

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

单光子激光雷达技术发展现状与趋势

赵浴阳, 周鹏飞, 解天鹏, 姜成昊, 蒋衍, 赵政伟, 朱精果

引用本文:

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.

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.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240037>

收稿日期: 2024-02-07; 修改日期: 2024-03-27; 录用日期: 2024-03-27

相关论文

基于衍射透镜接收的激光雷达特性分析及测试

王玲, 刘博, 吴城, 罗兰, 杨玉强

光电工程 2024, 51(3): 240032 doi: [10.12086/oe.2024.240032](https://doi.org/10.12086/oe.2024.240032)

高分辨率贝塞尔光束激光成像

祁慧宇, 张伟华, 翟迪迪, 朱欣怡, 李召辉

光电工程 2024, 51(3): 230243 doi: [10.12086/oe.2024.230243](https://doi.org/10.12086/oe.2024.230243)

频率调制连续波激光雷达测量技术的非线性校正综述

李超林, 刘俊辰, 张福民, 曲兴华

光电工程 2022, 49(7): 210438 doi: [10.12086/oe.2022.210438](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210438)

SiPM激光雷达阳光下探测概率性能分析

陈建光, 倪旭翔, 袁波, 严惠民

光电工程 2021, 48(10): 210196 doi: [10.12086/oe.2021.210196](https://doi.org/10.12086/oe.2021.210196)

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.2024.240037

单光子激光雷达技术发展现状与趋势

赵浴阳^{1,2}, 周鹏飞^{1,2}, 解天鹏^{1,2}, 姜成昊¹,
蒋衍¹, 赵政伟¹, 朱精果^{1*}

¹中国科学院微电子研究所, 北京 100029;

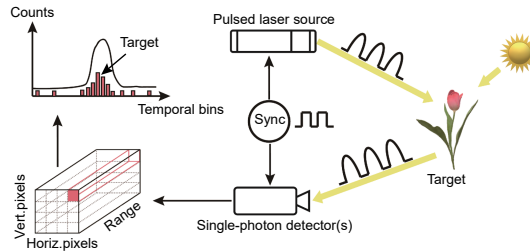
²中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 随着单光子探测器件及技术的快速发展, 具有光子级高灵敏度探测能力的单光子激光雷达已成为研究热点, 并在遥感测绘、智能驾驶和消费电子等领域发挥日益重要的作用。本文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单光子激光雷达探测原理。考虑到单光子探测器与处理算法的重要性, 概述了单光子探测器的发展现状, 以及典型的信号处理算法, 并梳理了单光子激光雷达在远距离探测、复杂场景探感、星载/机载测绘遥感、智能驾驶导航避障和消费电子 3D 感知等领域的应用情况和典型系统实例。最后, 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。

关键词: 激光雷达; 信号处理; 光子计数; 单光子雪崩光电二极管

中图分类号: O439

文献标志码: A



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

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

Development status and trends of single-photon LiDAR technology

Zhao Yuyang^{1,2}, Zhou Pengfei^{1,2}, Xie Tianpeng^{1,2}, Jiang Chenghao¹, Jiang Yan¹,
Zhao Zhengwei¹, Zhu Jingguo^{1*}

¹Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: With the rapid development of single-photon detectors and technologies, single-photon LiDAR with photon-level sensitivity has become a popular research topic. It plays an increasingly important role in fields such as remote sensing and mapping, intelligent driving, and consumer electronics. This paper focuses on LiDAR technologies and systems employing single-photon avalanche diode detectors, introducing three single-photon LiDAR detection principles: pulse accumulation, coding modulation and chirp modulation. Considering the importance of detectors and algorithms, it outlines the current development status of single-photon detectors and typical processing algorithms. It also reviews the applications and typical systems of single-photon LiDAR in long-distance detection, complex scene sensing, satellite/airborne remote sensing and mapping, intelligent driving

收稿日期: 2024-02-07; 修回日期: 2024-03-27; 录用日期: 2024-03-27

*通信作者: 朱精果, zhujingguo@ime.ac.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

navigation and obstacle avoidance, and 3D sensing in consumer electronics. Lastly, the paper analyzes the future development trends and forecasts the potential challenges of single-photon LiDAR technology in detectors, algorithms, systems, and application domains.

Keywords: light detection and ranging; signal processing; photon counting; single-photon avalanche diode

1 引言

在三维成像探测领域, 得益于激光波长短、波束窄的特点, 具有高分辨率、高测距精度以及出色抗干扰能力的激光雷达已被广泛应用于航空航天、自动驾驶、三维建模和环境监测等多个领域^[1]。然而, 激光在传输介质中的散射与衰减效应导致常用的线性探测模式激光雷达在雾霾、沙尘、水下等复杂环境以及远距离应用中的探测能力受到限制, 如何在复杂环境中保持高探测灵敏度、高探测精度和强抗干扰能力成为激光雷达技术发展中的一大挑战^[2]。

近年来, 随着单光子探测器性能的提升, 基于单光子探测器的激光雷达(下文简称“单光子激光雷达”)通过时间相关单光子计数(time-correlated single photon counter, TCSPC)技术, 可将探测灵敏度提升至光子级别, 显著降低激光雷达系统对激光光源功率的依赖, 使得超远距离探测和激光雷达系统轻量化成为可能; 此外, 对光信号利用率的大幅提升, 为微弱信号下高精度三维重建奠定了基础^[3-4]。单光子激光雷达的上述优势使其在远距离探测、复杂场景探感以及遥感测绘等领域具有广阔的应用前景, 逐步成为新一代激光雷达技术的发展趋势^[5-7]。

在常见的单光子探测器中, 工作在盖革模式下的雪崩光电二极管(geiger mode avalanche photon diode, Gm-APD), 也被称为单光子雪崩二极管(single-photon avalanche diode, SPAD), 具有易集成、低成本、高可靠性等优势, 已经成为单光子激光雷达的主流探测器之一^[8-9]。本文以基于 SPAD 探测器的激光雷达为重点, 从基本原理出发, 介绍了脉冲累积、编码调制和啁啾调制三种主要技术方案, 追踪了 SPAD 探测器的最新发展动态, 并对典型成像算法进行了概述。本文深入探讨了单光子激光雷达在各领域的研究进展, 梳理了其在远距离目标探测、复杂场景探感、遥感测绘、智能驾驶导航避障和消费电子领域的典型系统应用。最后, 从探测器件、成像算法、系统集成和应用层面展望分析了单光子激光雷达的主要发展趋

势和面临的挑战。

2 单光子激光雷达探测原理

单光子探测器赋予了单光子激光雷达独特的光子级微弱信号探测能力, 也深刻改变了其设计思路。为适应单光子器件独特的信号响应方式并进一步提高单光子激光雷达系统性能, 诸多技术方案被相继提出。本节将详细介绍脉冲累积、编码调制和啁啾调制三种典型的单光子激光雷达探测原理。

2.1 脉冲累积单光子探测原理

由于单光子探测器响应光子事件的随机性以及二值化输出特性, 单光子激光雷达难以通过单个脉冲或单个周期的测量准确地获取目标的距离。一种显而易见的思路是将多个周期的光子计数在时间维度进行累积, 通过所生成的时间分布直方图, 恢复原始信号的分布, 解算目标深度信息, 因此基于脉冲累积方案(也称脉冲/光子计数飞行时间技术)的单光子激光雷达应运而生。

脉冲累积技术探测原理如图 1 所示。同步模块以固定频率开启计时电路并驱动激光器发射激光脉冲作为测量载体到目标表面, 激光信号经目标表面反射后被单光子探测器接收, 响应信号由后端处理电路采集并由计时电路记录信号到达时间。在经过多个脉冲周期的累积后, 即可获得每个像素对应的时间直方图, 该直方图直观反映了信号与噪声在时间维度上的混合概率分布。此时, 信号处理算法能够快速有效地区分噪声和信号, 并得到目标位置对应的飞行时间, 经换算后得到距离信息。

为了更好地描述脉冲累积单光子激光雷达的成像过程, 可通过数学语言对光子计数直方图进行数学建模。通常情况下, 激光器所发射的激光波长远小于目标物表面粗糙颗粒的尺度, 因此由目标物漫反射的回波光信号可被视为热辐射光。Mandel 等人通过数学证明了在单光子成像过程中, 光子探测的半经典理论与量子理论等价^[10]。根据半经典理论, 由于在 SPAD 的实际应用中, 热辐射光的简并度远大于平均光子事

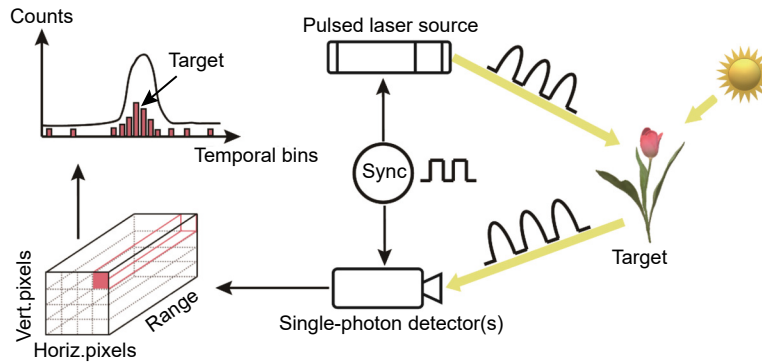


图 1 脉冲累积单光子探测原理

Fig. 1 The principle of pulse accumulation single photon detection

件数，因此 SPAD 探测器对光子的响应服从泊松分布。考虑到背景噪声与暗计数噪声通常服从均匀分布，可将 t 时刻光子事件发生期望 λ_t 简化为如下公式：

$$\lambda_t = \eta \rho g\left(t - \frac{2d}{c}\right) + n_b + n_d, \quad (1)$$

其中： η 、 ρ 、 d 、 c 分别代表探测器量子效率、目标物反射率、目标距离和光速， n_b 与 n_d 则代表背景噪声与暗计数噪声引发光子事件的期望， $g(\cdot)$ 表示系统响应函数。最终，经过 N 个脉冲的累积后，在 t 时刻发生 k 次光子事件的概率 $P(k)$ 可被描述为

$$P(k) = \text{Poisson}\left(N \int_t^{t+\Delta t} \lambda_t dt\right). \quad (2)$$

通过对直方图采用不同算法进行处理，可以获得光子飞行时间 t_d ，根据飞行时间测距原理，目标与探测系统的距离可通过公式 $d = ct_d/2$ 求得。必须说明的是，上述公式仅为理想数学模型，在实际系统搭建和算法设计时，探测器的死区时间、时间抖动、后脉冲

以及传输介质的分布特性和衰减系数等因素均会对该模型产生影响，需根据系统应用环境和器件情况具体问题具体分析。例如使用 InGaAs/InP SPAD 探测器在夜间成像时，噪声主要源于暗计数^[11]；而在白天，较强的太阳光将会显著提升 n_b ，背景噪声成为主要噪声来源。

对脉冲累积单光子激光雷达的研究可追溯到 1993 年，美国麻省理工学院林肯实验室开发了以 Gen 系列为代表的多个单光子激光雷达系统^[12]。英国赫瑞瓦特大学 Buller 团队于 1997 年首创了一款采用时间相关单光子计数技术的超短脉冲单光子探测系统^[13]，该系统使用 10 ps 脉宽的激光，实现了 30 μm 测距精度。该研究团队随后在 2009 年以平均功率不足 50 μW 的激光，实现了对 330 m 处目标的三维成像^[14]。图 2(a) 展示了该系统在 330 m 外对汽车的成像效果，图 2(b) 展示了同一系统在 325 m 外对人体模

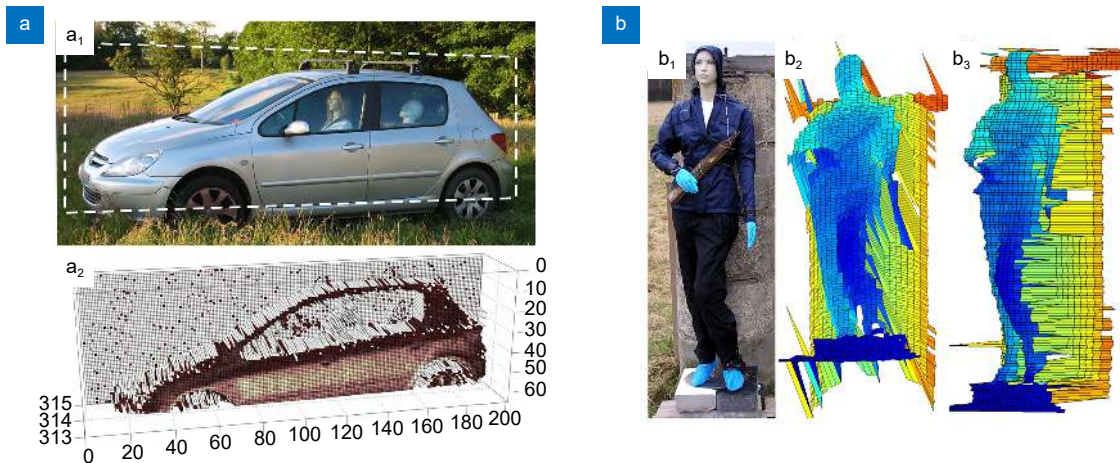


图 2 (a) Buller 团队 330 m 汽车三维成像；(b) Buller 团队 325 m 人体模型成像^[14]

Fig. 2 (a) Results of 3D imaging for a car at 330 m by Buller et al; (b) Results of 3D imaging for a human model at 325 m by Buller et al^[14]

型的成像效果。国内相关研究虽然起步较晚，但正在逐步追赶国际先进水平。2012年，中国科学院上海技术物理研究所舒嵘团队采用单脉冲能量为 $1 \mu\text{J}$ 的激光对 50 m 处外场目标进行成像实验^[15]，验证了单光子激光雷达在微弱信号回波下的测距和三维成像能力。

总体而言，采用脉冲累积技术的单光子激光雷达系统原理简单，计时电路或装置(如 TCSPC 模块)分辨率较高，且信号处理电路并行度高、易于集成，因此脉冲累积方案成为了当前较为常见的单光子激光雷达方案。此外，脉冲激光器单脉冲能量高，作用距离远，也赋予了脉冲累积单光子激光雷达更远的理论探测距离^[11]。但由于脉冲累积方案的最大无距离模糊探测距离为 $d_{\max} = cT_m/2$ ，在使用高重频脉冲光源以保证成像质量的条件下，若激光脉冲周期 $T_m = 1 \mu\text{s}$ ，则系统无距离模糊探测距离仅为 150 m。因此该方案在兼顾帧率、成像质量和探测距离等方面面临挑战。

