

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

激光雷达创新与应用专题导读

刘博, 赵彬, 蒋贇, 吴松华, 吴光

引用本文:

刘博, 赵彬, 蒋贇, 等. 激光雷达创新与应用专题导读[J]. 光电工程, 2024, 51(3): 240076.

Liu B, Zhao B, Jiang Y, et al. Special issue on innovation and application of LiDAR[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 240076.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240076>

收稿日期: 2024-03-26; 修改日期: 2024-03-31; 录用日期: 2024-04-01

相关论文

固态激光雷达研究进展

陈敬业, 时尧成

光电工程 2019, 46(7): 190218 doi: [10.12086/oe.2019.190218](https://doi.org/10.12086/oe.2019.190218)

智能驾驶车载激光雷达关键技术与应用算法

陈晓冬, 张佳琛, 庞伟淞, 艾大航, 汪毅, 蔡怀宇

光电工程 2019, 46(7): 190182 doi: [10.12086/oe.2019.190182](https://doi.org/10.12086/oe.2019.190182)

频率调制连续波激光雷达技术基础与研究进展

卢焰宇, 葛春风, 王肇颖, 贾东方, 杨天新

光电工程 2019, 46(7): 190038 doi: [10.12086/oe.2019.190038](https://doi.org/10.12086/oe.2019.190038)

宏/子脉冲编码光子计数激光雷达

刘博, 姜朔, 于洋, 陈臻

光电工程 2020, 47(10): 200265 doi: [10.12086/oe.2020.200265](https://doi.org/10.12086/oe.2020.200265)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240076

激光雷达创新与应用专题导读

刘 博^{1,2,3*}, 赵 彬^{1,2,3}, 蒋 赟^{1,2,3}, 吴松华⁴, 吴 光⁵¹中国科学院空间光电精密测量技术重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院大学, 北京 100049;³中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;⁴中国海洋大学信息科学与工程学部海洋技术学院, 山东 青岛 266100;⁵华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200241

摘要: 近年来, 激光雷达技术发展迅猛, 在科研与产业领域发挥出越来越重要的作用, 赋予遥感、成像、环境感知等领域新的生命力。《光电工程》组织了“激光雷达创新与应用”专题, 围绕单光子激光雷达、合成孔径激光雷达、调频连续波激光雷达、环境要素激光雷达、成像激光雷达, 以及应用于激光雷达的新型精密测量技术等几个方面, 介绍了近期的主要研究进展, 为相关领域学者和专家提供技术研究的参考及合作交流的平台, 积极推动我国激光雷达技术的研究进程。

关键词: 激光雷达; 单光子; 精密测量; 专题出版

中图分类号: TN958.98

文献标志码: A

刘博, 赵彬, 蒋赟, 等. 激光雷达创新与应用专题导读 [J]. 光电工程, 2024, 51(3): 240076

Liu B, Zhao B, Jiang Y, et al. Special issue on innovation and application of LiDAR[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 240076

Special issue on innovation and application of LiDAR

Liu Bo^{1,2,3*}, Zhao Bin^{1,2,3}, Jiang Yun^{1,2,3}, Wu Songhua⁴, Wu Guang⁵¹Key Laboratory of Science and Technology of Space Optoelectronic Precision Measurement, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;⁴College of Marine Technology, Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;⁵State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract: In recent years, the rapid development of LiDAR technology has played an increasingly important role in the field of scientific research and industry, giving new vitality to remote sensing, imaging, environmental perception and other fields. A special issue on "Innovation and application of LiDAR" was organized, which is around the single photon LiDAR, synthetic aperture LiDAR, FM continuous wave LiDAR, environmental factors LiDAR, imaging LiDAR, the new LiDAR precision measurement technology, as well as the recent main research progress. As a technical research reference and a exchange platform for scholars in related fields, this special issue will actively promote the research process of China's LiDAR technology.

