

All-photonic quantum repeater 연구 동향

송우영, 이원혁, 손일권*

한국과학기술정보연구원 (KISTI)

wysong@kisti.re.kr, livezone@kisti.re.kr, *d2estiny@kisti.re.kr

Recent researches on All-photonic quantum repeater

Wooyeong Song, Wonhyuk Lee, Ilkwon Sohn*

Korea Institute of Science and Technology Information (KISTI)

요 약

일반적인 양자 중계기 (Quantum repeater) 는 양자계 기반의 장기 메모리를 활용해 각 중계 노드에서 얽힘을 먼 거리로 확장하고 정제하는 구조를 가진다. 이에 반해 완전 광학적 양자 중계기(All-photonic quantum repeater) 방식은 광자 기반의 대규모 얽힘 상태를 미리 준비해두고, 오직 선형광학 소자와 측정만으로 중계 기능을 수행함으로써 메모리에 대한 필요성을 제거한다. 이러한 방식을 처음 제안한 Azuma-Tamaki-Lo 의 연구 [1] 이후, 프로토콜 내부에서 사용되는 양자오류정정 부호를 변경하거나, 내부 서브루틴에서의 확률적 벨 측정의 성공 확률을 부스팅하여 성능을 개선하는 다양한 연구가 수행되어 왔다. APQR 의 가장 초기 버전에 대해 소개하고 이후의 속도, 성능 및 실용성의 개선을 목적으로 제안된 최근까지의 다양한 연구를 개괄할 것이다.

I. 서론

양자통신에서 장거리 노드 간의 양자 얽힘을 생성하고 유지하는 기술은 보안 통신, 분산 양자 연산, 그리고 대규모 양자 네트워크의 구축을 가능하게 하는 핵심 기술로 여겨진다. Flying qubit 인 광자는 이러한 역할을 위한 가장 적절한 양자 시스템으로 간주되지만, 광섬유를 통해 전송되는 광자 qubit의 투과율(transmittance)은 거리에 따라 지수적으로 감소하여, 얽힘 상태의 전송 확률을 급격히 저하시킨다. 따라서, 단순한 직접 전송(direct transmission)만으로는 수백 킬로미터 규모의 양자 얽힘을 안정적으로 분배하는 것이 사실상 불가능하다. 이러한 한계를 극복하기 위해 도입되는 개념이 양자 중계기 (quantum repeater) 프로토콜이다.

양자 중계기의 핵심 아이디어는 긴 전송 거리를 여러 구간(segment)으로 나누고, 각 구간에서 부분적인 얽힘을 생성한 뒤 중계 노드(node) 단위로 이를 연결하여 전체 네트워크 규모의 얽힘으로 확장하는 것이다. Heralded entanglement generation (HEG) 와 Entanglement swapping (ES) 이 양자 중계기의 기본 작동 원리가 되는 양자 정보처리 프로토콜이며, 이 둘을 통해 멀리 떨어진 두 노드 간에 heralded 된 즉, 성공적인 케이스를 판별할 수 있는 방식으로 양자 얽힘을 생성하고 (HEG), 노드 간의 얽힘 상태를 교환함으로써 (ES) 더 먼 거리로 연결하고 확장할 수 있다. 장거리 전송에 대해, 하나의 양자 중계기 노드를 활용은 전송에 필요한 평균 시도 수의 관점에서 직접 전송 대비 제곱근의 개선을 가져다주고, 등간격으로 배치된 다수의 중계기 노드는 궁극적으로 평균 시도 수 관점에서 지수적인 개선을 가져와 효율적인 장거리 양자 통신을 가능케한다.

이러한 중계기에는 얽힘을 생성한 후에 그 결과를 보관하고 다음 단계의 연결에 사용하기 위한, 양자 시스템 기반의 장기 메모리가 필수적이다. 양자 메모리는 일반적으로 원자, 이온, 고체 스핀 결함 등의 정적 qubit (stationary qubits) 를 이용해 구현되어, 전송을 위한 광자 qubit와의 상호작용을 통해 양자 상태의 정보를 교환한다. 하지만 실제 구현에서 이러

한 양자 메모리의 결맞음 시간은 제한적이고, 광자와 메모리 qubit 간의 인터페이스 효율도 낮기 때문에 얽힘의 분배 속도와 신뢰도가 근본적으로 제한된다. 또한, 광자 qubit의 전송 간의 손실 (photonic loss) 이나 중계기 프로토콜 상의 조작에서 발생할 수 있는 오류 (operational errors) 를 고려하면 실제 양자 중계기의 성능은 더욱 제한되어, 중계기의 구현에는 손실과 조작 오류를 다루기 위한 능동적인 방법이 반드시 고려되어야 한다. 이러한 손실과 오류 등을 확률적 또는 확정적으로 처리하고 수정할 수 있는 다양한 방법이 있으며, 어떠한 방법을 적용하는가에 따라 양자 중계기는 1세대부터 3세대로 구분된다 [2].

