

## 单光子激光雷达研究进展

张汉熠<sup>1</sup>, 赵新宇<sup>1</sup>, 张益成<sup>1</sup>, 张蜡宝<sup>2</sup>, 孙鸣捷<sup>1\*</sup><sup>1</sup>北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;<sup>2</sup>南京大学电子科学与工程学院超导电子学研究所, 江苏南京 210093

**摘要** 单光子激光雷达是一种基于微弱光探测的新型激光雷达技术,可实现单个光子探测与计数,目前已达到了理论的探测极限。单光子激光雷达技术与弱光探测、超远距探测、人工智能等技术领域紧密结合并共同发展,产生了诸多研究成果。不同于传统激光雷达,单光子激光雷达通过对回波光子信号进行时间累积恢复出回波信号的离散波形,获取目标距离与反射率信息。回顾了单光子激光雷达系统和相关算法的发展历史,重点介绍了典型的单光子激光雷达系统与图像重建算法,讨论了单光子激光雷达在远距离探测和无人驾驶领域的技术应用和发展现状,并对其未来发展前景进行了展望。

**关键词** 成像系统; 激光雷达; 时间相关单光子计数; 远距离探测成像; 无人驾驶汽车

**中图分类号** TN958.98

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.1910003

## 1 引言

激光雷达(LiDAR)<sup>[1-3]</sup>作为一种可快速、精确获取目标三维空间信息的主动探测技术<sup>[4]</sup>,广泛应用于环境监测<sup>[5-6]</sup>、无人驾驶<sup>[7]</sup>、卫星测距<sup>[8]</sup>、国防军事<sup>[9-10]</sup>等领域。传统线性探测激光雷达按照探测体制可分为直接探测和相干探测激光雷达;按照工作原理可分为扫描成像探测和非扫描成像探测激光雷达等<sup>[11-12]</sup>。传统光学成像技术为追求高信噪比(SNR)的回波信号,通过提升激光出射功率和接收系统孔径来增加工作距离,系统的重复频率低,对动态运动目标的探测能力弱;雷达系统体积、重量和功耗进一步增大。此外,传统激光雷达在远距离、沙尘、浓雾等极端条件下往往因环境因素而失效<sup>[13]</sup>。

随着单光子探测器(SPD)、精密电子计时以及量子科学的进步,基于时间相关单光子计数(TCSPC)的光子计数激光雷达系统应运而生。早在1969年,光子计数激光雷达就被用来测量地球和月球之间的距离<sup>[14]</sup>。与传统的激光雷达相比,基于TCSPC技术的激光雷达具有探测灵敏度高、时间分辨率高、捕获时间短和光子利用率高等特点,成为了解决上述传统问题的新途径。

基于TCSPC的激光雷达并非通过单次回波判别目标信息,而是通过对回波信号进行时间累积恢复出回波信号的离散波形,获取目标的距离与反射率信息<sup>[15]</sup>。一方面,该技术不依赖于单次测量结果,因此

不要求单次回波具有高信噪比,对激光器的功率要求较低。另一方面,形成离散回波的过程可看作大量脉冲对目标的采样,每次少量光子回波中均包含丰富的目标信息。探测灵敏度达到单个光子水平的TCSPC激光雷达(下文简称“单光子激光雷达”),其设计思路中更注重充分利用有限的回波光子信息,在保持高灵敏度的基础上提升了光子利用率。在提升系统的探测效率和工作距离上,单光子激光雷达具有传统技术难以比拟的优势,成为新一代激光雷达技术的发展趋势。

目前,常规的TCSPC激光雷达成像探测体制中,随着工作距离的增加,图像平均每像素需积累较多光子才能获得高信噪比。在相同信噪比的条件下,对远距离探测成像目标需要更多的采样时间(即更长的光子累积时间),这在一定程度上限制了最大工作距离。近年来研究机构主要从两个方向探索解决该问题的方法:(1)减少累积光子数,提升成像算法效率<sup>[16-17]</sup>;(2)探索新型光子计数体制,提升回波光子利用效率<sup>[5,18-19]</sup>。2014年,麻省理工学院(MIT)的Kirmani等<sup>[20]</sup>首次提出了首光子成像(FPI)系统,为解决低光子利用率问题开辟了新路径。该方法可在每像素仅接收1个光子的极端条件下实现目标的高精度三维重建,将TCSPC成像技术带进了计算成像的新时代。而基于单光子探测计数成像的一些新体制相继引入激光雷达,与超衍射极限分辨、超远距探测、压缩感知等应用光学和计算成像领域<sup>[15-16,21]</sup>相结合,进一步提高

收稿日期: 2022-05-23; 修回日期: 2022-07-19; 录用日期: 2022-07-29

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金(61922011)、国家自然科学基金企业联合基金重点项目(U21B2034)

通信作者: \*mingjie.sun@buaa.edu.cn

了单光子激光雷达系统的成像性能。

本文主要从单光子激光雷达的系统搭建与重建算法入手,介绍了相关研究的发展情况,并就单光子激光雷达在远距离探测中的应用开展综述。

## 2 单光子激光雷达基本工作原理

随着高灵敏的 SPD 与 TCSPC 技术的发展,TCSPC 激光雷达逐步发展形成了基于少量光子回波

探测的新型激光雷达系统<sup>[15,22-24]</sup>。如果 TCSPC 激光雷达的接收灵敏度达到了能够响应单个光子能量的水平<sup>[15]</sup>,则称为“单光子激光雷达”。以下介绍单光子激光雷达的基本原理。

### 2.1 脉冲飞行时间直接探测原理

TCSPC 激光雷达往往用于直接探测方式下,通过测量往返脉冲飞行时间(ToF)来表征激光雷达系统与目标间的距离。其基本原理如图 1 所示。

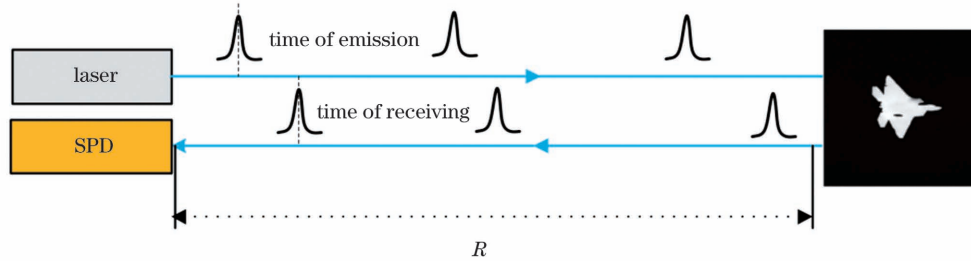


图 1 脉冲飞行时间测距的原理  
Fig. 1 Principle of pulse ToF ranging

激光器投射的脉冲照射到目标,从目标表面反射回来的回波被单光子探测器接收,通过测量发射脉冲与接收回波的时间间隔  $\Delta t$ (即 ToF),可得到与目标间的距离  $R = c \cdot \Delta t / 2$ ,其中  $c$  为光速。通过对探测脉冲定时并提取计数最终获取回波信号信息,而回波信号可反映目标的反射率水平。

在利用 ToF 方法测距时,距离模糊问题将严重制约远距离激光测距。最大非模糊距离  $d_m$  可表示为

$$d_m = \frac{c}{2nf_r}, \quad (1)$$

式中: $n$  为激光在大气中传播的折射率; $f_r$  为激光器的脉冲重复频率。

模糊距离的原理如图 2 所示。激光器周期性发射脉冲,对于某个回波信号,实际到达时间为  $2/f_r + t_0$ ,系统测得到达时间却仅为  $t_0$ ,便产生模糊测量距离。如果目标距离大于系统量程,回波信号未能落在该周期内,则无法判断目标的真实距离。

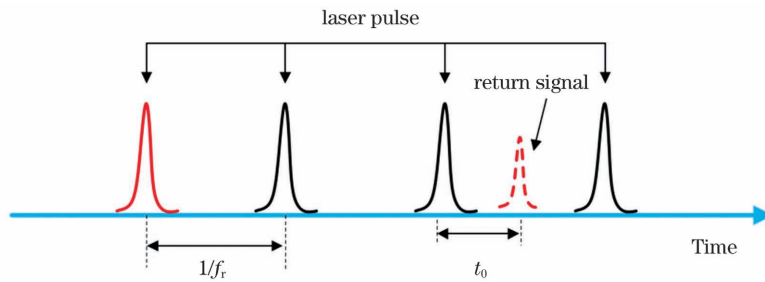


图 2 模糊距离的原理  
Fig. 2 Principle of range ambiguity

### 2.2 激光雷达距离公式

传统激光雷达通过对回波激光功率进行积分完成回波信号的探测。激光雷达距离公式被普遍用于计算接收系统接收的光功率:

$$P_r = \left( \frac{4P_t}{\pi\theta_t^2 R^2} \right) \cdot \left( \int \rho dA \right) \cdot \left( \frac{\pi D^2}{4\Omega R^2} \right) \cdot \eta_s \cdot \eta_a^2, \quad (2)$$

式中: $P_r$  为接收的回波功率; $P_t$  为激光发射功率; $\theta_t$  为出射激光的发散角; $R$  为激光雷达系统与目标间的距离; $\rho$  为目标的反射率; $dA$  为目标表面面元; $D$  为接收系统的口径; $\Omega$  为散射光的立体角; $\eta_s$  为光学系统的透过率; $\eta_a$  为激光在大气中的单程透过率。

对于单光子激光雷达,将目标简化为扩展的目标,即目标的尺寸大于激光衍射点尺寸,当目标表面积大

于激光照射面积时,认为目标有效反射面积与激光照射面积相等。此时,系统工作距离与接收激光能量之间的关系如下式所示:

$$E_r = \frac{A_{FOV}^2 E_t \cos \theta A_d}{\theta_t^2 \pi R^2} \eta_s \eta_a^2, \quad (3)$$

式中: $E_r$  为探测器接收到的能量; $E_t$  为发射激光的能量; $A_{FOV}$  为视场角; $\theta$  为激光雷达光轴与目标间的夹角; $A_d$  为探测器的有效光敏面面积。

探测远距离目标时,大气中的大分子、粒子、湍流等因素会对激光产生衰减和散射,导致较大的损耗。

### 2.3 TCSPC 探测原理

SPD 的极限灵敏度为单个光子水平。对于近红外光波段的激光,单光子的能量约在  $10^{-19}$  J 量级。为了

利用与探测光子信息,衍生出了光子计数探测和分析方法<sup>[25-27]</sup>。在光子计数激光雷达探测中,每个探测到的光

子事件都被看作是光子 ToF 的独立测量。TCSPC 系统对回波光信号的探测过程原理如图 3 所示。

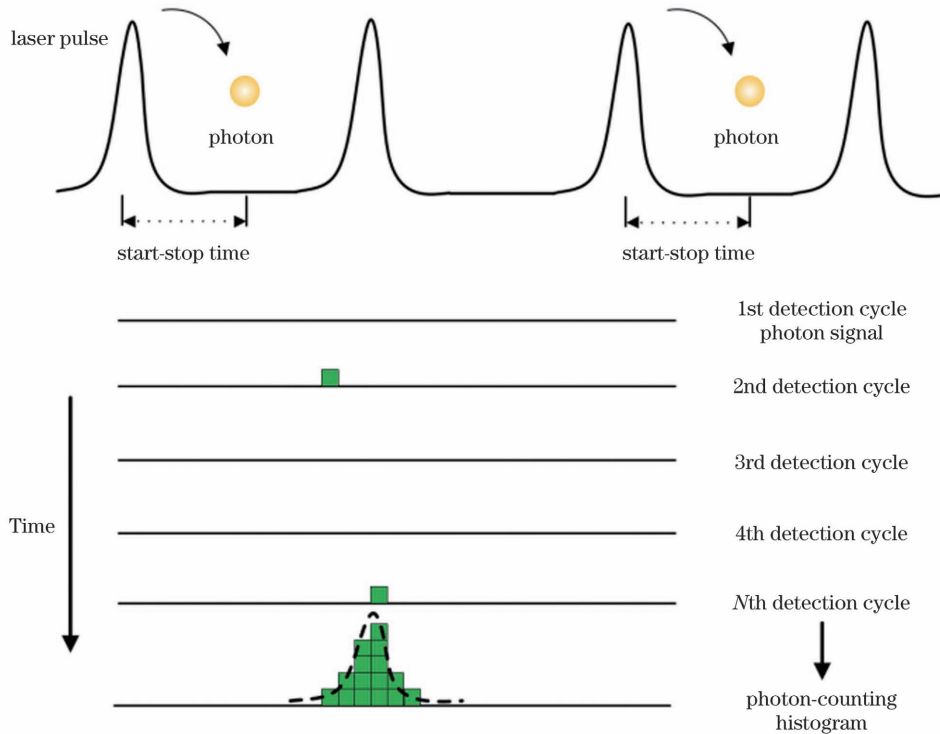


图 3 TCSPC 记录的光子飞行时间分布直方图

Fig. 3 Histogram of photon ToF distribution recorded by TCSPC

首先将由激光脉冲重复频率决定的一个探测周期等间隔划分为若干个时间片(Tb)<sup>[15]</sup>,经过多个探测周期后,在每个 Tb 内统计回波光出现的次数,最后依据信号光子和噪声光子不同的概率分布特征完成目标信息的反演。

