

量子网络系统研究进展与关键技术分析

李静, 高飞*, 秦素娟, 温巧燕, 张平

(网络与交换技术国家重点实验室(北京邮电大学), 北京 100876)

摘要: 量子信息领域的迅速发展为现代信息技术带来了新的机遇与挑战, 其中的热门研究方向之一即量子网络, 旨在利用量子力学的基本特性实现长距离的(安全)通信任务, 或通过分布式计算提供优于经典计算网络的计算能力, 相关研究对推动量子信息的实用化具有重要意义。本文根据量子网络应用场景和技术手段的差异性, 从量子密码网络、量子云计算网络、量子隐形传态网络3个细分类别出发, 全面梳理了国内外的研究进展及发展挑战, 以便掌握量子网络系统的最新发展态势; 结合量子网络的实施情况, 阐述了量子网络系统发展中亟待攻克的路由建立、信息传输、网络协议、物理硬件等关键技术。综合来看, 量子网络仍处于初级发展阶段, 当前需积极应对挑战并把握机遇, 以增强我国前沿领域的科技硬实力。研究建议, 加强基础硬件设施研发投入、重视量子网络理论研究、加强交叉学科研究和相关人才培养, 以促进我国量子网络系统的发展。

关键词: 量子信息; 量子网络; 量子密码网络; 量子云计算网络; 量子隐形传态网络

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

Research Progress and Key Technologies of Quantum Network Systems

Li Jing, Gao Fei*, Qin Sujuan, Wen Qiaoyan, Zhang Ping

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology (Beijing University of Posts and Telecommunications), Beijing 100876, China)

Abstract: The rapid development of quantum information has brought new opportunities and challenges to modern information technologies. As one of the popular research directions in the field of quantum information, quantum networks aim to utilize the fundamental properties of quantum mechanics to achieve long-distance (secure) communications or provide computational capabilities superior to classical computing networks through distributed computing. The study of quantum networks holds great significance in advancing the practicality of quantum information. To gain a comprehensive understanding of the development trajectory of quantum networks, this study categorizes quantum networks into three types: quantum cryptography, quantum cloud computing, and quantum teleportation networks, based on different application scenarios and technical approaches. It provides comprehensive reviews of both domestic and international research progress and the challenges faced in each aspect. Furthermore, in conjunction with the practical implementation of quantum networks, the key technologies that need to be overcome in the development of quantum network systems, involving link establishment, information transmission, networking protocols, and physical hardware, are summarized. Overall, the development of quantum networks is still in the primary stage. At this stage, actively addressing challenges and seizing opportunities are of great significance to enhance the technological prowess of China. Therefore, to promote the development of

收稿日期: 2023-10-11; 修回日期: 2023-10-30

通讯作者: *高飞, 网络与交换技术国家重点实验室(北京邮电大学)教授, 研究方向为量子密码和量子算法; E-mail: gaof@bupt.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“量子信息网络发展战略研究”(2022-HYZD-01)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

quantum network systems in China, suggestions are proposed from three aspects: strengthening investment in the research and development of fundamental hardware infrastructure, attaching importance to the theoretical research of quantum networks, and enhancing interdisciplinary research and talent cultivation.

Keywords: quantum information; quantum network; quantum cryptography network; quantum cloud computing network; quantum teleportation network

一、前言

量子信息科学是量子力学与信息技术相结合的一门新兴交叉学科,近年来已发展成为科技领域关注的焦点之一。量子信息科学主要包括量子通信、量子计算和量子测量等研究领域。量子通信,从字面上来讲,指传输量子态的通信形式,如直接在信道中传输量子比特,或者利用纠缠态为信道传输量子信息(称作量子隐形传态^[1])。由于当前的量子通信技术主要被应用于密钥分配,所以人们常听到的“量子通信”往往特指量子密钥分配(QKD)^[2]或者基于QKD的(用来传输经典消息的)保密通信。不同于传统密码学中的密钥分配协议,QKD的安全性由物理原理来保证,理论上可达到信息论安全,因此具有独特的优势。人们也尝试将量子力学性质应用于完成其他密码学任务(以期获得同样的安全性优势),如秘密共享、身份认证、数字签名、掷币、比特承诺等,相关研究属于量子密码学的范畴。量子计算是通过调控量子信息物理单元来进行并行计算的一种先进计算模式,相比经典计算,在求解某些特定问题上已展现出了显著的速度优势,

如整数分解^[3]、无序数据搜索^[4]等。

量子网络是量子通信和量子计算相结合的产物,被认为是量子信息技术发展的最终目标^[5];作为由网络节点和信道所构成的通信网络,可连接量子计算机与其他量子设备,其基本结构如图1所示^[6]。通信信道包括经典信道与量子信道(光纤/自由空间),其中经典信道用于传输经典信息,量子信道用于传输量子态。在量子节点中,量子计算机、量子云服务器用于实现量子云计算任务,量子安全通信设备用于实现量子密码功能,量子中继器用于克服信道损耗和噪声影响、提升量子态的传输距离进而构建更大规模的量子网络。

与经典互联网相协同,量子网络利用量子力学的基本特性可实现长距离的(安全)通信任务,或通过分布式计算提供优于经典计算网络的计算能力。量子网络为用户提供了许多传统互联网环境中无法提供的功能和服务,为量子信息技术提供了大规模应用的平台^[6]。国内外学者在探索量子网络的可用性方面做出了巨大努力,然而量子网络的发展仍处于初级阶段,由于量子硬件的限制,目前实现长距离、高效率的量子网络仍面临许多挑战。为了

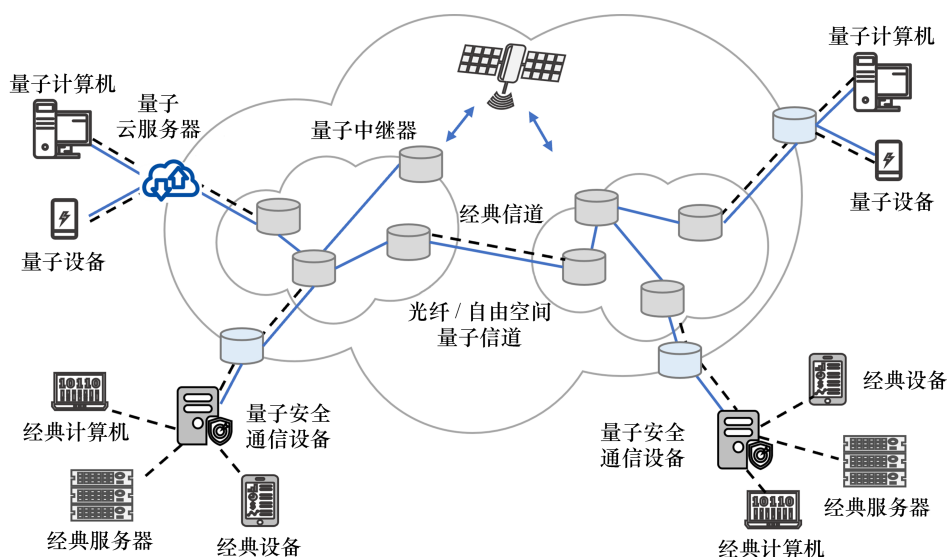


图1 量子网络的一般架构示意图

全面了解量子网络系统的发展态势，更好地应对挑战，我们根据应用场景和技术手段的不同，将量子网络大致分为量子密码网络、量子云计算网络和量子隐形传态网络3类。

量子密码网络指通过传输量子态来实现各类密码学任务的量子网络。由于当前技术上最成熟的量子密码协议是QKD，所以现阶段的量子密码网络通常是基于QKD的保密通信网。在当前技术条件下，该网络通常直接在光纤/自由空间信道中传输量子态，传输距离非常受限。为了提高传输距离，往往需要在网络中增加“可信中继”（即假设为可信的节点）来中继QKD密钥，而量子通信卫星也往往被用来扮演这种可信中继的角色。

量子云计算网络将昂贵的量子计算基础设施置于云端供网络中的用户使用。它类似于经典云计算网络，只不过其计算任务通常需要量子计算机来参与，如多个量子计算机（或者量子计算机与经典超算）以分布式的形式来共同完成某个计算任务。由于当前技术条件下难以实现量子态的高保真度和远距离传输，现阶段的量子云计算网络往往只是一个公司或研究机构将量子计算设备放在云端供用户共享使用，网络中的通信以经典通信为主（传输计算任务和计算结果），量子计算设备之间、量子计算与经典超算之间的协同还不多见。

不难看出，量子态的远距离可靠传输问题是制约量子密码网络和量子云计算网络发展的重要因素。量子隐形传态是一种以纠缠态为信道来传输量子态的技术手段。它首先通过以光纤/自由空间为信道的量子态传输在收发双方之间分享纠缠态，然后发送方就可以利用该纠缠态来传输量子比特给接收方（该过程不再需要在光纤/自由空间信道中传输量子态，因此称为“隐形”）。基于纠缠交换技术，人们可以实现真正的量子中继（即中继纠缠态），进而实现远距离的纠缠分发。因此，量子隐形传态网络可以实现远距离的量子态传输，被看作是未来量子网络的重要实现形式，可以被广泛应用于量子密码（不再需要“可信中继”，即被假设为可信的密钥中继）和量子云计算（多个量子计算设备之间可以远距离传输量子态来实现高效协同）等各种应用场景。