2.2 编码调制单光子探测原理

为了解决距离模糊问题，研究人员提出了编码调制方案，编码调制单光子探测技术的基本原理如图 3 所示^[16]。该方案的系统结构与传统的脉冲累积方案相差不大，主要区别在于增加了高速信号发生器，所产生的编码信号一路作为参考信号 $a(n)$ ；另一路作为激光器的驱动信号，使激光器按照所设定的编码方式产生脉冲光。脉冲光从目标表面反射回成像系统后，被 SPAD 探测器接收并生成回波信号 $b(n)$ 。

由于回波信号可被视为热辐射光，那么由激光雷达方程可以得到目标漫反射回来的随机脉冲序列

$P_r(t)$ 为

$$P_r(t) = P_i(t - \tau) \left(\frac{FOV}{\theta_T} \right)^2 \frac{\rho A_R}{\pi R^2} \eta_R \eta_T T^2 \cos \theta + n(t), \quad (3)$$

其中： $P_i(t)$ 为激光脉冲发射序列， τ 表示携带目标距离信息的飞行时间， FOV 是光学系统的接收视场角， θ_T 是发射脉冲光束的发散角， ρ 是目标反射率， A_R 是接收光学透镜的面积， η_R 和 η_T 分别是接收与发射光学系统的透射率， T 是大气透射率， θ 是激光光束与目标物表面法线的夹角， $n(t)$ 表示接收到的背景光信号。在不考虑 SPAD 死区时间的影响时， $a(n)$ 与 $b(n)$ 之间只有时间 τ 的延迟，则 $b(n)$ 的理论值可表示为

$$b(n) = a\left(n - \left\lfloor \frac{\tau}{\Delta t} \right\rfloor\right). \quad (4)$$

此时，目标的飞行时间可以通过对 $a(n)$ 与 $b(n)$ 执行互相关运算得到

$$g(\tau) = \sum_{n=1}^N a(n)b(n). \quad (5)$$

当互相关函数 $g(\tau)$ 取最大值时，对应的时间就是目标的飞行时间。相较于脉冲累积技术，编码调制技术中回波信号调制后的最大无模糊探测距离 $d_{\max} = cN_b/2f_{\text{base}}$ ，其中调制速率 f_{base} 通常为 GHz 级， N_b 为码元长度。理论上只要编码长度足够长即可实现任意距离的非模糊探测。

编码调制方案本质上通过对脉冲激光器的调制，提高了发射信号的时间带宽积，从而克服了距离模糊问题。而编码方式的差异，也为探测系统带来了不同的收益。2008年，英国赫瑞瓦特大学 Hiskett 团队开

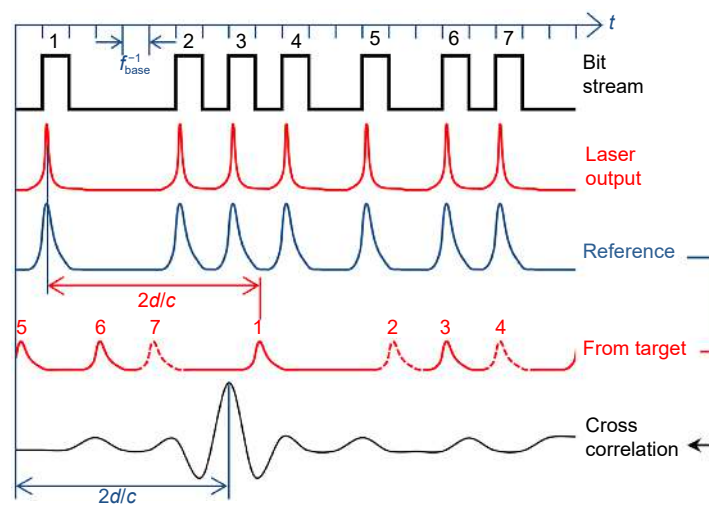


图 3 编码调制单光子探测技术测量原理^[16]

Fig. 3 Coded modulation of random coding single photon detection technique^[16]

发了一种基于随机编码的单光子探测技术^[17], 该技术能够加速数据采集并解决因高重复频率导致的距离模糊问题。2020年, 中国科学院光电技术研究所刘博团队提出一种固定模式的宏/子脉冲编码技术^[18], 该技术兼顾了距离模糊问题和激光器峰值功率问题, 为实现更远距离探测提供了新的解决方案。此外, 基于真随机信号序列的研究进一步提高了单光子激光雷达在远距离探测中的抗干扰能力, 并显著降低了对激光器调制性能的要求。2022年, 中国科学院微电子研究所朱精果团队提出混沌单光子激光雷达的概念^[19], 在克服距离模糊的同时, 信噪比也提高了60倍。2023年, 该团队提出的新方案突破了混沌激光雷达在远距离目标探测应用中的限制^[20-21], 系统结构如图4所示。

综上所述, 通过选择合适的编码方式, 可以有效提高系统探测距离、探测精度和抗干扰能力等关键指标。同时, 编码调制单光子激光雷达同样利用了脉冲激光器单脉冲能量高的特点, 具备远距离探测能力。但编码调制的瓶颈在于调制速率和激光脉宽通常为纳秒级, 其测距精度较低, 一般在厘米级。

2.3 啁啾调制单光子探测原理

基于调频连续波 (Frequency modulated continuous wave, FMCW) 技术的激光雷达能实现对目标毫米甚至微米级的高精度测距, 并具备测速能力, 因此被视为新一代激光雷达技术体制。随着单光子探测器的快速发展, 死区时间的缩短显著提高了探测器的采样频率, 为啁啾调制单光子激光雷达的快速发展奠定了基础。

啁啾调制单光子激光雷达主要分为光外差和电外差两种探测技术路线, 其区别在于混频处理位于单光

子探测器接收信号之前或之后。2006年, 美国麻省理工林肯实验室提出光外差啁啾调制单光子激光雷达, 并使用 32×32 像素的阵列 Gm-APD 探测器搭建了成像系统^[22], 验证了该技术路线的可行性。其系统工作流程如图5所示, 激光光源产生啁啾变化的激光信号, 该信号被分为两路: 一路作为测量载体发射; 另一路作为本振信号与回波信号进行混频处理, 混频后的信号将被单光子探测器接收。在大气衰减与目标反射率相对稳定的条件下, 回波信号的强弱与发射信号的强弱成正比。虽然单光子器件具有 0/1 输出特性, 无法直观显示回波信号的强弱, 但雪崩脉冲的密度正比于光子的平均到达率, 因此通过将蕴含啁啾信息的单光子脉冲序列进行统计与处理, 即可得到与往返时间成正比的中频信号, 进而获得目标的距离与速度等信息。2008年, 美国陆军研究实验室 (Army Research Laboratory, ARL) 设计了一种电外差啁啾调制单光子激光雷达^[23], 其使用单光子探测器直接接收回波光信号, 并利用本振信号调制探测器, 从而调节探测器灵敏度来完成本振信号与回波信号的混频。该方法简化了接收系统的结构, 探索了小型化啁啾调制单光子激光雷达方案的可能性。

在上述过程中, 令 f_0 为啁啾调制的起始频率, B 为啁啾调制的频率带宽, T_{pulse} 为一个调制脉冲的时间宽度, t_d 为信号在探测器和目标间往返时间。则本振啁啾信号的频率 f_x 和回波信号的频率 f_y 可分别表示为

$$f_x = f_0 + \frac{B}{T_{\text{pulse}}} \cdot t, \quad f_y = f_0 + \frac{B}{T_{\text{pulse}}} \cdot (t - t_d). \quad (6)$$

经过混频处理, 得到差频信号 $f_{\text{IF}} = f_x - f_y$, 该信

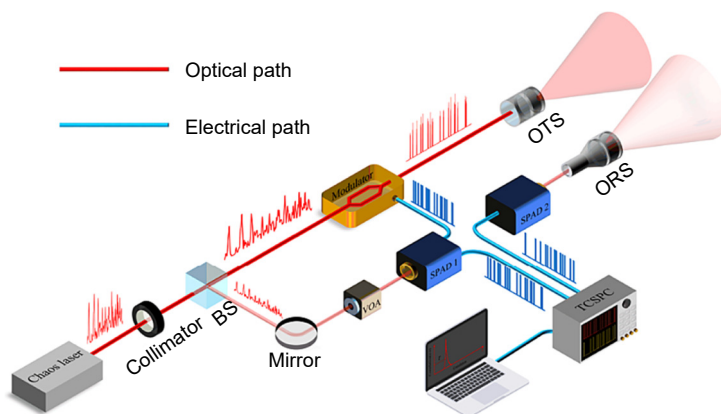
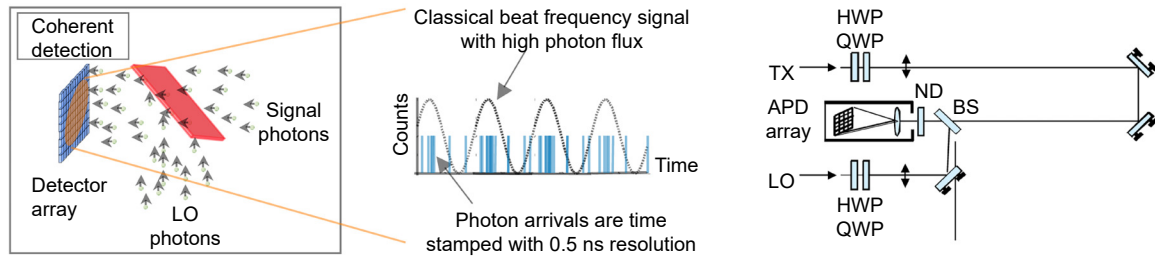


图4 混沌单光子探测系统^[21]

Fig. 4 Chaos single photon detection system^[21]

图 5 啁啾调制单光子探测原理^[16]Fig. 5 Chirped modulation single-photon detection principle^[16]

号也被称为中频信号。根据测距公式可得

$$d = \frac{cT_{\text{pulse}}}{2B} \cdot f_{\text{IF}} \quad (7)$$

因此, 通过测量中频信号即可求解目标距离信息。易得, 脉宽越窄, 带宽越宽, 测量精度越高。

啁啾调制的单光子激光雷达以单光子探测器作为接收器件, 其超高灵敏度赋予了雷达对微弱信号的探测能力, 为进一步提高 FMCW 激光雷达的探测距离提供了可能。但啁啾调制方案也存在诸多待解决的问题: 对于光外差技术, 其光学结构较为复杂且无法使用平衡探测器, 系统复杂度和信号质量有待进一步优化; 对于电外差方案, 单光子探测器直接接收回波信号, 从而引入了环境光噪声, 降低了系统信噪比。此外, 受限于 TDC 分辨率和单光子探测器带宽, 啁啾调制单光子激光雷达测距精度有所降低。

3 单光子激光雷达发展现状

单光子激光雷达的光子级感知能力源于单光子探测器的超高探测灵敏度, 因此单光子探测器件被视为成像系统的核心组成部分, 其性能已成为推动激光雷达性能指标提升的关键因素。此外, 为进一步提高光子利用率和探测系统的抗噪能力, 鲁棒的成像算法也被作为优化系统探测精度和探测距离的重要手段。随着探测器件的发展与成像算法的进步, 单光子激光雷达系统已被拓展到更多三维建模场景应用中。为系统展现单光子成像技术的发展现状, 本节详细梳理了以 SPAD 为代表的单光子探测器和单光子成像算法的研究进展, 并从远距离目标探测、复杂场景探感成像、星载/机载遥感测绘、智能驾驶导航避障和消费电子 3D 感知五个方面梳理了典型的系统级应用。

3.1 单光子探测器件发展现状

单光子探测器是单光子激光雷达的核心组成部分, 常见的单光子探测器主要包括光电倍增管 (photon-

multiplier tube, PMT)、超导纳米线单光子探测器 (superconducting nanowire single photon detectors, SNSPD)、单光子雪崩光电二极管和硅固态倍增管 (silicon photomultiplier, SiPM) 等。

光电倍增管是一种基于外光电效应的电子真空器件, 具有光敏面积大、增益高等优点。但其量子效率较低, 时间分辨率有限, 并且在工作时需要较高的反向电压, 这导致其体积、重量相对较大^[24]。超导技术的进步为超导纳米线单光子探测器的发明奠定了基础, SNSPD 通过在超导纳米线施加接近临界电流的偏置电流, 实现了光子的高效探测, 为在超低温条件下实现单光子探测提供了全新的解决方案。经过英国赫瑞瓦特大学、格拉斯哥大学和中国科学院上海微系统与信息技术研究所等机构的持续研究, SNSPD 不断向着高探测效率、大阵列的方向发展, 但较高的制冷要求限制了 SNSPD 的应用场景, 因此 SNSPD 主要在一些特殊应用中使用^[25]。

雪崩光电二极管 (Avalanche photon diode, APD) 是一种更为常见的光电探测器件, 其主要由不同掺杂元素制成的 P 型材料与 N 型材料构成。在一定反向偏压下, 由于雪崩效应, APD 能够将入射光信号转换为电信号并显著放大, 其工作原理如图 6(a) 所示。当外加反向偏置电压超过击穿电压时, 其将进入盖革模式从而具备单光子探测能力。SPAD 得益于探测器频谱范围广、功耗低、体积小和灵敏度高的特点, 其已成为单光子激光雷达的主流探测器之一, 并在量子通信等领域得到广泛应用^[26-27]。硅固态倍增管是一种基于多元微通道技术的硅基固态电子倍增器件, 它由数百乃至数千个 SPAD 并联组成 SiPM 的像素单元, 每一个像素单元可作为独立的 SPAD 探测器使用。SiPM 输出信号的电压幅度与该时刻发生雪崩像元的个数成正比, 在多光子条件下具有较高的动态范围以及线性响应的特性。同时其具有易于集成到阵列、抗

干扰能力强等优点, 被广泛应用于激光雷达测距与成像^[31]。

通常, 评价 SPAD 探测器性能的主要指标有:

1) 光子探测效率 (Photon detection efficiency, PDE), 即入射光子抵达探测器的感光区域并引发可测量电脉冲的概率;

2) 暗计数率 (Dark count rate, DCR), 即探测器在无光照射情况下, 因分子热运动等因素每秒产生的噪声事件数量;

3) 死区时间 (Dead time), 即单光子探测器发生雪崩效应后恢复至能够再次有效探测到下一光子事件的最小时间间隔;

4) 时间抖动 (Timing jitter), 即单光子探测器接收到光子信号的实际到达时间与其理想到达时间的统计偏差;

