

## 基于盖革 APD 阵列脉冲式三维成像激光雷达系统

陈勇强<sup>1,2</sup>, 贺岩<sup>1\*</sup>, 罗远<sup>1</sup>, 周亮<sup>4</sup>, 常鑫<sup>4</sup>, 刘芳华<sup>1,2</sup>, 焦崇森<sup>1,2</sup>, 郭守川<sup>1,3</sup>, 黄宜帆<sup>1,2</sup>, 陈卫标<sup>1\*\*</sup><sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;<sup>3</sup>上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210;<sup>4</sup>中国电波传播研究所, 山东 青岛 266107

**摘要** 提出了一种基于国内自研 InGaAs 64×64 盖革模式雪崩光电二极管(APD)阵列的小型化成像激光雷达系统, 系统采用阵列探测器结合一维同轴扫描的方式实现车载移动平台快速地形三维成像。详细介绍了该系统的理论仿真模型、系统组成、工作原理和实验结果。静态测量时, 对距离 100 m 处的平面目标扫描成像, 其平面测量精度为 0.12 m。动态测量时, 将系统搭载于运动速度为 60 km/h 的车载平台对目标区域进行三维成像, 成功获得了测量区域内目标三维点云, 测绘效率约为 36 km<sup>2</sup>/h, 平均测量点密度为 13454 点/m<sup>2</sup>。实验结果表明国产盖革模式 APD 阵列激光雷达系统可实现动平台高分辨率三维成像, 为高速运动车载平台实现高分辨率地形测绘提供新的技术手段。

**关键词** 成像系统; 激光雷达; 三维成像; 光子计数; 雪崩光电二极管; 探测器阵列

**中图分类号** TN958.98

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL220683

## 1 引言

盖革模式雪崩光电二极管(Gm-APD)阵列可以响应单个光子量级的回波信号<sup>[1]</sup>, 探测灵敏度高; 同时各个像元可以独立准确记录回波光子到达的时间, 集成度较高。相较于扫描时间较长的单点逐像素扫描的成像激光雷达系统, 采用 Gm-APD 阵列的雷达系统具有成像分辨率高、成像速度快、系统体积小等优势, 适合应用于地形遥感测绘、航天器着陆点选择、空间交会对接以及目标识别<sup>[2-5]</sup>等领域。

美国麻省理工林肯学院率先提出使用探测器阵列实现三维成像的方案, 于 2001 年采用 4×4 的 APD 阵列成功研制了第一代 APD 面阵激光雷达 GEN-I 系统<sup>[6]</sup>, 并在此后 20 年间先后研制了多套面阵成像激光雷达系统样机, 进行大量机载实验, 验证了采用大规模 APD 阵列的激光雷达系统实现全天时机载高分辨率地形成像的能力<sup>[7-8]</sup>。2015 年美国 Harris 公司推出了首套商业化 128×32 盖革模式阵列激光雷达系统, 开展城市规划、基础设施管理和应急救援等<sup>[9]</sup>民用领域应用。近年来, 得益于重庆光电技术研究所大规模 Gm-APD 阵列设计制造方面取得的突破<sup>[10]</sup>, 国内逐步开展了基于大规模 Gm-APD 阵列的三维成像研究。孙剑峰等<sup>[11]</sup>在国内自研 32×32 像元 Gm-APD 的基础上, 搭建了一套 1570 nm 激光主动成像实验平台, 获得

了外场 3.9 km 目标轮廓, 证实了国产面阵探测器的良好性能。葛鹏等<sup>[12]</sup>基于 64×64 Gm-APD 阵列搭建了 1064 nm 激光探测实验装置, 在室外对 600 m 远处目标进行成像, 同时利用正则化图像重构方法提升成像质量。但我国在 Gm-APD 阵列三维成像领域起步较晚, 此前的研究仍处于实验阶段, 尚无可搭载在移动平台上进行三维成像的大面阵激光雷达系统样机。

中国科学院上海光学精密机械研究所联合中国电波传播研究所共同研制了一套基于国内自研 64×64 InGaAs Gm-APD 阵列探测器的小型化激光雷达系统样机, 该样机可搭载于车载移动平台开展三维地形测绘。本文详细介绍了系统成像仿真模型、系统组成、工作原理及静态、动态实验结果。实验成功获得青岛白沙河特大桥周边沿江区域目标高分辨三维点云, 其平均测量点密度为 13454 点/m<sup>2</sup>, 远大于生成 1:500 数字高程模型所要求的点密度(≥16.00 点/m<sup>2</sup>)<sup>[13]</sup>。实验结果表明国产 Gm-APD 阵列激光雷达系统可实现动平台高分辨率三维成像。

## 2 基本理论

激光雷达系统发射激光脉冲照射到目标表面后反射, 目标回波光子经接收系统接收, 被单光子探测器响应。根据大目标探测的激光雷达方程<sup>[14]</sup>, 目标返回的信号光子数  $N_s$  为

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-04-12; 录用日期: 2022-04-24; 网络首发日期: 2022-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(41876105, 42106180)

通信作者: \*heyang@siom.ac.cn; \*\*wbchen@siom.ac.cn

$$N_s = \frac{E_l \lambda}{hc} \cdot \rho \cdot \frac{1}{\Omega R^2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \eta_{atm}^2 \cdot \eta_t \cdot \eta_r, \quad (1)$$

式中:  $E_l$  为激光单脉冲能量;  $\lambda$  为激光波长;  $h$  为普朗克常数;  $c$  为真空中光速;  $\rho$  为目标反射率;  $\Omega$  为激光发射立体角;  $R$  为目标距离;  $D$  为接收望远镜口径;  $\eta_{atm}$  为单程大气透过率;  $\eta_t$  为发射光学系统效率;  $\eta_r$  为接收光学系统效率。

瞬时视场内系统接收到的太阳背景光子同样能被单光子探测器响应<sup>[15]</sup>, 其中单个时域间隔  $\Delta t$  内平均背景光子数  $N_b$  可表示为

$$N_b = E_\lambda \cdot \frac{\lambda}{hc} \cdot \Delta t \cdot \Delta \lambda \cdot \frac{\theta_r^2}{4} \cdot \rho \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \eta_{atm} \cdot \eta_r \cdot \cos \theta_{sun}, \quad (2)$$

式中:  $E_\lambda$  为太阳背景辐照度;  $\Delta \lambda$  为接收系统滤光片带宽;  $\theta_r$  为望远镜瞬时接收视场角;  $\theta_{sun}$  为太阳光入射方向与目标表面法线夹角。