本文围绕上述3个方面来分别综述量子网络的研究进展及面临的挑战，然后结合量子网络的实施

情况对量子网络的关键技术进行梳理。最后提出我国在本领域的技术发展建议，以期对量子网络的系统性发展提供参考。

二、量子网络系统重点方向研究进展

（一）量子密码网络

量子密码网络通过传输量子态来实现各类密码学任务，目前已部署的量子密码网络主要是基于QKD的量子保密通信网络，该网络以实现安全的QKD协议为目标。QKD是一种通信双方通过传输量子态来获得一串只有通信双方共享的密钥协议，与一次一密结合可以实现完美安全的保密通信。随着量子保密通信网络技术的不断成熟，越来越多的国家和地区在基于QKD的保密通信网络方面取得成果。

1. 量子密码网络的研究进展

早在2002年，美国建成了世界上第一个QKD网络——DARPA QKD网络，其具有3个连接节点，分别为美国BBN科技公司、哈佛大学和波士顿大学，传输距离为10 km^[7]。之后，各国对QKD网络的实用化进行了一系列研究。例如，2004年，欧盟委员会的第六框架计划（FP6）项目“基于量子密码的安全通信（SECOQC）”集成了单光子、纠缠光子和连续变量（CV）光子等多种量子密钥收发系统，在西门子股份公司总部和其子公司之间建立了量子通信链接^[8]；2006年建立的东京量子通信和量子密码学（UQCC）QKD测试网络“日本千兆比特网络2+（JGN2plus）”最远传输距离达到90 km^[9]；2021年，俄罗斯建立了莫斯科—圣彼得堡量子保密通信干线，全长达700 km^[10]；2022年，波兰成功在波兹南和华沙两座城市之间搭建了一条380 km长的城际QKD链路^[11]。

我国对QKD网络实用化的首次研究可追溯到2007年，中国科学技术大学研究团队在北京市构建和演示了一个包括4名用户的星型拓扑量子通信网络^[12]，最远传输距离为42.6 km。这是国际上第一个全时全通的量子密钥分发网络，也是当时国际上公开报道的唯一无中转、可同时、任意互通的量子密码通信网络。2017年，世界首条量子保密通信干线“京沪干线”正式开通，京沪干线连接北京、上海，途经济南和合肥，全长达2000 km，全线路密钥率超过20 kbps^[13]。2021年，中国科学技术大学

研究团队演示了一个基于“墨子号”的集成空对地 QKD 量子通信网络,总距离可达 4600 km^[14];同年,该团队在 511 km 光纤链路上实现了双场 QKD (TF-QKD),并在无可信中继的情况下链接济南和青岛两城,成为全球首个无可信中继的长距离光纤 QKD 网络^[15]。中国科学技术大学、科大国盾量子技术股份有限公司、国科量子通信网络有限公司与上海交通大学等单位合作,在真实量子保密通信网络中实验验证了后量子密码算法在 QKD 网络认证中的可行性、效率和稳定性^[16],这是国际首次 QKD 和后量子密码融合可用性的现网验证。2022 年,我国开通了合肥量子城域网,该网络由中电信量子信息科技集团承建、科大国盾量子技术股份有限公司提供核心设备,具有 8 个核心网站点和 159 个接入网站点,全长 1147 km,可为近 500 家单位提供量子安全接入服务^[17]。

以上量子密码网络多基于 BB84 等离散变量 QKD 协议,此类协议的实现较为成熟,但是其点对点实现存在传输码率低、对硬件设备要求高等问题。为实现更高码率、更大规模、距离更长的量子保密通信,学者们提出 CV-QKD^[18]、测量设备无关 QKD (MDI-QKD)^[19]、TF-QKD^[20]等实现方案。

CV-QKD 利用量子力学中的连续变量,如光的相位和振幅,来实现密钥分发,可有效提高传输码率。2009 年,法国巴黎大学光学研究所团队在 SECOQC 项目的支持下实现了第一个 CV-QKD 的点对点实地实验,通过一个损耗为 3 dB 的信道,平均安全密钥率达 8 kbps^[21]。2019 年,北京邮电大学和北京大学的联合研究团队在城域内 50 km 商用光纤链路中实现了 CV-QKD,安全密钥速率比之前的外场实验提高了两个数量级^[22]。

MDI-QKD 协议利用双量子干涉选择纠缠光子对,不依赖于第三方的测量设备的安全性,可有效提高远距离量子密钥分发实验的安全性。2013 年,国内外研究团队先后完成光纤信道的 MDI-QKD 协议实验^[23,24]。2020 年,中国科学技术大学、清华大学、中国科学院上海微系统与信息技术研究所等研究团队联合完成了大气层内 19.2 km 的 MDI-QKD 实验,为实现基于卫星的 MDI 方案走出了关键的一步^[25]。2022 年,一种抗环境干扰的多用户非可信节点 MDI-QKD 组网方案被提出,能够提高网络在多用户场景下的鲁棒性和适应性^[26]。

TF-QKD 将 MDI-QKD 协议进行改进,利用单光子干涉后的探测作为有效探测事件,每次用来成码的有效探测所消耗的光子数比 MDI-QKD 更少,是近年来远距离 QKD 的主流发展方向。2022 年,有研究团队实现了 833 km 光纤 TF-QKD,将传输距离的世界纪录提升了 200 多千米,安全码率提升了 50~1000 倍^[27]。2023 年 5 月,多个研究团队合作,成功实现了光纤 1002 km 点对点远距离 QKD,创造了光纤无中继量子密钥分发距离的世界纪录^[28]。2023 年 6 月,北京量子信息科学研究院、南京大学物理学院研究团队合作,将异步匹配技术与响应过滤方法引入量子通信,在传输距离为 201 km 下量子密钥率超过每秒 57 000 bit、传输距离为 306 km 下量子密钥率超过每秒 5000 bit,创造了城际量子密钥率的新纪录^[29]。

2. 量子密码网络发展面临的挑战

目前世界各地已部署了多个基于 QKD 的量子保密通信网络。随着技术的不断发展,量子密码网络正朝着更高码率、更长距离、更大规模商业化 QKD 网络发展。这一发展趋势将使未来量子密码网络有望在更广泛的应用领域中发挥作用,并满足不同规模和安全性需求的通信要求。与此同时,相关研究也面临如下挑战。

(1) 量子密码协议体系:众所周知,网络中信息系统的安全性通常由多种密码技术(如密钥协商、数字签名、身份认证、消息认证、掷币、比特承诺、哈希函数、加密算法等)和安全防护技术(如防火墙、病毒查杀等)来共同保障。然而,量子密码协议研究目前处于“QKD 遥遥领先、其他协议难以突破”的不平衡状态。根据木桶原理,简单地用 QKD 协议替换现有信息系统中的密钥协商算法无法从根本上提高系统整体的安全性。为了实现全面提升信息系统安全性的目标,设计实用化的(QKD 之外的)其他量子密码协议、健全量子密码协议体系变得势在必行。比如能否设计出实用的量子数字签名、量子双方安全计算等关键协议,以及可与 QKD 相适配、结合 QKD 使用能够切实提高系统整体安全性的经典密码算法和协议,将是量子密码网络领域亟需攻克的重要理论问题^[30]。

(2) 性能提升:尽管国内外学者在 QKD 实验方面不断取得突破性进展,但在应用场景下 QKD 系统仍有三个方面的性能有待提升:① 传输速率。

为了实现“信息论安全性”，需要使用一次一密算法来加密数据，这将消耗与所加密数据等长的密钥。在数据量飞速提升的信息爆炸时代，提升QKD密钥速率的需求将长期存在。② 传输距离。QKD的传输距离直接影响到量子密码网络的规模。目前QKD的传输距离还很受限，通常采用“可信中继”来实现远距离的量子保密通信。由于密钥会在中继节点“落地”，一旦这种中继节点被敌手控制，则密钥的安全性将不再存在。因此，进一步提升点对点QKD的传输距离，减少“可信中继”的使用势在必行。③ 系统的实际安全性。尽管QKD协议在理论上可达到信息安全，但是实际物理器件存在诸多不完美性，这可能导致QKD系统出现安全漏洞。如何发现并对抗这种安全威胁，也是量子密码网络需要长期面对的问题。

(3) 标准化：量子密码网络存在多种QKD协议实现方式，这种差异可能会导致互操作性和兼容性方面的问题。制定共同的标准，可以确保不同量子密码系统之间的相互通信和兼容，从而实现一个更加灵活和可扩展的量子网络。2023年8月1日，工业和信息化部发布的3项量子保密通信相关的通信行业标准《量子保密通信网络架构》(YD/T 4301—2023)、《量子密钥分发(QKD)网络管理技术要求 第1部分：网络管理系统(NMS)功能》(YD/T 4302.1—2023)、《基于IPSec协议的量子保密通信应用设备技术规范》(YD/T 4303—2023)开始实施^[31]。这些标准在量子保密通信网络的组网、建设、运维和管理等方面起着重要的指导作用。随着QKD网络协议和设备的不断改进，更新和完善相关行业标准也成为推动量子密码网络发展的研究重点之一。此外，在未来量子密码网络中，除QKD，其他量子密码技术也需制定相关行业标准，为大规模量子密码网络的安全运行提供支撑。

(二) 量子云计算网络

量子云计算网络将新兴的量子信息资源整合，通过云计算的方式给用户计算服务，使用云端的量子设备参与完成分布式计算任务，能够为稀缺的量子计算基础设施和信息技术基础设施节约大量的成本。

