

盖革模式 APD 阵列在激光雷达技术中应用

韩小纯,王元庆

(南京大学电子科学与工程学院,江苏 南京 210046)

摘 要:激光雷达技术是成像前沿技术之一,基于盖革模式 APD 焦平面阵列的三维成像激光雷达以其高灵敏度、高距离分辨率、高成像效率而成为国内外研究热点。本文介绍了美国麻省理工学院林肯实验室研发的盖革模式 APD 阵列的结构和性能。该 APD 阵列具有单光子探测能力,采用桥接集成技术增加了 APD 阵列的集成度,每个像素都有独立的计时电路距离信息直接读出。同时文中还给出了 APD 阵列激光雷达在伪装目标识别、广域地形三维成像方面的最新研究成果。旨在为我国激光雷达技术研究与传感器选择方面提供参考。

关键词:盖革模式;APD 阵列;激光雷达

中图分类号:TN958.98 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.09.04

Application of Geiger-mode APD array in laser radar

HAN Xiao-chun, WANG Yuan-qing

(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

Abstract: Laser radar is one of the leading imaging technologies. Three dimensional imaging laser radar based on the Geiger-mode APD focal plane array becomes a hot research topic at home and abroad because of its high sensitivity, high range resolution and high imaging efficiency. The structure and performance of the Geiger-mode APD array in the Massachusetts Institute of Technology Lincoln laboratory are introduced. The APD array has single photon detection ability. The bridge bonding increases the integration of the APD array. The ranging information can be directly read out from each pixel that has independent timing circuit. At the same time, the article also gives the newest research achievements of the APD array laser radar in target recognition in disguise and three-dimensional imaging for wide area terrain. The purpose is to provide reference for domestic researchers in laser radar researching and sensor selection.

Key words: Geiger-mode; APD array; laser radar

1 引言

激光雷达技术是关系到国防安全的重要研究领域之一,不仅如此,其在自然灾害救援和地理测绘方面也有重要应用。目前,国际上已研制出多种体制的激光雷达,其中焦平面成像激光雷达备受关注。美国麻省理工学院林肯实验室自 1996 年开始研制基于 GMAPD(Geiger-Mode Avalanche Photodiode)焦平面阵列的闪光激光雷达,并进行了飞行试验,证明其对地面伪装目标和树林中隐蔽目标具有良好的探测力^[1]。

基于 GMAPD 阵列闪光激光雷达较其他体制激

光雷达具有如下主要优点^[2-3]:

- (1) 极高的探测灵敏度,可实现单光子探测;
- (2) 较高的测量精度,厘米量级;
- (3) 较高的探测效率,采用单脉冲焦平面阵列成像方式;
- (4) 较低的功耗;
- (5) 体积小,集成度高。

基金项目:装备预研基金。

作者简介:韩小纯(1988-),男,硕士生,主要从事成像激光雷达方面的研究。E-mail: xiaochun8@126.com

收稿日期:2013-02-26

由于上述优点,国际上很多研究机构和公司已投入此研究。据报道,2011 年林肯实验室在美国空军的支持下已完成 ALIRT (Airborne Ladar Imaging Research Testbed) 系统,并获得当年美国百大科技研发奖 (R&D 100 Awards), ALIRT 可在 9 km 高空作业,工作在 3 km 高度时距离分辨率可达一分米^[4]。

我国由于探测器发展较慢,为了更好地借鉴国外最新的研究成果,提升我国的三维成像激光雷达技术水平,本文简述了 GMAPD 阵列激光雷达的工作原理及其各试验系统特性,重点介绍了麻省理工学院林肯实验室在此方面的研究进展。

