

量子科技在信息通信领域的

Application Exploration of Quantum Technology in
Information and Communication Field

应用探讨

范琨,马昱,赵天奇(中国联合网络通信集团有限公司,北京 100033)

Fan Kun, Ma Yu, Zhao Tianqi (China United Network Communications Group Co., Ltd., Beijing 100033, China)

摘要:

聚焦量子科技给信息通信领域带来的技术突破与应用前景,系统分析量子通信、量子计算及量子精密测量三大核心技术的原理和在信息通信领域的落地路径。量子密钥分发成熟度高,是筑牢通信安全的核心手段,正突破长距离传输瓶颈;量子计算在电信基础设施优化、运营规划等场景的潜力逐步被发掘;量子精密测量在高精度时频测量、微波电磁场传感计量方面优势明显。尽管量子科技仍面临诸多技术挑战和商业化不确定性,但随着研究的深入和技术的成熟,它将提升通信安全、算力以及测量与传感能力,前景广阔。

Abstract:

It focuses on the technological breakthroughs and application prospects brought by the quantum technology to the telecommunications industry, and systematically analyzes the principles of the three core technologies of quantum communication, quantum computing, and quantum precision measurement, as well as their implementation paths in the telecommunications field. Quantum Key Distribution (QKD), with its high maturity, has become a core means to consolidate communication security, and the bottleneck of long-distance transmission is breaking through. Quantum computing is gradually unleashing its potential in scenarios such as telecommunications infrastructure optimization and operation planning. Quantum precision measurement has demonstrated immense potential and advantages in high-precision time-frequency measurement and microwave electromagnetic field sensing meteorology. Although quantum technology still faces numerous technical challenges and uncertainties in commercialization, with the deepening of research and the maturity of technology, it will enhance communication security, computing capability, as well as measurement and sensing capabilities, presenting broad application prospects.

Keywords:

Quantum technology; Quantum communication; Quantum computing; Quantum precision measurement

引用格式: 范琨,马昱,赵天奇. 量子科技在信息通信领域的应用探讨[J]. 邮电设计技术, 2025(10): 1-6.

0 引言

作为引领新一轮科技革命和产业变革的战略性、颠覆性技术,量子科技已成为国际科技竞争的关键焦点、大国博弈的重要变量,是我国抢占未来产业制高点的战略领域之一。它对实现高水平科技自立自强、保障国家安全、培育新质生产力具有重大意义。量子力学自 20 世纪 20 年代诞生以来,不仅革新了人类对

微观世界的认知,更催生出支撑现代社会的核心技术。就像麦克斯韦方程组历经百年才转化为规模化通信技术一样,量子力学的深层潜力正逐步释放,开启了第 2 次量子革命。如今,量子密钥分发技术(QKD)已进入商业化阶段,量子计算机实现经典计算机数千年任务的分钟级求解,量子精密测量技术精度突破传统极限。本文围绕电信行业需求,从技术原理、网络集成、应用场景 3 个方面,系统探讨量子通信、量子计算与量子精密测量的核心价值,为行业应用提供参考。

收稿日期: 2025-08-15

关键词:

量子科技;量子通信;量子计算;量子精密测量

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2025.10.001

文章编号: 1007-3043(2025)10-0001-06

中图分类号: TN914

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



1 量子通信在信息通信领域的应用

量子通信的核心是利用量子态的不可克隆性、纠缠性等特性,实现经典通信无法企及的安全传输与量子态互联。在电信领域,量子通信的短期应用集中于安全增强方面,长期来看则为构建量子网络奠定基础^[1]。

1.1 技术描述与现状

1.1.1 量子比特与核心特性

量子通信的基本信息单元是量子比特(Qubit),这些基态通常用狄拉克符号表示为 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 。根据量子力学核心的叠加原理,线性微分方程的任意线性组合仍为该方程的解,因此由基态 $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ 展开成的二维希尔伯特空间中,所有态矢量均为合法的量子比特态。因此量子比特的一般形式是叠加态 $\alpha|0\rangle+\beta|1\rangle$,其中归一化条件 $\alpha^2+\beta^2=1$ 成立,且 α, β 为复数。量子比特的核心特性决定了其通信优势^[2]。

