

32×32 面阵 InGaAs Gm-APD 激光主动成像实验

孙剑峰¹, 姜鹏², 张秀川³, 周鑫¹, 付宏明², 高新江³, 王骥¹

- (1. 哈尔滨工业大学 光电子技术研究所 可调谐(气体)激光技术国防科技重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 北京机电工程研究所, 北京 100074; 3. 中国电子科技集团公司第四十四研究所, 重庆 400060)

摘要: 近十年来, 由于盖革模式 APD 焦平面探测器在探测灵敏度、空间分辨率和距离分辨率等方面的优势, 使得面阵 APD 激光主动成像技术成为国际上的研究热点。考虑到大气传输特性, InGaAs 材料或者 HgCdTe 材料的面阵 APD 探测器成为研制首选。在国内自研 InGaAs 材料的 32×32 像元 Gm-APD 基础上, 搭建了一套 1 570 nm 激光主动成像实验平台, 在成像帧频 1 kHz、单脉冲能量 2 mJ 条件下, 获得了外场 3.9 km 目标的轮廓像, 在 720 m 处能获得目标的清晰表面结构距离像。通过该外场实验, 证实了国内自研的面阵 Gm-APD 探测器性能良好, 能够演示外场激光主动成像功能。实验结果表明, 1 570 nm 面阵 APD 激光成像雷达成像性能良好, 能够实现远距离目标遥感探测, 为未来实际应用奠定了良好的研究基础。

关键词: 激光成像雷达; 面阵 Gm-APD; InGaAs

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1206006

Experimental research of 32×32 InGaAs Gm-APD arrays laser active imaging

Sun Jianfeng¹, Jiang Peng², Zhang Xiuchuan³, Zhou Xin¹, Fu Hongming², Gao Xinjiang³, Wang Qi¹

- (1. National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Institute of Optoelectronic Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Beijing Electro-Mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China;
3. The 44th Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: In the last ten years, the laser active imaging technology on Geiger-mode focal plane APD has becoming the research hotspot on the international, because of its advantages on the detection sensitive, spatial resolution, and range resolution. Considering the characteristic of atmospheric transmission, the InGaAs or HgCdTe APD arrays has been selected firstly. Based on the InGaAs 32×32 APD arrays by domestic developing, the experimental platform of 1 570 nm laser active imaging was established. The target images from 3.9 km were captured on the condition of the frame 1 kHz, pulse energy 2 mJ, and the clear target surface structure range images from 720 m were collected. Through this field experiment, it is proved that the performance of Gm-APD arrays is good, and the platform can demonstrate the function

收稿日期: 2016-04-05; 修订日期: 2016-05-06

作者简介: 孙剑峰(1978-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事激光图像处理及目标识别方面的研究。Email: sjf@hit.edu.cn

of laser active imaging in the field. The experiments state that 1 570 nm focal plane APD laser radar can provide the well imaging performance, and it can remote sensing detection of the far distance target, laying the good research foundation for the future practical applications.

Key words: laser imaging radar; Gm-APD arrays; InGaAs

0 引言

进入 21 世纪后, 激光成像雷达主要向着闪光式、焦平面方向发展, 主要代表是面阵雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)激光成像体制^[1-3]。APD 又分为线性模式和盖革模式(Geiger Mode, Gm), 盖革模式在高压雪崩状态下可做到单光子探测, 探测灵敏度高, 又其直接输出数字信号, 使得读出电路难度大幅度下降, 成为主要研究方向^[4-7]。2002 年, 美国 MIT 林肯实验室最先发展了硅基盖革模式 APD 激光成像雷达^[8], 探测像元 32×32, 成像帧频 5~10kHz, 最大探测距离 1 km。因硅基 APD 响应波段为可见光, 其大气传输特性不如红外, 所以近年来国际上又重点发展了 InGaAs、HgCdTe 等材料的 Gm-APD 激光成像雷达^[9-11]。美国 Princeton Lightwave 公司发展了 32×128 像元的 InGaAs Gm-APD 激光成像雷达^[6], 主要应用于无人机导航和障碍规避等; 雷声公司发展了 HgCdTe Gm-APD 激光成像雷达^[12], 目前可做到 256×256 像元, 主要应用方向是激光成像制导和登月航天飞行器安全降落。

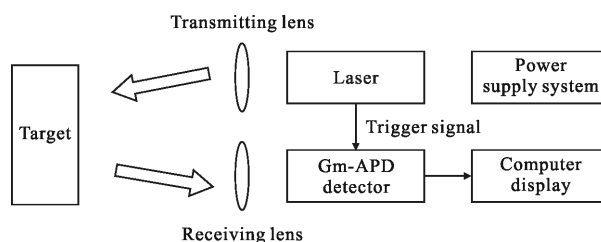
大面阵 APD 探测器可广泛应用于激光三维主动成像领域。近年来, 国内也开始重点研制 InGaAs 材料 Gm-APD 焦平面探测器, 目前中国电子科技集团公司第四十四研究所已经研制出 32×32 像元的 InGaAs Gm-APD 焦平面探测器^[13-15], 哈尔滨工业大学利用该器件搭建了一套 1.57 μm 激光主动成像实验平台, 并进行了外场静态目标成像实验, 取得了最远 3.9 km 目标的激光图像, 使大面阵 Gm-APD 激光成像雷达具备了实际应用的研究基础。

