

# 量子精密测量与 运营商网络赋能探索

## Exploration of Quantum Precision Measurement and Operator Network Empowerment

马 昱<sup>1</sup>, 范 琨<sup>1</sup>, 赵春旭<sup>2</sup> (1. 中国联合网络通信集团有限公司, 北京 100033; 2. 中国联通研究院, 北京 100032)

Ma Yu<sup>1</sup>, Fan Kun<sup>1</sup>, Zhao Chunxu<sup>2</sup> (1. China United Network Communications Group Co., Ltd., Beijing 100033, China; 2. China Unicom Research Institute, Beijing 100032, China)

### 摘 要:

量子精密测量是推动基础科学研究、工业技术革新与信息基础设施升级的关键技术。系统梳理量子精密测量的核心技术路线与工作原理, 重点探讨其在运营商网络时间同步、光纤链路监测、无线电磁感知等场景的应用潜力与实现路径, 旨在为量子精密测量技术在运营商网络中的落地应用提供理论参考。

### 关键词:

量子精密测量; 运营商网络; 时间同步; 光纤监测; 电磁感知

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.10.004

文章编号: 1007-3043(2025)10-0018-05

中图分类号: TN914

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Abstract:

Quantum precision measurement is a key technology driving basic scientific research, industrial technological innovation, and the upgrading of information infrastructure. It systematically sorts out the core technical routes and working principles of quantum precision measurement, focuses on discussing its application potential and implementation paths in scenarios such as operator network time synchronization, optical fiber link monitoring, and wireless electromagnetic sensing. It aims to provide a theoretical reference for the practical application of quantum precision measurement technology in operator networks.

### Keywords:

Quantum precision measurement; Operator networks; Time synchronization; Optical fiber monitoring; Electromagnetic sensing

引用格式: 马昱, 范琨, 赵春旭. 量子精密测量与运营商网络赋能探索[J]. 邮电设计技术, 2025(10): 18-22.

## 0 引言

量子精密测量是量子力学理论与实验技术深度融合的产物, 它利用光、原子、磁之间的相互作用, 来精确地响应待测物理量的微小变化, 实现对物理量的超高精度探测。量子精密测量已逐步从实验室走向通信、导航、能源、医疗等实际应用领域, 展现出“超精密、高稳定、抗干扰”的核心优势。随着 5G 向工业互联

网、车联网、远程医疗等场景延伸, 以及 6G 向星地一体化、空天地海全覆盖方向发展, 运营商网络对时间同步、链路监测、电磁感知等核心测量指标的要求已从传统的微秒级、分贝级迈向纳秒级、皮瓦级。量子精密测量技术的成熟为突破这一瓶颈提供了新思路, 为运营商网络的技术升级提供新动能。

## 1 量子精密测量的主流路线和原理

量子精密测量的核心目标是基于原子、光子、固态自旋等量子体系, 基于原子能级跃迁、量子相干性、

收稿日期: 2025-08-13

量子纠缠性等特性突破经典测量的物理极限,实现对物理量(如时间、频率、相位、力、磁场、电场)的超高精度测量。图1给出了量子精密测量的原理流程<sup>[1]</sup>。

量子精密测量主要研究在量子力学原理允许的条件下如何实现高精度测量,具体测量分为2个层面,一种是利用统计规律的经典测量方法所能达到的最高测量精度,被称为标准量子极限。由于量子力学中不确定性原理的条件限制,测量结果会有误差,为了减小误差带来的影响,一般进行多次实验,重复测量,取测量结果的平均值。根据中心极限定理,重复 $N$ 次( $N$ 远大于1)独立的测量,其测量结果满足正态分布,测量误差可以达到 $1/\sqrt{N}$ ,该比例因子即为标准量子极限,这就是经典力学框架下的测量极限<sup>[2-3]</sup>。另一种是利用系综中不同粒子之间的量子纠缠和关联的手段达到的最高测量精度,被称为海森伯极限,该测量方法在体系中使用更少的原子数即达到相同的精度。如将输入态制备成最大纠缠态,使 $N$ 个粒子的量子态相互纠缠,则可以把测量精度提高到 $1/N$ ,比标准量子极限允许的精度提高了 $\sqrt{N}$ 倍,该比例因子被称为海森伯极限<sup>[4]</sup>。

