文章编号:1001-5078(2023)11-1671-06　　·激光应用技术·

1030 nm 单光子探测激光雷达技术

杨函霖,李召辉,吴　光
(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:1 μm 波段单光子探测激光雷达因大气透过率高、背景噪声低、红外隐蔽性好、激光脉冲能量高,在远距离激光测距和成像方向极具发展前景。然而,传统的 1064 nm 激光器缺少对应的高性能的单光子探测器,成为 1 μm 波段单光子探测激光雷达的发展瓶颈。盖革 Si APD 单光子探测器(Si SPAD)具有优异的探测性能,但是其在 1064 nm 波长的探测效率极低。针对这个激光器与探测器的矛盾,本文研究 1030 nm 波长单光子探测激光雷达技术,Si SPAD 在 1030 nm 的探测效率是 1064 nm 的 2.9 倍,相同条件的单光子探测激光雷达探测距离提升 67.8 %。另外,本文搭建双棱镜光束扫描装置,演示了 1030 nm 波长的单光子三维成像。

关键词:单光子测距;单光子探测;三维成像;激光雷达
中图分类号:TN249;TN958.98　　**文献标识码:**A　　**DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.11.008

1030 nm single-photon detection lidar technology

YANG Han-Lin, LI Zhao-hui, WU Guang
(State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The 1 μm band single-photon detection Lidar has great development prospects in the direction of long-distance laser ranging and imaging due to high atmospheric transmittance, low background noise, great infrared concealment, and high laser pulse energy. However, the lack of corresponding high-performance single-photon detectors for conventional 1064 nm lasers has become a bottleneck in the development of 1 μm band single-photon detection lidar. Geiger Si APD single-photon detector (Si SPAD) has excellent detection performance, but its detection efficiency at 1064 nm wavelength is extremely low. In response to the contradiction between the laser and the detector, the 1030 nm wavelength single-photon detection Lidar technology is investigated. The detection efficiency of Si SPAD at 1030 nm is 2.9 times higher than that of 1064 nm, and the detection distance of single-photon detection Lidar under the same conditions is improved by 67.8 %. In addition, abeam scanning device composed of two wedge-shaped prisms is built to demonstrate single-photon 3D imaging at 1030 nm.

Keywords: single-photon ranging; single-photon detection; three-dimensional imaging; laser radar

1　引　言

激光雷达能够捕获目标表面的三维信息,是一种高精度、远距离的主动探测技术[1]。近年来基于单光子探测的激光雷达(单光子探测激光雷达)突破传统线性光电探测激光雷达的探测极限,越来越多的被应用于军事国防[2-4]、气象观测[5-6]、航空航天、汽车自动驾驶[7-9]、机载测绘[10-11]等领域。其中,1 μm 波段单光子探测激光雷达具有大气透过率高、背景噪声低、红外隐蔽性好、激光脉冲能量高等优势,有利于实现小型紧凑的远距离激光测距和成

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 11804099;No. 62075062;No. 62175067);上海市教育发展基金会和上海市教育委员会"晨光计划"项目(No. 21CGA31)资助。
作者简介:杨函霖(1997 -),男,硕士,主要研究近红外单光子测距与成像技术。E-mail:10165300302@stu.ecnu.edu.cn
通讯作者:吴光,男,博士,研究员,主要研究低噪声高速单光子探测技术。E-mail:gwu@phy.ecnu.edu.cn
收稿日期:2023-04-20;**修订日期:**2023-05-09

像系统。当前主要瓶颈是缺乏这个波段高性能的单光子探测器。针对 1 μm 波段的小型单光子探测器,主要有基于盖革 InGaAs APD 单光子探测器(InGaAs SPAD)和 Si SPAD 两种。其中,InGaAs SPAD 的探测效率达到 20 %[12-13],而 Si SPAD 的探测效率仅 1 ~ 5 %。但是,InGaAs SPAD 后脉冲非常严重,通常需要更长的死时间来抑制后脉冲。当后脉冲概率约 1 % 时,典型的 InGaAs SPAD 死时间高达 5 μs[14-17],无法在高背景环境中有效探测回波光,而典型的 Si SPAD 死时间小于 50 ns[18-19]。表 1 列出了典型 InGaAs SPAD 和 Si SPAD 的性能指标,除了探测效率,其他与测距密切相关的技术指标,包括死时间、感光面尺寸、暗计数、工作温度,Si SPAD 都远优于 InGaAs SPAD。

