

全国产化公里级单光子测距系统

邓阳阳 马必杨 侯大禄 肖杰峰 欧洋 熊玉朋

Domestic kilometer-level single photon ranging system

DENG Yangyang, MA Biyang, HOU Dalu, XIAO Jiefeng, OU Yang, XIONG Yupeng

引用本文:

邓阳阳, 马必杨, 侯大禄, 等. 全国产化公里级单光子测距系统[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 522–529. DOI: 10.5768/JAO202546.0311006

DENG Yangyang, MA Biyang, HOU Dalu, et al. Domestic kilometer-level single photon ranging system[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 522–529. DOI: 10.5768/JAO202546.0311006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0311006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单光子激光主动探测信噪比数学建模与评估

Mathematical modeling and evaluation of signal-to-noise ratio for single-photon laser active detection

应用光学. 2025, 46(1): 194–201 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0107001>

旋转物体的单光子三维重建技术

Single-photon 3D reconstruction technology of rotating objects

应用光学. 2024, 45(5): 879–884 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501001>

单光子探测三维点云与可见光图像融合处理算法研究

Fusion processing algorithm of single-photon detection for three-dimensional point cloud and visible light image

应用光学. 2021, 42(6): 1034–1039 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0602004>

基于SiPM单光子探测器的荧光光谱仪研究

Fluorescence spectrometer based on SiPM single photon detector

应用光学. 2022, 43(2): 278–283 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203001>

一种微波光子探测器组件的封装设计与实现

Package design and realization of a microwave photon detector component

应用光学. 2020, 41(2): 400–404 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0205004>

基于游标效应的双芯光子晶体光纤温度传感器

Dual-core photonic crystal fiber temperature sensor based on vernier effect

应用光学. 2022, 43(3): 551–556 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0308002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0522-08

引用格式: 邓阳阳, 马必杨, 侯大禄, 等. 全国产化公里级单光子测距系统[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 522-529.

DENG Yangyang, MA Biyang, HOU Dalu, et al. Domestic kilometer-level single photon ranging system[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 522-529.



在线阅读

全国产化公里级单光子测距系统

邓阳阳¹, 马必杨⁵, 侯大禄⁶, 肖杰峰⁵, 欧 洋^{1,2,3,4}, 熊玉朋^{1,2,3,4}

(1. 国防科技大学智能科学学院, 湖南长沙 410073; 2. 超精密加工技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073; 3. 装备状态感知与敏捷保障全国重点实验室, 湖南长沙 410073; 4. 国防科技大学南湖之光实验室, 湖南长沙 410073; 5. 国防科技大学前沿交叉学院, 湖南长沙 410073; 6. 国防科技大学军政基础教育学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 单光子激光雷达相较于传统线性激光雷达, 具备更高的探测灵敏度、时间分辨率和光子利用率, 在遥感测绘、军事侦查、伪装识别等领域发挥着重要作用。介绍了一种 1.5 μm 波段全国产化单光子测距系统, 自主构建 1.5 μm 高紧凑光纤光源系统, 具备自适应降噪、降频功能, 能降低系统暗计数并消除模糊距离, 高精度时间数字转换器 (time-to-digital converter, TDC) 与单光子探测系统进行系统集成以控制整体体积, 非共轴收发系统结构简单、调节方便、系统噪声低。在光源输出功率仅为 10 mW, 单脉冲能量为 200 nJ 的条件下, 实现了 1.7 km 单光子测距。在多层伪装网覆盖目标探测识别实验中, 可透过多层伪装网准确识别目标信息, 探测精度优于 0.1 m。实验结果表明, 目前全国产化系统已具备较高的性能, 在功耗、体积、重量方面优势明显, 未来有望在众多领域发挥重要作用。

关键词: 激光雷达; 单光子探测; 单光子测距; 模糊距离

中图分类号: TN29

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0311006

Domestic kilometer-level single photon ranging system

DENG Yangyang¹, MA Biyang⁵, HOU Dalu⁶, XIAO Jiefeng⁵, OU Yang^{1,2,3,4}, XIONG Yupeng^{1,2,3,4}

