

日盲紫外单光子成像

李召辉, 申光跃, 庞程凯, 吴光*

华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

摘要 介绍一种日盲紫外单光子成像系统。系统采用 Geiger 模式的硅基雪崩光电二极管 (Si APD) 的单光子探测器, 结合时间相关单光子符合计数技术, 实现了 0~400 m 距离的激光三维成像, 成像精度达到 22 mm。实验采用 266 nm 波长激光脉冲 (处于日盲紫外波段), 由于大气层的吸收作用, 在地表几乎不存在该波段的噪声, 大幅提高了单光子成像系统的抗背景光噪声的能力。该成像系统可在晴朗的白天运行, 实现了全天时中远距离单光子成像。

关键词 成像系统; 日盲紫外; 光子计数; 三维成像; 激光雷达

中图分类号 TN23

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011023

Solar-Blind Ultraviolet Single-Photon Imaging

Li Zhaohui, Shen Guangyue, Pang Chengkai, Wu Guang*

State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract In this study, a solar-blind ultraviolet single-photon imaging system was developed. The laser three-dimensional imaging was realized within a distance of 0–400 m with 22-mm imaging precision by combining the single-photon detector with Geiger-mode Si avalanche photodiode (Si APD) and the time-correlated single-photon counting technique. In the experiment, a 266-nm pulsed laser source was used, which is in the solar-blind band. Due to the atmospheric absorption, there is no background light noise at 266-nm wavelength on the surface of the Earth. This significantly improves the antibackground noise ability of the single-photon imaging system. Thus, this system can be operated on a sunny day to realize all-day single-photon imaging within a middle-long distance.

Key words imaging systems; solar-blind ultraviolet; photon counting; three-dimensional imaging; lidar

OCIS codes 110.6880; 040.7190; 030.5260; 280.3640

1 引言

脉冲飞行时间测距 (TOF) 采用激光照射目标表面, 通过测量光子飞行时间, 得到目标的距离信息^[1-6]。基于 TOF 的激光三维成像被广泛应用于遥感应用, 如地形测绘、环境监测、自动驾驶、机器人视觉、建筑测量等^[7-11]。采用单光子探测器并结合时间相关单光子符合计数 (TCSPC) 技术, 可以将激光三维成像系统的灵敏度提高至单光子水平^[12-14], 被称为单光子成像技术, 该技术大幅扩展测量范围,

降低系统功耗, 成为近年来的一个研究热点。然而, 强背景光噪声容易使单光子探测器饱和甚至损坏, 而且大量的背景光计数很容易使图像信息淹没在噪点之中, 严重阻碍了单光子成像的应用。由于大气平流层中臭氧气体的强烈吸收, 200~300 nm 紫外波段的太阳辐射几乎无法到达地表, 该波段被称为日盲紫外波段。工作在日盲紫外波段的光学系统能够有效降低错误检测的概率和太阳辐射产生的高背景噪声的影响^[15-17], 在自由空间通信、火焰检测、发动机监控、紫外成像仪、导弹预警等方面发挥着重要

收稿日期: 2021-01-26; 修回日期: 2021-02-10; 录用日期: 2021-03-03

基金项目: 国家自然科学基金 (11774095, 11804099)

* E-mail: gwu@phy.ecnu.edu.cn

作用。日盲紫外波段背景光噪声极低,单光子探测系统可以发挥灵敏度极限。

本文提出一种工作在日盲紫外波段的单光子成像系统,采用处于日盲紫外波段 266 nm 的固体脉冲激光及工作在 Geiger 模式的硅基雪崩光电二极管(Si APD)单光子探测器,在白天高背景光环境下,实现了 0~400 m 距离的单光子成像。

2 日盲紫外单光子成像系统

日盲紫外波段单光子成像系统原理如图 1 所示。激光光源采用四倍频 Nd:YAG 固体激光器,波长为 266 nm,重复频率为 60 kHz,脉冲宽度约为 800 ps,单脉冲能量为 0.1 μJ。激光输出光束为椭圆形状,所以采用熔融石英柱透镜整形激光光束。M1 和 M2 为介质膜高反镜,M2 透射端的激光照射到高速光电探测器(PIN),产生主波信号。在接收端,采用直径为 50 mm 的熔融石英透镜收集目标表面漫反射的回波光信号,光信号聚焦到 Si APD 单光子探测器的靶面,并且采用 1 片干涉滤光片(中心

