

保真度感知的自适应量子路由协议研究与仿真

王思图

导师：施新刚老师

计算机科学与技术系

2026-01-14

Outline

研究背景与意义

现有工作调研与分析

研究方法与技术路线

研究计划

总结

Outline

研究背景与意义

现有工作调研与分析

研究方法与技术路线

研究计划

总结

量子互联网的愿景与挑战

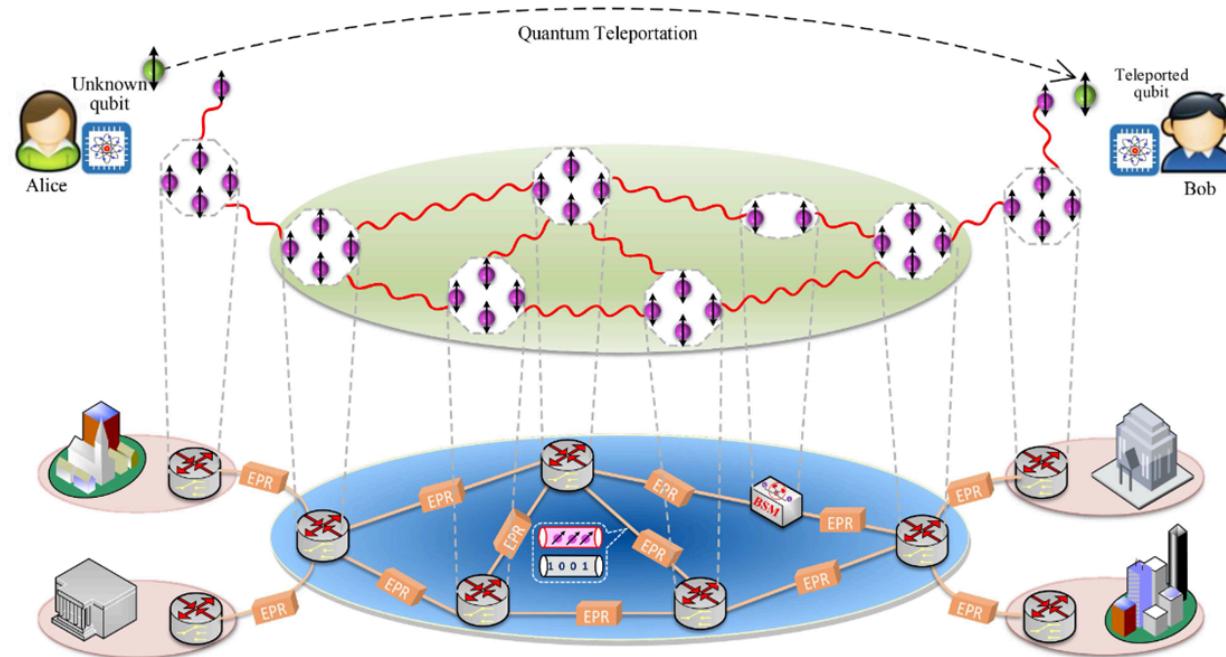


Fig. 28. The structure of an entanglement-assisted quantum network.

量子互联网的目标在分布式节点间建立高质量量子纠缠，为分布式量子计算、QKD和量子传感网络等应用提供支持。

量子互联网的愿景与挑战

核心需求：

1. 高保真度：纠缠保真度衡量实际纠缠态与理想态的相似程度，量化噪声、退相干等导致的品质衰减，直接决定量子网络任务的可靠性。
2. 多跳互联：量子信号随距离指数衰减，需通过量子中继器进行纠缠交换与纯化，实现多跳纠缠分发，建立长距离端到端量子连接。

关键挑战：

- 纠缠资源易衰减（噪声、存储退相干）
- 生成过程概率性（纠缠建立成功率 < 1 ）
- 路由决策需在保真度、成功率、时延之间进行复杂权衡。

问题的提出：现有路由机制研究的局限

- 路由优化目标局限：多数协议（如 Q-OSPF）使用“尽力而为”或“阈值满足”的思路，即将保真度仅视为由用户指定的硬阈值 ($F > F_{\text{th}}$)。→ 缺陷：忽略了在合格路径中进一步优化保真度对提升应用性能的巨大价值。
- 缺乏混合环境验证：现有研究多在纯量子模拟器（NetSquid 等）中验证，忽略了经典控制信令与量子数据流在共享网络资源时的竞争与拥塞影响。

本课项目标：设计以保真度为连续优化目标的自适应路由，并在量子-经典混合仿真平台（QNS-3）中验证。

Outline

研究背景与意义

现有工作调研与分析

研究方法与技术路线

研究计划

总结

现有工作：量子路由

Mihir Pant (npj QI 2019) & K. Chakraborty (IEEE TQE 2019)

- **机制**：利用多路径多样性 (Multipath Diversity) 进行准贪婪路由；或将纠缠分发建模为多商品流 (Multicommodity Flow) 问题。
- **分析**：主要侧重于挖掘网络拓扑的连通性与速率潜力。其模型通常假设链路属性相对静态，忽略了节点排队时延引入的动态存储退相干对保真度的影响。

ERA (Caleffi, TWC 2019)

- **机制**：提出使用路由代数计算链路纠缠生成成功率启发的生成策略，解决复合 Metric 计算问题。
- **缺陷**：优化目标仍偏向建立成功率，缺乏对保真度的优化能力。