1세대 양자 중계기는 확률적인 방식으로 손실과 오류를 처리하며 구체적으로는, 앞서 언급한 HEG 와 양방향 고전 통신을 필요로 하는 얽힘 증류 (entanglement distillation) 프로토콜을 활용한다. 비교적 단순한 구조를 가져 구현이 용이할 수 있고, 얽힘 자원 및 양자 메모리 자원의 관점에서 효율적이지만 양방향 고전 통신에 대한 필요성으로 인해 통신 속도와 양자 메모리의 긴 결맞음 유지 필요 등의 단점을 지닌다. 2세대 양자 중계기는 손실을 확률적으로 처리하지만, 오류는 확정적 (deterministic) 으로 처리할 수 있다. 이는 양자오류정정 (Quantum error correction, QEC) 를 도입, 부호화 된 양자 상태를 활용해 단방향 고전 통신만을 필요로 하는 구조를 가진다. 양방향 고전 통신에 대한 필요가 제거됨으로 속도가 향상되고, 부호화 된 양자 정보를 통해 일부 손실과 오류가 교정될 수 있다. 하지만, 이러한 인코딩 및 디코딩에 추가적인 연산과 자원이 요구되어 구현 난이도가 높다. 3세대는 더 강력한 Fault-Tolerant (결함 허용) QEC 를 적용, 손실과 오류 모두를 확정적으로 처리할 수 있다. 메모리 및 채널 노이즈를 모두 논리적으로 정정할 수 있는 구조로, 실시간 오류 정정이 가능하고 고속으로 얽힘을 확장할 수 있다. 다양한 오류정정 부호를 활용한 많은 연구들이 수행되었고, 이론상으로는 가장 높은 성능을 기대할 수 있으나, FT QECC 의 활용으로 인한 막대한 자원과 연산의 충실도, 물리적 오류율에 대한 높은 요구로, 현재 기술 수준에서는 현실적 구현이 어렵다.

이러한 기존의 양자 중계기와 구분되는 형태로 제안된 All-photonic quantum repeater (APQR) 또는 All-optical quantum repeater 는 양자 중계기 구현의 큰 장애물 중 하나인 양자 메모리에 대한 필요를 제거한다.

II. 본론

기존의 중계기들은 모두 얽힘 상태를 저장하고 교환하기 위해 일정 시간동안 양자 상태를 유지할 수 있는 양자 메모리를 요구하지만, APQR 은 이 과정을 광자 기반의 그래프 상태 (graph state) 와 선형광학 측정만으로 대체한다. 즉, 얽힘의 생성과 보존, 교환 과정 전체가 광자 상태의 구조적 연결로 표현되어, 중간 노드가 상태를 물리적으로 저장하지 않아도 장거리 얽힘 분배가 가능하다.

Azuma, Tamaki, Lo [1] 에 의해 처음으로 제안된 APQR 은 먼저, Repeater graph state (RGS) 라 불리는 상태를 준비한다. RGS 는 inner layer 와 outer layer 총 두 개의 layer 로 구성되고, inner layer 는 complete graph 를 이루는 m 개 qubit 의 GHZ 상태이다. outer layer 는 inner qubit 에 하나씩 붙어있기 때문에, RGS 는 $2m$ 개의 qubit 으로 구성된다. Outer qubit 은 다른 RGS 에 속한 outer qubit 과의 선형광학적 Bell 측정을 통해, 두 RGS 의 inner qubit 을 얽힘시킬 수 있다. RGS 의 예시는 아래 그림과 같다.

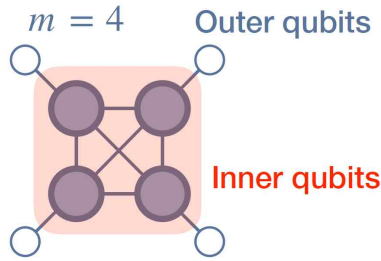


그림 1. Repeater Graph state ($m = 4$) 의 예시. Inner qubits 은 각각 tree-graph state 에 인코딩 된 logical qubit 으로 구성되고, outer qubit 은 각 inner qubit 에 붙어있다.