1. 量子云计算网络研究进展

2016年，国际商业机器公司(IBM)提出了首个免费的量子云计算服务(Q Experience)。一年后，IBM的量子云平台升级，16量子比特的芯片上线。到目前为止，IBM已经在云端推出了20多个量子处理器的服务。国外目前的量子云计算平台还有D-Wave公司的Leap、微软公司的Azure Quantum、亚马逊公司的Braket、欧洲公共量子计算平台Quantum Inspire、加拿大Xanadu光子量子平台等^[32]。

我国目前以真实量子计算机为后端的量子云平台有中国科学院-阿里巴巴量子计算实验室的“量子计算云平台”、本源量子计算云平台、北京量子信息科学研究院“量子未来-Quafu(夸父)”云平台等^[32,33]。其中，中国科学院-阿里巴巴量子计算实验室的“量子计算云平台”在2018年2月接入了11量子比特的超导量子计算服务。2021年2月，量子计算云平台进行了系统切换，量子创新研究院联合济南量子技术研究院和科大国盾量子技术股份有限公司等对网站页面和功能进行了重新设计，超导量子计算原型机升级至12量子比特^[32]。2023年5月31日，科大国盾量子技术股份有限公司接入“祖冲之号”同款176量子比特超导量子计算机，发布了新一代量子云平台^[34]。本源量子计算云平台于2020年上线，其后端为本源超导量子计算机“悟源”，搭载6量子比特超导量子处理器夸父KFC6-130，是国内率先实现工程化的量子计算机原型系统^[32]。2023年8月15日，本源量子计算云平台接入了搭载了12量子比特“悟空芯”超导量子芯片。2023年5月25日，北京量子信息科学研究院、中国科学院物理研究所和清华大学合作发布了新一代量子计算云平台“量子未来-Quafu(夸父)”，其后端最高接入了136量子比特超导量子芯片^[33]。

上述量子云计算平台均以真实计算机为后台，现阶段，量子计算机发展正处于含噪声中等规模量子(NISQ)时代，面临着研发成本高、易受噪声影响、支持的量子比特个数较少、难以脱离实验环境等问题。受这些问题限制，学者们开发了量子云服务模拟平台，通过模拟量子计算机的硬件和软件行为，提供量子计算任务的运行环境。例如，Google量子计算框架Cirq平台、Rigetti公司的Forest云平台、BlueQubit量子开发平台、本源量子模拟器OriginQ、

阿里巴巴“太章”模拟器、华为HiQ量子云平台、百度“量浆”量子云平台等。其中，Google Cirq平台可实现72量子比特的量子线路模拟^[35]；阿里巴巴研发的单振幅量子线路模拟器“太章”，可成功模拟81量子比特40层的谷歌随机量子线路^[36]。

目前，量子云平台大都是孤立的量子计算机，并没有像真正的网络一样做到互联互通。实现未来互联互通的量子云计算网络的一个重要途经是分布式量子计算，即由多个量子服务器协同完成一个计算任务。分布式量子计算可分为基于隐形传态^[37]和基于线路拆分^[38]的分布式量子计算两种类型。基于隐形传态的分布式计算面向容错量子计算，通过隐形传态技术实现芯片间的通信，需要量子信道和经典信道。在算法设计方面，学者们已提出了分布式量子均值估计算法^[39]和分布式Shor算法^[40]等。在硬件实现方面，由于隐形传态技术尚不成熟，多体系的分布式计算平台仍在研究中。近期，有研究团队在光学系统实现了对Deutsch-Jozsa算法和量子相位估计的远距离分布式计算演示^[41]。基于线路拆分的分布式计算将大规模的量子线路拆分成可在NISQ设备上运行的多个小规模子线路，通过经典信道实现芯片间通信。此类分布式计算可分为比特拆分方法和门拆分方法，分别通过切割量子比特和两比特门实现对量子线路的拆分，已被应用于变分量子特征求解器^[42]和量子近似优化算法^[43]。

2. 量子云计算网络发展面临的挑战

量子云计算网络为公众提供了量子计算资源，同时也为企业和研究机构提供了一种经济实惠的量子计算解决方案，降低了量子计算的成本和风险，使更多的企业和研究机构可以利用量子计算技术来解决业务问题和科学研究问题，促进了量子计算技术的应用和发展。其发展面临的挑战如下。

一是量子算法。量子云计算网络需要有效的量子算法以提高可用性。一些量子算法^[3,4]已被证明在理论上具有显著加速效果，这些算法或可在未来通用量子计算机上实现。然而，现有的量子算法还很少，其中还有很大一部分算法尚不能在当前的NISQ设备上实现。因此，不管是为了探索量子计算的能力边界，还是为了给量子计算找到更多应用场景，量子算法的设计都是需要解决的重要问题。就目前来看，如何设计可在NISQ设备上运行的量

子算法以及研究寻找当前NISQ设备能有效解决的实际问题对于探索当前量子云计算网络的可用性具有重要作用和价值。此外，分布式量子计算对于充分利用量子云计算网络的量子计算能力具有重要意义。受当前量子设备限制，其研究仍处于起步阶段。如何设计分布式量子算法也是量子云计算网络发展所面临的挑战之一。

二是量子计算的硬件性能。量子云平台目前存在多种量子比特的物理实现方案，但受限于严苛的物理条件，即使最先进的超导量子比特方案也只能实现数百个物理比特的制备和操控，且可实现的逻辑门保真度和深度都非常受限^[44]。到目前为止，研究者还难以实现对物理量子比特的纠错，尚未得到一个逻辑量子比特，距离实用化算法所需的硬件性能尚有距离。提高量子计算硬件的各项性能是量子计算领域的当务之急。

(三) 量子隐形传态网络

量子隐形传态网络主要是基于EPR纠缠对的量子非局域关联特性来实现量子态的远距离、高保真度传输。该网络的基本原理是利用量子纠缠分发、量子纠缠交换等技术，在网络中建立起一些量子纠缠信道，使得两个远距离的节点之间可以利用隐形传态技术来传输量子态。目前对量子隐形传态网络的研究仍处于实验阶段，并未实际部署。

1. 量子隐形传态网络的研究进展

1997年，有研究团队完成了世界上第一个独立光子偏振态的量子隐形传态的实验验证^[45]，该工作入选了《Nature》杂志“百年物理学21篇经典论文”。随后，相关团队演示了终端开放的量子隐形传态^[46]、两光子复合系统的量子隐形传态^[47]以及单光子多自由度的隐形传态^[48]，基于“墨子号”量子科学实验卫星，将量子隐形传态的距离推进至千千米量级^[49]。2019年，国内外研究团队合作，首次成功实现高维量子体系的隐形传态^[50]。

近几年，国内外其他研究团队在光子隐形传态实验中也有所突破。2020年，华东师范大学研究团队利用前期发展的光学轨道角动量复用的连续变量纠缠源结合全光量子隐形传态协议，在国际上首次成功构建了多通道复用的全光量子隐形传态协议^[51]。2021年，德国马克斯-普朗克量子光学研究所的实验实现了一个原则上是无条件的量子隐形传态协议，

只需要一个光子作为预先准备的资源，不需要预共享纠缠量子比特对^[52]。

除光子隐形传态实验外，2006年，丹麦哥本哈根大学研究团队首次实现了光与原子系综（铯原子团）之间的量子隐形传态实验^[53]，平均保真度接近60%。2012年，有团队在首次实验实现了光子与原子之间的百余千米自由空间隐形传态^[54]。2013年，马克斯-普朗克研究所实验演示了两个单原子之间的隐形传态，实现了 $(88.0 \pm 1.5)\%$ 的保真度^[55]。2014年，荷兰代尔夫特理工大学研究团队演示了在相隔3 m的金刚石自旋量子比特之间的任意量子态的无条件隐形传态^[56]。2022年，代尔夫特理工大学研究团队首次实现了金刚石氮-空位（NV）色心三节点线路中的跨节点隐形传态，效率约为117 s/次，保真度为70.2%^[57]。

2. 量子隐形传态网络发展面临的挑战

在未来的量子隐形传态网络中，多个节点将通过量子中继器共享纠缠，形成量子纠缠链路，实现安全的远距离信息传输。为实现更远距离、更大规模的量子隐形传态网络，目前面临的挑战如下。

（1）量子态的远距离传输：由于信道损耗和噪声的影响，量子态的传输质量会随传输距离的增加而下降，使量子态的远距离传输成为难题。为克服这一问题，学者们提出量子中继器的思想^[58,59]，将远距离量子链路划分为多个较短且损耗较小的链路。量子中继器的实现依赖于纠缠分发、纠缠交换、纠缠纯化（或量子纠错）和量子存储等技术。尽管这些技术在实验实现方面已经取得了部分进展，但仍然存在一些问题需要克服。例如，纠缠分发需要解决信道噪声等问题；纠缠交换和量子纠错需要高保真度的量子门等。这些问题使量子中继器实用化还有一段距离，限制了大规模量子隐形传态网络的发展。

（2）量子态的高性能存储：量子中继方案的实现需要各相邻节点间存储大量的共享纠缠态，需要高性能的量子存储器。当前量子存储器已在多个量子体系中实现，但不同体系具有不同的优势和缺陷，很难同时达到满足实际量子态传输的各项要求。例如，基于冷原子的量子存储器常利用光学晶格以获得较长的存储寿命，但会使存储效率受限^[60]；基于稀土掺杂晶体的量子存储器具有易于扩展的优点，但是在存储时间和效率上还需要进一步提升^[61]。

