

文章编号:1001-5078(2024)09-01339-07

· 综述与评论 ·

## 车载激光雷达参数问题研究进展

朱 萱<sup>1</sup>, 韩 鹏<sup>2,3</sup>, 吴子博<sup>2,3</sup>, 朱清利<sup>4</sup>

(1. 长春电子科技学院 光电信息科学与工程学院, 吉林 长春 130061;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院大学 大珩学院, 北京 100049; 4. 南京华航翼飞行器技术有限公司, 江苏 南京 210000)

**摘要:**随着自动驾驶和智能交通系统的快速发展,车载激光雷达已成为这一领域的关键技术。作为自动驾驶核心组成部分,车载激光雷达的高效运作和精确测量对系统整体性能发挥着决定性作用。本文首先介绍了车载激光雷达的基本概念及其结构特点;随后深入讨论了各种评价参数和硬件参数在评估车载激光雷达系统性能时的重要性及其对系统性能的具体影响,归纳了不同参数的研究进展,最终总结了对车载激光雷达性能优化的一系列设想,并对车载激光雷达的未来发展趋势进行了展望。

**关键词:**车载激光雷达;评价参数;硬件参数;性能评估

**中图分类号:**TN958.98;TP274 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.09.001

## Research progress on vehicle-mounted LiDAR parameters

ZHU Xuan<sup>1</sup>, HAN Peng<sup>2,3</sup>, WU Zi-bo<sup>2,3</sup>, ZHU Qing-li<sup>4</sup>

(1. School of Opto-Electronics Information Science and Engineering, Changchun College of Electronic Technology, Changchun 130061, China; 2. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. School of Daheng, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Nanjing China Air Wing Aircraft Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

**Abstract:** With the rapid development of autonomous driving and intelligent transport systems, vehicle-mounted LiDAR has become a key technology in this field. As a core component of autonomous driving, the efficient operation and accurate measurement of vehicle-mounted LiDAR play a decisive role in the overall performance of the system. Firstly, the basic concept of vehicle-mounted LiDAR and its structural characteristics are introduced. Then, the importance of various evaluation parameters and hardware parameters in evaluating the performance of vehicle-mounted LiDAR systems and their specific impact on the system performance discusses are discussed in detail. And the research progress of various parameters is summarized, and finally a series of ideas on optimizing the performance of vehicle-mounted LiDAR are concluded and the future development trend of vehicle-mounted LiDAR is outlined.

**Keywords:** automotive LiDAR; evaluation parameters; hardware parameters; performance evaluation

### 1 引言

随着时代和科技的迅速发展,无人驾驶技术在

自动驾驶领域中已成为最热门的研究领域之一,车载激光雷达也受到广泛的关注。作为自动驾驶技

作者简介:朱 萱(2004-),女,本科,主要从事自动驾驶、无人机技术研究。E-mail:1363950363@qq.com

通讯作者:吴子博(2001-),男,硕士研究生,主要从事大功率半导体激光器技术研究。E-mail:2392365159@qq.com

收稿日期:2024-03-25

术的核心技术之一,车载激光雷达在提升系统整体性能方面发挥着关键作用,其效率和测量精度的高低直接影响了整个驾驶系统的运作效果<sup>[1]</sup>。

车载激光雷达系统的性能评价依赖于一系列关键指标,包括评价参数和硬件参数。评价参数主要涵盖激光发射波长、噪声水平和点云质量等,而硬件参数着重于探测器和激光光源等组成部分。这些指标综合决定了激光雷达的关键性能,如测距范围、点频率、分辨率、视场角和测距精度等,对车载激光雷达系统的性能评估和实际应用影响深远。本文将重点分析这些关键参数在评估车载激光雷达系统性能时的重要性及其对系统性能的具体影响,提出了性能优化设想,并对其未来应用进行展望,旨在为自动驾驶技术的发展提供理论支持和技术参考。