表 1 InGaAs SPAD 与 Si SPAD 性能指标比较[14-20]

Tab. 1 Comparison of the performance between InGaAs SPAD and Si SPAD

性能参数	InGaAs SPAD	Si SPAD
探测效率@1μm/ %	10 ~ 20	1 ~ 5
感光面直径/μm	20 ~ 80	100 ~ 500
暗计数/cps	10 k	100
死时间@1 % 后脉冲	5μs	50ns
工作温度/℃	-30 ~ -60	10 ~ -20

在近期的 1 μm 波段单光子探测激光雷达研究中,华中光电研究所设计的单光子探测激光雷达能在 400m 距离上识别伪装网后车辆等目标,具有良好的伪装识别能力[21];郭静菁研究小组设计的高分辨率单光子探测激光雷达使用亚像素扫描对 3 km 外目标进行成像,取得超过衍射极限的分辨率与精度[22]。中国科学院上海技术物理研究所李铭研究小组搭建的 51 波束光纤阵列单光子探测激光雷达可在 3 km 高度下进行机载三维测绘[23];华东师范大学李召辉研究小组报道的高分辨率小型单光子探测激光雷达基于多通道探测器,大幅提高点云采集速率,同时具有强大的多层成像能力[18]。这些使用 Si SPAD 作为探测器的 1 μm 单光子探测激光雷达死时间均在 50 ns 以内,暗噪声均小于 1kHz。相较下过长死时间和过高后脉冲概率限制了 InGaAs SPAD 在近红外波段单光子探测激光雷达中的应用。中国运载火箭技术研究院潘超研究小组研究的 64 阵列机载单光子探测激光雷达使用 InGaAs SPAD 作为探测器,系统暗噪声高达 10 kHz[24]。

本文通过测试分析 SiSPAD 在 1 μm 附近的探测性能,发现 1030 nm 波长的探测效率是 1064 nm 的 2.9 倍,继而开展两种波长的单光子测距性能比对测试。得益于探测效率的明显提升,1030 nm 波长单光子探测激光雷达的测距能力较 1064 nm 提升了 67.8 %。

2 SiSPAD 在 1 μm 波段探测效率

SPAD 的探测概率由量子效率和光生载流子触发雪崩电流概率组成。量子效率指入射光子被 APD 吸收层的半导体材料吸收后产生光生载流子的概率,其中最主要的吸收形式为本征吸收。半导体材料对不同波长入射光子的本征吸收强度不同,导致 SPAD 的探测效率存在差异。在 1 μm 波段,Si 的本征吸收强度随波长增大而降低。本文首先测量 Si SPAD 在 1 μm 波段的探测效率,从而分析比较 1030 nm 与 1064 nm 两种波长单光子探测激光雷达的性能差异。本文采用德国 Laser Components 公司的 Si APD 器件(Sap500),发展主动抑制电路,研制成 Si SPAD,所测探测效率与其他同类产品存在绝对数值上的差异,但探测效率随波长的变化趋势是一致的。在暗室中对 Si SPAD 探测效率标定结果如图 1 所示。从标定结果可见,Si SPAD 在 1 μm 附近的探测效率随波长增长而快速下降,其在 1064 nm 波长的探测效率仅 1.1 %,而在 1030 nm 波长的探测效率达到 3.2 %,两者存在约 2.9 倍差异。

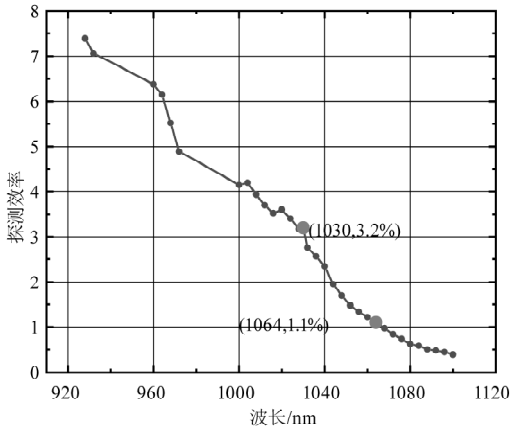


图 1 SiSPAD 探测效率标定结果

Fig. 1 Detection efficiency calibration results of the SiSPAD

使用雷达方程来计算探测效率差距对测距能力的影响。入射到探测器的每脉冲平均光子数 μ 为:

