

文章编号 1004-924X(2016)02-0251-09

直接测距型无扫描激光主动成像验证系统

徐正平*, 沈宏海, 姚园, 李刚, 宋玉龙, 李海星, 孙骞, 石磊

(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)

摘要:为提高成像效率,研究了基于雪崩光电二极管(APD)阵列和分束照明的直接测距型无扫描激光主动成像系统。系统采用脉冲激光器作为光源,通过测量激光脉冲飞行时间来获取目标距离信息;基于达曼光栅进行分束照明以提高能量利用率。另外,光学系统采用收发共孔径结构,保证了目标处激光脚点和 APD 阵列各像元的几何对准。与参考 APD 所采用固定阈值时刻鉴别法不同,系统采用固定阈值与恒比定时相结合的時刻鉴别法处理回波 APD 阵列的输出信号以适应外光路参数的变化。各通道采用专用计时芯片 TDC-GP22 测量启停脉冲之间的时间间隔,实现了 45 ps 的计时分辨率。最后,将 19 m 和 31 m 处放置的两个角反射器作为合作目标进行了成像实验,并给出了所获取的距离图像。结果表明:两个目标的平均距离分别为 19.28 m 和 31.54 m,测距误差分别为 0.28 m 和 0.54 m,显示提出的设计方案切实可行。

关键词:激光主动成像;无扫描式成像;直接测距;分束照明

中图分类号: TN249; P225.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162402.0251

Scannerless laser active imaging validating system by directly ranging

XU Zheng-ping*, SHEN Hong-hai, YAO Yuan, LI Gang,
SONG Yu-long, LI Hai-xing, SUN He, SHI Lei

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: xuzp090@163.com

Abstract: To enhance imaging efficiency, a scannerless laser active imaging system by directly ranging was explored on the basis of an Avalanche Photo Diode (APD) array and a splitting beam illuminating method. A pulse laser was selected to be a light source, and the distant information of a target was obtained by measuring the time-of-flight of laser. A Dammann grating was used for illuminating by splitting beams to improve the usage efficiency of laser energy. Furthermore, a transceiving optical system with a common aperture was adapted to ensure the geometrical alignment between laser footprints and pixels of the APD array. Different from the constant threshold discriminator used in reference APD, a time discrimination method in combination of the constant threshold discriminator and the constant fraction discriminator was used to process the echo signal from APD array and to adapt the parametric varia-

收稿日期:2015-07-13;修订日期:2015-09-08.

基金项目:中国科学院国防科技创新基金资助项目(No. CXJJ-14-S123);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20150204022GX).

tion of optical path. Moreover, dedicated time-detecting chip TDC-GP22 was used for each channel to test the interval between starting and stopping pulses, and to obtain the timing resolution of 45 ps. At last, an imaging experiment was conducted by choosing two corner reflectors respectively located in the distance of 19 m and 31 m as cooperative targets and the distant images were given. Result shows that the average distances of the two targets are 19.28 m and 31.54 m, respectively, and the distant errors are 0.28 m and 0.54 m. It concludes that the optical system and design method proposed are feasibility.

Key words: laser active imaging; scannerless imaging; directly ranging; illuminating with splitting beam

1 引言

20 世纪 60 年代,激光主动成像随激光器的发明而产生。该技术采用激光对目标进行主动照明以获取目标的距离信息^[1-2],相比于微波雷达,能够提供较高的角度、距离和速度分辨率,测速范围宽,并且能够提供目标的角-角-距-灰度-速度信息,具备“四抗”能力(抗电子战、反辐射导弹、抗低空突防及隐身目标),体积重量小,但其技术难度大。激光主动成像主要应用于多模制导^[3-5]、水下探测、直升机防撞^[6]、姿态估计、自动着陆、空间交会对接、战场侦察及隐藏目标识别^[7-10]、海岸线探测^[11]、高速公路维护、电力巡线、植被分布、城市及大气精细建模等军事与民用领域。