## 2 车载激光雷达

### 2.1 车载激光雷达结构

车载激光雷达是安装在移动车辆上的先进光学远程感测系统,它通过发射激光脉冲并测量反射光的传播时间或波长,从而估算物体与传感器之间的距离。这些数据用于生成三维点云图,以高精度再现车辆周边环境的地形和物体形貌。在自动驾驶汽车和先进驾驶辅助系统中,车载激光雷达作为一项关键技术,提供了与其他传感器互补的信息,实现更加精确的环境感知和障碍物检测<sup>[2]</sup>。

表 1 车载激光雷达的常见指标参数

Tab. 1 Common metric parameters of in-vehicle lidar

| 参数       | 描述                                    | 说明  |
|----------|---------------------------------------|---|
| 最大/小探测距离 | 激光雷达对特定反射率的漫反射板所能探测到的距离有效最远/近距离       | 测距范围越大,距离覆盖越广,目标物探测能力越强。目标物反射率影响探测距离,相同距离下,反射率越低越难进行探测。 |
| 点频       | 激光雷达理论上每秒输出的点数。                       | 点频越高,相同时间内探测点数越多,对目标物探测和识别越有利                           |
| 帧频       | 激光雷达每扫描覆盖一次其视场范围所获取的点云数据称为一帧          | 激光雷达每秒采集视场范围内点云数据的帧数                                    |
| 角分辨率     | 激光雷达两个相邻点云最小可分辨的水平和垂直夹角               | 相邻探测点间角度间隔越小,对目标物的细节分辨能力越强,越有利于进行目标识别                   |
| 视场角      | 激光雷达点云覆盖的区域相对坐标原点的最大角度,分为水平视场角和垂直视场角。 | 视场角越大,激光雷达对空间的角度覆盖范围越广                                  |
| 测距精度     | 激光雷达对同一距离下的物体多次探测所得数据间的一致程度           | 精度越高表示测距的随机误差越小,对物体形状和位置的描述越准确,对目标物探测越有利                |
| 测距准度     | 测距值与真实值之间的一致程度                        | 准度越高表示测量的系统误差越小,对物体形状和位置的描述越准确,对目标物探测越有利                |
| 功耗       | 激光雷达系统工作状态下所消耗的电功率                    | 功耗越低,系统的能量利用率越高,散射负担也更小                                 |

## 3 评价参数指标

### 3.1 车载激光雷达的波长

在激光雷达技术的领域中,常用的波长是

车载激光雷达中的激光器将电脉冲转换成光脉冲来进行距离测量。其核心部件分成激光发射单元、激光接收单元、信号处理单元和扫描系统四部分,通过持续扫描目标并运用点云算法,从而构建出周围环境的三维立体图像,如图 1 所示。

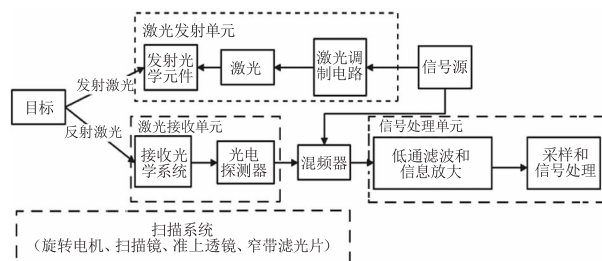


图 1 车载激光雷达结构

Fig. 1 Structure of vehicle-mounted lidar

### 2.2 车载激光雷达参数

车载激光雷达系统涉及众多性能指标,最关键的指标包括评价参数指标和硬件参数指标。其中评价参数指标包括车载激光雷达的发射波长、噪声、点云等,硬件参数指标包括车载激光雷达的探测器、激光光源等。这些参数将直接或者间接影响车载激光雷达的测距范围、点频、分辨率、视场角、测距精度等这些常见指标参数,表 1 展示了车载激光雷达的常见指标参数。我们将聚焦于评价参数指标和硬件参数指标,深入探讨其在系统评价中的重要性以及对性能的实际影响。

1550 nm、905 nm。在汽车行业中,905 nm 的车载激光雷达占据了主导地位。然而,随着技术的发展,1550 nm波长的车载激光雷达也开始被广泛适用<sup>[3]</sup>。