根据测量载体与物理原理的不同,量子精密测量主流的技术路线可分为“原子系综”“光子系综”“固态自旋系综”等,每类路线均有其独特的原理与应用场

景。

## 1.1 原子系综测量

原子系综测量以大量原子构成的系统为测量载体,利用原子能级跃迁的稳定性与原子态的相干性,实现对时间、频率、重力、加速度等物理量的高精度测量。其核心原理是:原子的能级结构由量子力学决定,特定能级间的跃迁频率具有极高的稳定性,且原子在特定条件下能保持良好的量子态相干性,通过探测原子能级跃迁的频率、相位或粒子数变化,可反推出被测量物理量的数值<sup>[5]</sup>。

### 1.1.1 中性原子测量技术路线

中性原子因无需额外电荷束缚、制备成本较低,是目前应用最广泛的原子系综技术路线,主要包括原子蒸气与冷原子2类形态。

原子蒸气体系以加热或自然蒸发形成的气态原子团为核心,典型代表有铷、铯原子蒸气。这类体系制备简单,加热金属铷、铯即可产生稳定原子蒸气,无需复杂真空冷却设备,故设备体积小、成本可控,适合便携式测量场景。在测量应用中,原子蒸气对磁场、光强响应速度快(毫秒级),常被用于构建小型化原子磁力计、原子钟,其磁场测量灵敏度可达纳特斯拉(nT)量级。