激光主动成像系统按照测距体制可分为相干测距型和直接测距型。相干测距型的测距精度能达到毫米级,但其结构复杂,实现较为困难。直接测距型的测距精度相对较低,但易于实现。其中,基于增强电荷耦合器件(ICCD)的激光主动成像系统采用切片成像技术,静态分辨率很高,但不适用于机载环境;盖革模式雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)具有单光子探测灵敏度,但其噪声较大,且需淬灭电路;线性模式 APD 在提供目标距离信息的同时,能够获取目标反射率。激光主动成像系统按照工作方式可分为单点扫描式、线阵扫描式和面阵无扫描式^[12]。实际应用时,需综合考虑系统体积、重量、功耗、激光器输出峰值功率及脉冲重复频率、所能获取的探测器类型、后续数据处理能力等多种因素折中选取激光成像系统的类型。

国内外有多家研究机构对直接测距型激光主动成像系统进行了深入研究。典型代表为林肯实验室的 JIGSAW 系统^[13],它采用 32×32 面阵探

测器,配合双光楔扫描实现宽覆盖成像,同时,为提高激光能量的利用率,光学系统采用分束照明。在国内,国防科技大学采用单点 APD 配合十二面体实现近距离目标成像^[14]。上海技术物理研究所于 2009 年采用单点 APD 配合摆镜扫描实现了 35 cm 的测距精度,光学系统采用收发共光轴结构^[15],并于 2010 年将系统探测器改为 3×3 单点探测器,采用 9 根光纤分别导光,以实现回波信号与探测器的对应^[16]。哈尔滨工业大学的朱静浩在光学平台上搭建了基于 8×8 探测器的无扫描激光成像演示系统^[17],收发光学系统非共口径,后续张勇等人采用双光楔扫描扩大了系统的覆盖宽度^[18]。上海光机所对基于单点 APD 配合声光扫描的三维视频激光雷达进行了研究,该雷达系统在图像分辨率为 $63 \text{ pixel} \times 63 \text{ pixel}$ 时的成像帧频可达 25 Hz ^[19]。

本文研究了基于线性 APD 阵列和分束照明的直接测距型激光主动成像系统。为提高激光的能量利用率,系统采用达曼光栅进行分束照明。考虑系统空间受限,光学系统采用收发共孔径结构形式,并通过成像光纤阵列确保激光回波信号与面阵 APD 敏感元之间的几何对准。本文在简要介绍系统组成框图及工作原理的基础上,详细介绍了窄脉宽全固态激光器、收发共孔径光学系统、APD 阵列信号采集和目标距离信息提取等组成模块,最后通过实验对该激光主动成像系统的性能进行了详细分析。

2 系统原理及组成

激光主动成像系统原理框图如图 1 所示。脉冲激光器输出激光进入半反半透棱镜,其中透射光线进入发射光学系统照射目标景物,反射光线照射在参考 APD 上。被目标景物反射的激光回

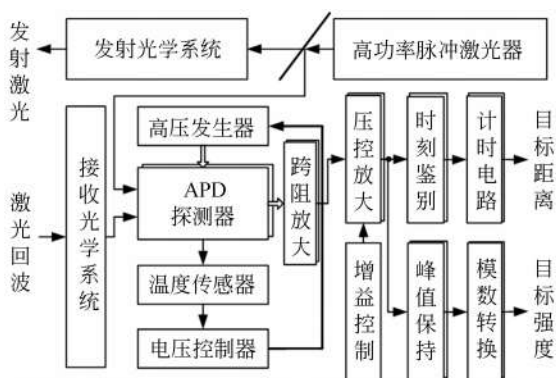


图 1 激光主动成像系统原理框图

Fig. 1 Block diagram of laser active imaging system

波信号经接收光学系统照射在回波 APD 上。参考 APD 和回波 APD 输出信号分别进入压控放大电路,放大信号经时刻鉴别电路获取信号基准,分别作为计时电路的启动和停止信号。高精度计时电路对启动和停止脉冲之间的时间间隔进行计时,获取目标的距离信息。为获取目标的强度信息,将 APD 压控放大电路的输出信号送入峰值保持电路,使得回波窄脉冲信号峰值能够保持一定时间,供 A/D 采集。

