

# 单光子激光测距技术研究进展

邵禹<sup>1,2</sup>, 王德江<sup>1\*</sup>, 张迪<sup>1,2</sup>, 陈成<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 随着工业的不断发展,单光子激光测距凭借其探测距离远和探测灵敏度高等特点在测绘领域扮演着不可或缺的角色。本文介绍了单光子激光测距的关键技术、单光子探测器以及着重介绍了单光子激光测距技术应用领域的研究进展,并对未来单光子激光测距的发展进行了总结和展望。

**关键词** 成像系统;单光子测距;单光子探测器;时间相关光子计数技术;飞行时间法;雪崩二极管

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011020

## Research Progress of Single Photon Laser Ranging Technology

Shao Yu<sup>1,2</sup>, Wang Dejiang<sup>1\*</sup>, Zhang Di<sup>1,2</sup>, Chen Cheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Aviation Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin, 130033, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** With the development of industry, the single photon laser ranging plays an indispensable role in the field of surveying and mapping with its long detection distance and high detection sensitivity. This paper introduces the key technology of single photon laser ranging, single photon detector, and focuses on the research progress of single photon laser ranging technology, and summarizes and prospects the development of single photon laser ranging in the future.

**Key words** imaging systems; single photon ranging; single photon detector; time correlated photon counting technology; time of flight; avalanche diode

**OCIS codes** 120.4820; 250.1345; 030.5260

## 1 引 言

激光器的出现,改变了传统的测距方式。激光在大气中传播发散角小,且能量集中,抗干扰性强,因此利用激光可以实现更远距离且精度较高的测距,根据测距原理分类,激光测距主要包括以下三种方法:飞行时间法(TOF)<sup>[1]</sup>、干涉法<sup>[2]</sup>和三角法<sup>[3-4]</sup>。三种测距方法由于测距原理不同,导致测距性能各不相同,如测量距离、精度等,飞行时间法通常用于远距离测距,测量距离在 20 km 以上,三角

法和干涉法多用于近距离测距,由于干涉法的测距精度高,多用于精密仪器的检测。近年来随着激光器、探测器以及相关电子学的发展,激光测距又衍生出一种新的测距方式,即单光子激光测距法。单光子激光测距系统中光子探测器可以对光子进行响应,进而实现更远距离的测量。目前,单光子激光测距技术发展迅速,在工业生产与日常生活中占有重要地位。

本文将从单光子激光测距关键技术、单光子探测器类型和单光子激光测距在各个领域的应用研究

收稿日期: 2021-01-18; 修回日期: 2021-02-17; 录用日期: 2021-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(61905240, 61675202)

\*E-mail: wangdj@ciomp.ac.cn

现状三个方面对国内外相关研究成果进行汇总和综述,旨在为本领域的研究人员提供参考。

## 2 单光子激光测距关键技术

### 2.1 时间相关光子计数法

由于光子探测器的灵敏度很高,需要在低背景噪声环境下才能通过光子计数法进行激光测距,然后对回波光子的计数。20 世纪末,开展了关于时间相关的光子计数法的研究,充分利用目标光子的相关特性,有效地将混杂在噪声中的目标回光子提取出来。最初是使用时间振幅转换器(TAC),将采集的时间转换为电压幅值,然后将此信息进行处理获取目标距离值。随着科技的进步,时间数字转换器(TDC)的出现进一步推进了单光子测距的发展,TDC 可以将采集的时间信号转换为数字信号。

TDC 的工作原理主要是系统接收到起始信号之后,需要经过一个逻辑门延迟链,当终止信号到达时,我们可以根据起始信号在延迟链中的位置来确定起始信号与终止信号之间的时间间隔,若每个延迟单元的延迟时间为  $T_d$ ,起始信号经过  $N$  个延迟的单元,则起始信号与终止信号之间的时间间隔为  $NT_d$ 。

测距系统采集高频脉冲的回波信号时,由于测量距离远且回波信号微弱,所以单个脉冲串可以接收到的目标回光子大约是一个,然后将多个脉冲串的采集结果对应累加可以得到光子计数分布直方图,由于目标光子与噪声光子均可使探测器产生雪崩效应,而噪声光子的时间相关性弱,所以噪声光子随机触发雪崩效应,且均匀分布在探测时间区间内。而目标回光子具有很强的时间相关性,所以探测到的目标回波信号经过多脉冲累积之后会产生与激光出射波形相似的包络形状。脉冲累积过程如图 1 所示。目前,主要有峰值法、质心法以及深度学习法<sup>[5]</sup>三种方法处理回光子累积直方图并提取目标的位置信息。峰值法是通过峰值获取算法来提取直方图中的峰值位置进而得到目标的位置信息;质心法是通过相关算法计算累积直方图的质心位置获取目标的位置信息,而深度学习法获取目标的位置信息则是通过仿真产生大量的数据集,利用一维卷积神经网络进行数据集训练,该方法解算的回波时刻精度高,且可以解决复杂回波条件下的位置解算。但是深度学习法仍有一定的弊端,训练的数据集需要包含所有情况,否则无法对未训练情况的测量结果进行解算。