(1. College of Intelligent Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Hunan Key Laboratory of Ultra-Precision Machining Technology, Changsha 410073, China; 3. State Key Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, Changsha 410073, China; 4. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 5. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 6. Basic Education College, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Single-photon lidar offers superior detection sensitivity, temporal resolution, and photon utilization compared to traditional linear lidar systems. It is increasingly important in fields such as remote sensing and mapping, military reconnaissance, and camouflage recognition. A domestically developed single-photon ranging system operating at the 1.5 μm wavelength was presented, in which a compact 1.5 μm fiber laser source with adaptive noise reduction and frequency modulation features was integrated to reduce system dark counts and eliminate range ambiguity. High-precision time-to-digital converters (TDC) were used to control

收稿日期: 2025-04-01; 修回日期: 2025-04-15

基金项目: 国防科技大学自主创新基金 (24-ZZCX-JDZ-26); 装备状态感知与敏捷保障全国重点实验室基金 (WDZC20245250308)

作者简介: 邓阳阳 (2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学系统设计与导航制导技术研究。E-mail: 2954759411@qq.com

通信作者: 熊玉朋 (1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学系统设计和复杂曲面光学元件超精密制造技术研究。

E-mail: yulinlang521@163.com

system size, while the non-coaxial transceiver design ensured simple structure, easy adjustment and low noise. The single-photon ranging of 1.7 km was achieved with an optical power output of only 10 mW and a single pulse energy of 200 nJ. Experiments with multi-layer camouflage net-covered targets demonstrate the accurate target identification through the camouflage, with a detection precision better than 0.1 m. The results indicate that the domestically developed system performs well, showing significant advantages in power consumption, size, and weight, and is expected to play an important role in many fields in the future.

Key words: lidar; single-photon detection; single-photon ranging; range ambiguity

引言

激光雷达作为一种可快速、精确获取目标方位、距离、速度及三维空间信息的主动探测技术,广泛应用于国防安全、航空航天、无人驾驶等领域^[1,2]。相比于微波雷达,激光雷达具有优异的方向性、精度和分辨率,以及更小的体积、重量等优点。传统的工作于线性探测模式下的激光雷达,依赖高信噪比回波信号实现高精度的距离探测,探测阈值高。目前,远距离激光雷达测距工作原理如图1所示,主要采用飞行时间法,下文中所述激光雷达均采用此工作方式^[3]。当激光雷达工作于远距离、高传输损耗介质(大雾、雾霾、水下等)等应用场景时,回波信号能量迅速衰减,超出线性激光雷达的探测极限。为提高回波信号信噪比,脉冲激光器需具备更高的输出功率和单脉冲能量,以及更大发射口径以减小发散角,同时,接收系统需达到一定口径,才能保证系统接收到足够强的激光回波信号。因此,激光雷达的工作距离与体积、质量、功耗正相关。当线性雷达应用于对机动性能有一定要求的作战场景时,受限于工艺、体积、重量、功耗等多方面因素,工作距离、测量精度、数据采样密度难以进一步提升,因此,对于远距离空间探测,线性雷达技术发展空间有限^[4-7]。

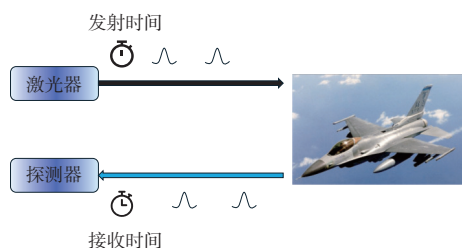


图1 脉冲飞行时间测距原理

Fig. 1 Principle of pulse ToF ranging

在国内研究方面,武汉大学针对PMT光子探测模型,验证了脉冲堆积效应对测距精度的影响,提出了通过优化激光脉宽和探测器时间抖动的方法,将单光子测距精度提升至毫米级^[8];杜秉乘团

队研发出了兆赫兹重频光子计数技术,在实地实验中实现了32 km测距,并发展了光子数分辨探测技术以抑制背景噪声,背景噪声抑制比达6 Mcps^[9];胡春源团队设计了一套基于PPM调制的通信测距一体化系统,通过脉冲宽度压缩技术,将测距精度从23.61 cm提升至0.91 cm,功耗低至-53.2 dBm^[10];在算法处理方面,刘骋昊团队通过蒙特卡洛仿真建立了TCSPC模型,量化激光脉宽和时间抖动对精度的影响,实验验证了在10 m测距时精度可达4 mm^[11];2021年中国科技大学团队完成了最远202 km的超远距离单光子三维成像,随后提出了一种高光子效率的三维成像框架,该框架允许激光以高脉冲频率运行,可用于远程深度成像且无距离模糊,算法层面,采取首光子算法等少量回波算法,实现少量光子成像,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^[12]。

