

# 小面阵块扫描激光成像系统实验研究

张 勇<sup>1,2</sup> 曹喜滨<sup>1</sup> 吴 龙<sup>2</sup> 张思成<sup>2</sup> 赵 远<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学小卫星技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001; <sup>2</sup> 哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 阵列成像激光雷达是激光雷达的发展方向,但受到阵列探测器和激光功率的限制,无法实现远距离的高分辨率成像。基于小面阵的块扫描激光雷达兼顾了阵列成像激光雷达的高分辨率和扫描激光雷达的远距离,成为现阶段激光雷达领域的研究热点。采用  $5 \times 5$  的阵列雪崩光电二极管(APD)为敏感元,设计了 25 路并行的放大器,实现了 200 MHz 的带宽和 40 dB 的增益;整形电路输出信号抖动小于 2 ns,25 路阵列计时器时钟频率达到了 200 MHz。利用上述器件配合高重频固体激光器和双光楔扫描器实现了小面阵块扫描激光雷达的原理实验系统,并利用该系统进行了室内距离成像实验。实验结果表明,该系统能够实现 0.8 m 的测距精度,  $3^\circ \times 3^\circ$  的成像视场角和  $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$  的图像分辨率。根据所获得的实验结果,对于影响块扫描激光雷达成像精度的因素进行了分析。

**关键词** 成像系统; 三维成像; 激光雷达; 块扫描; 小面阵

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0814001

## Experimental Research on Small Scale Risley Prism Scanning Imaging Laser Radar System

Zhang Yong<sup>1,2</sup> Cao Xibin<sup>1</sup> Wu Long<sup>2</sup> Zhang Sicheng<sup>2</sup> Zhao Yuan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> *The Satellite Technology Academy, Harbin Institute of Technology, Heilongjiang, Harbin 150001, China*)  
(<sup>2</sup> *Department of Physics, Institute of Technology, Heilongjiang, Harbin 150001, China*)

**Abstract** Laser radar development tends to focus on array imaging laser radars. Due to the restriction of array detectors and laser power, it is hard to realize imaging with high resolution in distant range. Risley prism scanning imaging laser radars based on small scale array, possessing both the advantages of high resolving power in array imaging laser radar and imaging in distance in scanning laser radar, have drawn much attention in laser radar researches. A small scale array Risley prism scanning imaging laser radar system is constructed with a high frequency solid laser transmitter and a double optical prism scanner for theoretical experiments. The system adopts a  $5 \times 5$  array detector as the sensitive unit and designs a 25-channel parallel amplifier. The bandwidth of 200 MHz and 40 dB gain are achieved with the plastic circuit output signal jitter being less than 2 ns. The frequency of the 25-channel array timer achieves 200 MHz. These realize the small plane array block scanning laser radar principle experiment system. With the system, an indoor imaging experiment is presented. The results show that the ranging accuracy of the system reaches 0.8 m with a  $3^\circ \times 3^\circ$  viewing angle and a  $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$  image resolution. It analyzes the factors to influence the accuracy of block scanning imaging laser radar system according to the experimental results. The results show that the beams pointing accuracy, the bandwidth and timing accuracy of the scanner probes and processing circuit have the primary impacts on restriction of distant imaging quality.

**Key words** imaging systems; three dimensional imaging; laser radar; Risley prism scanning; small scale array

**OCIS codes** 110.6880; 110.6915; 280.3640; 280.4788

收稿日期: 2013-03-01; 收到修改稿日期: 2013-03-28

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金(2010048)

作者简介: 张 勇(1979—),男,博士,工程师,主要从事光电探测和激光成像等方面的研究。

E-mail: zzyyyy@hit.edu.cn

# 1 引 言

传统的扫描激光雷达由于采用单元探测器加光机扫描的工作方式,虽然作用距离较远,但存在着成像速度低的问题,而近年来出现的无扫描激光雷达采用焦平面阵列探测器加泛光照明的的工作方式,成像速度得到了大幅提高,但作用距离却较近<sup>[1-2]</sup>。采用小面阵探测器光机扫描的块扫描激光雷达成为了一种兼具扫描激光雷达和无扫描激光雷达优势的方案。麻省理工学院林肯实验室利用 $32 \times 32$ 的雪崩光电二极管(APD)阵列双光楔扫描,实现了1 km的作用距离和4 Hz的成像帧频<sup>[3-4]</sup>。美国Sigma空间实验室利用 $10 \times 10$ 的光电倍增管(PMT)阵列双光楔扫描实现了4.7 km的作用距离的目标偏振激光雷达测量系统<sup>[5]</sup>。2010年,中国科学院上海光学精密机械研究所采用 $3 \times 3$ 盖革模式APD阵列进