1 1.57 μm 激光主动成像实验平台

InGaAs Gm-APD 响应波段范围为 900~1 700 nm, 结合现阶段激光器的研制状态及大气传输特性, 选用了 1.57 μm 固体激光器作为光源。Gm-APD 探测

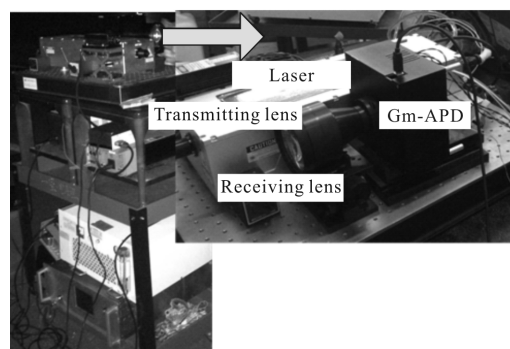
器直接输出数字信号, 可直接与上位机通信, 使得整套装置结构紧凑, 易实现小型化。

搭建的实验平台如图 1 所示。激光器发射脉冲光, 经发射镜头扩束后照射目标, 目标回波信号被接收镜头收集并聚焦到 Gm-APD 焦面上, 由探测器内部的电路系统记录接收回波时刻并以数字信号形式输出至上位机, 上位机接收激光图像并显示。



(a) Gm-APD 激光成像雷达组成框图

(a) Structure frame of Gm-APD imaging lidar



(b) 实物照片

(b) Physical photos

图 1 32×32 像元 Gm-APD 激光成像平台

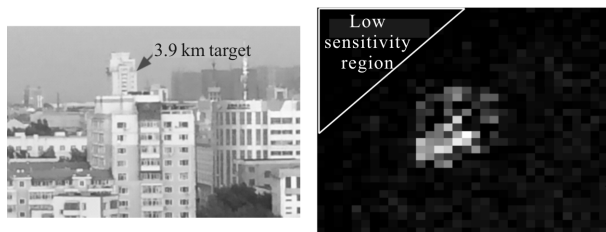
Fig.1 32×32-pixel Gm-APD laser imaging experiment platform

实验平台具体指标如下: 激光器波长 1 570 nm, 脉宽 < 10 ns, 单脉冲能量 1~3 mJ 可调, 重复频率 1 kHz; 收发镜头视场角为 2°; 成像帧频 1 kHz; 像元数 32×32, 探测器占空比约 60%。

2 成像实验结果

利用搭建的面阵 APD 激光成像实验平台对外

场目标进行了静态成像实验。先对 3.9 km 目标(该值由激光测距机测量)进行闪光式焦平面成像,结果如图 2(a)所示。在 3.9 km 处,APD 激光雷达的成像范围直径为 136 m,大于目标的几何尺寸,因此目标在图像中占有的像元数较少。在单脉冲能量 2 mJ、大气透过率 75%条件下,按照激光雷达距离方程计算,每个像元回波能量约为 2.02×10^{-18} J,按照中国电子科技集团公司第四十四研究所给出每个像元探测灵敏度为单光子(1.28×10^{-19} J),接收概率较高,可得到稳定的目标轮廓像,如图 2(b)所示,每个像素值为接收回波的有效计数,回波信号强则探测概率高,有效计数数值高。对多帧该目标图像进行分析,在图 2(b)中标注的三角区域几乎没有回波信号,表明在设定偏压下该部分区域像元探测灵敏度低,但在其他区域可观察到目标轮廓图像,整体像元均匀性有待提高。实验结果表明,国内研制的焦平面 Gm-APD 的探测灵敏度较高,像元均匀性较好,可用于远距离成像的激光成像雷达。



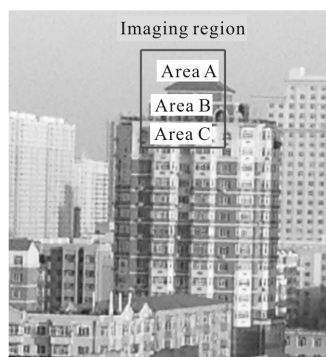
(a) 3.9 km 目标照片 (b) 32×32 像元 APD 图像
(a) 3.9 km target's photos (b) 32×32-pixel APD image