Ref. [1]에서 제안된 APQR을 통한 멀리 떨어진 A 와 B 간의 양자 얽힘의 분배 절차는 다음과 같다. 우선, A 와 B 사이에 N 개의 RGS 를 준비할 수 있는 major node 가 있고, 그 A, B 그리고 major node 들 사이에 총 $N+1$ 개의 minor node 가 있다고 가정하자. RGS 는 총 $2m$ 개의 qubit 즉, m 개의 inner qubits 와 m 개의 outer qubits 로 구성되어 있다. 여기서, Ref. [1]에서 제안된 프로토콜에서는 inner qubit 들이 광자 손실에 강한 성질을 갖기 위해 physical qubit 이 아닌, QECC 의 일종인 tree-graph state [3] 에 인코딩 되어있다.

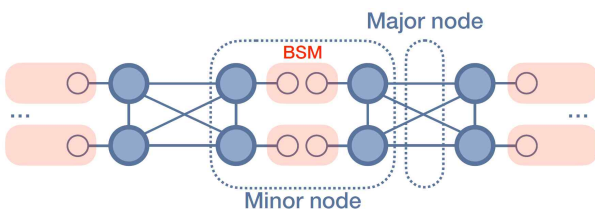


그림 2. APQR 의 모식도. Minor node에서는 인접한 두 major nodes로부터 전송된 m outer qubit 들의 선형광학적 Bell 측정 (BSM) 이 병렬적으로 수행된다.

minor node 는 인접한 두 major node 로부터 RGS 의 m 개의 outer qubits 을 받아, 총 m 쌍의 outer qubits 들에 병렬적으로 선형광학적 Bell 상태 측정 (Linear optical Bell state measurement, LOBSM) 을 수행한다. 각각의 LOBSM 의 성공확률은 $1/2$ 이지만 m 이 클수록 최소 하나의 BSM 이 성공할 확률은 증가한다. LOBSM 이 성공한 경우에 대해서는 해당 outer qubit 이 달려있는 inner qubit 에 X 측정을 수행하고, 나머지 inner qubit 들에는 Z 측정을 수행한다. 이 Z 측정들은 A, B 를 연결하는 전체 상태를 선형 클러스터 상태로 만들고, BSM 이 성공한 경우에 대한 inner qubit 에의 X 측정은 A, B 간의 상태를 Bell 쌍으로 바꾸어, 멀리 떨어진 A 와 B 사이의 양자 얽힘을 생성하는 결과를 가져온다. 이 프로토콜에서 qubit 들 즉, RGS 는 major node에서 생성되고 동시에 minor node 로 전송되어 BSM을 통해 바로 소모되고 그 BSM의 결과에 따라 inner qubit 이 수행해야 하는 단일 qubit 측정의 기저 (X 또는 Z) 만을 전해주면 되어, 양자 메모리에 대한 필요성이 제거된다.

해당 연구의 소개 이후, 다양한 변형된 형태의 양자 중계기가 제안되었다. 우선, 처음 제안된 완전 광학적 양자 중계기에서 쉽게 떠올릴 수 있는 개선점은 minor node에서 수행되는 outer qubit 간의 선형광학적 Bell 측정에 있다. 이는 두 광자 간의 간섭과 측정으로 수행되는 과정으로, 근본적으로 50%의 성공 확률을 가진다. 추가적인 광자를 활용함으로써 성공 확률을 부스팅할 수 있고 [3, 4] 이를 활용해 양자 중계기에서의 Bell 측정의 성공 확률을 높임으로 중계기 성능을 개선할 수 있다 [5]. 하지만, 이러한 추가적인 광자 또한 광 손실의 대상이 되고, 100%의 성공 확률을 위해서는 무한한 자원이 필요하다. 또는, outer qubit 에 양자 오류정정 부호 (QECC)를 활용해 minor node에서 일어나는 LOBSM 에서의 성공 확률을 높임과 동시에 여기서 발생할 수 있는 손실에 대한 내성을 부여할 수 있는 방법이 있다. Quantum Parity code (QPC) 는 손실에 대해 tolerant 한 대표적인 QECC 로, 이를 활용한 연구는 Ewert et al. [6] 에 의해 제안되었는데 해당 연구에서의 방법은 QPC 에 인코딩 된 qubit 을 직접 전송하는 형태로 APQR 보다는 3세대의 양자 리피터 프로토콜에 가깝다. Lee et al. [7] 의 연구는 QPC 에 인코딩 된 Bell 상태에 수행되는 Concatenated Bell 측정을 통해 광 손실에 대해 tolerant 하면서 Bell 측정의 성공 확률을 개선할 수 있음을 보였고 이것이 no-cloning theorem 과 선형광학의 제한에 의한 Bell 측정의 근본적인 한계까지 도달할 수 있음을 보였다. 이 외에도 더 일반적인 Graph state 로의 인코딩과 adaptive Bell 측정을 활용하는 등 [8], 다양한 QECC와 이에 적합한 Bell 측정을 통해 선형광학 Bell 측정의 성공 확률을 부스팅함과 동시에 손실과 오류에 대한 내성을 확보할 수 있기 때문에, 이러한 방법들을 APQR 에 적용하여 전송 간, 그리고 Bell 측정 간에 발생할 수 있는 손실과 에러를 효과적으로 처리하여 전송 효율을 높일 수 있다. 이 외에도 대규모 양자 얽힘 상태인 RGS를 생성하는 것 또한 쉽지 않은 과정이기 때문에, quantum emitter를 이용해 확정적으로 광자 기반 그래프 상태를 생성하고 이에 기반해 중계기를 구현하는 이론적 및 실험적 연구도 활발히 수행되고 있다 [9-11].