单光子激光雷达技术在国际上也呈现快速发展态势。2012年NASA用多波束测高试验激光雷达(MABEL)进行光子计数推扫测量试验,波长为532 nm和1 064 nm,单脉冲能量为3 J~5 J,获得了高精度的地面模型^[13];普林斯顿光波公司开发的Kestrel SPAD阵列(32×32像素)配合超连续激光源,激光脉冲重复率达30 kHz,单脉冲能量可达8.5 nJ,并支持186 kHz帧率的数据采集,Kestrel SPAD阵列集成的时间数字转换器(time-to-digital converter, TDC)时间分辨率达250 ps~1 250 ps,支持单光子事件的时间戳记录,在10 km测距场景中时间抖动小于100 ps^[14];瑞士团队开发的超导纳米线单光子探测器在1 550 nm波长下量子效率达90%,暗计数率小于1 Hz,时间抖动小于20 ps,但需在液氮温区(小于4 K)运行,限制了其工程化应用^[15]。

国内外单光子测距技术相关指标对比如表1所示。

表 1 国内外单光子测距技术相关指标对比

Table 1 Comparison of relevant indicators for single-photon ranging technology at home and abroad

类别	国内指标	国外指标	国产突破点
测距精度	0.91 cm ^[10]	3 cm(NASA ICESat-2)	毫米级精度
探测距离	32 km ^[9]	500 km(NASA星载系统)	远距-近距全覆盖
功耗, 灵敏度	-53.2 dBm接收功率 ^[10] 主动复位电路功耗降低40%	15 W(苹果车载系统)	超低功耗设计
抗干扰能力	CPPM调制抗交叉干扰能力提升100倍 (太原理工)	泊松-高斯模型误差降低75%(MIT)	强背景光、多雷达干扰场景下有复杂环境优势
量产成本	SPAD芯片成本低于200美元/单元(南京邮电)	Kestrel SPAD阵列高于500美元/单元	成本较低, 全产业链自主化

总体来看,国产化单光子激光雷达主要具有以下优势:在常温下也可具有较高的性能体现;通过非周期信号与脉冲压缩突破传统局限,提出创新的抗干扰方式;精度较高,功能更适应多场景变换;整体成本较低,且在体积、重量方面优势明显。但是,目前国内的单光子激光雷达依旧存在环境鲁棒性不足、核心器件依赖进口、多目标分辨能力受限等缺点。

量子信息技术的飞速发展推动了单光子探测技术的成熟,单光子探测器具备极高的探测灵敏度(可达单个光子级别),较线性激光雷达探测器高2~3个数量级。同时,伴随着精密电子计时的发展,基于时间相关单光子计数(time-correlated single photon counting, TCSPC)的光子计数激光雷达系统(下文简称“单光子激光雷达”)应运而生^[16]。与线性激光雷达相比,单光子激光雷达具有更高的探测灵敏度、时间分辨率和光子利用率,为解决上述传统问题的新技术路径之一,具备以下两方面优势^[1,3,17]。

在重量、体积及功耗方面,从激光光源角度,由于单光子激光雷达系统采用高灵敏度、高探测效率的单光子探测器,能够探测到单光子量级的回波,对同样的探测距离,脉冲能量要求低2~3个数量级,可以采用高紧凑、高效率低脉冲能量、高重频的光纤激光器替代传统的固体激光器,体积、质量、功耗可大幅压缩,同时,光源设计制作难度迅速降低,稳定性也得到提升;从光学系统角度,探测器灵敏度的提升对发射、接收链路光学口径的要求降低,体积与质量降低的同时,系统结构更加简单,光学系统加工、装调难度随之降低^[18]。

在工作性能方面,基于TCSPC的对回波信号的探测原理,根据激光脉冲重复频率把时域分解为多个探测周期,并等间隔划分为若干个时间片,经多个探测周期后,统计每个时间片内的回波光

子数,依据信号光子的统计分布特征完成目标信号的提取^[3]。从探测效率及数据密度角度,单光子激光雷达采用对回波信号进行时间累积的方式恢复回波信号的离散波形,以获取目标的距离与反射率信息,非线性探测体制中的单次高概率探测方式,一方面不依赖于单次测量结果,不要求单次测量具备高信噪比和高探测概率,但可实现极高的总体探测概率(99%以上)^[19,20],另一方面,回波信号的积累过程相当于是对目标物体的多次采样,大量回波都包含目标物体的丰富信息,由于光源使用的低脉冲能量、高重频激光器在重量、体积、功耗方面的优势,系统支持远距离多线测量,使得远距离高密度实时激光三维成像成为可能,整体数据密度远高于线性激光雷达^[2]。

