

# Quantum Networks

Quantum Internet; Quantum Networks; Entanglement Routing

陈科

Faculty of Artificial Intelligence  
School of Information Engineering  
Nanchang University

量子网络调研工作第一次汇报  
2023 年 5 月 17 日

类别经典互联网传输比特，量子互联网传输量子比特。

## 量子网络的目标

Enabling quantum communication between local quantum processors anywhere on earth.

- Secure Communication: 安全量子通信。
- Secure Quantum Computing in the Cloud: 安全的量子云服务。
- Clock synchronization, Pass Identification, Position Verification, Online Games: 时钟同步、身份验证方法、位置认证方法、量子网络游戏。（量子密钥分发技术）
- Quantum Computing Clusters, Quantum Distributed System: 量子计算集群、量子分布式系统

# What is a quantum network?

下图是一个简单的量子网络例子：

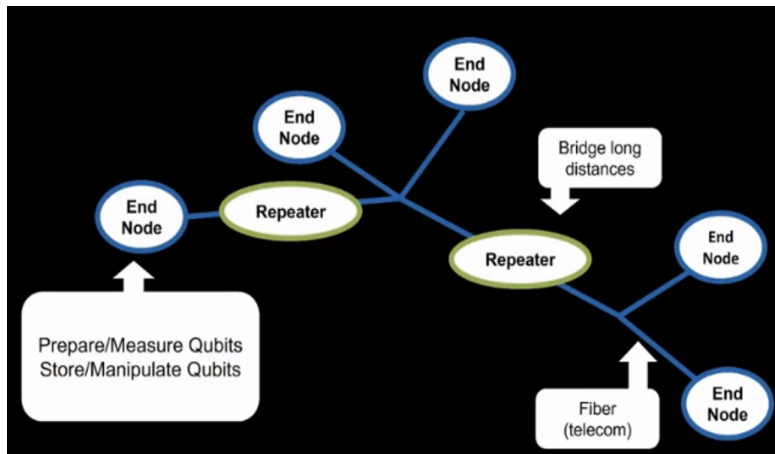


图: A quantum network example

基本上是通过量子密钥分发 (QKD) 和基本量子纠错进行实现：

- Commercial at short(100kms) distances. Survey by Alleaume et al, Theoretical Computer Science 2014.
- Entanglement over a distance of  $> 1200\text{km}$  via satellite Pan Group, science, July 2017. (量子卫星)
- **Two quantum processors** at the distance of **1.3km**: Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3km.
- **Two quantum memories** in the same lab, **50km** fiber.(Nature 2020)
- **1 Quantum processor** and **photon traveling 50km**.(2019)

挑战：

- Distance: longer distances.
- Functionality: not only the QKD.

# Quantum Repeater (量子中继器)

## Repeater 的作用

实现更长距离的量子比特间的传输，实现多跳量子网络。

The entanglement routing problem whose objective is build long-distance entanglements via **untrusted repeaters** for concurrent source-destination pairs through multiple hops.[1]

**Trusted repeaters problem:** 可信中继器将知道量子比特信息，将提高信息被窃取的概率，因此上述文章采用 untrusted。

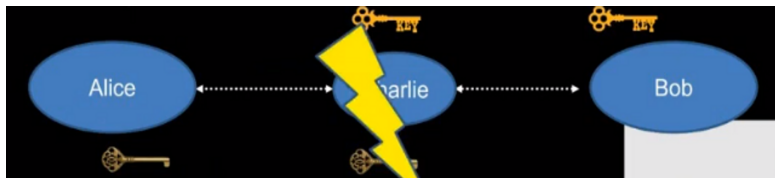


图: Trusted repeaters problem

为什么要长篇大论的讲述长距离传输、为什么长距离的量子比特这么难发送？

## 原因

根本原因：无法复制量子比特，只能通过量子隐形传态实现传输，并且无法实现撤销操作。

技术原因：量子比特相干时间短，难以同时操作多个量子比特，并且难以建立直接链接的长距离量子纠缠。

论文"Link Layer"[2] 中主要提出了量子中的网络协议栈，并且设计了 Link layer 和 Physics layer。

论文"Routing"[1]，针对不可信中继器实现了多跳量子拓扑网络，实现量子纠缠路由。(Network layer)

# Qubits Teleportation Methods

目前量子网络中操作纠缠的主要两个操作为：

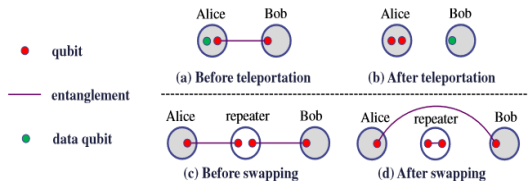


Figure 1: (a-b) Quantum teleportation to transmit a qubit (consuming a local or distant entanglement). (c-d) Entanglement swapping to build a long-distance entanglement.