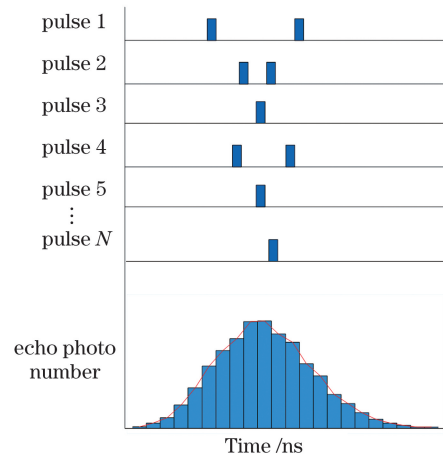


图 1 时间相关光子计数分布直方图

Fig. 1 Histogram of time-correlated single photon counting distribution

为探究荧光材料的寿命,科学家设计的光子计数技术在测距领域逐渐得到广泛的应用。2007 年, Sjöqvist 等<sup>[6]</sup>基于单光子探测器和皮秒脉冲激光器研制了高分辨率激光测距系统。受探测器以及计时器的影响,该系统无法实现较高的探测精度。但是该系统通过分析采集的数据直方图实现对目标距离信息的提取,对遥感领域的发展有重要意义。2010 年, Shrestha 等<sup>[7]</sup>研究了基于时间相关光子计数法的扫描式激光测距系统,利用波长为 532 nm、脉宽为 480 ps 且重复频率为 8 kHz 的激光器实现了地形目标和浅海水深度的测量。2014 年, Sjöqvist 等<sup>[8]</sup>研制出高分辨率的激光测距及成像系统,测量精度小于厘米量级,且实现了在白天的较大动态范围的测量,可以准确提取目标的特征信息,但是该系统的信息扫描采集速度慢。2020 年, 韩威等<sup>[9]</sup>研制了远程单光子探测系统,该系统基于飞行时间法和时间相关光子计数累积处理回波数据方法,且利用多重复频率方法有效解决了测距中存在模糊距离的问题,大大增加了测量距离。

### 2.2 飞行时间法

单光子激光测距主要是通过飞行时间法对目标进行测距,即通过激光器发射激光,激光照射到目标之后,目标将激光漫反射回来,通过光学接收系统将反射信号接收到探测器靶面。通过测距系统的计时模块可以记录激光出射产生起始信号的时间以及接收到目标反射回波产生终止信号的时间<sup>[10]</sup>,目标距离  $L$  可由公式  $L = \frac{c}{2}(t_2 - t_1)$  求得,  $c$  为光在真空中的传播速度,  $t_1$ 、 $t_2$  分别是信号起始时间和终止时间。

飞行时间法主要通过激光器、光学发射系统、光学接收系统、探测系统和信号处理系统实现,如图 2 所示。激光器发射特定波长的激光经过光学发射系统照射到目标;光学发射系统用于对激光器出射激光进行准直扩束,抑制激光的发散角,提高光束的质量;光学接收系统用于实现对目标漫反射回波的收集;而探测系统用于对接收系统收集的回波进行探测,将收集到的光信号转换为电信号输出;信号处理系统通过相应的算法处理激光的回波数据,解算出激光在测距机与目标之间的往返时间,根据飞行时间法,获取目标距离信息。

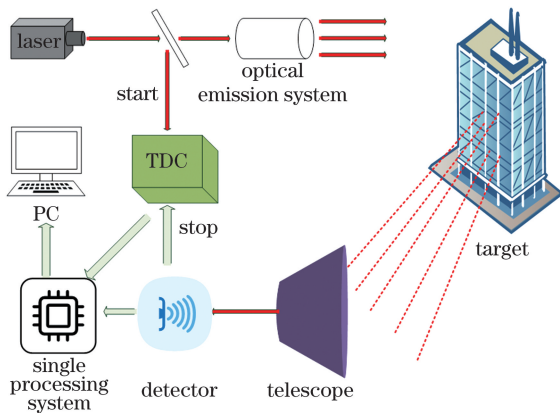


图 2 单光子激光测距系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single photon laser ranging system

传统飞行时间法激光测距主要是通过激光器发射连续的激光,在照射到目标之后,通过接收回波并计算激光在目标与探测器之间的传播时间,但是激光在空气中受到大气的扰动,导致激光衰减太快,所以测量距离越远所需要的激光发射的能量就越大,同时,大功率激光器的体积和重量都比较大,因此很多领域大功率连续激光测距系统的应用会受到限制。

单光子飞行时间法激光测距系统采用了高频窄线宽脉冲激光器,结合时间相关光子计数方法,可以有效提高光子利用效率,且高频脉冲激光器的体积、重量远小于连续大能量激光器。因此单光子激光测距系统可以广泛应用于机载和星载等平台。

随着飞行时间技术的发展,基于飞行时间法的单脉冲测距技术日益成熟,但是单脉冲测距系统的测程很短,只有数百米,且测量误差较大。黄民双<sup>[11-12]</sup>提出一种在特定距离下的误差计算方法,并通过最小二乘法拟合出误差补偿曲线,实现了对飞行时间法的单脉冲测距方法的误差补偿,提高了系统的测距精度。

### 3 单光子探测器的类型

光子探测器作为单光子激光测距系统的核心,在单光子激光测距系统中,激光器发射脉冲激光经过往返于目标与激光器之间的大气衰减,回波能量微弱,为了实现对单个光子的探测,以波长为 1064 nm 的激光为例,单个光子的能量为  $1.86 \times 10^{-19}$  J,因此探测器需要很大的增益,并且噪声小,目前可以实现光子探测的探测器主要包括以下三种:盖格模式雪崩二极管(Gm-APD)、光电倍增管(PMT)以及超导纳米线单光子探测器(SNSPD)。