Keywords: LiDAR; single photon; precision measurement; special issue publication

收稿日期: 2024-03-26; 修回日期: 2024-03-31; 录用日期: 2024-04-01

*通信作者: 刘博, boliu@ioe.ac.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

激光雷达, 英文缩写为 LiDAR (light detection and ranging), 中文可直译为“光探测与光测距”。虽然激光雷达发展到今天, 其用途已远不限于探测和测距, 但这个名称依然被沿用下来^[1]。

激光雷达是一种主动光电传感系统, 它发射可见光或红外谱段的电磁波照射目标, 同时接收目标后向散射的回波信号; 与目标发生散射作用时, 发射电磁波会受到目标特征的调制而携带上一些有用信息, 激光雷达通过对回波信号进行处理分析, 提取这些有用信息并反演目标特征, 完成目标的探测和特征识别。

与被动光电传感系统不同, 激光雷达自带光辐射源, 可以主动照明探测场景而不需要依赖外界环境辐射。因此, 在理论上, 激光雷达具备 24 小时工作能力。激光雷达与被动光电传感的另一个不同之处是, 激光雷达能灵活地控制场景照明方式 (如: 光信号调制, 光束扫描, 光束孔径的移动、分布、合成等), 使其具有更多的探测传感模式^[2], 比如: 单光子激光雷达^[3-4]、线性调频连续波激光雷达^[5]、合成孔径激光雷达^[6]、衍射光学激光雷达^[7]等。

激光雷达主要用于进行 1D 测量 (单点距离)^[8-9]、2D 成像 (角-角-反射率图像)^[10]、3D 成像 (角-角-距离图像)^[11-12]等。激光雷达测量, 特别是激光成像测量^[13], 之所以为人们所青睐, 是因为它的工作波段在可见光或红外光, 物体对这一谱段电磁波的散射特性, 正好符合或接近于人眼的视觉习惯。同时, 相比微波雷达, 更短的工作波长也赋予了激光雷达更高的分辨率, 能够获得更加精细的目标场景数据。

近年来, 激光雷达技术发展迅猛, 从大气探测^[14-15], 到遥感测绘^[16-17], 再到自动驾驶^[18-19], 激光雷达越来越显示出其巨大的应用潜力, 已成为国民经济与国防建设中不可或缺的关键技术之一。“激光雷达创新与应用”专题围绕单光子激光雷达、合成孔径激光雷达、调频连续波激光雷达、环境要素激光雷达、成像激光雷达, 以及应用于激光雷达的新型精密测量技术等几个方面介绍近期的主要研究进展。本期共择优收录了来自中国科学院微电子研究所、浙江大学、华中科技大学、天津大学、华东师范大学、青岛大学、河北工业大学、中国科学院光电技术研究所等高校和科研院所的 10 篇最近研究成果, 共包括 3 篇综述和 7 篇科研论文。

3 篇综述论文中, 《单光子激光雷达技术发展现状与趋势》聚焦于采用单光子雪崩光电二极管探测器

的激光雷达技术与系统, 介绍了脉冲累积、编码调制和啁啾调制三种主流单光子激光雷达探测原理, 概述了单光子探测器的发展现状及典型的信号处理算法, 分析展望了单光子激光雷达技术在器件、算法、系统和应用领域的未来发展趋势及面临的潜在挑战^[20]。

《合成孔径激光雷达成像技术研究进展》从合成孔径激光雷达的工作原理出发, 回顾和梳理了合成孔径激光雷达的主要关键技术的主要进展, 包括合成孔径激光雷达的系统模型和基础理论、系统设计与架构、运动补偿技术以及成像算法, 并探讨了后续实现工程化所需面对的困难和挑战^[21]。《基于直接散射光谱的多环境要素激光遥感方法》一文则对近年来直接散射光谱激光雷达在光谱特性研究技术和光谱探测技术两个方面取得的进展进行了归纳分析和总结, 主要介绍了基于直接散射光谱的水下和大气多环境要素探测理论和反演模型, 以及目前已有的多种直接散射光谱的测量方法^[22]。