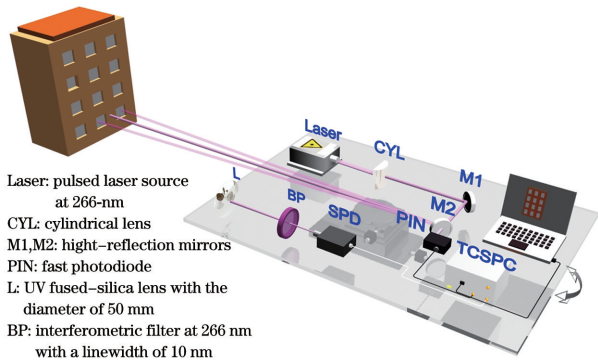


图 1 日盲紫外单光子成像系统原理图

Fig. 1 Schematic of the single-photon imaging system in the solar-blind UV band

波长为 266 nm,线宽为 10 nm)抑制背景光噪声。在数据采集模块中,系统开发了基于现场可编程门阵列(FPGA)的时间数字转换器(TDC),记录单光子探测器输出信号与主波信号之间的时间间隔。其中主波信号连接至 TDC 的 START 通道,单光子探测器的输出信号连接至 STOP 通道,TDC 的时间分辨率最高可设置为 64 ps,实验中可以根据时间测量量程(目标距离)调整 TDC 的时间分辨率。测量数据通过 USB 电缆线传输至电脑,电脑控制二维旋转电机实现目标扫描。接收端,系统使用本课题组自主研制的基于 Geiger 模式 Si APD(laser component, SAP500)的单光子探测器探测回波光, Si APD 的光敏面直径为 500 μm。为了降低暗计数,采用三级半导体制冷片将 Si APD 制冷至 -10 °C。单光子探测器在 266 nm 波长的探测效率约为 3.0%,暗计数率约为 3600 s⁻¹。

图 2 为日盲紫外回波光子的 TCSPC 统计,横坐标代表与主波信号的时间间隔,纵坐标代表归一化计数。其中,最大计数峰是日盲紫外激光的回波。但是,由于紫外光的大气散射严重,背向散射光对单光子探测系统造成了严重干扰,仅仅通过甄别计数峰值无法识别回波光子的位置。针对紫外背向散射问题,系统通过增加探测窗口,抑制背向散射计数。从图 2 可以看出:背向散射光噪声集中在 0~800 ns(即背向散射主要集中在距离紫外激光出射端 0~120 m);当加载到单光子探测器的探测窗口的同步延时从 0 调节到 1.2 μs,背向散射计数噪声得到有效抑制,从而可以通过甄别计数峰,简单快速地识别出回波光信号。

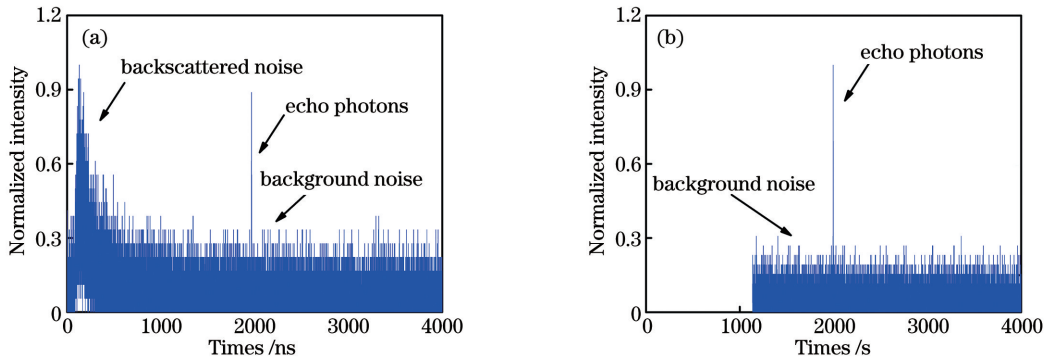


图 2 TDC 板卡软件获取的 TCSPC。(a)原始同步信号的测量结果;(b)同步信号延时 1.2 μs 的测量结果

Fig. 2 TCSPC acquired by the TDC software. (a) Measurement result of original synchronous signal; (b) measurement result of synchronous signal with a time delay of 1.2 μs

