

一种少光子高精度多波束激光雷达系统及验证

刘鸿彬^{1,2}, 李铭^{1*}, 王凤香¹, 黄庚华¹, 胡以华^{1,3}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要:介绍了一种基于 8×8 面阵 SiPM (Silicon photomultiplier) 的少光子高精度多波束三维成像激光雷达系统, 并给出了激光测距的理论计算以及系统设计. 从 64 波束线阵激光并行发射出发, 采用线阵转面阵光纤的排布技术实现激光发射与探测器接收配准. 设计了离轴三反的光学收发系统、超窄带滤波结构以及 64 通道高速并行读出电路, 并搭建了激光雷达样机. 实验结果表明, 静态 21 m 测距下, 64 通道一致性较好, 测距精度均达到 1 cm, 最大距离偏差为 6 cm; 三维成像中, 分辨率达到 512×512 , 成像时间 100 ms, 能够分辨 15 cm 不同目标, 平面点云厚度为 5 cm.

关键词:激光雷达; 多波束; 少光子; 高精度; 三维成像

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

A high accuracy multi-beam Lidar system and its verification on several photons

LIU Hong-Bin^{1,2}, LI Ming^{1*}, WANG Feng-Xiang¹, HUANG Geng-Hua¹, HU Yi-Hua^{1,3}

(1. Key Laboratory of Space Active Electro-Optical Technology and System, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: A several photons high accuracy multi-beam three-dimensional imaging Lidar system based on 8×8 array SiPM (Silicon photomultiplier) was introduced. The theoretical calculation and system design of laser ranging were given. According to the 64 laser beam transmitted in parallel, fiber array was used to realize the alignment of laser beam and detector. The off-axis three-mirror optical transceiver system, ultra-narrowband filter structure and 64-channel high-speed parallel readout circuit were designed, and a prototype of Lidar was built. Experimental verification result indicates that 64 channels are in good uniformity under static 21 m ranging, ranging accuracy is 1 cm and maximum distance deviation is 6 cm. In three-dimensional, imaging resolution is 512×512 , imaging time is 100 ms, different targets of 15 cm can be distinguished, and the thickness of plane is 5 cm.

Key words: Lidar, multi-beam, several photons, high accuracy, three dimensional imaging

PACS: 42.79.Qx

引言

对于脉冲式激光雷达系统, 其成像方法主要集中在单元探测器或者小面阵探测器配合光机扫描, 或者大面阵探测器凝视成像^[1]. 单元探测器配合光

机扫描型激光雷达, 由于只有一个探测器, 在相同激光能量条件下, 相对于其他方法具备更高的回波功率, 作用距离更远, 但受限于每发射一次激光只得到单点信息, 因此成像帧频不高. 大面阵非扫描型激光雷达可在一次激光发射中得到目标的全部信息, 不

收稿日期: 2018-11-15, 修回日期: 2019-05-28

Received date: 2018-11-15, revised date: 2019-05-28

基金项目: 量子雷达探测新技术项目

Foundation items: Supported by foundation of new technology of quantum radar detection

作者简介 (Biography): 刘鸿彬 (1992-), 男, 博士研究生, 主要从事光电信息获取与处理方面的研究. E-mail: liu_hb1992@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: lpfilter@163.com

需要扫描机构,可减小系统的体积、功耗,但受限于激光出射能量,很难作用于远距离目标成像.而采用小面阵探测器配合光机扫描型激光雷达则可在作用距离和成像效率上进行折中,因此成为各国的研究热点. LOLA 星载激光雷达是第一颗用于立体测量的激光雷达系统,并且首次采用多波束与多元探测器耦合的方式,通过衍射光学元件实现 5 波束探测,大大提高了作业效率^[2]. ICESat-2 搭载的 ALTAS 的星载激光雷达采用光电倍增管实现 6 波束探测^[3]. 美国国家研究委员会则提出 1000 波束星载 LIST 计划,并在 2009 年实施了 16 波束并行推扫的 IIP 机载验证^[4-5].

脉冲法激光测距技术包括传统的线性体制以及近年来出现的光子计数体制. 传统的线性体制激光测距技术每发射一次激光脉冲都对应一个明确的回波信号,并且回波信号的信噪比较高,可以通过阈值比较法将回波信号提取出来,但线性探测器的增益较低(一般 200~400),应用于远距离测距尤其在激光波束较多的前提下,对激光能量要求更高、系统功耗更大. 光子计数激光测距技术可以将激光测距系统的探测灵敏度提高到单个光子响应极限,然而,随着灵敏度的提高,目标回波和噪声的输出幅度相同,无法通过阈值比较法识别信号. 实际应用中往往需要存储所有的距离数据,然后利用噪声的随机分布特性做后期栅格法滤波处理,因此光子计数测距法对数据的存储、处理要求较高,精度低(一般在 0.15 m 左右),并且难以做到实时测量.