#### 3.1 光电倍增管

光电倍增管的工作原理主要是当光照射光电倍增管的阴极时,光电倍增管的阴极会受激发射电子,激发出的电子在电场的作用下进入倍增系统,电子经过若干倍增极后,阴极发射的少数电子会不断增加,这样倍增后的大量电子将到达光电倍增管的阳极,最终将入射的光能转化为电流或电压值输出。光电倍增管工作原理图如图 3 所示。

光电倍增管作为最早的光电探测器,其特点主要是增益很大,响应灵敏,但是随着光电倍增管应用领域要求的提高,光电倍增管正逐渐朝着小型化和集成化方向发展。得益于光电倍增管制作工艺的发展与进步,光电倍增管的价格在逐渐降低,同时光电倍增管的性能也在不断提高,如受噪声的影响在不断降低、光电倍增管的稳定性的提高、受振动干扰的问题在不断优化等。

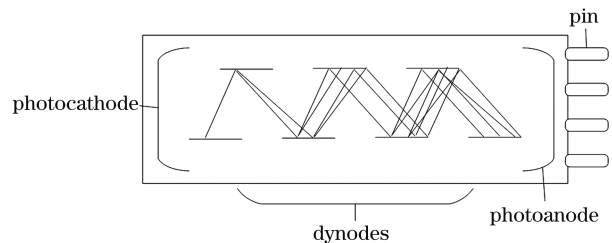


图 3 PMT 工作原理图

Fig. 3 Working principle of PMT

#### 3.2 盖格模式雪崩二极管

Gm-APD 主要是通过利用 P-N 结中载流子的碰撞进而使载流子产生雪崩效应。通过在 P-N 结中将低浓度的材料掺杂在其中,空间电荷区的电场随着 P-N 结的反向偏置电压的增强而增强,当电子和空穴经过空间电荷区时会被电场加速,获得大量能量,加速后的粒子会与晶体的原子相互碰撞,产生新的电子-空穴对,新的电子-空穴对再次经过空间电荷区时,会被电场加速,再次与晶体的原子相互碰

撞产生电子-空穴对,这样的过程会不断重复,当 P-N 结的反向偏置电压超过击穿电压之后,载流子数量就会迅速增加,同时反向电流也会急剧增加,此时就是盖格模式下的雪崩二极管,工作在盖格模式下的雪崩二极管才能实现对光子的响应。Gm-APD 的工作原理如图 4 所示。

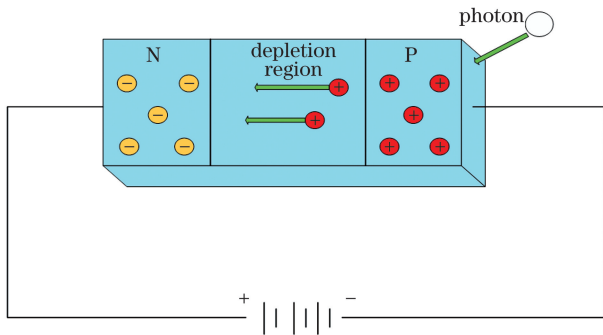


图 4 Gm-APD 工作原理图

Fig. 4 Working principle of Gm-APD

受材料特性的影响,选用不同倍增材料的探测器,其探测性能也各不相同,对于不同波段的探测效率会存在很大差异,目前市场上常见的两种 APD 是硅基雪崩二极管(Si-APD)和铟镓砷/铟磷雪崩二极管(InGaAs/InP-APD),分别是以硅和铟镓砷/铟磷作为倍增材料的探测器。

随着硅基雪崩二极管的普及,其开始逐渐应用于工业生产以及科学研究等领域。在 2009 年,德国公司研制出了 Si-APD 阵列式探测器<sup>[13]</sup>,阵列式光子探测器的研制使得单光子激光测距的应用领域更加广泛,但是其击穿电压较高。我国的半导体产业起步较晚,但是仍取得令人瞩目的成果。2015 年,哈尔滨工业大学团队设计了紫外增透型 Si-APD 探测器,主要用于对紫外光子的探测<sup>[14]</sup>。2019 年,厦门大学研究小组实现了低击穿电压的 Si-APD,并可以对近红外波段实现有效探测<sup>[15]</sup>。

Gm-APD 在对光子产生响应之后,即探测器发生雪崩效应,光电流快速增加,持续的雪崩效应使得探测器无法对下一个光子进行响应,所以门控电路的主要作用就是快速更新探测器的状态,让它在短时间内完成雪崩,且可以及时响应下一个光子。米兰理工的研究团队主要研究如何减小探测器的雪崩效应持续时间,该团队研制的主动淬灭技术有效降低了探测器的死时间,提高了探测器的工作性能<sup>[16-17]</sup>。2006 年,日本研究团队实现了 800 MHz 的正弦门控淬灭技术<sup>[18]</sup>,后该团队将正弦门控信号频率提高到 1.5 GHz<sup>[19-20]</sup>,但是其电路噪声较大。