a) 波函数坍缩原理。当测量量子的状态时,只有2种可能的结果:以概率 α^2 得到 $|0\rangle$,或以概率 β^2 得到 $|1\rangle$ 。无法直接获取 α 或 β 的值。测量后,态会坍缩到与测量结果对应的态,即如果得到“0”则为 $|0\rangle$,如果得到“1”则为 $|1\rangle$,每种结果的概率分别为 α^2 和 β^2 。

b) 不可克隆性。未知量子态无法被复制,这是QKD“窃听必被察觉”的核心原理,同时也导致量子信号无法通过传统光放大器中继,限制了其直接传输距离。

c) 纠缠性。当描述包含多个量子的系统的态时,纠缠性自然出现。2个量子 $|\varphi\rangle=\alpha|0\rangle+\beta|1\rangle$ 和 $|\phi\rangle=\alpha'|0\rangle+\beta'|1\rangle$ 在希尔伯特空间中的描述是它们的张量积: $|\varphi\rangle\otimes|\phi\rangle=(\alpha|0\rangle+\beta|1\rangle)\otimes(\alpha'|0\rangle+\beta'|1\rangle)=\alpha\alpha'|00\rangle+\alpha\beta'|01\rangle+\beta\alpha'|10\rangle+\beta\beta'|11\rangle$ 。这类态的显著特征是它们不能分离为一个量子比特的态与另一个量子比特的态的乘积,即 $|\Psi\rangle\neq|\varphi\rangle\otimes|\phi\rangle$,无论我们如何选择 $|\varphi\rangle$ 或 $|\phi\rangle$ 。这种不可分离性就是纠缠态的特征。如果我们测量其中一个量子比特,会发现另一个量子比特总是处于相同的态,也就是说,如果我们测量第1个量子比特并得到“0”,那么第2个量子比特已知处于 $|0\rangle$ 态,随后对该量子比特的测量将确定性地产生“0”。

1.1.2 QKD协议类型与技术路线

所有这些协议都需要具备产生、操纵、传输和测量量子信号的能力。对于电信行业而言,这些量子通信信号大部分是光子,传输它们的物理介质是光纤或

自由空间。QKD的核心是通过量子信道生成信息论安全的对称密钥,其协议可按“是否使用纠缠”“编码变量类型”进行分类。

a) 纠缠协议。纠缠源生成纠缠光子对,并将其分发给通信双方。双方通过测量粒子状态得到一致的随机密钥,且任何窃听行为都会破坏纠缠,被即时察觉,从而确保密钥不会泄露。该路线可避免光子数分离(PNS)攻击,但纠缠源产率低、成本高,目前仍处于实验阶段。

b) 制备-测量协议。发射端制备量子态并通过量子信道发送出去,接收端测量量子态,通过经典信道协商密钥。该路线技术成熟,是当前商用系统的主流(如BB84协议)。制备-测量协议根据编码变量类型分为离散变量(DV)和连续变量(CV)2种,2种不同协议的优缺点和应用场景如表1所示。

表1 CV-QKD和DV-QKD的特点比较

协议类型	核心原理	优势	劣势	典型应用场景
离散变量(DV)	利用单光子的离散自由度(偏振、相位等)编码量子比特,通过测量检测窃听	损耗容忍度高(40~50 dB),技术成熟度高	需低温单光子探测器,系统复杂度高	城域骨干网、数据中心互联
连续变量(CV)	利用电磁波电场 $\{X, P\}$ 的正交分量 $X\cos\theta+P\sin\theta$ 的连续取值编码信息,通过零差/外差检测获取量子态	兼容经典光通信器件,成本低,抗噪声能力强	损耗容忍度低(25~30 dB),密钥提取计算密集	接入网、短距离企业互联

(a) 离散变量(DV)QKD。利用量子比特的离散自由度(如偏振、相位)进行编码,采用单光子探测器(如硅APD、超导探测器)接收信号。其优势是损耗容忍度高(40~50 dB),可覆盖100~150 km光纤;缺点是探测器需低温工作,集成难度大。

(b) 连续变量(CV)QKD。利用光场正交分量 $\{X, P\}$ 的正交分量 $X\cos\theta+P\sin\theta$ 的连续值进行编码,采用零差/外差检测(经典通信技术的延伸)。其优势是可与经典信道共传、能在常温下工作、易集成;缺点是损耗容忍度低(25~30 dB),密钥提取计算密集(需FPGA/GPU加速)。

