

引用格式: 王童, 申屠国樑, 刘燕平, 等. 光量子雷达标准体系构建研究 [J]. 标准科学, 2026 (3): 97-103.  
WANG Tong, SHENTU Guoliang, LIU Yanping, et al. Research on a Standards System for Optical Quantum Lidar [J]. Standard Science, 2026 (3):97-103.

## 光量子雷达标准体系构建研究

王童<sup>1</sup> 申屠国樑<sup>2\*</sup> 刘燕平<sup>2</sup> 温丹亭<sup>2</sup> 安丰柱<sup>1</sup>

(1. 山东国家标准技术审评中心; 2. 山东国耀量子雷达科技有限公司)

**摘要:** 【目的】针对光量子雷达标准缺失制约产业发展的问题, 系统构建科学完善的光量子雷达标准体系框架, 支撑其规模化应用与产业高质量发展。【方法】通过分析国内外技术现状、政策体系及标准化需求, 采用“问题识别—体系构建—路径规划”的研究路径, 设计覆盖技术全要素的多维标准架构。【结果】构建了涵盖基础通用、关键技术、测试评价、安全规范及行业应用五大核心维度的标准体系, 提出了“分步实施、急用先立”的三阶段推进原则, 给出了加强协同创新与标准制定、深化应用示范与产业推广及建立标准体系动态更新机制的实施路径建议。【结论】为光量子雷达标准化工作提供理论支撑与实施路径, 助推产业高质量发展。

**关键词:** 光量子雷达; 政策体系; 标准化; 标准体系; 实施路径

DOI编码: 10.3969/j.issn.1674-5698.2026.03.012

## Research on a Standards System for Optical Quantum Lidar

WANG Tong<sup>1</sup> SHENTU Guoliang<sup>2\*</sup> LIU Yanping<sup>2</sup> WEN Danting<sup>2</sup> AN Fengzhu<sup>1</sup>

(1. Shandong National Standards Technical Review and Assessment Center; 2. Shandong Guoyao Quantum Lidar Technology Co., Ltd.)

**Abstract:** [Objective] The lack of standards for optical quantum lidar limits the industrial development of optical quantum lidar. Our paper establishes a scientific and comprehensive standards system for optical quantum lidar that can offer effective references for its large scale application and high-quality development. [Methods] By analyzing the situation of domestic and international technology, policy systems and standard requirements, the mode of "problem identification - system construction - roadmap planning" is taken to design a multidimensional standards system covering all technical elements. [Results] The system consists of five primary dimensions of the basic and general standards, key technologies, test and evaluation, safety specifications and industry applications. A three phased implementation principle of "advance steadily, needs immediately addressed first" was formed, and the implementation recommendations were provided, such as collaborative innovation and standards development, application demonstration

**基金项目:** 本文受山东省重点研发计划(重大科技创新工程)资助项目“基于近红外光量子雷达的大气颗粒物自动溯源软硬件解决方案系统”(项目编号:2023CXGC010901)资助。

**作者简介:** 王童, 博士, 高级工程师, 研究方向为信息技术与自动化领域标准化。

申屠国樑, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为量子测量与光量子雷达技术。

and industrial promotion, and the dynamic update mechanism for the standards system. [Conclusion] This study provides theoretical basis and implementation path for the standardization of optical quantum lidar, and promotes the high-quality development.

**Keywords:** optical quantum lidar; policy systems; standardization; standards system; implementation path

## 0 引言

光量子雷达是一种基于量子力学原理的新型环境感知与监测装备,其利用量子纠缠、量子关联、单光子探测等量子特性进行目标探测,提升雷达在强噪声或极限弱光信号环境中的探测性能<sup>[1]</sup>。光量子雷达有望超越传统雷达系统在探测距离、信噪比、灵敏度、分辨率、探测效率等方面性能极限,在低空经济、航空航天、军事防御、环境监测、智能交通、气象测绘等领域具有革命性的应用前景<sup>[2]</sup>。例如颗粒物光量子雷达相比传统激光雷达探测灵敏度提高约100倍,单次扫描周期缩短至分钟级,实时获取测量区域内大气的气溶胶、颗粒物、能见度、团雾、边界层等分布信息,在大气监测领域为大气颗粒物污染源精准追踪、污染传输过程、空气质量治理评估提供可靠数据支撑<sup>[3-5]</sup>。