2018 年陈雨等<sup>[21]</sup>通过优化电路,减小了正弦门控淬灭电路噪声。

相比于光电倍增管,盖格模式的雪崩二极管主要特点是对红外波段的响应灵敏,体积小,且不需要高压工作电压,但是它对温度变化很敏感<sup>[22]</sup>以及盖格模式探测器的死时间与暗计数将影响探测器的计数率以及虚警率,因此在选择 Gm-APD 作为光子探测器时,要根据探测环境设计相应的算法对探测器的缺陷作针对性优化,平衡死时间与暗计数对探测带来的影响。

### 3.3 超导纳米线单光子探测器

近年来随着超导材料研究的不断深入,越来越多超导特性材料广泛应用于科学研究,而超导纳米线单光子探测器就是其中之一,超导纳米线单光子探测器的探测原理是在特定温度下材料实现零电阻超导特性,然后给超导材料施加偏置电压,其电流大小略低于材料的临界电流,当有光子入射到探测器表面时,光子的能量将会改变材料中的电流分布,使得局部电流超过材料的临界电流,材料就会在部分区域内失去超导特性,就可以通过电路输出一个宏观的电压幅值,再对探测器及时降温,即可使有阻区域重新进入超导状态。其工作原理图如图 5 所示。

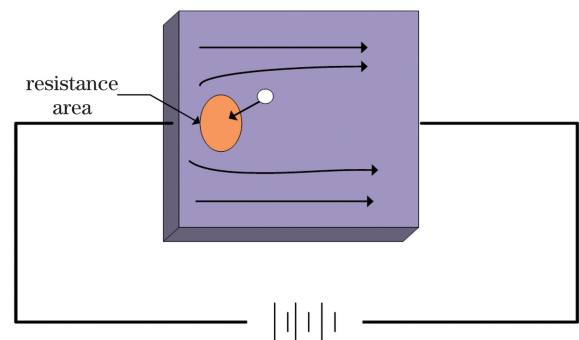


图 5 SNSPD 工作原理图

Fig. 5 Working principle of SNSPD

2001 年, Gol'tsman 等<sup>[23]</sup>首次研制了超导纳米线单光子探测器,并用该探测器探测到了光子响应信号。Jahanmirinejad 等<sup>[24]</sup>科学家研制了基于 NbN 的超导纳米线单光子探测器,并实现了从紫外光到红外光的宽光谱响应。2007 年, Yang 等<sup>[25]</sup>对 NbN-SNSPD 的光子响应过程提出了热模型和电路模型,较为合理地解释了超导纳米线单光子探测器的探测原理。2011 年, Marsili 等<sup>[26]</sup>制备了超窄 NbN 纳米线条,这种超窄结构探测器实现了对 0.5~5  $\mu\text{m}$  波段光子的探测,比 90 nm 宽的纳米线条探测器探测效率更高。国内对超导纳米线光子探

测器的研究发展迅速,主要是南京大学与中国科学院上海微系统与信息技术研究所对相关内容进行研究。2017 年,中国科学院上海微系统与信息技术研究所<sup>[27]</sup>基于 NbN 研制的 SNSPD 实现了对 1.55  $\mu\text{m}$  波长的光子 52.5% 的探测效率。

超导纳米线单光子作为新兴的光子探测器,其优势明显,该探测器死时间极短,暗计数很小,用于单光子测距可以忽略。但是 SNSPD 的工作温度在 2.5 K 左右,严格的温度要求限制了超导纳米线单光子探测器的应用。近年来超导纳米线单光子探测器主要在激光测距领域用于地对空的探测以及量子通信等领域。

## 4 单光子激光测距的应用领域及研究进展

激光在大气中传播稳定,受干扰较小,而且光的传播速度快,因此可以实现远距离、快速测距,结合 TDC 可以实现高分辨率测量,这些特点使得单光子激光测距的应用领域很广泛,本文主要介绍了航空平台单光子激光测距系统、单光子成像和地面对空间碎片和卫星测距三个领域的应用。

### 4.1 航空平台单光子激光测距系统

航空平台搭载单光子激光测距系统可以根据航空平台的类型分为机载单光子激光测距系统和星载单光子激光测距系统。

对于机载平台,2002 年,Deignan<sup>[28]</sup>设计了机载平台下的光子计数激光高度仪,该系统通过被动调 Q 激光器产生千赫兹的脉冲激光,脉冲能量为微焦量级,飞机以几千赫的速度飞行时,测距仪可以对地面建筑物、树冠和地形地貌进行绘制,且精度在分米量级。2005 年,麻省理工学院林肯实验室<sup>[29]</sup>设计了一种机载单光子测距系统,通过  $32 \times 32$  的阵列硅基 APD 单光子探测器,利用高重复频率激光照射目标获取目标距离直方图,可用于对地面隐藏、伪装目标的探测,但是该系统从数据采集到数据和图像的处理再到数据传输并实现可视化需要时间较长。2015 年,袁帅映等<sup>[30]</sup>为满足机载远程测距的应用需求,经过理论计算并设计仿真,实现了机载测距系统的测距范围的提高,减小测距盲区到 500 m 之内,该系统采用双通道固定分光比例,有效提高了测距系统的动态范围,在 500 m~100 km 范围内测距系统的探测概率不小于 96%,该方法对于抑制近场强回波光束效果明显,同样,对于远距离测量回波也会抑制,由于远场回波中包含目标回波光光子数较少,所以