2024年,中国联通研发的通密一体量子密钥分发设备在某市开展了试点验证,在该市机房部署了2台通密一体设备,2机房间的光缆距离约为12 km,验证场景为专线场景,可满足对10G速率的大带宽专线业务量子保密通信的需求。该设备集成了符合G.698.4要求的G.Metro光模块,是业内首款可在单台设备上集

成 CV-QKD 信道与经典加密业务信道的融合共纤传输的设备。

1.1.3 传输瓶颈与解决方案

量子信号对损耗极为敏感,即使使用最透明窗口的光纤和优质光纤,损耗约为 0.2 dB/km,而且本身用于传输的光网络在其他必须使用的设备中又引入了额外的损耗:每个连接器会使损耗增加 0.2 dB,分路器每次分光会使损耗增加 3 dB,一个 1:8 的分路器会使损耗增加 9 dB 等等。当前典型的 DV 和 CV 协议的损耗容忍记录分别在 40~50 dB 和 25~30 dB 范围内。在大多数情况下,量子通信仅能覆盖城域网络。当前,为进一步扩大量子通信的传输距离,主流的重点突破路径如下^[3]。

a) 新型协议突破。测量器件无关协议(MDI-QKD)不仅解决了传统 QKD 存在的测量端安全漏洞,还为构建“多节点量子网络”扩展量子通信传输距离提供了关键技术支撑。其核心是将“本地测量”改为“第三方贝尔态测量(BSM)”,即引入第三方节点,发送方和接收方仅负责“制备量子态并发送给第三方节点”,不进行本地测量;所有测量由第三方节点通过贝尔态测量(BSM)完成,BSM 的作用是判断发送方和接收方发送的量子态是否构成“纠缠态”,它仅输出“关联结果”,不泄露单个量子态的信息。MDI-QKD 的“第三方测量”架构天然适配量子中继,从而允许更长距离的传输。理论上,它可容忍 100 dB 的损耗。目前,中科大的实验传输距离可达 800~1 000 km,且探测器被窃听也不影响其安全性。

b) 卫星中继。卫星可以用作中继,也可以放置纠缠光子源,从而在 2 个地面站之间创建量子密钥。自由空间量子通信损耗远低于光纤(近地轨道卫星链路

损耗约为 20 dB)。

c) 量子中继器。在不复制量子态的前提下实现长距离纠缠分发,是解决全球量子通信难题的终极方案,其核心在于量子存储器与纠缠交换技术。先将长距离拆分为多个短段,在每段的两端制备纠缠光子对,通过量子纠缠交换,把相邻短段的纠缠关联起来,形成跨长距离的纠缠链路;同时用量子存储器暂存量子态,补偿光子传输损耗与操作延迟,避免量子态因退相干而失效,最终实现量子信息的可靠中继与远距离传输。

1.2 量子通信在电信网络中的集成

QKD 需与现有电信网络在物理层实现深度集成,并与运营商经典的光网络架构进行融合,这样才能突破“专用网络”的局限,在现网中实现规模化部署^[4]。QKD 与光纤通信网络融合的网络架构如图 1 所示。