III. 결론

본 논문에서는 장거리 양자통신을 위한 필수요소인 양자 중계기의 목표, 작동 원리 그리고 성능에 따른 세 개의 세대에 대해 간단히 소개하고, 양자 중계기 구현의 주요한 기술적 장벽 중 한 가지인 양자 메모리에 대한 필요성을 제거한 새로운 방법인 완전 광학적 양자 중계기 (All-photonic quantum repeater) 에 대해 다루었다. 본문에서는 가장 기초적인 수준의 초기 버전의 완전 광학적 양자 중계기에 대한 설명과, 이를 개선한 연구에

대해 큰 틀에서만 일부 다루었지만, 언급하지 못한 최근 연구들이 굉장히 많고, 여러 방면에서 다양한 개선점들이 활발하게 제안되고 있다. 처음 양자 중계기 프로토콜이 제안되었던 시점에 비해 양자 기술이 괄목할만한 성장을 이룸에 따라, 양자 중계기 기술의 구현 가능성 또한 점점 커지고 있다. 현재 KISTI 에서도 대규모 양자 네트워크의 구축을 목표로 양자 중계기에 관한 연구를 진행 중이며, 국내에서도 양자 네트워크의 구현을 목표로 한 양자 중계기 기술의 연구가 더 활발히 이루어질 것을 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 한국과학기술정보연구원(KISTI)의 기본사업으로 수행된 연구입니다 (과제번호 : K25L5M2C2)

참 고 문 헌

- [1] Azuma, K., Tamaki, K., and Lo, H. K., "All-photonic quantum repeaters." *Nature communications* 6(1), 6787 (2015).
- [2] Azuma, K., et al., "Quantum repeaters: From quantum networks to the quantum internet." *Review of Modern Physics* 95(4), 045006 (2023).
- [3] Grice, W. P., "Arbitrary complete Bell-state measurement using only linear optical elements." *Physical Review A* 84(4), 042331 (2011).
- [4] Ewert, F. and van Loock, P., "3/4-Efficient Bell measurement with passive linear optics and unentangled ancillae." *Physical Review Letters* 113(14), 140403 (2014).
- [5] Pant, M., et al., "Rate-distance tradeoff and resource costs for all-optical quantum repeaters." *Physical Review A* 95(1), 012304 (2017).
- [6] Ewert, F., Bergmann, M. and van Loock, P., "Ultrafast long-distance quantum communication with static linear optics." *Physical Review Letters* 117(21), 210501 (2016).
- [7] Lee, S.-W., Ralph, T. C. and Jeong, H., "Fundamental building block for all-optical scalable quantum networks." *Physical Review A* 100(5), 052303 (2019).
- [8] Bell, T. J., Petterson, L. A. and Paesani, S., "Optimizing Graph Codes for Measurement-Based Loss Tolerance." *PRX Quantum* 4(2), 020328 (2023).
- [9] Buterakos, D., Barnes, E. and Economou, S. E., "Deterministic Generation of All-photonic Quantum Repeaters from Solid-state emitters." *Physical Review X* 7(2), 041023 (2017).
- [10] Zhan, Y. et al., "Performance analysis of quantum repeaters enabled by deterministically generated photonic graph states." *Quantum* 7, 924 (2023).
- [11] Kaur, E., Patil, A. and Guha, S., "Resource-efficient loss-aware photonic graph state preparation using atomic emitters." *arXiv:2402.00731*.