$$\mu = \frac{E_{out}\lambda D^2}{8hcL^2}\rho T_{opt}T_a \tag{1}$$

其中，E_{out} 为系统出射光的单脉冲能量；D 为接收镜直径；ρ 为目标表面反射率；T_{opt} 为系统的光学损耗；L 为目标距离雷达系统的距离；hc/λ 为单光子能量；T_a 代表大气透过率。1030 nm 和 1064 nm 的大气透过率十分接近，非超远程工作条件下可以忽略 T_a 的影响。根据泊松分布公式，当平均入射光子数为 μ 时，单光子探测器能够探测到 n 个入射光子的概率 P 为：

$$P(\mu\eta,n) = \frac{(\mu\eta)^n}{n!} \cdot e^{-\mu\eta} \tag{2}$$

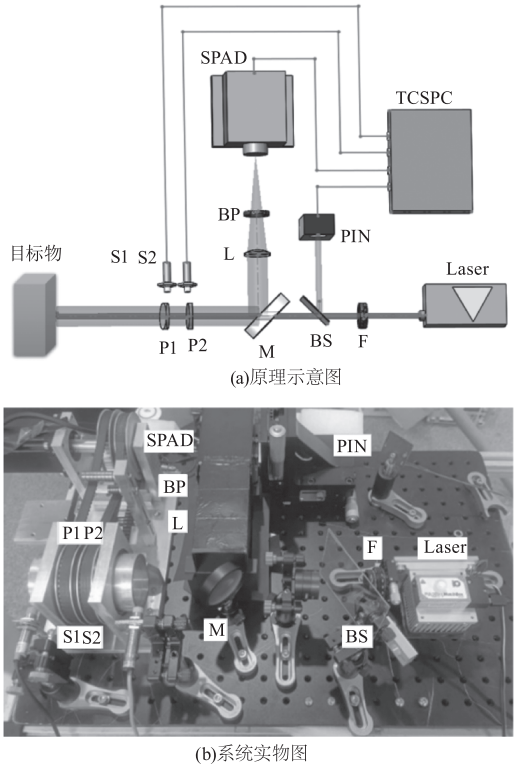
其中，η 为探测器的探测效率，探测器没有探测到光子的概率为 $P(\mu\eta,0) = e^{-\mu\eta}$，至少探测到一个光子的概率为 $P(\mu\eta,n \geqslant 1) = 1 - e^{-\mu\eta}$，已知 $\eta_{1030} = 2.9\ \eta_{1064}$。假设式(1)中其他参数相同，当 1030 nm/1064 nm 单光子探测激光雷达的非零计数概率 $P(\mu\eta,n\geqslant 1)$ 相同，代入可得：

$$L_{1030} = \sqrt{\frac{1030 \cdot \eta_{1080}}{1064 \cdot \eta_{1064}}} L_{1064} \approx 1.678 L_{1064} \tag{3}$$

结果为 1030 nm 激光雷达的探测距离比1064 nm 激光雷达高出约 67.8 %，更高的探测距离意味着更大的应用潜力。另一方面，激光光源的性能也与探测距离密切相关。现主流的 1064 nm 单光子探测激光雷达多使用 Nd：YAG 激光器作为光源，该激光器技术成熟且应用广泛。相比之下，虽然使用 Yb：YAG晶体的 1030 nm 激光器相关研究较少，但该晶体拥有量子效率高、能级结构简单、无激发态吸收和上转换作用、无浓度猝灭现象，高吸收带宽等独特优势。已经有许多高性能的 1030 nm 激光器产品相继推出，解决了 1030 nm 单光子探测激光雷达的光源问题。虽然 1064 nm 激光器输出功率高于 1030 nm激光器，但对于汽车自动驾驶、地形测绘等需要符合人眼安全条件的应用领域，现有 1030 nm 激光器已满足功率要求。