系统选取 1 064 nm 脉冲激光器作为光源,脉宽小于 7 ns,单脉冲能量为 100 μJ,脉冲重频为 10~100 Hz 可调。参考 APD 及回波面阵 APD 分别选取 First Sensor 公司的 AD230-9 TO 单点 APD 和 64AA0.04-9 SMD APD 阵列,其中 64AA0.04-9 SMD APD 阵列的像元数为 8×8,像元间距为 320 μm,敏感区域为 205 μm×205 μm。当增益为 100 时,在 1 064 nm 处的响应度小于 10 A/W。为了实现远距离成像,需提高激光器输出峰值功率的有效利用率或 APD 阵列增益。

激光主动成像系统可采用泛光照明或分束照明。泛光照明时激光功率的利用率较低,且易产生像元串扰;分束照明将激光输出功率集中照射在接收有限区域内,在提高激光利用率的同时可有效避免像元串扰,且放宽了光学系统像质的要求,能大大减小系统的尺寸、质量和成本等。本系统选用基于达曼光栅的分束照明方法。

3 模块设计

3.1 窄脉宽全固态激光器

激光器采用电光腔倒空技术,激光脉冲的宽

度主要取决于振荡器腔长以及 Q 开关的开门时间。当 Q 开关的开门时间足够短时,激光脉冲宽度等于腔内往返渡越时间,通过压缩谐振腔长可输出窄脉宽激光。系统采用半导体激光器作为泵浦源,其原理如图 2 所示,其实物图如图 3 所示。

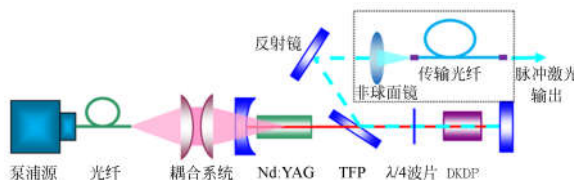


图 2 窄脉宽全固态激光器原理图

Fig. 2 Principle diagram of solid-state laser with narrow pulse

因空间尺寸限制,脉冲激光器的输出激光通过能量光纤传送给发射光学系统。然而激光能量过高会损伤光纤端面。同时,为实现高光束质量的激光传输,光纤芯径要尽量小(本系统要求光纤芯径小于 30 μm)。为此,这里采用模式剥离及端面融合技术解决光纤端面损伤的问题,实现高能量激光脉冲的近单模光纤传输,耦合效率优于 65%。

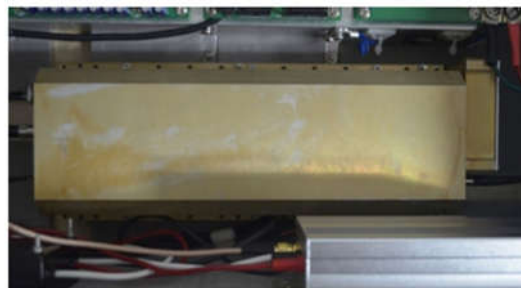


图 3 窄脉宽全固态激光器实物图

Fig. 3 Picture of solid-state laser with narrow pulse

激光器输出的脉冲波形如图 4 所示,可以看出输出激光的脉冲宽度为 5.1 ns。

3.2 收发共孔径光学系统

为保证对准精度、缩小结构尺寸,光学系统采用收发共孔径结构形式,通过接收光学系统像面和发射光学系统中间像面的共轭,保证收发光学系统视场的完全匹配,使得目标处的激光斑点阵列和 APD 阵列上的像元一一对准,且该几何对准关系不随工作距离的变化而改变。考虑到能量利用率和镜头内部的杂散光,收发共孔径光学系统选择双工反射镜实现分光,其布局如图 5 所示。