基于盖革模式的雪崩光电二极管阵列是近年来发展迅速的新型探测器,在粒子物理、空间物理、安全检查、核医学(尤其是 PET)等领域得到很广泛的应用^[6-7]. 光电二极管阵列包含几百到上千像元,每个像元内部串联一个工作在盖革模式的光电二极管以及淬灭电阻,当某一像元发生雪崩时,雪崩锁存该像元,其他像元仍然处于偏压状态,依然可以检测光子,因此与单光子探测器相比,光电二极管阵列具备分辨多光子的能力. SensL 公司生产的光电二极管阵列称为 SiPM,并且包含快速输出引脚(Fast Output),输出信号具有极短的上升时间(<1 ns)以及窄脉宽(2 ns),能够满足高精度测距需求^[8-9].

综上,为满足低能量、高精度以及多波束的要求,论文采用 8×8 面阵 SiPM 作为探测器,设计了能够分辨噪声和回波信号的少光子、高精度 64 波束激光雷达系统,并对其性能进行实验验证.

1 多波束激光雷达系统

1.1 理论分析

激光雷达探测对象为面目标时,根据激光雷达方程,接收到的目标回波光光子个数计算公式如下^[10]:

$$N_s = \rho T_a^2 \eta_t \eta_r \frac{A_r \cos \theta_t}{\pi R^2} \cdot \frac{1}{h\nu} \cdot E_t, \quad (1)$$

其中, N_s 为接收到的回波光光子数; E_t 为激光发射单脉冲能量; $h\nu$ 为激光脉冲中单个光子能量; η_t 为发射光学系统效率; η_r 为接收光学效率; T_a 为单程大气透过率; ρ 为目标的漫反射率; A_r 为接收光学口径面积(m^2); θ_t 为目标与激光法线的夹角; R 为目标与激光雷达之间的距离.

对于盖革模式的雪崩光电二极管阵列 SiPM,由于探测器内包含成千上百个像元,且每个像元相互独立,因此在不同光照条件下发生雪崩效应的像元个数 N_{fired} 可表示为^[11]:

$$N_{\text{fired}} = M \left(1 - \exp \left(- \frac{\text{PDE}(V, \lambda) N_{\text{ph}}}{M} \right) \right), \quad (2)$$

其中, M 为探测器中包含的像元总个数; N_{ph} 为照射到探测器的光子数;PDE(V, λ) 为量子效率取决于探测器的工作电压、填充因子以及入射光波长. 本文中接收系统采用光纤输出耦合探测器的方式,考虑到光纤准直后的圆形光斑不能够将光敏面完全覆盖,假设其重合率为 η_f ,因此探测器中实际能够发生雪崩的最大像元总个数为:

$$M' = M \cdot \eta_f \quad (3)$$

结合式(1-3)可推导出激光雷达系统中探测器发生雪崩效应的像元个数表达式:

$$N_{\text{fired}} = M \cdot \eta_f \left(1 - \exp \left(- \frac{\text{PDE}(V, \lambda)}{M \cdot \eta_f} \cdot \rho T_a^2 \eta_t \eta_r \frac{A_r \cos \theta_t}{\pi R^2} \cdot \frac{1}{h\nu} \cdot E_t \right) \right) \quad (4)$$

由于 SiPM 探测器是由多个工作在盖革模式的 APD 并联而成,因此某个像元发生雪崩时产生的次级光电子有可能被相邻像元探测并引起雪崩,这些雪崩同时发生,导致输出幅度等于多个光子响应的叠加. 值得注意的是,对 Sensl 10035 系列 SiPM 探测器,当工作电压超过击穿电压 2.5 V 时,受串扰影响,噪声最大幅度往往在 2 到 3 个光子的响应量级,当阈值电压设置超过 3 个光子时,探测器的暗计数可以忽略^[12-13]. 因此,基于该噪声特性,结合式(4)可知,要使得激光雷达能够通过阈值比较法明确区分出噪声和信号,系统设计时只需控制目标回波所

激发的像元个数 $N_{\text{fired}} \geq 4$.