现有工作：量子路由

Q-Cast (Shouqian Shi, IEEE T-COM 2019)

- 机制：基于时间扩展图解决多请求并发竞争问题，设计吞吐量最优路由。
- 缺陷：侧重于解决资源冲突，保真度仅作为次要约束，难以满足高保真计算任务需求。

REPS (Yangming Zhao, INFOCOM 2021)

- 机制：在相邻节点间预备冗余纠缠链路，动态选择成功链路以应对概率性失败。
- 分析：这是一种“以量换稳”的策略，资源消耗巨大 (Resource-hungry)；其核心通过冗余提升吞吐量，而非精细化提升单次纠缠的质量。

现有工作：量子路由

EFiRAP (Yangming Zhao, INFOCOM 2022)

- **机制**: 首次量化 E2E 保真度，协同优化路由选择与链路纯化策略。
- **局限 A**: 目标偏差。仍遵循“Maximize Throughput s.t. Fidelity > Threshold”范式，而非直接最大化保真度。
- **局限 B**: 仿真失真。纯化需要复杂的经典协商，现有纯量子仿真无法评估经典控制平面拥塞导致的信令高时延对纯化协议的影响。

综上所述，现有路由协议的研究主要集中在提高建立成功率与吞吐量，忽视了保真度的连续优化，也没有考虑经典网络行为对量子性能的影响。

仿真平台：隔离与融合

现有工具（NetSquid, SeQUeNCe）：

- **优势**：物理层模型精细（如密度矩阵演化）。
- **缺陷**：模拟隔离。量子事件调度与经典网络协议栈（TCP/IP）分离。
- **后果**：无法模拟路由控制报文丢包、拥塞导致的时延抖动对量子纠缠（存储退相干）的连锁反应。

QNS-3 平台：

- 基于 NS-3 构建，支持量子-经典混合事件同轴驱动。
- **现状**：仅有物理/链路层模型，缺乏网络层（Layer 3）路由协议栈。

Outline

研究背景与意义

现有工作调研与分析

研究方法与技术路线

研究计划

总结

核心算法：考虑保真度的路径度量指标

目前的协议设计暂时考虑使用传统的 OSPF 算法进行最优路径的计算，通过设计链路 e 的权重 w_e ，在“保真度优先”和“成功率优先”间做权衡：

$$w_e = \underbrace{\alpha \cdot [-\log(F_{\text{est}}(e))]}_{\text{保真度项}} + (1 - \alpha) \cdot \underbrace{[-\log(p_e)]}_{\text{成功率项}}$$

自适应策略 α ：

- 网络空闲/高保真业务：增加 α ，优先选 F_{est} 高的路径（哪怕跳数稍多）。
- 网络拥塞/时延敏感：减少 α ，优先选 p_e 高、建立快的路径，规避严重退相干。

核心算法：考虑经典网络影响的保真度预估

在上述的权重计算中，使用考虑受经典网络行为影响的保真度预估模型 $F_{\text{est}(P)}$ ：

$$F_{\text{est}}(P) = F_0 \cdot \underbrace{\left(\prod_{e \in P} \eta_e \right)}_{\text{交换与链路损耗}} \cdot \underbrace{\exp\left(-\frac{T_{\text{total}}(P)}{\tau}\right)}_{\text{存储退相干损耗}}$$

- η_e : 链路 e 的操作保真度因子
- $T_{\text{total}}(P)$: 端到端建立预估总时延（受到经典网络行为影响）
- τ : 量子存储器相干时间

创新点：将经典网络导致的时延显式引入保真度模型，能够捕捉网络拥塞导致的质量下降。

系统实现：QNS-3 协议栈开发

在 NS-3 框架内实现全功能的量子网络层，需解决三大关键难点：

1. 混合流量的统一调度

- 扩展 NetDevice，使其能同时处理微秒级量子事件（纠缠生成）和毫秒级经典数据包。
- 解决经典仿真时间轴与量子状态演化的同步问题。

2. 控制平面集成

- 设计封装在 IP 包中的量子路由协议 (Q-LSA)，让量子节点能利用成熟的 TCP/IP 栈交换链路状态。

3. 跨层资源接口

- 在 L3 路由层实现对物理层量子资源 (Qubit 状态、纠缠对句柄) 的锁定与释放接口。

Outline

研究背景与意义

现有工作调研与分析

研究方法与技术路线

研究计划

总结

时间规划

1. 第 1-4 周：理论建模与设计

- 完善保真度衰减模型各项参数的计算方法，并确保其可在工程实践中高效估算。
- 完成路由协议报文结构设计

2. 第 5-9 周：QNS-3 协议栈编码

- 实现量子网络层管理相关模块
- 调试经典-量子混合通信接口

3. 第 10-13 周：仿真实验与评估

- 搭建 Grid/Random 拓扑，引入背景流量
- 对比基准算法（Hop-count, Static-Threshold）
- 确定性能指标（E2E 保真度、建立成功率、时延分布等）并进行仿真

4. 第 14-16 周：论文撰写与答辩

Outline

研究背景与意义

现有工作调研与分析

研究方法与技术路线

研究计划

总结

总结

本研究致力于解决量子路由中“保真度优化缺位”与“混合仿真缺失”两大痛点。

预期成果：

1. 提出基于存储退相干模型的保真度感知自适应路由算法。
2. 在 QNS-3 平台填补网络层协议支持，实现混合流量环境下的路由协议栈。

汇报完毕

敬请各位老师批评指正