2 GMAPD 阵列器件简述

GMAPD 阵列器件由盖革模式 APD 阵列和相应的计时集成电路阵列两部分构成,这两部分都是在各自独立的基片上按照统一的设计规范加工出来,然后利用桥接集成技术 (Bridge Bonding) 将两部分集成在一起^[2]。如图 1 所示,这种桥接集成技术首先利用环氧树脂将 CMOS 计时电路和对应的 APD 阵列面对面胶合起来,在胶合的过程中两者之间没有任何电气连接。胶合之后形成了上面是 APD 阵列基底,中间为 APD 阵列,下面是 CMOS 计时电路阵列的“三明治”结构。然后,利用电化学刻蚀的方法将 APD 阵列的基底去除 (APD 阵列以背面照射的方式工作)。最后,在 APD 阵列的各单元之间刻蚀出通道,利用图案形成的方法在通道中形成“金属桥”以连接 APD 和计时读出电路。图 2 为利用桥接集成技术集成后的 APD 阵列显微照片。

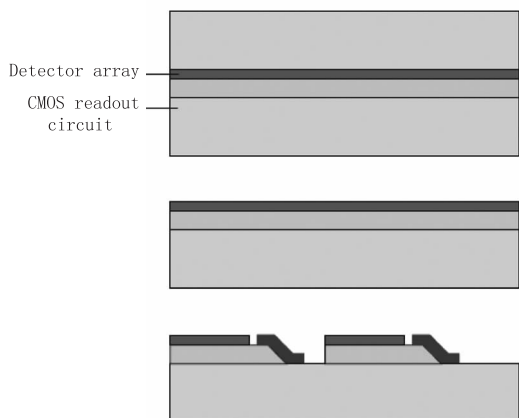


图 1 桥接集成技术

Fig. 1 bridge bonding

现以 32×32 阵列 GMAPD 为例来具体说明其特性。阵列像元之间的间距为 $150 \mu\text{m}$, APD 有效区

域的直径为 $50 \mu\text{m}$, 具有单光子探测能力。该阵列的设计目的是为了通过单激光脉来冲获取目标的三维信息, 因此, 每个像素单元都对应着一个独立的计时电路。光源发射的激光脉冲触发计时电路工作, 当从目标反射回来的脉冲到达时, 计时电路停止计时, 并将计数结果保存供读出。这样焦平面上的每个像素单元都会得到由计时电路产生的距离信息, 该计时电路的时间分辨率为 0.5 ns , 其对应的距离分辨率为 7.5 cm 。

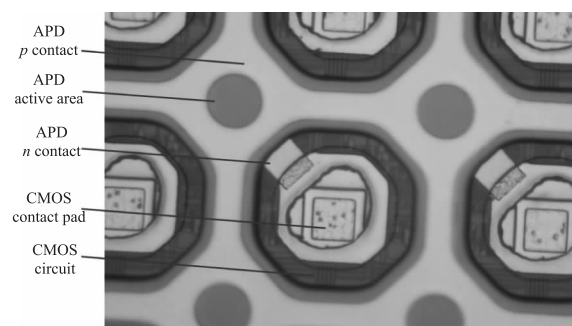


图 2 APD/CMOS 桥接后的显微照片

Fig. 2 photomicrograph of the same bridge-bonded APD/CMOS device

3 GMAPD 焦平面成像激光雷达

2002 年, 林肯实验室相继研发了包括 GEN-I (Brassbord)、GEN-II、GEN-III 三代实验系统^[5], 2003 年和 2011 年分别研发了 Jigsaw Ladar Sensor 和 ALIRT 试验系统。在 GEN-I 系统中, 4×4 的 APD 阵列被封装成一个独立的器件整合到印刷电路板上。每个 APD 单元对应着一个脉冲放大电路, 放大后的脉冲信号通过同轴电缆传输到计时模块。而在 GEN-II 系统中, 4×4 的 APD 阵列集成了带有 16 个计时电路的 CMOS 芯片。GEN-III 系统采用的则是完全将 32×32 APD 阵列和 32×32 CMOS 计时电路阵列相集成的传感器, 相元数目更多, 集成度更高。

