



综述

量子互联网关键技术与发展研究

刘姿杉, 赖俊森, 赵文玉
(中国信息通信研究院, 北京 100191)

摘要: 量子互联网将量子计算、量子测量与通信相融合, 可谓是量子信息技术演进的的未来目标。然而, 量子力学规律的限制, 例如量子不可克隆、量子纠缠与测量坍塌等, 对网络的网络功能、协议设计以及传输与中继等方面提出了新的挑战。首先介绍了量子互联网的基本概念与发展路径, 考虑量子通信特性与经典通信的不同之处, 从量子物理设备、网络协议、量子退相干与量子中继等方面对实现量子互联网的关键技术进行总结, 并对量子互联网的发展进行了展望与建议。

关键词: 量子互联网; 量子通信; 关键技术

中图分类号: TN915.02

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022034

Quantum Internet: key technologies and future prospect

LIU Zishan, LAI Junsen, ZHAO Wenyu

China Academy of Information and Communication Technology, Beijing 100191, China

Abstract: The quantum Internet integrates quantum computing, quantum measurement and communication, which can be described as the future goal of the evolution of quantum information technology. However, due to the restrictions of the laws of quantum mechanics, such as quantum teleportation, quantum entanglement, quantum measurement and non-cloning, which all pose new challenges to the quantum networking design. The basic concepts and development paths of the quantum Internet were firstly introduced, and the implementation differences between the classical network and the quantum network were explained. Considering the difference between quantum communication and the traditional communication, the key technologies for realizing the quantum Internet including the quantum physical devices, networking protocol, quantum decoherence and quantum relay were introduced, and finally the prospect and suggestions for developing quantum Internet was presented.

Key words: quantum Internet, quantum communication, key technology

0 引言

由于量子计算在计算性能上的巨大效率优势

以及对人工智能、军事和商业等领域潜在的推动与影响作用, 量子技术的发展已经成为目前国际技术竞争的重要领地^[1]。2020年2月7日, 美国

收稿日期: 2021-08-17; 修回日期: 2022-02-09

基金项目: 青年科学基金资助项目 (No.62006248)

Foundation Item: The National Science Fund for Young Scholars(No.62006248)

白宫发布《美国量子网络战略构想》^[2], 确立了美国量子网络的发展目标与技术发展计划, 使得这一概念引起市场和国内外研究界的广泛关注。量子信息网络, 也称量子互联网, 基于量子通信技术产生、传输和使用量子态资源, 并通过量子链路与经典链路的协同来实现量子信息处理系统或节点之间的互连, 从而进一步提高量子信息传输和处理能力, 并可扩大量子比特操作的数量^[3]。通过采用分布式的范式, 随着互连的量子设备数目的增多, 量子互联网可以被看作由大量量子比特构成的虚拟量子计算机, 实现计算能力的指数级加速^[4]。然而, 量子互联网的实现并非易事, 它受到经典通信系统所没有的量子力学特性的影响与限制, 包括不可克隆、测量坍塌、量子纠缠原理等。例如, 传统网络可以完整复制和放大信号的假设在量子网络中由于不可克隆原理而并不成立。本文在此背景下, 首先对量子互联网的基本概念与发展路径进行介绍, 对实现量子互联的关键技术进行总结。最后, 探讨了量子互联网的实现所面临的挑战并给出了相关发展建议。

1 量子互联网基本概念与发展现状

量子互联网与传统互联网所涉及的概念对比见表 1。传统互联网利用经典通信技术来遵循经典物理学原理传递经典比特, 目前发展最为成熟的量子密钥分发网络, 包括量子密钥分发 (quantum key distribution, QKD)、量子认证 (quantum authority) 和量子密集编码 (quantum dense coding, QDC) 等^[5]则是利用量子态作为信息比特的载体, 加密经典信息或量子比特。在 Wehner 等人^[6]发表在 *Science* 的论文中所描述量子互联网 6 个发展阶段中, 量子密码技术属于第 0 阶段, 它所描述的并非真正的量子网络, 而是用户能够创建量子密钥并在相距遥远的通信双方之间进行密钥的分发, 利用密钥的安全性来保证通信的保密性。