少光子激光雷达进行目标探测时,探测器还会接收到来自太阳背景光噪声的影响,虽然提高比较阈值可滤除噪声,但背景噪声计数率过大,目标返回时刻输出波形前沿上叠加噪声的几率增大,造成信号的幅度的基线漂移,将额外引入系统的随机误差.接收到的太阳背景噪声计算式为:

$$N_{\text{sun}} = M \cdot \eta_f \left(1 - \exp \left(- \frac{PDE(V, \lambda)}{M \cdot \eta_f} \cdot \rho \eta_r T T' \theta_r^2 A_r \cos \theta_{\text{sun}} \cdot \frac{1}{h\nu} \cdot E_\lambda \Delta\lambda \cdot \Delta t \right) \right), \quad (5)$$

其中,太阳和目标间的大气单程透过率为 T' ,接收光学系统角为 θ_r ,太阳入射角为 θ_{sun} ,太阳光谱辐照度为 E_λ ,滤光片带宽为 $\Delta\lambda$.从上述公式可知,对于给定接收光学口径以及激光发射角的系统,通过压窄接收视场以及添加窄带滤光片,均能够有效地降低太阳背景噪声.

1.2 系统设计

本文设计的多波束激光雷达系统设计参数如表 1 所示.为保证系统精度,采用脉宽为 100 ps 窄脉冲激光,激光波长为 532 nm,重复频率为 100 kHz,系统发射光学系统效率为 0.75,接收光学系统效率为 0.5,准直后光纤输出光斑与探测器接收光敏面的重合率为 0.5,有效接收光学口径为 35 mm.回波探测器采用 Sensl 公司 8×8 面阵 ArrayC-10035,其中每个单元探测器内部包含像元总个数为 504,对于波长为 532 nm 的激光工作偏压为 -27.5 V 时量子效率,假设大气单程透过率为 0.8,目标反射率为 0.3,因此对于发射单脉冲激光能量为 0.5 nJ,目标位于 20 m 时,通过式(4)可计算得到能够发生雪崩的像元个数为 12 个.而对于 0.2 nm 带宽的超窄带滤光片,以及 250 μrad 的接收视场设计,可计算出太阳直射目标时背景噪声水平为 0.00089 counts/ns 左

表 1 多波束激光雷达系统参数

Table 1 Parameter of Multi-beam Lidar

设计参数	参数值
激光波长	532 nm
脉宽	100 ps
重频	100 kHz
单波束激光脉冲能量	0.5 nJ
滤光片带宽	0.2 nm
发散角	100 μrad
接收视场角	250 μrad
束间角	692.6 μrad
激光波束	64
有效接收口径	35 mm
总视场	$20^\circ \times 20^\circ$

右,对于 2 ns 的信号脉宽,叠加噪声的概率约为 1.7%,能够有效降低噪声信号混叠的概率.

多波束激光雷达系统原理框图如图 1 所示.激光雷达在主控单元的控制下同步工作,激光器在接收到激光发射触发脉冲后,驱动输出激光,同时激光器内部的 PIN 管输出与激光发射时刻同步的脉冲信号给时间测量单元接收作为“Start”信号.激光器发射的光通过衍射光学元件进行分束和整形,发散角压窄后照射目标,在目标表面形成 64 元线阵激光足印,此时主控单元控制模块控制二维扫描机构同步工作,对 64 元线阵激光点进行位置扫描,形成 $20^\circ \times 20^\circ$ 的视场.接收光学系统将接收到的激光回波信号经超窄带滤光片滤光后汇聚到 64 路密排光纤的接收端面,光纤另一端排布成 8×8 阵列并耦合到 SiPM 面阵探测器,经过读出电路后作为“Stop”信号.通过记录起始和停止信号的时间间隔以及电机的指向即可实现目标三维成像.