物理层集成的核心在于解决量子信道与经典信道的共传问题,避免经典信号噪声掩盖量子信号。当前,共传解决方案如下。

a) 波长隔离。量子信道选用经典信道未使用的波段,并配合窄带滤波器抑制噪声。

b) 功率控制。降低经典信道功率(如从 10 dBm 降至 0 dBm),以减少拉曼散射噪声。该方案适用于城域网络,但会降低经典通信的速率。

c) 时分复用。量子信号与经典信号在不同时隙传输,避免时域叠加。该方案需要高精度同步,适用于低速率 QKD 场景。

2 量子计算在信息通信领域的应用

量子计算以量子比特(Qubit)为基本单元,利用量子比特的叠加性与纠缠性等原理实现并行计算,能够

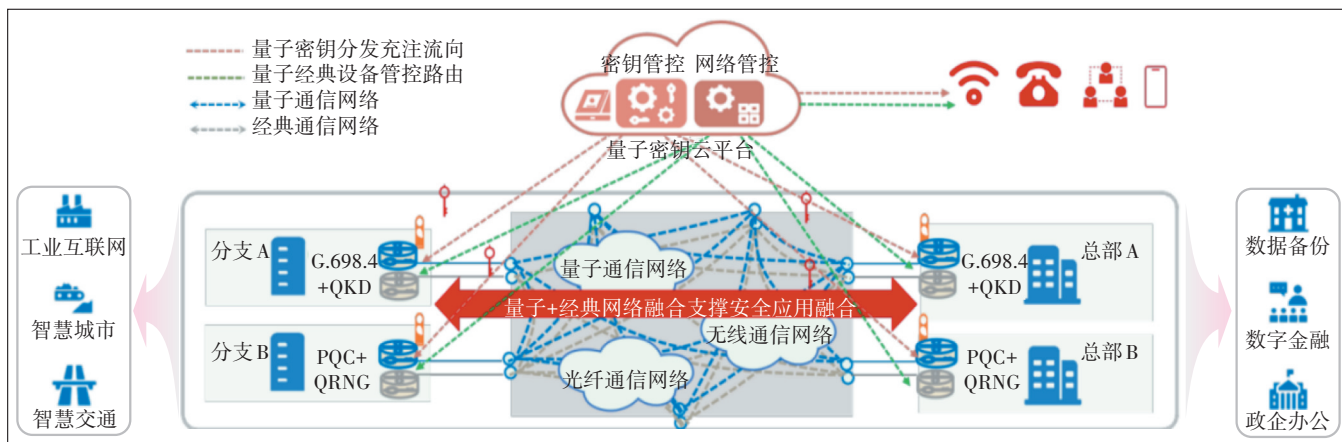


图1 QKD与经典通信网络融合架构

在复杂问题上提供计算能力的指数级加速,突破经典二进制限制。量子比特可同时处于 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的叠加态,而纠缠态使多比特间形成非局域关联,这赋予量子计算机指数级并行计算能力。具体而言,2个量子比特可以处于4种状态的叠加,3个量子比特可以处于8种状态的叠加,依此类推 N 个比特可以取 2^N 种可能的排列之一,而 N 个量子比特可以同时处于所有 2^N 种可能排列的叠加态,这对计算具有显著影响,可在特定问题上(如大数分解、复杂系统模拟等)实现经典计算无法企及的计算效率^[5]。

2.1 技术实现与现状

量子计算的核心技术主要集中在量子比特操控和量子算法设计方面。量子计算机按计算模型可分为“门基型”与“模拟型”。模拟量子计算机包括退火器、绝热量子计算机等,这些系统通过直接操纵量子比特之间的相互作用来解决问题,而非将操作分解为一组门操作。门基量子计算机(有时称为通用量子计算机)会对量子比特执行逻辑门操作(如AND、OR等)。在门基方法中,问题被表述为选择适当的量子算法,接着将量子算法转换为量子电路(即使用量子门),并在量子处理器上执行或进行模拟。

2.1.1 门基量子计算机的核心技术路线

当前,量子计算研究呈现“百花齐放”的局面,新技术研究路径尚未收敛,主流量子计算路径包括超导量子计算、硅基量子计算、光量子计算、离子阱量子计算、中性原子量子计算等。每种路径都有独特优势,同时也面临特殊挑战,主流技术路线的特性如表2所示。

量子计算的发展通常被划分为3个主要阶段。当前量子计算正处于从“基础研究”迈向“通用实用”的关键阶段。

第1阶段,小规模量子原型机:量子比特数量少(通常 <50),仅用于验证量子力学原理(如量子叠加、纠缠),无法实现任何实用功能,也无法超越经典计算机。

第2阶段,含噪声中等规模量子计算(NISQ,当前所处阶段):量子比特数量达到中等规模,开始在特定问题上实现“量子优势”,即完成经典超级计算机难以在合理时间内完成的任务,但受限于噪声,无法实现通用化。

