

面向 QNS-3 的保真度感知自适应量子路由协议研究与实现

王思图

计算机科学与技术系

2026-01-16

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

愿景: 在分布式节点间建立高质量量子纠缠，支撑分布式量子计算、QKD 和量子传感网络。

核心需求:

1. **高保真度:** 应用性能（如计算成功率）与其正相关。
2. **多跳互联:** 需通过中继器建立长距离端到端连接。

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**（成功率 < 1 ）
- 路由决策需在**保真度**、**成功率**、**时延**间进行复杂权衡。

问题的提出：现有路由机制的局限

现有量子网络通常沿用“尽力而为”或“阈值满足”的思路：

- **路由目标错位**：多数协议（如 Q-OSPF）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 I: 多路径与流规划路由

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

- **机制:** 利用多路径多样性 (Multipath Diversity) 进行准直路由; 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) & SLGR (Chakraborty, INFOCOM)

- **机制:** 提出纠缠路由代数或顺序链路生成策略, 解决复合 Metric 计算问题。
- **缺陷:** 优化目标仍偏向建立成功率; 缺乏对保真度的连续优化能力。

现有工作 II: 并发调度与冗余机制

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

- **机制:** 基于时间扩展图解决多请求并发竞争, 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 III: 保真度感知与纯化策略

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 (Purification) 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。
→ 这直接引出了本课题在 QNS-3 进行混合网络仿真的必要性。

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）。
- **致命缺陷**: 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：保真度演化与路径度量

建立综合考虑链路噪声与存储退相干的路径保真度预估模型 $F_{\text{est}(P)}$:

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

- 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（含排队等待）
- τ : 量子存储器相干时间

创新点: 将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。

核心算法：自适应动态权重机制

设计动态链路权重 $w_{e(t)}$, 在“保真度优先”和“成功率优先”间平滑切换:

$$w_{e(t)} = \underbrace{\alpha(t) \cdot \left[-\log\left(\eta_e \cdot e^{-\frac{t_{\text{wait}}}{\tau}}\right) \right]}_{\text{保真度项}} + (1 - \alpha(t)) \cdot \underbrace{[-\log(p_e)]}_{\text{成功率项}}$$

自适应策略 $\alpha(t)$:

- 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。

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