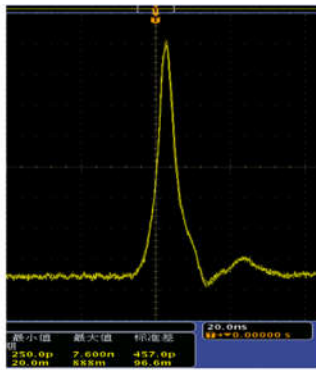


图 4 窄脉宽全固态激光器的输出波形图

Fig. 4 Output waveform of solid-state laser with narrow pulse

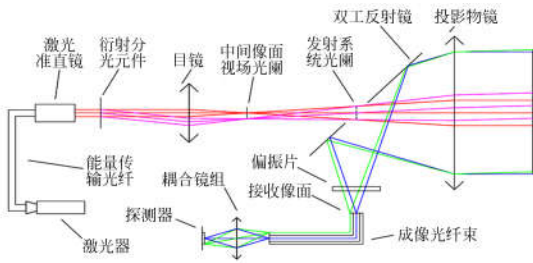


图 5 收发共口径光学系统布局图

Fig. 5 Layout of transceiver optical system with common aperture

激光器通过能量光纤发出的单束脉冲激光经扩束器扩束准直后平行入射在衍射分光元件上,单束激光被分成多个不同角度传播的阵列平行光束,后经二次成像透镜汇聚后,在中间像面上形成阵列分布的亮斑。该亮斑的二维分布与成像光纤端面的二维分布完全一致。在中间像面上设置视场光阑以滤除杂光。激光发射系统的出瞳设置在双工反射镜的开孔处,在提高能量利用率的同时,可有效避免激光散斑对成像造成的影响。投影物镜将中间像面上的亮斑投影至目标上的各个测量单元面积内。激光束在不同高程目标的表面发生漫反射,反射光线能量经投影主镜汇聚后,通过中继镜组和成像光纤束导入到面阵器件敏感元区,从而记录下各个测量单元面积内激光束的往返时间,进而反演出目标的距离信息。

衍射分光元件选择达曼光栅,系统设计的 8×8 达曼光栅单周期设计图及光刻显微照片如图 6 所示。

如前所述,系统通过成像光纤束将回波信号导至面阵 APD 敏感元区,成像光纤束通过定位



图 6 8×8 达曼光栅单周期设计图(左)及光刻显微照片(右)

Fig. 6 Image of designed single period(left) for 8×8 Dammann grating and its lithography micrograph(right)

器来固定,各定位孔间距与 APD 阵列像元间距保持一致。定位精度由光刻模板的设计精度来保证,端面平面度可通过磨抛实现最优化。

成像光纤定位器光刻及电镀光学显微图像如图 7 所示。

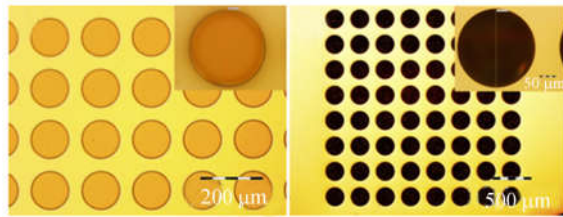


图 7 成像光纤定位器光刻(左)及电镀(右)显微图像
Fig. 7 Micrographs of lithography (left) and electroplating (right) for imaging fiber positioner

成像光纤定位器定位孔同心误差的测试结果如图 8 所示。可以看出:最大同心误差为 12.5 μm,是定位孔间距的 3.9%,满足系统要求。成像光纤定位器及装配后的实物图如图 9 所示。

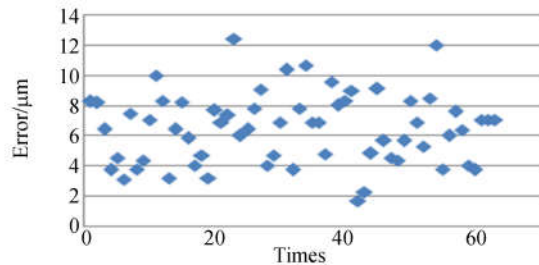


图 8 成像光纤定位器同心误差的测试结果
Fig. 8 Result of concentric error of imaging fiber positioner

接收光学系统结构如图 10 所示。根据设计结果,接收光学系统全视场的激光回波能量 95%集中在 Φ120 μm 的弥散斑内,最大畸变小于 0.2%。

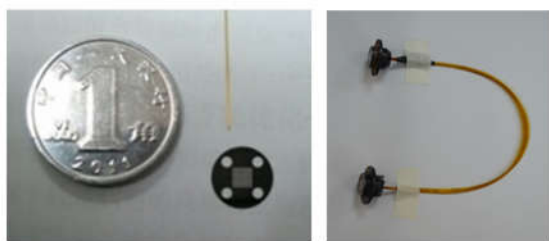


图 9 成像光纤定位器(左)及装配后(右)的实物图
Fig.9 Pictures of imaging fiber positioner (left) and its assembly(right)