信号光子到达时刻与发射脉冲相关,信号光子反射自同一目标位置时,光子到达时刻将在激光脉冲持续时间内集中分布。噪声光子未携带任何关于目标的信息,相对于发射脉冲的到达时刻是相互独立的,在探测周期内均匀分布。根据所有探测到的光子的 ToF 信息完成探测周期内每个 Tb 的光子计数统计,进而

获得光子 ToF 分布直方图,目标距离信息对应的 ToF 处将累积形成光子计数峰。分布直方图的横轴表示以 Tb 为单位的 ToF,纵轴表示每个 Tb 内的光子数统计,即“光子计数”。

#### 2.4 单光子激光雷达成像表征分析

事实上,仅能响应单个光子不足以完成高质量成像,系统必然会存在如 SPD 的暗计数(DCR)、背景噪声计数等噪声,将实际回波光光子计数与噪声区分开才可实现探测,而这需要通过优化系统硬件设计以及改进信号处理算法实现<sup>[27]</sup>。典型单光子激光雷达系统如图 4 所示,PC 机输出信号控制脉冲激光器投射激光

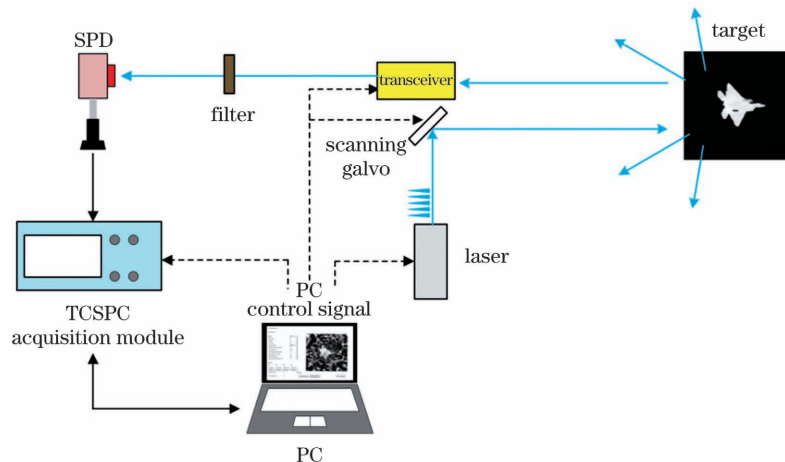


图 4 典型单光子激光雷达系统的结构图

Fig. 4 Schematic of typical single-photon LiDAR system



脉冲至目标,接收系统接收目标反射的光子回波,经过 SPD 将离散的光子信号转换为电脉冲信号并传送到 TCSPC 计数器,实现对回波光子的时间记录,最终获取目标的反射率信息与距离信息,实现三维成像。

单光子激光雷达系统的光子探测过程通常采用光探测半经典理论分析,对于镜面目标,回波信号满足泊松分布,而对于粗糙表面则满足负二项分布<sup>[28]</sup>。实际探测中,绝大多数目标表面是粗糙的。由于远距离目标回波信号极弱,在探测时间  $\Delta t$  内,可近似转化为泊松分布:

$$P_s(k) = \frac{N_s^k}{k!} \cdot e^{-N_s}, \quad (4)$$

式中: $N_s$  为探测时间  $\Delta t$  内的平均光电子数; $k$  表示特定计数时间段内探测到的光电子数。

背景噪声与暗计数在探测时间  $\Delta t$  产生的光电子数是一个泊松分布变量,在时间分布上满足均匀分布。设  $N_b$  为探测时间  $\Delta t$  内的总噪声光电子数,噪声光电子数的概率密度函数表示为

$$P_b(k) = \frac{N_b^k}{k!} \cdot e^{-N_b}. \quad (5)$$

当背景噪声进入激光雷达接收系统后,在探测时间  $\Delta t$  内,暗计数的光电子数目的均值函数可表示为

$$N_d = \psi_d \cdot \Delta t, \quad (6)$$

式中: $\psi_d$  表示暗计数率,与 SPD 的种类、内部结构以及温度有关。

暗计数与背景噪声同样满足独立的泊松分布。在单光子激光雷达探测过程中,引入的背景噪声光子与暗计数二者相互独立,且对探测信号的影响仅在于混叠,并未影响信号光子的统计分布,满足噪声叠加原理。

对于固定口径的望远系统和激光脉冲能量,单光子激光雷达的极限探测距离主要由信噪比决定。信噪比  $R_{SN}$  为记录的信号光子计数与噪声计数的比率:

$$R_{SN} = \frac{E_r \eta_d}{h\nu \sqrt{(N_D + N_B \eta_d) \tau}}, \quad (7)$$

式中: $\eta_d$  为 SPD 的探测效率; $\tau$  为出射激光的重复频率;噪声计数包括 SPD 的暗计数  $N_D$  和背景光子计数  $N_B$ 。

结合式(1)和式(3)可发现,当外部条件一定时,激光发射功率越高,接收孔径越大,背景噪声的抑制越好,则系统的信噪比越高。这也是单光子激光雷达系统的设计目标。

### 3 单光子激光雷达核心组成

单光子激光雷达的核心组成部分主要包括激光

器、收发光路、单光子探测器、TCSPC 模块以及控制与数据处理端。单光子激光雷达的主要性能指标是探测距离和探测精度,其中探测精度又包含测距精度和图像灰度精度。影响单光子激光雷达性能指标的因素主要包括大气传输影响与系统硬件性能。大气传输的影响主要包括自由空间中光传输衰减、大气湍流以及自由空间背景噪声等。激光在自由空间中传输时,大气中的吸收、散射都会影响激光发射和接收的能量,因此需要选择大气窗口的波段进行激光雷达探测<sup>[29]</sup>。大气湍流则影响投射光束的路径,造成光束偏转,影响对目标成像的分辨率。自由空间中的背景噪声对单光子激光雷达的影响主要体现在信号探测信噪比上,而有效抑制背景噪声是提升雷达信号收集效率的一项重要工作。下面重点从激光雷达系统硬件性能方面开展性能分析。

#### 3.1 脉冲光源

单光子激光雷达系统中,激光器向被探测目标发射激光脉冲,通过分析回波光子的 ToF 来确定与目标间的距离。根据式(2)与式(7),激光器的单脉冲能量与极限工作距离和信噪比相关;重复频率与系统的最大非模糊距离相关;激光的脉冲宽度与测量距离的精度相关。因此,单光子激光雷达系统为实现千米级以上的远距离探测成像,要求激光器具有一定的单脉冲能量、较高的重复频率以及窄脉冲宽度,但往往这三者不可兼得;同时,激光器的光束质量也制约着发射光路的扩束准直效果。

单光子激光雷达系统常用的激光器覆盖的波段从可见光到近红外,并且正朝着中红外波段发展。近红外波段的脉冲光源主要有超短脉冲锁模激光器、光纤激光器与调 Q 固体激光器等。锁模超短脉冲激光器可实现皮秒甚至飞秒级的脉冲输出,但其重复频率与谐振腔长度相关,系统复杂,稳定性与可靠性有待提高,限制了其在单光子激光雷达中的应用。光纤激光器转换效率高、散热效率高且光束质量好,同时其结构紧凑,使得振荡器的峰值功率较低,通常基于主振功放(MOPA)结构进行能量放大,往往伴随着强的放大自发辐射(ASE)效应和输出非线性。全固态调 Q 微片激光器具有可靠性高、结构紧凑和易获得单模输出等特点,通过控制谐振腔长度便可实现峰值功率达几十千瓦级甚至兆瓦级、脉宽皮秒级至纳秒级的脉冲输出,已应用于成熟的机载、星载等激光雷达系统中<sup>[6]</sup>。典型激光雷达所采用的亚纳秒脉冲激光器,单脉冲能量一般为几微焦,重复频率在数百千赫兹,可达到厘米级甚至毫米级的测距精度<sup>[11,30]</sup>。一些典型单光子激光雷达采用的脉冲激光器参数如表 1 所示。

表 1 典型单光子激光雷达采用的脉冲激光器参数

Table 1 Parameters of pulsed lasers applied in typical single-photon LiDAR

Institution	Year	Type	Performance
Heriot-Watt University <sup>[31]</sup>	1997	Q-switched diode	$\lambda$ : 850 nm; $E_t$ : 6 pJ@~1 MHz; $\tau$ : ~10 ps; $M^2 < 1.3$
NASA <sup>[6]</sup>	2002	Q-switched microchip	$\lambda$ : 532 nm; $E_t$ : 2 $\mu$ J@3.8 kHz; $\tau$ : <1 ns; $M^2 < 1.3$
Massachusetts Institute of Technology <sup>[24]</sup>	2007	Q-switched microchip	$\lambda$ : 532 nm; $P_t$ (average): 0.25 W
Heriot-Watt University <sup>[32]</sup>	2013	Mode-locked fiber laser	$\lambda$ : 1560 nm; $P_t$ (average): 2 mW@50 MHz; $\tau$ : <1 ps
Heriot-Watt University <sup>[33]</sup>	2014	Er <sup>3+</sup> -doped fiber laser	$\lambda$ : 1550 nm; $E_t$ : 4 $\mu$ J@125 kHz; $\tau$ : 0.8 ps
Heriot-Watt University <sup>[34]</sup>	2017	Er <sup>3+</sup> -doped fiber laser	$\lambda$ : 1550 nm; $P_t$ (average): 10 mW@125 kHz; $\tau$ : 0.8 ns
University of Science and Technology of China <sup>[35]</sup>	2020	Er <sup>3+</sup> -doped fiber laser	$\lambda$ : 1550 nm; $P_t$ (average): 120 mW@100 kHz; $\tau$ : 0.5 ns
University of Science and Technology of China <sup>[36]</sup>	2021	Er <sup>3+</sup> -doped fiber laser	$\lambda$ : 1550 nm; $P_t$ (average): 600 mW@500 kHz; $\tau$ : 0.6 ns

### 3.2 收发光路

常见的 TCSPC 成像系统大致可分为共轴光路与非共轴光路两大类。其中,共轴光路视场易于调节,且不存在视差的问题,能够在不调节收发光轴角度的条件下保证不同距离下的成像。典型共轴单光子激光雷达系统结构如图 5 所示。共轴光路收发的偏转角度可以

一直保证一致,可保持时间同步,能够保证系统的效率不受扫描的影响,可实现高速扫描。但共轴光路接收视场小,内部的后向散射较大,需要牺牲回波能量提高背景噪声抑制。2020 年,中国科学技术大学 Li 等<sup>[37]</sup>提出一种单光子激光雷达系统光子偏振态优化的技术方案,实现了对后向散射以及背景噪声的抑制<sup>[36]</sup>。

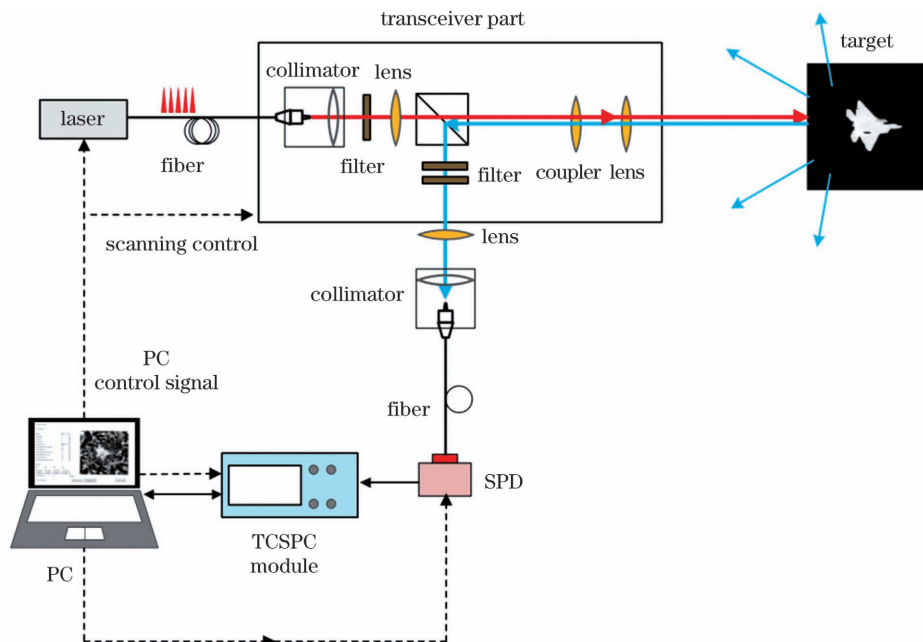


图 5 典型共轴单光子激光雷达系统的结构图

Fig. 5 Schematic of typical coaxial single-photon LiDAR system

非共轴光路(图 4)则恰恰相反,结构简单易于搭建,系统后向散射较小,接收视场仅受 SPD 光敏面直径与接收光路的限制。但同时非共轴光路也会引入更多的背景噪声,信噪比提升能力较弱。