分光容易降低远场的信噪比。2017 年,美国航空航天局<sup>[31]</sup>利用掺铒光纤激光器和光子计数探测器,在机载平台下完成在 3~13 km 范围内环境中二氧化碳排放量的测量。同年,国内学者王天顺等<sup>[32]</sup>研制了适用于机载的单光子远程激光测距系统,该系统可以实现百千米测距,且测距精度达到 2 m。

星载方面的单光子激光测距国外发展较早,美国在相关领域已有数十年的研究历史,1998 年,Massa 等<sup>[33]</sup>根据时间相关光子计数法研发了首台光子计数激光测距机。美国航空航天局研制了用于卫星探测的 SLR2000 光子计数测距系统<sup>[34]</sup>,该系统利用 Nd:YAG 调 Q 激光器发射 532 nm 脉冲激光,单脉冲能量为 60  $\mu\text{J}$ ,但是脉宽为 300 ns,有效降低了脉冲激光的能量,将激光的重复频率提升至 2 kHz。目前,星载激光高度计已经广泛应用于地球地形地貌的研究领域,但是传统的单点激光高度计测量速度慢,无法快速采集数据,而且传统的线性探测方式需要高能量激光器,在星载条件下能耗较大。2017 年,华东师范大学研究团队<sup>[35]</sup>研制了多光束大阵列探测器的光子计数成像系统,该系统以 100 束激光作为光源,结合阵列式单光子激光探测器将反射回波收集探测,多通道检测数据采集速度快,多通道探测器噪声小,对背景噪声抑制效果好,该方案有效消除了传统星载高度计的弊端。2017 年美国航空航天局发射的 ICESat-2<sup>[36]</sup>使用 532 nm 的激光测高仪,配合单光子探测器完成了对冰川、冰盖高度的变化,陆地和植被高度,海平面高度等地貌特性信息的测量。

### 4.2 单光子成像

自时间相关的光子计数激光测距仪诞生以来,光子计数激光测距系统时间分辨率可达到皮秒量级,2000 年,Pellegrini 等<sup>[37]</sup>使用 25 MHz 重复频率的 850 nm 波长调 Q 激光器,出射光的脉宽为 10 ps,脉冲能量为 10 pJ,使用硅基雪崩二极管探测反射回波,通过该系统可以在 50 m 之内探测目标,探测深度分辨率可以达到 3 mm。2001 年,Wallace 等<sup>[38]</sup>在此基础上进行了三维(3D)成像实验,在探测 50 m 处目标实验中,实现了 120  $\mu\text{m}$  的深度分辨率。2009 年,McCarthy 等<sup>[39]</sup>改进光子计数技术,添加扫描装置,利用微焦量级激光照射目标,结合单光子探测器,并对 325 m 处的非合作目标进行构建,实现空间和深度分辨率达到厘米级探测。2011 年,Kong 等<sup>[40]</sup>利用两个单光子探测器将接收信号划分,实现利用少量光子对目标的 3D 探测,该方法有

效降低了探测的虚警率且提高了图像的处理速度。在 2014 年, Kirmani 等<sup>[41]</sup>提出了首光子成像的方法, 该方法利用单光子探测器, 在光子数极少的情况, 图像的每个像素只需要一个光子, 即可实现对图像的恢复, 极大地缩短了成像的时间。2016 年, Degnan<sup>[42]</sup>研制了机载平台下的单光子激光测距系统, 该系统在飞机运动条件下可以实现较高分辨率的测量, 测距系统主要通过高频脉冲激光器向地面发射激光脉冲, 激光器频率为 60 kHz, 激光脉宽为亚纳秒, 然后利用 Gm-APD 阵列来接收目标反射回波。该系统测量精度可以达到亚分米水平, 并且能够对白天探测噪声进行抑制。

国内的光子成像技术的发展越来越迅速。2011 年, 中国科学院上海技术物理研究所<sup>[43]</sup>在单点激光测距的基础上, 研制了基于光子计数三维成像激光雷达系统, 该系统采用 532 nm 被动调 Q 激光器作为激光发射源, 其发射波长为 532 nm, 脉宽为 600 ps, 单脉冲能量 1  $\mu$ J, 最大脉冲重复频率可达到 13 kHz。2012 年, 南京理工大学的何伟基等<sup>[44]</sup>提出基于盖格模式雪崩二极管的光子计数二维扫描成像方法。2017 年, 哈尔滨工业大学 Xu 等<sup>[45-46]</sup>提出了一种基于泊松概率响应模型和质心算法的信号恢复方法。利用该方法得到了高精度的深度与强度融合的三维图像, 测距精度 0.6 cm。2020 年, 中国科学技术大学<sup>[47]</sup>利用超导纳米线单光子探测器实现了对 45 km 远距离的 3D 成像实验, 利用少数单光子实现远距离成像代表着基于单光子测距系统的低功耗、高分辨成像系统的进步。

利用单光子激光测距系统对目标进行 3D 成像技术的发展越来越迅速, 该系统的发展趋势主要是: 1) 采用高重复频率、超窄脉宽和高能量激光器; 2) 对大量回波数据实现快速采集以及处理; 3) 在复杂环境下对目标进行成像, 如在白天进行成像, 在强背景噪声中提取目标信号以及对运动目标的成像等。