第3阶段,大规模容错量子计算(FTQC):实现成熟的量子纠错技术,量子比特数量达到百万级以上,

表2 量子计算机主流路线与特点

类型	原理描述	优势	劣势	相关企业
光子量子 (Photonics)	光子通过芯片上的光学通道迷宫,测量输出时光子的分布情况来编码量子比特	线性光学门,可集成在芯片上	每个程序需要专属芯片及独特光学通道	Xanadu、PsiQuantum
中性原子 (Neutral Atoms)	像离子一样,存储量子比特于电子态。激光激活电子,使量子比特间产生相互作用	可实现大量量子比特,具备二维甚至潜在三维布局	编程难,单个量子比特控制不易,易受噪声影响	Atom Computing、ColdQuanta、PASQAL
离子阱 (Trapped Ions)	带电原子或离子用电场固定。量子比特存储于电子态,激光推动离子实现量子比特交互	稳定性极佳,门保真度目前最高	操作速度慢,需要大量激光	IonQ、AQT、Honeywell
超导 (Superconducting Loops)	无电阻电流在环路来回振荡,微波信号激发电流进入叠加态	可在芯片上布置物理电路	需冷却到接近绝对零度,制造差异大,噪声多	IBM、Google、Rigetti
硅量子点 (Silicon Quantum Dots)	通过在纯硅片添加电子制成“人造原子”,微波精准控制电子量子态	借助现有半导体行业基础	仅少数可连接,需冷却到接近绝对零度,制造差异大	Intel
拓扑量子比特 (Topological Qubits)	准粒子行为可在半导体结构通道中观测到,经编织路径编码量子信息	大幅降低误差	存在性尚未证实	Microsoft
自旋	量子比特编码自旋自由度(如量子点中的电子、NV中心、核磁共振中的核自旋或基底中的杂质)	可在室温下运行	难制造大量量子比特,限制计算能力,难纠缠	Intel、Quantum Brilliance、SpinQ

噪声被完全抑制,可运行任意复杂的量子算法,如大规模密码破解、精准药物设计、量子人工智能等,从而成为真正通用的“量子计算机”。

2.1.2 NISQ时代的核心特征

a) 中等规模。单台量子计算机的量子比特数量介于几十到几百之间,足以执行特定量子算法,但尚未达到大规模计算能力。

b) 噪声干扰。量子操作会受到环境噪声和量子比特间相互作用的影响,这种影响会导致量子态退相干和错误,需通过误差校正来提升可靠性。

c) 混合计算。将经典计算与量子计算相结合,利用经典系统处理量子计算结果或进行预处理,以克服当前技术局限。

2.1.3 NISQ时代的技术局限

当前阶段量子计算机面临三大局限,制约其规模化应用^[6]。

a) 量子纠错缺失。NISQ 设备无逻辑量子比特(需物理量子比特通过纠错码编码,可抑制噪声的理想量子比特),门操作错误率高($>0.1\%$),仅能运行短深度量子电路($<1\,000$ 个门操作)。

b) 量子比特互联不足。单台量子计算机的量子比特数有限(<500),且不同技术路线的量子比特无法直接互联,需依赖量子通信网络实现跨设备协作。

c) 算法适配性低。多数网络优化问题(如流量预测、信道估计)需定制量子算法,现有通用算法(如量子近似优化算法)的性能提升尚未超过经典启发式算法(如遗传算法)。

2.2 量子计算的通信应用场景

量子计算在电信行业的应用需依托“经典—量子混合架构”。在该架构中,经典计算机负责数据预处理与结果后处理,量子计算机专注于核心计算任务。当前,其潜力场景如下。

a) 网络规划优化。电信网络拓扑设计需平衡覆盖范围、建设成本与容量需求。针对物理小区标识符(PCI)分配、6G 无线网状网络路由以及多目标帕累托最优路径搜索,可利用量子退火或混合量子—经典方法,解决经典算法难以处理的组合优化难题,从而降低相邻小区干扰、优化路由效率^[7]。

b) 基站资源调度。5G 基站的时域/频域资源分配需满足多用户 QoS 需求,量子计算可提升调度精度。将无线调度问题(如空中链路激活、无人机服务资源分配、5G vRAN 调度)通过量子退火、量子近似优化算法进行求解,可减少干扰,提升吞吐量与资源利用率,同时适配低延迟需求^[8-9]。

c) 光网络波长分配。针对波分复用(WDM)中的波长分配问题,运用量子启发算法或未来量子求解,可避免波长冲突、最大化光纤信道利用率,有效应对大规模光网络的复杂度问题。