7 篇科研论文则将作者在擅长研究领域的最新成果呈现给读者。《基于衍射透镜接收的激光雷达特性分析及测试》利用衍射光学元件 (DOE) 的高设计自由度和色散大等优势, 将 DOE 件用于激光雷达接收端, 同时实现聚焦和滤光作用, 降低了光学系统复杂度^[23]。《调频连续波激光多路并行相干精密长度测量方法》针对传统长度测量系统存在光纤色散、辅助路光纤漂移导致长度测量精度降低问题, 提出一种含有氰化氢气体吸收池的三光路马赫-曾德尔干涉测量系统, 并基于光开关结构实现精密长度多路并行测量^[24]。《图像引导和点云空间约束的公路洒落物检测定位方法》提出了一种图像引导和点云空间约束的公路洒落物检测定位方法, 使用改进的 YOLOv7-OD 网络处理图像数据获取二维目标预测框信息, 将目标预测框投影到激光雷达坐标系下得到锥形感兴趣区域 (ROI), 联合点云聚类 and 点云生成算法获得不同尺度的洒落物在三维空间中的检测定位结果^[25]。《协同随机森林方法和无人机 LiDAR 空谱数据的盐沼植被“精灵圈”识别》将无人机激光雷达点云的空间信息与光谱信息结合, 无需人工经验设置参数, 能够精确地从无人机 LiDAR 三维点云数据中快速智能识别“精灵圈”, 为“精灵圈”时空分布反演提供了一种高精度的方法^[26]。《高分辨率贝塞尔光束激光成像》利用贝塞尔光束的中心光斑能量集中且束宽不随传输距离而变化的无衍射特性, 降低激光光束的发散角, 在远距离目标成像

中实现了角分辨率为 18.1 μrad 的激光三维成像^[27]。

《高精度相位式激光雷达测距系统的设计》采用激光控制同频参比的相位差检测方法, 提出了一种新型的高精度相位式激光雷达测距系统, 系统测量精度达到毫米级别, 简便实用且能满足广泛的实际应用需求^[28]。

《面向 MEMS 振镜激光雷达系统的近程接收机设计》针对 1550 nm 波段铟镓砷探测器小光敏面, 无法有效接收 MEMS 较大扫描视场回波的问题, 设计了一种适用于近程宽视场的接收装置, 满足了近程探测的需要^[29]。