3　单光子探测激光雷达实验设计

图 2 为单光子探测激光雷达系统示意图。实验中使用的 1030 nm 固态激光器输出脉宽为 1.5 ns、重复频率为 1.5 kHz，输出光束的直径为 1.1 mm、发散角为 1.2 mrad、单脉冲能量最大可调至 100 μJ。1064 nm 激光器的输出脉宽为 2.2 ns、重复频率为 1 kHz、光束的直径为 1 mm，发散角为 3.5 mrad，单脉冲能量 0.5 μJ。两波长激光器可以拆卸替换，便于开展两个波长的单光子测距对比实验。出射光束经过组合滤光片衰减后，由有机玻璃板进行分光(分光比为 3.7：96.2)，其中反射光束进入 PIN 光电二极管产生同步信号，透射光束穿过 50 mm 直径的打孔反射镜(打孔孔径 10 mm)后出射。扫描装置采用双棱镜设计，由一对直径 25.4 mm、顶角 18.2°的楔形棱镜组成，并使用两个金属传感器反馈棱镜的旋转角度。1030 nm 窄带滤光片用于抑制背景噪声。同步信号、金属传感器两路方位角信号、SPAD 总共 4 路信号输入到 TCSPC 系统中记录。



(a)原理示意图

(b)系统实物图

图 2　单光子探测激光雷达系统

Fig. 2. Single-photon detection lidar system

4　1030 nm/1064 nm 单光子测距对比

本文分别开展 1030 nm 和 1064 nm 波长的单光子测距实验，以验证两个波长探测效率差异对单光子测距能力的影响。按照图 2 原理图搭建单光子探测激光雷达，固定双棱镜的方位角使激光光束方向恒定，并通过改变滤光片调节脉冲强度，将两个光源调整到单脉冲能量基本一致。同时确保探测器计数保持在平均每脉冲 0.1 个光子以下，以规避多光子计数的影响。经过测试，光路中打孔反射镜、耦合透镜等其他光学原件在两波长处的光学损耗差异可以忽略不计。每个波长均测试 5 次，单次累计时间 t = 20 s，测距目标为实验室走廊后面 60 m 远的白色墙壁，图 3 展示了其中两次测量的结果。

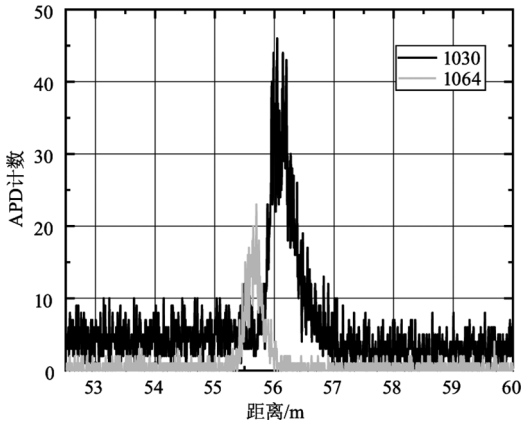


图 3 1030 nm/1064 nm 测距结果

Fig. 3 Single-photon ranging results at 1030 nm and 1064 nm

图 3 中 1030 nm 测距得到的信号峰在高度上明显超过 1064 nm。因为 1030 nm 激光器功率比 1064 nm激光器更大,其初始出射光束被滤光片反射回来并散射到周围后会对探测器产生干扰,所以两波长的噪声强度存在差异。本文在后续分析中先做了去底噪处理。两个波长测距时雷达系统的位置有一些变动,导致测距结果不一致。该差异在后续计算中已经代入,不影响验证比对。使用 Matlab 对两个波长的测距结果进行积分,得到信号峰内回波信号的总和,结果如表 2 所示。

表 2 相关参数和测距结果

Tab. 2 Relevant parameters and ranging results

波长/nm	距离 L/m	激光重频 f/kHz	脉冲能量 E_{out}/nJ	测距精度/mm	总光子计数 N
1064	55.65	1.0	1.0	14.5	435
1030	56.13	1.5	1.0	12.0	1884

总光子计数可表示为 $N = P(\mu\eta, n \geqslant 1) \cdot t \cdot f$。设 n_{1030}、n_{1064} 为两个波长的总光子计数,f_{1030}、f_{1064} 为激光重频,E_{1030}、E_{1064} 为脉冲能量。由(1)式和(2)式可推出:

$$\frac{\eta_{1030}}{\eta_{1064}} = \frac{L^2_{1030} \cdot E_{1064} \cdot 1064 \cdot \ln(1 - n_{1030}/(t \cdot f_{1030}))}{L^2_{1064} \cdot E_{1030} \cdot 1030 \cdot \ln(1 - n_{1064}/(t \cdot f_{1064}))} \approx 3.09 \tag{4}$$