3 单光子成像实验

为了验证单光子探测系统在不同波段的抗背景噪声能力,通过在接收端插入不同波长的带通滤光片,在晴天进行对比实验。单光子探测器的饱和计数率达到 $1.0 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$,但是,由于可见光波段背景光噪声极高,使用中心波长为 532 nm、线宽为 10 nm 的窄带滤光片时,单光子探测器处于过饱和状态,无法正常工作;而使用中心波长为 266 nm、线宽为 10 nm 的窄带滤光片时,背景光噪声计数率降至 $1.0 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$,结合 TCSPC 技术,可以高信噪比地甄别回波光信号。

单光子成像系统的时间抖动(Δt)决定了系统的距离测量精度,主要取决于单光子探测器的时间抖动(t_D , $\sim 800 \text{ ps}$)、激光光源的脉冲宽度(t_L , $\sim 600 \text{ ps}$)、主波信号的时间抖动(t_{PIN} , $< 10 \text{ ps}$)、TDC 的时间分辨率(t_{TDC} , 64 ps)等参数,根据公式 $\Delta t = \sqrt{t_L^2 + t_{PIN}^2 + t_D^2 + t_{TDC}^2}$,成像系统的整体时间抖动为 1.13 ns,对应距离分辨率为 0.17 m。

实验中,以 200 m 以外的建筑物为目标,在白天和晚上分别测量了日盲紫外单光子成像系统的距离测量精度,TDC 的时间分辨率设置为 64 ps,单点测量的累积时间设置为 0.1 s,通过 100 次重复测量,将多次测量结果的标准差作为成像系统的距离测量精度。最终测得成像系统在白天和晚上的距离测量精度分别为 22.0 mm 和 21.0 mm,其中白天系统背景光噪声的计数率约为 $1.0 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 。背景光噪声对系统精度的影响较小,单光子成像系统在白天和晚上能够达到相同水平的距离测量精度。

大气传输损耗对紫外波段光传输的影响至关重要,通过在不同的距离放置靶标,采集回波光光子计数,测试紫外波在大气中的衰减系数,在大气湿度为 43% 和 76% 的情况下进行两组测试,如图 3 所示,

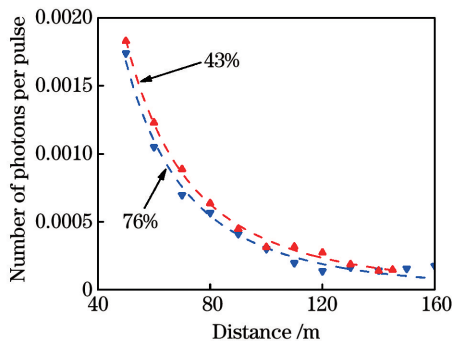


图 3 光子计数与距离的关系

Fig. 3 Relationship between photon counts and distance

结果表明,大气中水分子的吸收对紫外波段光的传输起到重要作用。回波光光子计数(n)、目标距离(L)、大气衰减系数的关系^[18]为

$$n \propto \frac{e^{-2\alpha L}}{L^2}, \quad (1)$$

式中: α 是 266 nm 激光在大气中的衰减系数。如图 3 所示,虚线是测量结果的拟合曲线,根据拟合结果,大气湿度为 43% 和 76% 时,激光的衰减系数分别为 0.22% 和 0.31%。由于紫外激光在大气中的传输衰减较大,因此日盲紫外单光子成像适用于中短距离范围。

为了验证日盲紫外单光子成像系统在白天的成像效果,首先开展了夜间单光子成像实验。实验中背景噪声计数率约为 4000 s^{-1} ,二维旋转平台在水平和垂直方向上的扫描分辨率分别设置为 1.42 mrad/point 和 2.12 mrad/point,TDC 的单点采集时间设置为 0.1 s。图 4 (b) 展示了尺寸为