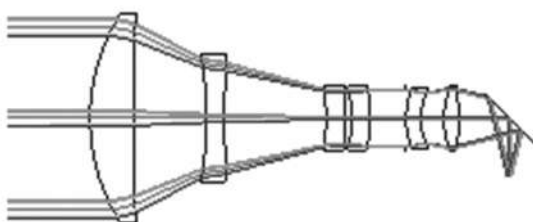


图 10 接收光学系统结构图
Fig.10 Structure diagram of receiving optical system

3.3 APD 阵列信号采集模块

APD 阵列在 23 °C 时的击穿电压为 200 V,且击穿电压的温敏系数为 1.45 V/K。APD 阵列的增益由加载偏压与击穿电压的比值决定,为保持 APD 阵列增益恒定,需随温度变化实时改变加载偏压。该 APD 阵列上带有温度系数为 $3\ 500 \times 10^{-6}/K$ 的温敏电阻,用于获取当前温度信息并进行温度补偿。为实现对 APD 阵列增益的数字控制,系统采用数字电位计,通过外部通信接口控制数字电位计值,以改变高压模块控制电压,进而控制 APD 阵列偏压,达到增益控制的目的。当有激光照射 APD 阵列敏感元时,各敏感元产生与入射光功率成比例的电流,该电流通过跨阻放

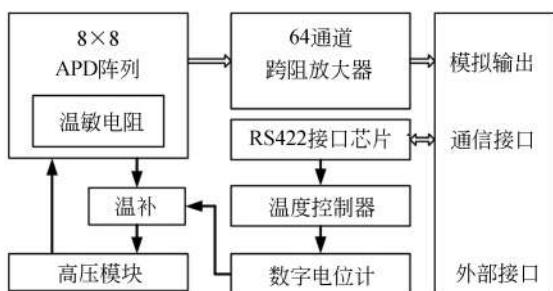


图 11 APD 阵列信号采集模块原理图
Fig.11 Block diagram of signal sampling module for APD array

大器转化为电压信号输出,以便后续处理。APD 阵列信号采集模块的原理框图如图 11 所示,实物图如图 12 所示。



图 12 APD 阵列信号采集模块实物图
Fig.12 Picture of signal sampling module for APD array

基于 DC-DC 变换的集成芯片可产生高压信号,其外围电路简单,但输出电压一般较低,不能满足 APD 的工作需求。BOOST 电路和电容二极管倍压可输出较高电压,但因采用分立元件,电路调节比较困难,且可靠性不高。本系统采用 EMCO 公司生产的 CA05N-5 高压模块,输出电压为 0~500 V,最大输出电流达 2 mA。

3.4 目标距离信息提取模块

目标距离信息提取模块主要包括时刻鉴别模块和高精度计时模块。它们的误差将影响系统的测距精度。

由固定阈值时刻鉴别方法可知,精度受信号幅值及形状的影响较大。因参考光不受大气传输及目标特性的影响,强度及波形较为稳定,参考 APD 选取固定阈值时刻鉴别方法。但因被测目标的回波信号受到大气传输、目标特性或 APD 阵列增益的影响,APD 阵列各敏感元对相同距离处目标输出信号的形状和幅值会有较大差异,若仍采用固定阈值时刻鉴别方法,势必会造成较大的误差。恒比定时时刻鉴别方法能够消除回波信号幅值对鉴别误差的影响。同时考虑干扰信号可能造成系统误判别,对于目标回波信号,系统采用固定阈值和恒比定时相结合的时刻鉴别方法^[20]。该方法在消除回波强度对时刻鉴别精度影响的同时,消除了噪声引起的误判别,提高了电路的鲁棒性。

计时方法主要有脉冲计数法、时间幅度转换

法、充放电插入法、延时链插入法和多相采样技术等。考虑到需要同时对 64 通道信号进行高精度计时,系统采用专用计时芯片 TDC-GP22,其计时分辨率可达 45 ps。