随着量子科技的迅猛发展,全球主要国家已将量子技术纳入国家战略竞争重点。联合国将2025年确定为“量子科学与技术之年”,彰显了国际社会对量子技术的高度重视。在此背景下,世界各国都对光量子雷达关键技术开展了广泛研究,如麻省理工学院量子照明雷达<sup>[6]</sup>、罗切斯特大学量子成像雷达<sup>[7]</sup>、美国雷神公司量子增强雷达<sup>[8]</sup>等。国内研发体系以产学研协同为特色:中国科学技术大学在量子成像雷达与单光子探测技术上取得突破<sup>[9-10]</sup>;山东国耀量子雷达科技有限公司主导大气多参数光量子雷达产业化,基于1 550 nm波长颗粒物光量子雷达已应用于多地环保监测组网<sup>[3-4]</sup>;西安电子科技大学着力推进多光子纠缠量子雷达的工程落地<sup>[11-12]</sup>。

本文旨在系统分析光量子雷达的政策现状与

标准化需求,将从政策支持体系、标准现状分析及标准化工作展望3个维度展开研究,深入探讨其产业化进程、面临的挑战,特别是标准化方面的缺口,并最终提出符合我国技术特点和产业需求的标准化发展路径、建议、对策。

## 1 政策支持体系

### 1.1 国家战略部署

光量子雷达所属的量子测量技术领域已成为我国国家战略的重要组成部分。2024年7月,党的二十届三中全会通过的《中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定》明确提出,建立未来产业投入增长机制,完善推动新一代信息技术、人工智能、航空航天、新能源、新材料、高端装备、生物医药、量子科技等战略性新兴产业发展和治理体系。2021年中共中央、国务院印发的《国家标准化发展纲要》对加强量子信息等关键技术领域标准研究作出战略部署。党中央、国务院将量子科技提升到国家现代化建设的战略高度,为光量子雷达等具体应用领域的发展提供了顶层政策保障。

### 1.2 部委专项支持

在专项规划层面,2025年《计量支撑产业新质生产力发展行动方案》将量子科技列为十大重点产业领域,要求攻克新一代计量基准量子化、计量标准小型化、量值传递扁平化等量子精密测量关键技术,提升深低温、强磁场、超高压等极端条件和复杂环境下的精密测量能力;2024年5月,网信办等三部门联合发布的《信息化标准建设行动计划(2024—2027年)》首次将“量子信息标准布局”列为重点任务,要求开展量子计算、量子通

信、量子测量关键技术标准研究,为光量子雷达的标准制定提供了直接政策依据;2023年8月,工业和信息化部等四部门实施的《新产业标准化领航工程实施方案(2023—2035年)》对量子测量领域标准化明确方向,要求研制“量子高灵敏度探测与目标识别”等关键标准。这些政策形成了从战略规划到具体实施的全链条政策支持体系,为光量子雷达的技术研发和标准制定指明了方向。

### 1.3 地方政策响应

地方政府积极响应国家战略,通过持续性政策培育(如税收减免、研发自主权、建设未来产业园区等)推动光量子雷达等量子测量关键技术的转化应用,在部分地区形成了区域产业集群。以济南市为例,依托济南量子技术研究院及30余家关联企业,该市已在主城区及周边区域构建了全国首个“颗粒物光量子雷达监测网络”,年产值超过1亿元,实现了从技术研发到场景应用的全链条布局。