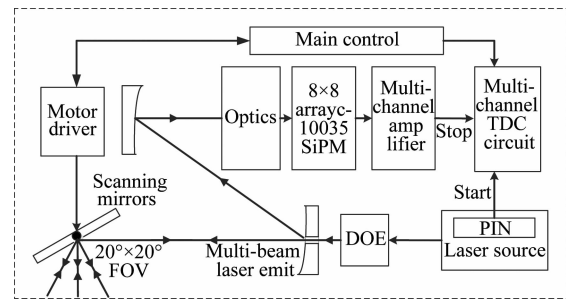


图 1 多波束激光雷达示意图

Fig. 1 Block diagram of the multi-beam Lidar

1.3 光学设计

多波束激光雷达采用激光发射系统和回波接收系统同光轴的工作方式,具体光路结构如图 2 所示.激光经衍射光学器件(Diffractive Optical Elements, DOE)分束成均匀 64 束后,通过离轴主镜中心穿孔出射,并经一组二维扫描振镜单元(与回波接收共用)后射向被测目标.其中接收望远镜采用离轴三反的形式,可满足 2.5° 瞬时视场的成像质量以及较高的消畸变要求,确保收发同轴,同时通过合理地安置激光器和探测器,可缩小系统体积和减轻重量.接收线阵光纤固定于接收系统焦点处,其对应的接收目标范围与激光照射在目标上的范围重合.

64 束激光并行发射与接收点阵光斑排布成的 $20^\circ \times 20^\circ$ 扫描视场如图 3 所示,其中激光发射的单元视场为 100 μrad ,接收单元视场略大于发射视场为 250 μrad ,并将发射一一覆盖,光斑间距为 692.6

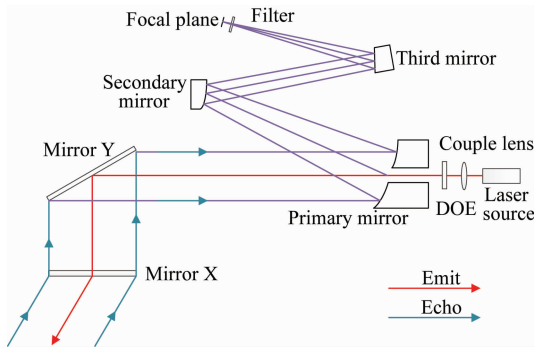


图2 收发光学系统设计
Fig.2 Design of transceiver system

μrad , 64 波束共可覆盖 2.5° 的瞬时视场。X 轴方向由扫描电机 A 以正弦方式 40 Hz 做摆动双边扫描, 有效角度范围为 $-10^\circ \sim +10^\circ$, 扫描角函数为:

$$\theta_x = \theta_{\max} \cos(2\pi f \cdot t) \quad , \quad (6)$$

Y 轴方向由指向电机 B 步进控制并与 X 轴配合, 为了覆盖 $20^\circ \times 20^\circ$ 总视场, 在每一条扫描线结束时, 进行一次步进, 累计一个采样周期进行单向 8 次步进, 总共覆盖 512×512 个激光足印。

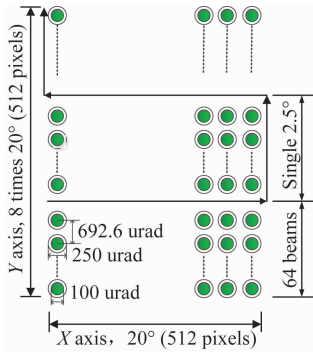


图3 激光足印分布
Fig.3 Laser footprint distribution

线阵转面阵光纤的排布如图 4(a) 所示, 线阵端为 1×64 元并固定在接收系统焦平面处, 元与元之间的中心间隔为 $173.15 \mu\text{m}$, 8×8 面阵端通过接收模块与 SiPM 耦合, 元与元的中心间隔跟探测器相邻元的中心间隔一致为 2 mm . 为了严格抑制工作波段外的背景辐射需添加滤光措施, 具体分两步进行消背景辐射的设计: 一是在焦面线列光纤前加一中心波长为 532 nm 的带通滤光片, 并且保证在焦面光线入射角度全范围内的高效率, 经计算, 焦面上光纤的最大角度为 4° , 引起的中心波长漂移为 -0.6 nm , 因此窄带滤光片的带宽以 5 nm 左右为宜. 二是在面阵探测器前线阵转面阵光纤阵列后, 增加准直

微透镜阵列和超窄带滤光片(带宽 0.2 nm) 的组合, 实现准直、滤光和探测. 其中单元滤光接收模块示意图如图 4(b) 所示, 面阵光纤端面发出的光经微透镜阵列准直后形成半径 0.45 mm 的圆形光斑, 平行通过超窄带滤光片, 而后全部落在探测器 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的光敏面上, 另考虑到光学装调偏移带来 20% 损失, 可计算出光斑与光敏面的重合率为 0.5 , 光线在窄带滤光片上的最大角度为 0.44° , 对应窄带滤光片的中心漂移为 -0.0074 nm , 可以忽略.