电路具备自校准功能,用以消除环境温度变化对计时精度的影响。电路自校准功能原理示意图如图 13 所示。

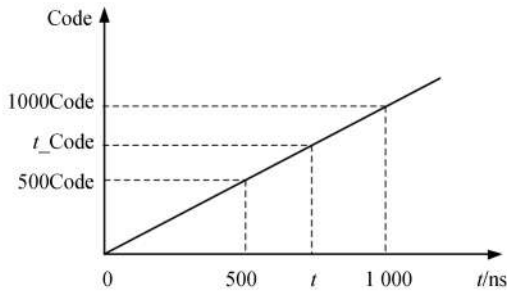


图 13 计时电路自校准功能原理示意图

Fig. 13 Principle of self-calibration for timing module

系统采用两点校准法,即由 FPGA 内部生成相对于计时起始时刻分别延迟 500, 1 000 ns 的延迟信号,计时芯片对上述两个延迟时间进行测量,获取的结果分别为 500Code、1000Code。在后续测量中,用该结果进行校准。假定某次测量结果为 t_Code ,其对应时间 t 为:

$$t = 500 \times \frac{t_Code - 1000Code}{1000Code - 500Code} + 1000.$$

系统每工作一段时间,就进行一次校准测试。目标距离信息提取模块电路实物如图 14 所示。



图 14 目标距离信息提取模块实物图

Fig. 14 Picture of target-distance detecting module

4 系统实验

激光主动成像光机系统的装配实物如图 15 所示。为测试达曼光栅的分束效果,在发射光学系统前放置摄像机记录出射光线,如图 16 所示。从图 16 可以看出:视场光阑滤除了达曼光栅分束后的各个次波,仅保留了主波,且从目视效果看, 8×8 激光束的能量分布均匀。

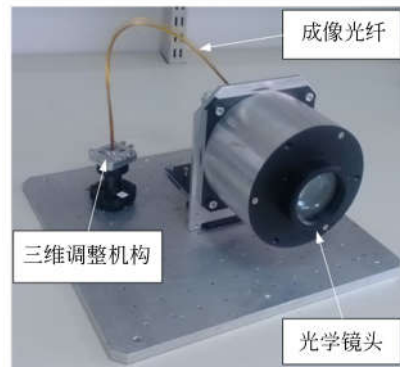


图 15 激光主动成像光机系统装配实物图

Fig. 15 Picture of assembled opto-mechanical system for laser active imaging



图 16 达曼光栅激光分束效果图

Fig. 16 Image of splitting laser beams with Dammann grating

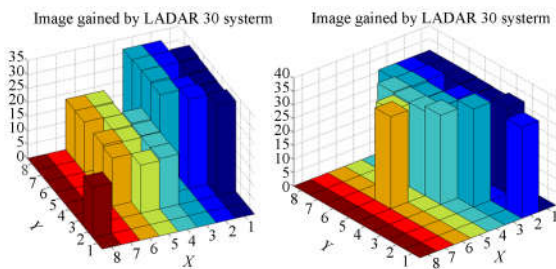
实验时,分别在 18 m 处和 30 m 处错开放置两个角反射器,实验场景如图 17 所示。分别对 19 m 和 31 m 处的两个角反射器、31 m 处的单个角反射器进行面阵成像实验,获取的距离图像如图 18 所示。

从图 18(a)可以看出:两个目标的平均距离分别为 19.28 m 和 31.54 m,测距误差分别为



图 17 实验场景图

Fig. 17 Picture of experimental scene



(a)两个角反射器在 19 m 和 31 m 处放置单个角反射器

(a)Two corner reflectors respectively located in distances of 19 m and 31 m (b)Single corner reflector in distance of 31 m

图 18 合作目标成像实验获取的距离图像

Fig. 18 Distance image gained from experiment with cooperative targets

0.28 m 和 0.54 m。在不考虑温度因素的影响时, TDC-GP22 的计时分辨率为 45 ps, 对应的测距分辨率为 0.006 75 m, 且计时电路具有温度自校准功能。由此可以看出, 计时误差不是系统测距误差的主要原因, 最大的计时误差来自时刻鉴别误差。当前激光器在发射脉冲激光的同时会产生很强的电磁干扰, 影响信号预处理电路, 从而引入时刻鉴别误差。因此, 增强系统的抗电磁干扰能力将是下一步的工作重点。

