

# 开题报告

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

研究方法与计划

研究总结

# Outline

研究背景与意义

现有工作调研

研究方法与计划

研究总结

# 量子互联网的愿景

## 量子互联网的愿景

量子互联网的目标是在分布式节点间建立量子纠缠态。几个重要应用包括:

1. 分布式量子计算
  - 实现远程量子门操作
  - 扩展量子计算机规模
2. 量子密钥分发 ( QKD )
  - 实现无条件安全的广域加密通信
3. 量子增强型传感网络
  - 实现超高精度分布式测量

共性需求: 高保真度、可扩展的多跳纠缠分发

# 从点对点链路到多跳网络

## 从点对点链路到多跳网络

现状：实验系统已实现点对点量子通信

- 卫星-地面量子通信（墨子号等）
- 城市光纤 QKD 网络（合肥、北京、济南等）

瓶颈：如何高效、可靠地建立多跳端到端纠缠

关键角色：

1. 量子中继器：克服信道损耗与距离限制
2. 网络层路由协议：协调多节点间纠缠建立

# 量子路由 vs 经典路由

## 量子路由 vs 经典路由

经典路由核心指标:

- 时延、带宽、丢包率
- 优化目标: 吞吐量最大化或时延最小化

量子路由的独特性:

- 纠缠资源易衰减 ( 噪声、退相干 )
- 纠缠生成具有概率性 ( 成功率  $< 1$  )
- 中继操作 ( 如纠缠交换 ) 引入额外保真度损耗

核心问题: 如何在路由决策中有效纳入保真度约束与优化

# 当前量子路由协议的局限

## 当前量子路由协议的局限

主流范式：将保真度视为**阈值约束**（“满足即止”）

典型两阶段算法：

1. 筛选出所有预计保真度  $F_{\text{est}} \geq F_{\text{th}}$  的路径
2. 在合格路径中优化其他指标（如跳数、时延）

存在问题：

- 对高保真度敏感应用（如分布式计算）支撑不足
- 未充分利用网络中高质量链路资源
- 静态阈值难以适应动态网络状态

保真度优化潜力未被充分挖掘

# 仿真验证的挑战

## 仿真验证的挑战

现有量子网络模拟器: NetSquid、SeQUeNCe、QuISP 等

关键局限性: 与经典网络模拟器分离

无法真实模拟:

1. 量子与经典业务共存时的资源竞争
2. 混合协议栈的交互行为
3. 经典控制信道排队、拥塞对量子业务的影响

缺乏: 支持量子-经典混合仿真的统一平台



# qns-3 模拟器

## qns-3 模拟器

首款基于 NS-3 工业级网络模拟器的量子扩展

核心创新: 量子事件与经典 TCP/IP 协议栈同轴运行

支持能力:

1. 量子-经典混合流量仿真
2. 高保真量子噪声模型集成（张量网络/稳定子）
3. 大规模拓扑下协议性能评估

当前局限: 缺少网络层路由协议实现

- 仅提供物理层和链路层模型
- 无法模拟多跳量子网络的核心功能

# 本课题的研究定位

## 本课题的研究定位

科学问题： 如何设计一种能主动优化端到端纠缠保真度的量子路由协议？

工程问题： 如何在 qns-3 中实现完整的量子网络层协议栈并进行混合仿真验证？

研究意义：

1. 理论层面：

- 推动量子路由从“满足阈值”向“主动优化保真度”演进
- 探索保真度作为连续优化目标的可行性

2. 工程层面：

- 填补 qns-3 网络层空白
- 为混合网络研究提供原型与案例

# Outline

研究背景与意义

现有工作调研

研究方法与计划

研究总结

# 量子路由协议代表工作

## 量子路由协议代表工作

**Routing entanglement in the quantum internet** (Caleffi, 2017) 提出纠缠路由代数 (ERA) 框架, 将链路建模为可同时表征纠缠对数量和保真度上限的代数对象。

**A quantum network stack and protocols for reliable entanglement-based networks** (Dahlberg et al., 2019) 提出完整的量子网络协议栈 (QNP), 定义面向连接的端到端量子通信框架, 包含连接建立、维护与拆除流程。

**Fidelity-aware multipath routing for multipartite state distribution in quantum networks** (Sutcliffe et al., 2025) 针对多体纠缠态分发, 提出保真度感知的多路径路由协议, 在动态路由中最大化最终 GHZ 态的保真度下界。

# 模拟器代表工作

## 模拟器代表工作

**Control Flow Adaption: An Efficient Simulation Method For Noisy Quantum Networks** (Lin et al., 2024) 提出控制流适应 (CFA) 方法, 通过将经典控制流编码到量子电路中, 显著提升 LOCC 协议的模拟效率。

**Simulation of Entanglement-Enabled Connectivity in QLANs using SeQUeNCe** (Mazza et al., 2024) 给出了可配置的 QLAN 拓扑生成脚本与 SeQUeNCe 用例

# Outline

研究背景与意义

现有工作调研

研究方法与计划

研究总结

# 研究方法：路由协议设计

1. 保真度衰减模型建立
  - 综合考虑链路固有噪声、纠缠交换操作损耗
  - 加入存储器退相干效应的指数衰减项、量化路径长度与建立时延对最终保真度的联合影响
2. 自适应权重调整机制
  - 将保真度纳入优化目标
  - 引入动态权重参数，综合优化吞吐率和保真度
3. 动态路径选择策略
  - 网络负载轻时优先选择高保真度路径
  - 网络拥塞时转向选择高成功率、低时延路径

# 研究方法： 模拟器实现与验证

## 1. 平台选择与优势

- 选用 qns-3 作为实现平台
- 统一时间轴模拟量子-经典混合网络， 支持真实网络环境下的协议测试

## 2. 协议栈实现关键

- 设计量子控制报文格式
- 实现量子与经典控制平面集成
- 完成量子资源管理与调度接口

## 3. 性能评估设计

- 构建多跳量子网络仿真场景
- 评估平均保真度、高保真交付成功率等关键指标



# 研究计划

研究总周期为 16 周，分为四个阶段：

1. 第一阶段（第 1-4 周）
  - 完成算法详细设计，规划协议栈架构与实验方案
2. 第二阶段（第 5-9 周）
  - 在 qns-3 平台编码实现协议栈，完成核心功能模块开发
3. 第三阶段（第 10-13 周）
  - 运行仿真实验并收集数据，分析算法性能与优势
4. 第四阶段（第 14-16 周）
  - 撰写毕业论文，准备毕业答辩材料

# Outline

研究背景与意义

现有工作调研

研究方法与计划

研究总结

## 研究总结

研究背景： 现有量子路由协议将保真度视为静态阈值约束，而多数应用需要将保真度作为连续优化目标。

研究内容： 设计保真度感知自适应路由算法，并在 qns-3 仿真平台实现完整协议栈。

方法创新： 提出将保真度作为连续优化目标的路由算法；在 qns-3 中实现量子网络层协议栈，支持量子-经典混合仿真

预期成果： 理论层面： 将保真度从约束条件提升为优化目标；工程层面： 填补 qns-3 平台网络层空白；验证层面： 在真实混合网络环境中系统评估算法性能

## 汇报完毕

敬请各位老师批评指正