单光子激光雷达技术的发展显著降低了探测技术对高功率激光光源和大口径接收光学系统的依赖,其高度灵敏的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^[21-23]。与传统激光雷达相比,单光子激光雷达具有高灵敏度、低功耗等特性,在智能驾驶导航避障、遥感测绘、低空无人机跟踪监控、鸟类监控追踪等领域得到了广泛应用,尤其是远距离目标探测、复杂场景成像等领域,单光子成像技术表现出了卓越的探测能力^[24,25]。

目前,国内研究机构所构建的单光子探测系统多依赖于进口高精度TDC及探测器,本文基于国内现有的技术条件,构建了一套紧凑型单光子测距系统,在光源输出功率仅为5 mW,单脉冲能量为100 nJ的条件下,实现了1.7 km单光子测距。开展多层伪装网覆盖目标的探测识别实验,可透过多层伪装网准确识别目标信息,探测精度优于0.1 m。实验证明,目前国产化系统已具备较高的性能,单光子探测系统在功耗、体积、重量方面优势明显。

1 测量结构及原理

图 2 为测量结构整体的设计方案图, 主要分

4 个部分: 自适应智能光源系统、非共轴收发系统、单光子探测及光子计数, 及数据后处理模块。

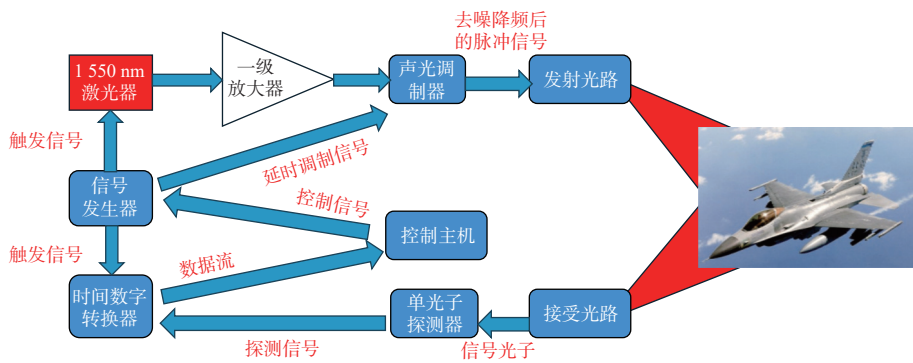


图 2 测量结构整体设计方案

Fig. 2 Overall design scheme of measurement structure

光源模块主要由光纤光源以及基于声光调制器的脉冲选择控制系统两部分构成。激光脉冲宽度与激光测距时间精度有关, 该参数直接影响纵向的深度分辨率, 所以一般要求激光器脉冲宽度尽可能窄(根据使用场合确定)。激光器重复频率则决定最远可测距离, 距离超过限制即产生模糊距离, 需要通过二次调整重复频率确定探测距离。在相同单脉冲能量下, 激光重复频率越高, 测距/成像采样时间越短, 在出射光脉冲能量足够大时, 重复频率决定了最远可测距离, 而在重复频率很低时, 出射激光的单脉冲能量和探测器灵敏度决定了最远可测距离。因此, 需要综合考虑出射激光的单脉冲能量、重复频率及探测器灵敏度等因素, 根据单光子激光雷达原理, 使用高重频、窄脉冲的激光光源。本文所使用光源为自主构建的 1 550 nm 波段、100 kHz~1 MHz 重频可调、1 ns~5 ns 脉宽可调的掺铒光纤激光器, 输出功率为百毫瓦级, 不存在模糊距离时, 极限测距为 1.5 km, 可直接输出激光脉冲, 亦可通过外部触发控制光源输出状态, 便于后期系统集成。当脉冲重复频率较低时, 脉冲间放大自发辐射噪声较强, 会直接影响探测效果, 所以, 实验设计了基于声光调制器的脉冲选择控制系统, 用于滤除脉冲间放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)成分, 降低系统噪声, 同时具备降频功能, 可根据目标距离自主降低激光器重复频率以消除模糊距离, 脉冲选择控制系统的加入扩展了系统使用范围, 提高了系统性能。