## 2 光量子雷达标准化现状分析

### 2.1 国际标准化现状

全球量子技术标准化工作正处于快速发展阶段。作为量子精密测量的重要技术领域,欧美等发达国家及地区对量子测量、光量子雷达等技术路径做出了前沿规划。2023年,欧洲标准化委员会(CEN)和欧洲电工标准化委员会(CENELEC)发布的《量子技术标准路线图》将光量子雷达列入新型改进传感和计量装置(Novel and improved sensing and metrology devices)<sup>[13]</sup>,并成立了世界上首个全面研究量子技术的标准化委员会JTC 22 QT(Joint Technical Committee 22 on Quantum Technologies)。2024年12月,美国能源部发布了《量子信息科学应用路线图》,虽然未直接提及光量子雷达领域,但系统规划了量子传感与测量的发展路径及多领域应用前景。

国际标准化组织(ISO)、国际电工委员会(IEC)和国际电信联盟(ITU)也在量子技术领域

积极布局。IEC于2021年发布《量子信息技术白皮书》,不仅分析了量子测量的技术现状、趋势及应用案例,还分析了现有标准化需求,以探索未来在量子信息技术领域的标准化机会<sup>[14]</sup>。上述组织先后成立了ISO/IEC JTC 1/WG 14(量子信息工作组)、ISO/IEC JTC 1/SC 27(信息安全、网络安全和隐私保护分技术委员会)、ISO/IEC JTC 3(量子技术联合技术委员会)、FG-QIT4N(网络量子信息技术焦点组)等标准化工作机构<sup>[15]</sup>,但重点主要集中在量子计算和量子通信方向。量子测量领域,特别是光量子雷达方向,目前尚未形成系统化的国际标准体系。这种国际标准缺失既为我国自主制定标准提供了战略机遇,也增加了我国技术产品出口的潜在壁垒。

### 2.2 国内标准化现状

光量子雷达属于量子测量与激光雷达的交叉领域。我国在量子测量标准化领域已经走在世界前列。2018年,国家标准化管理委员会批复成立全国量子计算与测量标准化技术委员会(SAC/TC 578),该标委会是世界首个专注于量子计算与测量的标准化技术组织,已发布6项量子测量领域国家标准,其中《量子测量术语》《单光子源性能表征及测量方法》等术语定义和测量方法标准为光量子雷达标准化奠定了重要基础。但是,在光量子雷达专用标准方面,相关工作进展相对滞后,行业层面也尚未形成针对光量子雷达性能评测、接口协议和测试方法的专门标准。

激光雷达领域虽然已有多项国家标准和行业(气象等)标准(见表1),但是光量子雷达作为量子精密测量的新兴领域,其核心功能(如单光子级探测)与表1所列标准存在显著技术代差。现有标准针对经典电磁波雷达设计,覆盖对象为宏观气象参数(风速、降水)或传统激光雷达测距/成像场景,既未涉及量子光源特性验证、量子噪声抑制阈值等关键技术指标,也未规范纳米级颗粒物多物理场耦合监测方法。同时,光量子雷达与传统激光雷达在探测机制、分辨率、应用场景等方面均有显著差异。

表1 激光雷达、大气环境监测领域国家标准、行业标准统计

序号	相关标准
1	激光雷达测风数据可靠性评价技术规范 (GB/T 44395—2024)
2	光电测量 智能操控类激光雷达主要参数测试方法 (GB/T 45307—2025)
3	测风雷达通用规范 (GB/T 12506—2017)
4	气象雷达参数测试方法 (GB/T 12649—2017)
5	天气雷达通用技术条件 (GB/T 12648—1990)
6	电工术语 雷达 (GB/T 3784—2009)
7	环境空气质量标准 (GB 3095—2012)
8	激光测风雷达观测规范 (QX/T 687—2023)
9	多普勒天气雷达维护要求 (QX/T 724—2024)
10	地基相干多普勒测风激光雷达 (QX/T 605—2021)
11	机载激光雷达数据获取技术规范 (CH/T 8024—2011)
12	X波段数字化天气雷达 (QX/T 348—2016)

### 2.3 现有标准缺口分析

综上所述, 现有的相关标准为光量子雷达标准化提供了基础框架, 如GB/T 43737—2024《量子测量术语》对量子雷达进行了定义<sup>[16]</sup>: 以量子测量原理和技术为基础, 利用量子系统的相干叠加、量子纠缠等特性实现的雷达。但是光量子雷达标准制定工作仍处于起步阶段, 存在多方面缺口, 主要表现为:

(1) 缺少术语和分类标准。量子雷达已经有过清楚的定义, 但光量子雷达没有统一的定义, 各类路线 (比如量子关联雷达、纠缠雷达) 的分类没有边界, 因而会给行业交流和市场统计造成混乱。

(2) 系统互联接口不统一。系统中数据格式定义、通信接口 (物理接口、链路接口、传输接口命令集) 及电源接口 (电压、电流、插接器等) 规范等不统一, 不利于系统集成和相应的开发、维护等。

(3) 性能评测标准存在空白。量子探测效率、抗环境能力 (如抗振动能力、温湿度稳定性等)、防电磁干扰、抗干扰等性能缺乏客观、统一的测试环境、测试方法和量化标尺, 使得各种光量子雷达产品难以客观准确评测。

(4) 安全标准缺少针对性。对于人眼安全性的量子激光功率阈值、电磁兼容性等没有专用标准且

存在安全隐患。在车载和机载等近距离使用的场合, 这些安全标准的缺失阻碍了产品的应用。

此外, 还缺少在行业领域的应用技术规程和规范。

## 3 光量子雷达的标准化工作展望

### 3.1 标准体系框架设计

科学完善的标准体系是光量子雷达高质量发展的前提基础之一。针对光量子雷达技术和产业现状特点, 要建立包括基础通用、关键技术、测试评价、安全规范及行业应用等方面的光量子雷达标准体系 (图1)。

基础通用标准有术语定义、符号标识、系统分类与体系通用要求等, 不涉及非常具体的技术要求, 但为整个产业生态提供统一语言, 为科研、生产、交流、贸易奠定基础。关键技术标准是其标准体系的核心, 它直接规定了实现卓越性能所需的核心软硬件组件应满足的具体技术要求和规范, 涵盖量子光源、单光子探测器、信号处理及系统互联等方面, 是确保产品性能、可靠性和互联互通的关键。