相反, 量子互联网丰富和扩展了量子通信范式以在量子信息设备之间进行量子信息的传输。

表 1 量子互联网与传统互联网概念对比

对比项	经典通信技术	量子通信技术
经典比特 (bit)	传统互联网	QKD、QA、QDC
量子比特 (qubit)	—	量子互联网

随着量子通信与量子计算技术的发展, 量子信息网络的关注点已经从量子密钥分发和量子态隐形传输发展为远距离量子计算设备之间的互联互通, 从实现经典网络的可信和安全传输, 发展到实现分布式量子计算和量子传感, 加大开放量子通信与计算能力^[7]。量子互联网是由多个量子计算机与量子设备共同组成的网络, 可以像传统互联网对经典信息比特一样, 实现对量子信息的传输、处理和存储。量子互联网是实现各类量子信息系统互联和提升量子信息处理能力的物理载体和使能技术, 量子互联网需要支持多维度、远距离与多量子信息设备之间的传输。对应于传统互联网, 其代表的 (量子) 计算、量子测量与通信相融合的发展方向可谓是量子信息技术演进的终极目标。量子隐形传态在不转移存储量子存储物理介质的前提下, 结合经典传输信道, 利用量子纠缠原理来实现量子态的传递, 是实现量子存储网络和量子互联网的基础。

2020 年年初, 美国发布《美国量子网络战略构想》^[2], 将量子网络描述为量子设备之间的互联网链路, 通过量子处理器之间的纠缠以及量子态的传输、控制和测量, 实现量子云计算和新型量子传感模式等。继 24 个欧盟成员表明共同开展量子通信基础设施计划后, 欧盟“欧洲量子技术旗舰计划”近期发布《战略研究议程 (SRA)》报告^[8], 提出欧盟未来 3 年将推动建设欧洲范围的量子通信网络, 为未来的“量子互联网”远景奠定基础。报告将量子互联网络的实现重点定位在利用量子密钥分发 (QKD) 协议的具有可信节点



的网络开发上,其最终目标是实现量子互联网。IETF 标准组织的互联网技术研究工作任务组 IRTF, 设立了专门的量子互联网研究组 (Quantum Internet Research Group, QIRG), 其研究内容包括量子信息网络的架构、使能技术、路由协议等方面。其中, IETF 草案《量子互联网的架构原则》^[9]将量子网络定义为一系列能够交换量子比特和纠缠态的互连节点,而只能通过经典方式与另一个量子节点进行通信的节点不能看作量子网络的成员。来自荷兰量子计算公司 QuTech 的研究人员成功实现将 3 个量子设备连接在同一个网络中。此外,他们还实现了关键量子网络协议的原理证明演示,标志着迈向量子互联网的一个重要里程碑^[10]。

我国高度重视量子通信与互联技术的发展,在政策、产业与研究界均有较大的投入与合作。中国通信标准化协会专门成立了量子通信与信息技术特设任务组,开展量子信息技术方面的标准研究和制订工作。目前我国在 QKD 组网技术上属于世界先进水平,并在 2016 年建设完成了延伸 2 000 km 级的“京沪干线”。在量子隐形传态技术上,我国具备一定的国际竞争优势,我国的潘建伟等人在国际上首次成功实现高维度量子体系的隐形传态^[11],并在 2020 年成功实现了相距 50 km 量子存储器之间的量子纠缠。2020 年 3 月,中国科学技术大学、清华大学、济南量子技术研究院等单位合作,首次实现 500 km 级真空光纤的双量子密钥分发和相位匹配量子密钥分发,传输距离长达 509 km。