5) 后脉冲概率 (Afterpulsing probability, AP), 即由被困载波在 SPAD 复位之后释放电子并引发雪崩效应的概率。

根据制造材料, SPAD 主要分为硅基 (Si) 和钢镓砷/钢磷 (InGaAs/InP) 两类, 本节将深入探讨两种 SPAD 探测器的发展现状。

3.1.1 Si SPAD 探测器

Si SPAD 探测效率在可见光波段较高, 因而常见于 400 nm 至 1000 nm 波段的激光应用, 图 6(b) 展示了典型 Si SPAD 的 PDE 随波长的变化情况, 从图中可以看出 Si SPAD 对可见光敏感, 对近红外区域的光子探测效率较低。传统的 Si SPAD 器件采用浅层的 p^+/n 阱结构, 该结构的器件受表面缺陷的干扰, 从而导致了较高的暗计数率, 难以通过增加偏置电压来提高 PDE。近年来, 研究人员针对器件的雪崩区提出了 p^+ /深 n 阱和 p 阱/深 n 阱等结构, 此类结构利用低

掺杂的深 n 阱形成雪崩倍增区, 不仅可以降低隧穿机制对暗计数率的影响, 还能形成宽耗尽区来拓宽光谱响应范围。Veerappan 等人^[28]提出的基底隔离结构和 Shin 等人^[29]所提出的深层虚拟保护环结构在 400~780 nm 的宽光谱范围内都能实现大于 10% 的 PDE。2018 年, 瑞士洛桑联邦理工学院 Lee 等人提出一种圆形 p^+ /深 n 阱结构^[30]。该 SPAD 在 600 nm 波段的暗计数率为 55.4 cps, PDE 达到 31.8%, 在 420~920 nm 波长范围内的光子检测概率超过 5%。

上述研究提升了 Si SPAD 在近红外波段的光子探测效率, 有效抑制了暗计数噪声, 但对短红外光子探测效率仍然很低, 因此拓宽 Si SPAD 波长范围也是目前的研究重点之一。2019 年, 英国赫瑞瓦特大学 Peter Vines 等人利用窄带隙的 Ge 材料代替 Si 材料作为 SPAD 器件的吸收层, 制备出了 Ge-on-Si SPAD 探测器^[31]。该器件在 125 K 温度下峰值 PDE 达到 38%@1310 nm, 但是因为晶格常数不匹配导致缺陷浓度过高, 从而使探测器 DCR 偏大。除此之外, 上海交通大学白鹏等人提出了基于 Si SPAD 器件的红外上变频单光子光电探测器 (infrared up-conversion single photon photodetector, USPD)^[32]。该器件实现了约 45%@1550 nm 的探测效率。在 200 K 时, 噪声等效功率 (noise equivalent power, NEP) 达到 1.39×10^{-18} WHz^{1/2}。

随着 CMOS 等半导体工艺的快速发展, Si SPAD 探测器朝着探测效率高、死区时间短、时间抖动小以及高像素“焦平面阵列”等方向快速发展。2018 年, 西南技术物理研究所和电子科技大学等研究机构成功研制了 32×32 与 64×64 Si SPAD 焦平面阵列探测器^[33]。2020 年, 瑞士洛桑联邦理工学院与日本佳能公司共同研发了 1024×1000 Si SPAD 焦平面阵

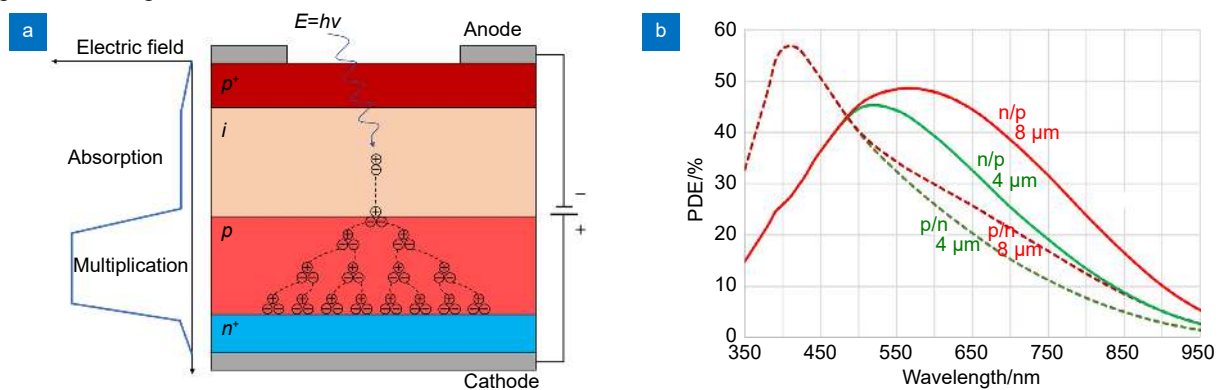


图 6 (a) 雪崩光电二极管工作原理图^[33]; (b) Si SPAD 的典型 PDE 随波长变化曲线^[34]

Fig. 6 (a) Working principle diagram of avalanche photodiode^[33]; (b) The typical PDE variation curve of Si SPAD with wavelength^[34]

列探测器^[36], 将像素规模扩展到了百万级, 但是其峰值 PDE 仅为 3.6%@520 nm。2021 年, 该机构又研发了 2072×1548 Si SPAD 焦平面阵列探测器^[37], 峰值 PDE 提升至 69.4%@510 nm, 该款探测器每个像素都集成了独立的 TDC 计时电路, 有助于实现高帧率、高分辨率的单光子三维成像。

表 1 总结了近年来 Si SPAD 探测器的最新进展和重要性能指标, 其制造工艺包括标准 CMOS、CIS (CMOS image sensor) 和 BCD (bipolar-CMOS-DMOS) 三种。由表 1 可知, 在相同的工艺下, 单位面积的 SPAD 探测器总体上呈峰值 PDE 增加、DCR 降低、死区时间越来越小的发展趋势。另外, 不同 CMOS 工艺也对 SPAD 性能产生显著影响, 例如 CIS 和 BCD 工艺对于提高探测器的峰值 PDE 和 DCR 指标具有独特优势。总体而言, 对 SPAD 探测器的研究表现出向高性能、低功耗和高分辨率发展的趋势。

3.1.2 InGaAs/InP SPAD 探测器

InGaAs/InP SPAD 主要工作于 1100 nm 到 1700 nm 的近红外波段。InGaAs 材料具有直接带隙、电离系数比大、晶格常数与 InP 匹配等特点, 是目前近红外波段性能最好的探测器材料之一。该器件的设计核心在于两点; 一是精确控制吸收区、倍增区的电场大小从而抑制带间隧穿并增强载流子的雪崩、漂移效应; 二是实现均匀的雪崩电场以减少过早的边缘击穿现象和暗计数率^[46]。2014 年, 英国谢菲尔德大学 Tan 团队将 InP 替换为 InAlAs 作为雪崩倍增区的材料^[47], 使得探测器的 PDE 在 260 K 和 290 K 的温度下分别达到 21% 和 10%。但 InAlAs 材料在雪崩区的隧穿电流较大, 导致该器件暗计数率较高。2018 年, 韩国首尔大学 Seo 等人在倍增层中引入多个 InGaAs 量子

阱区域^[48], 使得 InGaAs/InP SPAD 光子探测效率提高了一个数量级, 但其复杂的结构也令材料生长的质量较差, 暗计数率增加三个数量级。2021 年, 意大利米兰理工大学 Signorelli 等人提出了具有 10 μm 和 25 μm 两种不同直径的 InGaAs/InP SPAD 探测器^[49]。在 225 K 下, 10 μm 和 25 μm 器件的 DCR 分别为 1 kcps 和 4 kcps, 并在不同波段都有着较高的光子探测效率。

除了上述进展, 国内研究机构和企业近年来也在积极开展研究, 研制出多种规格的 InGaAs/InP SPAD 探测器。2020 年, 中国科学技术大学潘建伟团队在探测器中增加额外的电介质-金属反射层结构^[50], 使入射光子的吸收效率相对提高 20%, 工作温度为 253 K 时, SPAD 的探测效率约 40%@1550 nm, 暗计数率为 14.5 kcps。2023 年, 重庆光电技术研究所崔大健等人介绍了 InGaAs SPAD 探测器在结构设计、制造工艺以及电路设计等方面的进展, 概述了当前国内外在雪崩焦平面技术方面的发展现状, 并对百万级像素 InGaAs SPAD 探测器阵列进行了展望^[51]。到目前为止, 重庆光电技术研究所已成功开发了 64×64、256×64 像素规模的 InGaAs/InP SPAD 探测器^[35]。

表 2 整理了近年来 InGaAs/InP SPAD 探测器的最新进展和重要参数。由于现有工艺的限制, 相较 Si 材料, InGaAs/InP 探测器内部缺陷相对较多, 因此暗计数率显著高于 Si SPAD 器件, 往往需要制冷工作。除此之外, InGaAs/InP SPAD 的探测效率、死区时间和后脉冲概率等指标也存在提升空间。因此, 通过优化雪崩材料质量和器件结构以进一步提高主要指标, 将是 InGaAs/InP SPAD 的重要发展方向。

表 1 Si SPAD 探测器的最新进展和重要参数

Table 1 Recent progress and important parameters of Si SPAD detectors

Reference	Technology	Year	Size/μm	Timing jitter/ps	Dead time/ns	AP/%	DCR/cps	Peak PDE
[38]	65 nm standard CMOS	2018	20	7.8	100	<10	2800	8%@470 nm
[39]	65 nm standard CMOS	2021	10	139	3.5	-	233	23.8@420 nm
[40]	130 nm CIS	2019	23.78	127	-	-	50	25%@465 nm
[36]	180 nm CIS	2020	9.4	-	-	-	0.4	26.7%@520 nm
[41]	180 nm CIS	2021	50	16	50	<3	0.23	55%@480 nm
[42]	110 nm CIS	2023	10	68	-	0.15	12.6	73%@440 nm
[43]	160 nm BCD	2021	10/20/30	75	0.9/1.9	0.14/0.09	0.19	64%@490 nm
[44]	55 nm BCD	2021	8.8	52	0.97	0.97	0.1	62%@530 nm
[45]	55 nm BCD	2023	14.4	55	2500	0	38.2	89.4%@450 nm

表 2 InGaAs/InP SPAD 探测器的最新进展和重要参数
Table 2 Recent progress and important parameters of InGaAs/InP SPAD detectors

Reference	Year	Size/ μm	Timing Jitter /ps	Dead time/ns	AP/%	DCR/cps	Peak PDE
[52]	2018	<100	-	2	<2	-	10%@1060 nm
[50]	2020	-	-	88	5.5	3k@253 K	40%@1550 nm
[53]	2021	-	70	-	4.5	20k@225 K	50%@1550 nm
[54]	2022	20	-	-	-	43.8k@247 K	55.4%@1550 nm
[55]	2022	25	-	-	-	9.09k@223 K	25.72%@1550 nm
[49]	2022	10	159	-	-	1k@225 K	33%@1064 nm
[56]	2023	-	44	20	1.4	-	21%@1550 nm

3.2 单光子成像算法研究进展

在单光子激光雷达实际应用中, 光子级探测灵敏度带来了探测能力的提升, 但噪声引起的光子事件会造成单光子激光雷达噪声点增多的问题, 并带来了探测的随机性, 干扰对理想信号的重建, 最终影响探测结果, 因此鲁棒的成像算法对单光子探测系统不可或缺。以徕卡 SPL100 为例^[57], 图 7 展示了该款产品在去噪前后的效果对比图。

常规的中值滤波方法对于滤除单光子数据中的泊松噪声同样适用。但此类方法忽略了单光子数据内在的时空联系和信号的分布特性, 也损失了大量边缘信息和高频成分, 因此出现了多种基于数学建模的方法以更好地从大量噪声和少量光子的条件下恢复目标深度图^[5,58]。一般而言, 此类方法通常会利用噪声与信号的概率分布差异, 根据实际应用场景引入局部相关性、非局部相关性等先验知识, 使用凸优化理论迭代求解获得最终的结果。

2014 年, 美国麻省理工学院 Kirmani 等人提出了首光子系统^[5]。该系统在每个像素处仅捕获首个回波光子的, 利用像素间的局部相关性, 实现了在低光子通

量条件下重构目标的深度与反射率信息。设 η 为探测器量子效率, $r(x,y)$ 为目标反射率, $t(x,y)$ 为光子飞行时间, S 、 B 、 T_i 分别表示单周期内总信号、噪声计数和脉冲重频, 则该算法在第 k 个脉冲周期得到首光子的概率为

$$P_0[n(x,y) = k] = P_0(x,y)^k \cdot [1 - P_0(x,y)], \quad (8)$$

其中, $P_0(x,y)$ 为单次激光脉冲未能引发雪崩脉冲的概率, 且满足 $P_0(x,y) = e^{-\eta(r(x,y)S + BT_i)}$ 。由于通常情况下在像素 (x,y) 处发生的光子事件数 $n(x,y) \gg 1$, 因此 $r(x,y) \approx 1/n(x,y)$ 。但在实际成像过程中, 噪声将严重干扰算法成像质量, 因此首光子成像算法通过对相邻像素光子飞行时间的方差进行阈值筛选, 从而滤除了几乎所有由噪声引起的异常点。最后, 通过引入全变分正则化, 实现了深度图的平滑和进一步的滤噪。实验证明, 该方法可以显著提高光子的利用率, 缩短积分时间, 提高系统成像速度。2016 年, 面向多回波应用, 美国麻省理工学院 Shin 等人将多峰信号重建问题转化为反卷积问题, 并通过凸优化方法进行求解^[58]。