在冷原子体系方面,20世纪80年代激光冷却技术

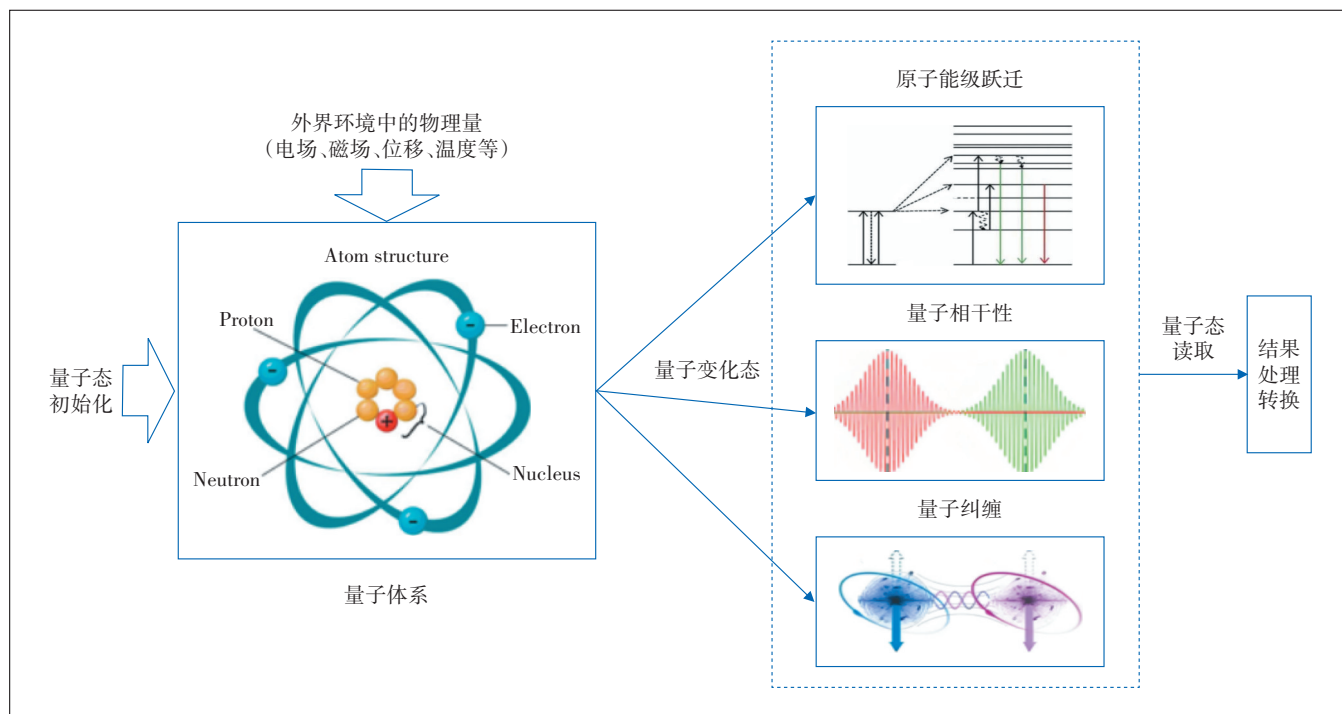


图1 量子精密测量原理

的出现引发了原子传感领域的变革。冷原子传播速度降低,在真空或被囚状态下沿特定轨迹自由下落,使得利用空间受限的原子进行更长时间的传感成为可能,自由下落的原子推动了原子重力仪和陀螺仪的发展。相较于原子蒸气,冷原子的量子态相干时间大幅延长(从毫秒级提升至秒级),原子热运动导致的测量噪声显著降低。冷原子常被制备成“原子喷泉”“光学晶格”等结构。例如铯原子喷泉钟通过将冷原子向上喷射形成“喷泉”轨迹延长原子与微波场的作用时间,使时间测量精度提升至 $10^{-16}$ 量级;光学晶格则通过激光形成的周期性势阱束缚冷原子,实现原子的有序排列与精准操控,可用于重力测量、加速度测量等。

#### 1.1.2 束缚离子测量技术路线

该路线以带电离子为测量对象,通过射频离子阱或保罗阱将离子束缚在真空环境中,实现单个或多个离子的精准操控。束缚离子的核心优势在于量子态稳定性极高——离子阱可隔绝外部环境振动、电磁干扰,使离子的能级相干时间突破秒级,甚至达到分钟级,因此该路线适合需要长期稳定测量的场景。在测量应用中,束缚离子的能级跃迁频率精度极高,是下一代光学原子钟的核心候选。不过,该路线需依赖高精度离子阱与超高真空系统,设备体积较大、成本较高,目前主要应用于实验室级高精度测量,未来通过微型化离子阱技术有望拓展至工业场景。

#### 1.1.3 里德堡原子测量技术路线

里德堡原子是处于高激发态的特殊原子,其最外层电子轨道半径极大,同时具有极强的偶极-偶极相互作用与对外界环境的超高敏感性,成为量子精密测量的“超灵敏探针”。在量子精密测量领域,里德堡原子的应用优势主要体现在3个方面:一是电场测量灵敏度极高,对外部电场的响应幅度远超基态原子,通过测量能级移动或跃迁频率变化,可实现微伏/厘米( $\mu\text{V}/\text{cm}$ )量级的微弱电场探测,适用于高压设备电场分布监测、半导体芯片内部电场检测等场景;二是磁场测量能力突出,里德堡原子的塞曼效应(能级随磁场分裂)更为显著,结合激光光谱探测技术,可构建纳特斯拉(nT)量级的量子磁力计,用于地下管线定位、航天器电磁环境监测;三是量子纠缠制备潜力大,里德堡原子间的长程相互作用(作用距离可达微米级)可诱导产生多原子纠缠态,通过纠缠增强测量突破标准量子极限,例如利用里德堡原子纠缠态构建的干涉仪,其相位测量精度可达到海森堡极限,为引力波探

测、基础物理常数测量提供了新手段。

#### 1.2 光子系综测量

光子干涉测量以光子为测量载体,利用光子的量子态(如偏振态、相位态、纠缠态)与干涉效应,实现对相位、光强、损耗、电场、磁场等物理量的高灵敏度测量。其核心原理是:光子的量子态对外部物理量(如电场、磁场、温度)的变化极为敏感,外部物理量的微小变化会导致光子量子态的相位、偏振或振幅发生改变;通过光子干涉仪(如马赫-曾德尔干涉仪、迈克尔逊干涉仪)将量子态的变化转换为干涉条纹的移动或光强的变化,进而实现对被测量物理量的高精度探测。