#### 4.3 地面对空间碎片及卫星测距

近年来, 我国航天事业取得丰硕的成果, 主要是针对月球的探索。随着太空中飞行器和太空碎片的不断增加, 精确探测太空中飞行器以及太空碎片的位置对于成功发射卫星有着重要意义<sup>[48]</sup>。

目前, 空间探测面临着以下难题, 首先, 月球距离地球 380000 km, 地面激光照射进入太空后, 经过大气的衰减等影响, 漫反射回波光子数量极少, 少数回波光子被淹没于噪声中, 造成目标光子的接收提取困难。其次, 由于太空中的探测目标的影响, 即探

测目标的运动状态、运动姿态以及目标的反射等未知因素的影响, 增加了地面对太空目标的探测难度。

我国科学家针对上述难点展开了研究, 通过利用 SNSPD 高灵敏度单光子探测器结合门控电路实现了对空间碎片的高精度探测。

2016 年, 中国科学院云南天文台 Xue 等<sup>[49]</sup>根据理论推导, 证明了门控条件利用超导纳米线单光子探测器的探测系统可以实现 830 km 空间碎片的探测, 并使用 1064 nm 波长激光结合 SNSPD 完成对卫星的激光测距。同年, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 Li 等<sup>[50]</sup>针对卫星激光测距, 设计了基于 532 nm 波长的超导纳米线光子探测系统, 在暗计数极低的情况下在佘山天文台完成了对距离 3000 km 的目标卫星的测量, 测量精度在 8 mm。中国科学院上海天文台张海峰等<sup>[51]</sup>在高频率、高功率激光器和灵敏度的单光子雪崩二极管探测器的基础上建立了一套高效的太空碎片探测系统, 可以实现在白天对 0.3~20 m<sup>2</sup> 空间碎片的观测。2019 年, 中国科学院上海天文台邓华荣等<sup>[52]</sup>研制了 4 kHz 重复频率的激光测距系统, 相比于重复频率为 1 kHz 的测距系统, 随着重复频率的提高, 对卫星测量的精度提高了 1.62 倍。同年, 刘通等<sup>[53]</sup>通过对漫反射测距数据的分析实现了对目标姿态的估算。该算法通过建立漫反射激光测距模型, 并对目标运动状态进行了仿真分析, 最终提出了估算目标姿态的方法。2020 年, 中国科学院云南天文台张海涛等<sup>[54]</sup>利用阵列式超导纳米线光子探测器对轨道高度为 1000 km、面积为 0.045 m<sup>2</sup> 的小目标进行了准确探测。实验中采用了脉宽为 5.7 ns、能量为 70~150 W 的脉冲激光器。

## 5 结束语

随着科学技术的快速发展, 激光测距的发展迅速且技术日新月异, 作为新兴的激光测距方法, 单光子激光测距技术已经广泛应用于机载远距离激光测距、单光子激光成像、星载单光子激光测距和地基对太空碎片探测等领域, 并且取得丰硕成果。但是目前单光子激光测距仍然有很大的发展前景。单光子激光测距系统的优化主要是针对激光器和单光子探测器的性能优化。

单光子激光测距要实现远距离的传播就需要考虑大气对激光传输的影响, 所以激光器波长选择在大气传输窗口, 现在常用的激光器是 Nd:YAG 激光器出射 532 nm 的激光, 以及经过 Nd:YAG 激

光器倍频后波长为 1064 nm 的激光器,但是这两个波长会对人眼产生损伤,未来需将人眼安全波段的激光用于探测,即波长在 1.5  $\mu\text{m}$  以上。同时,据上述单光子激光测距应用领域研究进展可以看出,目前激光器的出射光多为窄线宽高频脉冲激光,且脉冲激光的脉宽已经实现皮秒量级,因此未来单光子激光测距系统使用的激光器的发展方向将趋于 1.5  $\mu\text{m}$  以上波长的体积小、重量轻、窄线宽和高重复频率的特点。

单光子激光测距系统使用的探测器主要是光电倍增管、盖格模式的雪崩二极管和超导纳米线单光子探测器。三种探测器性能各不相同,可以根据使用环境选择合适的探测器,发挥探测器最优性能,但是低暗计数、短死时间及可实现连续探测是单光子探测器的主要发展方向,与此同时,目前国内外都致力于二维和三维单光子探测器阵列的研制,用于弥补单个探测器在光子数分辨方面的缺陷。