“激光雷达创新与应用”专题将在《光电工程》2024 年第 3 期刊出, 希望通过本专题对激光雷达原理、设计、测试评估等方面新理论、新方法、新技术的不断探索, 为相关领域学者和专家提供技术交流、合作研究平台和参考, 并持续、快速地共同推进我国激光雷达研究进程。当然, 这需要相关领域同仁的共同努力和不懈探索。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Molebny V, Mcmanamon P F, Steinvall O, et al. Laser radar: historical prospective—from the East to the West[J]. *Opt Eng*, 2016, **56**(3): 031220.
- [2] McManamon P F. *LiDAR Technologies and Systems*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2019. <https://doi.org/10.1117/3.2518254>.
- [3] Liu B, Jiang Y, Wang R, et al. Technical progress and system evaluation of all-time single photon lidar[J]. *Infrared Laser Eng*, 2023, **52**(1): 20220748.
刘博, 蒋贇, 王瑞, 等. 全天时单光子激光雷达技术进展与系统评价[J]. *红外与激光工程*, 2023, **52**(1): 20220748.
- [4] Li ZH, Wu E, Pang C K, et al. Multi-beam single-photon-counting three-dimensional imaging lidar[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(9): 10189–10195.
- [5] Li C L, Liu J C, Zhang F M, et al. Review of nonlinearity correction of frequency modulated continuous wave LiDAR measurement technology[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(7): 210438.
李超林, 刘俊辰, 张福民, 等. 频率调制连续波激光雷达测量技术的非线性校正综述[J]. *光电工程*, 2022, **49**(7): 210438.
- [6] Li D J, Hu X. Optical system and detection range analysis of synthetic aperture lidar[J]. *J Radars*, 2018, **7**(2): 263–274.
李道京, 胡旭. 合成孔径激光雷达光学系统和作用距离分析[J]. *雷达学报*, 2018, **7**(2): 263–274.
- [7] Zhu J Y, Xie Y J. Large aperture lidar receiver optical system based on diffractive primary lens[J]. *Infrared Laser Eng*, 2017, **46**(5): 0518001.
朱进一, 谢永军. 采用衍射主镜的大口径激光雷达接收光学系统[J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(5): 0518001.
- [8] Zuo H, He S Y. 1D LiDAR based on large aperture FPCB mirror[C]//2019 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, 2019: 150–151. <https://doi.org/10.1109/OMN.2019.8925013>.
- [9] Li Y H, Wu Z S, Gong Y J, et al. Laser one-dimensional range profile[J]. *Acta Phys Sin*, 2010, **59**(10): 6988–6993.
李艳辉, 吴振森, 宫彦军, 等. 目标激光脉冲一维距离成像研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(10): 6988–6993.
- [10] Hess W, Kohler D, Rapp H, et al. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2016: 1271–1278. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487258>.
- [11] Liu B, Yu Y, Jiang S. Review of advances in LiDAR detection and 3D imaging[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, **46**(7): 190167.
刘博, 于洋, 姜朔. 激光雷达探测及三维成像研究进展[J]. *光电工程*, 2019, **46**(7): 190167.
- [12] Huang Y J, Li X Y, Ye W Y, et al. High resolution 3D imaging based on confocal sub-pixel scanning[J]. *Acta Opt Sin*, 2023, **43**(8): 0822014.
黄远建, 李晓银, 叶文怡, 等. 基于共聚焦亚像素扫描的高分辨三维成像[J]. *光学学报*, 2023, **43**(8): 0822014.
- [13] Hu Y H, Zhang X Y, Xu S L, et al. Research progress of laser reflective tomography techniques[J]. *Chin J Lasers*, 2021, **48**(4): 0401002.
胡以华, 张鑫源, 徐世龙, 等. 激光反射层析成像技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2021, **48**(4): 0401002.
- [14] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. *Appl Opt*, 1984, **23**(5): 652–653.
- [15] Chen Y B, Wang X P, Bu Z C, et al. Calibration and result analysis of aerosol LiDAR in megacity experiment[J]. *Laser Technol*, 2022, **46**(4): 435–443.
陈玉宝, 王箫鹏, 步志超, 等. 超大城市试验气溶胶激光雷达标定及结果分析[J]. *激光技术*, 2022, **46**(4): 435–443.
- [16] Lefsky M A, Cohen W B, Parker G G, et al. Lidar remote sensing for ecosystem studies: lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists[J]. *BioScience*, 2002, **52**(1): 19–30.
- [17] Tang J W, Chen G, Chen W B, et al. Three dimensional remote sensing for oceanography and the Guanlan ocean profiling Lidar[J]. *Natl Remote Sens Bull*, 2021, **25**(1): 460–500.
唐军武, 陈戈, 陈卫标, 等. 海洋三维遥感与海洋剖面激光雷达[J]. *遥感学报*, 2021, **25**(1): 460–500.
- [18] Behley J, Garbade M, Milioto A, et al. SemanticKITTI: a dataset for semantic scene understanding of LiDAR sequences[C]//2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2019: 9296–9306. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00939>.
- [19] Zhang Y, Ren G Q, Cheng Z Y, et al. Application research of there-dimensional LiDAR in unmanned vehicle environment perception[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2019, **56**(13): 130001.
张银, 任国全, 程子阳, 等. 三维激光雷达在无人车环境感知中的应用研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, **56**(13): 130001.
- [20] Zhao Y Y, Zhou P F, Xie T P, et al. Development status and trends of single-photon LiDAR technology[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51**(3): 240037.
赵浴阳, 周鹏飞, 解天鹏, 等. 单光子激光雷达技术发展现状与趋势[J]. *光电工程*, 2024, **51**(3): 240037.
- [21] Xu C, Jin K, Wei K. Research progress of synthetic aperture lidar techniques[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51**(3): 240007.
徐晨, 晋凯, 魏凯. 合成孔径激光雷达成像技术研究进展[J]. *光电*