### 3.3 单光子探测器

利用 SPD 接收回波信号是激光雷达信号处理的第一步,SPD 的性能对最终的成像结果具有关键影响。SPD 的主要指标包括探测效率、暗计数、信号时间抖动和死时间<sup>[29,38]</sup>。探测效率指单个入射光子到达 SPD 光敏面后产生可探测电脉冲信号的概率,受器件的量子效率、响应水平、电路甄别等影响;暗计数指无信号输入时 SPD 自身仍能输出响应,这种响应基于探测器自身材料和结构,属于噪声计数;信号时间抖动指信号真实回波时间与理想值的偏差,由器件材料决定;死时间指 SPD 响应一个光子后,需要一定的“重启时间”,在此时间内探测器不响应任何信号。

SPD 主要包括微通道板探测器、光电倍增管(PMT)和半导体雪崩二极管(APD)<sup>[15,39]</sup>等类型。PMT 具有较大的光敏面,对可见光可进行有效的单光子探测,但存在暗计数高、偏置电压高、红外波段探测效率较低以及时间抖动高等缺点<sup>[40]</sup>。相较于 PMT,APD 具有可靠性高、集成度高、偏置电压低等诸多优势。APD 可采用线性模式工作,具有一定增益,但此时的灵敏度远不能达到单光子量级。为了使 APD 具有单光子探测灵敏度,可使其在盖革模式下以雪崩击穿状态工作,此时称为单光子雪崩二极管(SPAD)。随着 InGaAs/InP SPAD 的出现,单光子激光雷达系统由可见光向近红外甚至中红外方向发展<sup>[41]</sup>。SPAD 因具有灵敏度高、功耗低、工作频谱范围广、体积小、工作电压低等优点<sup>[42]</sup>,广泛应用于 TCSPC 激光雷达系统。但 SPAD 在近红外波段具有较高的 DCR 和后脉冲效应,因此部分研究机构将目光转向超导纳米线单光子探测器(SNSPD)<sup>[43]</sup>。

SNSPD 具有极高的系统探测效率(SDE)<sup>[41]</sup>( $>90\%$ )、高计数率、低暗计数率<sup>[44]</sup>( $<10^3$  counts/s)、低时间抖动<sup>[45]</sup>以及从可见光到中红外的宽响应带宽<sup>[46]</sup>。SNSPD 在近红外波段的综合性能已明显超越传统的半导体探测器<sup>[40]</sup>。国内,南京大学的张彪等<sup>[45,47-48]</sup>对 SNSPD 进行了探索研究,将其应用于远距离测距<sup>[49]</sup>,获得了百公里级测距结果<sup>[49-50]</sup>,并研究了 SNSPD 测距的影响因素<sup>[44]</sup>。制约 SNSPD 的条件主要是技术仍不够成熟、系统复杂程度高以及需要严格的低温制冷(低于 4.2 K),难以实现系统小型化应用。

### 3.4 数据处理算法

为实现单光子激光雷达远距三维成像,一种方法是优化硬件部分,而另一种有效的途径则是对图像重建算法进行改进<sup>[51]</sup>。

#### 3.4.1 少量回波算法

常规的长时间累积光子直方图和回波光子曲线拟合方法适用于大量回波光子计数的情况。随着单光子激光雷达工作距离的增加,远距离回波光子数极少,而大量光子积累意味着需要更长的工作时间,难以保证系统的工作效率。国际上很多研究机构针对低回波光子的设计了一系列单光子三维图像计算重构算法<sup>[52-53]</sup>,利用不同的手段实现少量光子成像,包括首光子算法(FPI)<sup>[20]</sup>、信号/噪声解混合算法、机器学习算法以及基于阵列探测器的算法<sup>[54]</sup>等,大部分算法仍处在原理验证阶段。这些算法极大地降低了成像算法对光子信号的需求,灵敏度达到每像素 1 个回波光子。

2013 年,He 等<sup>[55]</sup>针对少量回波造成的距离随机游走问题提出了一种先验模型,并提出了一种补偿误差函数,适用于场景中材料特性或反射特性差异较大的情形,有效地减小目标反射率差异引起的距离游走误差。2014 年,Kirman 等<sup>[20]</sup>设计的首光子成像系统表明,通过引入像素间的局部相关性可解决少光子回波场景重建问题。该系统利用每个像素处的首个回波光子捕获目标 3D 空间结构与反射率,随后采用总变分(TV)正则化的方法重建目标信息,利用真实场景的空间相关性在低光子数条件下实现高质量计算成像。根据模型重建场景反射率  $\alpha(x, y)$  与 3D 空间场景  $Z(x, y)$ ,当单次激光脉冲照射像素目标时,未能探测到光子的概率可表示为

$$P_0(x, y) = e^{-\gamma[\alpha(x, y)S + BT_r]}, \quad (8)$$

式中: $S$  和  $B$  分别为一个脉冲周期内的总信号与噪声计数; $T_r$  表示脉冲重复频率; $\gamma$  表示探测器的量子效率。

每个传输激光脉冲都会产生相对独立的泊松噪声。系统接收到首个光子的概率为

$$P[n(x, y) = k] = P_0(x, y)^{k-1} [1 - P_0(x, y)], \quad (9)$$

式中: $n(x, y)$  表示被探测前所发射的脉冲数。在无背景光的情况下, $n(x, y) \gg 1$  时,逐点最大似然反射率估计  $\hat{\alpha}_{ML}(x, y)$  可近似为  $1/n(x, y)$ 。

最近提出了一种混合描述估计量稀疏度 TV 项的算法,用于更好地恢复此过程中的反射率与深度信息<sup>[56]</sup>。基于 TCSPC 原理,在脉冲投射的采样时间内,一个回波光子以较大的概率被探测到,根据此模型建立合理的似然函数,以激光投射脉冲个数表征目标反射率强度,便可获取目标灰度初始图像。在首光子三维场景表征中,同样以光子回波探测概率为基础,根据投射激光脉冲的包络曲线,以单个脉冲周期内仅有 1 个光子到达为假设,得到目标三维信息的统计分布。

2015 年,Shin 等<sup>[53]</sup>基于首光子的思想提出了一种正则化重建算法,为少量光子重建算法的后续发展提供了理论指导;次年他们进一步提出了基于联合子空间模型的重建算法<sup>[57]</sup>。2016 年,Altmann 等<sup>[58]</sup>提



出一种基于贝叶斯模型的新型图像优化算法,重点针对少量回波光子信息研究算法优化并应用于 TCSPC 激光雷达系统,采用马尔科夫链蒙特卡罗的距离估计算法实现对贝叶斯框架下的回波信息提取。2018 年,中国科学院 Kang 等<sup>[59]</sup>提出了一种基于少量回波光子

的快速远距离目标三维成像方法,目标图像每像素平均回波光子(PPP)少于 1 个,实现了 900 m 距离的三维成像。该方法采用 TV 惩罚项,结合像素间的关联特性,与传统中值滤波相对比,得到了在不同测量时间(最短 5 ms/pixel)内的目标恢复图像,如图 6 所示。

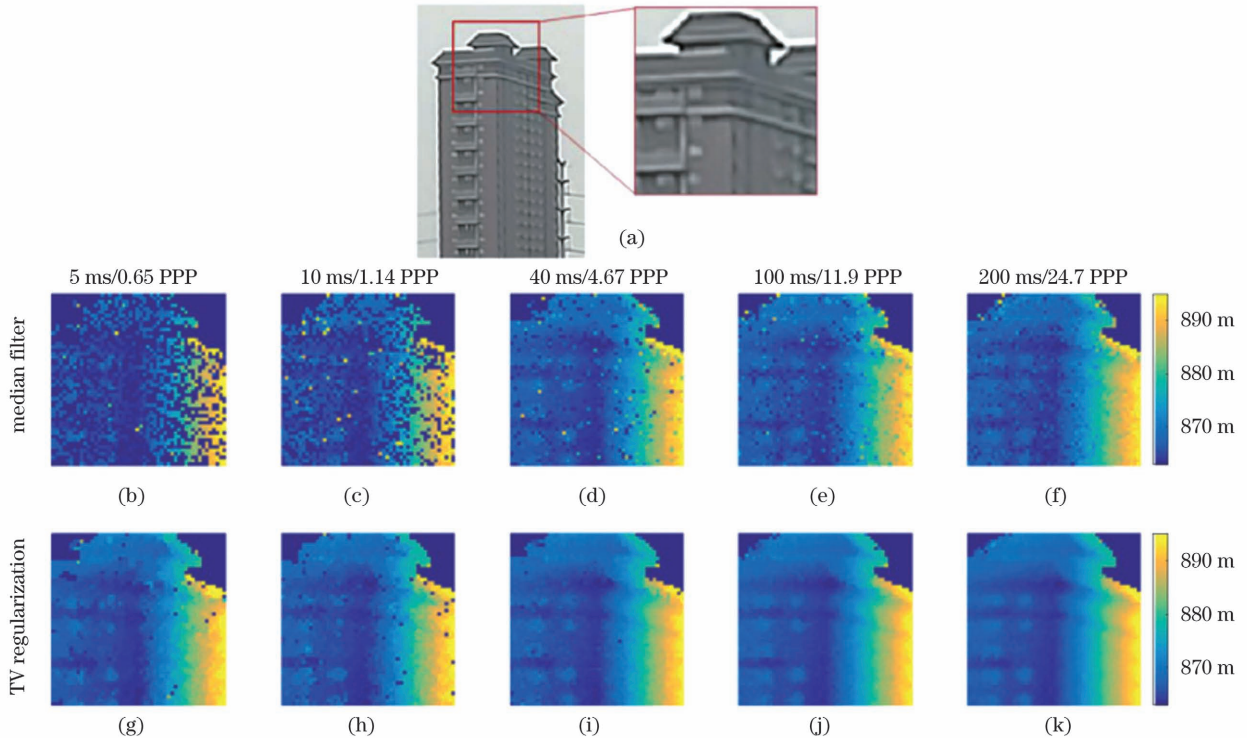


图 6 不同单像素采集时间下 900 m 距离的激光雷达三维成像结果。(a)建筑物照片;(b)~(f)不同单像素采集时间下深度图像中值滤波结果;(g)~(k)不同单像素采集时间下深度图像 TV 正则化结果

Fig. 6 3D imaging results of LiDAR at 900 m distance with different single pixel acquisition time. (a) Photograph of building; (b)~(f) median filtering results of depth image with different single pixel acquisition time; (g)~(k) TV regularization results of depth image with different single pixel acquisition time

2020 年北京航空航天大学 Peng 等<sup>[60]</sup>针对首光子成像算法,提出一种结合小波范数和全变分的补偿函数,重建其边缘特征并抑制了阶梯效应,完成了二维、三维成像重构仿真与实验,如图 7 所示。图 7 中 GT 表示真值,RDP-Ti 是一种平移不变递归二元分割方法,PC 表示光子计数,各图像下方的小数为重建图

像相对于真值或光子计数结果的均方根误差(RMSE)。

中国科学技术大学 Li 等<sup>[30,35]</sup>提出考虑了远距离成像中多重回波问题的前向模型。由于远距离回波光子探测概率较低,不同于传统逐像素恢复的方法,该算法将整个场景的探测模型抽象为物体和扩展视场的卷

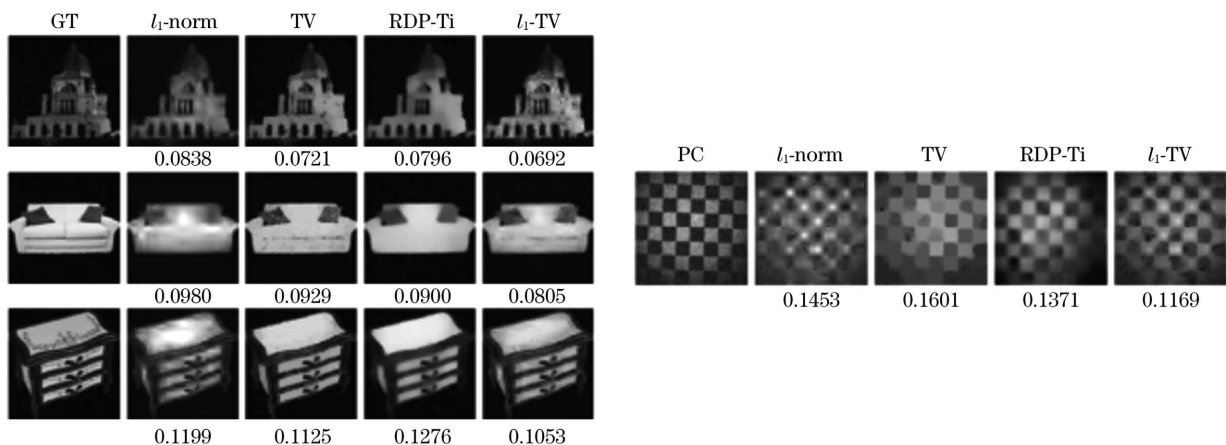


图 7 二维、三维成像重构仿真与实验

Fig. 7 Simulation and experiment of 2D and 3D imaging reconstruction

积模型,将重建过程描述为反解卷积问题。整合二维、三维优化过程并建立反射率与深度之间的相关性,实现了反射率和深度同步优化。

### 3.4.2 单光子算法优化

由于背景噪声和探测器暗计数引起的无关探测噪声,在重建场景深度信息时会使得目标函数变得非凸。因此,在进行深度恢复之前,往往要先去除噪声。由于光子探测离散度较大,常规的中值滤波算法适合对回波数据进行优化,可有效消除孤立的噪声点。但这种方法没有深入考察回波光子的统计特性,会减弱图像的高频部分,造成图像边缘信息丢失。目前更多的研究以光子探测模型中噪声与信号的概率分布差异构建光子探测去噪方法,主流算法如稀疏泊松强度重构算法(SPIRAL)<sup>[61]</sup>,将空间所有位置的估计值与一个稀疏正则项结合,利用空间相关性并结合凸优化理论<sup>[62]</sup>完成对图像噪声点的去除,在不同场景下优化正则项达到重构图像最优。