2017 年, 美国波士顿大学 Rapp 等人提出了经典

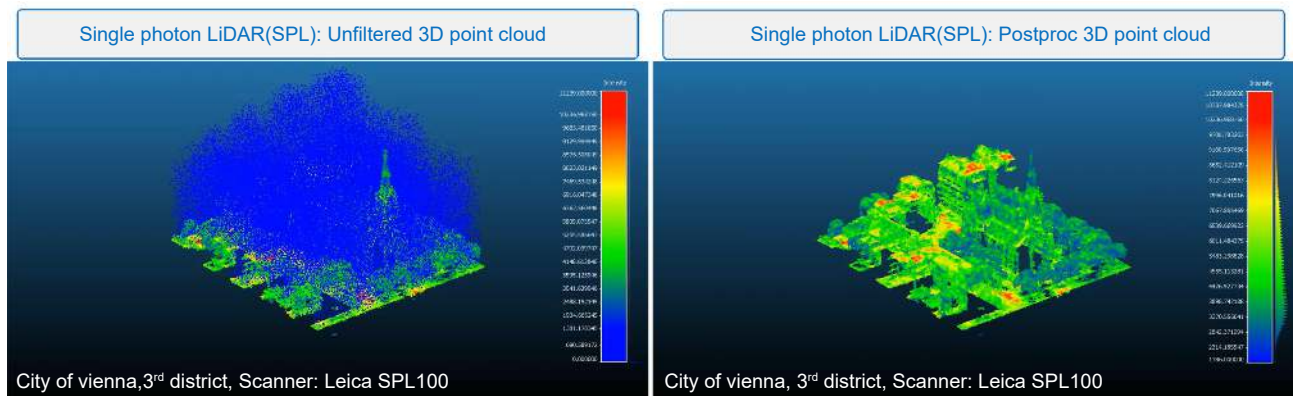


图 7 SPL100 数据处理前后点云去噪效果图

Fig. 7 Point cloud before and after data processing for the SPL100

的 UA (unmixing algorithm) 算法^[59], 其核心在于对噪声和信号光子的分离。基于自然场景的邻域内具有相似反射率的像素, 其深度值也相近的假设, UA 引入了窗口策略和超像元理论: 对单个像素的时间维度执行窗口策略, 若窗口内光子事件数超过阈值则输出窗口作为信号, 否则扩大邻域范围, 将邻域内反射率相近的像素相加后继续执行窗口策略, 直至光子数满足阈值或邻域范围超出设定时停止。将噪声滤除后, 在下述两式的基础上添加惩罚项 (如全变分正则化等), 即可迭代求解目标反射率 $\hat{r}(x,y)$ 和深度信息 $\hat{z}(x,y)$:

$$\hat{r}(x,y) = \max\left(\frac{k(x,y) - N_r B_n}{N_r \eta S}, 0\right), \quad (9)$$

$$\hat{Z}(x,y) = \operatorname{argmax}_{z(x,y) \in [0, z_{\max})} \sum_{l=1}^{k(x,y)} \log s\left[t(x,y)^l - \frac{2z(x,y)}{c}\right], \quad (10)$$

式中: $k(x,y)$ 表示光子事件数, N_r 表示激光照明次数, η 为量子效率, S 为信号光子事件平均数, B_n 为背景光子事件平均数, $s(t)$ 表示激光器脉冲波形。

2019 年, 中国科学院西安光学精密机械研究所 Chen 等人提出了 OPEN3DR (optimized based non-local3D restoration) 算法^[60], 通过拉普拉斯矩阵将非局部相关性引入单光子成像领域, 采用反复的迭代求解, 利用非局部特征实现对场景反射率和三维空间结构的重建。2022 年, 中国科学技术大学徐飞虎团队提出了一种基于啁啾调制单光子激光雷达的成像算

法^[61]。该方法借用邻近像素的数据来增强深度估计, 并采用全变分正则化来抑制深度图上的噪声。实验证明, 相较于传统的 FFT 方法, 该技术将光子利用率提高了 10 倍, 具体效果如图 8 所示。2023 年, 美国威斯康星大学 Lee 等人提出了一种无需训练的主动单光子成像协作处理技术 (collaborative photon processing for active single-photon imaging, CASPI)^[62]。通过协同利用时空光子数据中的局部和非局部相关性, CASPI 技术能够在非常具有挑战性的光照条件下可靠地估计场景信息。

基于建模的方法能够在多种极具挑战性的成像条件下高效地完成重建任务, 但通常需要根据系统和环境条件人为设置超参数, 因而降低了算法鲁棒性。随着深度学习技术快速发展, 神经网络也被研究人员引入单光子三维成像技术中。相比传统方法, 基于深度学习的单光子成像算法通过分析先验知识进而针对性地设计神经网络结构, 展现出了更加优秀的成像效果和更加强健的鲁棒性, 已经成为本领域的研究热点之一。其中, U 型神经网络结构是最具代表性的结构之一^[63], 其通过对数据进行尺度压缩和复原, 可有效提取数据中蕴含的粗粒度语义特征和细粒度边缘特征。2018 年, Lindell 等人首次将神经网络引入单光子成像领域^[64]。该算法利用 U 型结构有效提取了局部空间信息, 验证了深度学习在该领域的可行性, 图 9 展示

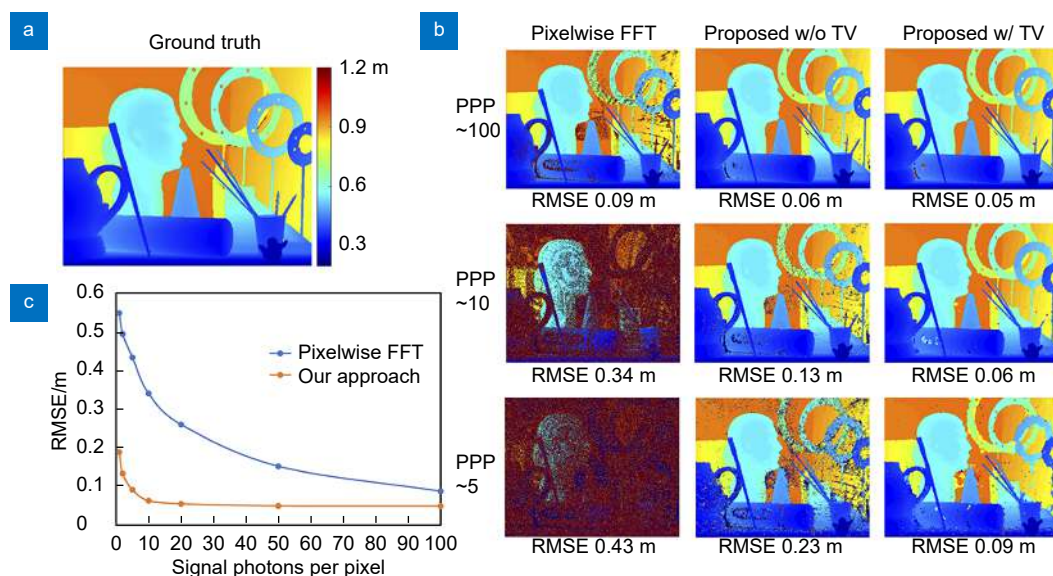
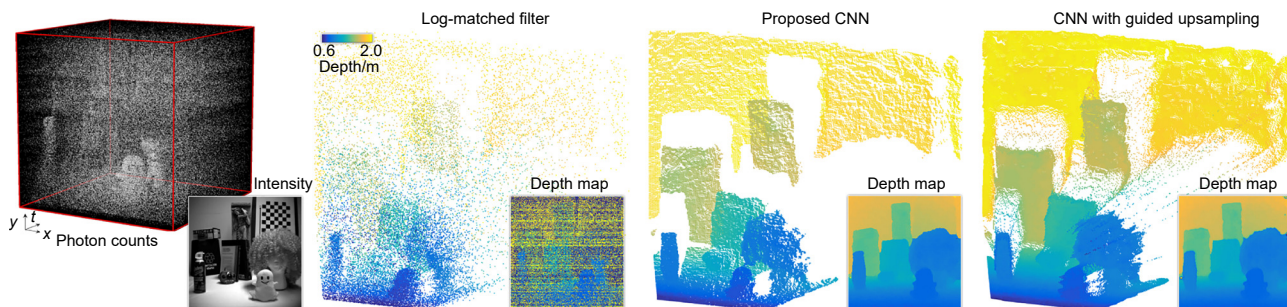


图 8 啁啾调制单光子激光雷达的成像算法效果图^[61]。(a) 目标场景“Art”的精确深度图; (b) 不同条件下不同算法成像效果; (c) 不同方法的光子利用率

Fig. 8 Imaging algorithm effect diagrams of chirp modulated single-photon LiDAR^[61]. (a) Accurate depth map of the target scene “Art”; (b) Performance comparisons of different methods with various conditions; (c) Photon efficiency of different approaches

图9 Lindell 等人提出算法效果图^[64]Fig. 9 Reconstruction results of the method proposed by Lindell et al^[64]

了该方法的具体成像效果。2022年, 南京理工大学 Zhao 等人通过引入注意力机制^[65], 在 UNet 的基础上, 采用 ADAG (attention-directed attention gate) 结构捕获了数据中蕴含的时空相关性。

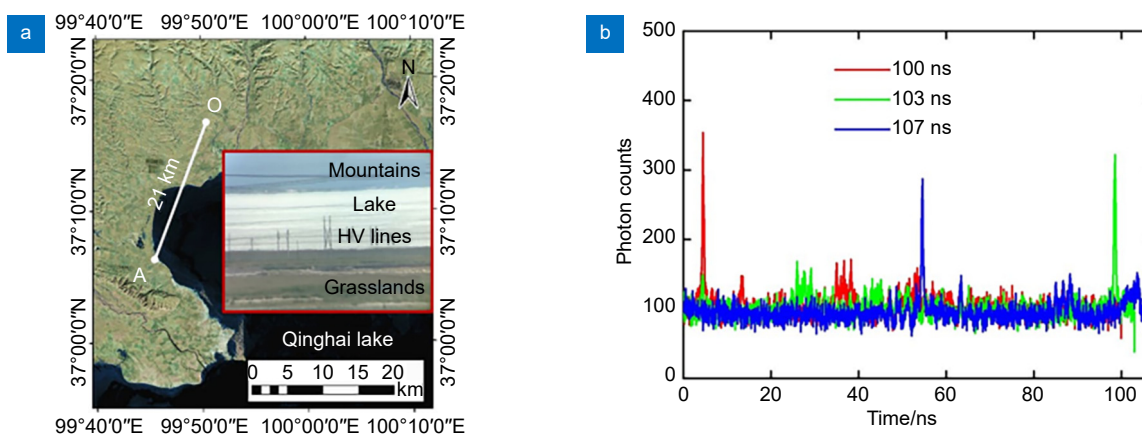
除 U 型结构外, 其他基于神经网络的方法也受到广泛关注。2020年, 中国科学技术大学 Peng 等人基于数据中的非局部相关性, 设计了一种全新的神经网络, 并通过膨胀卷积来替代 U 型结构提取语义特征^[66]。实验证明, 该方法可在平均回波光子数为 1、信噪比为 0.01 的极端条件下恢复目标三维信息。2022年, 浙江理工大学 Yang 等人提出了一种非局部稀疏注意力 (non-local sparse attention, NLSA) 编码器神经网络来提取三维信息^[67], 该网络模型能够以每帧 0.014 s 的处理速度实时重建场景。目前, 基于深度学习的算法虽然显著提高了成像精度, 但其同样面临着困难与挑战, 例如大规模数据集收集和仿真困难、所需计算资源较多、难以低成本部署等问题。此外, 卷积操作还引入了过多的平滑性, 使算法对边缘信息

的保留有所欠缺。

3.3 单光子激光雷达系统及应用

3.3.1 远距离目标探测

单光子激光雷达高灵敏度、高分辨率等特点使其在远距离探测领域具有独特优势。2012年, 西南技术物理研究所方照勋对基于 Gm-APD 探测器的啁啾调制激光雷达的原理进行了分析, 并通过仿真实验, 采用发射功率为 6.4 W 的调制信号对 2 km 处目标进行探测^[68]。2017年, 赫瑞瓦特大学 Pawlikowska 等人利用单点 InGaAs/InP SPAD 探测器和 1550 nm 光纤激光器, 在光源平均功率仅为 10 mW 的条件下, 将单光子探测距离拓展到 10 km 以上^[69]。2018年, 华东师范大学吴光课题组利用重复频率互为质数 (100 ns, 103 ns, 107 ns) 的激光脉冲, 将系统最大非模糊距离提升到 165 km^[70]。在 TCSPC 时间分辨率为 64 ps, 系统总体时间抖动约为 224 ps 的条件下实现了青海湖 21 km 测距的实验验证, 效果如图 10 所示。

图 10 21 km 远距离单光子探测成像结果^[70]。(a) 成像目标照片与其在地图中的位置;

(b) 所采集回波光子直方图

Fig. 10 Results of single photon for long-distance detection at 21 km^[70]. (a) Photograph of targets and its location in the map; (b) Histogram of return photons from the target

2020年, 中国科学技术大学徐飞虎团队提出了一种突破光学瑞利分辨的亚像素扫描超分辨单光子探测系统^[71], 利用 1550 nm 波长的光源, 在光子数量极低的情况下 (每像素约 1~6 个光子), 通过精细的亚像素扫描和 3D 卷积算法, 将原有系统分辨率提升了 2 倍, 在 8.2 km 的距离上实现了空间分辨率约为 5.5 cm 的新成像系统。2021 年, 该团队又提出了一种紧凑型同轴单光子激光雷达系统^[11], 具体成像系统和成像效果如图 11 所示。该单光子激光雷达通过离子束沉积技术, 将镜头对 1550 nm 激光的透射率提高至 95%, 并使用额外的高消光比声光调制器实现系统在发射模式和检测模式之间的快速切换, 使得噪声光子计数的总数达到 0.4 kHz 左右, 减少了约 50 倍。最终, 该系统在每像素的信号光子低至 0.44 的条件下, 实现了对 201.5 km 处目标的三维成像。

表 3 总结了单光子激光雷达在远距离探测中的代

表性成果及其系统参数。从中可以看出, 由于 SPAD 探测器对微弱光学信号的出色响应能力, 使用 mW 级功率的激光器即可实现超远距离探测。得益于 1550 nm 激光的穿透性较好、能量较高且探测器响应能力较强, 该波段已成为地面远距离探测的常见选择。整体而言, 单光子激光雷达具备超远距离探测能力, 而进一步提升探测距离则依赖于使用更高功率的光源、更灵敏的探测器和更高效的信号处理算法以提高设备的信噪比; 此外, 衍射极限也制约着单光子激光雷达的空间分辨率^[72-73]。设计更合理的激光雷达系统和更鲁棒的成像算法, 是单光子激光雷达在该领域的未来发展方向。