当把 19 m 处的角反射器去掉, 仅对 31 m 处的角反射器进行成像, 获取的距离图像如图 18(b)

参考文献:

- [1] 施智勇, 潘晓声, 张谦. 利用延时法进行高精度脉冲激光测距[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 252-258.
SHI ZH Y, PAN X SH, ZHANG Q. High-precision

所示。与图 18(a) 相比, 该图中有输出信号的敏感元更多, 原因是 19 m 处角反射器遮挡了部分敏感元。上述实验结果表明, 整个系统方案是切实可行的。为了对外场非合作目标进行成像, 在增加激光器输出功率的同时, 需优化光机结构, 减小内部杂散光对系统成像的影响, 同时可考虑对 APD 阵列偏压进行动态控制, 确保 APD 只响应目标回波信号^[21]。

系统目前只能对合作目标进行实验室功能成像实验, 合作目标距离比较近, 回波信号强度的变化不大, 所以系统进行目标灰度提取是无意义的。随着后续研究的深入, 当系统能够对室外非合作目标进行成像实验时, 将同步获取目标灰度图像。

5 结 论

基于 APD 阵列的无扫描激光主动成像系统在发送单束激光脉冲的条件下, 可以获取多个目标点的距离信息, 成像效率高。但在作用距离相同的情况下, 对激光器的输出功率要求较高。为提高激光的能量利用率, 系统采用达曼光栅进行分束照明, 将激光器的输出激光束集中照射在目标点上, 同时光学系统采用收发共孔径结构设计, 保证目标处激光斑点阵列和 APD 阵列上像元的几何对准关系。结合固定阈值和恒比定时时刻鉴别法对 APD 输出信号进行处理以准确计时, 该方法在消除噪声引起的误判别的同时, 可有效减小激光回波幅值对时刻鉴别精度的影响。对 19 m 和 31 m 处合作目标的成像实验显示: 两个目标的平均距离分别为 19.28 m 和 31.54 m。由此表明本文所提出的方案是切实可行的。整个系统按照功能样机设计及装调, 从而为后续工程应用奠定了技术基础。下一步将在激光器功率提高的基础上对外部非合作目标进行成像实验, 并完成系统指标的定量评价。

- pulsed laser measuring distance by time delay method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 252-258. (in Chinese)
[2] 徐正平, 沈宏海, 许永森. 直接测距型激光主动成像系统发展现状[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 28-38.
XU ZH P, SHEN H H, XU Y S. Review of the de-