一类去除噪声的方法是利用探测的空间相关性。对于像素位置 $(i, j)$ ,  $t_{i,j}$  与其相邻的 8 个像素的光子到达时间之间的差值绝对值,按升序排列后取前四个作和,得到  $S_{AD_{i,j}}$ <sup>[20]</sup>,或取 8 个相邻像素的中值  $R_{M_{i,j}}$ <sup>[53,63]</sup>,用来逐点去噪。如满足

$$S_{AD_{i,j}} \geq 4T_p \frac{B}{\eta \hat{\alpha}_{i,j} S + B}, \quad (10)$$

或

$$|t_{i,j} - R_{M_{i,j}}| \geq 2T_p \frac{B}{\eta \hat{\alpha}_{i,j} S + B}, \quad (11)$$

则当前像素的探测会被视为噪声。

式(10)和式(11)中: $T_p$  是激光脉冲波形的均方根时间; $\hat{\alpha}_{i,j}$  为重建场景反射率; $\eta$  为探测效率。

文献[52]提出了另外一类逐点的时间窗去噪方法,用于分辨信号和噪声光子。相比于噪声,信号光子往往更容易聚集,因此用光子串中光子数量最大作为鉴别信号光子的依据。对于在像素位置 $(i, j)$ 的  $k_{i,j}$  个探测光子,首先要根据一个给定的时间窗  $T_{wind}$ ,寻找具有最多数量  $k_{i,j}^{\max}$  的探测光子的时间集合  $D_{i,j}^{\max}$ ,即

$$D_{i,j}^{\max} = \underset{D_{i,j}^l}{\operatorname{argmax}} |D_{i,j}^l|, l \in \{1, 2, \dots, k_{i,j}\}, \quad (12)$$

式中: $D_{i,j}^l = \{t_{i,j}^{\text{interval}} : t_{i,j}^l \leq t_{i,j}^{\text{interval}} < t_{i,j}^l + T_{wind}\}$ 。

根据给定的错误接受门限值  $\tau_{FA}$  计算得出一个最小可接受的聚集数量  $N_{cl}$ 。如满足  $k_{i,j}^{\max} \geq N_{cl}$ ,则落在  $D_{i,j}^{\max}$  内的数据会被保留,其外的探测光子会被去除;如不满足  $k_{i,j}^{\max} \geq N_{cl}$ ,则此位置接收的光子将会被全部抹除。此外,文献[64]提出了一种基于超像素图像的方法,用于改善那些光子数不足或全被抹除的位置的重建结果。

文献[64]描述了一种基于一维直方图的去噪方

法。直方图  $\tilde{h}_{\Delta 0} = \text{hist}(ct/2)$  的横坐标由一系列宽度为  $c\Delta/2$  的深度区间组成,纵坐标为光子计数,其中  $\Delta$  是探测器阵列的时间分辨率。对于  $N_z$  个深度区间中的第  $n_z$  个,初始的估计是由原直方图中光子计数减去背景噪声及暗计数得到,表示为

$$(\tilde{h}_{\Delta})_{n_z} = (\tilde{h}_{\Delta 0})_{n_z} - b\Delta, n_z = 1, 2, \dots, N_z. \quad (13)$$

$\tilde{h}_{\Delta}$  是  $h_{\Delta}$  卷积  $s_z \propto s(2z/c)$  后附加了噪声,去噪的优化问题可描述为

$$\begin{aligned} \hat{h}_{\Delta} = \underset{h_{\Delta}}{\operatorname{argmin}} \sum_{n_z=1}^{N_z} \|(\tilde{h}_{\Delta})_{n_z} - (s_z * h_{\Delta})_{n_z}\|_2^2, \\ \text{s. t. } \|h_{\Delta}\|_0 = m, (h_{\Delta} \geq 0, n_z = 1, 2, \dots, N_z), \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $m$  表示  $h_{\Delta}$  的稀疏程度,与深度范围以及时间分辨率  $\Delta$  有关。

结合深度学习建立真实世界图像降噪(RID)数据集,通过样本训练进一步高效利用目标图像像素间的相关性,可以提升图像恢复质量。2022年,北京航空航天大学 Cheng 等<sup>[65]</sup>提出了一种基于 K 次奇异值分解(K-SVD)去除实际噪声的改进方案,通过字典学习和稀疏编码来重建无噪声的图像块,对图像块进行叠加和重组,以获得预处理的深度数据。

传统的单光子激光雷达重建算法是逐像素重建算法,仅能利用当前像素的回波信息实现对目标空间位置的图像重建,在少量光子回波条件下,图像重建效果不佳<sup>[18]</sup>。针对稀疏回波光子条件,目前大部分重建算法都通过发掘数据中的冗余信息作为重建的先验知识,利用空间位置的相关性求解病态方程,这类方法的本质是通过空间采样来弥补时间采样的不足。然而这些方法利用的都是图像空间局部像素的关联性,对图像整体像素的相关性把控较差。通过结合人工智能从而学习场景全局的相似度,建立更有效的优化算法,是目前重建算法的一个研究热点。同时,针对稀疏的光子回波场景,优化算法往往需要消耗大量的时间成本,因此提升算法实时性也是目前少光子重建算法的一个重点研究方向。

## 4 单光子激光雷达研究进展

光子计数雷达自 20 世纪 90 年代诞生以来,世界上多个研究机构都进行了探索工作。目前有公开集中报道的单光子激光雷达研究的机构,国外以美国航空航天局(NASA)、美国 MIT 林肯实验室、英国 Heriot-Watt 大学等为主,国内包括中国科学技术大学、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、中国科学院西安光学精密机械研究所等。为了更清晰地综述单光子激光雷达的研究现状,图 8 按照时间顺序梳理了单光子激光雷达发展过程中的代表性成果。



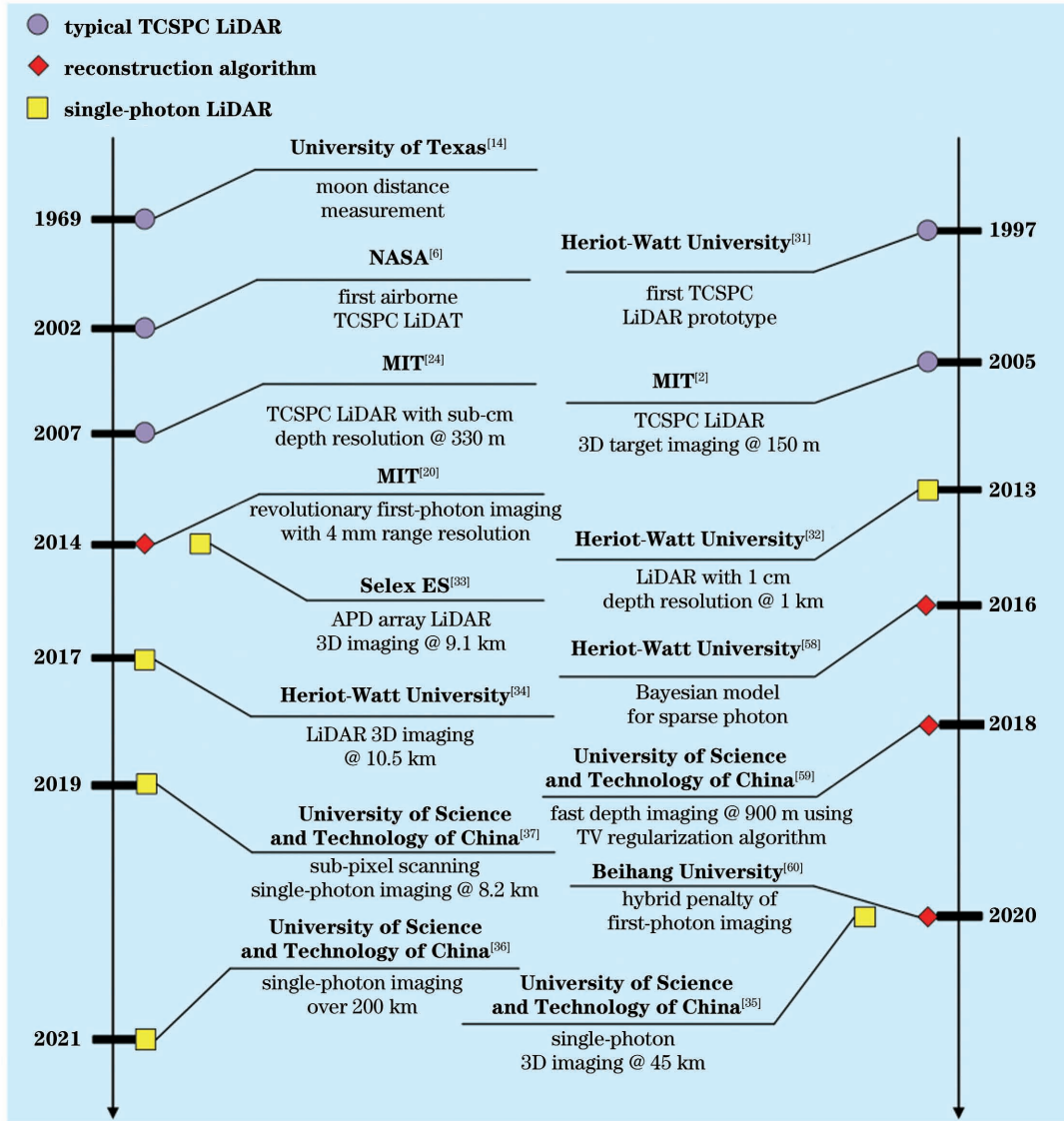


图 8 单光子激光雷达发展过程中的代表性成果

Fig. 8 Representative achievements in single-photon LiDAR

#### 4.1 远距离探测成像

本文主要探讨基于 ToF 测距原理的主动探测单光子激光雷达。1997 年,英国 Heriot-Watt 大学<sup>[31]</sup>首次提出了一种基于超短脉冲 ToF 以及 TCSPC 技术获取距离深度信息的方法,系统采样用 1 MHz 的脉冲激光,具有 30 μm 的测距精度,并于次年完成了首台基于 TCSPC 的单光子激光雷达系统样机。2002 年, NASA<sup>[6]</sup>报道了首个机载光子计数激光雷达验证系统。在 6.7 km 海拔的飞行测绘成像试验中,获得了优于分米级的地表等高信息。光源采用波长为 532 nm 的被动调 Q 微片激光器,光束质量  $M^2 < 1.3$ ,单脉冲能量 2 μJ @ 3.8 kHz;系统采用收发共路光学天线设计,激光经过发射系统后的发散角小于 100 μrad,对应的接收视场角为 170 μrad,可以保证较高的回波信号接收效率。2003 年, MIT 研发出 GenIII 系列 APD 阵列,阵列规模为 32 × 32,并基于此阵列完成机载成像实验<sup>[66]</sup>,是首次利用光子回波的闪光激光雷达系统。2007 年, NASA 与 Sigma Space 公司<sup>[24]</sup>合

作研发 1550 nm 的三维单光子计数雷达系统,其出射激光重复频率为 22 kHz,在 330 m 的距离上具有亚厘米级的深度分辨率。系统的定时抖动为 70 ps,对应实验的深度精度为 1 cm,经过算法优化后深度精度可以达到 4 mm。NASA 与 Sigma Space 公司利用优化后的系统完成了海拔 1 km 的实验,进一步利用其进行海岸探测、海底地形形貌探测等研究<sup>[67]</sup>,如图 9 所示。

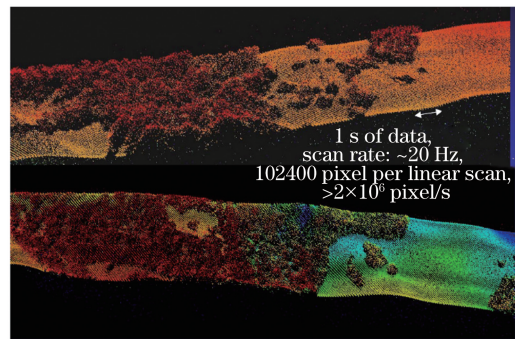


图 9 海拔 1 km 地形探测实验

Fig. 9 Experiment of 1 km altitude terrain probe

2013 年, McCarthy 等<sup>[32]</sup> 利用 1550 nm 波段的 InGaAs/InP SPAD 实现了深度分辨率优于 1 cm 的 1 km 级单光子计数成像。采用的 SPAD 单光子探测效率为 26%, 暗计数率为 16000 counts/s (温度为 230 K