3.3.2 复杂场景探感成像

在实际应用中, 对场景的探测感知成像任务通常会受到复杂环境的干扰, 例如水下环境和雨、浓雾、烟尘等恶劣天气会显著降低单光子激光雷达的成像质

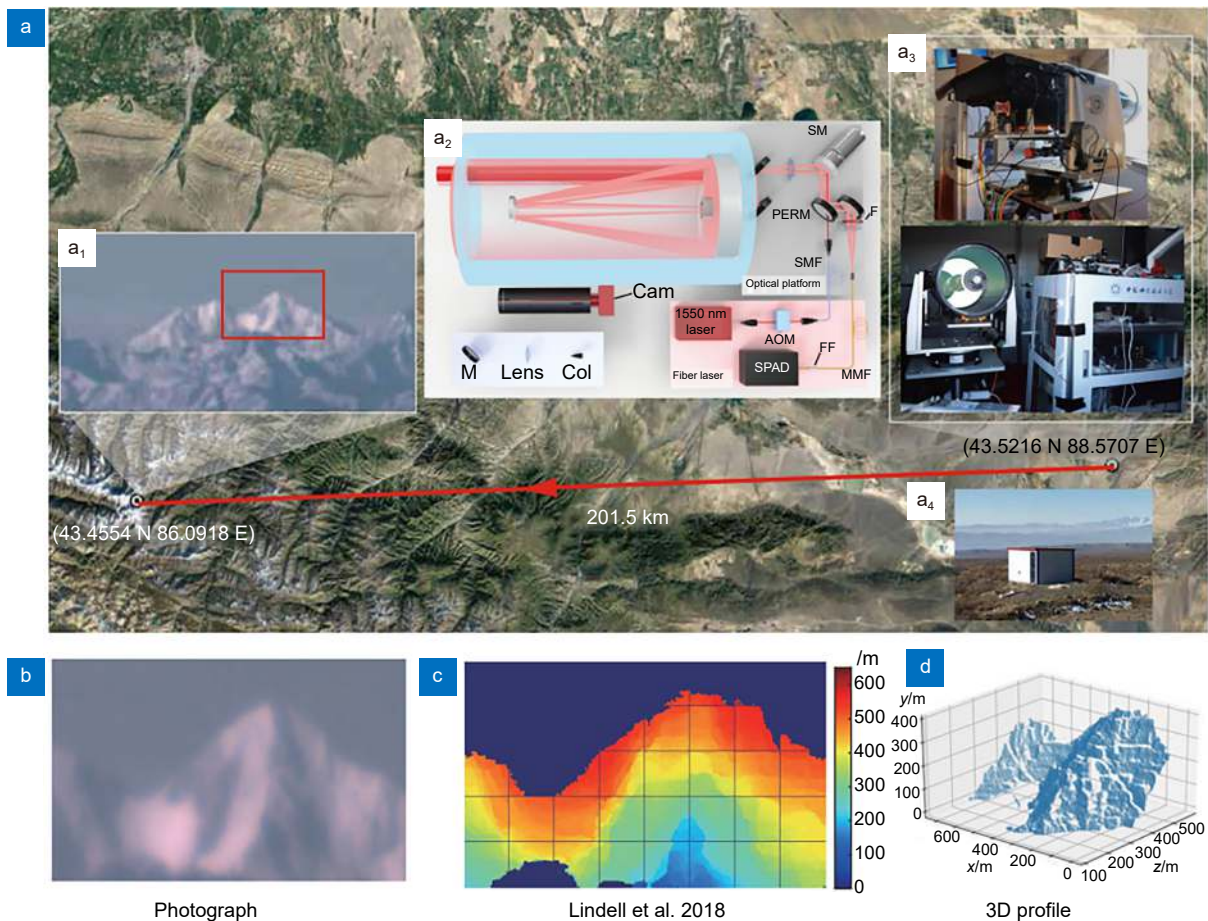


图 11 201.5 km 远距离单光子探测成像系统及成像结果^[11]。(a) 201.5 km 远距离单光子探测成像系统; (b) 目标图片; (c) Lindell 所提算法效果; (d) 三维重构轮廓

Fig. 11 Imaging system and results of single photon for long-distance detection at 201.5 km^[11]. (a) Imaging system for long-distance detection at 201.5 km; (b) Photograph of the target; (c) Results of the algorithm proposed by Lindell; (d) Reconstructed 3D profile

表 3 SPAD 激光雷达在远距离探测的最新进展和重要参数
Table 3 Recent progress and important parameters of SPAD LiDAR in long-range detection

Reference	Year	System	Distance /km	Wavelength/nm	Power/mW	Array	Mode	FOV/ μ rad	PDE/%	Aperture /mm
[74]	2013	Pulse accumulation	4.5	1550	<0.6	64 × 64	flash	3800	26	-
[75]	2014	Random coding	1.77	1550	63800 (peak)	-	-	-	-	50
[69]	2017	Pulse accumulation	10.5	1550	10	-	scan	28	~30	210
[76]	2017	Pulse accumulation	2.5	532	3	100*1	scan	24750	~36.8	95
[70]	2018	Pulse accumulation	21	1550	0.5	-	scan	80	~3.58	130
[71]	2020	Pulse accumulation	8.2	1550	120	128 × 128	scan	22.3	35	279
[73]	2020	Pulse accumulation	45	1550	120	1*1	scan	22.3	15	-
[11]	2021	Pulse accumulation	201.5	1550	600	1*1	scan	11.2	19.3	280
[77]	2023	Pulse accumulation	13.8	1550	300	-	scan	-	-	-

量；此外，针对半透明遮挡物或网状干扰物，如何以较少光子数高效地重建各层目标物，也成为单光子探测技术亟待解决的问题。目前解决此类问题的普遍策略是结合计算成像理论，合理地建模与分析场景特征，并对成像系统及算法进行独立改良或联合优化设计。而兼顾成像效果与实时性需求，同样为系统和算法的设计带来了额外的挑战。

水对光的强衰减作用使激光穿过水介质后的回波信号变得极为微弱，单光子激光雷达则为此问题提供了一种新的解决方案。由于水下探测时，特殊的后向散射噪声带来的背景噪声变化对探测精度影响显著，因此建立一个能够准确描述信号强度变化的 SPAD 水下探测概率模型，是推动该技术走向大规模应用的关键之一。2015 年，英国赫瑞瓦特大学 Maccarone 等人将单光子激光雷达应用于水下探测^[7]。2019 年，该团队基于 192×128 的 SPAD 阵列，采用 670 nm 波长

的皮秒级脉冲光源，在平均功率 0.4 mW(清水)~8 mW(浊水)的条件下，实现 6.7 个衰减长度的水下动态静态目标成像^[78]，其系统结构如图 12 所示。2020 年，中国科学院光电技术研究所刘博团队提出了一种矫正水下测距漂移误差 (range walk error, RWE) 的方法^[79]。该方法可以区分来自水下的信号光子和噪声光子，并基于先验模型来补偿 RWE，从而提高光子计数激光雷达的水下三维成像质量。2023 年，英国赫瑞瓦特大学 Maccarone 等人又基于 SPAD 阵列设计了一种基于单光子检测技术的全浸入式水下探测系统^[80]，其能够在浑浊条件下实现大约 3 m 的水下目标三维轮廓获取和重建，帧率可达 10 FPS。

对于恶劣天气下的重建任务，2019 年，英国赫瑞瓦特大学 Tobin 等人基于 InGaAs/InP SPAD 探测器，实现了乙二醇蒸汽、水雾、化学烟雾等多种复杂介质下最远 24 m 三维目标成像，配合图像重建算法达到

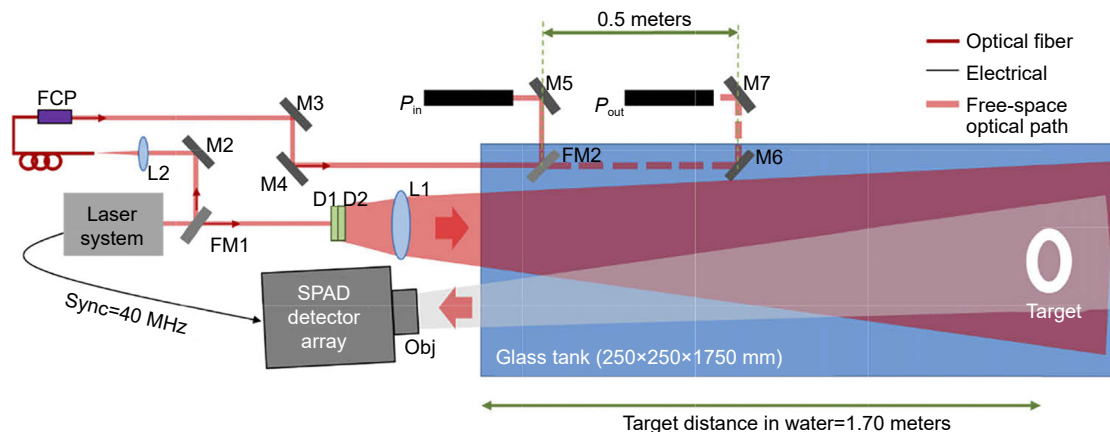


图 12 水下单光子探测系统示例^[78]
Fig. 12 A single photon system for underwater detection^[78]

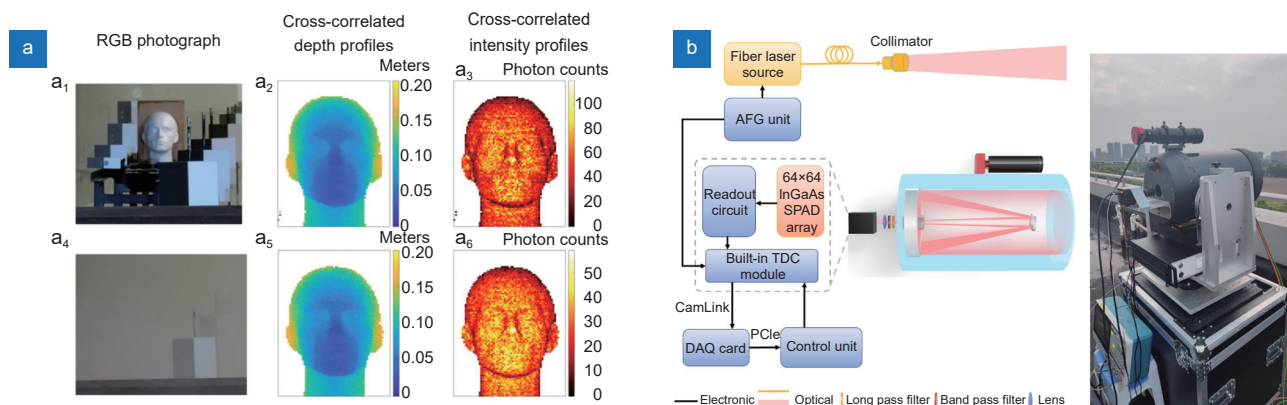


图 13 (a) 浓雾环境下成像对比结果^[81]; (b) 64×64 InGaAs SPAD 单光子成像系统与成像装置^[84]

Fig. 13 (a) Comparison of imaging results with smog^[81]; (b) The single photon imaging system with 64×64 InGaAs SPAD detectors^[84]

了良好的成像效果^[81], 图 13(a) 展示了浓雾环境下成像对比。2022 年, 华东师范大学吴光团队研制了一种贝塞尔光束单光子激光雷达系统^[82]。实验证明在透过率为 0.023 的浓雾中, 该系统仍能实现高质量成像, 为恶劣天气下的自动驾驶应用提供了解决方案。2023 年, 该团队又提出了一种非衍射脉冲贝塞尔光束的 3D 光学成像系统^[83], 克服了传统成像系统因衍射和噪声导致的扩散和失真, 为单光子激光雷达在遮挡探测领域的应用提供了新的解决方案。同年, 徐飞虎团队基于 64×64 像素的 InGaAs SPAD 探测器阵列与 1550 nm 波长的光纤激光器, 在相当于 4.92 个衰减长度的浓雾中, 重建出 13.4 km 处目标的深度像与强度像^[84], 其成像系统和成像装置如图 13(b) 所示。

对于半透明遮挡物, 2020 年, 南京理工大学陈钱课题组提出了一种基于伪随机扩频单光子探测系统的快速成像技术, 能够准确恢复单个像素的多深度信息^[85]。实验证明其成像技术相比传统的 Richardson-

Lucy 方法有显著改进, 成功地将距离分辨率从 15 cm 提高到 6 cm, 突破了半高全宽的限制。面向单光子阵列探测系统, 2017 年, 英国赫瑞瓦特大学的 Halimi 等人针对伪装目标三维重建提出了 L21+TV 算法^[86], 该算法考虑数据的泊松统计特性, 利用已有先验知识和像素间的空间相关性, 引入全变分正则化等约束条件, 实现了多层目标的遮挡探测。2023 年, 中国科学院微电子研究所朱精果团队提出了一种基于深度学习的多层目标成像算法 PCE-Net^[87], 通过迭代式网络结构设计和对像素与通道特征进行捕捉, 成功实现了多层目标准确重建, 算法效果如图 14 所示。

3.3.3 星载/机载遥感测绘

基于星载和机载的遥感测绘是单光子激光雷达的重要应用方向。星载单光子激光雷达主要用于地形测绘、冰川和冰盖检测以及森林植被检测等。星载应用面临探测距离远和光学信号衰减问题, 而单光子成像系统对光子的高利用率契合了星载应用需求。通常,

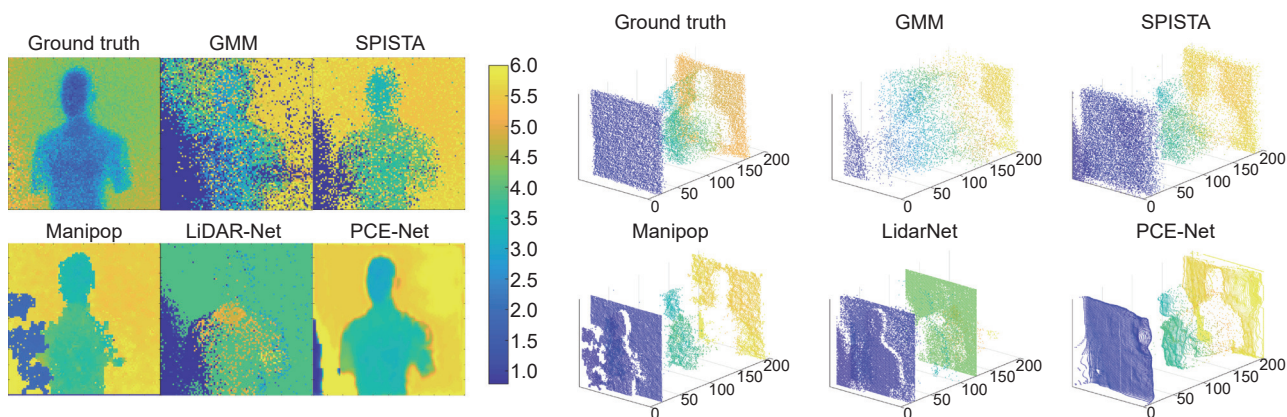


图 14 PCE-Net 重建效果图^[87]