行了外场实验,采用的扫描系统为双摆镜系统<sup>[6]</sup>。2011年,北京航空航天大学采用盖革模式APD阵列激光雷达进行了3D成像仿真,分别用 $32 \times 32$ 和 $128 \times 128$ 的APD阵列进行仿真<sup>[7]</sup>。采用双光楔的块扫描激光雷达系统研制尚未见相关的报道。本文利用商用化的 $5 \times 5$  APD阵列和双光楔扫描器设计了一套块扫描激光雷达系统,并对影响其性能的因素进行了实验研究。

## 2 块扫描激光成像系统结构及工作原理

### 2.1 块扫描激光成像原理

块扫描激光雷达系统工作于脉冲飞行时间测量模式,通过测量激光脉冲的飞行时间来测定目标距离,设计的系统结构如图1所示。

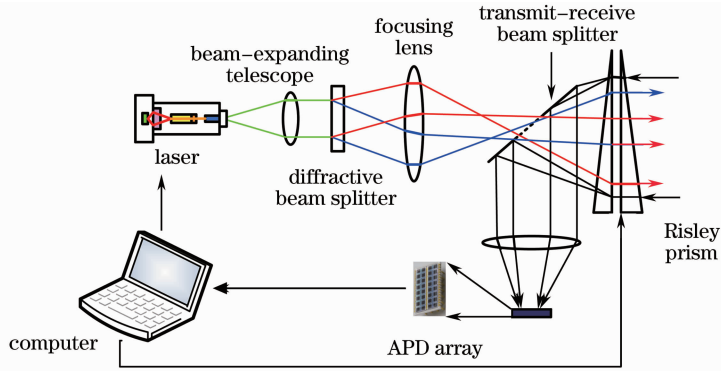


图1 APD阵列探测器块扫描激光雷达成像系统结构

Fig.1 System structure of APD array scanning imaging laser radar system

由计算机控制脉冲激光发生器产生激光脉冲,激光脉冲发出后,同时启动信号处理器开始计时。激光经过点阵照明器变为激光点阵后,经过双光楔扫描器照明被探测的目标。由目标处返回的激光信号经过扫描器后,被成像透镜会聚到阵列探测器,由阵列探测器接收后,经过阵列处理电路处理。处理电路采用阈值比较的方法,当某路的信号强度达到或超过预定阈值时,认为有激光回波到达探测器,处理电路此时产生一个计时停止脉冲,停止该路信号的计时器,所获得的时间记为该像元激光飞行时间 $t_i$ 。则目标对应的距离为

$$d_i = ct_i/2, \quad (1)$$

式中 $d_i$ 为第 $i$ 个像元的目标距离, $c$ 为光速,由于空气中光速与真空相差不大,可直接取为真空中的光速。

### 2.2 块扫描系统的关键技术

#### 2.2.1 扫描曲线的设计

双光楔扫描是一种收发合置的高速扫描手段,由于扫描器的转动角速度保持匀速,因此扫描精度较高。并且光楔的口径较大,所以允许系统接收更多的能量,从而实现更远的作用距离。双光楔扫描通过调节扫描器的转动方向和转速实现多种扫描图样,其中最常用的就是玫瑰线和渐开线。双光楔以相同角速度方向及相反角速度方向旋转得到的扫描轨迹如图2所示。当角速度方向相同时,其扫描图样为渐开线,并且中间分布比较稀疏,而边缘分布比较密集;当扫描角速度方向相反时,扫描图样为玫瑰线。由于激光雷达视场中心区域往往是最感兴趣的区域,希望视场中心的扫描更为密集,因此扫描曲线采用玫瑰线。