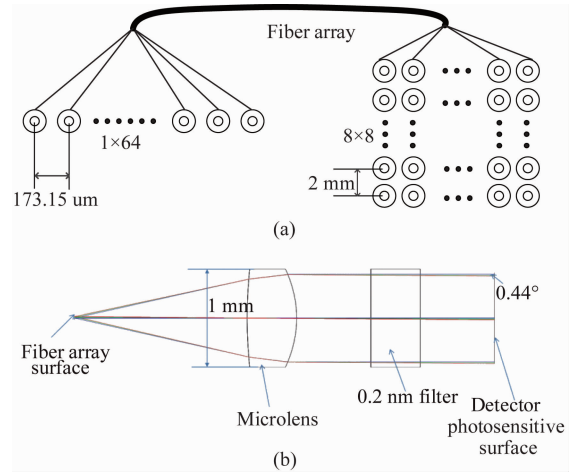


图4 (a) 光纤排布, (b) 滤光接收
Fig.4 Scheme of (a) the fiber arrangement, and (b) the receiving filter

1.4 电子学设计

图 5 为激光雷达 64 路回波处理系统框图, 由于采用 Sensl 公司 8×8 阵列 ArrayC-10035 作为回波探测器, 而该探测器的快速输出具有上升时间快 (0.3 ns)、输出脉宽窄 (0.6 ns) 的特点, 因此为了尽量不失真地将回波信号放大, 放大电路带宽为 50 kHz 到 1 GHz , 增益为 36 dB , 经放大后的单个光子响应输出信号幅度为 50 mV 、上升时间为 1 ns , 放大后的 64 路模拟电压信号输入到时间测量单元.

时间测量单元由两块 Virtex-4 芯片组成, 每块时间测量板完成 32 通道时间测量, 利用 FPGA 内部的高精度进位链资源和外部高稳定恒温晶振可以实现 100 ps 以下的测时精度. 64 路回波通过距离门控处理, 送入 FPGA 进行时间精确测量, 得到原始数据后经过预处理和误差校正得到最终时间数据通过总线接口送入主控. 其中, 选用型号 62.5 MHz 的高精度温补晶振为 FPGA 提供温度频率稳定度达到 $\pm 1 \text{ ppm}$ 的时钟基准, 并在 EEPROM 芯片存储 FPGA 各通道不同温度条件下绝对和相对的校准参数, 用于校正各通道的测量绝对值和各通道间的均匀性.

