

## 基于盖革 APD 阵列的微扫描激光成像技术

谢绍禹<sup>1,2</sup>, 赵毅强<sup>1</sup>, 王永乐<sup>2</sup>, 吕 华<sup>2</sup>, 贾晓东<sup>2</sup>

(1. 天津大学 微电子学院, 天津 300072; 2. 天津津航技术物理研究所, 天津 300192)

**摘 要:** 盖革 APD 阵列探测的激光成像雷达具有高灵敏度、高帧频、宽视场、坚固、体积小等优点, 成为了激光成像雷达发展的趋势。但目前 APD 阵列像元填充比低, 器件阵列少, 无法满足高分辨率激光成像的要求。为了解决该问题文中提出采用激光点阵发射的方法与 APD 阵列像元一一对应, 采用拼接技术提高成像分辨率, 采用微扫描技术提高激光成像视场。通过构建实验系统, 完成了室外试验, 成像效果良好, 使用现有 APD 探测器(32×32)将系统空间分辨率提高了四倍(64×64), 提高了激光三维成像能力。

**关键词:** APD 阵列; 微扫描; 激光成像

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1206010

## Microscanning laser imaging technology based on Geiger-mode APD array

Xie Shaoyu<sup>1,2</sup>, Zhao Yiqiang<sup>1</sup>, Wang Yongle<sup>2</sup>, Lv Hua<sup>2</sup>, Jia Xiaodong<sup>2</sup>

(1. School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300192, China)

**Abstract:** The laser imaging radar based on Geiger APD array detection has the advantages of high sensitivity, high frame frequency, wide field, solid, small volume, and has become the development trend of laser imaging radar. At present, the APD array has fewer pixels and fewer device arrays, which can not meet the requirements of high resolution laser imaging. In order to solve this problem, one-to-one correspondence between laser dot array and APD array pixels was proposed. The imaging resolution was improved by splicing technique, and the laser imaging field was improved by micro scanning technique. By building an experimental system, the outdoor experiment was finished which had good imaging effects. The existing APD detector (32×32) was used to improve the system spatial resolution by four times(64×64), and the ability of laser 3D imaging was also improved.

**Key words:** APD array; microscanning; laser imaging

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-08-03

作者简介: 谢绍禹(1983-), 男, 工程师, 博士生, 主要从事激光探测与制导方面的研究。Email: xsy0371@163.com

导师简介: 赵毅强(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光探测技术研究方面的研究。Email: yq\_zhao@tju.edu.cn

## 0 引言

激光成像雷达在目标的识别、分类和精确瞄准等方面有着明显的技术优势。与被动光电设备相比,它具有可以获取目标精确三维图像而不是二维图像的特点,并且不受光照条件和目标背景反差特性的影响<sup>[1-3]</sup>。与毫米波雷达相比,它具有分辨率高、抗干扰性好、不受地面杂波影响等优势,因此发达国家都投入了大量人力物力对激光成像技术进行了研究,已经研制和开发出大量激光三维成像系统。DARPA 和美国陆军近年来联合启动了“竖锯”项目 Jigsaw,开发无人机机载的高分辨激光三维成像系统,并用于地面伪装军事交通工具的成像和识别<sup>[4-8]</sup>。国内西南技术物理研究所、重庆光电技术研究所开展了  $8 \times 8$  线性模式以及  $16 \times 16$ 、 $32 \times 32$  盖革模式焦平面阵列探测器研究及激光成像雷达技术研究。但目前 APD 阵列存在像元填充比低、器件阵列少,无法满足高分辨率激光成像的要求。为了解决该问题文中采用微扫描技术提高激光成像视场,采用激光点阵发射的方法与 APD 阵列像元一一对应,用点阵拼接实现高分辨成像。文中使用现有 APD 探测器( $32 \times 32$ )将系统空间分辨率提高了四倍( $64 \times 64$ )。