因此，深入研究不同的物理体系，寻找更优的量子存储器实现方案对于量子隐形传态网络的研究至关重要。

三、量子网络系统关键技术及攻关要点

根据量子网络的发展和实施，我们将关键技术归纳为四个方面：链路建立技术、信息传输技术、网络协议技术和物理硬件技术。其中，链路建立技术包括用于生成纠缠态的纠缠生成技术与用于在远距离节点处建立纠缠链路的远程纠缠建立技术。信息传输技术用于提高信息传输效率，包括信道复用技术和量子接口技术。其中，信道复用技术可以提高信道的利用率，量子接口技术用于实现不同类型量子系统之间的信息交换。网络协议技术用于保证网络各部分的协同运作，主要包括量子网络堆栈和量子网络协议两部分。物理硬件技术包括用于存储量子态的量子存储器和用于扩展传输距离的量子中继器。

（一）量子网络系统链路建立技术

1. 纠缠生成技术

纠缠生成是指在量子系统中，通过一些操作使两个或多个量子比特之间产生纠缠。在量子通信中，光子纠缠态是量子网络的关键资源。产生纠缠光子对最为便捷的一种方法是自发参量下转换（SPDC）过程。SPDC描述了一个二阶非线性过程^[62,63]，其中一个泵浦光子与一个非线性介质相互作用，并分裂成两个能量较小的光子。在多光子实验中应用最广泛的是偏振纠缠SPDC源，包括I型匹配纠缠源^[64]、II型匹配纠缠源^[65]、三明治型纠缠源^[66]、贝尔干涉态型纠缠源^[67]等。除光子纠缠生成外，纠缠生成技术还有原子量子比特纠缠生成^[68]、超导量子比特纠缠生成^[69]等。其中，原子纠缠生成基于腔量子电动力学（QED），通过原子间相互作用来生成的纠缠态，可通过冷原子、离子阱、原子波导等体系来实现。超导量子比特纠缠生成基于线路QED，通过量子门操作和控制电路来实现。

在未来量子网络中，构建高维、大尺寸纠缠是纠缠生成技术必然的发展趋势。目前，大多数量子纠缠生成方法都依赖于高效的纠缠光子源，这些纠缠光子源被视为量子力学中的必要工具。虽然光子

纠缠在纠缠生成中广泛利用,但是在实现量子光学实验的过程中依然存在很多障碍,包括更稳定高效的纠缠光源、单光子的存储、量子态的测量以及多光子高纬度纠缠等^[70]。此外,为了实现大规模的量子信息处理技术,需将简单灵活的量子实验扩展至集成光学器件上,这使多光子源的集成成为当前研究的一个关键问题。

2. 远程纠缠建立技术

远程纠缠建立是指在两个相距较远的网络节点之间建立共享纠缠对(即两个节点各存有纠缠对中的1个量子比特)的过程。远程纠缠建立主要包括纠缠分发、纠缠交换和纠缠蒸馏三个部分。其中,纠缠分发是指将生成的纠缠态中的两个量子比特分别分发给两个相邻节点。受信道损耗的影响,纠缠分发的距离相对较近。纠缠交换可以将相邻节点间共享纠缠态转化为(相距较远的)非相邻节点间的共享纠缠态。纠缠蒸馏将多个(受信道噪声影响而导致的)低质量的纠缠对进行一系列操作,从而得到一个高质量的纠缠对。

在远程纠缠分发中,纠缠态需要通过常规信道(如光纤)进行传输。在实验中,人们已实现了光^[71]、离子阱^[72]、超导^[73]、量子点^[74]和冷原子^[75]等量子比特的纠缠分发。然而,随着距离的增加,信道中存在的噪声、衰减和损耗等因素会导致纠缠质量下降。因此,如何在长距离传输过程中有效地保持纠缠态的质量是一个难题。此外,纠缠分发的速度对于实际应用非常重要。然而,在目前的纠缠分发方案中,实现高速的纠缠分发仍然是一个挑战。例如,在光子对的纠缠分发中,光子之间的相互作用和光子之间的噪声限制了分发速度。

纠缠交换通过量子测量和量子操作,可以使分别共享于(相邻节点)A-B和B-C之间的2对纠缠态转化为(非相邻节点)A-C之间的1对纠缠态。在纠缠交换实验中目前已实现了光^[76]、原子^[77]和超导^[78]等量子比特的纠缠交换。目前纠缠交换技术存在的攻关要点主要在三个方面:测量方案优化、量子门操作优化、噪声和干扰控制。通过优化测量方案,可提高纠缠交换的成功率和效率。在这一方面,已有很多学者从不同方面提高了量子测量的准确性和速度等,如利用压缩感知技术减少测量次数提高测量效率^[79]、通过最小化测量误差来实现高效的量子测量^[80]等。量子门操作优化的关键在于设计

和实现高效的量子门操作,可加快纠缠交换速度。采用噪声抑制技术和干扰隔离方法实现干扰控制,可减小对纠缠交换的负面影响。

纠缠蒸馏旨在将大量纠缠度较低的共享纠缠态中“蒸馏”出少量纠缠度更高的纠缠态。根据实现方式的不同,纠缠蒸馏可以分为离散变量和连续变量两种。在离散变量的纠缠蒸馏中,常用的方法是利用量子门操作和测量来提高纠缠度^[81]。基于连续变量的纠缠蒸馏利用了连续变量之间的纠缠性质。例如,可以通过使用光子对两个高斯模式进行干涉来制备更强的纠缠态^[82]。目前的研究工作主要集中在如何有效地控制操作和如何克服噪声等问题,以实现高保真度、高效率的纠缠蒸馏。为了解决这一问题,研究人员采用噪声抑制技术和误差控制方法来减少或抵消与蒸馏过程相关的噪声和误差^[83,84]。此外,纠缠蒸馏协议的设计也是需解决的关键问题之一,这包括选择适当的量子门操作、测量方案和反馈控制策略。

(二) 量子网络系统信息传输技术

1. 信道复用技术

信道复用技术指量子信号与经典信号在同一根光纤中传输的技术。该技术可简化网络结构,显著提高信道利用率,进而降低网络的建设成本。常用的经典-量子信道复用技术有波分复用(WDM)和空分复用(SDM)两种。

WDM技术是将不同波长的光载波信号在发送端经复用器汇合到同一根光纤中进行传输,在接收端再经解复用器将各种波长的光分离。在WDM技术中,需解决的一个关键问题是降低噪声干扰。目前的信道复用方案常采用波长隔离、窄带滤波、时域滤波等各类技术手段降低噪声干扰,形成了较远波长隔离^[85]和同波段传输^[86,87]两类主流方案。较远波长隔离方案相对容易实现,但通信距离较短,适用于短距离高密度局域网的建设;而同波段传输方案的建设成本较高,但具备更远的通信距离和较大的提升潜力,可作为构建量子城域网的参考方案^[88]。

SDM技术基于能够支持多个空间横向光传播模式的光纤,为每个模式分配一个独立的数据通道,从而增加了光纤容量。空分复用光纤主要有多芯光纤、少模光纤、少模-多芯光纤以及环形光纤^[89]。复用器和解复用器用于将不同的数据流组合

和拆分到SDM光纤中的相应空间信道中。已有研究将复用器和解复用器集成在光纤或者光子芯片上^[90-92]。SDM光纤的成本较低可以实现广泛的应用。已有许多实验证明使用空分复用光纤实现空间模式的量子纠缠可以实现更高维度的QKD^[93-95]。但实现更高维度的数百千米的传播距离的量子QKD仍是信道复用技术目前面临的攻关难点之一。此外,在实际的量子网络系统中,信道复用技术的应用还应解决诸多工程问题,如量子网络与现有光纤通信网络的兼容、光纤中产生的非线性噪声引起的高误码率等。

2. 量子接口技术

量子接口可完成量子存储器中静态比特和信道中动态比特的转换,是未来量子网络中不可缺少的元件。动态比特通常是光量子比特,便于传输和接收量子信息。静态量子比特通常采用超导电路、量子阱、量子点等物理体系实现,它们易于长时间存储。

量子接口技术的核心是将不同类型的量子系统进行耦合和相互作用。腔QED是物理学家研究光和物质在量子水平上相互作用的原型系统。1997年,研究者提出了一个基于腔QED的原子-光子接口,由耦合在两能级原子上的高质量光腔构成^[96]。之后,对基于腔QED的原子-光子接口的研究不断发展。目前已有的用于原子-光子接口的常用介质有室温气体^[97]、冷原子^[98]、固态^[99]、原子晶格^[100]、量子阱^[101]等。腔QED也被扩展到其他情形,如量子点耦合到微柱和光子带隙腔、库伯对与超导共振器的相互作用(即线路QED)^[102]。基于这些相互作用可实现量子点-光接口^[103]和微波光子-光接口^[104]。

量子网络中量子接口包括3个攻关要点:波长转换、转换效率和集成。其中,波长转换是在量子网络中实现不同体系量子节点互联的必要技术,需要解决不同节点之间的工作波长和带宽的差异。转换速度的影响因素主要包括光学器件效率和不同量子态间的转换和匹配。不同量子态间转换和匹配需要电光调制器(EOM)。为实现高速转换,通常使用具有GHz带宽的光纤EOM^[105]。为了进一步提升速度,一些研究者采用全光开关的方式,利用光来代替电实现THz级带宽^[106-108]。但这两种方式都依赖于光纤的非线性特性,并需要将光从自由空间耦合到光纤中,这必然会导致较高的信号损耗。量