3 量子精密测量在信息通信领域的应用

量子精密测量利用量子效应、量子相干、量子纠缠或量子隧穿等量子系统特有的性质,实现高精度、高灵敏的探测和测量^[10]。它可以用于测量时间和频率、磁场、电场、重力、温度/压力、加速度、角动量等多种物理量,其测量精度远超经典传感器,可达到海森堡精度极限。

3.1 高精度时频测量

无线通信网络依赖高精度时间同步,这些主时钟

通常是由卫星和铯钟提供,可以在几十纳秒内同步远程位置,并满足时钟同步误差在 $1.5\,\mu\text{s}$ 以内的要求。未来,随着 6G 在太赫兹频段的大规模应用,自动驾驶和工业机器人等应用的推广,对时间同步精度的需求已突破微秒级限制。量子时频精密测量技术凭借其极高的频率稳定性和纳秒级时间同步能力,解决了经典技术面临的“瓶颈”问题,为大规模基站协同、超低时延数据传输提供了核心支撑^[11-12]。

时钟的精度取决于参考频率的稳定性,量子时钟通过原子跃迁频率实现超高精度。1967 年国际计量大会定义“秒”为基于铯-133 原子基态超精细跃迁频率($9.192\,631\,770\,\text{GHz}$)。但铯钟受原子跃迁频率限制,精度已接近理论极限,因此在过去 30 年中,开始研究使用光学域跃迁($>100\,\text{THz}$)的新型时钟,其性能现已超越铯钟。其核心原理是:光学钟最常见的例子是由激光器构成的,光学腔稳定其频率和相位。光学腔为激光器提供短期稳定性。然后,激光器将其频率锁定到对应于原子跃迁的频率(见图 2)。这种光谱学中使用的原子跃迁具有非常窄的线宽,并且对外部因素(如磁场或黑体辐射)的敏感性较低^[13]。

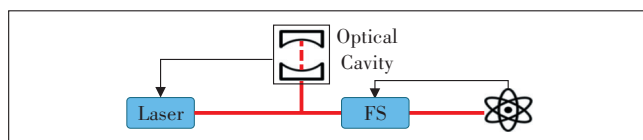


图2 原子跃迁原理

当前光学钟主要分为“晶格钟”与“离子钟”,二者特性互补。

a) 晶格钟。将中性原子(如铷原子、铯原子)囚禁于光晶格中,可同时探测数千个原子,稳定性优异。

b) 离子钟。囚禁单个或少量离子(如铝离子、汞离子),原子与外部扰动隔离度高,精度更高。

3.2 微波电磁场传感计量

随着量子传感技术的进步,里德堡原子天线技术受到了学术界和产业界的广泛关注。里德堡原子天线技术是一种基于高激发态里德堡原子量子特性的新型电磁波传感技术,它具有超宽带调谐、高灵敏度、低噪声等显著优势。近年来,该技术在无线通信、无线感知等领域取得突破性进展,未来将成为 6G 无线通信、空天地海一体化通信领域潜在的关键技术之一。

里德堡原子是指外层电子被激发至高主量子数态的原子,它具有极高的极化率和宽频带响应特性,对外界电场极为敏感。通过激光将原子激发至高能

级里德堡态,利用其大电偶极矩对微弱电磁场的强响应特性实现信号探测,相比传统金属天线,其灵敏度提升3个数量级以上,且尺寸与波长无关,可实现小型化设计。采用里德堡原子天线技术,无线通信系统可以在不增加发射功率的情况下,通过显著降低接收机噪声功率来提升信噪比,从而大幅提升无线通信系统的信息传输速率和微弱信号检测能力。另一项显著优势是,该技术能够突破天线的体积限制实现超宽带调谐。里德堡原子天线无需更改任何硬件,只需要激发碱金属原子到不同的激发态,即可在短波(如9.81 MHz)、甚高频(如223.7 MHz)、4G频段(2.06 GHz)、毫米波(29.5 GHz)、亚太赫兹(如104.77 GHz)甚至太赫兹(如338.75 GHz)的极宽频率范围内的大量离散频点上进行调谐^[14]。

4 总结与展望

2025年被联合国定为“国际量子科学与技术年”,以纪念现代量子理论诞生100周年。量子科技作为新一轮科技革命和产业变革的前沿领域,不仅意味着突破经典物理的局限、拓展人类对微观世界的认知边界,还为信息通信、信息安全、精密测量等领域提供颠覆性技术支撑,有望深刻重塑未来人类生产生活方式与全球竞争格局。