收发系统可分为共轴光路与非共轴光路两大类^[26]。共轴光路视场易于调节, 不存在视差的问

题, 但需要通过加入偏振检测或穿孔反射镜等实现发射激光与接收信号激光的分离, 结构复杂。非共轴光路结构简单易于搭建, 系统后向散射较小, 接收视场仅受单光子探测器光敏面直径与接收光路的限制。本实验采用非共轴收发光路, 系统整体设计参数如表 2 所示。

表 2 系统整体设计参数
Table 2 Overall design parameters

参数	取值	参数	取值
波长/nm	1550	探测距离/km	1~3
发射视场/ μ rad	~280	接收视场/ μ rad	~620
发射系统有效焦距/mm	37	接收系统有效焦距/mm	100

发射系统主要起到两大作用: 准直和扩束。由于系统使用光纤激光器, 输出尾纤为标准的通信光纤 SMF28e+, 直接输出后发散角过大, 不能远距离传输, 准直的主要目的是将发散光束转变为平行光。由于准直后光束仍然会受限于光学衍射的作用而逐步发散, 而大口径的光束由衍射作用后, 发散角较小, 因此需要扩束。采用集成式准直器, 该准直器结构简单紧凑, 将光纤中传出的发散光准直成平行光。该准直器口径为 24 mm, 等效焦距为 37 mm, 数值孔径为 0.24, 根据高斯光束传输理论, 计算得出到达 1 km 目标处的光斑直径约为 0.5 cm, 可以满足公里级的测距要求。

接收望远镜的口径大小直接决定了在相同距离下回收的光子数, 影响着最远可测距离以及系统分辨率, 口径过大会导致系统重量、体积指数级上升, 过小则无法有效接收目标信号。接收望远

镜的光学衰减系数决定了回收的光子通过望远镜聚焦到焦平面上的衰减量,影响系统灵敏度,实验中使用的镜片为自主设计加工的非球面透镜,使用真空镀膜法镀1 550 nm波段增透膜,提升回收光子接收效率。接收望远镜的等效焦距以及探测器敏感面面积决定了接收视场角,接收视场角的大小不仅影响着目标光子接收效率,同时也与背景噪声直接相关,过大的接收视场会引入过大的背景噪声,导致无法识别出目标信号,所以需要合理设计接收系统。接收系统采用镀有1 550 nm增透膜的非球面透镜作为接收透镜,整体结构简单,系统口径为50 mm,等效焦距为100 mm,接收视场角约为620 μ rad,该视场目标处的投影约为0.62 m,与激光在目标处的光斑直径类似,该设计满足公里级测距要求。

单光子探测及光子计数单元是系统中最关键的部分,其主要参数指标有探测效率、暗计数、后脉冲、死时间、时间抖动等。目前,能够响应单光子的探测器一般有:光电倍增管、雪崩二极管、超导纳米线单光子探测器等^[27,28]。雪崩二极管型探测器具有探测效率高、增益高、暗计数率低、响应波长范围宽等优点。系统使用全国产化的已集成时间相关单光子计数系统的探测模块,探测器使用重庆44所自主研发的探测器,时间数字转换器使用国仪量子技术有限公司生产的时间数字转换器TDC1610。国产化探测系统价格合理,集成化程度高,其在1 550 nm附近的最大探测效率优于

25%,时间分辨率优于200 ps,暗计数率低于10 kcps,死时间20 ns~1 μ s可调,性能满足实验要求。

2 实验结果与分析

为完成公里级测距实验,选择将实验平台搭建于湖南长沙岳麓区网络安全产业园33楼高层建筑顶层,该处视野十分开阔,数公里范围内有多个标志性建筑,本实验具体选择长房云时代作为目标建筑进行测试,实验现场如图3所示。实验时间为黄昏时刻,天气为阴天且有大雾,无强太阳光直射,温度为20℃,湿度为40%。



图3 公里级测距实验现场

Fig. 3 Kilometer-level ranging experiment site

通过精细调节保证发射系统和接收系统共轴,图4给出了对长房云时代的测距结果,接收光子累积在11 275 ns处,因此取 $\Delta t=11\ 275$ ns,由式(1)计算可得11 275 ns处信号对应的距离约为1.69 km,与百度电子地图标记距离基本一致。实验使用中光源脉冲经过声光调制器降噪降频后的光脉冲,脉冲重复频率为50 kHz,输出功率仅为10 mW,单脉冲能量为200 nJ。