- velopment of laser active imaging system with direct ranging[J]. *Chinese Optics*, 2015,8(1):28-38. (in Chinese)
- [3] 王灿进,孙涛,石宁宁,等. 基于双隐含层 BP 算法的激光主动成像识别系统[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6):1639-1647.
WANG C J, SUN T, SHI N N, *et al.*. Laser active imaging and recognition system based on double hidden layer BP algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(6):1639-1647. (in Chinese)
- [4] 张军强,谢飞,薛庆生,等. 基于四象限探测器的激光导引镜头的研制[J]. *中国光学*, 2015,8(3):471-479.
ZHANG J Q, XIE F, XUE Q SH, *et al.*. Laser guided lens based on four-quadrant detector [J]. *Chinese Optics*, 2015,8(3):471-479. (in Chinese)
- [5] 严洁,阮友田,薛珮瑶. 主被动光学图像融合技术研究[J]. *中国光学*, 2015,8(3):378-385.
YAN J, RUAN Y T, XUE P Y. Active and passive optical image fusion technology[J]. *Chinese Optics*, 2015,8(3):378-385. (in Chinese)
- [6] SAVAGE J, HARRINGTON W, MCKINLEY R A. 3D-LZ helicopter lidar imaging system [J]. *SPIE*, 2010,7684:768407.
- [7] GSCHWENDTNER A B, KEICHER W E. Development of coherent laser radar at Lincoln laboratory [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2000,12(2):383-396.
- [8] ALBOTA M A, AULL B F, FOUCHED G, *et al.*. Three-dimensional imaging laser radars with Geiger-mode avalanche photodiode arrays [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002,13(2):351-370.
- [9] 杨名字. 利用激光主动探测技术实现光电窥视设备检测[J]. *中国光学*, 2015,8(2):255-262.
YANG M Y. Detecting of photoelectric peeping devices based on active laser detection [J]. *Chinese Optics*, 2015,8(2):255-262. (in Chinese)
- [10] 刘立生,张合勇,王挺峰,等. 激光外差探测对振动目标多普勒频谱成像[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6):1508-1515.
LIU L SH, ZHANG H Y, WANG T F, *et al.*. Doppler spectrum imaging of vibrating target using laser heterodyne detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(6):1508-1515. (in Chinese)
- [11] FEYGELS V I, PARK J Y, WOZENCRAFT J, *et al.*. CZMIL (Coastal Zone Mapping and Imaging Lidar): from first flights to first mission through system validation [J]. *SPIE*, 2013,8724:87240A.
- [12] 王飞,汤伟,王挺峰,等. 8×8APD 阵列激光三维成像接收机研制[J]. *中国光学*, 2015,8(3):422-427.
WANG F, TANG W, WANG T F, *et al.*. Design of 3D laser imaging receiver based on 8×8APD detector array [J]. *Chinese Optics*, 2015,8(3):422-427. (in Chinese)
- [13] MARINO R M, DAVIS W R. Jigsaw: a foliage-penetrating 3D imaging laser radar system [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005,15(1):23-36.
- [14] 胡春生. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005.
HU CH SH. *Investigation into the High-speed Pulsed Laser Diode 3D-imaging Lidar* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [15] 王建宇,洪光烈,卜弘毅,等. 机载扫描激光雷达的研制[J]. *光学学报*, 2009,29(9):2584-2589.
WANG J Y, HONG G L, BU H Y, *et al.*. Study on airborne scanning lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009,29(9):2584-2589. (in Chinese)
- [16] GUO Y, HUANG G H, SHU R. 3D imaging laser radar using Geiger-mode APDs[J]. *SPIE*, 2010, 7684:768402.
- [17] 朱静浩. 阵列 APD 无扫描激光雷达非均匀性的分析与实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
ZHU J H. *Analysis and Experimental Research on Non-uniformity of Non-scanning Lidar Based on APD Arrays*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [18] 张勇,曹喜滨,吴龙,等. 小面阵块扫描激光成像系统实验研究[J]. *中国激光*, 2013,40(8):0814001.
ZHANG Y, CAO X B, WU L, *et al.*. Experimental research on small scale risley prime scanning imaging laser radar system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013,40(8):0814001. (in Chinese)
- [19] 罗远,贺岩,胡善江,等. 基于声光扫描的三维视频激光雷达技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(8):

0802005.

LUO Y, HE Y, HU SH J, *et al.*. Three-dimensional video imaging lidar system based on acousto-optic laser scanning[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8):0802005. (in Chinese)

- [20] 徐正平,沈宏海,许永森,等. 激光成像系统高精度目标距离和强度信息提取[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8):2668-2672.

XU ZH P, SHEN H H, XU Y S, *et al.*. Target-distance and intensity information detecting with

high precision in laser imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2668-2672. (in Chinese)

- [21] 陈慧敏,刘新阳. 收发同轴脉冲激光引信在水雾中的后向散射偏振特性[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3):626-632.

CHEN H M, LIU X Y. Backscattering polarization characteristics of pulsed laser fuse with coaxial optical system in water fog [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3):626-632. (in Chinese)

作者简介:



徐正平(1983—),男,河南许昌人,博士,副研究员,硕士生导师,2006年于东北师范大学获得学士学位,2011年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事激光主动成像及航空遥感器电子学设计等方面的研究。E-mail: xuzp090@163.com.



沈宏海(1976—),男,研究员,博士,硕士生导师,1998年于山东大学获得学士学位,2001年、2009年于中科院长春光机所分别获得硕士、博士学位,主要从事新型航空光学遥感技术及其光电集成方面的研究。E-mail: shenhh@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)