结果为 3.09 倍,与上文 Si SPAD 探测效率的标定结果(2.9 倍)基本符合。

5 单光子三维成像实验

扫描装置的性能高低是影响雷达光束在空间上指向精确与否的关键性因素。声光、电光偏转器等[25]非机械性的扫描装置会引发光电效应等现象,因此存在通光孔径偏小和光束传输质量较差等问题。机械性扫描装置包括以旋转电机为代表的云台法、以振镜为代表的反射法和以楔形棱镜为代表的折射法。其中云台法大都体积笨重,无法高精度且快速的扫描;反射法因镜子角度改变量与光束偏转角度为 2 倍关系,在机械误差上更为敏感,面对机械震动等外界因素时抗干扰能力不足。与上述方法相比,双棱镜结构更为紧密、响应速度快、抗干扰能力更强[26],在复杂环境的适用性上也更好[27-28]。

组成扫描装置的一对楔形棱镜安置在金属套筒中。套筒上安装有传动轮,通过传动带与步进电机相连,最高转速 10 r/s。步进电机上安装了两个不同齿数的传动轮用于带动双棱镜旋转,其驱动信号由高精度信号发生器给出,双棱镜的方位角信息由棱镜套筒旁的两个金属传感器给出。双棱镜的转动速度由电机转速和各自传动轮齿数比共同决定,通过更换传动轮即可改变扫描轨迹。实验中的齿数比为 50∶47,扫描轨迹如图 4(b)所示。激光落点的空间坐标由双棱镜的转动方程求解:

$$x(\omega_1, \omega_2) = (r_1 + r_d) \cdot \sin(\omega_1 t) + r_2 \cdot \sin(\omega_2 t + \Delta\theta) \tag{5a}$$

$$y(\omega_1, \omega_2) = (r_1 + r_d) \cdot \cos(\omega_1 t) + r_2 \cdot \cos(\omega_2 t + \Delta\theta) \tag{5b}$$

$$x(\omega_1, \omega_2)^2 + y(\omega_1, \omega_2)^2 + z(\omega_1, \omega_2)^2 = D^2 \tag{5c}$$

$$r_1 \approx r_2 \approx z(\omega_1, \omega_2) \cdot \tan(\theta_0) \tag{5d}$$

$$r_d = C_1 + C_2 \cdot \cos(|\omega_1 t - \omega_2 t - \Delta\theta|) \tag{5e}$$

$x(\omega_1, \omega_2)$、$y(\omega_1, \omega_2)$、$z(\omega_1, \omega_2)$ 分别为当前时刻激光落点的空间三维坐标,ω_1、ω_2 为双棱镜的角速度;θ_0 为楔形棱镜的顶角角度;C_1、C_2 为一个和 θ_0 有关的已知小常量;t 为当前时刻距离起始时刻经过的时间,由金属传感器信号和同步信号的差值给出;$\Delta\theta$ 为起始时刻双棱镜之间的相位角,在组装雷达时测量给出;D 为激光飞行距离,由 TCSPC 测量给出。对(5)式综合求解即可得到对应时间点的空间三维坐标。

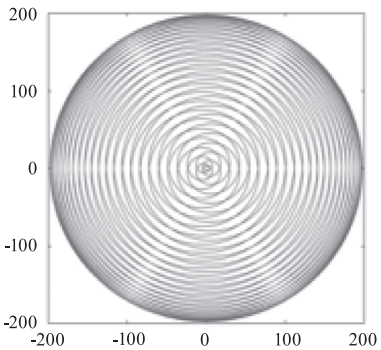
为进一步减少背景噪声,本文在打孔反射镜到单光子探测器的光路上用吸光材料做了遮蔽处理。