这一转变源于 1550 nm 雷达在探测范围和人眼安全方面相对 905 nm 雷达具有较大优势。具体来说,1550 nm 的车载激光雷达在使用更高的功率同时,对人眼的潜在风险更小<sup>[4-5]</sup>,这使其成为一个重要的替代选择因素。结合 1550 nm 与调频连续波的技术,该雷达不仅能进行精确的距离测量,还能通过多普勒频移来估算目标对象的速度。此外,在应对各种天气条件时,如大雾或者大雨,905 nm 的车载激光雷达会产生重大影响,此时光束会被雾气或者水雾散射,导致感知范围进一步减小,而 1550 nm 波长的车载激光雷达则表现出出色的大气穿透能力<sup>[6]</sup>。

1550 nm 波长的车载激光雷达在允许的光功率和应对不利天气条件方面,相较于 905 nm 波长,展现出了显著优势,这种优势意味着 1550 nm 波长的雷达能实现更远的探测范围和更强的环境适应性。然而,从制备工艺角度上来讲,1550 nm 波长的车载激光雷达的关键部件在成本和生产工艺上都要远高于制备 905 nm 波长的雷达,在当前汽车行业对功率和成本的重视下,905 nm 波长仍然是一个适宜的选择,只有当 1550 nm 波长的车载激光雷达成本降低,并且自动驾驶汽车中的电池技术进一步提升时,1550 nm 波长的车载激光雷达才可能成为主流选择<sup>[7-8]</sup>。

2022 年,Sidi Aboujja 等人<sup>[9]</sup>报告了一种基于 AlInGaAs/InP 材料体系,采用隧道结层边缘发射设计的三结 1550 nm 高功率激光二极管。通过 n 型和 p 型 InGaAs 层构成的隧道结,该器件有效减小应力并优化散热。在 10 ns 脉冲宽度和 100 A 峰值电流下,其斜率效率为 1 W/A,实现超过 100 W 的峰值光功率,是单结激光器的三倍。此外,1550 nm 三结在长距离激光雷达探测中表现卓越,相较于 905 nm 波长,在光子计数增加 80 倍的情况下,信噪比提高 60 倍,且在超过 200 m 距离的目标物检测概率高出 24 倍。

2023 年,Sidi Aboujja 等人<sup>[10]</sup>开发了一种基于 AlInGaAs 材料系统的半导体光放大器(SOA)结构,该结构在 InP 基板上具有多个量子阱。研究发现,在 1550 nm 和 1310 nm 波长处,该 SOA 结构展现出超过 40 dB 的小信号增益,并在 1 A 注入电流下分别达到 350 mW 和 450 mW 以上的饱和输出功率,适用于相干探测的激光雷达应用。一个包含 127

$\mu\text{m}$  或 500  $\mu\text{m}$  间距的四个 SOA 波导阵列能提供超过 2 W 的总输出功率,并具有适当的散热性能。此外,SOA 阵列可通过电气和光学隔离实现单独寻址处理。这种高性能的 SOA 阵列为多种扫描模式的激光雷达系统提供了设计灵活性,有助于实现远程探测。

### 3.2 车载激光雷达的噪声

在车载激光雷达的激光测距过程中,接收到的回波信号通常伴随着大量噪声。这些噪声的存在严重影响了测距系统的精度。为了提高车载激光雷达测距系统的精度,就需要对噪声干扰进行深入的分析,并有效提取其中的微弱回波信号。研究表明<sup>[11]</sup>,影响车载激光雷达测距精度的关键因素是其信噪比,而信噪比又取决于噪声的种类及其噪声相关特性。车载激光雷达系统中普遍存在的噪声包括散粒噪声、暗电流噪声以及热噪声等,这些均属于高斯分布的白噪声。车载激光雷达主要面临的噪声挑战是环境噪声,尤其是太阳背景噪声。实际上,车载激光雷达的系统噪声要远小于太阳背景噪声<sup>[12]</sup>。