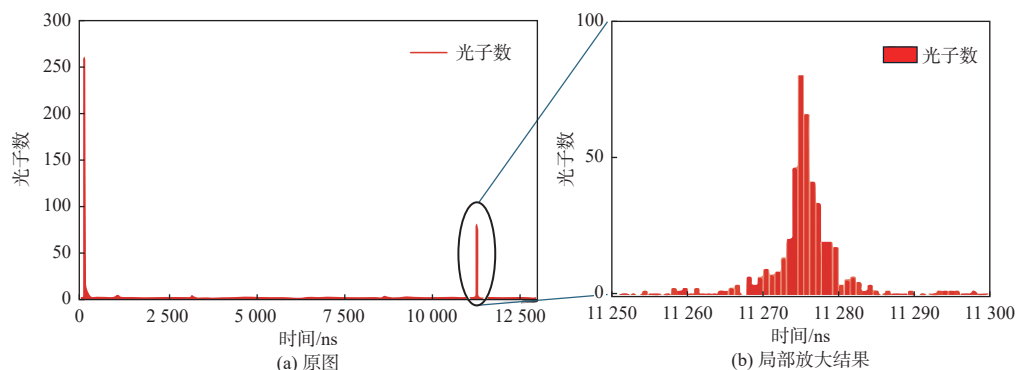


图4 公里级测距结果

Fig. 4 Kilometer-level ranging results

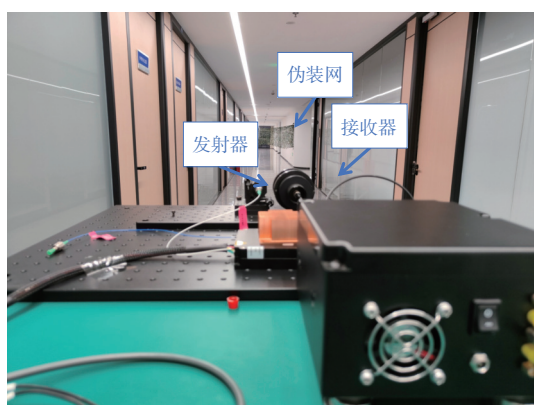
$$L=c \times \Delta t / 2 \quad (1)$$

式中: L 为激光探测器与目标距离,单位m; c 为光速,取 2.98×10^8 m/s; Δt 为接收到信号所需时间,单位ns。

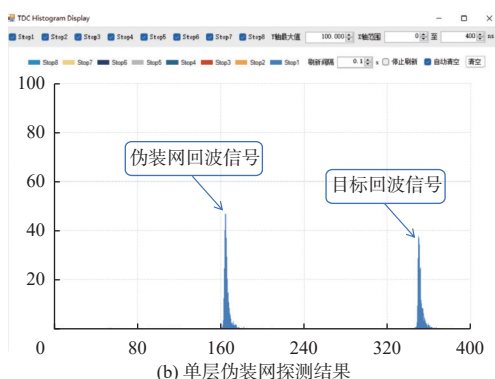
在众多应用场合中,被探测目标可能存在遮挡

情况,如在遥感探测领域,对森林区域进行测绘时需穿透树冠探测详细的地面高程数据。因此,对本系统进行了近距离遮挡条件下的目标探测识别实验。首先,如图5(a)所示,使用单层伪装网对场地进

行布置, 测试系统是否能在有障碍物干扰的环境下测得目标的距离。实验结果如图 5(b)所示, 在 165 ns 处和 350 ns 处各有一个明显的回波信号, 且 165 ns 处峰值高于 350 ns 处。通过无障碍实验得知目标信号在 350 ns 处, 由此分析 165 ns 处为出射光打在伪装网上的回波信号, 350 ns 的信号为穿透伪装网的激光经目标反射后的回波。从图中可以清晰分辨出伪装网反射信号峰与目标反射信号峰, 且目标信号虽然被削弱但依然能够被成功探测。