测试评价标准直接关系到光量子雷达的性

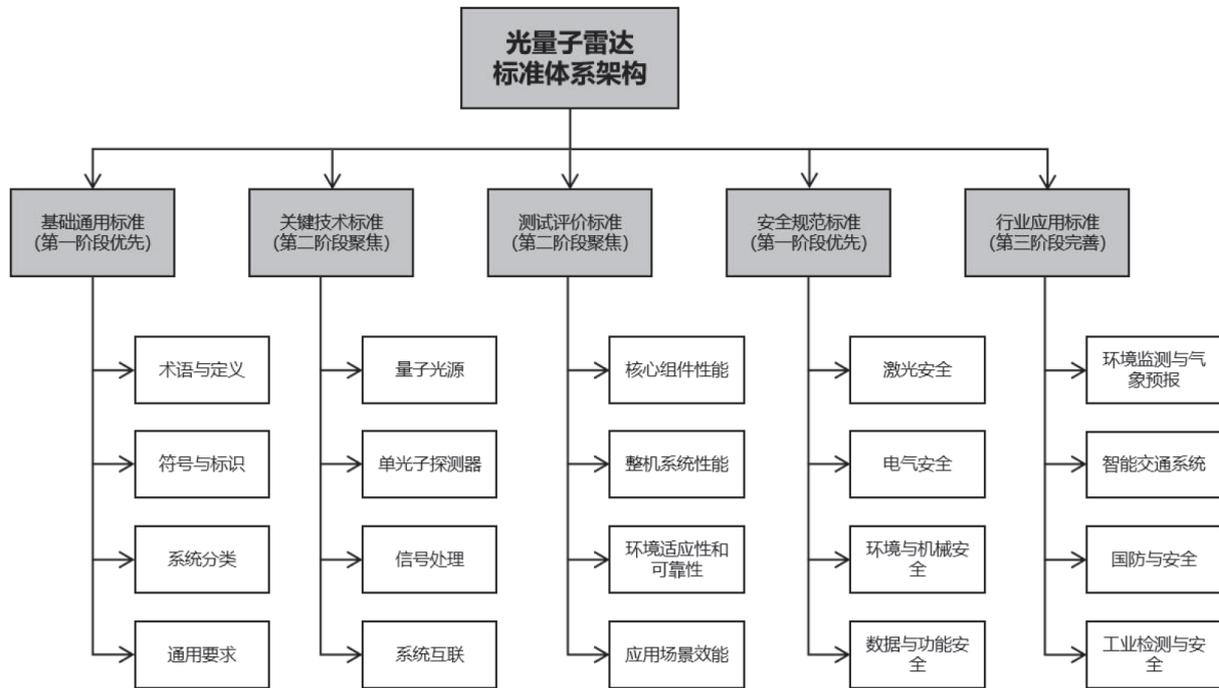


图1 光量子雷达标准体系架构图

能、可靠性和最终的应用效果，需对核心组件性能、整机系统性能、环境适应性和可靠性及应用场景效能进行测试评价，是确保相关产品和技术从实验室走向工程化和产业化应用的“试金石”。

安全规范包括激光安全、电气安全、环境与机械安全、数据与功能安全等方面，保证雷达在制造、安装、运输、贮存、使用和维护过程中对人员、设备、环境提供多重保护。

行业应用标准则适用于环境监测与气象预报、智能交通系统、国防与安全、工业检测与安全等不同场景，推动光量子雷达从实验室走向实用化。

标准体系建设应遵循“分步实施、急用先立”的原则。第一阶段优先制定基础标准和安全规范，为光量子雷达的发展制定基础框架；第二阶段聚焦关键技术和性能测试方法，提出核心软硬件组件、数据接口互联的统一规范和测试方法，消除厂商间技术壁垒，促进产业互联互通；第三阶段完善应用标准和维护规范，推动光量子雷达标准与产业深度融合，支撑规模化和高质量发展。

### 3.2 重点领域建议

在标准体系建设的基础上，结合2.3所剖析的现有标准缺口，建议重点开展以下标准制定工作：

(1) 基础通用标准方面。在现有《量子测量术语》国家标准的框架下，制定《光量子雷达术语与分类》相关标准化文件，依据其物理原理（如量子纠缠、量子关联等）和技术架构，建立清晰、科学的分类标准。

(2) 关键技术标准方面。研制接口协议等标准，统一雷达数据的格式规范、通信接口和传输协议，提升系统兼容性。可借鉴济南光量子雷达监测网络的经验，采用模块化设计理念，支持新旧设备平滑过渡。

(3) 测试评价标准方面。研制量子探测性能、整机性能评测标准，明确单光子探测效率、时间抖动、暗计数率等关键参数的测试评价条件与方法；规定设备极端温度（如 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）、湿度、振动等的环境适应性能要求和测试方法，保证设备稳定运行。

(4) 安全规范标准方面。针对 $1\ 550\ \text{nm}$ 等常用

波长, 制定人眼安全的量子激光功率阈值标准, 明确车载、机场等场景下的安全要求, 确保设备在公共区域的安全使用。

(5) 行业应用标准方面。在目前光量子雷达应用较多的环境监测、智能交通及气象测绘等领域制定规程类标准, 推动技术落地。

通过上述重点标准的逐步制定与实施, 将系统性地填补现有标准缺口, 支撑光量子雷达产业的规范发展。

### 3.3 实施路径与策略

本文从标准的制定、实施验证和评估优化等角度提出了以下路径与策略:

(1) 强化协同创新与标准制定。建立“企业提出需求—科研机构技术攻关—标准组织转化规范”的协同模式, 依托领军研究机构与企业, 加速技术成果向标准转化。同步推进国际标准对接, 积极参与ISO/IEC等国际标准制定, 推动我国在碳监测、大气污染溯源等优势领域的实践形成国际共识, 加强中外标准互认, 破除产业出口壁垒, 提升国际话语权。