### 3.3 点云算法

在车载激光雷达系统中,对点云的高效建模至关重要。这一过程直接影响到整个雷达系统的精度。点云算法的准确性是提升雷达性能的关键因素。

车载激光雷达点云数据的特征表述可分为两个维度表述:一种是根据特征表达的基本单元进行分类<sup>[13]</sup>,包括基于单个点的特征和基于整体对象的特征;另一种是根据特征表达的层次性质进行划分<sup>[14]</sup>,包括低层次特征、中层次特征、高层次特征等。

在车载激光雷达系统的应用中,通常更倾向于采用基于对象的特征表述方式,这种方式通过将点的特征聚合或在对象的局部空间内应用统计分析和深度学习技术来构建特征,有效地减少了点特征的不稳定性,并显著增强了分类过程的鲁棒性<sup>[15]</sup>。

车载激光雷达根据点云特征处理方式的不同,又被分为:基于原始点云、基于体素、基于多视图以及基于融合的方法<sup>[16]</sup>。

这些不同的点云特征处理方法各自具有独特的优势与局限性:

基于原始点云的方法:此方法的优势在于它能

够保留点云的所有信息,确保没有任何数据遗失。然而,由于点云的稀疏性和不规则性,这种方法在处理时间上往往较长。

**基于体素的方法:**这种方法通过归一化点云来方便特征的改进获取,并且处理时间短。不过,需要注意的是,体素化过程不可避免地会丢失部分原始点云信息,这可能对结果产生较大的影响。

**基于多视图的方法:**这实质上是一种形式的体素化方法,它通过压缩特征尺寸来加快处理速度。

**基于融合的方法:**该方法能提供丰富的细节特征,从而弥补点云的不足。然而,这种方法在处理上的难度较大,需要解决收敛、时间同步等问题。

随着机器学习和深度学习理论不断发展,现代车载激光雷达已经能够仅凭扫描匹配算法单独生成高精度的映射轨迹,这极大地提升了车载激光雷达的整体性能和准确度<sup>[17]</sup>。同时,研究者在车载激光雷达点云特征的提取和分类构建方面也做了大量工作,逐渐转向融合多种处理技术的综合应用模式,如 PV-RCNN<sup>[18]</sup> 和 P2V-RCNN<sup>[19]</sup> 等算法的发展不仅体现了技术的创新,也推动了雷达系统性能的全面提升。

2022 年,中国民航大学<sup>[20]</sup> 研发了一种改良的自适应密度噪声空间聚类 (DBSCAN) 算法,旨在提升道路障碍物的聚类性能。该算法首先根据点云数据的反射强度信息检测车道线并提取关注区域,随后通过射线坡度阈值算法实现地面分割,有效分割斜坡地面,从而快速准确地聚类不同距离的密集障碍物。实验结果显示,该优化算法在聚类不同距离的密集障碍物方面表现出高准确性,与传统方法相比,正检率提升了 24.07 %,平均处理时间缩短了 1.18 s。

2023 年,同济大学的研究团队<sup>[21]</sup> 开发了一种基于混合固态激光雷达的点云处理方法,用于高精度的路面三维重建,有效解决了路面点云的分层问题。通过构建低成本移动激光扫描系统和设计基于轨迹点的感兴趣区域 (ROI) 提取算法,该研究优化了点云数据的利用效率。引入的平面基全局配准 (PGR) 技术,分为粗配准和精配准两步,采用少量平面信息和迭代最近点 (ICP) 算法显著提高了垂直配准精度,减少了误差。PGR 算法对比现有配准技术,在多种道路场景下展示了卓越的配准精度和实

时性,重建精度达到 1 cm 内,为路面信息提取提供了高效的技术方案。

#### 4 硬件参数指标

##### 4.1 车载激光雷达的探测器

车载激光雷达技术在汽车领域已经得到广泛应用,并随着技术进步面临着越来越高的要求。众多研究者正致力于满足针对高频率、高精度的探测需求,不断探索和改进车载激光雷达的性能。目前,在车载激光雷达最新领域中,已经出现了如有 SPAD 阵列、双芯片方法和 3D 集成技术等创新方案<sup>[22]</sup>。