## 1 基于盖革 APD 阵列的微扫描激光成像工作原理

基于盖革 APD 阵列的微扫描激光成像系统组成如图 1 所示,包括激光器、分光镜、达曼光栅、微扫描系统、APD 阵列探测器及读出电路、FPGA 处理器等部分。其工作过程为:四个脉冲激光器产生激光脉冲,依次轮流发射,经光学整形一部分经过分光镜照到 PIN 探测器上,产生一个脉冲信号作为计时开始信号,标记为对应的激光器编号后送到 FPGA 处理电路,由同步控制电路控制计时。每一路激光器发出的激光脉冲经各自的达曼光栅分束后均生成  $32 \times 32$  阵列均匀照明目标视场。经目标反射后的回波信号首先经滤波片滤除杂光及背景光,然后由接收光学系统聚焦到探测器阵列表面,依附于探测器阵列的阵列测距电路记录下此时刻。当信号强度达到预定值时,认为激光信号已经由目标返回,此时计时停止,计时时间  $t$  即为激光脉冲往返时间。由于采用阵列探测及阵列的计时采样电路,所以一个激光脉冲发射后可以同时获得整个视场范围内的所有  $32 \times 32$  激光点的各自目标距离信息。从而一次激光照射即可实现二维的目标距离成像,大大提高成像速率。每一路

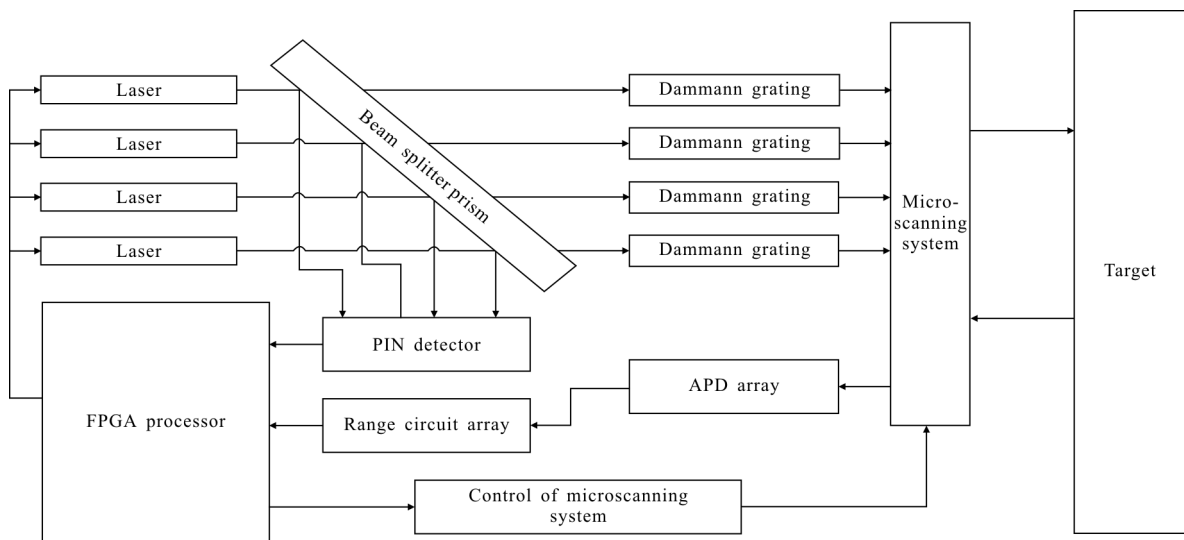


图 1 微扫描三维激光成像系统组成框图

Fig.1 Block diagram of microscanning 3D laser imaging

激光生成的  $32 \times 32$  点阵图,配合每一路激光器的空间发射角度进行三维坐标变换后,将连续的四路激光生成的四幅图进行拼接合就可生成  $64 \times 64$  点阵图。

## 2 多路激光点阵拼接成像

文中采用四只发射频率都为 20 Hz 的激光器以一定的相对角度分时轮流循环发射,将每四只激光器打出的  $32 \times 32$  点阵源进行拼接,组成  $64 \times 64$  的点阵,实现  $2^\circ$  视场内激光点对目标的覆盖,如图 2 所示。图中黑色圆圈代表探测器的探测范围,圆点代表激光器的照射范围。每一种不同的颜色代表一个激光器,四个激光器每一个都可以发出  $32 \times 32$  的点阵,四个激光器的发射光路成一定的角度,目的是让每一个探测器点源可以收到来自四个不同的,成一定发射角度的、分时发射的激光器。采用近红外激光单脉冲触发作为激光基准信号,由 APD 阵列探测器上的飞行时间触发电路计算回波时刻进而实现距离测量;光学系统采用收发同光路、棱镜耦合,发射、接收系统在小视场范围内对应,通过微扫描实现成像视场扩大。