### 参 考 文 献

- [1] Chen Q S, Yang C W, Pan Z W, et al. A brief introduction on the development of laser time-of-flight distance measurement technology[J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32(1): 7-10.  
陈千颂, 杨成伟, 潘志文, 等. 激光飞行时间测距关键技术进展[J]. *激光与红外*, 2002, 32(1): 7-10.
- [2] Burgarth V, Zhang C, Zeid A A, et al. Diode laser interferometer for absolute distance measurement[J]. *Technisches Messen*, 2003, 70(2): 53-58.
- [3] Wu J F, Wang W, Chen Z C, et al. Study on the analysis for error in triangular laser measurement and the method of improving accuracy[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*, 2003, 20(5): 89-91.  
吴剑锋, 王文, 陈子辰, 等. 激光三角法测量误差分析与精度提高研究[J]. *机电工程*, 2003, 20(5): 89-91.
- [4] Chang C, Zhang Z F. Study on the error in triangular laser measurement[J]. *China Science and Technology Information*, 2006(23): 61-62, 64.  
常城, 张志峰. 激光三角法测量的误差研究[J]. *中国科技信息*, 2006(23): 61-62, 64.
- [5] Hu S J, He Y, Yu J Y, et al. Method for solving echo time of pulse laser ranging based on deep learning[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1010001.  
胡善江, 贺岩, 俞家勇, 等. 基于深度学习的脉冲激光测距回波时刻解算方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1010001.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Sjöqvist L, Henriksson M, Jonsson P, et al. Time-correlated single-photon counting range profiling and reflectance tomographic imaging [J]. *Advanced Optical Technologies*, 2014, 3(2): 187-197.
- [9] Han W, Yan R T, Yang X, et al. Photon remote detection based on multiple repetition frequency for solving ambiguity [J]. *Radio Engineering*, 2020, 50(8): 706-710.  
韩威, 闫瑞涛, 杨旭, 等. 基于多重复频率解模糊的光子远程探测[J]. *无线电工程*, 2020, 50(8): 706-710.
- [10] Delaye V, Labeye P. High-resolution eye-safe time-of-flight laser ranging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4035: 216-225.
- [11] Huang M S. Time-of-flight laser ranging technique of single transmitted pulse[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 120007.  
黄民双. 单发脉冲飞行时间激光测距技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 120007.
- [12] Huang M S, Liu X C, Ma P, et al. Periodic error compensation of pulsed time-of-flight laser ranging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0317004.  
黄民双, 刘晓晨, 马鹏, 等. 脉冲飞行时间激光测距系统中周期误差补偿[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(3): 0317004.
- [13] Sadygov Z, Zerrouk A F, Ariffin A, et al. Spatial distribution of photo-sensitivity in new micro-pixel avalanche photodiodes: assembly of 64-element arrays [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, 610(1): 390-392.
- [14] Wang X D. Optimization of the enhancement of the Si-based APD for near-ultraviolet detection through structural design [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.  
王旭东. 硅基 APD 近紫外探测增强的结构优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [15] Ye Y J, Ke S Y, Wu J Y, et al. Design and research of Ge/Si avalanche photodiode with a specific lateral carrier collection structure[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 833-843.