除了太阳背景噪声外, 探测器本身的暗电流噪声也是系统噪声的主要组成部分。假设暗电流噪声在整个探测周期内为均匀分布, 已知探测器的暗计数率为  $f_{dark}$ , 可等效得到单个时域间隔  $\Delta t$  内暗电流初始光电子数  $N_{dark}$  为

$$N_{dark} = f_{dark} \cdot \Delta t, \quad (3)$$

则不同时刻  $t$  内单光子探测器产生的初始光电子数  $S(t)$  为

$$S(t) = E_{PD} \cdot [N_s(t) + N_b(t)] + N_{dark}, \quad (4)$$

式中:  $E_{PD}$  为探测器的量子效率。

工作在盖革模式的探测器, 其初级光电子产生符合泊松分布<sup>[16]</sup>,  $t$  时刻产生  $m$  个光电子的概率为:

$$P(m; t) = \frac{1}{m!} \cdot S(t)^m \cdot e^{-S(t)}. \quad (5)$$

由于系统采用的单光子探测器单次探测周期只能响应一次, 则探测器在第  $j$  个时间间隔  $\Delta t$  内被触发的概率  $P_j$  等于前  $j-1$  个时间间隔内没有初级光电子产生的概率乘以第  $j$  个时间间隔  $\Delta t$  至少有一个初级光电子产生的概率<sup>[17]</sup>:

$$P_j = \left[ \prod_{i=1}^{j-1} p(m=0; i) \right] \cdot p(m \geq 1; j) = \exp \left[ - \sum_{i=1}^{j-1} S(i \cdot \Delta t) \right] \{ 1 - \exp [ S(j \cdot \Delta t) ] \}. \quad (6)$$

对于采用 Gm-APD 阵列探测器的系统, 定义每个像元对应的目标区域内的激光能量时空分布、目标距离和反射率, 结合式(1)~式(6), 可以逐像元计算得到探测器阵列各个像元在不同时间间隔内对应的光子数, 进而得到各个像元在不同时间间隔内被触发探测的概率密度分布和累积概率分布函数。随后利用蒙特卡罗仿真的方法进行随机抽样, 模拟得到 4096 个像元单次脉冲测量下的实时采集结果和多脉冲重复测量的结果。仿真过程中某像元不同时刻的光子数分布、探测概率密度分布(概率密度函数, PDF)和累积分布(累积分布函数, CDF)结果如图 1(a)~图 1(c)所示。

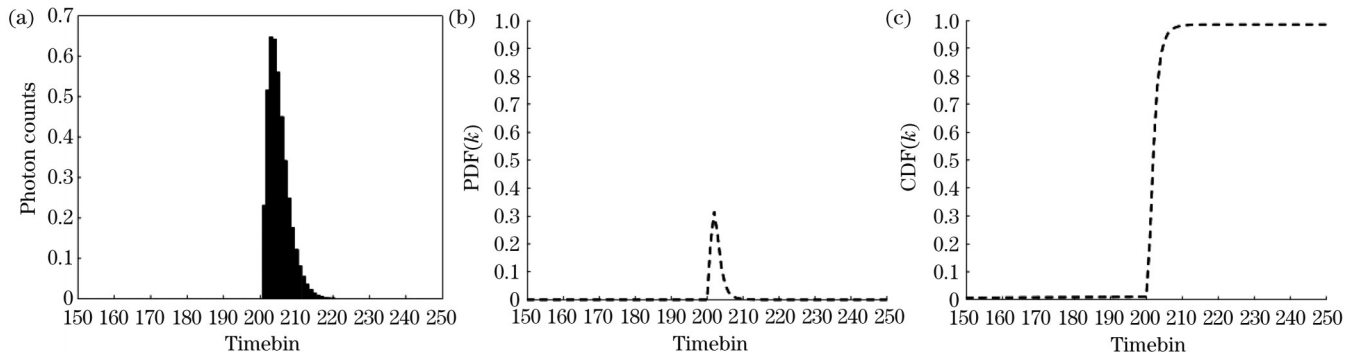


图 1 某像元光子探测仿真结果。(a)光子数;(b)概率密度函数;(c)累积分布函数

Fig. 1 Simulation of photon detection of a pixel. (a) Photon number; (b) probability density function (PDF); (c) cumulative distribution function (CDF)

### 3 激光雷达系统研制

#### 3.1 系统组成

所设计的雷达系统采用基于 Gm-APD 阵列的脉冲式三维成像激光雷达技术, 通过阵列三维成像和一维机械扫描相结合, 实现车载快速移动平台的高分辨率三维成像。系统结构组成主要分成以下 5 个模块: 光纤激光器模块、阵列探测器模块、发射接收光学模块、扫描模块以及总控模块。系统框图如图 2 所示。总控模块控制光纤激光器发射激光脉冲, 出射光束经

发射光学模块整形后经扫描模块照射到目标表面。目标激光回波信号沿原光路返回, 由接收光学元件接收到阵列探测器触发探测。阵列探测器采集的数据经 CameraLink 数据端口传输到总控模块, 经数据转换存储于固态硬盘中, 同时采集的数据可经 UDP 网络端口传输至用户端, 进行实时采集数据预览显示。

雷达系统发射光源为小体积光纤激光器, 采用传导散热的方式减小激光发射模块的质量和体积。该激光器中心波长为 1550 nm, 重复频率为 25 kHz, 脉冲宽度为 4 ns, 单脉冲能量为 32  $\mu$ J。初始出射的激光光斑

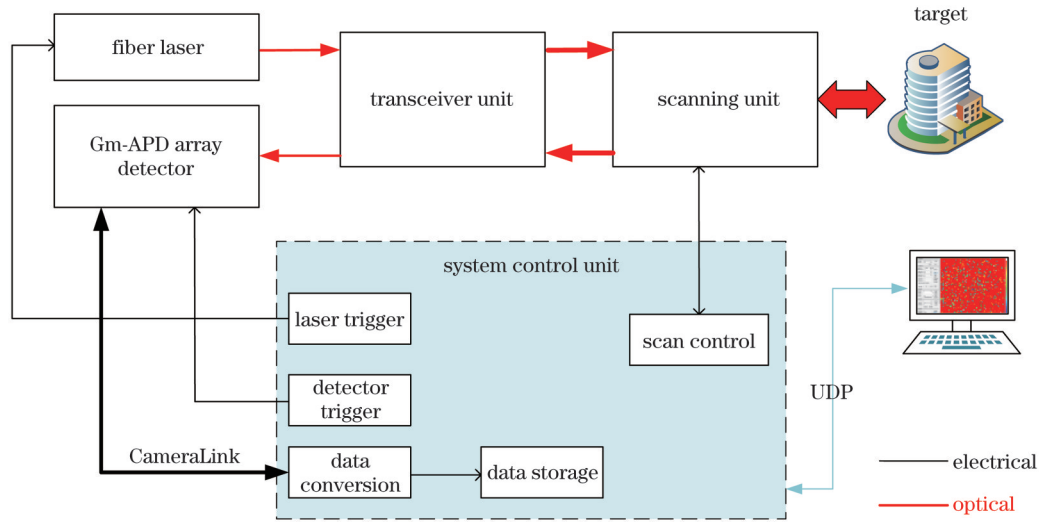


图 2 系统结构框图

Fig. 2 System structure diagram

在空间上呈现不均匀的高斯分布,为了实现目标区域的相对均匀光强照射,激光器出射端接上一段匀化光纤对出射的激光光束进行整形,整形后的光束再经准直镜准直,使出射激光发散角为 8 mrad。收发光路采用收发同轴的设计,接收光路中利用 45° 反射镜进行光路转折,使得整体结构排布更加紧凑,进一步实现系统的小型化和轻量化。扫描模块由 45° 旋转扫描镜、中空扫描电机及角度编码器组成,采用扫描反射镜转动的方式实现 360° 旋转扫描。系统总体光路如图 3 所示。系统所用探测器为  $64 \times 64$  InGaAs Gm-APD 阵列,在 1550 nm 波段对应的量子效率为 20%,低温制冷条件下对应的暗计数率为 20 kHz。