(2) 深化应用示范与产业推广。依托“双碳”监测、智慧城市等国家重点项目, 在济南大气监测网、舟山海雾监测等示范工程中优先应用和验证新标准, 加速技术迭代与成本优化, 形成可复制的示范模式, 以标准引领产业规模化发展。

(3) 建立标准体系动态更新机制。成立覆盖产学研用的跨行业分技术委员会或工作组, 常态化跟踪国内外技术进展与产业动向, 建立技术预警与评估体系。明确标准制修订的触发条件, 包括关键技术突破(如单光子探测效率显著提升)、产业规模达到阈值(如年产值突破30亿元)、新兴场景成熟或国际标准重大更新, 确保标准体系持续先进、适用。

## 4 结论

光量子雷达作为量子精密测量技术的典型应用, 已从实验室走向规模化部署, 但标准缺失正成为产业发展的关键瓶颈。

本文梳理了国际、国内在量子测量和光量子雷达相关领域的政策和标准化现状, 分析了现有标准的缺口问题, 给出了该领域的标准化工作建议和实施路径, 提出了建立覆盖基础通用、关键技术、测试评价、安全规范和行业应用的全链条标准体系, 建议强化协同创新与标准制定、深化应用示范与产业推广及建立标准体系动态更新机制, 期望相关内容能为光量子雷达标准化及产业发展提供参考。未来将继续针对光量子雷达的标准化路线图开展研究, 以标准化引领产业高质量发展。

### 参考文献

- [1] 张晴雪,张欣亮.量子雷达技术的研究现状及应用发展趋势探究[J].新技术新工艺, 2024(8):17-21.
- [2] 窦贤康,薛向辉,徐飞虎.光量子雷达:看得更远,看得更快,看得更清[J].前沿科学, 2020, 14(4):46-49.
- [3] 申屠国樑,王冲,尚祥,等.颗粒物光量子雷达的研制及其在环保监测中的应用[J].信息通信技术与政策,2022(7):52-59.
- [4] 周咪咪,尚祥,曲砾源,等.济南市一次污染传输过程中的光量子雷达联合组网监测[J].环境工程技术学报,2025,15(5):1655-1664.
- [5] 贾铭蛟,尚祥,任翔宇,等.基于颗粒物光量子雷达的颗粒物排放实时溯源及应用[J].中国环境监测, 2024, 40(2):222-232.
- [6] LLOYD S.Enhanced Sensitivity of Photodetection via Quantum Illumination[J].Science, 2008, 321(5895):1463-1465.
- [7] MALIK M, MAGAÑA-LOAIZA O S, BOYD R W. Quantum-secured imaging[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(24):1539.
- [8] DUTTON Z, SHAPIRO J H, GUHA S. LADAR resolution improvement using receivers enhanced with squeezed-vacuum injection and phase-sensitive amplification[J].

- Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(6): A63–A72.
- [9] LI Z P, YE J T, HUANG X, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. Optica, 2021, 8(3): 344–349.
- [10] YU C, SHANGGUAN M, XIA H, et al. Fully integrated free-running InGaAs/InP single-photon detector for accurate lidar applications[J]. Optics express, 2017, 25(13): 14611–14620.
- [11] GAO W L, XU L P, ZHANG H, et al. One-shot detection limits of time-alignment two-photon illumination radar[J]. Chinese Physics B, 2023, 32(5): 050304.
- [12] GAO W, XU L, ZHANG H. Time alignment quantum illumination based on single real-time coincidence counting[J]. Optics Express, 2023, 31(25): 41887–41904.
- [13] 欧洲标准化委员会. 量子技术标准化路线图[R]. 布鲁塞尔: CEN–CENELEC, 2023.
- [14] IEC. 量子信息技术白皮书[R/OL]. [2023–06–27]<https://max.book118.com/html/2022/0401/8110136052004067.shtm>
- [15] 陈卫,杜健,安洁,等.量子信息法规政策及标准现状浅析[J].中国标准化,2025(4):55–59.
- [16] 全国量子计算与测量标准化技术委员会.量子测量术语:GB/T 43737—2024[S].北京: 中国标准出版社,2024.