- 叶余杰, 柯少颖, 吴金镛, 等. 横向收集结构锗硅半导体雪崩探测器的设计研究[J]. 中国光学, 2019, 12(4): 833-843.
- [16] Ribordy G, Gautier J D, Zbinden H, et al. Performance of InGaAs/InP avalanche photodiodes as gated-mode photon counters [J]. Applied Optics, 1998, 37(12): 2272-2277.
- [17] Haitz R H. Mechanisms contributing to the noise pulse rate of avalanche diodes[J]. Journal of Applied Physics, 1965, 36(10): 3123-3131.
- [18] Cova S, Longoni A, Andreoni A, et al. Towards picosecond resolution with single-photon avalanche diodes[J]. Review of Scientific Instruments, 1981, 52(3): 408-412.
- [19] Namekata N, Sasamori S, Inoue S, et al. 800 MHz single-photon detection at 1550-nm using an InGaAs/InP avalanche photodiode operated with a sine wave gating[J]. Optics Express, 2006, 14(21): 10043-10049.
- [20] Namekata N, Adachi S, Inoue S, et al. 1.5 GHz single-photon detection at telecommunication wavelengths using sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiode[J]. Optics Express, 2009, 17(8): 6275-6282.
- [21] Chen Y, Yang Y, Hao P Y, et al. Optimization design of single photon laser range quenching circuit [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(12): 40-46.  
陈雨, 羊毅, 郝培育, 等. 单光子激光测距淬灭电路设计优化[J]. 航空科学技术, 2018, 29(12): 40-46.
- [22] Yan P Q, Meng W D, Wang Y R, et al. Si-APD single-photon detector with high stability based on auto-compensation of temperature drift[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 080403.  
颜佩琴, 孟文东, 王煜蓉, 等. 基于温漂自动补偿的高稳定性 Si-APD 单光子探测器[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 080403.
- [23] Gol'tsman G N, Okunev O, Chulkova G, et al. Picosecond superconducting single-photon optical detector[J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(6): 705-707.
- [24] Jahanmirinejad S, Frucci G, Mattioli F, et al. Telecom-wavelength photon number resolving detectors based on the series array of superconducting nanowires [C] // 2012 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 6-11, 2012, San Jose, California United States. Washington D. C.: OSA, 2012: CTh5D.3.
- [25] Yang J K W, Kerman A J, Dauler E A, et al. Modeling the electrical and thermal response of superconducting nanowire single-photon detectors[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 581-585.
- [26] Marsili F, Najafi F, Dauler E, et al. Single-photon detectors based on ultranarrow superconducting nanowires[J]. Nano Letters, 2011, 11(5): 2048-2053.
- [27] Huang J, Zhang W J, You L X, et al. Spiral superconducting nanowire single-photon detector with efficiency over 50% at 1550 nm wavelength [J]. Superconductor Science and Technology, 2017, 30(7): 074004.
- [28] Degnan J J. Photon-counting multikilohertz microlaser altimeters for airborne and spaceborne topographic measurements [J]. Journal of Geodynamics, 2002, 34(3/4): 503-549.
- [29] Marino R M, Davis W R, Rich G C, et al. High-resolution 3D imaging laser radar flight test experiments[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5791: 138-151.
- [30] Yuan S Y, Yang Y, Dong T, et al. Simulation of key technologies of single photon detection for airborne long-distance ranging [J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(2): 80-84.  
袁帅映, 羊毅, 董涛, 等. 用于机载远程测距的单光子探测关键技术仿真研究[J]. 光电与控制, 2015, 22(2): 80-84.
- [31] Riris H, Rodriguez M, Mao J P, et al. Airborne demonstration of atmospheric oxygen optical depth measurements with an integrated path differential absorption lidar[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 29307-29327.
- [32] Wang T S, Huo J, Wang P C, et al. Research on single photon ranging technology which can be used for airborne remote detection [C] // Symposium on Quantum Information Technology and Applications 2017, June 15, 2017, Beijing, China. Beijing: Chinese Institute of Electronics, 2017: 50-57.  
王天顺, 霍娟, 王鹏程, 等. 可用于机载远程探测的单光子测距技术研究[C] // 2017 量子信息技术与应用研讨会论文集. 北京: 中国电子学会, 2017: 50-57.
- [33] Massa J S, Buller G S, Walker A C, et al. Time-of-flight optical ranging system based on time-correlated single-photon counting[J]. Applied Optics, 1998, 37(31): 7298-7304.
- [34] Degnan J J. Present and future space applications of photon-counting lidars [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7323: 73230E.
- [35] Li Z, Wu E, Pang C, et al. Multi-beam single-photon-counting three-dimensional imaging lidar[J]. Optics Express, 2017, 25(9): 10189-10195.
- [36] 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.
- [37] Pellegrini S, Buller G S, Smith J M, et al. Laser-based distance measurement using picosecond resolution time-correlated single-photon counting [J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(6): 712-716.
- [38] Wallace A M, Walker A C, Buller G S, et al. 3D imaging and ranging by time-correlated single photon counting [J]. *Computing & Control Engineering Journal*, 2001, 12(4): 157-168.
- [39] 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]. *Applied Optics*, 2009, 48(32): 6241-6251.
- [40] Kong H J, Kim T H, Jo S E, et al. Smart three-dimensional imaging lidar using two Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19323-19329.
- [41] Kirmani A, Venkatraman D, Shin D, et al. First-photon imaging [J]. *Science*, 2014, 343(6166): 58-61.
- [42] Degnan J J. Scanning, multibeam, single photon lidars for rapid, large scale, high resolution, topographic and bathymetric mapping [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 958.
- [43] Guo Y, Hou L B, Shu R, et al. Photon counting 3D imaging laser radar analysis and experiments [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(10): 1081-1084.  
郭颖, 侯利冰, 舒嵘, 等. 光子计数三维成像激光雷达的分析与实验 [J]. *激光与红外*, 2011, 41(10): 1081-1084.
- [44] He W J, Sima B Y, Cheng Y J, et al. Photon counting imaging based on GM-APD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(8): 1831-1837.  
何伟基, 司马博羽, 程耀进, 等. 基于盖格-雪崩光电二极管的光子计数成像 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1831-1837.
- [45] Xu L, Zhang Y, Zhang Y, et al. Signal restoration method for restraining the range walk error of Geiger-mode avalanche photodiode lidar in acquiring a merged three-dimensional image [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(11): 3059-3063.
- [46] Xu L, Zhang Y, Zhang Y, et al. Restraint of range walk error in a Geiger-mode avalanche photodiode lidar to acquire high-precision depth and intensity information [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(7): 1683-1687.
- [47] 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.
- [48] Pan Q J, Fang Q H, Yang Y, et al. Key technique and its progress in satellite laser ranging at high repetition rate [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(7): 33-39.  
潘秋娟, 房庆海, 杨艳, 等. 高重复率卫星激光测距的关键技术及其进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(7): 33-39.
- [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] Li H, Chen S J, You L X, et al. Superconducting nanowire single photon detector at 532 nm and demonstration in satellite laser ranging [J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3535-3542.
- [51] Zhang H F, Deng H R, Wu Z B, et al. Observations of space debris by ground-based laser ranging system [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2016, 33(5): 457-462.  
张海峰, 邓华荣, 吴志波, 等. 地基激光测距系统观测空间碎片进展 [J]. *航天器环境工程*, 2016, 33(5): 457-462.
- [52] Deng H R, Zhang H F, Long M L, et al. 4 kHz repetition rate satellite laser ranging system and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0314002.  
邓华荣, 张海峰, 龙明亮, 等. 4 kHz 重复频率卫星激光测距系统及其应用 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0314002.
- [53] Liu T, Shen M, Gao P Q, et al. Tumbling motion estimation of rocket body based on diffuse reflection laser ranging [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0104007.  
刘通, 沈鸣, 高鹏骐, 等. 基于漫反射激光测距的火箭残骸翻滚姿态估算 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0104007.
- [54] Zhang H T, Li Z L, Tang R F, et al. Application of array detection technology in laser ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 140-147.  
张海涛, 李祝莲, 汤儒峰, 等. 阵列探测技术在激光测距中的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(10): 140-147.