量子科技正从实验室走向产业化应用,并在信息通信领域展现出可观的发展前景。在量子通信领域,QKD是当前唯一可实现信息论安全的通信技术,它已在数据中心互联、PON安全等场景落地。2025年全球商用QKD市场规模预计达50亿美元。在量子计算领域,NISQ时代的量子计算机已在电信基础设施优化、资源调度等场景展现潜力。尽管当前其性能尚未超越经典算法,但随着量子比特数增加与算法优化,它将逐步替代经典计算机处理复杂优化问题。在量子精密测量领域,光学钟将突破传统时间同步极限,支撑5G-A/6G分布式MIMO、量子网络等场景,未来有望成为网络的“时间基准核心”。里德堡原子天线也凭借其独特的窄带响应、无热噪声以及宽带调谐等优良特性,在6G无线通信系统中展现出了非凡的应用潜力。此外,量子信息技术还将被用于实现新型6G功能与服务,例如量子辅助无线接入网(qRAN)。在qRAN中,各类节点之间的所有物理信道均具备量子传输能力,部分节点还将具备完整的量子计算能力^[15]。量子科技将凭借其不可替代的技术特性,推动6G等下一代

网络实现从“功能升级”到“范式革新”的颠覆性跨越,为全球信息通信网络的演进开辟全新路径。

参考文献:

- [1] MARTIN V, BRITO J P, ESCRIBANO C, et al. Quantum technologies in the telecommunications industry [J]. EPJ quantum technology, 2021, 8: 19.
- [2] WOOTTERS W K, ZUREK W H. A single quantum cannot be cloned [J]. Nature, 1982, 299(5886): 802-803.
- [3] 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(7705): 400-403.
- [4] 赵春旭,王光全,毛颖秋,等. 新型光纤在量子通信方面的应用研究 [J]. 邮电设计技术, 2018(6): 72-76.
- [5] PHILLIPSON F. Quantum computing in telecommunication—a survey [J]. Mathematics, 2023, 11(15): 3423.
- [6] PRESKILL J. Quantum computing in the NISQ era and beyond [J]. Quantum, 2018, 2: 79.
- [7] BARILLARO G, BOELLA A, GANDINO F, et al. Comparison of heuristic approaches to PCI planning for quantum computers [C]//2023 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). Las Vegas: IEEE, 2023: 1-6.
- [8] M S. Machine learning and quantum computing for 5G/6G communication networks – a survey [J]. International Journal of Intelligent Networks, 2022, 3: 197-203.
- [9] KIM M, KASI S, LOTT P A, et al. Heuristic quantum optimization for 6G wireless communications [J]. IEEE Network, 2021, 35(4): 8-15.
- [10] 孙思彤,丁应星,刘伍明. 基于线性与非线性干涉仪的量子精密测量研究进展 [J]. 物理学报, 2022, 71(13): 1-21.
- [11] PATI A K, MUKHOPADHYAY C, CHAKRABORTY S, et al. Quantum precision thermometry with weak measurements [J]. Physical Review A, 2020, 102(1): 012204.
- [12] MACCONE L, SACHA K. Quantum measurements of time [J]. Physical Review Letters, 2020, 124(11): 110402.
- [13] IEEE. IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems: IEEE Std 1588-2019 [M]. Piscataway, NJ: IEEE, 2020.
- [14] 王莹,郭余庆,郭旭泓,等. 面向6G无线通信的里德堡原子天线: 技术架构与应用前瞻 [J]. 通信学报, 2025, 46(7): 191-205.
- [15] WANG C G, RAHMAN A. Quantum-enabled 6G wireless networks: opportunities and challenges [J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 29(1): 58-69.

作者简介:

范琨,毕业于西安电子科技大学,高级工程师,硕士,主要从事网络规划优化、网络新技术实验、战新与未来产业研究等工作;马昱,毕业于北京邮电大学,高级工程师,硕士,主要负责未来产业及6G、量子等新兴技术专项工作;赵天奇,毕业于北京邮电大学,工程师,硕士,主要负责原创技术策源地及量子、人工智能等新兴技术专项工作。