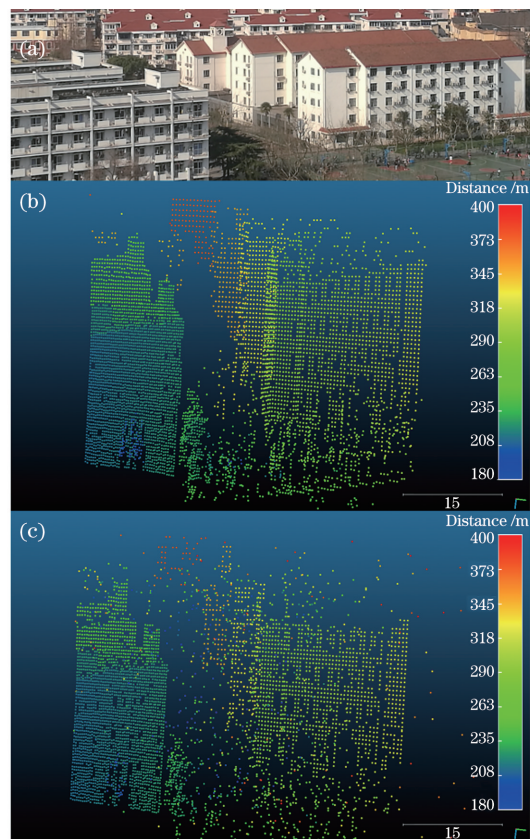


图 4 单光子成像实验结果。(a) 目标建筑物的真实照片;(b) 在晚上采集的建筑物图像;(c) 在晴天采集的建筑物图像

Fig. 4 Experimental results of the single-photon imaging. (a) Real photo of the target buildings; (b) rebuilt image of the buildings at night; (c) rebuilt image of the buildings on a sunny day

75 pixel×120 pixel 的三维图像,可以清晰地识别出 200~400 m 距离建筑物的轮廓,与实物照片一一对应,同时由于激光照射到玻璃上时回波光光子较少,也可以识别出建筑物上的窗户。对于大于 400 m 距离的建筑物,由于回波光光子减少,在相同的采集时间内,无法获得清晰的图像。作为对比,在白天重复了该实验,在下午(当地时间 13:00)获得了图 4(c)所示的三维图像,当天的能见度约为 20 km,实验中各项参数设置与晚上完全相同。在白天,大气背景光噪声取决于天气条件和太阳高度角,实验中,背景光噪声在 $9 \times 10^5 \sim 1.3 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 波动。图 4(c)展示了尺寸为 75 pixel×120 pixel 的三维图像,扫描范围与图 4(b)相同。与图 4(b)相比,由于高背景光噪声的影响,图 4(c)中虽然有更多的噪声点,但是仍旧能清楚地识别出建筑物。实验结果表明,日盲紫外单光子成像系统在白天工作时具有出色的抑制背景光噪声性能。在白天,利用光学相机直接成像只能获取目标的二维图像,而日盲紫外单光子成像系统可以获取目标的三维距离信息。

4 结 论

实现了一种基于 Geiger 模式 Si APD 单光子探测器的日盲紫外单光子成像,利用日盲紫外波段在白天出色的低背景光噪声特点、单光子探测器高灵敏特性,实现 0~400 m 距离的全天时单光子成像。在实验系统中,Si APD 单光子探测器在 266 nm 的探测效率仅为 3.0%,随着高性能单光子探测技术的发展^[19-20],日盲紫外单光子成像系统的性能有望得到进一步提升。同时,由于紫外波段下激光在大气中的衰减非常严重,在地表环境中,日盲紫外单光子成像系统比较适合应用于短距离范围内的测量。