Fig. 14 The reconstruction results of the PCE-Net^[87]

在光源方面, 星载单光子激光雷达选用对水汽和云层穿透力好、功率高的 532 nm 激光器搭建扫描式探测系统; 在器件方面, 其更多选用高性能的 PMT 探测器单元, 以兼顾体积、功耗和探测灵敏度^[88]。2018 年, 美国国家航空航天局 (NASA) 发射的 ICESat-2 卫星搭载了单光子激光雷达系统 ATLAS, 其系统结构与探测效果如图 15 所示^[89]。该系统的激光重频为 10 kHz, 单次输出脉冲能量为 400 μJ , 其搭载的 532 nm 激光器表现出优异的水体穿透能力, 在南海区域, 该系统能穿透至水下 30 m 深, 探测误差低于 1 m。此外, NASA 还将激光雷达地形测绘 (LiDAR surface topography, LIST) 计划列为下一代对地探测系统的重点任务。2011 年, LIST 通过机载飞行验证, 证实了 SPAD 作为单光子探测器应用于该领域的可行性^[90]。

在国内, 华东师范大学吴光课题组针对星载单光子激光雷达开展了一系列研究工作。2016 年, 该课题组提出了一种基于 Si SPAD 的日盲紫外单光子检测系统, 该系统实现了 4.62%@280 nm 的光子探测效率^[91]。2017 年, 该课题组研究了基于多波束的单光子三维成像系统^[76]。该系统将光束分为 100 份, 并由具有 100 个独立通道的硅基 APD 接收, 为高速、高分辨率、低能耗的推扫式机载或星载激光高度计提供了解决方案。

目前, 虽然星载单光子系统具备较强的探测能力, 但极低的回波光子数使得平衡 PDE 与 DCR 成为了系统设计的关键问题之一, 有待国内外研究团队开展进一步工作。

机载单光子激光雷达作为遥感领域的重要成像技

术之一, 在地形测绘和遮蔽目标探测等领域已有较为成熟的产品和应用。与星载系统类似, 机载单光子成像系统通过大功率可见光波段激光器获得更高的回波能量, 从而实现对植被和云雾等目标更强的穿透能力。2002 年, NASA 旗下的 Sigma Space 开发了新型机载激光雷达系统 MMLA (multi-kiloherz micro-laser altimeter)^[92]。MMLA 能够捕捉目标反射的单个光子并测量其高度, 实现了光子计数技术在地球观测领域的应用。2005 年, 在美国国防部高级研究计划局的支持下, 美国麻省理工学院林肯实验室设计了 Jigsaw 系列机载激光雷达^[93]。在 450 m 的机载实验中, Jigsaw 系统成功实现了对地面树木下的车辆和建筑的三维成像, 展示了机载单光子探测技术在隐蔽目标成像方面的有效性和应用潜力。2011 年, 林肯实验室又基于 128 \times 32 的 InGaAs SPAD 阵列开发了一种机载单光子三维成像试验平台并在 3 km 高空对科罗拉多大峡谷进行了扫描成像, 分辨率可达 10 cm, 扫描速度达到了 2000 km^2/h ^[94]。2016 年, Sigma Space 又研制了一套新的高分辨率量子激光雷达系统 HRQLS (high resolution quantum LiDAR system)^[95], 该系统能够有效探测 13 m 深的海底地形, 测深精度为 3 cm。随着技术发展, 基于光子计数探测技术的激光雷达逐步实现商业化。Leica 于 2017 年推出了基于 532 nm 激光器、适用于中空作业的 SPL100 单光子激光雷达^[57], 系统外观及其获得的完整地物信息如图 16 所示。2016 年, 中国科学院朱精果等人设计了基于 SiPM 探测器的机载激光雷达 Mars-LiDAR 系统^[96], 利用误差传播定律分别对该系统在 3000 m 和 4000 m

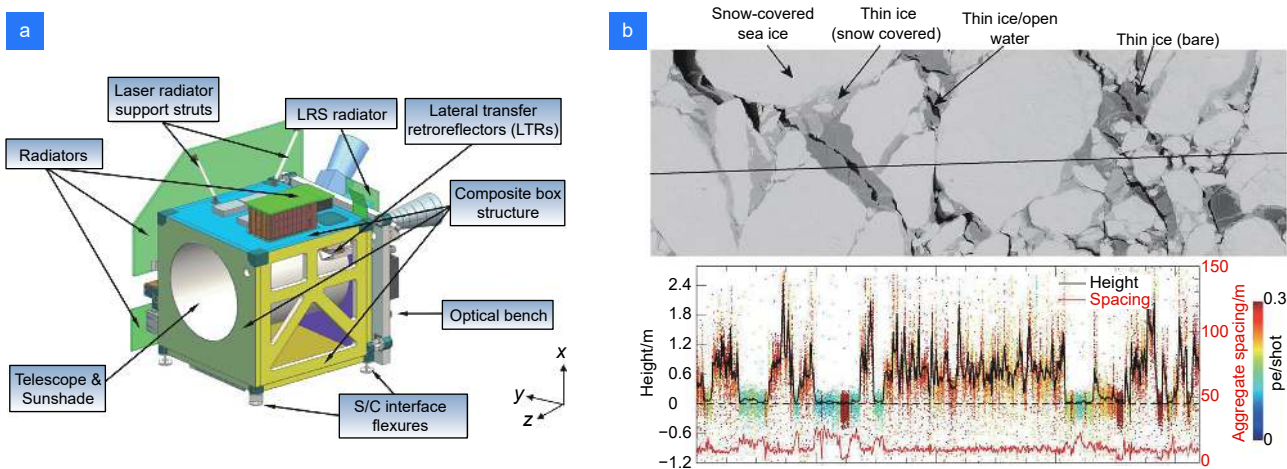


图 15 ATLAS 系统结构与冰盖高度测量^[89]。(a) ATLAS 系统结构; (b) 冰盖高度测量结果

Fig. 15 ATLAS system architecture and results for glacier height measurement by ATLAS^[89]. (a) ATLAS system architecture; (b) Results for glacier height measurement by ATLAS



图 16 徕卡 SPL100 与获取的地物信息^[57]。(a) 徕卡 SPL100 系统; (b) SPL100 重建结果

Fig. 16 The Leica SPL100 system and terrain features acquired by the SPL100^[57].
(a) The Leica SPL100 system; (b) Results reconstructed by the SPL100

飞行高度获得的点云进行了定位精度分析和校正, 验证了 Mars-LiDAR 系统安置角误差检校方法的实用性。2018 年, 中国科学技术大学张军团团队基于多模光纤耦合技术和 InGaAs/InP SPAD, 提出了一种工作在 1.5 μm 波段的紧凑轻便 (仅 15 kg) 的机载单光子激光雷达系统^[97]。该激光雷达系统具有透过云层探测 12 km 外目标的能力, 激光器平均功率 300 mW, 空间分辨率为 15 m。

3.3.4 智能驾驶导航避障

受自动驾驶、人工智能技术的驱动, 车载激光雷达同样是当前单光子激光雷达领域的研究热点。由于对人眼更安全, 850 nm、905 nm 与 940 nm 成为其代表性光源波段。同时, SPAD 探测器规模的扩大和性能的提升也推动着车载激光雷达的扫描方式不断向闪光成像发展。表 4 展示了近年来部分商业公司所推出的车载单光子激光雷达产品。以一径科技为例, 其于 2023 年发布的 SPAD 车载激光雷达 ZVISION EZ6,

垂直扫描线数提升至 192 线, 具体性能参数与成像效果如图 17(a) 所示。目前, 车载单光子激光雷达已能够在较低功率条件下, 实现三维目标实时成像。根据视场角与探测距离, 其通常被用作补盲激光雷达或主激光雷达。总体而言, 鉴于 SPAD 易于集成的特点, 单光子激光雷达已被视为下一代车载激光雷达方案之一。

3.3.5 消费电子 3D 感知

除了车载应用, 易于集成的探测器件同样使 SPAD 激光雷达在消费电子领域得到广泛应用。苹果公司于 2020 年将 SPAD 激光雷达作为 3D 图像传感器引入智能手机和平板电脑产品。以 iPad Pro 为例, 其搭载的单光子激光雷达采用 SPAD 探测器阵列与 VCSEL 光源的组合设计, 分辨率为 3 万像素, 像素尺寸为 10 μm, 测量范围最远可达 5 m, 图 17(b) 展示了 iPhone12 Pro 中单光子激光雷达的三维成像效果。2023 年, 面向消费领域, 意法半导体发布基于

表 4 部分公司单光子激光雷达产品

Table 4 Single-photon LiDAR products of partial companies

Company	Year	Product	FOV	Distance/m	Power/W	Frame
Ouster	2020	ES2	26°(H) × 13°(V)	200	12~18	10~30
Ouster	2020	OS2	360°(H) × 22.5°(V)	200	18~24	20
南京芯视界	2020	VI4330	73°(H) × 58°(V)	15	-	30
IBEO	2021	Ibeonext	11.2°(H) × 5.6°(V)	140	-	-
Sense Photonics	2021	MultiRange™	-	200	-	-
亮道智能	2022	LDSatellite	120°(H) × 75°(V)	30	<10	10~25
速腾聚创	2022	RS-LiDAR-E1	120°(H) × 90°(V)	30	-	10~30
禾赛科技	2023	ET25	120°(H) × 25°(V)	250	12	10/20
SolidVue	2023	ES	-	200	-	-
一径科技	2023	ZVISION EZ6	120°(H) × 20°(V)	180	<15	-
华为	2023	-	-	250	-	20
灵明光子	2023	ADS6311 ToF	120°(H) × 90°(V)	30	3	20

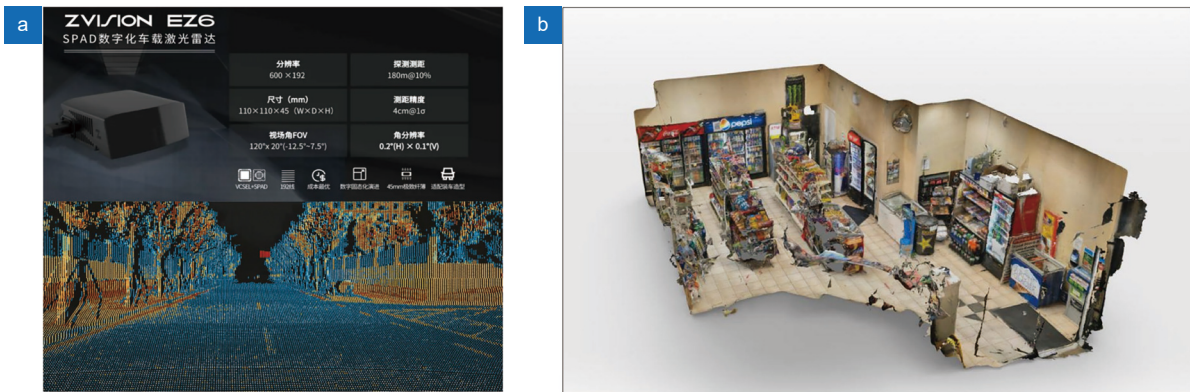


图 17 (a) ZVISION EZ6 的性能参数及点云效果; (b) iPhone12 Pro 三维成像效果图

Fig. 17 (a) Performance metrics and imaging results of ZVISION EZ6; (b) The result of 3D imaging by iPhone 12 Pro

940 nm 垂直腔面发射激光器 (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 的 8×8 多区域 SPAD 测距传感器 VL53L8CX。该传感器具有 65° 对角线视场, 最远探测距离可达 400 cm, 帧率可达 60 Hz。同年, 索尼报道了 IMX611 距离传感器。该传感器像素规模为 140×170 (约 2.3 万像素), 在 940 nm 波长的激光光源下, 光子探测效率可达 28%, 具有出色的光子探测性能。依托大面阵 SPAD 阵列与 905 nm 或 940 nm 的垂直腔面激光发射器的单光子激光雷达, 有望成为未来消费电子领域常见的 3D 深度传感器。

4 单光子激光雷达发展趋势

作为一种新兴的三维成像技术, 尽管单光子激光雷达在多个领域得到快速发展, 但仍面临诸多挑战。在高背景光环境中, 由于堆积效应导致信号光子被大量噪声光子淹没, 因此设计能够适应不同环境条件的光学接收系统或探测器件, 成为单光子探测技术亟待解决的重要课题。此外, 与传统探测器线性输出信号不同, 构建一个基于 SPAD 探测器随机特性并能够准确描述应用场景的数学模型, 也成为难点之一。同时, 考虑到算法设计的灵活性和系统开发成本, 在有限的计算资源下实现准确的实时成像, 对单光子激光雷达的体制设计和处理算法提出了新的要求。在系统分析单光子探测技术目前发展态势的基础上, 本节从探测器件、成像算法、系统集成和应用领域四个方面对单光子激光雷达的未来发展做出展望:

1) 与 CMOS 工艺良好兼容的 SPAD 探测器随着设计和工艺水平的提升快速发展。

在探测器性能提升方面, 在 Si 衬底上直接生长 InGaAs 外延层并实现二者集成发展, 有助于解决晶

格失配、热膨胀系数差异等问题, 已成为当前研究热点^[48]。同时, 为了拓展探测器响应波段至近红外区域, 持续优化器件工艺参数和探索新结构、新材料成为 Si SPAD 与 InGaAs/InP SPAD 的共同发展趋势^[98]。而在阵列探测器制造领域, 有效抑制光学串扰, 尤其是来自间接光路的串扰, 对提升阵列性能至关重要, 采用隔离槽和在衬底底部增加吸收层都是可能的方向^[99-100]。展望未来, 我们有望见证 SPAD 探测器在像素阵列规模 (达百万级)、探测灵敏度、降低暗计数及功耗等方面取得显著进展^[39-40]。

2) 单光子成像算法作为影响系统性能的关键因素, 其迭代与系统的发展相辅相成。

一方面, SPAD 成像系统凭借其固有的二维成像能力, 能够利用测量数据中的强度信息辅助重建三维距离像^[101]; 另一方面, 时空相关成像算法已从传统的脉冲累积方案拓展到编码调制和啁啾调制技术^[61]。同时, 单光子成像算法正逐步与硬件设计实现更深层次的融合。在基础融合层面, 探测器芯片将增加部分处理计算功能, 例如, 针对脉冲累积的多帧叠加计时直方图数据减薄算法等^[102]; 在更高级的融合层面, 基于脉冲神经网络的高层次感算一体芯片将实现单光子信息的获取、表达、处理和传输的全流程一体化, 有效应对片上存储成本、处理延迟和功耗等挑战^[103]。此外, 直接从单光子数据中实现目标检测等下游应用的高效算法正受到重视^[104]。随着计算光学成像技术的发展, 单光子成像算法与成像系统设计的整合日益紧密, 如何从系统角度设计高性能算法和从算法角度优化系统设计, 将成为未来研究的重点。