子接口集成将不同类型的量子系统连接在一起,需要解决量子系统之间的耦合、噪声和退相干等问题。2018年,我国研究团队首次实现了25个量子接口之间的量子纠缠^[109],而此前记录是加州理工学院研究组^[110]保持的4个。

(三) 量子网络系统网络协议技术

1. 量子网络堆栈

与经典通信网络类似,量子网络堆栈是从量子网络底层物理实现中抽象出来的分层模型,每层通过特定的量子网络协议提供一些通信功能^[111]。通过设计量子网络堆栈,可以进一步完善量子网络的架构,并为量子网络的建立制定标准。目前学者们提出了基于链式网络结构^[112-115]、集群的主从式量子网络结构^[116]和针对图态网络^[117]的网络协议堆栈。量子网络堆栈的不同层负责不同的网络功能,共同实现信息传输任务。

建立量子网络堆栈需要面对一个基本问题,即量子网络与经典网络的交互。在量子网络中,节点之间会存在两种连接方式:物理连接(通过物理信道连接)和虚拟连接(通过纠缠信道连接)。这两种连接方式都需要网络节点之间的紧密合作和协调,这涉及到经典信号的传递。因此,量子互联网不太可能在功能上独立于经典互联网。同时由于物理连接和虚拟连接的存在,在量子网络堆栈会出现跨层交互。跨层交互或可通过定义经典-量子接口实现,利用现有的经典功能通过经典控制信号来实现经典-量子交叉层^[118]。此外,在评估量子网络堆栈中的各层性能时,需确定最能表征堆栈每一层性能的参数。当涉及到纠缠时,经典通信和量子通信之间存在严格的相互作用,如生成和纠缠资源时,其生成速率在性能评估中起着关键作用,同时所需的经典控制命令受到经典比特吞吐量的限制,因此在确定参数时应根据堆栈功能同时考虑量子度量与经典度量^[118]。

2. 量子网络协议

量子网络协议用于实现网络运行各个阶段的功能,是保证网络正常运行和数据传输安全、可靠的基础。目前对量子网络协议的研究集中于网络路由协议,包括纠缠路由协议与密钥路由协议。纠缠路由协议在网络上选择一条建立远程纠缠的最优路径,常用度量标准有纠缠生成时间^[119]、纠缠保真

度^[120]、端到端纠缠率^[121,122]、纠缠生成率^[123-125]、网络吞吐量^[126-128]等。密钥路由协议通过选择合适的路径来实现QKD网络量子节点的负载均衡,对其研究多通过改进经典路由协议以适应QKD网络。例如,DARPA QKD网络使用开放最短路径优先(OSPF)协议作为密钥路由协议^[7,129],欧洲SECOQC网络使用升级版的OSPF-v2协议^[130]等。也有学者针对QKD网络特性,以传输跳数^[131]、剩余密钥量^[132]等为路由度量标准来设计密钥路由协议。除网络路由协议之外,还有图态网络配置协议^[133]、量子数据平面协议^[134]等。这些协议与特定量子网络堆栈相关,实现网络堆栈定义的具体功能。如图态网络配置协议位于Pirker等人提出的量子网络堆栈的链路层,用于在网络运行时分发量子态和生成目标图态。

与经典网络相比,量子网络中的路由协议更为复杂。如何综合考虑各种因素,构造合适的路由度量标准是设计量子网络路由协议的难点之一^[135]。针对纠缠路由协议,其路由度量不仅必须根据路径长度、成本和吞吐量计算路径,而且还必须考虑所需的端到端保真度。此外,更高保真度的纠缠链路需要更多的时间来产生,这在确定路由度量标准时也必须考虑到。对于密钥路由协议,还需考虑剩余密钥数量、密钥生成速率、路由安全性等因素。量子网络协议的设计也需要考虑退相干的影响,满足量子网络的高同步与低时延要求。此外,目前量子网络的研究基于单一硬件平台的同构网络^[134]。然而,未来的量子网络将不可避免地包括各种各样的物理平台,导致量子节点和链路的退相干和量子态保真度等参数存在差异,需要做更多的工作来了解混合量子网络中量子网络协议的性能。

(四) 量子网络系统物理硬件技术

1. 量子存储器

量子存储器是一种能够按照需要进行存储和读出量子态的物理设备,在量子网络中扮演着非常重要的角色。量子存储器的研究目标是要达到长存储时间、高保真度、高存取效率、大存储带宽、多模容量以及可以按需读出的实用化标准^[136]。目前,量子存储器已经在多个体系中实现,包括原子体系(冷原子^[137]与室温原子^[138])、固态体系(金刚石NV色心^[139]和稀土掺杂晶体^[61,140,141])、单量子系统(单原子^[142]和单离子^[143])等。所采用的量子存储协议

包括电磁诱导透明协议^[144]、原子频率梳协议^[145]、光子回波协议^[146]等。

近年来,量子存储器在各项性能指标上均有所突破,例如,基于冷原子的存储器的存储效率最高可达到90.6%^[137];基于稀土掺杂晶体的量子存储器的存储时间已超1 h^[140],存储模式最高可达1650^[141]。但是,仍然没有物理体系能够同时达到可实用化的各项标准,提升量子存储的综合性能还需要做大量的探索研究。

2. 量子中继器

量子中继器是量子网络中的核心部件,集成了量子存储、纠缠生成和建立、量子接口等技术,通过分段纠缠分发与纠缠交换来拓展通信距离^[58,59]。目前,量子中继器的研究主要有两类趋势:提出新的中继方案,进一步降低其技术要求,如DLCZ方案^[59]、全光子量子中继器方案^[147,148]、基于吸收型量子存储器的量子中继^[149,150]等;提高量子存储器、光子探测器、纠缠生成源等基本元件的技术指标,使其接近主流中继方案的技术需求。

在量子中继器的研究中,克服光子损耗和操作误差的影响是提高量子中继效率的关键问题^[151]。现有的解决方法包括预示纠缠生成(HEG)^[152]、预示纠缠纯化(HEP)^[153]和量子纠错(QEC)^[154]。其中,HEG和HEP通过一系列测量和操作后确定地获得所需的量子纠缠态,但需要双向经典通信,受到通信速率的限制,且HEP会使通信时间随着距离呈指数增长。QEC方法使用量子奇偶校验码(QPC)^[155]、CSS码^[156]等纠错码来克服噪声的影响,需要高保真度的量子门操作。因此,上述方法的实现均具有较高的技术难度。

四、对我国量子网络系统相关研究的建议

量子网络是能够赋能量子通信和量子计算等领域的基础设施,是未来信息技术发展的重要方向。目前,量子网络的发展距离大规模使用还存在一定距离,仍有许多技术瓶颈亟需攻克。近年来,各国纷纷加大对量子网络的研究和投入。我国应抓住发展机遇,加强基础硬件研发与理论研究的投入,实现量子网络基础硬件的国产化,突破关键瓶颈,以掌握主动权,提高科技硬实力;加强交叉学科人才培养,建立系统的综合研究体系,以推动量子网络

的发展和應用，為我國的科技創新注入新的動力。

（一）加強基礎硬件設施研發投入

量子中繼器和量子存儲器等基礎硬件設施在量子網絡中起着至關重要的作用，是建設大規模量子網絡的核心。當前國內外對於量子中繼器和量子存儲器的研究存在多種技術路徑，仍處於探索階段。相關基礎硬件設施的進一步發展需要世界各國的重視和持續投入。

目前，我國科研人員在全光量子中繼器、基於吸收型量子存儲器的量子中繼器和基於冷原子、稀土摻雜晶體等物理體系的量子存儲器的研究中取得了一定突破，而對於其他物理體系的研究相對薄弱。在量子發展的初期階段，我國應抓住發展時機，厘清國際技術發展形勢，補齊短板，篩選優勢領域以取得進一步突破，實現基礎硬件的國產化，減少核心設備受制於人的風險。因此，加強對量子網絡基礎設施研究的投入，掌握核心技術的自主研發和生產，對於提高我國在量子信息領域的戰略優勢至關重要。

（二）重視量子網絡理論研究

量子網絡的理論研究包括量子密碼協議和量子算法等。其中，量子密碼協議是建立安全量子密碼網絡的基礎。目前只有 QKD 較為成熟，但其他量子密碼協議仍處於瓶頸期，這導致在實際應用中很難全面提升信息系統的安全性。因此，設計實用化的其他量子密碼協議，健全量子密碼協議體系是目前量子密碼網絡發展的重中之重。量子算法在探索量子計算的能力邊界和發掘量子網絡的可用性方面起到了重要作用，然而目前已知的有實際應用價值的代表性量子算法還很少。無論是實用化量子密碼協議還是量子算法，相關理論交叉性強、难度大，需要科研人員發揮“甘坐冷板凳”的精神，長期潛心研究。

然而，我國對量子網絡理論研究的重視程度尚有明顯不足。一些對科研人員的考核標準，片面追求短期成果和經費數量，使從事上述高難度理論研究的學者舉步維艱。基於上述情況，建議高度重視量子網絡理論研究，優化相關考核機制，以營造良好的研究氛圍，助力科研人員的全身心投入，推動量子網絡的理論發展。

（三）加強交叉學科研究和相關人才培養

量子網絡涵蓋物理學、計算機科學、密碼學等多個學科，研究难度大且极具挑战性，未來量子網絡的實現也將是一項浩大的工程。為了在相關研究方面走在世界前列，需要大量具備多學科背景的交叉型、複合型人才。