(a) 单层伪装网探测实验现场

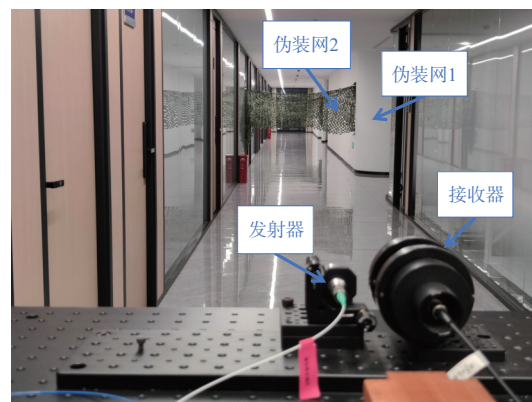


(b) 单层伪装网探测结果

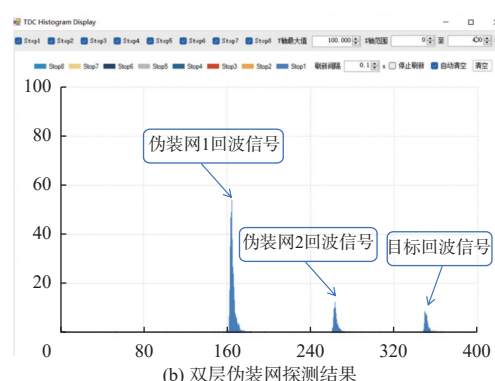
图 5 单层伪装网探测实验

Fig. 5 Experiment of single-layer camouflage nets

其次, 进行了如图 6(a)所示的双层伪装网遮蔽目标情境下的探测实验, 实验结果如图 6(b)所示, 依然能接收到清晰的目标回波信号, 证明本单光子探测系统对此类障碍有较好的穿透能力。对比可知, 显然最右侧脉冲累计信号位置为目标位置。由图 6(b)可推知, 出射激光在遇到第一层伪装网时受到遮挡, 反射回接收端, 在约 165 ns 处形成较强信号。透过第一层伪装网的探测光又分别打在第二层伪装网和穿过第二层伪装网被目标漫反射, 回波经探测器接收并处理后在直方图上形成右侧两个小尖峰, 说明在双层障碍遮挡的情况下系统依然可以做到有效探测。



(a) 双层伪装网探测实验现场



(b) 双层伪装网探测结果

图 6 双层伪装网探测实验

Fig. 6 Experiment of double-layer camouflage nets

在军事战争中, 由于出射激光通过伪装网时单光子信号强度会被削弱, 因此通过比较回波信号的强度水平可以分辨出伪装网和目标的回波信号, 从而精确获取目标的位置信息。这说明该系统在实战环境下具有可行性, 能够发挥测量敌目标距离信息的作用。

3 结论

本文介绍了一种 1.5 μm 波段全国产化单光子测距系统, 在光源输出功率仅为 10 mW, 单脉冲能量为 200 nJ 的条件下, 实现了 1.7 km 单光子测距。开展多层伪装网覆盖目标的探测识别实验, 该系统可透过多层伪装网准确识别目标信息, 实验证明, 目前的全国产化系统已具备较高的性能, 单光子探测系统在功耗、体积、重量方面优势明显, 具有自主可控的特点, 未来有望在众多领域逐步替代传统激光雷达系统。

参考文献:

- [1] 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 Yuyang, ZHOU Pengfei, XIE Tianpeng, et al. Development status and trends of single-photon LiDAR technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2024, 51(3): 240037.
- [2] 刘博, 蒋贇, 王瑞, 等. 全天时单光子激光雷达技术进展与系统评价[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(1): 20220748.
- LIU Bo, JIANG Zhi, WANG Rui, et al. Technical progress and system evaluation of all-time single photon lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(1): 20220748.
- [3] 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.
- ZHANG Hanyi, ZHAO Xinyu, ZHANG Yicheng, et al. Review of advances in single-photon lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1910003.
- [4] 夏中秋, 宋海智, 史衍丽, 等. 星载单光子计数成像系统仿真技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(16): 1611001.
- XIA Zhongqiu, SONG Haizhi, SHI Yanli, et al. Simulation techniques of a space-borne single-photon counting imaging system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(16): 1611001.
- [5] 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.
- LI Yujia, ZHOU Xiaoqing, LI Guoyuan, et al. Progress and prospect of space-borne photon-counting lidar shallow water bathymetry technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(10): 20220003.
- [6] 乔凯, 杨杰, 靳辰飞. 基于时间相关单光子计数的穿透成像激光雷达研究[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(8): 20220404.
- QIAO Kai, YANG Jie, JIN Chenfei. Research on penetrating imaging lidar based on time-correlated single photon counting[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(8): 20220404.
- [7] 吴琛怡, 汪琳莉, 施皓天, 等. 百微米精度的单光子测距[J]. *物理学报*, 2021, 70(17): 174201.
- WU Chenyi, WANG Linli, SHI Haotian, et al. Single-photon ranging with hundred-micron accuracy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(17): 174201.
- [8] 向雨琰, 李松, 马跃. 光电倍增管输出电子流脉冲堆叠对光子计数法测距的影响[J]. *物理学报*, 2022, 71(21): 163-175.
- XIANG Yuyan, LI Song, MA Yue. Effect of PMT output electron flow pulse pile-up on photon counting ranging method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(21): 163-175.
- [9] 杜秉乘. 光子计数激光脉冲探测应用技术研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- DU Bingcheng. Research on the application of photon-counting laser pulse detection[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [10] 胡春源, 林玉洁, 朱简尊, 等. 单光子激光通信测距一体化系统设计[J]. *国外电子测量技术*, 2024, 43(6): 119-126.
- HU Chunyuan, LIN Yujie, ZHU Jianzun, et al. Design of single-photon laser communication and ranging integration system[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2024, 43(6): 119-126.
- [11] 刘骋昊, 陈云飞, 何伟基, 等. 单光子测距系统仿真及精度分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 382-387.
- LIU Chenghao, CHEN Yunfei, HE Weiji, et al. Simulation and accuracy analysis of single photon ranging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 382-387.
- [12] LI Z P, YE J T, HUANG X, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. *Optica*, 2021, 8(3): 344-349.
- [13] MAGRUDER L A, WHARTON M E I, STOUT K D, et al. Noise filtering techniques for photon-counting lidar data[C]//*Laser Radar Technology and Applications XVII*. Baltimore, USA: SPIE, 2012: 837924.
- [14] MADONINI F, SEVERINI F, ZAPPA F, et al. Single photon avalanche diode arrays for quantum imaging and microscopy[J]. *Advanced Quantum Technologies*, 2021, 4(7): 2100005.
- [15] ROSENBERG D, KERMAN A J, MOLNAR R J, et al. High-speed and high-efficiency superconducting nanowire single photon detector array[J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1440-1447.
- [16] 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.
- [17] 张弛, 董光焰, 吴淦华, 等. 基于单光子激光雷达远距离海上测距的实现[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(14): 5645-5649.
- ZHANG Chi, DONG Guangyan, WU Ganhua, et al. Realization of signal photon detection for long-range sea surface laser ranging[J]. *Science Technology and Engineer-*

- ing, 2020, 20(14): 5645-5649.
- [18] CHANG J Y, LI J N, CHEN K, et al. Dithered depth imaging for single-photon lidar at kilometer distances[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5304.
- [19] 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]. *Optics Express*, 2023, 31(10): 16054-16066.
- [20] JIANG Y, LIU B, WANG R, et al. Photon counting lidar working in daylight[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 163: 109374.
- [21] 吕阳, 李召辉, 杨雷, 等. 白天单光子探测激光测距[J]. *量子光学学报*, 2019, 25(2): 138-144.
- LYU Yang, LI Zhaohui, YANG Lei, et al. Daytime single-photon detection laser ranging[J]. *Journal of Quantum Optics*, 2019, 25(2): 138-144.
- [22] 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.
- LIU Bo, YU Yang, JIANG Shuo. Review of advances in lidar detection and 3D imaging[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(7): 190167.
- [23] 李召辉, 吴光. 单光子探测激光距离测量技术[J]. *自然杂志*, 2019, 41(1): 24-28.
- LI Zhaohui, WU Guang. Laser distance measurement based on single-photon detection[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2019, 41(1): 24-28.
- [24] DAI C, YE W L, YU C, et al. Long-range photon-efficient 3D imaging without range ambiguity[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(6): 1542-1545.
- [25] 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.
- [26] 刘宇承, 王春泽, 宋有建, 等. 适用于高精度激光测距的光学系统设计[J]. *应用光学*, 2022, 43(2): 191-197.
- LIU Yucheng, WANG Chunze, SONG Youjian, et al. Design of optical system for high-precision laser ranging[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(2): 191-197.
- [27] 周飞, 陈奇, 刘浩, 等. 基于超导单光子探测器的红外光学系统噪声分析和优化[J]. *物理学报*, 2024, 73(6): 068501.
- ZHOU Fei, CHEN Qi, LIU Hao, et al. Noise characteristics analysis and suppression of optical system based on infrared superconducting single-photon detector[J]. *Acta Physica Sinica*, 2024, 73(6): 068501.
- [28] 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.
- HUO Xiaopei, YANG Dezhen, YU Songlin, et al. Research on status and development of single photon detector[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(1): 3-11.