时)。系统发射激光的平均光功率小于 600  $\mu$ W, 单像素采样时间为 0.5~20 ms, 此外, 在优化了硬件数据采集后, 他们利用该系统在 4.5 km 距离上完成了三维目标的成像<sup>[68]</sup>。系统结构以及实验结果如图 10 所示。

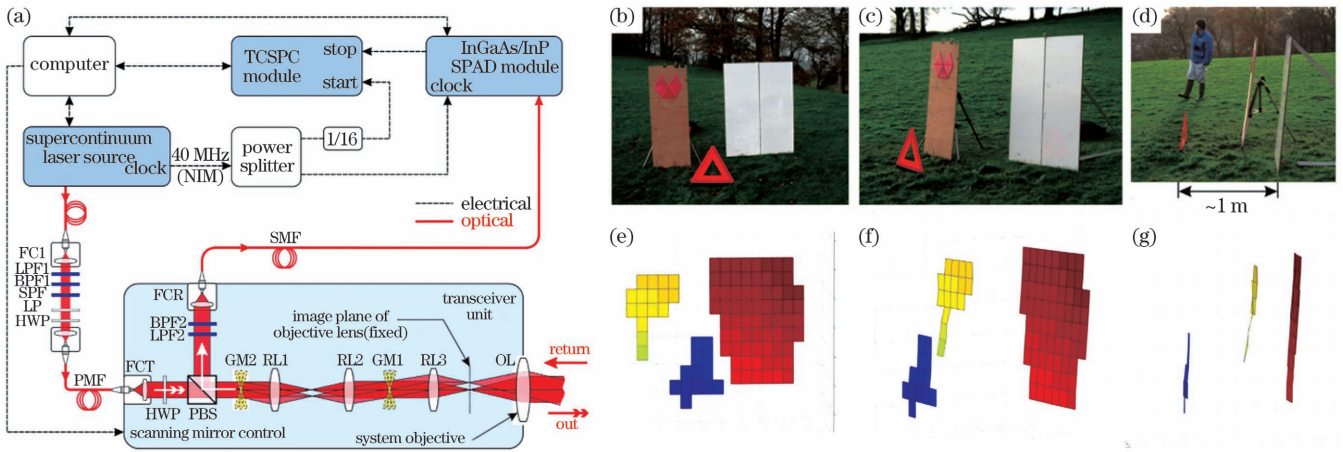


图 10 4.5 km 单光子计数三维目标成像。(a) 系统结构; (b)~(d) 实验照片; (e)~(g) 成像结果

Fig. 10 Experiment of 4.5 km single-photon counting 3D target imaging. (a) System structure; (b)–(d) photographs of experimental scene; (e)–(g) imaging results

2014 年, 英国 Selex ES 公司使用一种 32×32 单光子探测器阵列实现了对 9.1 km 处目标的三维重建<sup>[33]</sup>。系统使用 125 kHz 的 1550 nm 脉冲激光器, 累积了 125000 frame 光子回波数据, 整体成像时间为 1 s。2014 年, MIT 的 Kirmani 等<sup>[20]</sup> 首次提出了基于回波首光子探测的三维成像实验, 在每个像素上仅记录回波的首个光子, 便可获取目标的二维和三维信息, 距离分辨率达到了 4 mm。与传统光子计数累积方式有所不同, 不再利用大量光子统计模型对目标回波进行反演估计, 需要根据首光子统计原理建立探测模型。2016 年, 南京大学 Xue 等<sup>[49]</sup> 采用基于 SNSPD 的 532 nm 激光雷达系统对回波为单光子量级的非合作

目标进行测距, 在 19 km 的距离上获得了亚厘米的测距精度, 结果表明该系统有望用于空间碎片监测; 同年, 他们将 SNSPD 应用于 1064 nm 的激光雷达系统<sup>[41]</sup>, 实现了 126.025 km 外夜间漫反射拓展目标的测距, 所用 SNSPD 的暗计数仅为 6400 counts/s, 探测效率为 40%。2017 年, Pawlikowska 等<sup>[34]</sup> 报道了一种实现 10 km 级三维成像的高效远程单光子激光雷达系统。该系统使用集成的收发共路结构, 出射激光能量为 80 nJ@125 kHz, 回波光子单像素采集时间为 300 ms。采用了高效的 RDI-TV 图像重构算法提高回波光子的利用效率, 实现对 10.5 km 的山坡目标准确成像, 如图 11 所示。

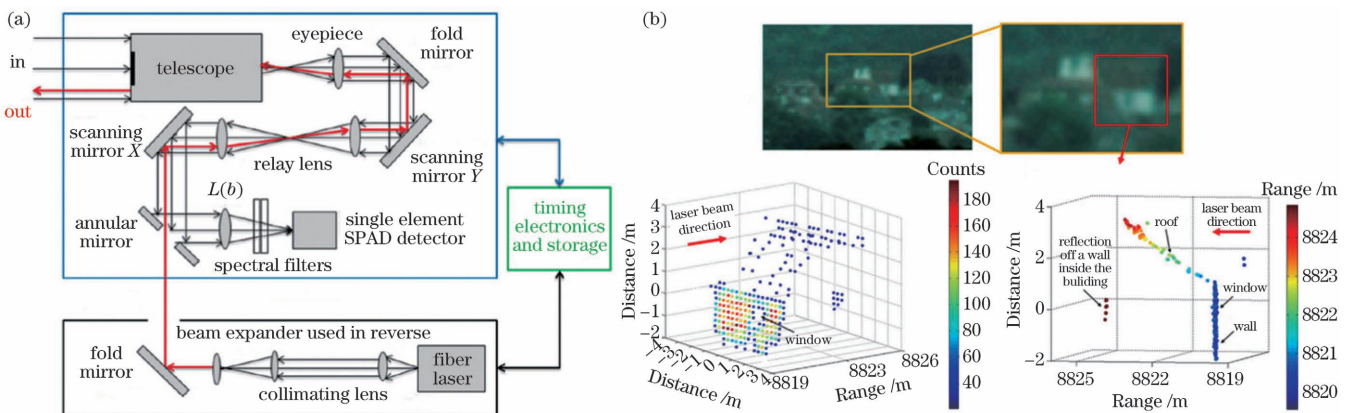


图 11 10 km 级三维成像单光子激光雷达系统。(a) 激光雷达系统结构图; (b) 10.5 km 处的山坡目标成像实验

Fig. 11 10 km 3D imaging single-photon LiDAR system. (a) System structure; (b) experiment of 10.5 km hillside target imaging

2020 年, Li 等<sup>[35]</sup> 提出了超远距单光子激光雷达, 采用相应的技术方案有效地抑制了后向散射以及背景噪声, 实现了 45 km 外目标的三维信息获取, 整图像的 PPP 为 2.59 个。在高效算法的基础上, 获得

了远距离目标三维成像结果, 并与其他主流重构算法进行了对比。深度分辨率达到了 0.6 m, 可分辨出窗户的轮廓, 分别如图 12 与图 13 所示。



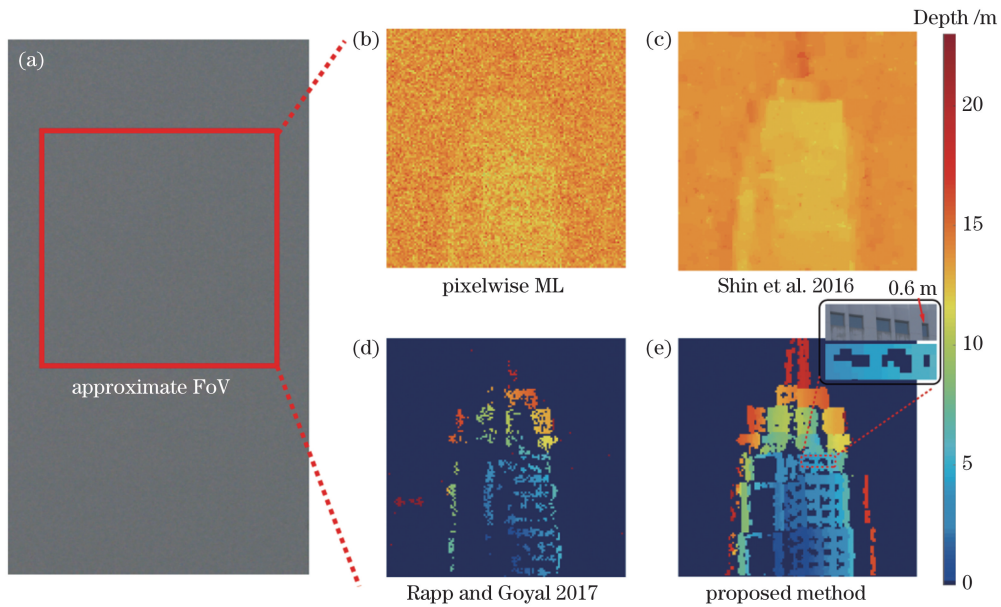


图 12 单光子激光雷达 45 km 远距离 3D 成像结果

Fig. 12 Long range single-photon LiDAR 3D imaging results over 45 km

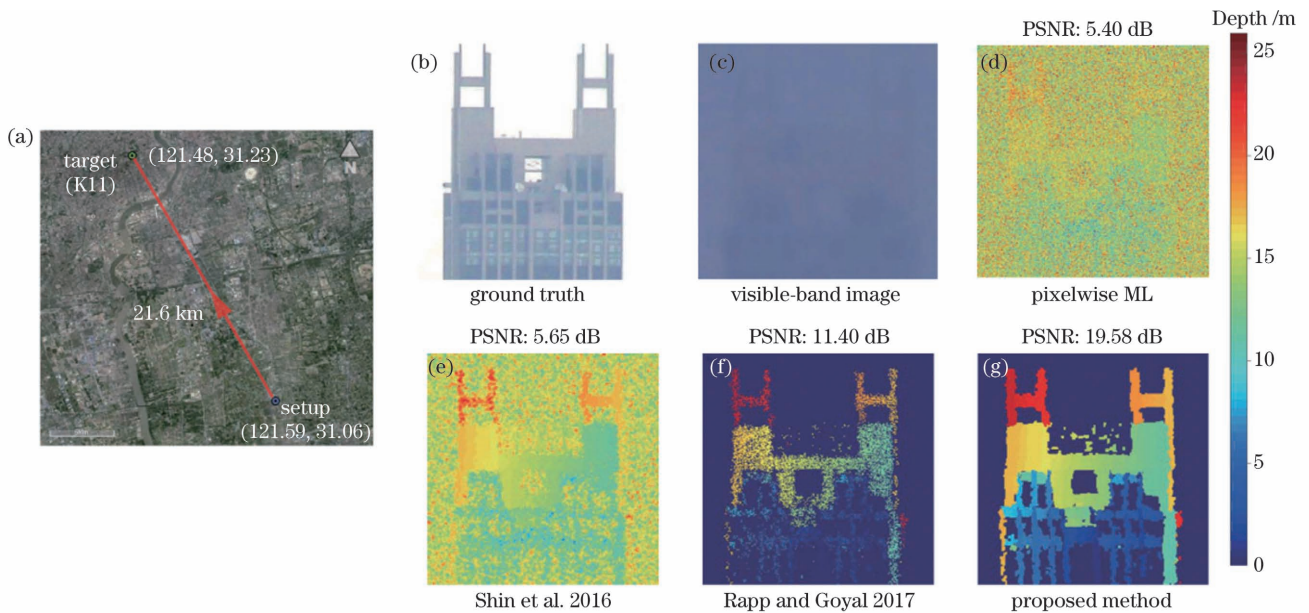


图 13 白天和夜间对 21.6 km 处的远程目标 3D 成像结果对比

Fig. 13 Long-range target at 21.6 km imaged in daylight and at night

2021 年, 南京大学 Zhang 等<sup>[50]</sup> 提出一种基于 SNSPD 阵列的激光雷达, 并利用该系统对 100 km 外的软目标与硬目标进行测距实验, 结果如图 14 所示, SNSPD 的暗计数为 1000 counts/s, 探测效率为 40%。实验结果表明该系统具有全天候激光雷达的潜力。

2021 年, Li 等<sup>[36]</sup> 实现了 200 km 的单光子激光雷达三维成像, 整图像的 PPP 为 0.41 个, 系统结构如图 15 所示, 126 km 外图像重构结果如图 16 所示。