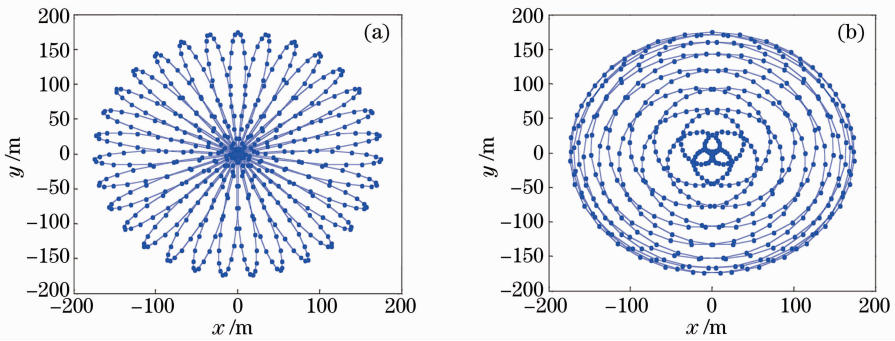


图 2 角速度方向(a)相反和(b)相同时的双光楔扫描图样

Fig. 2 Scanning trajectory of double Risley prism scanning imaging laser radar system with (a) opposite whirling direction and (b) same whirling direction

光楔的转动速度比决定了玫瑰线的瓣数,当瓣数较多时,扫描一个周期的速度很低,影响了成像速度,

扫描瓣数较少时,容易产生扫不到的遗漏。扫描转速比不同的条件下扫描点阵中心的轨迹如图 3 所示。

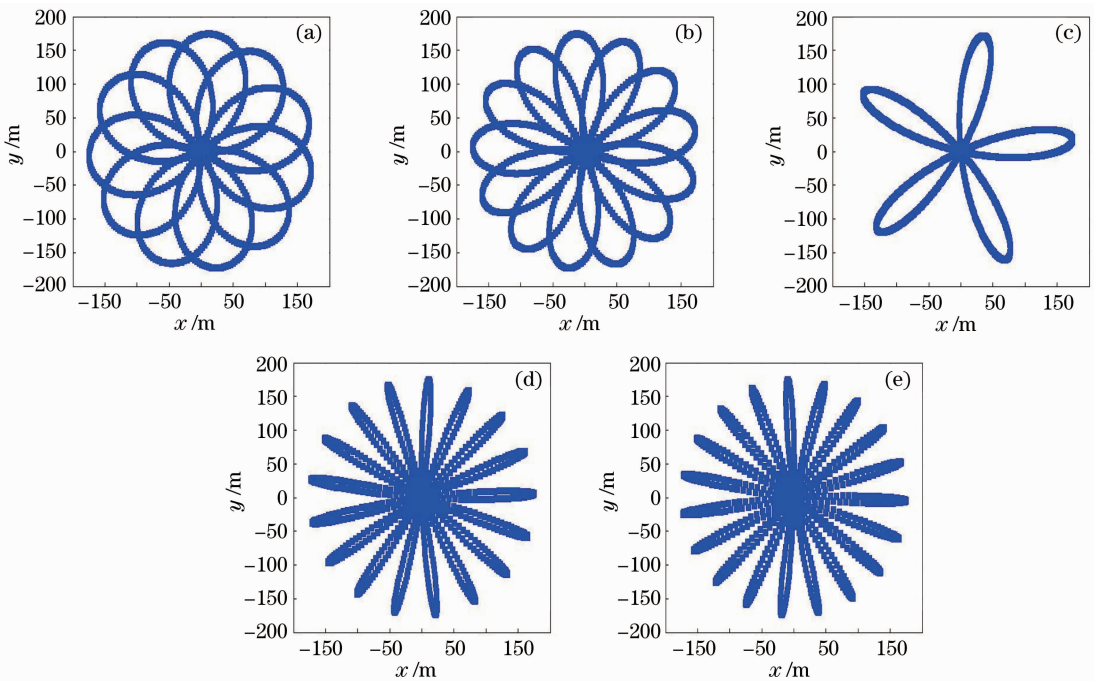


图 3 不同转速条件下的理论扫描曲线。(a) 9:2 ;(b) 9:4 ;(c) 9:6 ;(d) 9:8 ;(e) 9:10

Fig. 3 Calculated pattern with different rotating speeds. (a) 9:2 ;(b) 9:4 ;(c) 9:6 ;(d) 9:8 ;(e) 9:10