图: Quantum teleportation and Entanglement swapping[1]

(1) 两者都需要消耗纠缠; (需要产生量子纠错) (2) 需要经典比特的传递; (需要经典网络) (3) 需要存储量子比特。(Quantum memories)

# Physical Entanglement Generation

下图是具体物理过程中的一种产生纠缠的方法，类似一个 entanglement swapping 的过程：

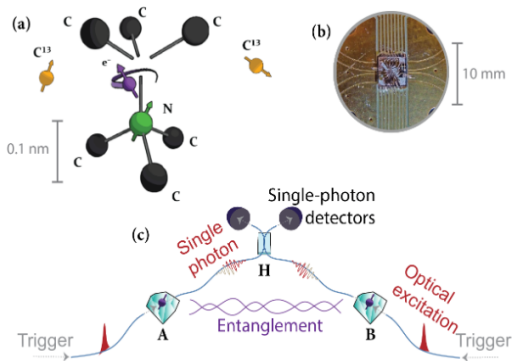


图: Physical Entanglement Generation[2]



# Quantum Network Stack

类似于经典网络，量子网络中也定义一系列的网络协议层级。

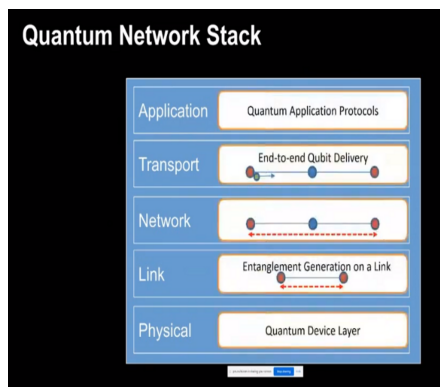


图: Quantum Network Stack[2]

- 1 Physical layer: 量子器件层，量子比特、物理设备以及它们的控制。（物理学）
- 2 Link layer: 纠缠产生或链接。
- 3 Network layer: 通过中间节点产生多跳纠缠。
- 4 Transport layer: 信息的输入和量子比特传输实现。
- 5 Application: 应用程序协议。

# Quantum Network Stack

类似于经典网络，量子网络中也定义一系列的网络协议层级。

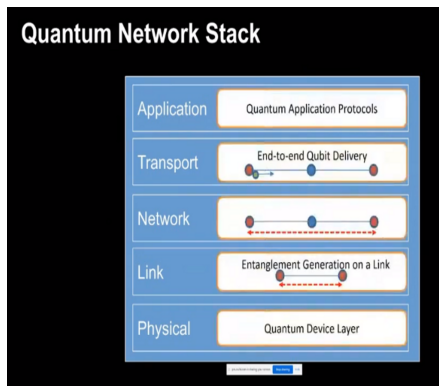


图: Quantum Network Stack[2]

- 1 Physical layer: 量子器件层，量子比特、物理设备以及它们的控制。（物理学）
- 2 Link layer: 纠缠产生或链接。
- 3 Network layer: 通过中间节点产生多跳纠缠。
- 4 Transport layer: 信息的输入和量子比特传输实现。
- 5 Application: 应用程序协议。

# Link Layer

类似于经典网络，量子网络中也定义一系列的网络协议层级。

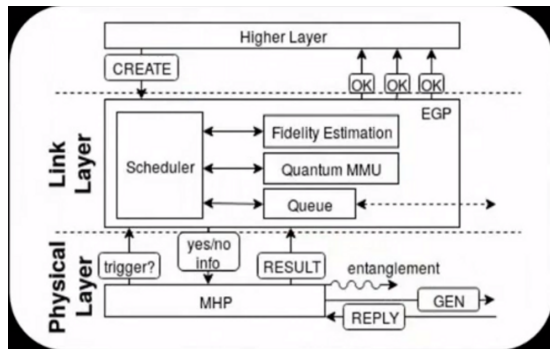


图: Quantum Network Stack[2]

- 1 发送 CREATE 命令，从队列并发取出所需纠缠对任务，传入 Scheduler。
- 2 Physical 层告诉 Link 层可触发 (trigger)。
- 3 Link 层返回 yes 和 no 的信息。
- 4 物理层告诉 link 层是否成功产生纠缠，成功返回 OK 告诉高层。
- 5 如果不成功的话，多次尝试，一段时间后再告诉高层是否成功产生了纠缠。