3) 依托探测器、算法与制造工艺的进步, 单光子激光雷达向着智能化、模块化和集成化迅速发展。

从光学收发系统出发, 以多波束光学设计为代表的优化方案显著提高了系统并行度, 精简了系统扫描结构; 同时微透镜阵列的引入, 也进一步促进系统向小型化发展。从计算处理单元出发, 健壮的成像算法增强了系统在不同条件下的可靠性, 推动了信号处理电路与探测器件由传统的分立式结构走向模组化。目前, 索尼、意法半导体等商业公司均推出了感算一体的单光子成像模组。而在系统层面, 随着垂直腔面激光发射器 (VCSEL) 等光源集成难度和成本的降低, 以苹果公司为代表, 集成了激光器、光学收发系统、探测器和信号处理电路的片上单光子激光雷达也成为消费级单光子深度传感器的发展趋势之一。

4) 作为应用驱动型技术, 单光子激光雷达的应用会在更多领域得到快速拓展。

特别是在测绘遥感领域, 机载和星载单光子激光雷达系统正成为必要探测手段之一。单光子探测系统对超远距离目标和水下目标的成像能力, 使其从对冰川、地面和植被高度的感知逐步发展到对水体、海底表面的探测^[105]。此外, 单光子激光雷达凭借其集成度高和性能卓越的优势被广泛应用于智能驾驶领域。同时, 其功耗低、体积小、无机械结构和集成度高的特点, 使其成为手持消费电子领域的 3D 传感器新方案, 为消费者带来全新的三维成像体验。在目标侦察方面, 单光子激光雷达被各国军方和安全机构视为有效的非视域成像手段^[106]。

5 结束语

单光子激光雷达技术的发展显著降低了对高功率激光光源和大口径接收光学系统的依赖, 其高灵敏度探测能力突破了传统激光雷达在探测距离、精度和系统尺寸等方面的局限, 带来了全新的解决方案和系统应用。本文梳理了基于 SPAD 的单光子激光雷达的基本技术方案以及不同类型探测器的特性和研究进展, 并展望了其产品化、产业化发展前景。与传统激光雷达相比, 单光子激光雷达凭借其高灵敏度、低时间抖动、低功耗等特性, 在智能驾驶导航避障和遥感测绘等领域取得了显著进展, 尤其对于远距离目标探测、复杂场景探感成像、消费电子 3D 成像等领域, 单光子成像技术表现出卓越探测能力。综上所述, 相信随着技术研究和产品开发的持续深入, 单光子激光雷达将在学术研究和商业应用中展现出更大的潜力和价值。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Andersson P. Long-range three-dimensional imaging using range-gated laser radar images[J]. *Opt Eng*, 2006, **45**(3): 034301.
- [2] 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.
- [3] Chen J G, Ni X X, Yuan B, et al. Analysis of detection probability performance of SiPM LiDAR under sunlight[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(10): 210196. 陈建光, 倪旭翔, 袁波, 等. SiPM激光雷达阳光下探测概率性能分析[J]. *光电工程*, 2021, **48**(10): 210196.
- [4] Becker W. *Advanced time-correlated single photon counting techniques*[M]. Qu J L, trans. Beijing: Science Press, 2009. Becker W. 高级时间相关单光子计数技术[M]. 屈军乐, 译. 北京: 科学出版社, 2009.
- [5] Kirmani A, Venkatraman D, Shin D, et al. First-photon imaging[J]. *Science*, 2014, **343**(6166): 58–61.
- [6] O'Toole M, Lindell D B, Wetzstein G. Confocal non-line-of-sight imaging based on the light-cone transform[J]. *Nature*, 2018, **555**(7696): 338–341.
- [7] Maccarone A, McCarthy A, Ren X M, et al. Underwater depth imaging using time-correlated single-photon counting[J]. *Opt Express*, 2015, **23**(26): 33911–33926.
- [8] Niclass C, Gersbach M, Henderson R, et al. A single photon avalanche diode implemented in 130-nm CMOS technology[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2007, **13**(4): 863–869.
- [9] Zhang H Y, Zhao X Y, Zhang Y C, et al. Review of advances in single-photon LiDAR[J]. *Chin J Lasers*, 2022, **49**(19): 1910003. 张汉熠, 赵新宇, 张益成, 等. 单光子激光雷达研究进展[J]. *中国激光*, 2022, **49**(19): 1910003.
- [10] Goodman J W. *Statistical optics*[M]. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [11] Li Z P, Ye J T, Huang X, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. *Optica*, 2021, **8**(3): 344–349.
- [12] Marino R M, Spitzberg R M, Bohrer M J. A photon counting 3-D imaging laser radar for advanced discriminating interceptor seekers[C]//*Annual Interceptor Technology Conference*, 1993: 2644. <https://doi.org/10.2514/6.1993-2644>.
- [13] Massa J S, Wallace A M, Buller G S, et al. Laser depth measurement based on time-correlated single-photon counting[J]. *Opt Lett*, 1997, **22**(8): 543–545.
- [14] McCarthy A, Collins R J, Krichel N J, et al. Long-range time-of-flight scanning sensor based on high-speed time-correlated single-photon counting[J]. *Appl Opt*, 2009, **48**(32): 6241–6251.
- [15] Shu R, Huang G H, Hou L B, et al. Multi-channel photon counting three-dimensional imaging laser radar system using fiber array coupled Geiger-mode avalanche photodiode[J]. *Proc SPIE*, 2012, **8542**: 85420C.
- [16] Krichel N J, McCarthy A, Buller G S. Resolving range ambiguity in a photon counting depth imager operating at kilometer distances[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(9): 9192–9206.
- [17] Hiskett P A, Parry C S, McCarthy A, et al. A photon-counting time-of-flight ranging technique developed for the avoidance of range ambiguity at gigahertz clock rates[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(18): 13685–13698.
- [18] Liu B, Jiang S, Yu Y, et al. Macro/sub-pulse coded photon

- counting LiDAR[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(10): 200265. 刘博, 姜朔, 于洋, 等. 宏/子脉冲编码光子计数激光雷达[J]. *光电工程*, 2020, **47**(10): 200265.
- [19] Hu Z H, Jiang C H, Zhu J G, et al. Chaos single photon LiDAR and the ranging performance analysis based on Monte Carlo simulation[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(23): 41658–41670.
- [20] Hu Z H, Zhu J G, Jiang C H, et al. Improving the ranging performance of chaos LiDAR[J]. *Appl Opt*, 2023, **62**(14): 3598–3605.
- [21] Hu Z H, Jiang C H, Zhu J G, et al. Efficient and robust chaos single photon LiDAR[J]. *Opt Laser Technol*, 2024, **174**: 110623.
- [22] Luu J X, Jiang L A. Coherent photon counting lidar[C]//*Optical Amplifiers and Their Applications/Coherent Optical Technologies and Applications*, 2006: CWB5. <https://doi.org/10.1364/COTA.2006.CWB5>.
- [23] Redman B C, Stann B L. Photon counting chirped amplitude modulation lidar[R]. Affiliation: Army Research Laboratory, 2008.
- [24] Chen X S, He J L, Li Q, et al. Research progress of mid-infrared avalanche photodiode detectors[J]. *Infrared Technol*, 2018, **40**(9): 825–836. 陈效双, 何家乐, 李庆, 等. 中红外波段雪崩光子探测器研究进展[J]. *红外技术*, 2018, **40**(9): 825–836.
- [25] You L X. Status and prospect of superconducting nanowire single photon detection[J]. *Infrared Laser Eng*, 2018, **47**(12): 1202001. 尤立星. 超导纳米线单光子探测现状与展望[J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(12): 1202001.
- [26] Huo X P, Yang D Z, Yu S L, et al. Research on status and development of single photon detector[J]. *Laser Infrared*, 2023, **53**(1): 3–11. 霍晓培, 杨德振, 喻松林, 等. 单光子探测器研究现状与发展[J]. *激光与红外*, 2023, **53**(1): 3–11.
- [27] Cheng B T, Dai Q, Xie X M, et al. Research progress of single-photon detectors[J]. *Laser Technol*, 2022, **46**(5): 601–609. 程碑彤, 代千, 谢修敏, 等. 单光子探测器的研究进展[J]. *激光技术*, 2022, **46**(5): 601–609.
- [28] Veerappan C, Charbon E. A substrate isolated CMOS SPAD enabling wide spectral response and low electrical crosstalk[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2014, **20**(6): 299–305.
- [29] Shin D, Park B, Chae Y, et al. The effect of a deep virtual guard ring on the device characteristics of silicon single photon avalanche diodes[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2019, **66**(7): 2986–2991.
- [30] Lee M J, Ximenes A R, Padmanabhan P, et al. High-performance back-illuminated three-dimensional stacked single-photon avalanche diode implemented in 45-nm CMOS technology[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2018, **24**(6): 3801809.
- [31] Vines P, Kuzmenko K, Kirdoda J, et al. High performance planar germanium-on-silicon single-photon avalanche diode detectors[J]. *Nat Commun*, 2019, **10**: 1086.
- [32] Bai P, Zhang Y H, Shen W Z. Infrared single photon detector based on optical up-converter at 1550 nm[J]. *Sci Rep*, 2017, **7**: 15341.
- [33] Hu Z H. Research on key technologies of single-photon detection based on random coding[D]. Beijing: Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, 2023. 胡志宏. 基于随机编码的单光子探测关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院微电子研究所, 2023.
- [34] Acerbi F, Gundacker S. Understanding and simulating SiPMs[J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res A Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2019, **926**: 16–35.
- [35] Song H Z. Avalanche photodiode focal plane arrays and their application to laser detection and ranging[M]//Chee K. *Advances in Photodetectors-Research and Applications*. London: IntechOpen, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81294>.
- [36] Morimoto K, Ardelean A, Wu M L, et al. Megapixel time-gated SPAD image sensor for 2D and 3D imaging applications[J]. *Optica*, 2020, **7**(4): 346–354.
- [37] Morimoto K, Iwata J, Shinohara M, et al. 3.2 Megapixel 3D-stacked charge focusing SPAD for low-light imaging and depth sensing[C]//*2021 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 2021: 20.2. 1–20.2. 4. <https://doi.org/10.1109/IEDM19574.2021.9720605>.
- [38] Nolet F, Parent S, Roy N, et al. Quenching circuit and SPAD integrated in CMOS 65 nm with 7.8 ps FWHM single photon timing resolution[J]. *Instruments*, 2018, **2**(4): 19.
- [39] Jiang W, Scott R, Deen M J. High-speed active quench and reset circuit for SPAD in a standard 65 nm CMOS technology[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2021, **33**(24): 1431–1434.
- [40] Erdogan A T, Walker R, Finlayson N, et al. A CMOS SPAD line sensor with per-pixel histogramming TDC for time-resolved multispectral imaging[J]. *IEEE J Solid-State Circuits*, 2019, **54**(6): 1705–1719.
- [41] Gramuglia F, Wu M L, Bruschini C, et al. A low-noise CMOS SPAD pixel with 12.1 ps SPTR and 3 Ns dead time[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2022, **28**(2: Optical Detectors): 3800809. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2021.3088216>.
- [42] Lee M J, Karaca U, Kizilkan E, et al. A 73% peak PDP single-photon avalanche diode implemented in 110 nm CIS technology with doping compensation[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2024, **30**(1: Single-Photon Technologies and Applications): 3800310. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2023.3288674>.
- [43] Severini F, Cusini I, Berretta D, et al. SPAD pixel with sub-ns dead-time for high-count rate applications[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2022, **28**(2: Optical Detectors): 3802808. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2021.3124825>.
- [44] Gramuglia F, Keshavarzian P, Kizilkan E, et al. Engineering breakdown probability profile for PDP and DCR optimization in a SPAD fabricated in a standard 55 nm BCD process[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2022, **28**(2: Optical Detectors): 3802410. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2021.3114346>.
- [45] Ha W Y, Park E, Eom D, et al. SPAD developed in 55 nm bipolar-CMOS-DMOS technology achieving near 90% peak PDP[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2024, **30**(1: Single-Photon Technologies and Applications): 3800410. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2023.3303678>.
- [46] Shi Y L, Li Y X, Bai R, et al. Advancement of shortwave infrared single-photon detectors (invited)[J]. *Infrared Laser Eng*, 2023, **52**(3): 20220908. 史衍丽, 李云雪, 白容, 等. 短波红外单光子探测器的发展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2023, **52**(3): 20220908.
- [47] Meng X, Tan C H, Dimler S, et al. 1550 nm InGaAs/InAlAs single photon avalanche diode at room temperature[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(19): 22608–22615.
- [48] Seo H S, Park S H, Kwak S, et al. A model for the InGaAs/InP single photon avalanche diodes with multiple-quantum wells in the charge multiplication region[J]. *J Korean Phys Soc*, 2018, **72**(2): 289–293.
- [49] Signorelli F, Telesca F, Conca E, et al. Low-noise InGaAs/InP single-photon avalanche diodes for fiber-based