推動我國量子網絡系統領域的健康發展，需要加強跨學科人才的培養，通過良好的科研條件和政策的激勵來吸引更多學者從事相關研究，尤其是現階段我國還存在短板的研發方向。此外，以跨領域合作項目為牽引，舉辦交叉領域的研討會，有助於促進不同學科研究者的交流與合作。

致謝

感謝李廣輝、李凌霄、魏東梅、張雪、趙秀美等課題組成員對本文撰写的協助。

利益衝突聲明

本文作者在此聲明彼此之間不存在任何利益衝突或財務衝突。

Received date: October 11, 2023; **Revised date:** October 30, 2023

Corresponding author: Gao Fei is a professor from the State Key Laboratory of Networking and Switching Technology (Beijing University of Posts and Telecommunications). His major research fields include quantum cryptography and quantum algorithms. E-mail: gaof@bupt.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Development of Quantum Information Network” (2022-HYZD-01)

參考文獻

- [1] Karlsson A, Bourennane M. Quantum teleportation using three particle entanglement [C]. Glasgow: European Quantum Electronics Conference, 1998.
- [2] Bennett C H. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing [C]. Bangalore: IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing, 1984.
- [3] Shor P W. Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring [C]. Santa Fe: The 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, 2002.
- [4] Grover L K. Quantum mechanics helps in searching for a needle in a haystack [J]. Physical Review Letters, 1997, 79(2): 325–328.
- [5] 郭光灿. 量子信息技术研究现状与未来 [J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(9): 1395–1406.
Guo G C. Research status and future of quantum information technology [J]. Scientia Sinica Informationis, 2020, 50(9): 1395–1406.
- [6] Gyongyosi L, Imre S. Advances in the quantum Internet [J]. Communications of the ACM, 2022, 65(8): 52–63.
- [7] Elliott C, Yeh H. DARPA quantum network testbed [R]. New York: BBN Technologies Cambridge, 2007.

- [8] Peev M, Poppe A, Maurhart O, et al. The SECOQC quantum key distribution network in Vienna [C]. Vienna: The 35th European Conference on Optical Communication, 2009.
- [9] Sasaki M, Fujiwara M, Ishizuka H, et al. Tokyo QKD network and the evolution to secure photonic network [C]. CLEO: 201-Laser Science to Photonic Applications, 2011.
- [10] Stanley M, Gui Y, Unnikrishnan D, et al. Recent progress in quantum key distribution network deployments and standards [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2416(1): 012001.
- [11] IDQ. A new 380 km long intercity QKD infrastructure in Poland [EB/OL]. (2022-09-05)[2023-09-28]. <https://www.idquantique.com/a-new-380-km-long-intercity-qkd-infrastructure-in-poland/>.
- [12] Chen W, Han Z F, Zhang T, et al. Field experiment on a “star type” metropolitan quantum key distribution network [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(9): 575–577.
- [13] 中国科学技术大学. 世界首条量子保密通信干线开通 [EB/OL]. (2017-10-19)[2023-09-28]. https://www.cas.cn/jh/201711/t20171120_4622633.shtml.
University of Science and Technology of China. The world’s first quantum secured communication backbone is now operational [EB/OL]. (2017-10-19)[2023-09-28]. https://www.cas.cn/jh/201711/t20171120_4622633.shtml.
- [14] Chen Y A, Zhang Q, Chen T Y, et al. An integrated space-to-ground quantum communication network over 4, 600 kilometres [J]. *Nature*, 2021, 589: 214–219.
- [15] Chen J P, Zhang C, Liu Y, et al. Twin-field quantum key distribution over a 511 km optical fibre linking two distant metropolitan areas [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15: 570–575.
- [16] Wang L J, Zhang K Y, Wang J Y, et al. Experimental authentication of quantum key distribution with post-quantum cryptography [J]. *NPJ Quantum Information*, 2021, 7: 67.
- [17] 安徽网. 合肥建成全国最大量子保密通信城域网 [EB/OL]. (2022-08-26)[2023-09-28]. <http://www.ahwang.cn/hefei/20220826/2419436.html>.
Anhui Network. Hefei has established the largest quantum secured communication metropolitan area network in China [EB/OL]. (2022-08-26)[2023-09-28]. <http://www.ahwang.cn/hefei/20220826/2419436.html>.
- [18] Ralph T C. Continuous variable quantum cryptography [J]. *Physical Review A*, 1999, 61: 010303.
- [19] Lo H K, Curty M, Qi B. Measurement-device-independent quantum key distribution [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(13): 130503.
- [20] Lucamarini M, Yuan Z L, Dynes J F, et al. Overcoming the rate-distance limit of quantum key distribution without quantum repeaters [J]. *Nature*, 2018, 557: 400–403.
- [21] Fossier S, Diamanti E, Debuisschert T, et al. Field test of a continuous-variable quantum key distribution prototype [J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11(4): 045023.
- [22] Zhang Y C, Li Z Y, Chen Z Y, et al. Continuous-variable QKD over 50 km commercial fiber [J]. *Quantum Science and Technology*, 2019, 4(3): 035006.
- [23] Liu Y, Chen T Y, Wang L J, et al. Experimental measurement-device-independent quantum key distribution [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(13): 130502.
- [24] Rubenok A, Slater J A, Chan P, et al. Real-world two-photon interference and proof-of-principle quantum key distribution immune to detector attacks [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(13): 130501.
- [25] Cao Y, Li Y H, Yang K X, et al. Long-distance free-space measurement-device-independent quantum key distribution [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(26): 260503.
- [26] Fan-Yuan G J, Lu F Y, Wang S, et al. Robust and adaptable quantum key distribution network without trusted nodes [J]. *Optica*, 2022, 9(7): 812.
- [27] Wang S, Yin Z Q, He D Y, et al. Twin-field quantum key distribution over 830 km fibre [J]. *Nature Photonics*, 2022, 16: 154–161.
- [28] Liu Y, Zhang W J, Jiang C, et al. Experimental twin-field quantum key distribution over 1000 km fiber distance [J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(21): 210801.
- [29] Zhou L, Lin J P, Xie Y M, et al. Experimental quantum communication overcomes the rate-loss limit without global phase tracking [J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(25): 250801.
- [30] Zhang X, Gao F, Qin S J, et al. Current status and future development of quantum cryptographic protocols [J]. *Chinese Journal of Engineering Science*, 2022, 24(4): 145.
- [31] 中国科学院量子信息与量子科技创新研究院. 中国三项量子行业标准正式执行 [EB/OL]. (2023-08-01)[2023-09-28]. <https://quantumcas.ac.cn/2023/0828/c24874a610609/page.htm>.
CAS Center for Excellence in Quantum Information and Quantum Physics. China’s three quantum industry standards officially implemented [EB/OL]. (2023-08-01)[2023-09-28]. <https://quantumcas.ac.cn/2023/0828/c24874a610609/page.htm>.
- [32] 魏璐, 马钟, 刘倩玉. 量子计算模拟平台发展综述 [J]. *微电子学与计算机*, 2022, 39(11): 1–10.
- Wei L, Ma Z, Liu Q Y. Overview of quantum computing simulation platforms [J]. *Microelectronics & Computer*, 2022, 39(11): 1–10.
- [33] Group B Q. Quafu-qcover: Explore combinatorial optimization problems on cloud-based quantum computers [EB/OL]. (2023-05-29)[2023-09-28]. <https://arxiv.org/abs/2305.17979.pdf>.
- [34] Xinhuanet. China’s 176-qubit quantum computing platform goes online [EB/OL]. (2023-05-31)[2023-09-28]. <https://english.news.cn/20230531/0946675301284c1786b4ee27251c89a3/c.html>.
- [35] Ryan L R. Overview and comparison of gate level quantum software platforms [J]. *Quantum*, 2019, 3: 130.
- [36] Chen J X, Zhang F, Huang C, et al. Classical simulation of intermediate-size quantum circuits [EB/OL]. (2018-03-03)[2023-09-28]. <https://arxiv.org/abs/1805.01450.pdf>.
- [37] Cuomo D, Caleffi M, Cacciapuoti A S. Towards a distributed quantum computing ecosystem [J]. *IET Quantum Communication*, 2020, 1(1): 3–8.
- [38] Perlin M, Tomesh T, Pearlman B, et al. Parallelizing simulations of large quantum circuits [C]. New York: The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis, Supercomputin, 2019.
- [39] Grover L K. Quantum teleportation [EB/OL]. (1997-04-07)