该激光雷达系统采用紧凑的共轴系统, 有效抑制了系统的后向散射。激光器的波长为 1550 nm, 出

射激光能量为  $1.2 \mu\text{J}@500 \text{ kHz}$ , InGaAs/InP SPAD 的制冷温度为 173 K, 单光子探测效率为 19.3%, DCR 为 100 counts/s, 较之前研究工作中采用的 SPD 性能有较大的提升。发射激光的发散角和接收视场分别为  $17.8 \mu\text{rad}$  和  $11.2 \mu\text{rad}$ , 较以前的研究中<sup>[30,35]</sup> 采用的角度小 50%, 且接近望远镜光圈的衍射极限。

我们对文献中基于 ToF 的远距离单光子激光雷达的总体性能进行了综合对比, 如表 2 所示。不难发现, SNSPD 的出现以及 SPAD 的性能提升对于单光子激光雷达的总体性能提升起重要作用。



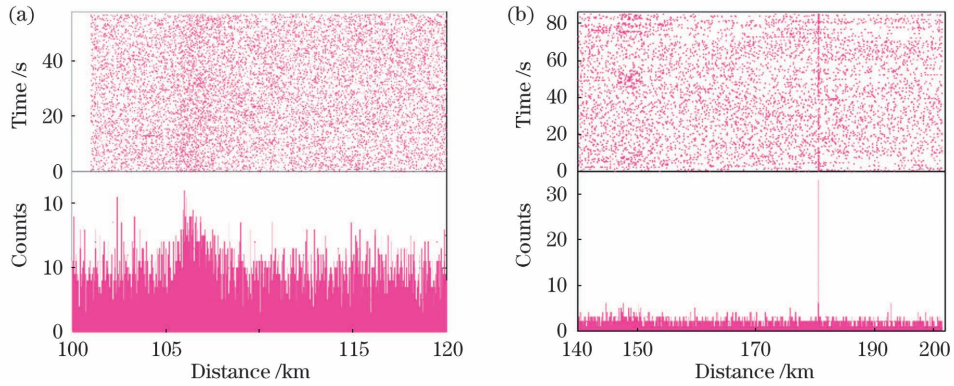


图 14 基于 SNSPD 阵列的激光雷达对 100 km 外目标的测距结果。(a)白天对 106 km 外云层的探测结果;(b)夜间对 180 km 外山脉的探测结果

Fig. 14 Ranging results of targets 100 km away from LiDAR based on SNSPD array. (a) Detection result of clouds 106 km away in daylight; (b) detection result of mountains 180 km away at night

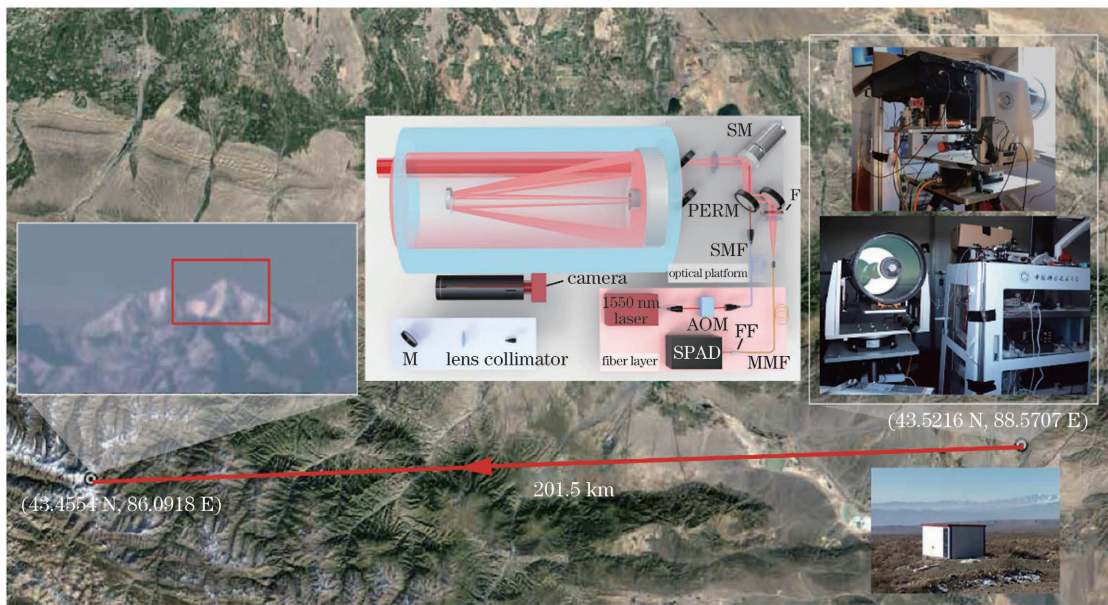


图 15 200 km 成像激光雷达系统结构图

Fig. 15 Schematic diagram of LiDAR system with imaging range of 200 km

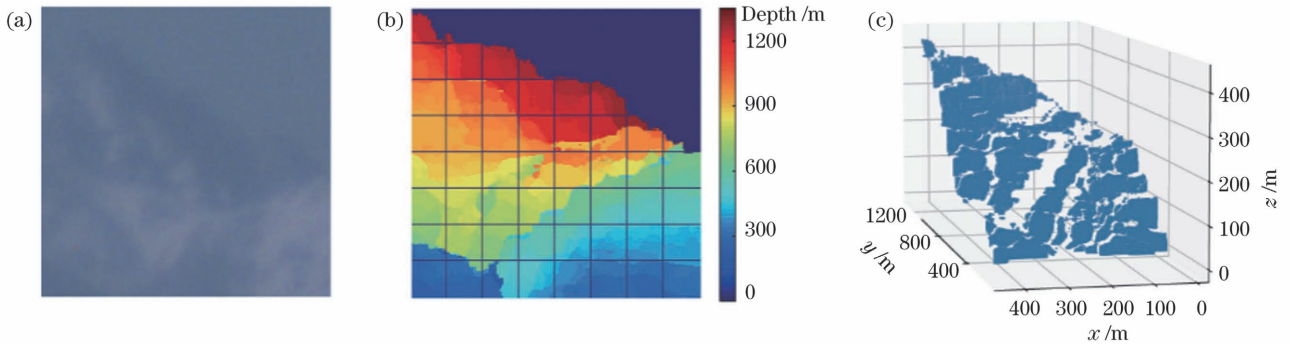


图 16 126 km 外的山脉目标图像重建结果。(a)照片;(b)对比方法结果;(c)文献[36]结果

Fig. 16 Reconstruction imaging result of 126 km mountain target. (a) Photograph; (b) result in literature for comparison; (c) result by Li et al. [36]

综上所述,在基于 ToF 测距原理的单光子激光雷达中,使用 TCSPC 技术进行光学测距,探测极限取决于信噪比,测距精度依赖于激光脉宽的量级以及系统的定时精度(主要由探测器和电路决定)。而对于远距

离成像而言,空间分辨率则受限于系统的衍射极限(系统的口径),中国科学技术大学提出了“亚像素扫描”方式来解决该问题。提升极限探测距离最直接的方式是提升激光能量和抑制背景噪声,目前主流的研究中背

表 2 典型 ToF 远距离单光子激光雷达性能对比  
Table 2 Performance of typical ToF-based long-range single-photon LiDARs

Year	Institution	Detector type	Detector parameters			Distance /m	Distance accuracy /mm	Mode
			SDE /%	DCR / (counts·s <sup>-1</sup> )	Jitter /ps			
1997	Heriot-Watt University <sup>[31]</sup>	SPAD@850nm	—	—	50	—	0.03	Imaging
2007	Heriot-Watt University <sup>[69]</sup>	SNSPD@1550 nm	1	100	70	330	4	Imaging
2013	Heriot-Watt University <sup>[32]</sup>	SNSPD@1560 nm	18	1000	98	910	1.1	Imaging
2016	Nanjing University <sup>[49]</sup>	SNSPD@1064 nm	>20	1000	50	1.95×10 <sup>7</sup>	78.6	Ranging
2017	Heriot-Watt University <sup>[34]</sup>	SPAD@1550 nm	30	—	—	1.05×10 <sup>4</sup>	—	Imaging
2018	Delft University of Technology <sup>[70]</sup>	SPAD array@637 nm	33.7	195	—	50	1.4	Ranging
2020	University of Science and Technology of China <sup>[35]</sup>	SPAD@1550 nm	35	880	—	8.2×10 <sup>3</sup>	55	Imaging
2021	University of Science and Technology of China <sup>[36]</sup>	SPAD@1550 nm	19.3	100	180	2.015×10 <sup>5</sup>	35	Imaging

景噪声的抑制体现在系统设计和去噪算法的优化。结合上述措施,单光子激光雷达有望在未来实现更高的距离精度和更远的探测距离。

#### 4.2 大气探测

目前,单光子激光雷达已广泛应用于大气探测激光雷达系统中,因其优异的时空分辨率、较高的探测精度和连续的剖面数据采集能力,成为大气探测的有力工具。单光子激光雷达可用来探测气溶胶、云、大气密度、臭氧、温室气体、风场、能见度等。工作在近红外波段的激光雷达在大气探测方面具有许多优势。首先,对于人眼相对安全。其次,与激光雷达系统中常用的可见光相比,水蒸气、CO<sub>2</sub> 等在近红外波段的吸收截面很小,因此探测波可轻松地穿透云雾,在恶劣天气下具有出色的探测能力。另外,在近红外波段,影响激光雷达系统信噪比的太阳背景辐射较小,可以实现昼夜连续的低噪声探测。

2015 年, Xia 等<sup>[71]</sup> 搭建了一台基于上转换 SPD (1550 nm 时 SDE 为 15%, DCR 为 40 counts/s) 的单光子激光雷达,连续监测大气能见度超过 24 h,并用商用 InGaAs APD 进行了对比实验,实验结果表明,较商用 InGaAs APD 信噪比提高了两个数量级。尽管大气激光雷达系统都是基于直接探测的,相干探测激光雷达在大气探测中也同样扮演着重要的角色。通过深入分析相干探测激光雷达回波信号的功率谱,可以反演附加的大气参数,如云高度和云厚度、雨速、风切变和湍流耗散率。在近红外大气激光雷达中,通

常使用的是 SPAD 的单光子激光雷达。2022 年,南京大学 Guan 等<sup>[70]</sup> 使用基于 SNSPD 的单光子激光雷达探测了 180 km 范围内的海雾。探测到 42.3~63.5 km 和 53.2~74.2 km 范围内的海雾回波信号,反映了雾的浓度和移动速度。2021 年,南京大学张彪等<sup>[45]</sup> 对单光子激光雷达系统进行了优化,并使用了具有四光子分辨能力的多像素 SNSPD,成功探测到 106 km 处的云层和 200 km 处的山脉,利用光子数分辨能力区分雾回波信号和高山回波信号。上述研究同样表明,在远程激光雷达系统中,极限距离主要取决于输出信号的信噪比,受激光器发射能量的影响较大,而在探测器层面,信噪比主要由 SDE 和 DCR 决定。

#### 4.3 空间探测

早在 1964 年, NASA 就发射了第一颗装有光学逆向反射器的人造卫星,并实现了激光测距,由于采用红宝石调 Q 激光器并受探测器的性能影响,测距精度仅为数米。经过几十年的发展,激光雷达系统已经成为深空探测的关键。单光子激光雷达在空间目标探测中有着广泛的应用,包括卫星激光测距和空间碎片探测。最早, PMT 被广泛用于激光测距,但其传输时间抖动导致的距离不确定度高达 15 cm<sup>[72]</sup>, 后续开发的微通道板式光电倍增管 (MCP-PMT) 具有极低的渡越时间抖动 (对应于 3 mm 的距离不确定度)。探测器定时抖动产生的距离不确定度远大于此,因此用上述探测器进行卫星激光测距的精度保持在厘米级。

20 世纪 90 年代以来, SPAD 在卫星激光测距中



得到了广泛的应用。与 PMT 相比, SPAD 具有更高的计时精度,但其 DCR 更高,并且存在时间游走的问题(取决于光脉冲能量和设备的温度)。1993 年, Zappa 等<sup>[73]</sup>提出并开发了具有时间游走补偿的 SPAD (C-SPAD),其时序抖动约为 30 ps,结合优化后的系统,实现了亚厘米精度的卫星激光测距。随着 InGaAs SPAD 和 Ge SPAD 的出现以及 Nd:YAG 纳秒脉冲激光器的发展,红外卫星激光测距开始发展。Courde 等<sup>[74]</sup>使用基于 InGaAs SPAD 以及 Nd:YAG 调 Q 脉冲激光器的单光子激光雷达进行了月球激光测距,在盖革模式下, SPAD 的量子效率约为 20%,暗计数率为 28000 counts/s,最终测距精度达到 3 mm。虽然 InGaAs SPAD 在近红外波段性能优越,但在 3.3 节已经提及,需要在 DCR 和 SDE 之间进行权衡,并且 SPAD 还具有显著的后脉冲效应。

相比之下,部分研究机构初步尝试将基于 SNSPD 的单光子激光雷达应用到空间探测中。Xue 等<sup>[49]</sup>实现了基于 SNSPD 的 1064 nm 单光子激光雷达激光测距,系统中的激光平均功率为 40 W,脉宽为 662.7 ps,光学系统的效率为 10%,SNSPD 的 DCR 为 1000 counts/s,探测效率为 20%。他们将该系统引入云南天文台,并在 Cryosat、Ajisai 和 Glonass 三颗典型的低、中轨道 (LEO/MEO) 卫星上成功地进行了 1600~19500 km 的测距。