参 考 文 献

- [1] Huang M S, Guan Z H. A fast and high-precision pulse laser ranging method based on cursor principle [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0510001.
黄民双, 关在辉. 基于游标原理的快速高精度脉冲激光测距方法[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0510001.
- [2] Ma J P, Shang J H, Sun J T, et al. Laser ranging system based on high-speed pulse modulation and echo sampling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0810004.
马建平, 尚建华, 孙嘉瞳, 等. 基于高速脉冲调制和回波采样的激光测距系统[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0810004.
- [3] Long M L, Zhang H F, Deng H R, et al. Laser ranging for space debris using double telescopes with kilometer-level distance [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0228002.
龙明亮, 张海峰, 邓华荣, 等. 距离千米级双望远镜的空间碎片激光测距[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0228002.
- [4] Bao Z Y, Liang Y, Wang Z Y, et al. Laser ranging at few-photon level by photon-number-resolving detection[J]. Applied Optics, 2014, 53(18): 3908-3912.
- [5] Xie G C, Ye Y D, Li J M, et al. Echo characteristics and range error for pulse laser ranging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0610001.
谢庚承, 叶一东, 李建民, 等. 脉冲激光测距回波特性及测距误差研究[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0610001.
- [6] Xie S Y, Zhao Y Q, Wang Y L, et al. Microscanning laser imaging technology based on Geiger-mode APD array[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 1206010.
谢绍禹, 赵毅强, 王永乐, 等. 基于盖革 APD 阵列的微扫描激光成像技术[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 1206010.
- [7] Zhou H, He Y H, You L X, et al. Few-photon imaging at 1550 nm using a low-timing-jitter superconducting nanowire single-photon detector[J]. Optics Express, 2015, 23(11): 14603-14611.
- [8] Song Y H, Zhang J Y, Zhao Y C, et al. Low-frequency laser imaging-detection experiment based on Gm-APDs [J]. Infrared Technology, 2020, 42(10): 936-939.
宋毅恒, 张佳悦, 赵英超, 等. 基于 Gm-APDs 的低频激光成像探测实验[J]. 红外技术, 2020, 42(10): 936-939.
- [9] Wästlund A, Holmgren J, Lindberg E, et al. Forest variable estimation using a high altitude single photon lidar system [J]. Remote Sensing, 2018, 10(9): 1422.
- [10] Wang G, Wang Q, Zhang Z X, et al. Classification of airborne LiDAR vegetation point clouds assisted by aerial images[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 201005.
王果, 王强, 张振鑫, 等. 航空影像辅助的机载 LiDAR 植被点云分类[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 201005.
- [11] 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.
- [12] Liang Y, Huang J H, Ren M, et al. 1550-nm time-of-flight ranging system employing laser with multiple repetition rates for reducing the range ambiguity[J]. Optics Express, 2014, 22(4): 4662-4670.
- [13] Feng B C, Li Z H, Shi Y F, et al. Laser ranging with large dynamic range based on dual-mode detectors[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0504001.
冯百成, 李召辉, 师亚帆, 等. 基于双模式探测器的大动态范围激光测距[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0504001.
- [14] Mc Carthy 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.
- [15] Wang B H, Li T T, Zheng G X, et al. Research of solar blind ultraviolet detection system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 022202.
王保华, 李妥妥, 郑国宪, 等. 日盲紫外探测系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 022202.
- [16] Song S S, Lin L N, Wang W S, et al. Design of solar blind ultraviolet warning optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 102203.
宋珊珊, 林丽娜, 王文生, 等. 日盲紫外告警光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 102203.
- [17] Shi Y F, Li Z H, Feng B C, et al. Enhanced solar-blind ultraviolet single-photon detection with a Geiger-mode silicon avalanche photodiode [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(3): 030401.
- [18] Tan X Y. Research on ranging equation for laser radar[J]. Electronics Optics & Control, 2001, 8(1): 12-18.
谭显裕. 激光雷达测距方程研究[J]. 电光与控制, 2001, 8(1): 12-18.
- [19] Wang Y R, Lü Y, Wang Y, et al. Noise characterization of Geiger-mode 4H-SiC avalanche photodiodes for ultraviolet single-photon detection [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(2): 1-5.
- [20] Dong H, Zhang H, Su L L, et al. After-pulse characterizations of Geiger-mode 4H-SiC avalanche photodiodes [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(12): 706-709.