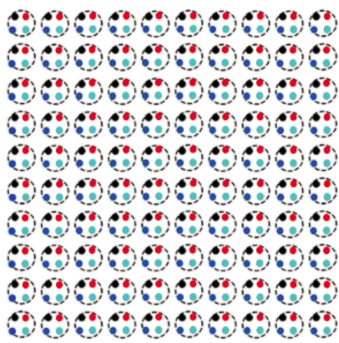


图 2 光斑示意图

Fig.2 Sketch map of light spot

## 3 微透镜阵列和达曼光栅分光实现

目前改变光束分布形式的有光纤耦合方式、微透镜阵列方式和达曼光栅方式。光纤耦合方式是将激光光束通过光纤耦合透镜后耦合进光纤通过在光纤内的多折反使光束均匀;微透镜阵列是通过多个以阵列方式排列的多个微小透镜将激光打散,改变激光高斯分布的形式;达曼光栅是一种可以将入射单色光在傅里叶变换的远场处高效率地生成均匀光强点阵的位相光栅。其中光纤传输方式对传输的

激光峰值功率有一定的要求,若功率较大则会损坏光纤。 $32 \times 32$  达曼光栅方式光栅利用微纳米加工的深度刻蚀工艺制作,理论衍射效率为 60%。均匀性达到 95%。微透镜阵列方式透过率可达 96%,文中采用微透镜阵列和达曼光栅方式实现分光,其分光效果如图 3 所示。

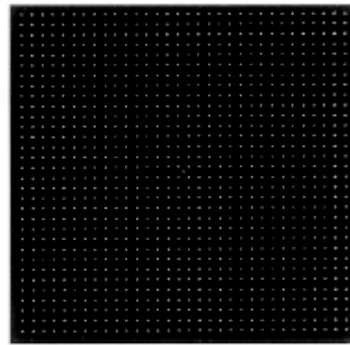


图 3 激光经达曼光栅  $32 \times 32$  阵列分光效果图

Fig.3 Picture of laser beam through Damann grating array by  $32 \times 32$

## 4 微扫描光学实现

二元光学技术的微透镜阵列扫描系统用来实现大视场成像,其微扫描方式可以采用正透镜阵列组合和正负透镜阵列组合两种方式,即通过改变两个透镜阵列的相对位置关系,在垂直于光轴的方向移动透镜来改变光轴指向。正透镜阵列组合是由两个正微透镜阵列共焦放置,扫描时微透镜发生横向位移,有部分光束从对应微透镜相邻的微透镜中出射从而形成干扰光束,扫描角度越大相应微透镜横向位移量也就越大,这样干扰光束所占的能量就会越多。该项目在考虑第二微透镜阵列每个微透镜尺寸不发生改变的前提下缩短第二微透镜阵列的焦距,这样消除一部分光束的干扰,为了达到更大的扫描角时需要进一步缩短第二微透镜阵列的焦距,由于微透镜的设计与制作工艺受限,正透镜阵列组合带来的像差会比较大,并且内部存在实焦点,能量集中容易损伤光学元件。

正负微透镜阵列组合采用的是正负微透镜阵列共焦放置组成的伽利略望远系统。当移动负微透镜阵列,同时正透镜阵列位置固定不动,这样就可以达到光束方向发生变化的效果。正微透镜阵列和负微透镜阵列的焦距共同决定负微透镜阵列的最大横向位移,扫描角的大小由负微透镜阵列的移动距离决