人们期望单光子激光雷达系统中的单光子探测器具有高效率、低暗计数、较大光敏面、低定时抖动等综合性能。因此,经过对单光子探测器以及光学系统参数的优化和改进,单光子激光雷达有望在未来实现更高的距离精度并探测更小的空间碎片。

#### 4.4 无人载具中的目标感知

无人驾驶汽车的性能以及安全性要求其具有准确绘制地图并实时响应周围环境的能力。车载激光雷达则要求系统轻量化、小型化、实时性高、功耗低、可靠性高<sup>[75]</sup>。在无人驾驶汽车市场的刺激下,诞生了 Velodyne、Quanegy、IBEO、Sick 等商业激光雷达公司<sup>[76]</sup>。2017 年 Wang 等<sup>[77]</sup>将 Velodyne 64 型激光雷达应用于研究自动驾驶的行人识别与追踪问题。Velodyne 公司的产品丰富,不仅包括传统的雷达,也推出了如 VLS、HDL 等系列激光雷达<sup>[78]</sup>,然而这些激光雷达的性能仅适用于低速、小范围无人驾驶,且价格相对高昂<sup>[79]</sup>(数十万元人民币)。文献<sup>[78]</sup>指出,无人驾驶要求激光雷达的性能至少要能探测 200 m 处反射率为 10% 的暗物体。传统的连续波激光雷达难以实现此性能要求,而脉冲激光雷达通过增加激光能量的方法实现远距离探测则受限于载具的功率。

单光子激光雷达有探测距离远、深度分辨率优异等优势<sup>[80]</sup>,系统采用的激光器单脉冲能量多在微焦量级,且波段为近红外的“人眼安全”波段,是无人驾驶车辆的良好选择。2018 年, Lindell 等<sup>[81]</sup>提出了一种可

记录 25 Hz 瞬变图像的成像系统,适用于无人驾驶的实时采样。该系统采用  $256 \times 1$  的 SPAD 阵列以及配套扫描振镜, SPAD 阵列的 DCR 为 2500 counts/s,光子探测效率为 20%,激光器的波长为 450 nm,单脉冲能量为 18 nJ@25 MHz。系统可以以每秒几帧的速度记录这种瞬变图像,瞬变图像仅有几个 PPP,如图 17 所示。

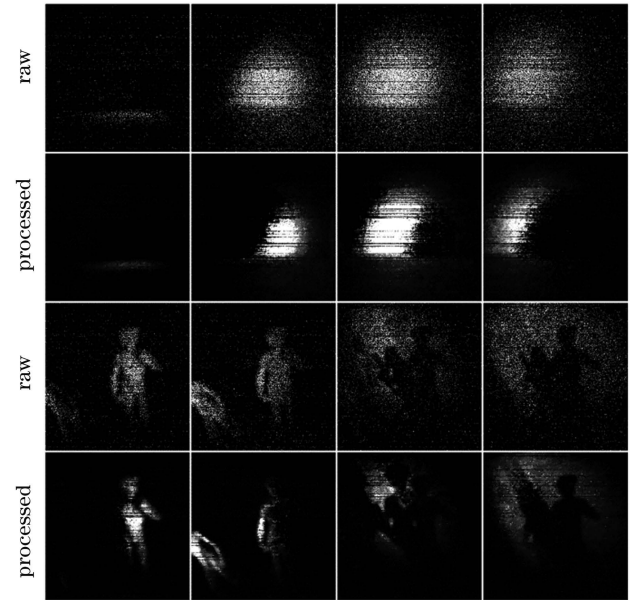


图 17 利用成像系统捕捉的瞬变图像片段

Fig. 17 Transient image segments captured by imaging system

2017 年, Chan 等<sup>[82]</sup>利用基于 3 个硅基 SPAD 构成的激光雷达,在平均功率为 2 mW 的条件下,实现了 2.5 m 外 15 cm×15 cm 物体的快速追踪。该方法对于无人驾驶或者实时运动目标检测定位是可行的。2020 年, Du 等<sup>[83]</sup>基于 SPAD 的单光子激光雷达提出了车辆自主感知方法。相较于传统的激光雷达,在同等精度条件下,结合混沌脉冲位置调制 (CPPM) 技术和自适应算法的单光子激光雷达系统可在 0~96 km/h 的时速内准确识别车道标志,并且检测速度快 16.1%。

在无人驾驶以及室外自动机器人等实际复杂环境中,尽管单光子激光雷达系统较传统的线激光雷达以及单目/双目视觉等成像系统具有更高的分辨率以及较好的响应速度,但 TCSPC 系统的价格高昂,不适宜大规模应用。

## 5 结束语

单光子成像体制的出现为 TCSPC 激光雷达提供了一种有效的解决方案。本文对单光子激光雷达进行了综述,介绍了典型单光子激光雷达的基本技术原理、相关数据处理算法以及目前单光子激光雷达的主要研究方向与进展,对典型研究进行了梳理与思考。在 TCSPC 激光雷达成像系统中,要有效保证系统的远距



离工作能力,常规的途径是增加发射功率和光学系统的接收口径。提升单光子激光雷达工作距离的新途径主要是提高光子探测效率和压缩采样光子计数。但高光子效率探测意味着仅有少量光子被雷达系统接收,面临着巨大的探测强噪声挑战。

单光子激光雷达对目标探测过程的复杂场景感知中,针对具体成像系统提出的去噪方案与重构算法仍是目前的重点研究内容。目前国内外有关单光子成像雷达的研究多在实验室内演示成像原理和重构算法,少量光子算法的效果和适应性仍需要更多地在实际环境下验证。目前相关新体制的算法层出不穷,需要以保证激光雷达工作距离为核心,在优化光学系统与改善噪声抑制的同时增强自身算法处理能力,推动图像重构的研究。

综上所述,单光子激光雷达在远程测距、远距离计算成像、高分辨率成像以及人工智能等领域都获得了很大的发展,以具备单个光子探测能力的优势在远距离成像中更是获得了广泛关注与研究。随着相关研究的不断深入,单光子激光雷达拥有更广阔的工程化应用前景,有望成为推动光子计数成像技术发展的新动力。

### 参 考 文 献

- [1] Sun S, Lin H Z, Xu Y K, et al. Tracking and imaging of moving objects with temporal intensity difference correlation[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27851-27861.
- [2] Marino R M, Davis W R. Jigsaw: a foliage-penetrating 3D imaging laser radar system[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, 15(1): 23-36.
- [3] Andersson P. Long-range three-dimensional imaging using range-gated laser radar images[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(3): 034301.
- [4] 倪旭翔, 胡凯. 脉冲串互相关方法在远程激光测距中的应用[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1112005.  
Ni X X, Hu K. Multi-pulse train cross-correlation method in remote laser ranging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1112005.
- [5] Degnan J J, Field C T. Moderate to high altitude, single photon sensitive, 3D imaging lidars[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9114: 91140H.
- [6] Degnan J J. Photon-counting multikilohertz microlaser altimeters for airborne and spaceborne topographic measurements[J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, 34(3/4): 503-549.
- [7] Repasi E, Lutzmann P, Steinvall O, et al. Mono- and bi-static SWIR range-gated imaging experiments for ground applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7114: 71140D.
- [8] Mao D D, McGarry J F, Mazarico E, et al. The laser ranging experiment of the Lunar Reconnaissance Orbiter: five years of operations and data analysis[J]. *Icarus*, 2017, 283: 55-69.
- [9] Vaidyanathan M, Blask S, Higgins T, et al. Jigsaw phase III: a miniaturized airborne 3-D imaging laser radar with photon-counting sensitivity for foliage penetration[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6550: 65500N.
- [10] Clifton W E, Steele B, Nelson G, et al. Medium altitude airborne Geiger-mode mapping LIDAR system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9465: 946506.
- [11] 曹杰, 郝群, 张芳华, 等. APD 三维成像激光雷达研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(9): 20190549.  
Cao J, Hao Q, Zhang F H, et al. Research progress of APD three-dimensional imaging lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20190549.
- [12] 卜禹铭, 杜小平, 曾朝阳, 等. 无扫描激光三维成像雷达研究进展及趋势分析[J]. *中国光学*, 2018, 11(5): 711-727.  
Bu Y M, Du X P, Zeng Z Y, et al. Research progress and trend analysis of non-scanning laser 3D imaging radar[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 711-727.
- [13] 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 Sensing of Environment*, 2017, 190: 260-273.
- [14] Abbot R I, Shelus P J, Mulholland J D, et al. Laser observations of the Moon: identification and construction of normal points for 1969-1971[J]. *The Astronomical Journal*, 1973, 78: 784.
- [15] Buller G S, Collins R J. Single-photon generation and detection[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(1): 012002.
- [16] Shin D, Shapiro J H, Goyal V K. Single-photon depth imaging using a union-of-subspaces model[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(12): 2254-2258.
- [17] Shin D, Xu F H, Wong F N C, et al. Computational multi-depth single-photon imaging[J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 1873-1888.
- [18] 陈松懋, 郝伟, 苏秀琴, 等. 光子计数成像算法的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(18): 1811010.  
Chen S M, Hao W, Su X Q, et al. Research progress on photon counting imaging algorithms[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(18): 1811010.
- [19] Dong W S, Shi G M, Li X, et al. Compressive sensing via nonlocal low-rank regularization[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(8): 3618-3632.
- [20] Kirmani A, Venkatraman D, Shin D, et al. First-photon imaging[J]. *Science*, 2014, 343(6166): 58-61.
- [21] Garipey G, Krstajić N, Henderson R, et al. Single-photon sensitive light-in-flight imaging[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6021.
- [22] Shrestha K Y, Slatton K C, Carter W E, et al. Performance metrics for single-photon laser ranging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(2): 338-342.
- [23] 孙建锋, 闫爱民, 刘德安, 等. 远距离激光成像雷达进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(8): 49-54.  
Sun J F, Yan A M, Liu D A, et al. Progress on long-range laser imaging lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(8): 49-54.
- [24] Sjöqvist L, Henriksson M, Jonsson P, et al. Time-of-flight range profiling using time-correlated single-photon counting[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6738: 67380N.
- [25] Albota M A, Aull B F, Fouche D G, et al. Three-dimensional imaging laser radars with Geiger-mode avalanche photodiode arrays[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, 13(2): 351-370.
- [26] Becker W. Advanced time-correlated single photon counting techniques[M]. Heidelberg: Springer, 2005.
- [27] Lussana R, Villa F, Mora A D, et al. Enhanced single-photon time-of-flight 3D ranging[J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 24962-24973.
- [28] Tucker L R. Some mathematical notes on three-mode factor analysis[J]. *Psychometrika*, 1966, 31(3): 279-311.
- [29] Ren X M, Connolly P W R, Halimi A, et al. High-resolution depth profiling using a range-gated CMOS SPAD quanta image sensor[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5541-5557.
- [30] 位超杰, 闫仁鹏, 李旭东, 等. 三维成像激光雷达应用的亚纳秒激光器研究进展[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(6): 1270-1280.  
Wei C J, Yan R P, Li X D, et al. Research progress of sub-nanosecond lasers for 3D imaging lidar[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(6): 1270-1280.
- [31] Massa J S, Wallace A M, Buller G S, et al. Laser depth measurement based on time-correlated single-photon counting[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(8): 543-545.