#### 1.3 固态自旋系综测量

固态自旋系综以固体材料中的量子缺陷或量子结构为核心,具有体积小、集成度高、稳定性强等优势,能够在室温等复杂环境下稳定工作。这类系综的量子特性主要源于材料中的微观缺陷,这些缺陷具有独特的电子自旋或能级结构,可通过光、电、磁等手段进行操控和测量,从而实现对外部物理量的高精度感知。与原子系综和光子系综相比,固态系综更易于与传统半导体工艺兼容,便于大规模集成制造。金刚石色心是金刚石晶体中的一种缺陷结构,其中研究最为广泛的是氮-空位(NV)色心。NV色心由一个氮原子取代金刚石晶格中的一个碳原子,并且在相邻位置存在一个空位而形成。NV色心具有独特的电子自旋特性,其基态为自旋三重态,具有较长的自旋相干时间。在室温下,NV色心的电子自旋可以长时间保持量子态,不易受到环境噪声的干扰,这使得它成为一种非常稳定的量子比特和量子传感器。此外,NV色心的电子自旋状态可以通过光和微波进行精确操控和测量,具有良好的可扩展性和兼容性。由于NV色心的电子自旋对外部磁场、电场极为敏感,因此其在磁场和电场测量方面具有显著优势<sup>[6]</sup>。

原子系综、光子系综、固态自旋系综的特点对比如表1所示。

## 2 利用量子纠缠特性达到海森堡极限

第1章介绍到利用统计规律的经典测量方法所能达到的最高测量精度被称为标准量子极限,可以利用原子、光子、固态自旋等量子物理态,如果要进一步突破标准量子极限,需要利用系综中不同粒子之间的量子纠缠和关联的手段达到的最高测量精度,被称为海

表1 原子系综、光子系综、固态自旋系综的特点对比

| 对比维度 | 原子系综                                                                | 光子系综                                                           | 固态自旋系综                                                                            |
|------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 特点   | 由大量原子组成,原子间存在相互作用,量子态相干时间长,可利用激光冷却、囚禁等技术精确控制原子状态                    | 以光子的量子特性为基础,如偏振、相位、纠缠等,传播速度快,不易受外界干扰,可通过非线性光学过程产生和调控           | 基于固体材料中的量子缺陷,如金刚石中的氮-空位(NV)色心、碳化硅中的缺陷等,具有良好的稳定性和可集成性,能在室温下工作                      |
| 优势   | 时间频率测量精度极高,对磁场、电场等物理量的测量灵敏度和分辨率高,量子态操控技术成熟                          | 可实现长距离、高速率的量子信息传输和处理,测量响应速度快,适合动态物理量的监测,与现有光通信技术兼容性好           | 体积小、重量轻,易于集成到小型设备中,对环境条件要求相对较低,稳定性高                                               |
| 劣势   | 设备通常需要低温、真空等特殊环境,体积较大,便携性差,对环境振动、电磁干扰敏感,原子系综的制备和维护成本较高              | 光子的产生、操控和检测技术较为复杂,对光学元件的要求高,量子态容易受到损耗和噪声的影响                    | 量子缺陷的量子比特数量相对较少,量子态的相干时间有限,量子比特的扩展性和相互作用的调控难度较大                                   |
| 测量对象 | 时间频率(原子钟)、磁场(原子磁力计)、角速度(原子陀螺仪)、电场(里德堡原子电场仪)、重力、加速度、温度(碱土金属原子温度传感器)等 | 位移、振动、相位、折射率(光纤量子干涉仪)、磁场、电场(纠缠光子态磁力计/电场计)、频率、光谱(量子光谱仪)、光强、光子数等 | 磁场(金刚石 NV 色心磁力计)、温度(硅空位色心温度传感器)、电场(碳化硅缺陷色心电场仪)、压力(固态缺陷压力传感器)、微波场(金刚石 NV 色心微波探测器)等 |