- [2023-09-28]. <https://arxiv.org/abs/quant-ph/9704012.pdf>.
- [40] Xiao L G, Qiu D W, Luo L, et al. Distributed shor's algorithm [J]. *Quantum Information and Computation*, 2023, 23(1&2): 27–44.
- [41] Liu X, Hu X M, Zhu T X, et al. Distributed quantum computing over 7.0 km [EB/OL]. (2023-07-28)[2023-09-28]. <https://arxiv.org/abs/2307.15634.pdf>.
- [42] Peng T Y, Harrow A W, Ozols M, et al. Simulating large quantum circuits on a small quantum computer [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(15): 150504.
- [43] Lowe A, Medvidović M, Hayes A, et al. Fast quantum circuit cutting with randomized measurements [J]. *Quantum*, 2023, 7: 934.
- [44] 崔子崑, 王维语, 翁文康. 量子云计算平台的现状与发展 [J]. *信息通信技术与政策*, 2020 (7): 43–48.
Cui Z W, Wang W Y, Weng W K. The status and development of quantum computation cloud platform [J]. *Information and Communications Technology and Policy*, 2020 (7): 43–48.
- [45] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, et al. Experimental quantum teleportation [J]. *Nature*, 1997, 390(6660): 575–579.
- [46] Zhao Z, Chen Y A, Zhang A N, et al. Experimental demonstration of five-photon entanglement and open-destination teleportation [J]. *Nature*, 2004, 430: 54–58.
- [47] Zhang Q, Goebel A, Wagenknecht C, et al. Experimental quantum teleportation of a two-qubit composite system [J]. *Nature Physics*, 2006, 2: 678–682.
- [48] Wang X L, Cai X D, Su Z E, et al. Quantum teleportation of multiple degrees of freedom of a single photon [J]. *Nature*, 2015, 518: 516–519.
- [49] Ren J G, Xu P, Yong H L, et al. Ground-to-satellite quantum teleportation [J]. *Nature*, 2017, 549: 70–73.
- [50] Luo Y H, Zhong H S, Erhard M, et al. Quantum teleportation in high dimensions [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(7): 070505.
- [51] Liu S S, Lou Y B, Jing J T. Orbital angular momentum multiplexed deterministic all-optical quantum teleportation [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3875.
- [52] Langenfeld S, Welte S, Hartung L, et al. Quantum teleportation between remote qubit memories with only a single photon as a resource [J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(13): 130502.
- [53] Sherson J F, Krauter H, Olsson R K, et al. Quantum teleportation between light and matter [J]. *Nature*, 2006, 443: 557–560.
- [54] Bao X H, Xu X F, Li C M, et al. Quantum teleportation between remote atomic-ensemble quantum memories [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(50): 20347–20351.
- [55] Nölleke C, Neuzner A, Reiserer A, et al. Efficient teleportation between remote single-atom quantum memories [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(14): 140403.
- [56] Pfaff W, Hensen B J, Bernien H, et al. Unconditional quantum teleportation between distant solid-state quantum bits [J]. *Science*, 2014, 345(6196): 532–535.
- [57] Hermans S L N, Pompili M, Beukers H K C, et al. Qubit teleportation between non-neighbouring nodes in a quantum network [J]. *Nature*, 2022, 605(7911): 663–668.
- [58] Briegel H J, Dür W, Cirac J I, et al. Quantum repeaters: The role of imperfect local operations in quantum communication [J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(26): 5932–5935.
- [59] Duan L M, Lukin M D, Cirac J I, et al. Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics [J]. *Nature*, 2001, 414(6862): 413–418.
- [60] Wei S H, Jing B, Zhang X Y, et al. Towards real-world quantum networks: A review [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(3): 2100219.
- [61] 魏世海, 张雪莹, 廖金宇, 等. 集成固态光量子存储器件研究进展 [J]. *信息通信技术与政策*, 2023, 49(7): 44–52.
Wei S H, Zhang X Y, Liao J Y, et al. Progress of integrated solid-state photonic quantum memory [J]. *Information and Communications Technology and Policy*, 2023, 49(7): 44–52.
- [62] Klyshko D. Coherent photon decay in a nonlinear medium [J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 1967, 6: 23.
- [63] Zel'dovich B, Klyshko D. Field statistics in parametric luminescence [J]. *Jetp Letters*, 1969, 9: 40.
- [64] Hübel H, Hamel D R, Fedrizzi A, et al. Direct generation of photon triplets using cascaded photon-pair sources [J]. *Nature*, 2010, 466: 601–603.
- [65] Kwiat P G, Mattle K, Weinfurter H, et al. New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs [J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(24): 4337–4341.
- [66] Zhang C, Huang Y F, Wang Z, et al. Experimental greenberger-horne-zeilinger-type six-photon quantum nonlocality [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(26): 260402.
- [67] Kim Y H, Kulik S P, Chekhova M V, et al. Experimental entanglement concentration and universal Bell-state synthesizer [J]. *Physical Review A*, 2003, 67: 010301.
- [68] Zheng S B, Guo G C. Efficient scheme for two-atom entanglement and quantum information processing in cavity QED [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(11): 2392–2395.
- [69] Cervera-Lierta A, Krenn M, Aspuru-Guzik A, et al. Experimental high-dimensional greenberger-horne-zeilinger entanglement with superconducting transmon qutrits [J]. *Physical Review Applied*, 2022, 17(2): 024062.
- [70] 高伟超. 纠缠光子源的制备及其在量子信息中的应用研究 [D]. 北京: 北京邮电大学 (博士学位论文), 2020.
Gao W C. Preparation of entangled photon source and its application in quantum information [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications (Doctoral dissertation), 2020.
- [71] Ecker S, Bouchard F, Bulla L, et al. Overcoming noise in entanglement distribution [J]. *Physical Review X*, 2019, 9(4): 041042.
- [72] Jost J D, Home J P, Amini J M, et al. Entangled mechanical oscillators [J]. *Nature*, 2009, 459: 683–685.
- [73] Kurokawa H, Yamamoto M, Sekiguchi Y, et al. Remote entanglement of superconducting qubits via solid-state spin quantum memories [J]. *Physical Review Applied*, 2022, 18(6): 064039.
- [74] Gaudreau L, Bogan A, Korkusinski M, et al. Entanglement distribution schemes employing coherent photon-to-spin conversion in semiconductor quantum dot circuits [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2017, 32(9): 093001.
- [75] van Leent T, Bock M, Fertig F, et al. Entangling single atoms over 33 km telecom fibre [J]. *Nature*, 2022, 607: 69–73.
- [76] Liu S S, Lou Y B, Chen Y X, et al. All-optical entanglement swapping [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(6): 060503.

- [77] Liu Y H, Yan Z H, Jia X J, et al. Deterministically entangling two remote atomic ensembles via light-atom mixed entanglement swapping [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25715.
- [78] Salimian S, Tavassoly M K, Ghasemi M. Multistage entanglement swapping using superconducting qubits in the absence and presence of dissipative environment without Bell state measurement [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 16342.
- [79] Shabani A, Kosut R L, Mohseni M, et al. Efficient measurement of quantum dynamics via compressive sensing [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(10): 100401.
- [80] Zhu H J, Hayashi M. Efficient verification of pure quantum states in the adversarial scenario [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(26): 260504.
- [81] 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.
- [82] Duan L M, Giedke G, Cirac J I, et al. Entanglement purification of Gaussian continuous variable quantum states [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(17): 4002–4005.
- [83] Wilde M M, Krovi H, Brun T A. Convolutional entanglement distillation [C]. Austin: 2010 IEEE International Symposium on Information Theory, 2010.
- [84] Kalb N, Reiserer A A, Humphreys P C, et al. Entanglement distillation between solid-state quantum network nodes [J]. *Science*, 2017, 356(6341): 928–932.
- [85] Nweke N I, Toliver P, Runser R J, et al. Experimental characterization of the separation between wavelength-multiplexed quantum and classical communication channels [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(17): 174103.
- [86] Qi B, Zhu W, Qian L, et al. Feasibility of quantum key distribution through a dense wavelength division multiplexing network [J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12(10): 103042.
- [87] Bahrami A, Lord A, Spiller T. Quantum key distribution integration with optical dense wavelength division multiplexing: A review [J]. *IET Quantum Communication*, 2020, 1(1): 9–15.
- [88] 王宇帅, 李云霞, 石磊, 等. 量子密钥通信网信道复用方案研究 [J]. *通信技术*, 2015, 48(1): 82–85.
Wang Y S, Li Y X, Shi L, et al. Channel multiplexing scheme in optical networking for quantum key distribution [J]. *Communications Technology*, 2015, 48(1): 82–85.
- [89] Xavier G B, Lima G. Quantum information processing with space-division multiplexing optical fibres [J]. *Communications Physics*, 2020, 3: 9.
- [90] Birks T A, Gris-Sánchez I, Yerolatsitis S, et al. The photonic lantern [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(2): 107–167.
- [91] Yerolatsitis S, Gris-Sánchez I, Birks T A. Adiabatically-tapered fiber mode multiplexers [J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 608–617.
- [92] Zeng X L, Li Y, Feng L P, et al. All-fiber orbital angular momentum mode multiplexer based on a mode-selective photonic lantern and a mode polarization controller [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4779–4782.
- [93] Cañas G, Vera N, Cariñe J, et al. High-dimensional decoy-state quantum key distribution over multicore telecommunication fibers [J]. *Physical Review A*, 2017, 96(2): 022317.
- [94] Cozzolino D, Bacco D, Da Lio B, et al. Orbital angular momentum states enabling fiber-based high-dimensional quantum communication [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(6): 064058.
- [95] Hu X M, Xing W B, Liu B H, et al. Efficient distribution of high-dimensional entanglement through 11 km fiber [J]. *Optica*, 2020, 7(7): 738–743.
- [96] Cirac J I, Zoller P, Kimble H J, et al. Quantum state transfer and entanglement distribution among distant nodes in a quantum network [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(16): 3221–3224.
- [97] Dou J P, Yang A L, Du M Y, et al. Direct observation of broadband nonclassical states in a room-temperature light-matter interface [J]. *NPJ Quantum Information*, 2018, 4: 31.
- [98] Yang P F, Xia X W, He H, et al. Realization of nonlinear optical nonreciprocity on a few-photon level based on atoms strongly coupled to an asymmetric cavity [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(23): 233604.
- [99] Burek M J, Meuwly C, Evans R E, et al. Fiber-coupled diamond quantum nanophotonic interface [J]. *Physical Review Applied*, 2017, 8(2): 024026.
- [100] Yang S J, Wang X J, Bao X H, et al. An efficient quantum light-matter interface with sub-second lifetime [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(6): 381–384.
- [101] Stute A, Casabone B, Brandstätter B, et al. Toward an ion-photon quantum interface in an optical cavity [J]. *Applied Physics B*, 2012, 107(4): 1145–1157.
- [102] Vahala K. Optical microcavities [J]. *Nature*, 2003, 424: 839–846.
- [103] Yao W, Liu R B, Sham L J. Theory of control of the dynamics of the interface between stationary and flying qubits [J]. *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, 2005, 7(10): S318–S325.
- [104] Barzanjeh S, Abdi M, Milburn G J, et al. Reversible optical-to-microwave quantum interface [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(13): 130503.
- [105] Vedovato F, Agnesi C, Tomasin M, et al. Postselection-loophole-free Bell violation with genuine time-bin entanglement [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(19): 190401.
- [106] Kupchak C, Erskine J, England D, et al. Terahertz-bandwidth switching of heralded single photons [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(6): 1427–1430.
- [107] Oza N N, Huang Y P, Kumar P. Ultrafast switching of photonic entanglement [C]. California: IEEE Photonics Conference, 2012.
- [108] Kupchak C, Bustard P J, Heshami K, et al. Time-bin-to-polarization conversion of ultrafast photonic qubits [J]. *Physical Review A*, 2017, 96(5): 053812.
- [109] Pu Y F, Wu Y K, Jiang N, et al. Experimental entanglement of 25 individually accessible atomic quantum interfaces [J]. *Science Advances*, 2018, 4(4): eaar3931.
- [110] Choi K S, Goban A, Papp S B, et al. Entanglement of spin waves among four quantum memories [J]. *Nature*, 2010, 468(7322): 412–416.
- [111] Illiano J, Caleffi M, Manzalini A, et al. Quantum Internet protocol stack: A comprehensive survey [J]. *Computer Networks*, 2022, 213: 109092.
- [112] Van Meter R, Ladd T D, Munro W J, et al. System design for a