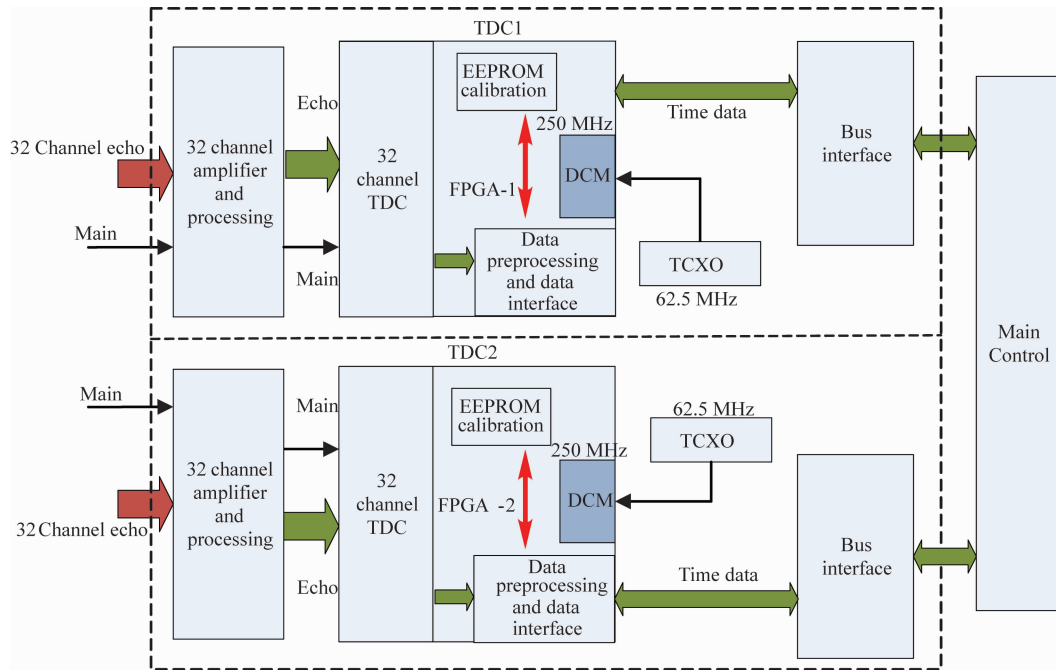


图5 64路读出电路
Fig.5 Readout circuit for 64 channels

2 实验结果分析

2.1 噪声分析

搭建系统后,对噪声进行测试,示波器采集的噪声波形如图6所示.与单光子计数不同,本论文搭建的系统输出噪声具有不同的幅值.其中多数为50 mV和100 mV,而经过放大后单个光子响应的输出幅度为50 mV,因此图中对应1个像元和2个像元的雪崩结果,而3个像元同时雪崩的噪声脉冲在500 μs的时间轴上只出现了一次.对于20 m距离处,经过定标后反射率与仿真相同均为0.3的标准目标,可测得回波信号经过放大后的输出幅度为500 mV,即目标回波照射到探测器表面并引起SiPM同时发生雪崩的像元个数为10个与上述理论设计结果12相近.此时,在过阈值比较法中只需将阈值电平设置为3.5个像元同时响应幅度(180 mV),即可区分出目标和噪声,实现线性探测.

2.2 精度分析

脉冲激光测距法误差主要包括系统误差和随机误差,其中系统误差指与标准值之间的绝对精度,可通过标定与校正消除,这里不做讨论;随机误差指对固定目标测量过程结果的随机抖动.随机误差主要来源于时间测量的量化误差、前沿鉴别法的抖动误差以及模拟信号数字化过程中的信号边沿抖

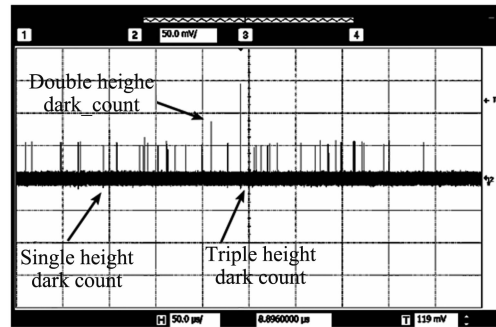


图6 系统噪声
Fig.6 System noises

动^[14-15].

其中,时间量化误差由时间测量最小间隔引入,假定 f 为测时芯片最大计数器频率,则时间量化误差为:

$$\sigma = \frac{c}{4\sqrt{3}f} \quad (7)$$

设计采用的Virtex-4最小延时单元为81 ps,可得出 $\sigma = 0.0035$ m,由于“Start”和“Stop”信号都会引入量化误差,因此对应的误差为:

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_{\text{Start}}^2 + \sigma_{\text{Stop}}^2} \quad (8)$$

可得出 $\sigma = 0.005$ m;脉冲测距法受大气传输和目标散射的影响,导致接收到的脉冲会存在起伏,另外输入噪声引起的鉴别时刻抖动也会带来误差,假定信

号上升时间为 t_r , 信噪比为 SNR, 则前沿鉴别法抖动误差为:

$$\sigma_l = \frac{ct_r}{2\sqrt{2} \cdot \text{SNR}}, \quad (9)$$

实验中测出回波信号输出幅度为 500 mV, 上升时间为 1 ns, 系统信噪比为 10, 根据式(4)可计算出 $\sigma_l = 0.011$ m; 模拟信号数字化过程中数字信号的上升沿抖动也会引起测距误差, 在电路设计中采用 LVPECL 电路和 LVTTTL 电路组合的方式减小数字电路上升沿抖动引起的误差, 电路抖动标准差近似为 20 ps, 对应的误差 $\sigma_j = 0.003$ m. 根据误差合成理论, 当各项随机误差均服从正态分布时, 总的误差合成式为:

$$\sigma_{\text{TOTAL}} = \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_n^2 + \sigma_j^2}, \quad (10)$$

对于本文设计的激光雷达, 带入各项参数可计算得 $\sigma_{\text{Total}} = 0.012$ m, 取置信系数 $\varepsilon = 3$, 可知系统测距误差为 ± 3.6 cm.

为了验证多波束激光雷达系统的实际精度, 将激光雷达放置于距目标 21 m 处进行测距, 并关闭二维转镜的电机控制, 对目标进行多次重复测距. 图 7(a) 为第一通道 5000 次距离测量值, 经直方图统计分析测可知测距结果呈高斯分布, 其中距离最大偏差为 6 cm, 标准差为 9.4 mm, 与理论计算值相符. 图 7(b) 为全部 64 通道测距误差分布, 图中测距误差均在 1.1 cm 附近, 通道间的一致性较好.