2003 年, Richard M. Marino 领导的小组研发了 Jigsaw Ladar Sensor 系统, 这个系统的突出特点是能够对遮蔽在树叶、伪装网后面的目标进行识别^[3]。Richard M. Marino 等人认为, 单视角的激光三维成像, 对于覆盖率为 95% 的目标只能得到很稀疏的抽样。如果能够获得目标从多个角度获取的点云数据, 并将这些数据有效的综合就可以得到目标表面的密集抽样, 利用这种方法实现对目标的可靠精确识别。表 1 列出了 Jigsaw Ladar Sensor 系统的主要参数。

表 1 Jigsaw Ladar Sensor 系统主要参数
Tab. 1 Jigsaw Ladar Sensor System Parameters

参数	数值	说明
标定距离	150 m	
视场角	10. 8°	在 150m 作用距离处， 目标区域直径为 28. 3m
激光波长	532nm	
激光远场光束图样	32 × 32 点阵	对应探测器阵列
激光脉冲宽度	300ps	半高全宽
脉冲和原始成像速率	16 000Hz	
接收光学孔径	7. 5cm	
有效焦距	300mm	
光圈数	f/4. 0	
焦平面像元数	32 × 32	
瞬时横向分辨率	5cm(150 作用距离)	< 7. 5cm
视场(32 × 32)	10. 1mrad × 10. 1mrad	
距离分辨率	40cm	> 7. 5cm
焦平面阵列 距离抽样率	2GHz	500MHz 加两个游标位
瞬时视场角	10. 1mrad × 10. 1mrad	1. 51m × 1. 51m (150m 作用距离， 32 × 32 阵列)

Jigsaw Ladar Sensor 采用的是 32 × 32 GMAPD 阵列,在 150 m 作用高度横向分辨率为 5 cm,距离分辨率为 40 cm。其中,激光器采用了林肯实验室研发的微片激光(Microchip Lasers)技术,是一种被动调 Q 式的固态倍频 Nd : YAG 激光器,工作波长为 532 nm,脉冲宽度 300 ps,脉冲频率 16 kHz^[6-7]。图 3 给出了 Jigsaw Ladar Sensor 三维成像的一个实例,图 3(a)是从多角度获取的目标原始点云数据融合后建立的三维场景图,从俯视的角度观看只能看到树冠而看不到隐藏在下面的军事目标。图 3(b)和图 3(c)是对三维场景的处理过程,将树冠层削去则隐藏在树下的坦克目标清晰可见^[8],如图 3(d),从而实现对伪装目标的精确识别。

2011 年,林肯实验在美国空军的支持下完成了 ALIRT(Airborne Ladar Imaging Research Testbed)系统的研制^[9]。ALIRT 能够从 9 km 高度对广域地形进行快速高分辨率三维成像,每小时可完成2000 km²区域的三维成像,其在 3 km 高度距离分辨率为 10 cm。图 4 给出了 ALIRT 系统原理框图,ALIRT 采用了 32 × 128 GMAPD 焦平面计时阵列^[10],配合角度编码器实

现大幅宽的快速三维成像。林肯实验室还为 ALIRT 系统设计了 GMAPD 数据读出子系统,其读出速率为 160MB/s。为了将生成的 3D 距离图像精确地放置在世界坐标系中,ALIRT 安装了全球定位系统(GPS)和惯性测量装置(IMU)用来确定飞机的位置和飞行方向。

