하여 중단 간 통신을 지원할 수 있다.

[3]의 프로토콜 스택 계층은 물리 계층, 연결성 계층, 링크 계층, 네트워크 계층으로 구성되었다.

물리 계층은 양자간 양자 얽힘 기반 프로토콜 스택에서와 달리 오로지 인접한 기기 간 양자 얽힘을 생성하고, 직접적인 양자 정보 전송을 수행한다.

연결성 계층은 물리 계층의 양자 채널의 불완전성으로 인한 에러를 해결하고 장거리 양자 얽힘 생성을 담당한다. 연결성 계층은 얽힘 증류 프로토콜을 통해 양자 얽힘의 신뢰성을 향상시킨다. 만일, 얽힘 증류

프로토콜 과정이 성공하지 못하면 양자 링크가 생성되지 못하지만 연결성 계층에서는 실패를 감지하고 반복적으로 얽힘 증류 프로토콜을 사용하여 연결의 완결성을 보장한다.

링크 계층은 내부망에 분산된 노드들의 다자간 양자 얽힘 상태를 생성하고, 생성된 상태를 노드 간 공유하는 서비스를 제공한다. 이를 위해, 링킹 프로토콜이 활용된다. 링킹 프로토콜은 생성된 양자 얽힘 상태와 양자 장치의 상태를 요청된 그래프 상태(즉, 다자간 양자 얽힘 상태)로 변환한다. 또한, 연결성 계층에서와 마찬가지로 양자 증류 프로토콜을 활용하여 연결의 고신뢰성을 보장한다.

네트워크 계층은 링크 계층과는 다르게 그래프 상태 요청을 서로 다른 망에 전달하기 위해 외부망 간 얽힘을 생성하는 역할을 한다. 외부망 간 연결을 위한 장치(즉, 양자 라우터)는 담당하는 지역을 다자간 얽힌 양자 상태를 통해 연결한다. 이 때, 서로 다른 망 간 그래프 상태를 전달하기 위해서는 라우팅 프로토콜이 필요하다. 제안하는 라우팅 프로토콜은 외부망 간 연결을 위한 그래프와 링크 계층의 내부망의 그래프를 통합하여 중단 간 양자 정보 전송을 가능하게 한다.

## III. 결론

본 논문에서는 일반적인 양자 인터넷의 구조와 핵심기술에 대해 살펴보고, 양자 인터넷을 구체화하기 위해 필수적인 참조 모델, 그리고 각 계층에 적용된 핵심 프로토콜들에 대해 살펴보았다. 현재, 양자 인터넷의 참조 모델은 양자 얽힘 방식에 따라 다른 접근 방법을 취하고 있다. 앞서 언급한 것과 같이 각 접근방법에서 정의하는 계층과 그 기능이 제각각이다. 대규모 네트워크를 구성하고 관리하기 위해서는 통일된 참조 모델이 필수적인 만큼 지속적인 연구를 통해 해당 모델 설계가 필요하다.

## ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 대학 ICT 연구센터 육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2022-2021-0-01810)

## 참 고 문 헌

- [1] A. Dahlberg *et al.*, "A Link Layer Protocol for Quantum Networks," In *Proc. SIGCOMM '19: Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication*, August 2019.
- [2] W. Kozłowski *et al.*, "Designing a quantum network protocol," in *Proc. ACM CoNEXT '20, Barcelona, Spain*, December 2020.
- [3] A. Pirker, and W. Dür, "A quantum network stack and protocols for reliable entanglement-based networks,"