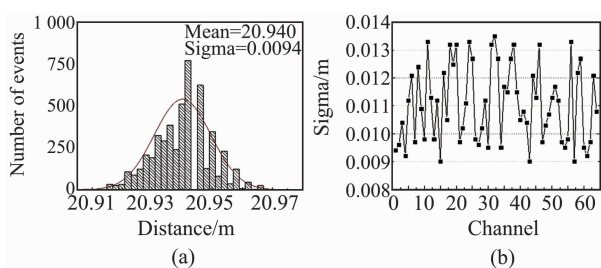


图 7 (a) 通道 1 距离分布, (b) 64 通道标准差
Fig. 7 (a) Ranging distribution of Channel 1, and (b) the standard deviation of 64 channels

2.3 三维成像

为了验证多波束激光雷达三维成像能力, 在室内走廊中将距离起伏的目标靶板放置于距激光雷达 25 m 处进行三维成像, 实验场景如图 8(a) 所示. 此时目标靶板上的单元激光光斑大小为 2.5 mm, 光斑中心间距为 17 mm, 64 波束 2.5° 视场的线阵激光发射瞬时覆盖范围为 1 m, 为了方便观察不同扫描带成像误差, 调节激光雷达的初始位置, 使得中间扫描

带只存在 30 个激光发射光斑照射在目标靶板上. 图 8(b) 为经过 8 次扫描得到的三维点云, 由于本文设计的激光雷达系统采用 64 路回波并行读出设计, 因此其成像速率主要取决于 X、Y 电机的转速, 可达到 100 ms. 图中像素点即为单次发射激光足印点所获取的距离信息, 并未做累计平均处理, 得益于 SiPM 区分噪声和信号的能力, 三维点云图中并不包含噪声信息. 图中外轮廓为室内走廊, 内部为目标靶板, 靶板由两条扫描带组成, 经检校以及运动补偿后的目标图像并无错位, 并且能够清晰地识别靶板边缘. 此外, 三维点云图中依然能够清晰地分辨出不同距离的两个端面, 图中橙色方形区域为目标靶板近距离端面, 紫色为远端, 两个平面距离为 15 cm. 为了衡量多波束激光雷达三维直角坐标精度, 将目标点云单独提取出来, 并从侧视图观察点云, 如图 8(c) 所示. 从图中可知, 对于相同距离的面目标成像时, 所有通道的点云厚度基本相同为 5 cm, 此时选取某一通道经直方图统计计算, 距离抖动标准差仍保持在 1 cm, 表明多波束激光雷达在扫描成像条件下仍具有较高的精度以及一致性.

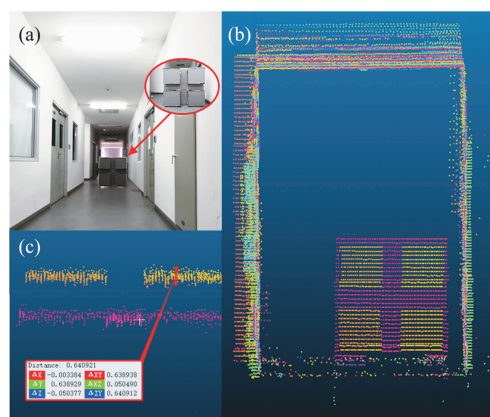


图 8 (a) 真实目标图像, (b) 激光雷达点云, (c) 靶板左视图
Fig. 8 (a) Real photo of target, (b) Lidar image, (c) Left view

3 结论

多波束激光雷达系统中, 发射激光波束越多、束间角越小, 成像效率与分辨率越高, 但系统越复杂, 论文给出一种基于 8×8 小面阵探测器的多波束激光雷达设计的方法, 并给出相应的理论计算、系统设计、光学设计、读出电路设计, 最后对激光雷达系统精度进行测试并进行不同距离下目标三维成像. 总的来说: (1) 通过光纤耦合设计, 可实现线阵激光