2 量子互联网关键技术

考虑量子通信的特性与经典通信有很大不同,量子互联网的设计与实现需要量子物理设备、网络协议、量子退相干与量子中继等方面的关键技术。

(1) 量子物理设备

为了实现量子互联网,所需的量子物理设备

原则上至少应包括纠缠制备、量子节点、量子测量设备、量子存储设备以及传输链路等,如图 1 所示。

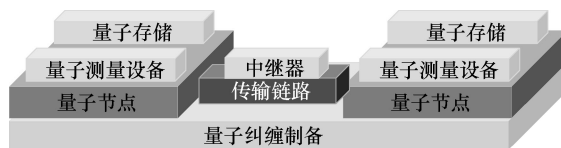


图 1 实现量子互联网所需的基本量子设备组成

量子节点是量子互联网进行连接的各种设备实体,它是量子互联网最关键的组成部分。为了使量子互联网充分发挥潜力,量子节点需要具备一定的功能与能力,借助著名理论物理学家 DiVincenzo 提出的条件,包括将量子比特初始化能力、足够的量子相干时间、量子比特表征能力、特定量子比特的测量能力以及一定的量子比特纠错能力等^[12]。量子纠缠制备,负责量子链路之间量子纠缠态的生成和分发,通过执行贝尔态测量 (Bell state measurement, BSM) 等方式来实现量子信息处理任务,例如量子隐形传态和量子纠缠交换 (entanglement swapping)。量子纠缠制备可以是单独的物理实体,也可以是量子节点的部分组件。除此以外,量子测量设备与量子存储也是量子互联网不可或缺的组成部分,其中量子测量设备负责为量子节点针对具体的传输任务生成纠缠态,量子存储设备负责存储量子态以及量子信息的应答等。

(2) 网络功能与协议设计

由于量子通信的物理本质与经典通信完全不同,因此量子互联网的实现需要从头构建相应的网络协议堆栈。实际上,在量子互联网络中需要特殊的网络范式来利用量子力学的特性,这可能导致量子网络与传统网络之间的一一映射变得不可行。其中,不可克隆定理和量子测量坍塌造成的无法安全地读取与复制量子信息,使得量子互联网中网络功能的设计更加困难和复杂化。在经典计算与通信网络中,可以实现在任意时间从存

储单元中对数据进行复制、错误检验和校正等。而在量子力学中,对于量子比特的观测会引起量子坍塌,使得量子从不确定的叠加态坍塌至确定态。一个量子比特虽然能够同时表示 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 两种基态,然而若对 $|\psi\rangle$ 进行测量,从一次测量中只能获得关于粒子基态的一个比特信息。因此,无法使用经典网络中的方法来对量子互网络进行数据的错误检验和校正等。将多个物理量子比特进行编码来应对量子系统的噪声与退相干问题,是未来量子互联网的实现基础。量子不可克隆定理导致量子信息无法被直接传输到多个目的地。经典网络中链路层的媒体接入控制协议和路由协议无法在量子互网络中直接使用,已经有研究表明^[13],基于 Dijkstra 或 Bellman-Ford 的经典路由算法无法在基于量子纠缠的链路中使用。IETF 标准草案^[14]对中间系统—中间系统(intermediate system to intermediate system, IS-IS)和开放式最短路径优先(open shortest path first, OSPF)协议进行了添加,以便用于量子网络中量子对的创建和纠缠处理。同样的,基于数据包重传来应对数据报文丢失的网络层 TCP 也无法在量子互联网中应用。量子互联网需要专门的网络功能和协议设计,需要从体系架构层面来应对量子力学的特性。

(3) 量子退相干与保真

在开放的量子系统中,量子相干性会因为与外部环境发生量子纠缠而使得量子比特的信息量逐步丢失。除非在完全隔离的环境中可以保留量子比特的状态,然而量子系统与环境隔离来维持量子逻辑一致性在物理上需要很高的技术要求,此外节点之间需要进行量子比特的读/写与通信等操作交互,因此在实践中很难实现。因此在量子互联网中,需要保证足够的量子保真能力,这很大程度上取决于量子比特的操控技术,通常用量子退相干时间来进行量化。除了量子退相干性的影响,物理系统的缺陷和随机噪声也是影响量

子保真的因素。传统的纠错技术无法抵御量子退相干与量子系统的噪声影响,目前已出现了量子纠缠纯化技术^[15-16]、量子误差校正技术^[17-18]与量子编码^[19-20]等技术来缓解量子退相干和进行量子纠错。