由图 3 可知,扫描的瓣数是两个光楔的转动角速度之和除以角速度的最大公约数,随着扫描花瓣数的增加,花瓣的宽度在逐渐减小。图 3 的扫描曲线是在扫描器没有转动误差条件下得到的结果,但是在实际中,由于光楔转速不同,会造成两者的转动阻力不同,从而影响光楔得到的扫描图案,图 3 中各种转速比得到的实际扫描图案如图 4 所示。

系统中采用的激光点阵的发散角为 2 mrad,图 4(a),(d),(e)的扫描曲线中心轨迹的间距都要

比 2 mrad 小很多,从而造成扫描光斑重叠严重,降低了系统的扫描效率,而图 4(b)的扫描曲线中心线间距大于 2 mrad,会造成很多区域无法被扫描到,形成成像盲区。而转速比为 9:6 的扫描曲线中心线间距非常接近分光点阵的发射角(2 mrad),既不会造成严重的光斑重叠又不会造成扫描不到的盲区,因此最终确定了光楔转动的角速度比为 3:2。激光点阵扫描后得到的扫描点阵的图样如图 5 所示。

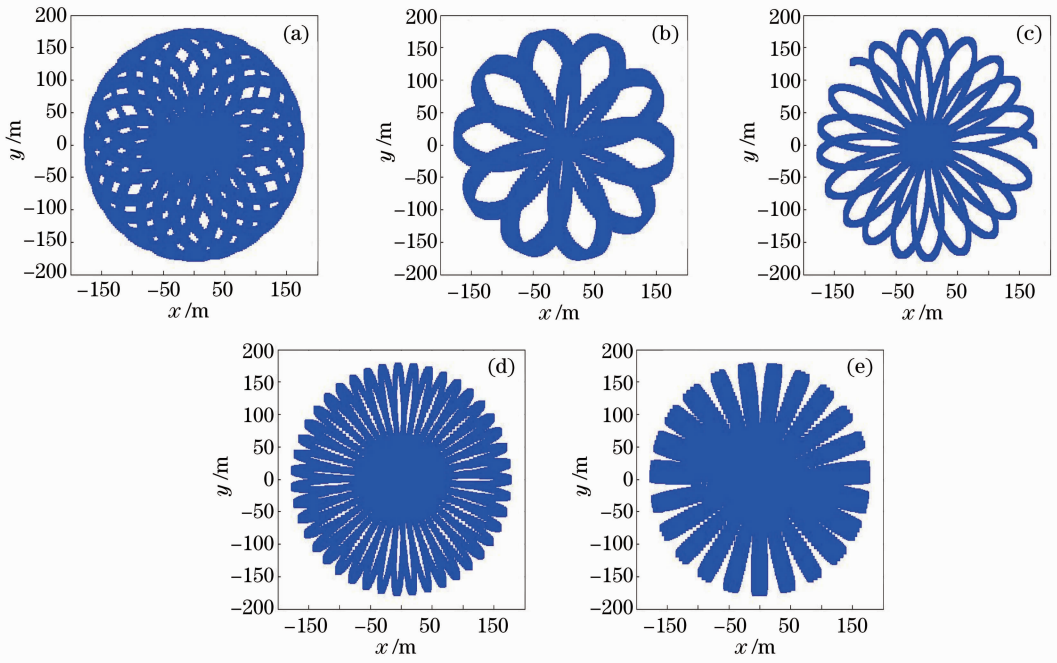


图 4 不同转速下的实际扫描图样。(a) 9:2;(b) 9:4;(c) 9:6;(d) 9:8;(e) 9:10

Fig. 4 Scanned pattern with different rotating speeds. (a) 9:2; (b) 9:4; (c) 9:6; (d) 9:8; (e) 9:10