定, 正负透镜阵列的组合比正正微透镜阵列组合更容易校正像差。因此, 文中扫描器采用正负微透镜阵列组合模式实现光学扫描。

一般情况下透镜扫描角  $\theta$  满足  $\tan\theta=\Delta/f_2$ ,  $\Delta$  取最大值时扫描角就取得最大值, 而  $\Delta$  的最大值需要保证继续下移时不会有光束从相邻负透镜出射形成干扰光。正微透镜的曲率半径  $R_1$  确定那么  $f_1$  也确定, 减小负微透镜的曲率半径  $R_2$  那么  $f_2$  减小, 这样可以增大扫描角。 $R_2$  受到实际制作工艺、临界角最大为  $90^\circ$  及填充系数的限制, 可以确定单个微透镜单元的临界尺寸。初步计算出负透镜阵列单元透镜的焦距  $f_2$  不大于  $0.57\text{ mm}$ , 透镜单元尺寸  $d$  不大于  $0.4\text{ mm}$ 。正透镜焦距  $f_1$  略大于负透镜焦距  $f_2$ 。

根据光学单元基本尺寸的计算结果, 利用 Lightools 光学设计软件对扫描器光学单元建模进行参数优化, 图 4 是正负微透镜阵列组合应用较多的一种组合方式。实现  $20^\circ$  扫描视场负透镜阵列位移量约  $\pm 0.1\text{ mm}$ 。其微透镜阵列的排布方式如图 5 所示。

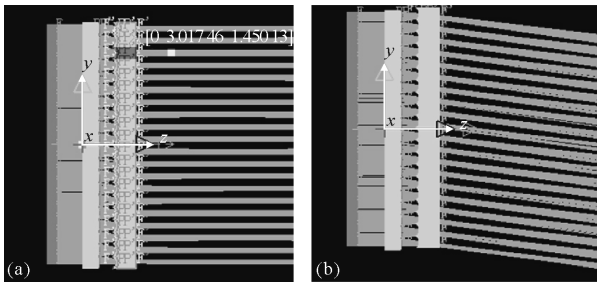


图 4 正负微透镜阵列组合

Fig.4 Positive and negative microlens array combination

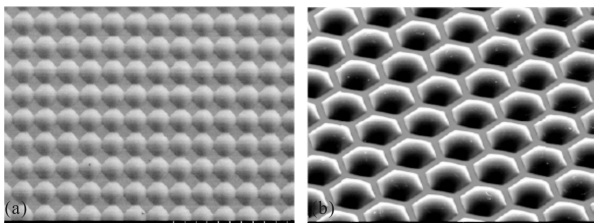


图 5 微透镜阵列排布方式图

Fig.5 Configuration of microlens array

### 5 微扫描快速精确控制

微透镜扫描器的驱动部分采用压电陶瓷实现。如图 6 所示, 外框机构部分是底座, 构成微透镜阵列扫描器的固定部分装配正微透镜阵列, 内框机构采

用压电陶瓷驱动发生位移的活动部分, 装配负微透镜阵列。中间正方形的空窗用来使光线透射过去。通过电容位移探测器来实时监控负微透镜阵列的位移量进行反馈。

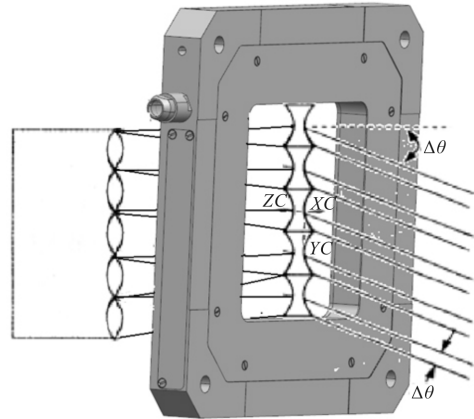


图 6 微透镜扫描器工作原理示意图

Fig.6 Sketch map of microlens scanner working principle

微扫描控制驱动器主要分为压电陶瓷驱动式微扫描器和伺服电机驱动式微扫描器两类。压电陶瓷驱动器通过控制驱动电压大小进行调节位移量, 响应速度快、且控制精度高, 比较适用于微位移控制。微扫描是一个采样过程。系统对同一场景进行多次采样, 每次焦平面阵列与场景图像发生微小的相对位移, 通过每次位移后对场景图像进行一次采样, 就可以获得一幅子图像, 完成一个采样周期后, 对获得的子图像进行拼接及处理, 形成一帧图像。采用 FPGA 生成正弦曲线带动微扫描器进行二维机动, 微扫描器 X 轴向的控制信号(VX)和 Y 轴向的控制信号(VY)由 FPGA 给出。负载与微扫描器连接刚度以及负载惯性、微扫描器的负载对微扫描位移量的影响等因素需要进行位移量控制。