图 4 系统整体视图

Fig. 4 Overall view of system

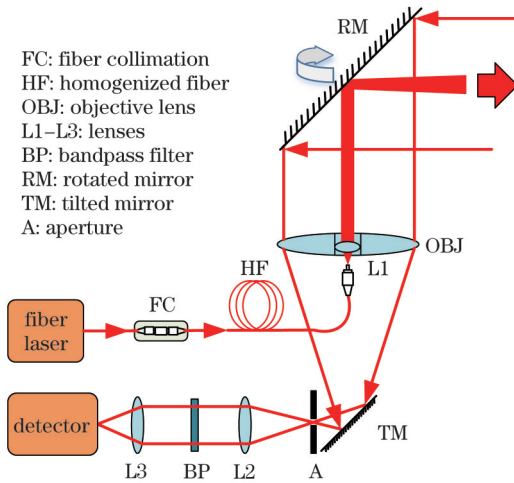


图 3 总体光路图

Fig. 3 Diagram of light path

依据设计方案,最终研制的雷达系统质量为 17.2 kg,长宽高分别为 360 mm、258 mm、300 mm。系统样机的整体视图如图 4 所示。系统的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 系统主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of system

Part	Parameter	Value
Transmitter	Pulse repetition frequency / kHz	25
	Wavelength / nm	1550
	Pulse width / ns	4
	Pulse energy / $\mu$ J	32
	Divergence angle / mrad	8
Receiver	Receiver aperture / mm	50
	Receiver field of view / mrad	8
	Optical filter bandwidth / nm	1
	Optical throughput efficiency	0.6
Detector	Number of columns and rows	64, 64
	Range bin size / ns	1
	Gate width / ns	20-4000
	Frame rate / kHz	25
	Dark count rate / kHz	20
	Detector efficiency	0.2
	Lidar	Weight / kg
Size(length $\times$ width $\times$ height) / mm		360 $\times$ 258 $\times$ 300



### 3.2 工作原理

系统的工作时序关系如图 5 所示。总控模块将触发信号分别给到激光器模块和阵列探测器模块:一路信号触发光纤激光器发射脉冲激光,另一路信号作为同步信号发送给阵列探测器,探测器内部同步产生一个 Start 信号(计时开始脉冲信号),Start 信号经过固定延时  $t_{\text{delay}}$  后产生距离门控信号作为探测器内部各个像元的时钟计数器 TDC 的起始信号。当目标回波脉冲信号到达探测器光敏面时,阵列探测器各个像元分别被触发产生计时停止 Stop 信号,停止 TDC 计数。单次测量周期结束后各个像元测量得到对应的飞行时间计数值  $t_0$ 。单次成像周期结束后探测器内部的读数电路将各个像元的时间计数值读出,被触发的像元读出的数据为对应时间计数测量值,而未被触发的像元读出的数据为门宽值,从而在单个脉冲出射下测量得到

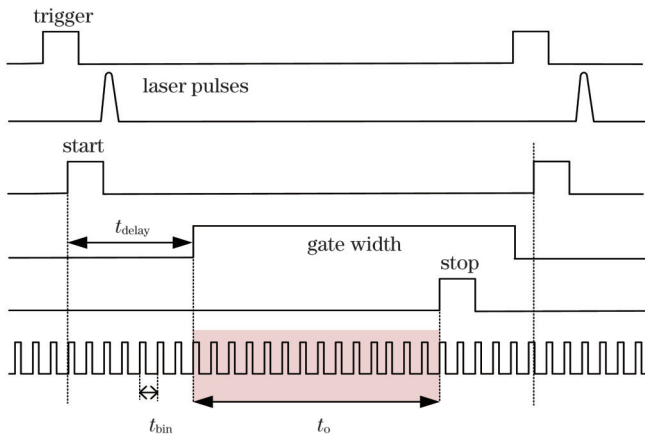


图 5 系统工作时序

Fig. 5 Timing sequence of system

目标的三维信息。由于激光器实际出光的时刻与阵列探测器开始工作的时刻存在一定的延时,这一延时会带来固定的测量误差,因此系统装调完成后需要利用距离已知的目标进行距离零位校正。各像元距离测量值  $R_i$  可由下式得到:

$$R_i = \frac{c}{2} \cdot (t_{\text{delay}} + t_0) \cdot t_{\text{bin}} + R_{\text{offset}}, \quad (7)$$

式中:  $t_{\text{bin}}$  为探测器的时间分辨率;  $R_{\text{offset}}$  为距离零位校正值。

### 3.3 数据处理

阵列探测器实时输出单帧采集图像中,除目标有效计数外还包括较多的噪声计数,其主要来源<sup>[18]</sup>包括背景光触发、暗计数以及近场强散射信号光子触发。这些噪声计数将在后期点云坐标转换中生成大量的噪声点云,使得目标点云淹没于大量的噪声中,直接影响目标的识别分类结果。传统的方法通常基于点云聚类信息实现噪声滤除,但这种方法所需的处理时间较长。对实时采集数据进行分析 and 预处理将实现低噪声计数率的原始数据获取,大大缩减数据后处理所需时间,提高成像效率。系统实时采集原始数据及其时间计数值分布结果如图 6 所示。由图 6(a) 实时图像中可以观察到有效目标像元中掺杂着大量的随机噪声点;从图 6(b) 时间计数值分布直方图结果中可见,目标像元计数值较集中地分布在几纳秒的探测时间间隔内。由近场强散射信号触发的噪声像元计数值分布于探测门宽前部,背景光、暗计数触发的噪声像元计数值则随机分布于整个探测门宽范围,且信号像元的计数率远高于噪声触发的像元的计数率。