配合带宽 10 nm 的窄带滤光片，背景噪声最终被控制在 10 kHz 以内。

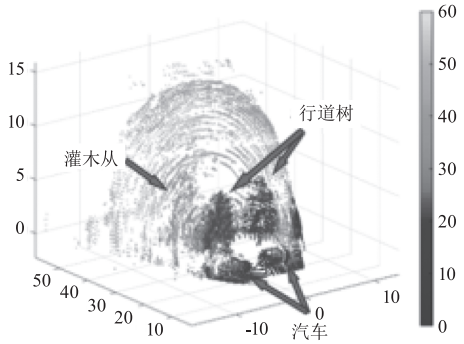
为演示 1030 nm 单光子探测激光雷达的成像效果，本文在实验室周围选取了一个合适的场景。如图 4(a)所示，整体场景可分为 3 层：距离最近的两辆汽车和两颗行道树、靠中间的灌木丛、以及最外层的办公楼外墙。扫描范围为一个顶角 36°的圆锥，从系统到办公楼外墙的距离约 50 m，最大扫描半径 16 m。本文将连续扫描的轨迹平均划分为若干个像素点，用 TCSPC 技术处理单个像素点对应时间段内的所有回波信号。在多个脉冲周期累计后，背景噪声接近平均的分布在时间轴上，而与同步信号相关性强的目标信号集中累积在一处，形成计数值远超噪声的信号峰。设定一个比较阈值去噪后对该信号峰提取质心对应的时间 T，即可求出该像素点的距离 $D = cT/2$ 。

尽管在白天使用 1030 nm 单光子探测激光雷达也能获得目标场景的距离信息，但过高的背景计数会导致系统信噪比过低、运算处理时间过长，所以本章实验在夜间进行。设置扫描时间 250 s，电机转速为 0.2 r/s，双楔形棱镜分别转动 50 圈和 47 圈。每个像素点的累计时间为 6.6 ms，扫描轨迹被划分为约 38000 个像素点。扫描结果如图 4(c)、(d)所示。

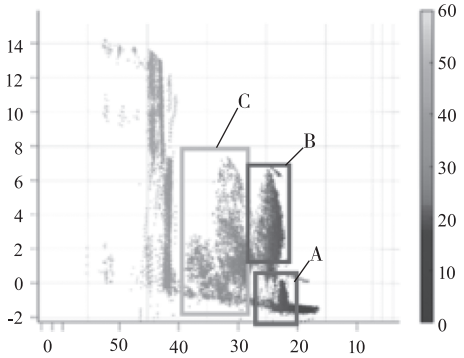
(a)场景实物图



(b)扫描轨迹示意图



(c)三维点云侧视图



(d)三维点云左视图

图 4　单光子成像点云图

Fig. 4 The point cloud of the single-photon imaging

图中目标场景的重建效果良好。距离约 25 m 的蓝色点云中，靠上部分为两颗行道树，靠下部分为两辆汽车，在图 4(d)中分别“A”框和“B”框标出。第二层灌木丛距离约 35 m，用浅蓝灰色点云显示，在图 4(d)中用“C”框标出。最后的办公楼外墙距离约 50 m，用橙色点云显示其 3 层结构。汽车和树木的总体轮廓清晰，而办公楼外墙在细节上效果一般。这是因为汽车和树木的表面反射率较高，而办公楼外侧有大量低漫反射率的玻璃窗，导致回波光子数量有差异。同时在双楔形棱镜扫描轨迹划分的像素点中，中心区域的像素点较为密集，而边际区域的像素点分布稀疏，进而造成了外墙部分成像模糊。

6　结　论

本文搭建了一套基于 SiSPAD 的 1030 nm 单光子探测激光雷达，采用双棱镜作为扫描装置。从 SiSPAD 探测效率标定数据的分析和 1064 nm/1030 nm 两个波长测距比较实验这两个方面验证，说明 1030 nm单光子探测激光雷达能够获得 67.8 % 左右的探测距离提升。另外，本文还演示了 50 m 范围的近距离三维成像，证明了 1030 nm 单光子探测激光雷达的可行性。同时，目前已经研发出高性能的

1030 nm 激光器货架产品,解决了激光光源的问题。相较于传统的近红外激光雷达,这种 1030 nm 单光子探测激光雷达在未来汽车自动驾驶、地形测绘等方面有很大的应用潜力。

参考文献:

[1] Llop J, Gil E, Llorens J, et al. Testing the Suitability of a Terrestrial 2D LiDAR Scanner for Canopy Characterization of Greenhouse Tomato Crops [J]. Sensors, 2016, 16(9):1435.

[2] Molebny V, McManamon P, Steinvall O, et al. Laser radar: historical prospective-from the East to the West[J]. Optical Engineering, 2017, 56(3):031220.

