

양자 네트워크 시뮬레이터의 오픈 소스 동향 연구

최윤철, 박정수, 김성한
한국전자통신연구원

cyc79@etri.re.kr, pjs@etri.re.kr, sh-kim@etri.re.kr

A study of open-source trends in the Quantum Network Simulator

Choi Yun Chul, Park Jung Soo, Kim Sung Han
Electronics and Telecommunications Research Institute.

요 약

양자 네트워크 실험 환경을 구축하기 위해서는 고가의 전문 장비와 극저온 및 초고진공과 같은 복잡한 물리적 조건이 필요하며, 이는 실험 환경의 구성 및 유지에 있어 큰 제약으로 작용한다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 본 연구는 오픈소스 기반 시뮬레이션 도구를 활용하여 하드웨어 없이 다양한 조건에서 양자 네트워크의 성능을 분석하고 실험할 수 있는 방안을 제안한다. 이를 통해 양자 키 분배(Quantum Key Distribution, QKD)와 같은 보안 프로토콜의 성능 검증뿐만 아니라, 양자 중계기 배치 최적화, 노이즈 및 신호 감쇠 분석 등도 수행할 수 있으며, 새로운 양자 라우팅 및 네트워크 최적화 기법에 대한 연구도 가능하다. 본 논문에서는 이러한 오픈소스 기반 양자 네트워크 시뮬레이터의 기술 동향을 살펴보고자 한다.

I. 서 론

양자 네트워크는 양자 시스템을 기반으로 정보를 전송하는 차세대 통신 기술로, 빛의 입자적 성질을 갖는 광자를 주요 매개체로 활용한다. 특히, 단일광자 또는 결맞음(coherent) 광자를 이용함으로써 양자역학의 기본 원리인 중첩과 얽힘을 기반으로 보안을 제공한다. 이러한 특성은 양자 키 분배(Quantum Key Distribution, QKD)와 같은 보안 프로토콜에 효과적으로 적용될 수 있다. 그러나 양자 상태를 전송하는 양자 네트워크 기술은 장거리 전송 과정에서의 물리적 제약으로 인해 여전히 기술적 한계를 갖고 있다. 특히, 거리 확장을 위한 양자 중계기 기술과 큐비트를 안정적으로 저장하기 위한 양자 메모리 기술은 양자정보 변환 및 확장성 등의 문제로 기술개발에 어려움을 겪고 있다. 그리고, 양자 네트워크 실험 환경을 구축하기 위해서는 고가의 장비와 함께 극저온, 초고진공 등과 같은 특수한 물리적 조건을 지속적으로 유지해야 하며, 이는 연구 및 개발에 있어 상당한 경제적·기술적 부담으로 작용한다^[1].

이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로, 최근에는 양자 네트워크의 동작 특성과 성능을 분석할 수 있는 시뮬레이션 기술의 활용이 주목받고 있다. 시뮬레이션 기반 접근은 하드웨어 구축 없이 다양한 조건에서의 네트워크 성능 평가가 가능하며, 이를 통해 양자 중계기의 효율적 배치, 노이즈 및 신호 감쇠 모델링, 양자 키 분배(QKD)와 같은 보안 프로토콜의 성능 검증, 나아가 새로운 양자 라우팅 및 네트워크 최적화 기법에 대한 연구를 효과적으로 수행할 수 있다. 본 연구에서는 오픈소스 기반 양자 네트워크 시뮬레이터의 기술 동향을 살펴보고자 한다.

II. 본론

NetSquid^[2,3]는 양자 정보를 모델링하는 데 활용할 수 있는 이산 이벤트 기반 양자 네트워크 시뮬레이터로, 다양한 양자 네트워크 구성 및 프로토콜을 시뮬레이션할 수 있도록 설계되었다.

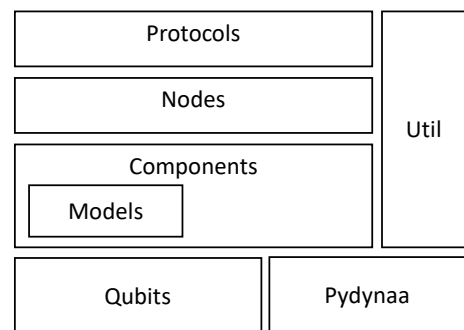


그림 1. NetSquid 시뮬레이터 모듈 구조

NetSquid 는 파이썬 언어로 'qubits', 'components', 'models', 'nodes', 'protocols', 'util' 등의 소프트웨어가 작성되었고, 그림 1 과 같이 구성된다. 시뮬레이션 엔진은 PyDynAA^[4] 라는 이산 이벤트 시뮬레이션 라이브러리를 기반으로 구현되었으며, 이는 이벤트 기반 시뮬레이션을 위한 클래스와 개념을 정의하고, 이벤트 식별자 관리, 이벤트 등록, 대기 및 실행 기능을 제공한다.