# Concurrent Entanglement Routing

本篇工作关于的问题是**纠缠路由问题**，即在大规模的量子网络，利用**多跳量子网络与不可完全信任的中继器**，可以同时为并发的源与目的地址实现长距离的量子纠缠连接，满足大规模量子通信的需求。（因为中继器的不可信性，在通信过程中必须采取措施来保证信息的安全性不被中继器获取）

创新点：

- 描述了一个新的量子纠缠路由模型，可以适用于任何网络拓扑结构。
- 提出了两个新的量子纠错路由算法，Q-PASS 和 Q-CAST。
- 提出了一个新的指标：预期吞吐量 (EXT) 。

实验算法：我们将 Q-PASS 和 Q-CAST 与量子网络研究中使用的两种现有路由算法（单链路多路径路由 (SLMP) [3]（一种电路交换式协议）和贪婪路由（一种分布式协议 [4]）进行比较。

## 实验方法：

- 硬件平台：NV[2] 制作的量子处理器，产生纠缠比消耗纠缠快。超级计算机 [2]，实现大规模模拟。
- 模拟器：NetSquid（离散事件模拟器 [2]），SimulaQron(应用程序级模拟器)，QuantumRouting(量子路由模拟 [1])

## 实验指标：

- 延迟：纠缠请求之间的时间，每次纠缠产生一个纠缠对 [2]。
- 吞吐量：每秒纠缠对的数量 [2]。
- 公平性：网络之间不同节点的性能差异 [2]。
- 保真度：产生量子纠缠的质量 [2]。
- 跳数：传输过程中，经过中间节点的数量 [1]。
- 预期吞吐量 (EXT)：量化网络拓扑上的端到端路径 [1]。

下面是一些学习过程中查找到的相关资料：

- QuTech: 主页, twt
- Quantum Network Explorer (QNE): 可在线访问我们的量子互联网演示器并了解其应用程序和功能。
- Stephanie Wehner: 量子网络方面的文章, [2] 也参与。谷歌学术论文 Quantum Networks: From a Physics Experiment to a Quantum Network Systems 视频
- EU Quantum Internet Alliance: 量子互联网联盟
- Quantum Cryptography: edX QuCryptoX

# 比较老的推荐论文

下面应该算是一些比较经典的论文，视频中推荐的：

## Link Layer

A. Dahlberg, M. Skrypczyk et al., A link layer protocol for quantum networks, ACM SIGCOMM, 2019

## Introduction to Quantum

Nielsen & Chuang, Quantum Computation and Quantum Information, 10th edition, 2011, Cambridge University Press

## Overview Articles

H. J. Kimble. 2008. The quantum internet. Nature 453, 7198 (2008), 1023.

S. Wehner et al. 2018. Quantum internet: A vision for the road ahead. Science 362, 6412 (oct 2018). Free download via <https://qutech.nl/stephanie-wehner-group/wehner-group-publications/>

R. Van Meter. 2012. Quantum networking and internetworking. IEEE Network 26, 4 (2012), 59–64.

W. J. Munro et al. 2015. Inside quantum repeaters. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 21, 3 (2015), 78–90.

N. Sangouard et al. 2011. Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics. Reviews of Modern Physics 83, 1 (2011), 33.

R. Van Meter, 2014, Quantum Networking, Wiley ISTE, ISBN-10 : 9781848215375

W. Dür and H. J. Briegel. 2007. Entanglement purification and quantum error correction. Reports on Progress in Physics 70, 8 (2007), 1381.

W. Kozłowski et al, Towards large-scale quantum networks. In Proceedings of the Sixth Annual ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (pp. 1-7), 2019.

图: Some Paper

# 参考文献 I

- [1] Shouqian Shi and Chen Qian. “Concurrent Entanglement Routing for Quantum Networks: Model and Designs”. In: *Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication*. Virtual Event USA: ACM, July 2020, pp. 62–75. ISBN: 978-1-4503-7955-7. DOI: 10.1145/3387514.3405853. (Visited on 05/11/2023).
- [2] Axel Dahlberg et al. “A Link Layer Protocol for Quantum Networks”. In: *Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication*. Aug. 2019, pp. 159–173. DOI: 10.1145/3341302.3342070. arXiv: 1903.09778 [quant-ph]. (Visited on 05/16/2023).
- [3] Kaushik Chakraborty et al. *Distributed Routing in a Quantum Internet*. July 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1907.11630. arXiv: 1907.11630 [quant-ph]. (Visited on 05/16/2023).



- [4] Mihir Pant et al. “Routing Entanglement in the Quantum Internet”. In: *npj Quantum Information* 5.1 (Mar. 2019), pp. 1–9. ISSN: 2056-6387. DOI: 10.1038/s41534-019-0139-x. (Visited on 05/16/2023).