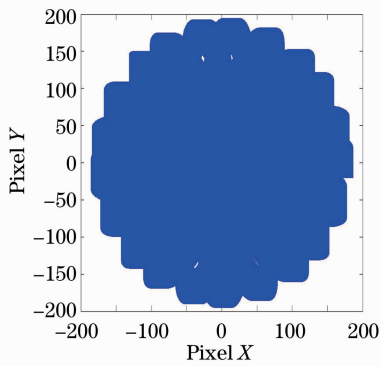


图 5 5×5 激光点阵扫描图样

Fig. 5 Scanned pattern using a 5×5 laser spot array

### 2.2.2 并行接收电路的设计

块扫描成像系统信号处理的工作原理与扫描成像系统原理信号处理的原理一致,区别在于前者采用阵列探测器进行并行探测,其核心就是阵列探测

器及阵列处理电路。目前小面阵的 APD 阵列已经商品化,但是仅仅是 APD 阵列裸片,并不带有并行的接收和处理电路。而 APD 激光雷达为了进行并行的测距,需要高带宽、多通道、集成化的并行处理电路,并且还要克服通道间的串扰影响,在电路设计上存在较多问题。采用的系统中阵列处理电路的组成如图 6 所示。阵列信号处理电路的主要功能为阵列探测器输出信号的放大,放大后的信号后经过两种处理,峰值保持和阈值比较同时进行。将回波信号与设定的阈值进行比较,达到或者超过阈值时则产生脉冲信号,送入可编程门阵列(FPGA)中,标记计时结束。同时,利用峰值保持电路,记录下回波信号的强度,并保持一定的时间,待所有信号回波均到达或者经过特定时间后,通过直流/交流(A/D)转换电路将记录下的回波信号强度信息转换为数字信号,最后输入到 FPGA 处理电路进行数字处理。

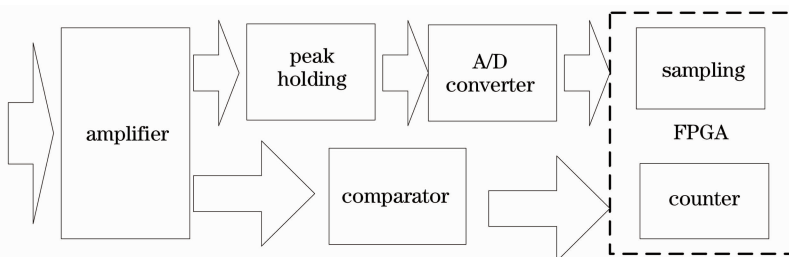


图 6 阵列信号处理电路功能框图

Fig. 6 Flow chart of array signal processing



阵列计时部分及数字信号处理部分采用 FPGA 实现。FPGA 工作速度快,并可进行在线编程,在不改变硬件的条件下,实现不同的功能。对应阵列中的每一个探测器,均有一路单独的计时电路相对应,各单元的工作电路互不干扰从而实现阵列的并行计时功能。

### 2.2.3 3D 图像生成方法

玫瑰线扫描由于中心区域被多次扫描,而周围区域仅扫描了一次,因此扫描光斑分布较为密集,周围稀疏,在进行 3D 图像的生成时需要将扫描点处理成均匀分布的图像。本系统采用的方法是横向分辨率均匀化方法,该方法的主要思路在于选取多大的图像分辨率,若要求图像分辨率达到最高,即将图像填满,针对像素空点,建立这样的模型:

$$x_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1, j=1}^{i+1, j+1} x_{m,n}, \quad x_{m,n} > 0 \quad (2)$$

式中  $n$  为不为空的个数,如图 7 所示。

$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$
$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$
$x_{31}$	$x_{32}$	$x_{33}$

图 7 图像填充示例

Fig. 7 Filling sample of detector pixels

针对 APD 块扫描成像激光雷达图像扫描所获得点阵,对其设置相应的分辨率,如果在此分辨率范围内存在空点,那么对此空点周围的 8 个点进行扫描,并取平均值放到这个位置上。

## 3 成像实验及结果

### 3.1 实验装置

First Sensor 公司的 AA-25 是一款  $5 \times 5$  的小面阵 APD 阵列,上升时间为 2 ns,噪声等小功率为  $2 \times 10^{-14} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。阵列处理电路为 25 路,采用前置放大器加主放大器加整形电路的形式,输出为晶体管-晶体管逻辑电平(TTL)信号。对该 APD 及信号处理电路板的灵敏度测量结果表明,它可以实现 10 nW 的最小可探测光功率。

FPGA 阵列计时部分采用 Altera 公司的 FPGA 芯片完成,采用 200 MHz 工作时钟,计时精度为 5 ns。所获得的数据通过串口送入计算机存储单元以方便实验数据处理。由于 FPGA 的可编程性,未来应用时,数据处理部分可以由 FPGA 本身直接完成。