NetSquid 주요 구성 모듈은 표 1 과 같고, 양자 상태(QState) 객체를 통해 큐비트 간 상태를 공유 하고, 이를 통해 양자 정보를 추적할 수 있다. 또한 양자 상태

간의 자동 변환 기능 및 상태 분포에 대한 샘플링 기능을 지원한다. 양자 네트워크의 구성 요소는 노드, 연결, 양자 메모리, 채널, 광자 소스 등으로 모델링되며, 이들 물리적 장치는 지연, 손실, 노이즈 등의 특성을 반영한 모델을 통해 정의된다. 시뮬레이션시 각 구성 요소의 동작은 이러한 물리적 특성에 기반하여 구현되고, 시험 네트워크 구성을 위한 고전 네트워크 프로토콜 및 양자 네트워크 프로토콜을 지원한다. 프로토콜은 시뮬레이션 엔티티로서 타임라인 이벤트와 상호작용하며, 계층적 중첩이 가능하고 로컬 및 원격 동작 모두를 기술할 수 있다.

표 1. NetSquid 주요 구성 모듈

모듈	설명
qubits	큐비트 및 양자 상태(QState)를 정의. 양자 상태 간 변환, 얽힘 및 측정을 처리.
components	노드, 연결, 메모리, 채널, 소스 등 물리 장치 구성요소
Models	지연, 감쇠, 노이즈 특성 정의
Nodes	노드와 노드 간 연결 구성
Protocols	양자 통신 프로토콜 정의
util	로그, 통계, 데이터 분석 도구

NetSquid 와 관련된 오픈소스 프로젝트는 그림 2 와 같다.

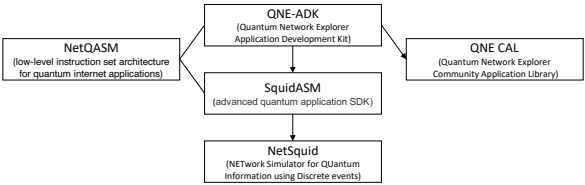


그림 2. NetSquid 관련 프로젝트

NetSquid 의 확장 프로젝트인 SquidASM 은 NetSquid 의 기능을 기반으로 하여, 보다 간편하고 모듈화된 방식으로 양자 네트워크 응용을 시뮬레이션할 수 있도록 한다. QNE-ADK^[5]는 QNE 플랫폼 상에서 양자 응용을 개발하기 위한 도구로, SquidASM 보다 높은 수준의 추상화 객체를 지원한다. QNE-ADK 에서 작성된 응용은 QNE-CAL 을 통해 공유가 가능하다. QNE-ADK 는 시뮬레이션 백엔드로 SquidASM 뿐만 아니라 실제 양자 하드웨어도 선택적으로 사용할 수 있어 실험 환경에 따라 유연한 운용이 가능하다. NetQASM^[6]은 양자 응용을 구성하는 데 사용하는 프로그램 언어로, SquidASM 및 QNE-ADK 환경에서 양자 응용의 로직을 기술하는 데 사용되며, NetSquid 과 관련된 프로젝트를 정리하면 표 2 와 같다.

표 2. NetSquid 관련 프로젝트 설명

프로젝트	설명
SquidASM	NetSquid 를 모듈식으로 확장하여 양자 네트워크 응용을 간단히 시뮬레이션할 수 있도록 만든 도구
QNE-ADK	QNE 플랫폼용 응용 개발 도구로 응용 작성, 공유 및 실행을 지원함
QNE CAL	작성된 응용을 공유 및 실행을 지원하는 응용 도구
NetQASM	NetSquid 와 SquidASM 에서 사용되는 양자 응용 프로그램 작성 언어

III. 결론

본 연구에서는 오픈소스 기반으로 개발된 NetSquid 양자 네트워크 시뮬레이터들을 중심으로, 양자 정보를 모델링할 수 있는 이산 이벤트 기반 시뮬레이션 환경을 살펴보았다. NetSquid 시뮬레이터는 파이썬 기반의 라이브러리 및 코어 엔진으로 구성되어 있으며, 시뮬레이터 내에 포함된 프로토콜 및 유틸리티를 통해 양자 네트워크의 동작을 이해할 수 있도록 지원한다.

이러한 오픈소스 시뮬레이터를 활용함으로써, 고비용의 실험 환경 없이도 양자 중계기 배치 최적화, 노이즈 및 신호 감쇠 분석, 양자 키 분배(QKD)와 같은 보안 프로토콜의 성능 검증이 가능하며, 나아가 새로운 양자 라우팅 및 네트워크 최적화 기법의 연구도 수행할 수 있다. NetSquid 프로젝트에서는 관련 기능을 실습할 수 있도록 예제 및 튜토리얼을 함께 제공하고 있어, 연구자 및 개발자가 양자 네트워크 기술을 손쉽게 실험하고 검증할 수 있는 기반을 마련하고 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.RS-2025-02219147, 신뢰 기반 인공지능 학습모델의 교환 및 공유 표준개발)

참 고 문 헌

- [1] “2024 년 양자정보기술백서”, https://www.kqic.kr/main/q_info_tech_whitepaper_2024_01.pdf
- [2] NetSquid (NETwork Simulator for QUantum Information using Discrete events, <https://netsquid.org/>
- [3] Coopmans, Tim, et al. "Netsquid, a network simulator for quantum information using discrete events." Communications Physics 4.1 (2021): 164.
- [4] PyDynAA, <https://pypi.org/project/pydynaa/>
- [5] Quantum-Network Explorer, <https://www.quantum-network.com/>
- [6] NetQASM, <https://github.com/QuTech-Delft/netqasm>