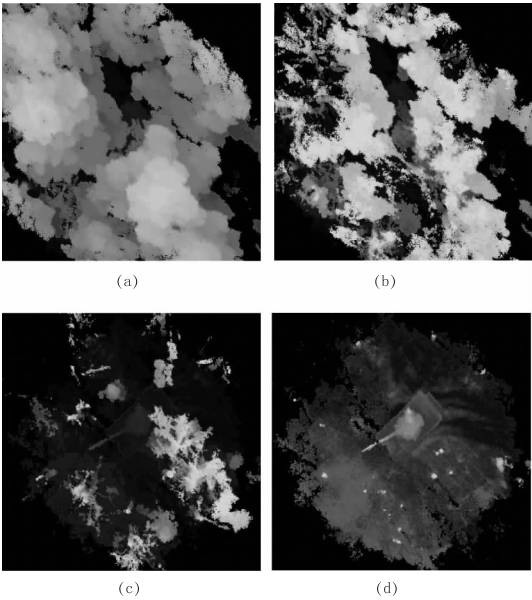


图 3 树冠下目标的提取识别

Fig. 3 recognition of the target below the tree canopy

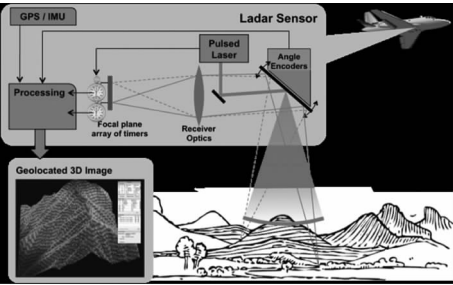


图 4 ALIRT 系统原理框图

Fig. 4 a system block diagram of ALIRT

图 5 是 ALIRT 产生的美国科罗拉多大峡谷三维地形图,左上角为大峡谷的实景照片。大峡谷的高度落差接近 2 km,从图中不仅可以看出大峡谷的地形结构,还可以看到清晰的细节,可见 ALIRT 系统的作用距离和精度都达到了很高的水平。



图 5 美国科罗拉多大峡谷的 ALIRT 成像

Fig. 5 ALIRT imagery of the Grand Canyon

4 结 语

文中介绍了美国林肯实验室研发的盖革模式 APD 阵列,并给出其在激光雷达应用方面的最新研究进展。基于 GMAPD 阵列的激光雷达具有灵敏度高、距离分辨率高、作用距离远、快速高效和能对伪装目标精确识别等优点。林肯实验室已经研制了 GEN-I、GEN-II、GEN-III、Jigsaw Ladar Sensor 和 ALIRT 等试验系统,这些激光雷达系统所表现出来的出色性能在军事和民用方面都受到广泛关注。随着探测器技术的不断发展,GMAPD 阵列性能将会进一步提升,也将在夜视系统、深空探测和侦察应用等领域中有更加广泛的应用。

参考文献:

- [1] 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. (in Chinese)
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.
- [2] Brian F Aull, Andrew H Loomis, et al. Geiger-mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, 13(2): 335 – 350.
- [3] Richard M Marino, William R Davis, Jr. Jigsaw: A Foliage-Penetrating 3D Imaging Laser Radar System[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, 15(1): 23 – 36.
- [4] MIT Lincoln Laboratory. MIT lincoln laboratory wins four 2011 R&D 100 awards [EB/OL]. <http://www.ll.mit.edu/news/2011R-DAwards.html>, 2011 – 08.
- [5] Marius A. Albota, Brian F. Aull, et al. Three-dimensional imaging laser radars with geiger-mode avalanche photodiode arrays[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, 13(2): 351 – 370.
- [6] J J Zayhowski. Microchip lasers [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 1990, 3(3): 427 – 446.
- [7] John J Zayhowski. Passively Q-switched Nd:YAG microchip lasers and applications [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2000, 302 – 304: 393 – 400.
- [8] Michael E O'Brien, Daniel G Fouche. Simulation of 3D laser radar systems [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, 15(1): 37 – 60.
- [9] Robert Knowlton. Airborne ladar imaging research testbed [M]. America: Lincoln Laboratory, 2011.
- [10] R&D Magazine. Faster mapping at higher altitudes [EB/OL]. <http://www.rdmag.com/award-winners/2011/08/faster-mapping-higher-altitudes>, 2011 – 08 – 14.