采用的激光器为固体激光器,工作波长为 1064 nm,脉冲重复频率为 2.5 kHz,单脉冲能量为  $5 \mu\text{J}$ ,脉冲宽度为 5 ns。实验目标为一块近似为朗伯体的平板目标,激光脉冲经扩束后照射到点阵分光器,形成  $5 \times 5$  的激光点阵,通过开孔反射镜中心的孔照射到双光楔扫描器上,旋转方向相反的双光楔扫描器将激光点阵在空间进行玫瑰线扫描,对目标进行照明。

### 3.2 测距精度实验

利用以上设备,在 50 m 长的走廊内进行测距和距离成像实验。固体激光器在发光时都存在时间抖动,根据激光器的不同,该抖动时间一般为毫秒量级,对激光雷达同步和距离获得带来较大影响。为了避免这一问题,设计了激光器发光时间测量电路,将控制激光器发光的声光控制器输出信号作为系统同步信号,该同步信号能够准确地与激光发光时刻同步,抖动时间短于 5 ns,并且该同步信号能够早于激光  $1.7 \mu\text{s}$  产生,可以有效避免由于系统固有延迟所带来的激光雷达系统测距盲区。利用示波器测量得到的激光器同步信号与激光脉冲时间关系如图 8 所示。

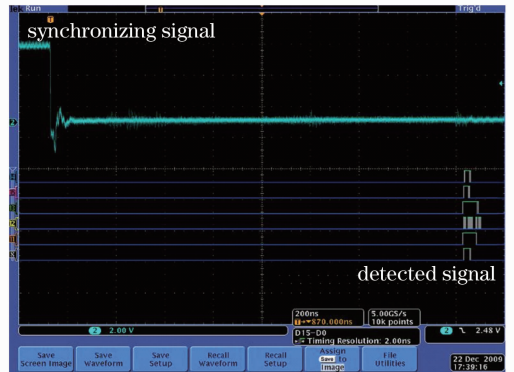


图 8 激光器同步信号的示波器测量结果图

Fig. 8 Synchronizing signal of laser on oscillograph

为了消除背景光的影响实验时间选在夜间环境下进行。为了测试系统的测距精度,在扫描器不工作的情况下对于不同距离处的平板目标进行了测距。目标由近到远每隔 1.6 m 进行一次测量,每次测量 10 次,分别就单次测量结果与测量结果平均值进行了讨论。最终获得系统测距精度实验结果如图 9 所示。

由实验结果获得的测量距离与真实距离误差单次测量误差小于 1.1 m,10 次测量结果的总平均值小于 0.75 m。由于激光脉冲宽度为 5 ns,FPGA 计时阵列的计时精度也为 5 ns,因此系统的误差范围

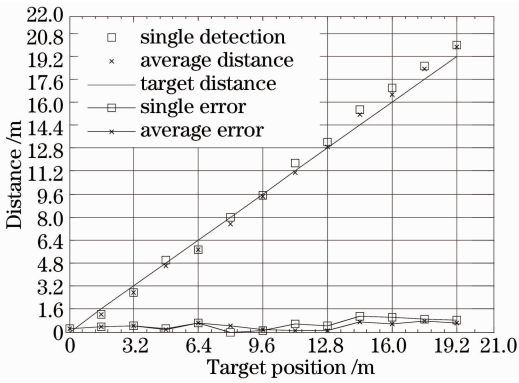


图 9 测距精度测量结果图

Fig. 9 Range accuracy measurement results

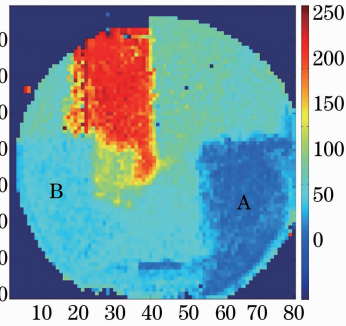


图 10 块扫描成像实验成像结果图

Fig. 10 Imaging results of scanning imaging experiment

从成像的结果看,距离像中 A 和 B 区域区别明显,两者之间的距离差为 1 m,因此完全可以认为系统的距离分辨力优于 1 m。各距离不同区域的边缘至少存在 1~2 pixel 的边缘模糊,这主要是受光楔角度控制精度为 5°的影响,而且也与距离图像的拼接算法有关。距离像的拼接时根据扫描器给出的空间二维角度信息将 5×5 的 APD 距离数据填充在对应的空间位置,当扫描器扫过空间的所有角度后,便可生成目标的完整距离图像。因为玫瑰线扫描为了扫过所有位置,所以很多方位的距离数据被填充了两次或者多次,而扫描器控制的误差导致每次填充的数据并不一定是该像元的,而可能是周围像元的,因此会造成图像边缘的平滑模糊效果。这一问题需要进一步提高扫描器的扫描精度来解决。