单光子雪崩二极管 (SPAD) 这种元件在工作时的偏置电压高于击穿电压,对信号检测更加敏感,单个光子便可触发显著的载流子雪崩,使其适合于飞行时间测距法 (TOF) 和远程测量。

在双芯片法的应用中,由将单光子雪崩二极管 (SPAD) 与 DSO 信号处理器集成于同一芯片,显著降低了车载激光雷达的成本并提高了其信噪比。而二维 SPAD 的车载激光雷达<sup>[23]</sup> 采用二维 SPAD 阵列进行扫描接收,此外还可以通过光栅扫描消除了对传统 RX 扫描机械的依赖,大幅减小了整个系统的体积。此外,结合主动猝灭技术,二维 SPAD 通过晶体管重置以缩短猝灭时间,实现了更高分辨率且成本更低的雷达系统。

3D 集成技术的车载激光雷达<sup>[24]</sup> 在 SPAD 上应用微透镜和背面照明 (BSI) 技术,有效提高了图像传感器的灵敏度,2021 年,日本索尼公司<sup>[25]</sup> 研究表明,在波长为 905 nm 时,3D 集成技术的车载激光雷达的 PDE 可以显著提高到 22 %,几乎是传统 SPAD 的 2 倍,这种 PDE 的增加导致了激光雷达性能的显著改善。

光学相控 (OPA)<sup>[26]</sup> 技术通过控制各像素单元激光的相位差,合成具有特定方向的主光束,从而实现激光扫描。车载激光雷达以其体积小、成本相对较低等优势,有望为汽车中使用的当前激光雷达设备的大多数缺点提供解决方案。

2020 年,日本东芝公司的 Tuan 团队<sup>[23]</sup> 提出了一种新型二维 SPAD 阵列激光雷达技术,通过传感器内的 RX 光栅扫描方法,消除了外部 RX 扫描机构的需求,显著缩减了雷达尺寸。该技术采用主动猝灭与复位带晶体管 SPAD,有效缩短猝灭时间,减少了每像素所需的 SPAD 数量,实现了成本更低、分

分辨率更高的激光雷达系统。

2022 年,美国亚利桑那大学<sup>[27]</sup>开发了一款基于 TOF 测距的全固态激光雷达技术。该技术通过结合德州仪器的数字微镜器件(DMD)与基于 MEMS 的二维扫描镜,实现了宽广的扫描角度、快速的扫描速度与高分辨率。DMD 的粗扫描机制提供了快速大角度的扫描能力,而 MEMS 反射镜的精细控制显著提升了检测分辨率。利用 DMD 的大孔径接收能力,该雷达能够实现远距离检测。在视场范围内,系统能以 0.588 f/s 的速率完成  $12 \times 112$  点的扫描,达到  $0.57 \mu\text{m}(\text{H}) \times 0.23 \mu\text{m}(\text{V})$  的极高角分

辨率。

#### 4.2 车载激光雷达的激光光源

在车载激光雷达系统中,激光光源为关键器件。为了缩短激光器尺寸与功耗,激光雷达光源目前以光纤激光器和半导体激光器为主。现阶段,广泛使用的光源主要有边发射半导体激光器(EEL)、垂直腔面半导体发射激光器(VCSEL)、外腔型半导体激光器、固体激光器以及光纤激光器等。这些光源的种类和波长选择会对车载激光雷达的性能及适用性产生显著影响,表 2 归纳了各种激光器的主要特性、优势及其在车载激光雷达应用中的适用性。