### 6 试验分析

文中构建基于盖革 APD 阵列的激光成像系统, 进行室外试验, 对  $1000\text{ m}$  楼房进行成像, 目标回波率约  $90\%$ 。图 7 为目标楼房的可见光图像, 图 8 为采用  $32\times 32$  的盖革 APD 的三维激光图像。图 9 为基于盖革 APD 阵列的拼接激光成像系统成像, 图像分辨率为  $64\times 64$ 。从试验结果可以看出: 基于盖革 APD 阵列拼接的激光成像系统与原 APD 成像相比, 分辨

率提高了四倍,成像效果明显提高。



图 7 目标可见光图像

Fig.7 Picture of target by visible light

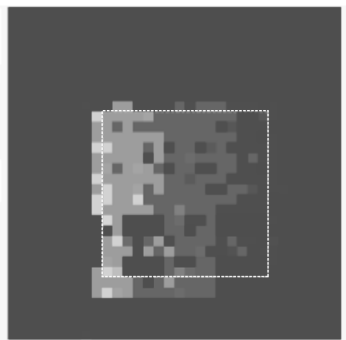


图 8 32×32 APD 三维像

Fig.8 APD 3D imaging by 32×32

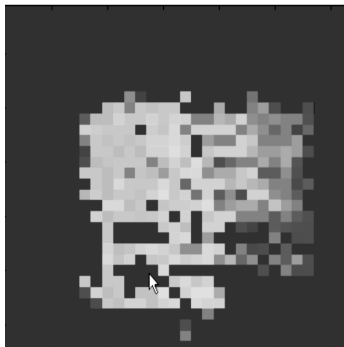


图 9 64×64 APD 三维像

Fig.9 APD 3D imaging by 64×64

## 7 结 论

文中针对目前 APD 阵列存在像元填充比低、器件阵列少,无法满足高分辨率激光成像的要求,提出了采用多元点阵拼接的办法提高成像分辨率,同时提出了微扫描技术扩大成像视场的解决方案,然后通过构建实验系统,完成室外试验,实现了对固定目标的高分辨成像,成像效果良好。

## 参考文献:

- [1] Schneider M, Wurm G. Experiments on light scattering and extinction by small, micrometer-sized aggregates of spheres [J]. *Appl Opt*, 2012, 41(6): 1175-1180.
- [2] Di Xiaoguang, Yao Yu, Zhou Fengqi. Common aperture IR/Ladar dual-mode imaging seeker system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(5): 577-581. (in Chinese)
- [3] Zhang Zhonghua, Chen Jianxin, Wang Qi, et al. The application of binary optical technique in the laser scanner of CO<sub>2</sub> laser imaging radar [J]. *Laser Technology*, 2011, 25(2): 126-128. (in Chinese)
- [4] Halmos M J, Jack M D, Asbrock J F, et al. 3D flash ladar at Raytheon[C]//SPIE, 2011, 4377: 409-420.
- [5] Zhang Yi, Bai Lianfa, Chen Qian. Performance analysis and computation for spatial resolving capability of IRFPA micro-scan [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 221-225. (in Chinese)
- [6] Zhang Hui, Zhu Yong, Wang Yongtian. Optical fiber-based simulation system for laser fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(6): 19-27. (in Chinese)
- [7] Zhang Haojun, Zhao Jianlin. Dual-wave technology used in laser-fuze anti-interfere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 5-9. (in Chinese)
- [8] Wang Jinhua, Yao Hongbao. Adverted issues of application of pulsed laser diode in laser proximity fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 9-13. (in Chinese)