(4) 量子纠缠分发与中继

量子纠缠分发是构建量子互联网链路 with 核心架构的关键技术。在量子互联网中,为实现长距离的量子通信,量子节点必须以量子纠缠分发技术与相邻节点之间建立共享纠缠对,并需要量子存储技术将纠缠对进行存储,并通过一系列量子中继器来进行量子纠缠纯化和纠缠交换从而不断扩展量子纠缠距离。量子纠缠交换与量子隐形传态的原理类似,通过测量结果与量子态坍塌之间的对应关系来实现量子态之间的纠缠^[21]。以贝尔态测量方法为例,如图 2 所示,本文对量子纠缠交换的原理进行说明。假设两个 EPR 对分别被分发给发送节点与中继节点($a1, b1$),以及中继节点与接收节点($a2, b2$)。中继节点分别对 $b1, b2$ 进行贝尔态测量,就可以最终使 $a1$ 与 $a2$ 系统处于纠缠态。因此通过多次对量子纠缠的中继,可以实现量子纠缠远距离的分发^[18]。

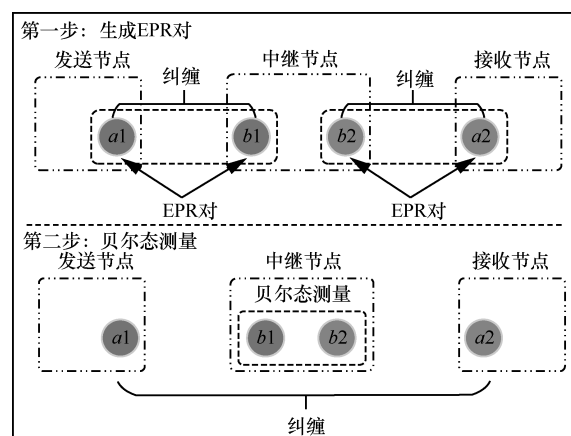


图2 基于BSM的纠缠交换原理说明

为了支持高效能的量子分发,还需要对相应的网络功能进行专门的设计,包括物理层、链路层和网络层等。2017年,中国科学技术大学的潘



建伟院士团队在国际上首次实现利用参量下转换光源的方法实现了基于线性光学的量子中继器中的嵌套纠缠纯化,从而实现对量子纠缠交换过程中噪声的自动剔除^[22]。由于量子信息无法广播的特性,因此在链路层为了实现多个设备之间的纠缠分发,需要设计不同于经典互联网的多址传输技术,从而允许多个量子设备能够同时在单个量子链路进行传输。在网络层,纠缠分发的性能决定了量子互联网的连通能力,因此需要针对量子设备之间的连接设计量子路由的度量指标与路由协议。文献[23]提出了一种机会主义的量子纠缠分发方法,利用费用函数来衡量本地量子存储器中由量子相干造成的误差和量子保真度的变化,并通过机会模型从一系列量子节点中挑选得到费用最小的节点来进行量子纠缠分发。与此同时,由于量子纠缠的影响,当一个新的量子比特需要被传输时,传输源与接收者之间需要生成并分发一个新的纠缠对,这种约束条件也是量子网络中所需要考虑的问题。

3 未来展望与发展建议

量子互联网的发展过程需要解决计算与通信等一系列的技术挑战。我国的潘建伟指出量子网络的发展将分为量子密钥网络、量子存储网络与量子计算网络 3 个阶段。文献[6]提出的 6 个阶段的量子互联网发展演进中,目前量子的互联网发展仍停留在初级阶段。一方面,量子互联网的设计与实现与经典网络有很大不同,量子互联网的研究与发展需要考虑支持通信信息技术在量子领域的改进与创新。另一方面,量子互联网的实现依赖于量子设备与量子计算等技术的共同发展。量子互联网的发展与实际部署需要考虑以下几个方面的挑战。

(1) 当前量子计算与量子制备的发展

量子互联网的最终实现需要通用量子计算能力作为前提,然而现阶段量子计算的实现在可扩展

展性、操控时间与保真度等方面依然存在较大局限。量子制备与量子计算机的制造与维护现阶段需要高昂的费用来支撑,相关技术与发展目前集中在少数企业与组织,为满足量子计算与量子互联的需求与应用探索,量子计算与通信技术的应用将最可能集中在少数具备量子操控能力的数据中心以云服务的形式提供服务。到 2024 年,预计一半以上的量子计算市场将以量子云服务的方式来呈现^[24]。而短期内,量子计算市场对于通用与分布式量子计算的需求较小,因此量子互联网的发展与部署将会是一个较为漫长的过程。