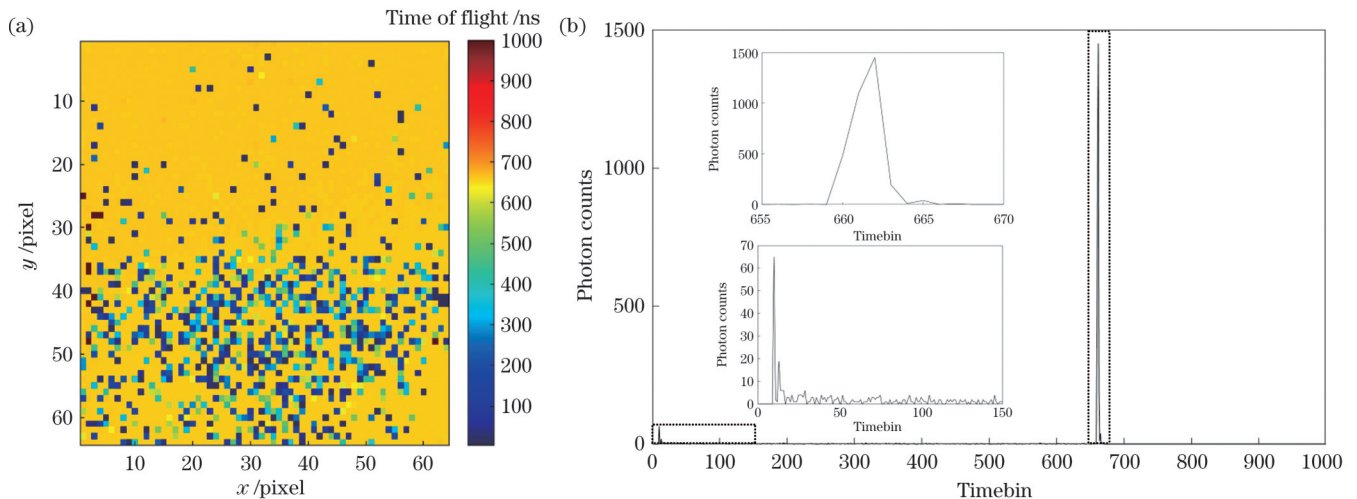


图 6 实时采集数据及其时间计数值分布直方图结果。(a) 实时图像; (b) 时间计数值分布直方图

Fig. 6 Real-time image and time of flight histogram results of raw data. (a) Real-time image; (b) time of flight histogram

基于噪声计数和信号计数在时域分布的特性,可以通过划定合适的计数阈值滤除数据中的噪声,处理流程如图 7 所示。首先对单帧实时数据统计其时间计数值分布,得到时间计数值分布函数  $H(T_i)$ ,同时

将频次最大的时间计数值作为去噪阈值的选择依据;其次对时间计数值分布函数  $H(T_i)$  相邻时间区间进行滑动累加,得到累积后的时间计数值分布函数  $F(T_i)$ :

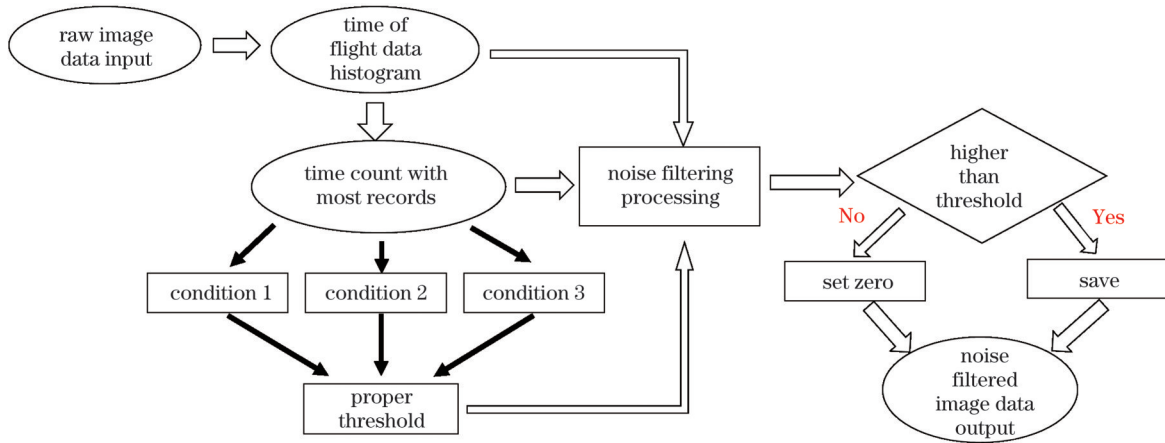


图7 基于图像的去噪处理方法流程

Fig. 7 Flowchart of image-based noise filtering method

$$F(T_i) = \sum_{x=i+2}^{x=i-2} H(T_x); \quad (8)$$

最后对单帧 4096 个像元进行逐像元阈值判断,若对应像元时间计数值的累积分布频次  $F(T_i)$  大于设定的阈值,则该像元为信号像元,计数值保留,若低于设定的

阈值则该像元为噪声像元,该计数值设置为门宽值。

处理后的单帧图像及其时间计数值分布直方图结果如图 8 所示,采集数据中噪点被剔除,计数值分布中仅保留了目标范围的几个计数值,数据中仅保留了有效目标像元数据。

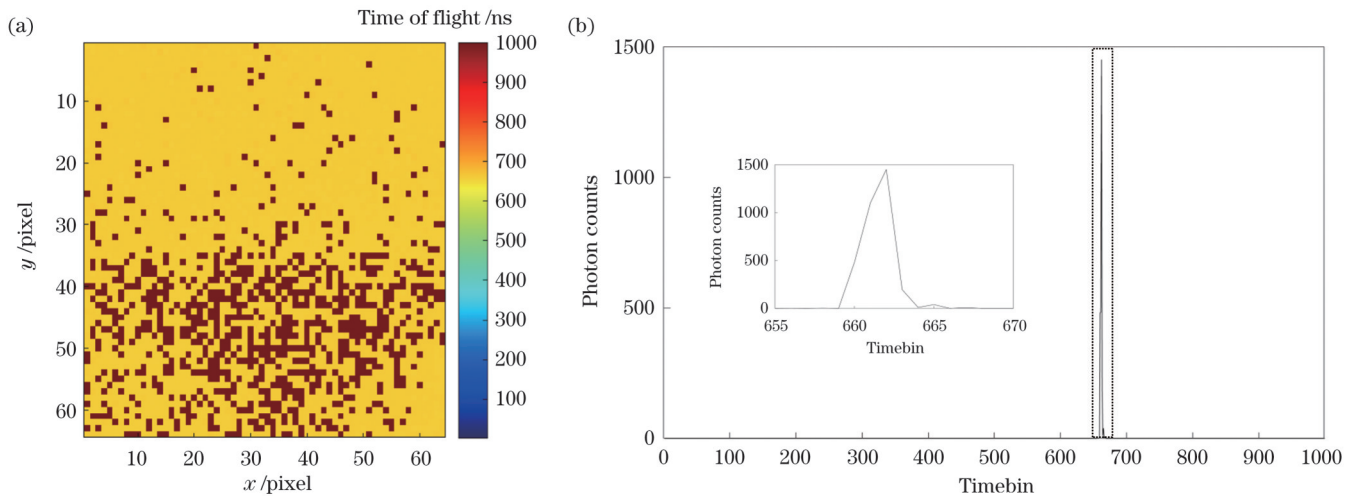


图8 处理后数据及其时间计数值分布直方图结果。(a)实时图像;(b)时间计数值分布直方图;