[3] Steinvall O, Tulldahl M. Laser range profiling for small target recognition [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9832:98320E.

[4] McManamon P F, Banks P, Beck J, et al. Comparison of flash lidar detector options [J]. Optical Engineering, 2017, 56(3):031223.

[5] Rollenbeck R, Bendix J. Rainfall distribution in the Andes of southern Ecuador derived from blending weather radar data and meteorological field observations[J]. Atmospheric Research, 2011, 99(2):277 – 289.

[6] Urgilés G, Célleri R, Trachte K, et al. Clustering of rainfall types using micro rain radar and laser disdrometer observations in the tropical andes[J]. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021, 13(5):991.

[7] Wang L, Zhang Y, Wang J. Map-based localization method for autonomous vehicles using 3D-LIDAR[J]. Ifac Papersonline, 2017, 50(1):276 – 281.

[8] Liu Bingbing, Wang Bin, Wang Heng, et al. Pedestrian recognition and tracking using 3D LiDAR for autonomous vehicle[J]. Robotics And Autonomous Systems, 2017, 88:71 – 78.

[9] Pierzcha A M, Giguère P, Astrup R. Mapping forests using an unmanned ground vehicle with 3D LiDAR and graph-SLAM[J]. Computers Electronics in Agriculture, 2018, 145:217 – 225.

[10] Swatantran A, Tang H, Barrett T, et al. Rapid, high-resolution forest structure and terrain mapping over large areas using single photon lidar[J]. Scientific Reports, 2016, 6:28277.

[11] Leah W, Rick D, Laura C, et al. Influence of vegetation structure on lidar-derived canopy height and fractional cover in forested riparian buffers during leaf-off and leaf-on conditions[J]. PLoS ONE, 2013, 8(1):e54776.

[12] Guan Y, Li H, Xue L, et al. Lidar with superconducting nanowire single-photon detectors: recent advances and developments[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 156:107102.

[13] Jiang X, Itzler M A, Ben-Michael R, et al. InGaAsP – InP avalanche photodiodes for single Photon Detection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(4):895 – 905.

[14] Zhang J, Itzler M A, Zbinden H, et al. Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication[J]. Light-Science & Applications, 2015, 4:e286.

[15] Liu C, Ye H-F, Shi Y-L. Advances in near-infrared avalanche diode single-photon detectors[J]. Chip, 2022, 1(1):100005.

[16] Liu J L, Xu Y N, Li Y F, et al. Ultra-low dead time free-running InGaAsP single-photon detector with active quenching[J]. Journal of Modern Optics, 2020, 67(13):1184 – 1189.

[17] Liu J L, Xu Y N, Dong Y K, et al. Integrated InGaAsP near-infrared single-photon detector with fast active quenching [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12):1212002.

[18] Li Z, Pan H, Shen G, et al. Single-photon Lidar for canopy detection with a multi-channel Si SPAD at 1064 nm[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 157:108749.

[19] Huang G H, Shu R, Hou L B, et al. Design and performance of a fiber array coupled multi-channel photon counting, 3D imaging, airborne lidar system[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9080:90800F.

[20] Du W, Yu H, Zeng X, et al. High resolution single-photon imaging for recognition of camouflaged target [J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11763:117638Z.

[21] Guo J, Fei X, Ge P, et al. High-resolution three-dimensional imaging based on all-fiber photon-counting Lidar system[J]. Infrared and Laser engineering, 2021, 50(7):134 – 143.

[22] 李铭. 基于光纤光学的光子计数激光雷达技术研究[D]. 上海:中国科学院大学,中国科学院上海技术物理研究所,2017.

[23] 潘超. 机载多波束阵列探测三维成像激光雷达关键技术研究[D]. 北京:中国运载火箭技术研究院,2022.

[24] Li A H, Zhong S Z, Liu X S, et al. Double-wedge prism imaging tracking device based on the adaptive boresight adjustment principle [J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(2):025107.

[25] Rosell F A. Prism Scanner[J]. Journal of the Optical Society of America, 1960, 50(6):521 – 526.

[26] Li A, Gao X, Ding Y. Comparison of refractive rotating dual-prism scanner used in near and far field[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9192:919216.

[27] Li A H, Liu X S, Sun J F, et al. Risley-prism-based multi-beam scanning LiDAR for high-resolution three-dimensional imaging [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 150:106836.