(2) 发展路径多样化与统一接口

目前量子纠缠分发与传输相关技术实现的路径呈现多样化,量子互联的实现需要考虑不同技术之间的兼容性与统一接口。量子比特的传输需要飞行量子位作为纠缠的载体,后者一般利用光子作为衬底。实现物理量子比特的技术目前已经出现了超导、量子阱、硅量子点、光量子、拓扑量子比特等多种物理实现方案^[25],因此物理量子比特与飞行量子位之间需要可以独立于不同制备技术以及不同量子传输信道的统一接口。

(3) 量子通信与经典通信技术与资源的整合

量子互联网的发展无法完全独立或取代经典互联网,未来量子互联网的发展可能是利用现有通信资源与基础设施来进行量子通信与经典互联网的融合,例如利用现有的光网络同时进行经典信息与量子信息的传输。然而,能否灵活地进行经典通信技术、基础设施资源与量子技术的整合,仍然存在很多开放性的问题,其解决方案需要多学科与领域的合力,包括通信理论、网络工程与量子力学等。

由于我国量子信息技术及其标准化发展起步较晚,尽管在量子保密通信与隐形传态等技术上有很大的竞争优势,但在标准建设、硬件发展、生态建设上和国际最先进水平仍有一定差距。因此,对于中国发展量子互联网技术提

出以下建议。

- 明确概念，加强产学研合力发展

量子互联网是未来量子信息通信发展的最终目标，也是分布式量子计算实现的关键支撑。但目前对于量子互联网的概念和关键技术尚未达成共识。明确量子互联网的概念和基本发展路径，将有利于多方达成共识，有助于将相关投入尽快转化为技术与产业成果。同时，我国应推动“产学研”三方之间的合作，量子互联网的优势最终需要落地实践来证明，而目前量子互联网的前沿成果较大部分集中在高校与科研机构，因此通过加强科研机构与相关企业的技术联系，发展实践与验证渠道，有助于推动量子互联网技术的落地和多个领域的全面健康发展。

- 加快底层技术研究与应用

量子信息技术的发展需要量子制备技术、量子处理器与量子计算机等底座技术与物理系统的支撑，当前我国在量子计算机与处理器等领域距离国际先进水平仍有较大差距，且受目前国家局势的影响，技术路线较为受限。因此国家需要加大对于基础量子物理系统与设备的研发，把握量子信息技术与量子计算发展的核心能力，确保关键技术的自主研发性。在投入基础研究的同时，加快技术应用与落点验证，将理论技术真正转化为应用优势与产业效益，从而获得量子信息技术与量子计算的可持续发展。

- 重视政策推动与标准建设

目前，量子信息技术发展迅速且方案多样化，国际上已经有相关标准组织开始对量子互联网进行专门研究与标准化工作，而我国尚未开展专门针对量子互联网的标准规范化工作。通过对量子互联网的概念、功能体系、发展路线、关键技术等进行统一规范，可以对量子互联网的发展起到引导作用。通过建立完善的评测体系，也可带动量子信息技术的商业化应用推广与产业健康发展。