森堡极限<sup>[7]</sup>。实现多个微观粒子的量子纠缠态是达到海森堡极限的关键步骤之一。在不同的物理体系中,有多种制备量子纠缠态的方法。

a) 在原子系综中,常用的方法包括基于激光冷却和囚禁技术的原子纠缠制备。通过特定频率和强度的激光照射原子系综,利用原子与光场的相互作用,可以诱导原子之间发生量子纠缠。例如,利用拉曼激光对原子的能级进行操控,使原子在不同能级间的跃迁过程中产生纠缠<sup>[8]</sup>。

b) 在光子系综中,通过自发参量下转换过程可以制备纠缠光子对。当一束强激光通过非线性光学晶体时,在满足一定的相位匹配条件下,会有一定概率产生一对纠缠的光子,它们在偏振、相位等属性上存在关联。

c) 在固态系综(如金刚石 NV 色心)中,可以利用微波和光脉冲的协同作用来制备纠缠态。通过精确控制微波脉冲的频率、相位和幅度,以及光脉冲的照射时间和强度,实现对 NV 色心电子自旋的操控,从而

制备出多个 NV 色心之间的纠缠态。

一旦制备出量子纠缠态,就可以将其应用于精密测量方案中。相比传统的基于非纠缠粒子的测量方案,基于纠缠态的测量方案能够有效降低测量过程中的量子噪声。因为纠缠态粒子之间的量子关联使它们能够共同对外部物理量的变化做出响应,通过对这种集体响应的测量和分析,可以提取出更准确的信息,从而突破标准量子极限,逼近海森堡极限。

3 量子精密测量的主要应用

根据 ICV 发布的《2024 量子精密测量产业发展展望》<sup>[9]</sup>,当前量子精密测量领域已形成相对完整的产业结构,具体可划分为三大核心环节:一是基础赋能技术层,涵盖支撑量子精密测量系统运行的关键技术与材料,包括低温技术、测控设备、真空系统、磁体、激光器、单光子探测器以及用于原子系综与固态系综制备的专用材料;二是核心产品层,基于原子、固态等不同量子体系,研制出的量子精密测量设备,具体包含时间测量设备、磁场测量设备、重力测量设备、惯性测量设备及目标识别设备等;三是行业应用层,上述技术与产品已在重点领域实现应用突破,覆盖卫星导航、军事国防、医疗保健、通信等关键场景。

在导航领域,量子惯性导航技术利用原子干涉仪测量加速度与角速度,摆脱了对 GNSS 的依赖,定位精度达到厘米级,且抗干扰能力强,已在无人机、潜艇等领域开展测试应用。

在勘探领域,量子传感器可用于检测地下资源,如通过高精度重力测量,分析地下地质结构差异,重力场微小变化,定位潜在的石油、天然气等资源储存区域,为隐伏矿床定位提供关键数据。

在电力行业,量子磁力计被用于电力设备的无损检测,可检测变压器、电缆等设备内部的微弱磁场变化,提前发现设备故障,提升电力系统的可靠性。

在医疗领域,量子精密测量技术凭借其对微弱信号的高灵敏度探测能力,在多场景发挥关键作用。在疾病诊断中,该技术可通过量子传感器捕捉疾病引发的体内分子浓度、磁矩等细微物理量变化,为癌症、神经退行性疾病等的早期检测提供关键依据;在人体成像方面,以脑磁图成像为代表,依托量子传感技术实现对大脑神经放电微弱磁场的精准检测,支持患者在舒适状态下完成脑部扫描,助力脑功能区定位与病灶识别。

在运营商网络中,量子精密测量的潜在应用有以下几个方面。

a) 高精度时间同步。5G/6G 网络中的车联网、工业互联网、星地一体化通信业务对时间同步的精度要求极高,传统基于 GNSS 与 NTP 的同步方案难以满足需求。基于原子钟的量子时间同步技术可提供稳定、可靠的时间基准。在星地一体化网络中,利用光晶格钟作为卫星与地面站的时间基准,通过星地激光链路实现时间传递,保障星地高速通信、全球高精度定位的服务质量。在时间同步领域,基于原子钟的量子时间同步技术已在 5G 基站中试点应用,可满足车联网、工业互联网等业务的需求<sup>[10-11]</sup>。