Fig. 8 Real-time image and time of flight histogram results of processed data. (a) Real-time image; (b) time of flight histogram

## 4 实验结果与分析

### 4.1 静态平面测量

为了评估系统平面测量精度,在测试场地距离雷达系统正前方约 100 m 处放置两个平面目标,测得目标 1、目标 2 至雷达扫描中心点的距离分别为 102.56 m 和 104.06 m,实验时将雷达设置为旋转扫描状态。图 9 展示了两目标单帧采集数据的时间计数值直方图分布结果,从中可清晰识别两个目标峰值,两峰值点位置分别为 684 和 694,对应距离分别为 102.6 m 和 104.1 m;对应的距离差为 1.5 m,与实际相符。从局部放大结果可以看到,由于激光脉冲本身具有一定脉冲宽度,同时探测器时间测量值也存在一定抖动,故而目标计数值分布在峰值点附近约 4 ns 的区间范围内;实验过程

中符合泊松分布的散粒噪声随机地分布于整个探测门宽。图 10 展示了实际测试场景及处理后三维图像结果,从三维图像中可以清晰分辨出两目标。

利用上述单光子成像仿真模型,综合考虑系统参数、目标距离和反射率等参数,可得到两目标对应的仿真数据,其时间计数值直方图分布结果和三维图像如图 11 所示。单帧仿真数据时间计数值分布与实际测量数据直方图分布结果基本一致,可清晰识别两个目标峰值,两峰之间时间间隔为 10 ns。仿真时考虑了正午最强的太阳背景光照及最大的暗计数率,而实验时间接近傍晚,因此仿真数据中背景噪声率略高于实际测量结果。

由实验测量目标三维图像和仿真得到的目标三维图像结果中可以看到,对于平面目标测量,各个像元会

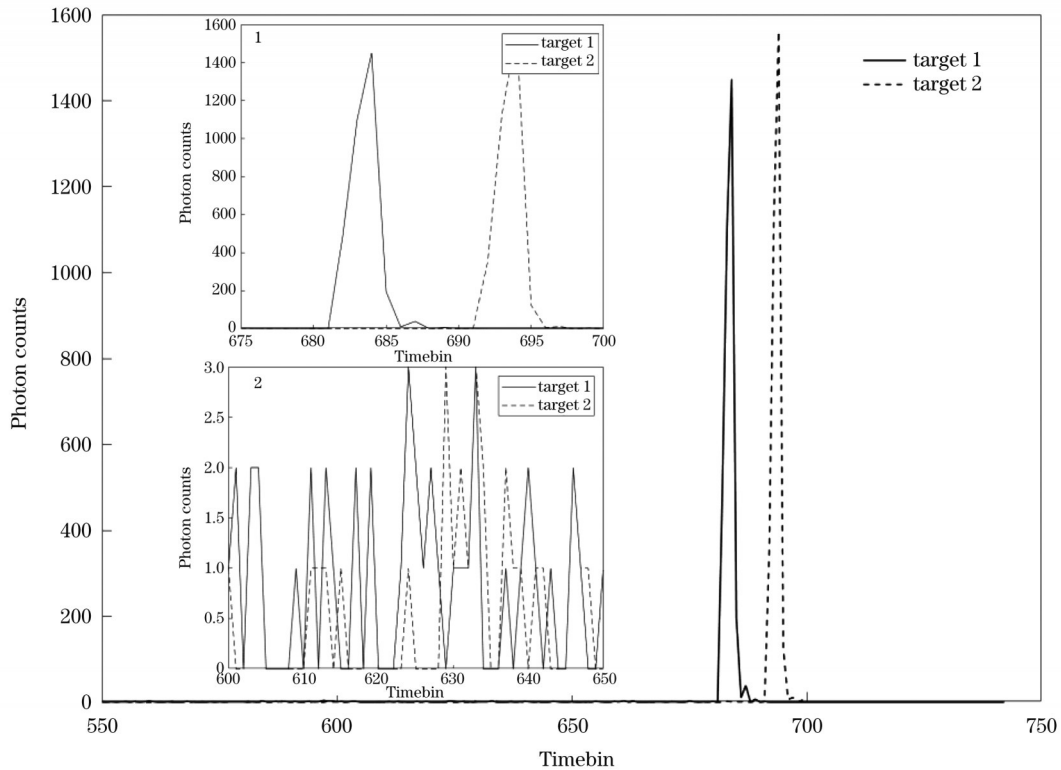


图9 两目标时间计数直方图分布结果。插图1局部放大的目标峰值区域;插图2测试时较低的背景噪声率

Fig. 9 Time of flight histogram results of two-target example. Inset 1: zoomed in regions of two peaks; inset 2: low background noise rate in measurement

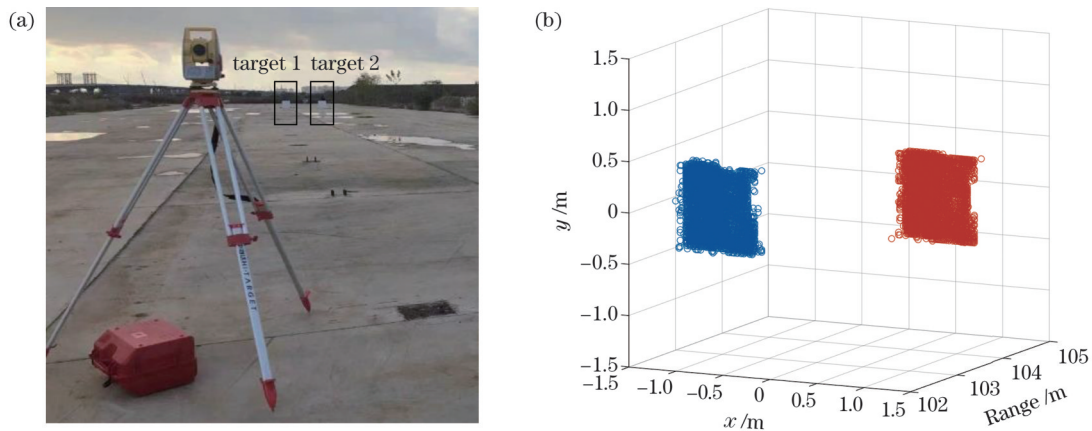


图10 测试场景及目标三维图像。(a)测试场景;(b)目标三维图像

Fig. 10 Test scene and 3D image of targets. (a) Test scene; (b) 3D image of targets

得到不同的距离值,从而导致目标三维点云存在一定厚度。评估单帧测量平面目标时测量精度的计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{c}{2} \cdot \frac{1}{K-1} \cdot \sum_{i=1}^K (t_{oi} - \bar{t})^2}, \quad (9)$$