参考文献：

- [1] 中国信息通信研究院. 量子信息技术发展与应用研究报告[R]. 2019.
CAICT. Research report on development and application of quantum information technology[R]. 2019.
- [2] 美国白宫网站. 美国量子网络战略构想[R]. 2020.
White House website. A strategic vision for americas quantum networks[R]. 2020.
- [3] CACCIAPUOTI A S, CALEFFI M, TAFURI F, et al. Quantum Internet: networking challenges in distributed quantum computing[J]. IEEE Network, 2020, 34(1): 137-143.
- [4] KIMBLE H J. The quantum Internet[J]. Nature, 2008, 453(7198): 1023-1030.
- [5] 樊矾, 魏世海, 杨杰, 等. 量子保密通信技术综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(3): 356-362.
FAN F, WEI S H, YANG J, et al. Review of quantum secret communication technology[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2018, 13(3): 356-362.
- [6] WEHNER S, ELKOUSS D, HANSON R. Quantum Internet: a vision for the road ahead[J]. Science, 2018, 362(6412): eaam9288.
- [7] CALEFFI M, CACCIAPUOTI A S, BIANCHI G. Quantum Internet: from communication to distributed computing[C]// Proceedings of the 5th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication. New York: ACM Press, 2018.
- [8] RIEDEL M, KOVACS M, ZOLLER P, et al. Europe's quantum flagship initiative[J]. Quantum Science and Technology, 2019, 4(2): 020501.
- [9] KOZŁOWSKI W. Architectural principles for a Quantum Internet[R]. 2019.
- [10] POMPILI M, HERMANS S L N, BAIER S, et al. Realization of a multinode quantum network of remote solid-state qubits[J]. Science, 2021, 372(6539): 259-264.
- [11] LUO Y H, ZHONG H S, ERHARD M, et al. Quantum teleportation in high dimensions[J]. Physical Review Letters, 2019, 123(7): 070505.
- [12] DIVINCENZO D P. The physical implementation of quantum computation[J]. Fortschritte Der Physik, 2000, 48(9/10/11): 771-783.
- [13] CALEFFI M. Optimal routing for quantum networks[J]. IEEE Access, 2017(5): 22299-22312.
- [14] KOMPELLA K, AELMANS M, WEHNER S, et al. Advertising entanglement capabilities in quantum networks[R]. 2018.
- [15] PAN J W, SIMON C, BRUKNER Č, et al. Entanglement purification for quantum communication[J]. Nature, 2001, 410(6832): 1067-1070.
- [16] BENNETT C H, BRASSARD G, POPESCU S, et al. Purification of noisy entanglement and faithful teleportation via noisy channels[J]. Physical Review Letters, 1996, 76(5): 722-725.
- [17] CORY D G, PRICE M D, MAAS W, et al. Experimental quan-



- tum error correction[J]. Physical Review Letters, 1998, 81(10): 2152-2155.
- [18] ZHANG J F, GANGLOFF D, MOUSSA O, et al. Experimental quantum error correction with high fidelity[J]. Physical Review A, 2011, 84(3): 034303.
- [19] HASELGROVE H L. Optimal state encoding for quantum walks and quantum communication over spin systems[J]. Physical Review A, 2005, 72(6): 062326.
- [20] ELDER S S, WANG C S, REINHOLD P, et al. High-fidelity measurement of qubits encoded in multilevel superconducting circuits[J]. Physical Review X, 2020, 10(1): 011001.
- [21] METER R, TOUCH J. Designing quantum repeater networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(8): 64-71.
- [22] CHEN L K, YONG H L, XU P, et al. Experimental nested purification for a linear optical quantum repeater[J]. Nature Photonics, 2017, 11(11): 695-699.
- [23] GYONGYOSI L, IMRE S. Opportunistic entanglement distribution for the quantum Internet[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-9.
- [24] H. S. R. C. (HSRC). Quantum computing market & technologies — 2018–2024[R]. 2018.
- [25] 张海懿, 崔潇, 吴冰冰. 量子计算技术产业发展现状与应用分析[J]. 信息通信技术与政策, 2020(7): 20-26.
- ZHANG H Y, CUI X, WU B B. Analysis of quantum computing industrial developments and applications[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2020(7): 20-26.

[作者简介]



刘姿杉 (1992—), 女, 博士, 中国信息通信研究院工程师, 主要研究方向为网络智能化、联邦学习、量子通信技术等。



赖俊森 (1983—), 男, 博士, 中国信息通信研究院技术与标准研究所宽带网络研究部高级工程师, 主要从事量子信息等相关新技术研究、标准制订及测试验证等工作。



赵文玉 (1973—), 男, 博士, 中国信息通信研究院技术与标准研究所宽带网络研究部主任、正高级工程师, 主要从事超高速光通信、光模块器件和量子信息等相关新技术研究、标准制订及测试验证等工作。