随着作用距离增加或者扫描速度提高,该系统所成图像会产生畸变,分析其产生的原因主要是由于扫描系统所固有的扫描滞后角的影响。由于扫描器转动速度较快,因此造成的发射光束与返回光束不是通过扫描器的同一个位置,因而造成两方面的影响: 1) 回波光束的中心不再是探测器的中心位置,而是有一个偏离; 2) 回波光束绕着中心光束存

在 10 ns 以内,对应的最大测距误差为 1.5 m。在激光回波较强时,一般均在脉冲前沿触发,因此测距精度可以比 10 ns 更高。

### 3.3 距离成像实验

实验条件,在夜间全黑的走廊内进行实验,目标为走廊一端的门与几块泡沫板,泡沫板之间以及泡沫板与门之间的距离为 1 m,走廊长度为 50 m。光楔扫描器的直径为 75 mm,楔角 1.5°,转速为 600 r/min,转动的角位置控制精度为 5°。发射部分根据探测器的填充因子对达曼光栅的入射激光的发散角进行调节,从而实现目标上照明激光点阵与探测器像元的匹配关系,获得的成像效果如图 10 所示。

在一个旋转。这两方面的影响严重制约了激光能量利用率和成像质量的提高。

## 4 结 论

利用 5×5 APD 阵列探测器和双光楔扫描器,设计并搭建了一套块扫描激光雷达系统,并对系统测距精度和块扫描成像进行了实验研究。实验结果表明此系统在激光峰值功率为 1 kW 的条件下能够获得 50 m 远目标的距离像,图像为 128 pixel×128 pixel,测距精度达到 1 m 以下。如果采用主流的激光器峰值功率在 500 kW,则系统的作用距离将超过 1 km。得出了在本系统的实验条件下,扫描器转速比为 3:2,扫描效率最高。扫描器的光束指向精度是影响图像横向分辨力的主要影响因素,需要进一步提高扫描器的光束指向精度。分析了影响块扫描成像系统图像质量的因素,指出了扫描滞后角是影响成像质量的主要因素,降低扫描滞后角的影响将是下一步的研究工作。

### 参 考 文 献

1 Wang Jianyu, Hong Guanglie, Bu Hongyi, et al.. Study on airborne scanning lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9):

- 2584—2589.
- 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.
- 2 Mao Minjun, Bu Hongyi, Jin Hui, *et al.*. Design and test method for scan system of 3D Ladar[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(S1): 110—114.
- 毛闵军, 卜弘毅, 金 辉, 等. 激光三维成像雷达的扫描系统设计与测试[J]. 中国激光, 2010, 37(S1): 110—114.
- 3 A I Mark, E Mark, O Mark, *et al.*. Comparison of  $32 \times 128$  and  $32 \times 32$  geiger-mode APD FPAs for single photon 3D ladar imaging[C]. SPIE, 2011, 8033: 1—12.
- 4 M A Albota, B F Aull, D G Fouche. Three-dimensiona imaging laser radars with geiger-mode avalanche photodiode arrays[J]. Lincon Laboratory Journal, 2002, 13(2): 35—37.
- 5 J Degan, R Machan, E Leventhal, *et al.*. Inflight performance of a second generation: photon-counting 3D imaging ladar [C]. SPIE, 2008, 6950: 1—9.
- 6 G Ying, H H Huang, R Shu. 3D imaging laser radar using geiger-mode APDs: analysis and experiments[C]. SPIE, 2010, 7684: 1—8.
- 7 Wu Lijuan, Li Li, Ren Ximing. 3D imaging simulation of APD arrays laser radar system based on Geiger mode[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2180—2186.
- 吴丽娟, 李 丽, 任熙明. 盖革模式 APD 阵列激光雷达的三维成像仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2180—2186.

栏目编辑:李文喆