- long-line quantum repeater [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17(3): 1002–1013.
- [113] Van Meter R, Touch J. Designing quantum repeater networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(8): 64–71.
- [114] Dahlberg A, Skrzypczyk M, Coopmans T, et al. A link layer protocol for quantum networks [C]. Beijing: The ACM Special Interest Group on Data Communication, 2019.
- [115] Kozłowski W, Wehner S. Towards large-scale quantum networks [C]. Dublin: The Sixth Annual ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication, 2019.
- [116] Li Z H, Xue K P, Li J, et al. Building a large-scale and wide-area quantum Internet based on an OSI-alike model [J]. *China Communications*, 2021, 18(10): 1–14.
- [117] Pirker A, Dür W. A quantum network stack and protocols for reliable entanglement-based networks [J]. *New Journal of Physics*, 2019, 21(3): 033003.
- [118] Illiano J, Caleffi M, Manzalini A, et al. Quantum Internet protocol stack: A comprehensive survey [J]. *Computer Networks*, 2022, 213: 109092.
- [119] Van Meter R, Satoh T, Ladd T D, et al. Path selection for quantum repeater networks [J]. *Networking Science*, 2013, 3(1): 82–95.
- [120] Li J, Wang M J, Xue K P, et al. Fidelity-guaranteed entanglement routing in quantum networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(10): 6748–6763.
- [121] Caleffi M. Optimal routing for quantum networks [J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 22299–22312.
- [122] Das S, Khatri S, Dowling J P. Robust quantum network architectures and topologies for entanglement distribution [J]. *Physical Review A*, 2018, 97: 012335.
- [123] Shirichian M, Tofighi S. Protocol for routing entanglement in the quantum ring network [C]. Tehran: 2018 9th International Symposium on Telecommunications (IST), 2018.
- [124] Pant M, Krovi H, Towsley D, et al. Routing entanglement in the quantum Internet [J]. *NPJ Quantum Information*, 2019, 5: 25.
- [125] Li C H, Li T Y, Liu Y X, et al. Effective routing design for remote entanglement generation on quantum networks [J]. *NPJ Quantum Information*, 2021, 7(1): 10.
- [126] Cai X F, Yu X T, Shi X X, et al. Ad hoc quantum network routing protocol based on quantum teleportation [C]. Nanjing: The International Symposium on Antennas & Propagation, 2013.
- [127] Yu X T, Zhang Z C, Xu J. Distributed wireless quantum communication networks with partially entangled pairs [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(1): 010303.
- [128] Zhang L, Liu Q. Optimisation of the routing protocol for quantum wireless Ad Hoc network [J]. *IET Quantum Communication*, 2022, 3(1): 5–12.
- [129] Elliott C, Colvin A, Pearson D, et al. Current status of the DARPA quantum network [C]. Orlando: Quantum Information and Computation III, 2005.
- [130] Dianati M, Alléaume R, Gagnaire M, et al. Architecture and protocols of the future European quantum key distribution network [J]. *Security and Communication Networks*, 2008, 1(1): 57–74.
- [131] Han Q, Yu L Y, Zheng W C, et al. A novel QKD network routing algorithm based on optical-path-switching [J]. *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, 2014, 5: 13–19.
- [132] Zou X Y, Yu X S, Zhao Y L, et al. Collaborative routing in partially-trusted relay based quantum key distribution optical networks [C]. California: Optical Fiber Communication Conference (OFC), 2020.
- [133] Pirker A, Wallnöfer J, Dür W. Modular architectures for quantum networks [J]. *New Journal of Physics*, 2018, 20(5): 053054.
- [134] Kozłowski W, Dahlberg A, Wehner S. Designing a quantum network protocol [C]. Barcelona: The 16th International Conference on Emerging Networking EXperiments and Technologies, 2020.
- [135] Hussein S A, Abdullah A A. A review of various quantum routing protocols designed for quantum network environment [C]. Malang: 2022 11th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS), 2022.
- [136] 张雪莹, 袁晨智, 魏世海, 等. 稀土掺杂固态量子存储研究进展 [J]. *低温物理学报*, 2019, 41(5): 315–334.
- Zhang X Y, Yuan C Z, Wei S H, et al. Rare earth ion doped solid state quantum memory [J]. *Low Temperature Physical Letters*, 2019, 41(5): 315–334.
- [137] Wang Y F, Li J F, Zhang S C, et al. Efficient quantum memory for single-photon polarization qubits [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(5): 346–351.
- [138] Main D, Hird T M, Gao S, et al. Room temperature atomic frequency comb storage for light [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(12): 2960–2963.
- [139] Nakazato T, Reyes R, Imai N, et al. Quantum error correction of spin quantum memories in diamond under a zero magnetic field [J]. *Communications Physics*, 2022, 5: 102.
- [140] Ma Y, Ma Y Z, Zhou Z Q, et al. One-hour coherent optical storage in an atomic frequency comb memory [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 2381.
- [141] Wei S H, Jing B, Zhang X Y, et al. Storage of 1650 modes of single photons at telecom wavelength [EB/OL]. (2023-02-08)[2023-09-28]. <https://arxiv.org/abs/2209.00802>.
- [142] Specht H P, Nölleke C, Reiserer A, et al. A single-atom quantum memory [J]. *Nature*, 2011, 473(7346): 190–193.
- [143] Wang P F, Luan C Y, Qiao M, et al. Single ion qubit with estimated coherence time exceeding one hour [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 233.
- [144] Heinze G, Hubrich C, Halfmann T. Stopped light and image storage by electromagnetically induced transparency up to the regime of one minute [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(3): 033601.
- [145] Afzelius M, Simon C, de Riedmatten H, et al. Multimode quantum memory based on atomic frequency combs [J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 052329.
- [146] Damon V, Bonarota M, Louchet-Chauvet A, et al. Revival of silenced echo and quantum memory for light [J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(9): 093031.
- [147] Azuma K, Tamaki K, Lo H K. All-photonic quantum repeaters [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6787.
- [148] Li Z D, Zhang R, Yin X F, et al. Experimental quantum repeater without quantum memory [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 644–648.
- [149] Sangouard N, Simon C, de Riedmatten H, et al. Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2011, 83(1): 33–80.

- [150] Liu X, Hu J, Li Z F, et al. Heralded entanglement distribution between two absorptive quantum memories [J]. *Nature*, 2021, 594: 41–45.
- [151] Muralidharan S, Li L S, Kim J, et al. Optimal architectures for long distance quantum communication [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20463.
- [152] Krastanov S, Raniwala H, Holzgrafe J, et al. Optically heralded entanglement of superconducting systems in quantum networks [J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(4): 040503.
- [153] Li T, Yang G J, Deng F G. Heralded quantum repeater for a quantum communication network based on quantum dots embedded in optical microcavities [J]. *Physical Review A*, 2016, 93: 012302.
- [154] Roffe J. Quantum error correction: An introductory guide [J]. *Contemporary Physics*, 2019, 60(3): 226–245.
- [155] Munro W J, Stephens A M, Devitt S J, et al. Quantum communication without the necessity of quantum memories [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 777–781.
- [156] Muralidharan S, Kim J, Lütkenhaus N, et al. Ultrafast and fault-tolerant quantum communication across long distances [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(25): 250501.