式中: $K$ 为目标像元的个数; $t_{oi}$ 为第*i*个目标像元的时间计数值; $\bar{t}$ 为测量平面目标的平均时间计数值。

由式(9)可求得靶标1、靶标2测量数据和仿真数据瞬时测量的精度分别为0.12 m、0.11 m、0.10 m和0.10 m。实测数据与仿真数据的平面测量精度结果基本一致。

#### 4.2 动平台成像实验

为了验证系统动平台成像性能,将雷达样机、全景

相机以及定位定姿系统(POS)整体安装至车载平台置于车顶,对行驶路径范围内目标进行三维成像。图12(a)和图12(b)展示了实验搭载平台和系统整体安装情况,系统以一定倾斜角度安装于平台顶部;图12(c)为实验区域谷歌地图及平台移动路径,实验区域位于中国山东青岛白沙河特大桥周边沿江区域,图中实线对应实验时平台移动轨迹,全长约2.2 km。实验过程中车载平台位置和姿态信息由Novatel SPAN-FSAS高精度惯性分体式组合导航系统提供,系统由Novatel OEM638接收机板卡、FSAS IMU单元以及配套接收天线组成。POS系统性能参数如表2所示,各项精度指标用均方根(RMS)值表征。



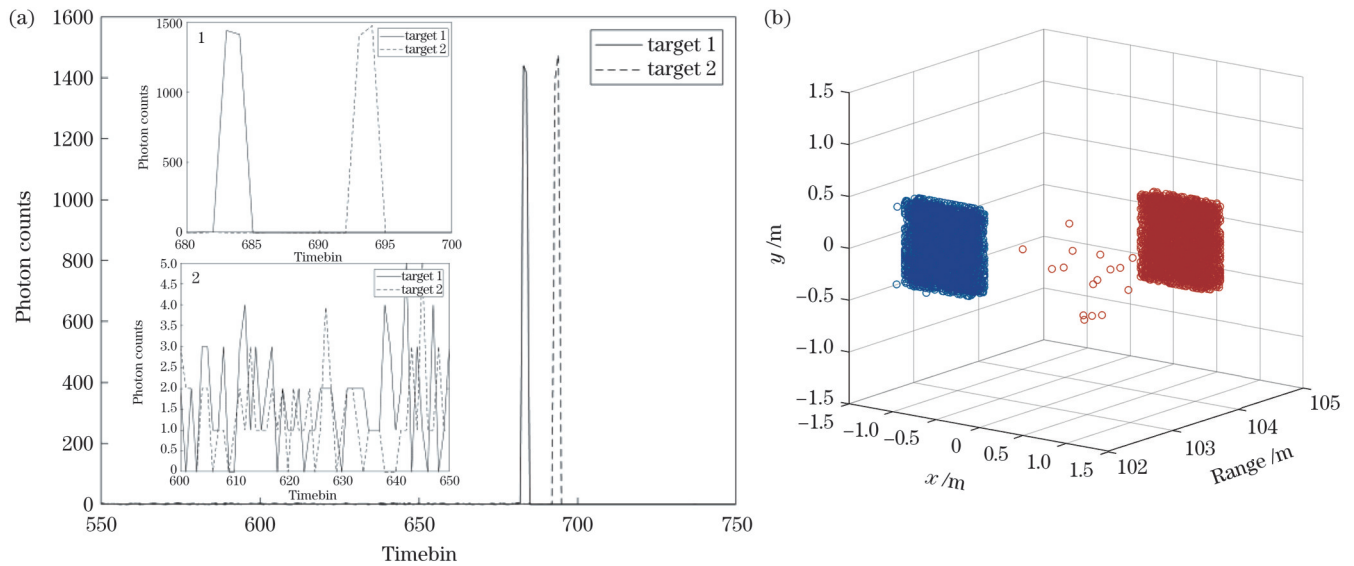


图 11 仿真数据结果。(a)时间计数值分布直方图,其中插图1为局部放大的目标峰值区域,插图2为较低的背景噪声率;(b)三维图像  
Fig. 11 Results of simulated data. (a) Time of flight histogram, in which inset 1 shows zoomed in regions of two peaks and inset 2 shows low background rate; (b) 3D image



图 12 动平台成像实验。(a)实验搭载平台;(b)系统整体安装;(c)测试区域谷歌地图。

Fig. 12 Automobile imaging experiment. (a) Vehicle experimental platform; (b) system overall installation; (c) Google map of test area

表 2 POS 系统性能参数  
Table 2 Performances of POS system

Time of lost lock / s	RMS position accuracy / m		RMS velocity accuracy / (m·s <sup>-1</sup> )		RMS attitude accuracy / (°)		
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Roll	Pitch	Azimuth
0	0.010	0.015	0.020	0.010	0.008	0.008	0.012
10	0.020	0.020	0.020	0.010	0.008	0.008	0.013
60	0.130	0.050	0.030	0.020	0.010	0.010	0.016

实验过程中平台以 60 km/h 的移动速度开展地形测绘,实验历时约 150 s,共获得道路两侧面积 1.5 km<sup>2</sup> 的目标区域的激光雷达三维点云,实际测绘效率约为 36 km<sup>2</sup>/h。对实验采集的原始数据,利用 3.3 节中的

去噪方法进行预处理,预处理后的数据再融合位置、姿态及编码器角度信息进行坐标转换得到滤除噪点后的三维点云结果。图 13 为实验获取的沿江路段整体激光雷达三维点云图像,图中右上角为白沙河特大桥的

部分轮廓,左上角展示了大桥局部放大结果,可以清晰识别桥墩、桥上路灯等目标。图 14 展示了局部高分辨率三维图像与谷歌地图对比结果,其中图 14(a)为沿江景观及防潮堤坝高分辨率三维图像,该区域平均测量点密度为 13454 点/ $\text{m}^2$ ,图 14(b)为对应区域的谷歌

地图图像。从对比结果中可以清晰分辨出 1 大 4 小共 5 个半圆形沿江市民活动区、整齐分布的景观树木、路旁的荒地以及防潮堤坝等特征目标。动态实验结果表明所设计的系统成像性能良好,可以搭载于高速移动的车载平台实现高分辨率地形三维测绘。