表 2 不同激光器的特性与优势

Tab.2 Features and advantages of different lasers

| 激光器类型                        | 主要特性                 | 优势                            |
|------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| 边发射激光器 <sup>[28]</sup>       | 高性能、高效率和高亮度          | 成本低、输出效率出色                    |
| 垂直腔面发射激光器 <sup>[29-30]</sup> | 窄发散角、高效率、良好的耐温性和尺寸小  | 测量精度和分辨率高、产品尺寸更小型化和轻量化、适用不同环境 |
| 外腔型半导体激光器 <sup>[31-32]</sup> | 可调整的输出波长、较高的发射功率     | 适用于精准定位                       |
| 固体激光器 <sup>[33]</sup>        | 稳定的性能、良好的光束质量、耐用和寿命长 | 成本低、精度高、可以在多种模式下操作,提供更多的灵活性   |
| 光纤激光器 <sup>[34]</sup>        | 可靠性高、不受恶劣环境影响、易于小型化  | 出色的光束质量,强大的振动和抗温度变化能力,优异的热管理  |

随着高速光通信和高精度固态激光雷达技术的进步,对半导体激光器窄线宽,低噪声和高速直调的要求也愈发严格。

2021 年,捷克科学院物理研究所<sup>[35]</sup>开发了一款高功率固体激光器,输出波长为  $1.88 \mu\text{m}$ ,重复频率为  $1 \times 10^{-3}$  KHz,脉冲宽度为 18 ns,输出能量为 2.22 mJ。该激光器旨在优化激光雷达性能,显著提升其探测精度和探测距离。

2022 年,山东大学<sup>[36]</sup>通过优化 Moiré 及切趾光栅分布反馈激光器,实现了两大进展:400  $\mu\text{m}$  腔长激光器光谱线宽达到 248 kHz,直调速度提升至 30 Gb/s;1 mm 腔长激光器光谱线宽更是压缩至 99.2 kHz,实现了压窄光谱线宽和高速直调,满足高性能半导体激光器的迫切要求。

## 5 结 论

随着汽车行业的快速发展,车载激光雷达的性能和应用要求也在不断提升。从现有市场看,机械旋转式最为常用;全固态式是未来业界大力发展方向;混合固态式是机械式和全固态式的折中方案,仍保留部分较小的活动部件,如微振镜、转镜等。转镜体积庞大,但一般具有良好的光学特性,可获得 360 度数据;微振镜通过使用一个极小的可移动微镜,消

除了对笨重机械部件的需求。因此,激光雷达的尺寸可以大大减少。无论哪种扫描方式,未来激光雷达的发展趋势是向着更小型化、轻便化、成本更低、寿命延长的方向发展。

当前在车载激光雷达领域,研究的热点主要集中在提高探测的准确性和点云数据处理技术的进步。研究团队正通过采用新型光电检测器技术和优化激光发射光源及其波长,进一步增强车载激光雷达系统的灵敏度与解析能力,从而扩大其在不同场景下的适用性。同时,为了从车载激光雷达产生的复杂数据中高效提取关键信息,点云数据处理技术的创新也受到广泛关注。这些集成化的研究努力目标在于显著提升车载激光雷达系统整体性能,确保其在自动驾驶和环境感知等关键领域应用的可靠性和精确性。

本文系统介绍了车载激光雷达的基本原理、分类,重点讨论了影响雷达性能和测量精度的评价参数和关键参数。针对未来激光雷达的小型化、轻便化、成本降低及寿命延长等发展趋势,提出了一系列性能优化的设想。本文对于推进自动驾驶技术的发展及车载激光雷达技术的创新和应用扩展提供了有益参考,具有重要的理论和实践意义。