- and free-space applications[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2022, **28**(2: Optical Detectors): 3801310. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2021.3104962>.
- [50] Fang Y Q, Chen W, Ao T H, et al. InGaAs/InP single-photon detectors with 60% detection efficiency at 1550 nm[J]. *Rev Sci Instrum*, 2020, **91**(8): 083102.
- [51] Cui D J, Ao T H, Xi S Q, et al. Research progress of InGaAs single-photon avalanche focal plane (invited)[J]. *Infrared Laser Eng*, 2023, **52**(3): 20230016.
崔大健, 敖天宏, 奚水清, 等. InGaAs单光子雪崩焦平面研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2023, **52**(3): 20230016.
- [52] Diagne M, McIntosh A, Donnelly J, et al. Advances in InP/InGaAs Geiger-mode APD focal plane arrays (Conference Presentation)[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10659**: 1065904.
- [53] Signorelli F, Telesca F, Conca E, et al. InGaAs/InP SPAD detecting single photons at 1550 nm with up to 50% efficiency and low noise[C]//2021 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2021: 20.3. 1–20.3. 4. <https://doi.org/10.1109/IEDM19574.2021.9720559>.
- [54] He T T, Yang X H, Tang Y S, et al. High photon detection efficiency InGaAs/InP single photon avalanche diode at 250 K[J]. *J Semicond*, 2022, **43**(10): 102301.
- [55] Wang S, Ye H, Geng L Y, et al. Design, fabrication, and characteristic analysis of 64×64 InGaAs/InP single-photon avalanche diode array[J]. *J Electron Mater*, 2022, **51**(5): 2692–2697.
- [56] He D Y, Wang S, Chen J L, et al. 2.5 GHz gated InGaAs/InP single-photon avalanche diode with 44 ps time jitter[J]. *Adv Devices Instrum*, 2023, **4**: 0020.
- [57] Brown R, Hartzell P, Glennie C. Evaluation of SPL100 single photon lidar data[J]. *Remote Sens*, 2020, **12**(4): 722.
- [58] Shin D, Xu F H, Venkatraman D, et al. Photon-efficient imaging with a single-photon camera[J]. *Nat Commun*, 2016, **7**: 12046.
- [59] Rapp J, Goyal V K. A few photons among many: unmixing signal and noise for photon-efficient active imaging[J]. *IEEE Trans Comput Imaging*, 2017, **3**(3): 445–459.
- [60] Chen S M, Halimi A, Ren X M, et al. Learning non-local spatial correlations to restore sparse 3D single-photon data[J]. *IEEE Trans Image Process*, 2020, **29**: 3119–3131.
- [61] Huang X, Hong Y, Li Z P, et al. Frequency-modulated continuous-wave 3D imaging with high photon efficiency[J]. *Opt Lett*, 2022, **47**(14): 3568–3571.
- [62] Lee J, Ingle A, Chacko J V, et al. CASPI: collaborative photon processing for active single-photon imaging[J]. *Nat Commun*, 2023, **14**(1): 3158.
- [63] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[C]//18th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, 2015: 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28.
- [64] Lindell D B, O'Toole M, Wetzstein G. Single-photon 3D imaging with deep sensor fusion[J]. *ACM Trans Graph*, 2018, **37**(4): 113.
- [65] Zhao X C, Jiang X D, Han A J, et al. Photon-efficient 3D reconstruction employing a edge enhancement method[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(2): 1555–1569.
- [66] Peng J Y, Xiong Z W, Huang X, et al. Photon-efficient 3D imaging with a non-local neural network[C]//16th European Conference Computer Vision, 2020: 225–241. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58539-6_14.
- [67] Yang X, Tong ZY, Jiang P F, et al. Deep-learning based photon-efficient 3D and reflectivity imaging with a 64×64 single-photon avalanche detector array[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(18): 32948–32964.
- [68] Fang Z X, Zhang H, Liu P P, et al. Analysis of chirped AM lidar based on Geiger-mode APD[J]. *Laser Infrared*, 2012, **42**(6): 620–625.
方照勋, 张华, 刘鹏鹏, 等. 基于盖革模式APD的啁啾调幅激光雷达分析[J]. *激光与红外*, 2012, **42**(6): 620–625.
- [69] Pawlikowska A M, Halimi A, Lamb R A, et al. Single-photon three-dimensional imaging at up to 10 kilometers range[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(10): 11919–11931.
- [70] Du B C, Pang C K, Wu D, et al. High-speed photon-counting laser ranging for broad range of distances[J]. *Sci Rep*, 2018, **8**(1): 4198.
- [71] Li Z P, Huang X, Jiang P Y, et al. Super-resolution single-photon imaging at 8.2 kilometers[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(3): 4076–4087.
- [72] 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.
- [73] Li Z P, Huang X, Cao Y, et al. Single-photon computational 3D imaging at 45 km[J]. *Photonics Res*, 2020, **8**(9): 1532–1540.
- [74] McCarthy A, Ren X M, Della Frera A, et al. Kilometer-range depth imaging at 1550 nm wavelength using an InGaAs/InP single-photon avalanche diode detector[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(19): 22098–22113.
- [75] Yang F, Zhang X, He Y, et al. High speed pseudorandom modulation fiber laser ranging system[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, **12**(8): 082801.
- [76] Li Z H, Wu E, Pang C K, et al. Multi-beam single-photon-counting three-dimensional imaging lidar[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(9): 10189–10195.
- [77] Dai C, Ye W L, Yu C, et al. Long-range photon-efficient 3D imaging without range ambiguity[J]. *Opt Lett*, 2023, **48**(6): 1542–1545.
- [78] Maccarone A, Della Rocca F M, McCarthy A, et al. Three-dimensional imaging of stationary and moving targets in turbid underwater environments using a single-photon detector array[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(20): 28437–28456.
- [79] Hua K J, Liu B, Fang L, et al. Correction of range walk error for underwater photon-counting imaging[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(24): 36260–36273.
- [80] Maccarone A, Drummond K, McCarthy A, et al. Submerged single-photon LiDAR imaging sensor used for real-time 3D scene reconstruction in scattering underwater environments[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(10): 16690–16708.
- [81] Tobin R, Halimi A, McCarthy A, et al. Three-dimensional single-photon imaging through obscurants[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(4): 4590–4611.
- [82] Shi H T, Shen G Y, Qi H Y, et al. Noise-tolerant Bessel-beam single-photon imaging in fog[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(7): 12061–12068.
- [83] Qi H Y, Shen G Y, Li Z H, et al. Noise-tolerant single-photon imaging by using non-diffractive pulsed laser beams[J]. *Opt Commun*, 2023, **527**: 128978.
- [84] Jiang P Y, Li Z P, Ye W L, et al. Long range 3D imaging through atmospheric obscurants using array-based single-photon LiDAR[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(10): 16054–16066.
- [85] Shen S S, Chen Q, He W J, et al. Approach for Pseudo-random bit-stream multi-depth imaging[J]. *Opt Quantum Electron*, 2020, **52**(2): 76.
- [86] Halimi A, Tobin R, McCarthy A, et al. Restoration of

- multilayered single-photon 3D lidar images[C]//2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2017: 708–712. <https://doi.org/10.23919/EUSIPCO.2017.8081299>.
- [87] Zhao Y Y. Design and implementation of embedded real-time processing system based on single-photon LiDAR[D]. Beijing: Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, 2023.
赵洛阳. 基于单光子激光雷达的嵌入式实时处理系统设计与实现[D]. 北京: 中国科学院微电子研究所, 2023.
- [88] Li Y J, Zhou X Q, Li G Y, et al. Progress and prospect of spaceborne photon-counting lidar shallow water bathymetry technology[J]. *Infrared Laser Eng*, 2022, **51**(10): 20220003. 李雨佳, 周晓青, 李国元, 等. 星载单光子激光雷达浅水测深技术研究进展和展望[J]. *红外与激光工程*, 2022, **51**(10): 20220003.
- [89] Markus T, Neumann T, Martino A, et al. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): science requirements, concept, and implementation[J]. *Remote Sens Environ*, 2017, **190**: 260–273.
- [90] Yu A W, Krainak M A, Harding D J, et al. Sixteen channel, non-scanning airborne lidar surface topography (list) simulator[C]//2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011: 4119–4121. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2011.6050139>.
- [91] Shi Y F, Li Z H, Feng B C, et al. Enhanced solar-blind ultraviolet single-photon detection with a Geiger-mode silicon avalanche photodiode[J]. *Chin Opt Lett*, 2016, **14**(3): 030401.
- [92] Degnan J J, McGarry J F, Zagwodzki T W, et al. Design and performance of a 3D imaging photon-counting microlaser altimeter operating from aircraft cruise altitudes under day or night conditions[J]. *Proc SPIE*, 2002, **4546**: 1–10.
- [93] Marino R M, Davis W R, Jr. Jigsaw: a foliage-penetrating 3D imaging laser radar system[J]. *Lincoln Lab J*, 2005, **15**(1): 23–36.
- [94] Knowlton R. Airborne lidar imaging research testbed[R]. Lexington: MIT Lincoln Laboratory, 2011.
- [95] Li Q H, Degnan J, Barrett T, et al. First evaluation on single photon-sensitive lidar data[J]. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2016, **82**(7): 455–463.
- [96] Hu G J, Zhu J G, Liu R Q. Error analysis of Mars-LiDAR system and calibration of installation angle error[J]. *Infrared Laser Eng*, 2016, **45**(12): 1217009. 胡国军, 朱精果, 刘汝卿. Mars-LiDAR系统误差分析及安置角误差飞行检校[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(12): 1217009.
- [97] Yu C, Qiu J W, Xia H Y, et al. Compact and lightweight 1.5 μm lidar with a multi-mode fiber coupling free-running InGaAs/InP single-photon detector[J]. *Rev Sci Instrum*, 2018, **89**(10): 103106.
- [98] Xie S Y, Zhang S Y, Tan C H. InGaAs/InAlAs avalanche photodiode with low dark current for high-speed operation[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2015, **27**(16): 1745–1748.
- [99] Zhang X C, Jiang L Q, Gao X J, et al. Fabrication of InGaAs/InP Geiger-mode avalanche focal plane arrays[J]. *Semicond Optoelectron*, 2015, **36**(3): 356–360,391. 张秀川, 蒋利群, 高新江, 等. InGaAs/InP盖革模式雪崩焦平面阵列的研制[J]. *半导体光电*, 2015, **36**(3): 356–360,391.
- [100] Osrečki Ž, Knežević T, Nanver L K, et al. Indirect optical crosstalk reduction by highly-doped backside layer in single-photon avalanche diode arrays[J]. *Opt Quantum Electron*, 2018, **50**(3): 152.
- [101] Zhao X C, Wu M, Zhang Y, et al. Robust single-photon 3D imaging based on full-scale feature integration and intensity edge guidance[J]. *Opt Lasers Eng*, 2024, **172**: 107850.
- [102] Lindner S, Zhang C, Antolovic I M, et al. A 252×144 SPAD pixel FLASH LiDAR with 1728 dual-clock 48.8 ps TDCs, integrated histogramming and 14.9-to-1 compression in 180nm CMOS technology[C]//2018 IEEE Symposium on VLSI Circuits, 2018: 69–70. <https://doi.org/10.1109/VLSIC.2018.8502386>.
- [103] Yang X, Yao C H, Kang L, et al. A bio-inspired spiking vision chip based on SPAD imaging and direct spike computing for versatile edge vision[J]. *IEEE J Solid-State Circuits*, 2023. <https://doi.org/10.1109/JSSC.2023.3340018>.
- [104] Mora-Martin G, Turpin A, Ruget A, et al. High-speed object detection with a single-photon time-of-flight image sensor[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(21): 33184–33196.
- [105] Kwok R, Cunningham G F, Zwally H J, et al. Ice, Cloud, and land Elevation Satellite (ICESat) over Arctic sea ice: retrieval of freeboard[J]. *J Geophys Res Oceans*, 2007, **112**(C12): C12013.
- [106] Li Y, Peng J Y, Ye J T, et al. NLOST: non-line-of-sight imaging with transformer[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023: 13313–13322. <https://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.01279>.

作者简介



赵洛阳(1995-), 男, 博士研究生, 主要从事单光子激光雷达、三维重建和深度学习等研究。

E-mail: zhaoyuyang@ime.ac.cn



【通信作者】朱精果(1977-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 组织机载、车载、地面新型激光雷达研发10余类, 拓展了激光雷达在公共安全领域的应用, 近年来主要从事激光雷达、光电子集成、公共安全等研究。

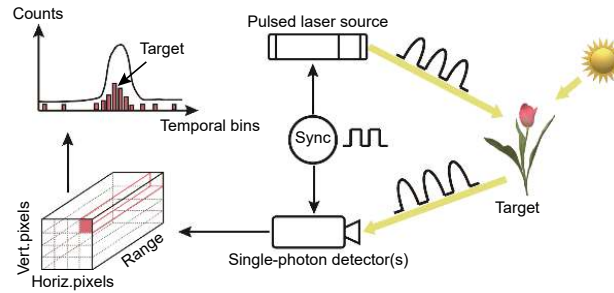
E-mail: zhujingguo@ime.ac.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Development status and trends of single-photon LiDAR technology

Zhao Yuyang^{1,2}, Zhou Pengfei^{1,2}, Xie Tianpeng^{1,2}, Jiang Chenghao¹, Jiang Yan¹, Zhao Zhengwei¹, Zhu Jingguo^{1*}



Principle of pulse accumulation single photon detection

Overview: LiDAR (Light Detection and Ranging) is an active remote sensing technology that can accurately and quickly acquire the three-dimensional spatial information of objects. Compared with traditional linear-mode LiDAR, single-photon LiDAR, especially those based on Single-Photon Avalanche Diodes (SPAD), represents an emerging technology with high temporal resolution, high sensitivity, and ease of integration. Due to its unique technological advantages in capturing weak signals and high-precision 3D imaging, it is widely applied in military, aerospace, and autonomous driving fields. In recent years, the continuous development of SPAD detectors has driven the vigorous development and rapid performance improvement of various single-photon LiDAR systems. Furthermore, the single-photon imaging algorithm has evolved from single-point signal processing to array image reconstruction. By exploring the spatiotemporal correlation between pixels, it can accurately restore the depth information carried by weak signals from high background noise. The introduction of deep-learning-based approaches with single-photon imaging prior knowledge has also become one of the current research hotspots. Meanwhile, thanks to powerful imaging algorithms, advanced optomechanical structures, and efficient system designs, they have significantly improved detection accuracy and speed and promoted the application scope of single-photon imaging systems from traditional satellite and airborne applications to vehicle-mounted and consumer electronics fields.

This article focuses on LiDAR technology based on SPAD. Starting from the basic principles, it introduces single-photon LiDAR technology and three typical technical systems, including pulse accumulation time-of-flight technology, coded modulation time-of-flight technology, and chirp modulation coherent detection technology. Based on this, the article highlights SPAD detectors, illustrates the research progress of Si SPAD and InGaAs/InP SPAD, and discusses classical imaging algorithms and typical prior assumptions. Moreover, this review looks back on the current development of single-photon LiDAR in long-distance detection, complex scene sensing, satellite/airborne mapping remote sensing, intelligent driving navigation and obstacle avoidance, and consumer electronics 3D perception, organizing typical systems in different application fields and platforms. Finally, based on current research hotspots and pain points, this article summarizes the main development trends of single-photon detection technology in detectors, imaging algorithms, system integration, and application fields. Of course, single-photon LiDAR also faces challenges such as distance ambiguity and pile-up effects. Therefore, in the design of single-photon LiDAR systems, adopting the concept of computational imaging based on application needs and jointly optimizing the system architecture, optical transmission and reception system, and 3D imaging algorithms might be a beneficial approach. It is hoped that this paper can provide some references for readers to understand the development and design of single-photon LiDAR systems.

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; DOI: 10.12086/oe.2024.240037

¹Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* E-mail: zhujingguo@ime.ac.cn