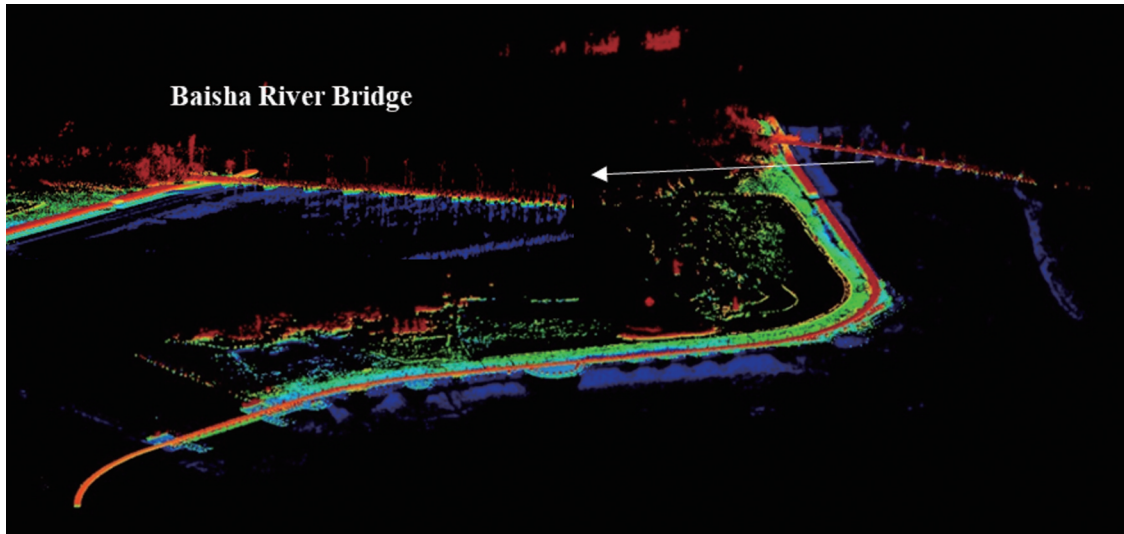


图 13 白沙河特大桥附近区域激光雷达图像

Fig. 13 Lidar image of area near Baisha River Bridge

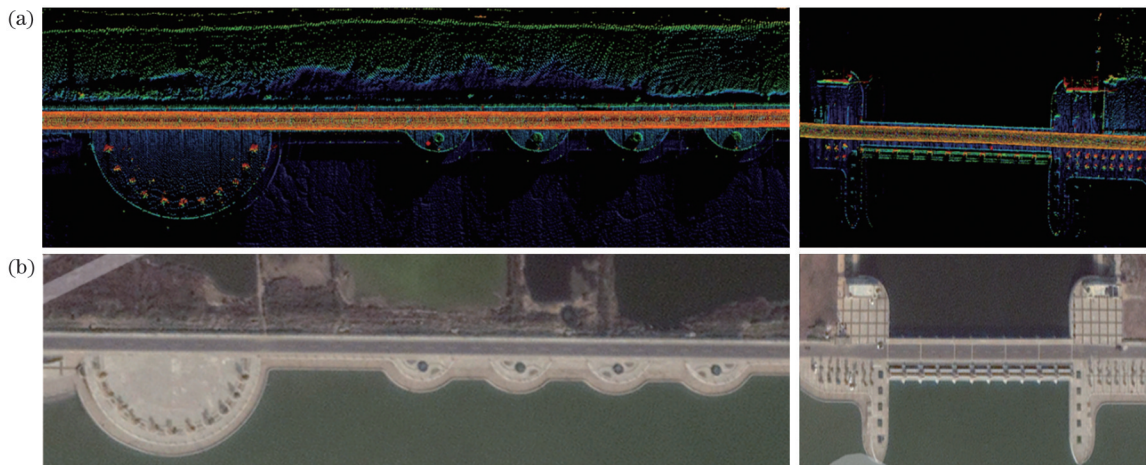


图 14 激光雷达图像与谷歌地图对比。(a)激光雷达图像;(b)谷歌地图

Fig. 14 Comparison between lidar images and Google maps. (a) Lidar images; (b) Google maps

## 5 结 论

基于国产 InGaAs  $64 \times 64$  Gm-APD 探测器阵列和人眼安全波段 1550 nm 脉冲式光纤激光器,研制了据我们所知为国内首套的小型化 Gm-APD 阵列三维成像激光雷达系统样机。系统采用阵列探测器结合一维同轴扫描的方式实现车载移动平台快速地形三维成像。开展了动、静态实验评估系统成像性能。静态测量时,对 100 m 外的平面目标扫描成像,测量精度为 0.12 m。动态测量时,系统搭载于移动速度为 60 km/h 的车载平台开展动平台成像实验,成功获得了青岛白

沙河特大桥周边沿江区域目标的三维图像,可实现每小时约  $36 \text{ km}^2$  测量区域的成像覆盖。实验获得的部分区域点云,平均测量点密度为 13454 点/ $\text{m}^2$ ,从激光雷达图像中可以清晰识别桥梁、道路、市民景观、绿化植被和防潮堤坝等目标。实验表明所设计的国产 Gm-APD 阵列激光雷达系统成像性能良好,可实现动平台高分辨率三维成像,为高速运动车载平台实现高分辨率地形测绘提供了新的技术手段。未来将进一步实现系统的小型化和轻量化,以便搭载于小型无人机(UAV)平台,对车辆平台难以运行的复杂地形区域开展空中对地快速三维成像。



## 参 考 文 献

- [1] Itzler M A, Entwistle M, Owens M, et al. Geiger-mode avalanche photodiode focal plane arrays for three-dimensional imaging LADAR[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7808: 78080C.
- [2] Li X L, Liu C, Wang Z N, et al. Airborne LiDAR: state-of-the-art of system design, technology and application[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(3): 032002.
- [3] Lim H C, Kucharski D, Kim S, et al. Evaluation of a Geiger-mode imaging flash lidar in the approach phase for autonomous safe landing on the Moon[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(3): 1122-1132.
- [4] Amzajerjian F, Roback V E, Bulyshev A E, et al. Imaging flash LIDAR for safe landing on solar system bodies and spacecraft rendezvous and docking[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9465: 946502.
- [5] Steinvall O, Tulldahl M. Laser range profiling for small target recognition[J]. Optical Engineering, 2017, 56(3): 031206.
- [6] Albota M A, Heinrichs R M, Kocher D G, et al. Three-dimensional imaging laser radar with a photon-counting avalanche photodiode array and microchip laser[J]. Applied Optics, 2002, 41(36): 7671-7678.
- [7] 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.
- [8] Albota M A, Gurjar R, Mangogna A, et al. (Contributed Review) Advanced three-dimensional laser radar imaging with the airborne optical systems testbed[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(10): 101502.
- [9] Clifton W E, Steele B, Nelson G, et al. Medium altitude airborne Geiger-mode mapping LIDAR system[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9465: 946506.
- [10] 张秀川, 蒋利群, 高新江, 等. InGaAs/InP 盖革模式雪崩焦平面阵列的研制[J]. 半导体光电, 2015, 36(3): 356-360, 391.
- Zhang X C, Jiang L Q, Gao X J, et al. Fabrication of InGaAs/InP Geiger-mode avalanche focal plane arrays[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(3): 356-360, 391.
- [11] 孙剑峰, 姜鹏, 张秀川, 等.  $32 \times 32$  面阵 InGaAs Gm-APD 激光主动成像实验[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1206006.
- Sun J F, Jiang P, Zhang X C, et al. Experimental research of  $32 \times 32$  InGaAs Gm-APD arrays laser active imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(12): 1206006.
- [12] 葛鹏, 郭静菁, 陈丛, 等. 基于盖革 APD 阵列的光子计数三维成像[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0305007.
- Ge P, Guo J J, Chen C, et al. Photon-counting 3D imaging based on Geiger-mode APD array[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0305007.
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 机载激光雷达水下地形测量技术规范: GB/T 39624—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification for underwater topographic survey of airborne lidar: GB/T 39624—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [14] 刘芳华, 贺岩, 罗远, 等. 基于光子计数激光雷达的运动小目标测距测速系统[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1310001.
- Liu F H, He Y, Luo Y, et al. Moving target distance and velocity measurement system based on photo-counting lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1310001.
- [15] 邵禹, 王德江, 张迪, 等. 单光子激光测距技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011020.
- Shao Y, Wang D J, Zhang D, et al. Research progress of single photon laser ranging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011020.
- [16] 刘岩鑫, 范青, 李翔艳, 等. 超低暗计数率硅单光子探测器的实现[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1004001.
- Liu Y X, Fan Q, Li X Y, et al. Realization of silicon single-photon detector with ultra-low dark count rate[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1004001.
- [17] 丁宇星, 李永富, 刘鸿彬, 等. 基于 InGaAs 探测器的日光条件光子计数实验[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1104003.
- Ding Y X, Li Y F, Liu H B, et al. Photon counting experiment based on InGaAs detector in daylight[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1104003.
- [18] 康岩, 薛瑞凯, 李力飞, 等. 基于 SPAD 阵列的共光路扫描三维成像[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011024.
- Kang Y, Xue R K, Li L F, et al. Coaxial scanning three-dimensional imaging based on SPAD array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011024.