## 参考文献:

- [1] Z H Li, E Wu, C K Pang, et al. Multi-beam single-photon-counting three-dimensional imaging lidar[J]. Optics Express, 2017, 25(9): 10189.
- [2] Huang Runkun, Chen Ying, Wu Di, et al. Overview of automotive LiDAR industry[J]. Technology and Economic Markets, 2023, (5): 16 – 18. (in Chinese)  
黄润坤, 陈颖, 吴迪, 等. 车载激光雷达行业概述[J]. 科技经济市场, 2023, (5): 16 – 18.
- [3] Kim T, Park T. Calibration method between dual 3D lidar sensors for autonomous vehicles [C]//Proceedings the 56th Annual Conference of the Society-of-Instrument-and-Control-Engineers-of-Japan (SICE), Kanazawa Univ, Kanazawa, JAPAN, 2017: 1075 – 1081.
- [4] Michaelis M, Berthold P, Meissner D, et al. Heterogeneous multi-sensor fusion for extended objects in automotive scenarios using Gaussian processes and a GMPHD-filter [C]. Proceedings the 2017 Sensor Data Fusion: Trends, Solutions, Applications (SDF), Bonn, Germany, 2017: 1 – 6.
- [5] F C Delori, R H. Webb, D H Sliney. Maximum permissible exposures for ocular safety (ANSI 2000), with emphasis on ophthalmic devices[J]. Journal of The Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision, 2007, 24(5): 1250 – 1265.
- [6] M Kuttila, P Pyykönen, H Holzhüter, et al. Automotive LiDAR performance verification in fog and rain [C]//Proceedings the 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui, HI, USA, 2018: 1695 – 1701.
- [7] P Duthon, M Colomb, F Bernardin. Light transmission in fog: the influence of wavelength on the extinction coefficient[J]. Applied Sciences, 2019, 9(14): 2843.
- [8] J Wojtanowski, M Zygmunt, M Kaszczuk, et al. Comparison of 905 nm and 1550 nm semiconductor laser rangefinders' performance deterioration due to adverse environmental conditions[J]. Opto-Electron, 2014, 22(3): 183 – 190.
- [9] Aboujja S, Chu D, Been D. Multi-junction long-wavelength laser diode in long range LiDAR for highspeed autonomous vehicles [C]//Proceedings of the 2022 Conference on Laser Radar Technology and Applications XXVII, Electr Ntwork, 2022, 12110: 1211004 – 1 – 12.
- [10] Aboujja S, Chu D. Semiconductor optical amplifier array for coherent FMCW LiDAR in autonomous vehicles [C]//Proceedings of the 2023 Conference on Laser Radar Technology and Applications XXVIII, Orlando, FL, 2023, 12537: 12530D – 1 – 7.
- [11] C H Wen, Y Q Li. Research on De-noising in optical inter-satellites communication [C]//International Conference on the Software Process, Beijing, 2006: 1 – 4.
- [12] Wang Shuchao. Research on photon counting lidar signal denoising technique [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)  
汪书潮. 光子计数激光雷达信号去噪技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
- [13] Chen D, Peethambaran J, Zhang Z. A supervoxel-based vegetation classification via decomposition and modelling of full-waveform airborne laser scanning data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(9): 2937 – 2968.
- [14] Zeiler M D, Fergus R. Visualizing and understanding convolutional networks [C]//European Conference on Computer Vision, Springer, Cham, 2014: 818 – 833.
- [15] Antonarakis A S, Richards K S, Brasington J. Object-based land cover classification using airborne LiDAR [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(6): 2988 – 2998.
- [16] Qin Jing, Wang Weibin, Zou Qijie, et al. A review of 3D target detection methods based on LiDAR point cloud [J]. Computer Science, 2023, 50(S1): 259 – 265. (in Chinese)  
秦静, 王伟滨, 邹启杰, 等. 基于激光雷达点云的3D目标检测方法综述[J]. 计算机科学, 2023, 50(S1): 259 – 265.
- [17] C Chen, L Pei, C Xu, et al. Trajectory optimization of lidar slam based on local pose graph [C]//Proceedings of the 10th China Satellite Navigation Conference (CSNC), Beijing, Peoples R China, 2019, 562: 360 – 370.
- [18] Shi S, Guo C, Jiang L, et al. Point-voxel feature set abstraction for 3D object detection [C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2020: 10529 – 10538.
- [19] Li J, Sun Y, Luo S, et al. Point to voxel feature learning for 3D object detection from point clouds [J]. IEEE Access, 2021, 9: 98249 – 98260.
- [20] Zhang Changyong, Han Liang. LiDAR obstacle detection based on optimised DBSCAN [J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2022, 59(12): 506 – 514. (in Chinese)  
张长勇, 韩梁. 基于优化 DBSCAN 的激光雷达障碍物检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(12): 506 – 514.
- [21] Zou Z, Lang H, Lou X Y, et al. Plane-based global registration for pavement 3D reconstruction using hybrid solid-