b) 光纤链路监测。基于弱值测量的光纤损耗监测技术可实现对光纤链路中皮瓦级微弱光信号的检测。该技术可实时监测光纤链路的微小损耗变化,提前发现光纤老化、接头松动、外部挤压等故障,尤其适用于海底光缆、量子保密通信链路等对损耗敏感的场景。此外,基于量子纠缠干涉的相位噪声监测技术可测量光纤链路中皮弧度级的相位波动,为 5G/6G 网络的高速信号传输提供相位稳定保障<sup>[12-13]</sup>。

c) 无线电磁感知。基于光子干涉的电磁传感器利用光子偏振态对电场、磁场的敏感性,可实现对微弱电磁信号的高灵敏度探测。该技术可用于运营商网络的电磁环境监测,检测非法信号、干扰信号,提升网络安全防护能力;同时,可用于基站天线的辐射场型测量,优化天线部署,提升网络覆盖质量。

## 4 总结与展望

量子精密测量依托量子特性突破经典测量极限,形成原子、光子、固态自旋等主流技术路线,已在运营商网络时间同步、光纤监测、电磁感知场景显示应用价值,可满足 5G 延伸与 6G 布局需求<sup>[14-15]</sup>。未来需突破设备微型化、多量融合测量、纠缠工程化应用瓶颈,按“试点验证—标准制定—规模推广”步骤落地,推动“量子+6G”协同,为星地一体化网络提供统一时间基准与全域电磁感知能力,支撑空天地海无缝通信,同时强化网络安全防护,使其成为数字基础设施核心支撑,助力数字经济升级。

### 参考文献:

- [1] WRESZINSKI W F. A theory of quantum (statistical) measurement [EB/OL]. [2025-01-10]. <https://arxiv.org/abs/2205.12906>.

- [2] BARNETT S M, FABRE C, MAÎTRE A. Ultimate quantum limits for resolution of beam displacements[J]. The European Physical Journal D - Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics, 2003, 22(3): 513-519.
- [3] HUANG J H, ZHUANG M, LU B, et al. Achieving heisenberg-limited metrology with spin cat states via interaction-based readout [J]. Physical Review A, 2018, 98(1):012129.
- [4] 陈耕, 李传锋. 超越海森伯极限的量子精密测量[J]. 物理, 2023, 52(6):417-419.
- [5] 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.
- [6] 程春阳, 张琪, 石发展. 单自旋量子精密测量——基于钻石量子传感器的微扰磁共振[J]. 中国科学技术大学学报, 2019, 49(11): 861-872.
- [7] WANG E L, WANG G C, ZHU L X, et al. Progress of atomic spin squeezing and its applications in quantum precision measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(9):0900001.
- [8] OU Z Y. Enhancement of the phase-measurement sensitivity beyond the standard quantum limit by a nonlinear interferometer [J]. Physical Review A, 2012, 85(2):023815.
- [9] 中国量子信息解读. ICV&QUANTUMCHINA 报告:《2024 全球量子精密测量产业发展展望》[R/OL]. [2025-01-10]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/685723395>.
- [10] MACCONE L, SACHA K. Quantum measurements of time [J]. Physical Review Letters, 2020, 124(11):110402.
- [11] IEEE. IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems; IEEE 1588-2019 [S]. Piscataway, NJ:IEEE, 2020.
- [12] PATI A K, MUKHOPADHYAY C, CHAKRABORTY S, et al. Quantum precision thermometry with weak measurement [J]. Physical Review A, 2020, 102(1):012204.
- [13] 张萌. 量子测量技术与产业发展及其在通信网中的应用展望[J]. 信息通信技术与政策, 2020(4):66-71.
- [14] WANG C G, RAHMAN A. Quantum-enabled 6G wireless networks: opportunities and challenges [J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 29(1):58-69.
- [15] ALI M Z, ABOHMRA A, USMAN M. Quantum for 6G communication: a perspective [J]. IET Quantum Communication, 2023, 4(3): 112-124.

### 作者简介:

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; 范琨, 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; 赵春旭, 毕业于北京大学, CCSA 量子通信与信息技术特设任务组(ST7)WG1 组副组长, 高级工程师, 博士, 主要从事量子通信与高速光通信技术的应用研究工作。