## Pulsed Three-Dimensional Imaging Lidar System Based on Geiger-Mode APD Array

Chen Yongqiang<sup>1,2</sup>, He Yan<sup>1\*</sup>, Luo Yuan<sup>1</sup>, Zhou Liang<sup>4</sup>, Chang Xin<sup>4</sup>, Liu Fanghua<sup>1,2</sup>,  
Jiao Chongmiao<sup>1,2</sup>, Guo Shouchuan<sup>1,3</sup>, Huang Yifan<sup>1,2</sup>, Chen Weibiao<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;

<sup>4</sup>China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, Shandong, China

### Abstract

**Objective** Geiger-mode avalanche photodiode (Gm-APD) arrays have single-photon sensitivity and each pixel can detect the echo photons independently. Lidar systems based on Gm-APD arrays have many advantages, including high imaging resolution, fast imaging rate and possibilities of using lower power laser as the transmitter hence reducing the overall system size, weight, and power (SWaP). These advantages make the Gm-APD array lidar system very suitable for applications in the fields of mobile platform terrain mapping, which have a strict restriction on the total SWaP of the payloads and require a fast imaging rate. In this study, we propose a miniaturized imaging lidar system based on a domestically developed InGaAs  $64 \times 64$  Gm-APD array. This system uses a large-pixel-

format detector array combined with a coaxial scanning mechanism to achieve fast terrain three-dimensional (3D) imaging on vehicle-mounted mobile platforms.

**Methods** The system is composed of fiber laser module, detector array module, transceiver module, scanning module and system control module. The 1545 nm laser source can operate at a repetition rate of 25 kHz with a maximum pulse energy of 32  $\mu\text{J}$ , and the laser pulse width is 4 ns. In order to get a uniform illumination on the targets, the transmitting optics collimate and homogenize the laser pulses, so that the divergence angle of the emitted laser pulses is 8 mrad. The receiving optics collect the echo photons, and a 1-nm-bandwidth filter with a center wavelength of 1545 nm is used to reduce the solar background noise. The InGaAs  $64 \times 64$  Gm-APD array with a detector efficiency of 20% at 1545 nm is adopted to detect the echo photons. Using a  $64 \times 64$  detector array and a fast scanning unit, and with the help of a moving sensor platform, the system can achieve large-scale terrain mapping. A noise filtering method based on time-domain distribution characteristics of signal and noise is used to remove the noise points in the real-time data. Both static experiments and dynamic imaging experiments were conducted to verify the performance of the system. In static measurement conditions, two flat-panel targets were placed in front of the system at distances of 102.56 m and 104.06 m, respectively. Then the standard deviation of points to plane was evaluated for the two targets. In dynamic imaging experiment conditions, the lidar system, position and orientation system (POS), and panoramic camera were installed on a vehicle-mounted mobile platform with a velocity of 60 km/h to conduct large-scale 3D imaging of the test area. The 3D lidar images of the test area were compared with the Google map results, meanwhile, the area coverage rate and the average measuring point density were evaluated.

**Results and Discussions** The two flat-panel targets at distances of 102.56 m and 104.06 m were detected. The time of flight histogram (Fig. 9) shows two peaks with a time difference of 10 ns, and from the 3D image (Fig. 10) the points of the two targets can be clearly identified. The measured distance deviation of the two targets is consistent with the reference distance deviation. The standard deviations of points fit to plane of the measured data are 0.12 m and 0.11 m, respectively, and the results for the simulated data are 0.10 m and 0.10 m (Fig. 11). In dynamic imaging experiments, the point cloud results of the region near Baisha River Bridge, Qingdao, Shandong Province, were successfully captured at a platform velocity of 60 km/h. The resulting area coverage efficiency was 36  $\text{km}^2/\text{h}$ . The partial profiles of the Baisha River Bridge show detailed 3D information about the bridge, and the piers and the street lamps can be clearly identified in the 3D lidar image (Fig. 13). The high-resolution lidar image (Fig. 14) shows a 3D point cloud of the scenic spots along the river and a dam, which has a mean measurement density greater than 13000 points/ $\text{m}^2$ . The Google map photographs of the same area helped to identify the characteristics of these targets.

**Conclusions** A miniaturized imaging lidar system based on a domestically developed InGaAs  $64 \times 64$  Gm-APD array is designed, which is capable of achieving fast terrain 3D imaging on a vehicle-mounted mobile platform. Both static experiments and dynamic imaging experiments were conducted to verify the performance of the system. In static measurement conditions, the standard deviation of points to plane for flat targets at a distance of 100 m was 0.12 m. In dynamic imaging experiment conditions, the 3D point cloud results of the measured area were successfully obtained when the system was mounted on a mobile platform with a velocity of 60 km/h. The mapping rate was about 36  $\text{km}^2/\text{h}$  and the average measuring point density was 13454 points/ $\text{m}^2$ . The results indicated that the lidar system based on a domestic Gm-APD array can realize topographical remote sensing detection on the mobile platform, providing a new technical means for high-resolution terrain mapping of the high-speed vehicle platform. The development of a smaller and more lightweight Gm-APD array lidar system, which can be mounted on small unmanned aerial vehicles (UAVs) to conduct complex terrain area mapping missions, will be explored in the future.

**Key words** imaging systems; lidar; three-dimensional imaging; photon counting; avalanche photodiode; detector array