- state LiDAR point cloud[J]. Automation In Construction, 2023, 152:1 – 18.
- [22] Yoshioka K. A tutorial and review of automobile direct ToF LiDAR SoCs: evolution of next-generation LiDARs [J]. IEICE Transactions on Electronics, 2023, E105C (10):534 – 543.
- [23] Tuan T T, Hiroshi K, Koichi K, Toshiki Sugimoto, et al. A 2D-SPAD array and read-out AFE for next-generation solid-state LiDAR [C]//Proceedings of the IEEE Symposium on VLSI Circuits, Electr Network, 2020:1 – 2.
- [24] Oichi K, Junichi O, Masao M, et al. A 189x600 back-illuminated stacked SPAD direct time-of-flight depth sensor for automotive LiDAR systems [C]//Proceedings of the IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), Electr Network, 2021, 64:110 – 112.
- [25] Zhang C, Lindner S, Antolovic I M, et al. A 30-frames/s, 252X 144 SPAD flash LiDAR with 1728 dual-clock 48.8-pps TDCs, and pixel-wise integrated histogramming [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019, 54 (4): 1137 – 1151.
- [26] A Rahim, J Goyvaerts, B Szelag, et al. Open-access silicon photonics platforms in europe [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25 (5):1 – 8.
- [27] Kang E, Choi H, Hellman B, et al. All-MEMS lidar using hybrid optical architecture with digital micromirror devices and a 2D-MEMS Mirror [J]. Micromachines, 2022, 13 (9):1 – 15.
- [28] Shan X, Chela C, Lang X, et al. Advances in narrow linewidth diode lasers [J]. Scientia Sinica Informationis, 2019, 49 (6):649 – 662.
- [29] D Li, J Hu, R Ma, X Wang, et al. SPAD-based LiDAR with real-time accuracy calibration and laser power regulation [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2023, 70 (2):431 – 435.
- [30] Panajotov K, Arizaleta M, Camarena M, et al. Polarization switching induced by phase change in extremely short external cavity vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Applied Physics Letters, 2004, 84 (15):2763 – 2765.
- [31] Shin D K, Henson B M, Khakimov R I, et al. Widely tunable, narrow linewidth external-cavity gain chip laser for spectroscopy between 1.0 ~ 1.1  $\mu\text{m}$  [J]. Optics Express, 2016, 24 (24):27403 – 27414.
- [32] Duca L, Perego E, Berto F, et al. Design of a Littrow-type diode laser with independent control of cavity length and grating rotation [J]. Optics Letters, 2021, 46 (12):2840 – 2843.
- [33] Tran MA, Huang D, Guo J, et al. Ring-resonator based widely-tunable narrow-linewidth Si/InP integrated lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26 (2):1 – 14.
- [34] Li Xiaolu, Zhou Yier, Bi Tengfei, et al. A review of key technology development of lightweight sensing lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49 (19):255 – 269. (in Chinese)
- 李小路, 周依尔, 毕腾飞, 等. 轻量型感知激光雷达关键技术发展综述 [J]. 中国激光, 2022, 49 (19): 255 – 269.
- [35] Koerner, J, Jambunathan V, Yue F, et al. Diode-pumped, electro-optically Q-switched, cryogenic Tm:YAG laser operating at 1.88  $\mu\text{m}$  [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9:1 – 6.
- [36] Zhao Yingming. Modelling and numerical study on the design of narrow linewidth semiconductor laser [D]. Ji'nan: Shandong University, 2022. (in Chinese)
- 赵英明. 窄线宽半导体激光器设计建模与数值研究 [D]. 济南: 山东大学, 2022.