发射与面阵探测的收发配准,能够降低多波束激光雷达系统对长线阵探测器的依赖进而推广到更长线阵扫描激光雷达应用中;(2)本文设计的64元多波束激光雷达系统能够区分噪声和信号,对于距离为20 m的目标,其响应的像元个数为10个,并且静态测距误差为1 cm,通道间一致性较好;(3)激光雷达成像时间100 ms,分辨率为 512×512 ,对平面目标扫描成像过程中所有通道的点云厚度相近,同一通道的统计误差仍保持在1 cm,并且能够有效地分辨出相距15 cm的不同目标,获取的图像质量具有一定意义。

此外,对于机载平台的应用,可使扫描电机X工作,摆扫成像,由于单次扫描周期为25 ms,64波束线阵激光视场为 2.5° ,可计算得只需保证小于6278/h的速度高程比,即可实现无盲区三维扫描成像;而对于车载平台,同样可以采用在垂直运动方向,上下摆扫的模式;若要采用二维扫描成像,则需考虑运动过程中,长时间扫描所引入的运动畸变,以60 km/h平台运动速度、100 m距离处的目标连续成像为例,经过单帧100 ms的时间间隔,可获得 $4.3 \text{ m} \times 4.3 \text{ m}$ 的图像,由于平台运动,相邻采样点的漂移为0.4 mm,但此时间段内末尾64元采样点的累计漂移却达到1.67 m,对此可根据采样时标对每次采样点的位置进行运动补偿,并通过连续几帧图像融合的方式,获得目标非畸变的图像。

References

- [1] Xu Z P, Shen H H, Xu Y S. Review of the development of laser active imaging system with direct ranging [J]. *Chinese Optics* (徐正平,沈宏海,许永森. 直接测距型激光雷达主动成像系统发展现状[J]. *中国光学*), 2015, **8**(1): 28 - 38.
- [2] Riris H, Sun X, Cavanaugh J F, et al. The lunar orbiter laser altimeter (LOLA) on NASA's lunar reconnaissance orbiter (LRO) mission [C]//Conference on lasers and electro-optics. Optical Society of America, 2008: CMQ1.
- [3] Hagopian J, Bolcar M, Chambers J, et al. Advanced topographic laser altimeter system (ATLAS) receiver telescope assembly (RTA) and transmitter alignment and test [J]. *Earth Observing Systems XXI. International Society for Optics and Photonics*, 2016, **9972**: 997207.
- [4] Anthony W Y, Krainak M A, Harding D J, et al. Development effort of the airborne lidar simulator for the lidar surface topography (LIST) mission [J]. *Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VII. International Society for Optics and Photonics*, 2011, **8182**: 818207.
- [5] Anthony W Y, Krainak M A, Harding D J, et al. Spaceborne laser instruments for high-resolution mapping [J]. *Solid State Lasers XIX: Technology and Devices. International Society for Optics and Photonics*, 2010, **7578**: 757802.
- [6] LI Liang, GONG Guang-Hua. The new development of silicon photomultiplier [C]// National Annual Conference on Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology, 2010. (李亮, 龚光华. 硅光电倍增管的新发展[C]//全国核电子学与核探测技术学术年会. 2010).
- [7] Buzhan P, Dolgoshein B, Filatov L, et al. Silicon photomultiplier and its possible applications [J]. *Nuclear Inst & Methods in Physics Research A*, 2003, **504**(1-3): 48 - 52.
- [8] Yeom J Y, Vinke R, Pavlov N, et al. Performance of fast timing silicon photomultipliers for scintillation detectors [C]// Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference. IEEE, 2013.
- [9] Herbert D J, Moehrs S, D'Ascenzo N, et al. The silicon photomultiplier for application to high-resolution positron emission tomography [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2007, **573**(1): 84 - 87.
- [10] Hou L B. Research on key technology of photon counting imaging lidar in moving conditions [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (侯利冰. 运动平台条件下光子计数激光成像雷达关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2013).
- [11] Gruber L, Brunner S E, Marton J, et al. Over saturation behavior of SiPMs at high photon exposure [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, A*, 2014, **737**(2): 11 - 18.
- [12] Technical note: An introduction to the silicon photomultiplier [S]. Application Note, 2011.
- [13] Rech I, Ingargiola A, Spinelli R, et al. Optical crosstalk in single photon avalanche diode arrays: a new complete model [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(12): 8381 - 94.
- [14] Hu C S. Investigation into the high-speed pulsed laser diode 3D-imaging lidar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (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: 国防科技大学, 2005).
- [15] Chen P F. Research of key technologies of wide dynamic range and high precision laser distance measurement [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (程鹏飞. 大动态范围高精度激光测距关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014).