- [32] McCarthy A, Ren X M, Frera A D, et al. Kilometer-range depth imaging at 1550 nm wavelength using an InGaAs/InP single-photon avalanche diode detector [J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22098-22113.
- [33] Pawlikowska A M, Pilkington R M, Gordon K J, et al. Long-range 3D single-photon imaging lidar system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9250: 925007.
- [34] Pawlikowska A M, Halimi A, Lamb R A, et al. Single-photon three-dimensional imaging at up to 10 kilometers range [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11919-11931.
- [35] Li Z P, Huang X, Cao Y, et al. Single-photon computational 3D imaging at 45 km [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(9): 1532-1540.
- [36] Li Z P, Ye J T, Huang X, et al. Single-photon imaging over 200 km [J]. *Optica*, 2021, 8(3): 344-349.
- [37] Li Z P, Huang X, Jiang P Y, et al. Super-resolution single-photon imaging at 8.2 kilometers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 4076-4087.
- [38] Zhang L, Chitnis D, Chun H, et al. A comparison of APD- and SPAD-based receivers for visible light communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(12): 2435-2442.
- [39] Lawrence D, Zheng Y, Upton R, et al. Recent advances in photon-counting, 3D imaging lidars [EB/OL]. [2022-04-02]. <https://cdsis.nasa.gov/lw18/docs/papers/Session12/13-04-22-Degnan.pdf>.
- [40] You L X. Superconducting nanowire single-photon detectors for quantum information [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(9): 2673-2692.
- [41] 张晓英, 贾磊, 朱江, 等. 基于 SNSPD 与 SPAD 探测器的激光测距系统的比较研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(3): 378-384.  
Zhang X Y, Jia L, Zhu J, et al. Comparison of laser ranging system based on SNSPD and SPAD detectors [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(3): 378-384.
- [42] Pasquinelli K, Lussana R, Tisa S, et al. Single-photon detectors modeling and selection criteria for high-background LiDAR [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(13): 7021-7032.
- [43] 张森, 陶旭, 冯志军, 等. 超导单光子探测器暗计数对激光测距距离的影响 [J]. *物理学报*, 2016, 65(18): 188501.  
Zhang S, Tao X, Feng Z J, et al. Enhanced laser ranging with superconducting nanowire single photon detector for low dark count rate [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(18): 188501.
- [44] 张蜡宝, 康琳, 陈健, 等. 超导纳米线单光子探测器研究新进展 [J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2014, 50(3): 254-261.  
Zhang L B, Kang L, Chen J, et al. Development of superconductor nanowire single photon detector [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2014, 50(3): 254-261.
- [45] 张彪, 陈奇, 管焰秋, 等. 超导纳米线单光子探测器光子响应机制研究进展 [J]. *物理学报*, 2021, 70(19): 198501.  
Zhang B, Chen Q, Guan Y Q, et al. Research progress of photon response mechanism of superconducting nanowire single photon detector [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(19): 198501.
- [46] Chen S J, You L X, Zhang W J, et al. Dark counts of superconducting nanowire single-photon detector under illumination [J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 10786-10793.
- [47] Zhang L B, Wan C, Gu M, et al. Dual-lens beam compression for optical coupling in superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(16): 1434-1438.
- [48] Chen Q, Ge R, Zhang L B, et al. Mid-infrared single photon detector with superconductor  $\text{Mo}_{0.8}\text{Si}_{0.2}$  nanowire [J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(10): 965-968.
- [49] Xue L, Li Z L, Zhang L B, et al. Satellite laser ranging using superconducting nanowire single-photon detectors at 1064 nm wavelength [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(16): 3848-3851.
- [50] Zhang B, Guan Y Q, Xia L H, et al. An all-day lidar for detecting soft targets over 100 km based on superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2021, 34(3): 034005.
- [51] Chen G B, Wiede C, Kokoziński R. Data processing approaches on SPAD-based d-TOF LiDAR systems: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(5): 5656-5667.
- [52] Shin D, Xu F H, Venkatraman D, et al. Photon-efficient imaging with a single-photon camera [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12046.
- [53] Shin D, Kirmani A, Goyal V K, et al. Photon-efficient computational 3-D and reflectivity imaging with single-photon detectors [J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2015, 1(2): 112-125.
- [54] 孙鸣捷, 闫崧明, 王思源. 鬼成像和单像素成像技术中的重建算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(2): 0200001.  
Sun M J, Yan S M, Wang S Y. Reconstruction algorithms for ghost imaging and single-pixel imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(2): 0200001.
- [55] He W J, Sima B Y, Chen Y F, et al. A correction method for range walk error in photon counting 3D imaging LIDAR [J]. *Optics Communications*, 2013, 308: 211-217.
- [56] 翟鑫亮, 吴晓燕, 孙艺玮, 等. 单像素成像理论与方法 (特邀) [J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(12): 20211061.  
Zhai X L, Wu X Y, Sun Y W, et al. Theory and approach of single-pixel imaging (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(12): 20211061.
- [57] Shin D, Shapiro J H, Goyal V K. Performance analysis of low-flux least-squares single-pixel imaging [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2016, 23(12): 1756-1760.
- [58] Altmann Y, Ren X M, McCarthy A, et al. Lidar waveform-based analysis of depth images constructed using sparse single-photon data [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(5): 1935-1946.
- [59] Kang Y, Li L F, Liu D W, et al. Fast long-range photon counting depth imaging with sparse single-photon data [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3): 7500710.
- [60] Peng X, Zhao X Y, Li L J, et al. First-photon imaging via a hybrid penalty [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(3): 325-330.
- [61] Rehai P, Sua Y M, Zhu S Y, et al. Noise-tolerant single photon sensitive three-dimensional imager [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 921.
- [62] Boyd S, Vandenberghe L, Foybusovich L. Convex optimization [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(11): 1859.
- [63] 陈波, 杨靖, 杨旭, 等. 激光主动成像中散斑噪声对波前畸变校正性能的影响 [J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1012002.  
Chen B, Yang J, Yang X, et al. Effect of speckle noise on wavefront distortion correction in laser active imaging [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1012002.
- [64] Rapp J, Goyal V K. A few photons among many: unmixing signal and noise for photon-efficient active imaging [J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2017, 3(3): 445-459.
- [65] Cheng Y, Zhao X Y, Li L J, et al. First-photon imaging with independent depth reconstruction [J]. *APL Photonics*, 2022, 7(3): 036103.
- [66] Marino R M, Stephens T, Hatch R E, et al. A compact 3D imaging laser radar system using Geiger-mode APD arrays: system and measurements [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5086: 1-15.
- [67] McGill M, Markus T, Scott V S, et al. The multiple altimeter beam experimental lidar (MABEL): an airborne simulator for the ICESat-2 mission [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(2): 345-352.
- [68] McCarthy A, Krichel N J, Gemmell N R, et al. Kilometer-range, high resolution depth imaging via 1560 nm wavelength single-photon detection [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8904-8915.
- [69] Warburton R E, McCarthy A, Wallace A M, et al. Subcentimeter depth resolution using a single-photon counting time-of-flight laser ranging system at 1550 nm wavelength [J].

- Optics Letters, 2007, 32(15): 2266-2268.
- [70] Guan Y Q, Li H C, Xue L, et al. Lidar with superconducting nanowire single-photon detectors: recent advances and developments[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 156: 107102.
- [71] Xia H Y, Shentu G L, Shangguan M J, et al. Long-range micro-pulse aerosol lidar at 1.5  $\mu\text{m}$  with an upconversion single-photon detector[J]. Optics Letters, 2015, 40(7): 1579-1582.
- [72] Degnan J J. Satellite laser ranging: current status and future prospects[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, GE-23(4): 398-413.
- [73] Zappa F, Ripamonti G, Lacaita A, et al. Tracking capabilities of SPADs for laser ranging[EB/OL]. (1993-06-01) [2022-01-05]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19940011097>.
- [74] Courde C, Torre J M, Samain E, et al. Lunar laser ranging in infrared at the Grasse laser station [J]. Astronomy & Astrophysics, 2017, 602: A90.
- [75] Rapp J, Tachella J, Altmann Y, et al. Advances in single-photon lidar for autonomous vehicles: working principles, challenges, and recent advances [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2020, 37(4): 62-71.
- [76] Halterman R, Bruch M. Velodyne HDL-64E lidar for unmanned surface vehicle obstacle detection [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7692: 123-130.
- [77] Wang H, Wang B, Liu B B, et al. Pedestrian recognition and tracking using 3D LiDAR for autonomous vehicle [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 88: 71-78.
- [78] Belkin I, Abramenko A, Yudin D. Real-time lidar-based localization of mobile ground robot [J]. Procedia Computer Science, 2021, 186: 440-448.
- [79] Behroozpour B, Sandborn P A M, Wu M C, et al. Lidar system architectures and circuits [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(10): 135-142.
- [80] Xie X, Bai L, Huang X M. Real-time LiDAR point cloud semantic segmentation for autonomous driving [J]. Electronics, 2021, 11(1): 11.
- [81] Lindell D B, O' Toole M, Wetzstein G. Towards transient imaging at interactive rates with single-photon detectors [C] // 2018 IEEE International Conference on Computational Photography, May 4-6, 2018, Pittsburgh, PA, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [82] Chan S, Warburton R E, Garipey G, et al. Fast tracking of hidden objects with single-pixel detectors [J]. Electronics Letters, 2017, 53(15): 1005-1008.
- [83] Du P F, Zhang F, Li Z P, et al. Single-photon detection approach for autonomous vehicles sensing [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(6): 6067-6078.

## Review of Advances in Single-Photon LiDAR

Zhang Hanyi<sup>1</sup>, Zhao Xinyu<sup>1</sup>, Zhang Yicheng<sup>1</sup>, Zhang Labao<sup>2</sup>, Sun Mingjie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;*

<sup>2</sup>*Research Institute of Superconductor Electronics, School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China*

### Abstract

**Significance** Single-photon LiDAR is widely combined with emerging imaging technology fields such as low-light detection, ultra-long-range detection, artificial intelligence (AI), and computational imaging, producing remarkable research results. Conventional linear detection LiDAR can be divided into different categories of scanning detection, direct detection, coherent detection and non-scanning detection. LiDAR systems based on the time-of-flight (ToF) technique are capable of ranging detection of remote targets by directly interpreting the time difference between the outbound and return laser pulses. Initially, researchers tended to achieve long ranging distance by increasing the laser output power and the aperture of transceiver system. Adopting these methods, the weight and power consumption of the LiDAR system are further increased. Besides, the pursuit of high signal-to-noise ratio (SNR) echo signals in conventional LiDAR resulted in low system frequency and weak detection ability of dynamic targets. In long-distance ranging, conventional LiDAR systems were susceptible to extreme conditions such as dust and fog weather and lost effectiveness.

With the advancement of single-photon detector (SPD) and precision electronic-timing technology, LiDAR based on time-correlated single photon counting (TCSPC) appeared, which has become a new way to solve the above problems. Compared with the conventional LiDAR systems, TCSPC LiDAR systems have the characteristics of higher sensitivity, higher depth accuracy, shorter acquisition time and higher photon efficiency. By time accumulation of the single echo and photon statistics, TCSPC LiDAR does not rely on single pulse measurement results, so that it does not emphasize on high SNR of single detection pulse and high laser power. TCSPC LiDAR with the detection sensitivity reaching the single-photon level is called single-photon LiDAR. In the single-photon LiDAR system, only one photon can be detected and tagged, which achieves the theoretical detection limit. This new photon statistics scheme emphasizes on the full employment of the limited echo photon information, thus improving the photon utilization rate while maintaining high sensitivity. In improving working distance and detection efficiency of the LiDAR system, TCSPC has incomparable advantages over the traditional technology.

Many corresponding advances have been achieved in single-photon LiDAR systems, but they still face a series of challenges in noise suppression and performance improvement such as working range and depth accuracy. This review aims to act as an introduction to the topics of ToF-based single-photon LiDAR for the general reader and to provide a brief



introduction to the current technologies available.

**Progress** The process of accumulating discrete echoes in single-photon LiDAR can be regarded as targets acquisition through laser pulses, which means that a few echo photons contain abundant target information. Firstly, the ToF ranging method, TCSPC technique and fundamental principle of single-photon LiDAR are summarized. Then, the single-photon LiDAR system components are introduced, including the laser, optical transceiver system, single-photon detector, TCSPC module, and the control and data processing unit. Performances of lasers applied in typical single-photon LiDAR are listed (Table 1). The main abilities of single-photon LiDAR are ranging distance and detection accuracy. In order to achieve high-precision long-distance three-dimensional imaging of single-photon LiDAR, one method is to optimize the hardware part. The traditional way is to promote transmission laser power and increase the efficiency of optical transceiver system by expanding the receiving aperture and suppressing the noise of the optical transceiver structure. The main parameters of single-photon detectors include dark count rates (DCRs), dead time and detection efficiency.

Image reconstruction algorithms were designed for solving the case of low echo photons in single-photon LiDAR. For example, the first-photon imaging algorithm was adopted to improve the utilization efficiency of echo photons. According to the detection probability model of echo photons in the first-photon imaging algorithm, the spatial structure and reflectivity of the three-dimensional scene are acquired, and the target information is fully reconstructed with high quality. Before imaging depth recovery, noise suppressed or removed cannot be neglected. Mainstream algorithms, such as sparse Poisson intensity reconstruction algorithm (SPIRAL), optimize the regularization term in different scenes to achieve the optimal reconstructed image. In the end, the main development history of single-photon LiDAR is introduced (Fig. 8), and the technical applications of single-photon LiDAR in long-distance detection imaging and autonomous vehicles are discussed. At present, the farthest imaging and ranging working distance of single-photon LiDAR has been expanded from sub-kilometer level (2013) to 200 km (2021), and the imaging accuracy has reached millimeter level from sub-decimeter level. It should also be pointed out that the single-photon LiDAR was developed in the direction of real-time target recognition. Single-photon LiDARs are capable of dynamic targets tracking and transient images recording, which is expected to be applied in the field of autonomous vehicles and space fragment monitoring.

**Conclusion and Prospects** Single-photon LiDAR has gained extensive attention and produced remarkable research in long-range detection imaging because of its single-photon detection and tagging ability. At present, the research on single-photon LiDAR mainly demonstrates the imaging principle and reconstruction algorithm in the laboratory, and more research is needed to verify the effect and adaptability of few-photon algorithms in the actual environment. In summary, single-photon LiDAR still needs in-depth and detailed explorations to further promote the system performance and optimize new reconstruction algorithms.

**Key words** imaging systems; LiDAR; time-correlated single-photon counting; single photon; long-range detection imaging; autonomous vehicles