- 工程, 2024, 51(3): 240007.
- [22] 郭圆新, 梁琨, 徐杨睿, 等. 基于直接散射光谱的多环境要素激光遥感方法[J]. 光电工程, 2024, 51(3): 240003.
- [23] Wang L, Liu B, Wu C, et al. Characteristics analysis and test of LiDAR based on diffraction lens receiving[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 240032.
王玲, 刘博, 吴城, 等. 基于衍射透镜接收的激光雷达特性分析及测试[J]. 光电工程, 2024, 51(3): 240032.
- [24] Hu S B, Liu J C, Yu S, et al. Multiline parallel precision coherent length measurement of frequency modulation continuous wave lidar[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 230285.
胡申博, 刘俊辰, 余苏, 等. 调频连续波激光多路并行相干精密长度测量方法[J]. 光电工程, 2024, 51(3): 230285.
- [25] Cai H Y, Yang Z Q, Cui Z Y, et al. Image-guided and point cloud space-constrained method for detection and localization of abandoned objects on the road[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 230317.
蔡怀宇, 杨朝乾, 崔子扬, 等. 图像引导和点云空间约束的公路洒落物检测定位方法[J]. 光电工程, 2024, 51(3): 230317.
- [26] Han J T, Tan K, Zhang W G, et al. Identification of salt marsh vegetation "fairy circles" using random forest method and spatial- spectral data of unmanned aerial vehicle LiDAR[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 230188.
韩江涛, 谭凯, 张卫国, 等. 协同随机森林方法和无人机LiDAR空谱数据的盐沼植被“精灵圈”识别[J]. 光电工程, 2024, 51(3): 230188.
- [27] Qi H Y, Zhang W H, Zhai D D, et al. High-resolution Bessel beam laser imaging[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 230243.
祁慧宇, 张伟华, 翟迪迪, 等. 高分辨率贝塞尔光束激光成像[J]. 光电工程, 2024, 51(3): 230243.
- [28] Li A R, Shao G C, Jin F Y, et al. Design of high precision phase laser radar ranging system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 230246.
李岸然, 邵光存, 靳凤宇, 等. 高精度相位式激光雷达测距系统的设计[J]. 光电工程, 2024, 51(3): 230246.
- [29] Wan S S, Pang Y J, Xue R X, et al. Design of short-range LiDAR receiver based on MEMS mirror[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 230287.
万岁, 庞亚军, 薛瑞祥, 等. 面向MEMS振镜激光雷达系统的近程接收机设计[J]. 光电工程, 2024, 51(3): 230287.

作者简介

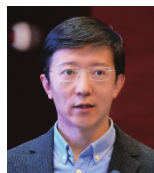


【通信作者】刘博, 研究员, 博士生导师, 中国科学院空间光电精密测量技术重点实验室副主任, 激光雷达学科带头人, 中科院“百人计划”A类海外引进人才, 中国光学工程学会高级会员, 中国科学院大学光电学院教学委员会委员、岗位教授。长期致力于激光雷达探测与通信领域研究, 作为项目负责人承担并完成自然科学基金、863计划、装备预研、国家重大专项等多项科研项目, 在国内外学术期刊发表SCI论文50余篇、授权国家发明专利20余项。

E-mail: boliu@ioe.ac.cn



吴光, 华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室研究员, 博士生导师。主要从事单光子探测、光子计数激光测距/成像、量子通信等方向的研究。研制成高稳定Si SPAD, 该项工作被评为《物理学报》2021年度高被引论文; 提出基于GHz单光子探测的激光测距方法, 单篇引用110次。共发表论文70余篇, 获得发明专利13项、上海市技术发明二等奖1项(排名第2), 承担863、国家自然科学基金等13项基金项目。



吴松华, 教授, 博士生导师, 中国海洋大学信息科学与工程学部海洋技术学院副院长, 崂山实验室双聘教授。长期从事激光雷达大气海洋遥感研究, 研制了分子滤波直接探测多普勒激光雷达、脉冲相干多普勒激光雷达、多波长偏振夫琅和费暗线海洋激光雷达等多种海洋大气激光雷达遥感系统, 应用于大气多尺度动力学、上层海洋光学剖面、水汽通量、航空与风电场等科学研究与业务化观测。承担国家重点研发计划、863计划、自然科学基金重点基金等项目; 发表SCI收录60余篇, 8项专利(2项PCT专利), 获教育部科技进步奖二等奖(第1位), 青岛市科学技术发明奖一等奖1项(第2位)、二等奖1项(第1位)。中国光学工程学会理事、海洋光学专委会委员, 中国光学学会环境光学专委会委员等。美国光学学会Applied Optics编委, 《大气与环境光学学报》副主编, 《中国海洋大学学报》编委等。