图 2 3.9 km 目标外场成像实验结果

Fig.2 Outdoor imaging experiment result of 3.9 km target

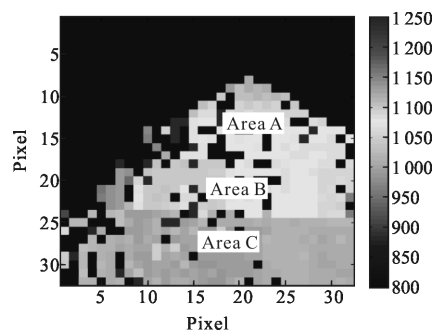
对 740 m 处的建筑物顶部进行凝视成像,如图 3 所示,其中图 3(a)为成像目标的实物照片,标注了成像区域;图 3(b)为成像目标的三维距离像,右侧标注了伪彩色条,距离值与选通门宽内触发位置相对应。将成像区域大体分为三个部分:A 区、B 区和 C 区,在图 3(b)中对这三个成像区域进行了相应标注。

A 区为建筑物顶部三角区,在距离像 A 区中,从底部向顶部颜色从黄色渐变为桔黄色,对应的距离值逐渐变大,这与实际相吻合。B 区为拱形门,与 A 区有一定的距离差,B 区为绿色,A 区为黄色,二者之间有颜色差,显示为前后两个区域。C 区为窗户,与 A 区、B 区都一定的纵深距离,在距离像中显示为蓝色,由伪彩色可标识目标的表面空间结构。



(a) 目标照片

(a) Target photo



(b) 32×32 像元 APD 图像

(b) 32×32-pixel APD image

图 3 740 m 外场目标成像实验结果

Fig.3 Outdoor imaging experiment result of 740 m target

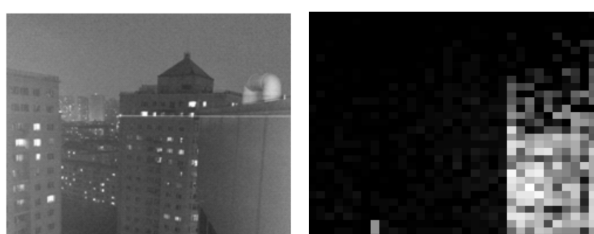
对三个成像区的距离值进行统计,结果如表 1 所示。在三个区中选 3×3 模块像素,取均值作为该区的距离值。参照面阵 APD 探测器参数,每位代表了 0.12 m,则 A、B 之间的距离为 4.08 m,A、C 之间的距离为 9.84 m,B、C 之间的距离为 5.76 m。

对 1.1 km 处某商厦的成像结果如图 4 所示。图 4(a)中,成像目标为某商厦。雷达选通范围 $2.2 \mu\text{s}$,根据目标回波峰值位置,推算目标在门内 311 m 处。在图 4(b)的左上角也没有回波信号,参照图 2(b),这部分像元与其他像元相比差异较大。

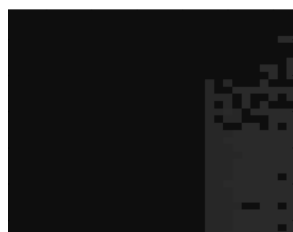
表 1 距离信息统计表

Tab.1 Range information statistics

| | Range bits in the range gate | Difference between range bits | | |
|--------|------------------------------|-------------------------------|----|----|
| Area A | 1 076 | - | 34 | 82 |
| Area B | 1 042 | 34 | - | 48 |
| Area C | 994 | 82 | 48 | - |



(a) 场景照片
(a) Scene photo
(b) 强度像
(b) Intensity image

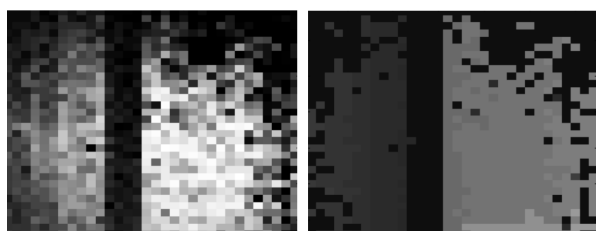


(c) 距离像
(c) Range image

图 4 成像实验结果

Fig.4 Result of imaging experiment

针对该目标场景转动APD 激光成像雷达,可在同一视场内观察到两个目标,如图 5 所示。左侧楼要远于右侧楼,回波信号较弱,反映在强度像上,亮度不如右侧的高;距离像的颜色差反映了二者之间距离不同,根据回波峰值位置,二者距离差为 52.8 m。



(a) 强度像
(a) Intensity image
(b) 距离像
(b) Range image

图 5 两个目标成像实验结果

Fig.5 Imaging experiment result of two targets

对上图距离像进行点云显示,如图 6 所示。两个目标高低不同,二者在纵向上有距离差;左侧目标表面也不是平面,表面结构有距离差异,大体分为三个部分,从左至右,峰值位置分别为 2 501、2 543、2 596,对应距离差为 5.04 m、6.36 m;对应目标,左侧楼在视场内是侧斜的,反映了楼体渐变。由此可见,面阵 Gm-APD 激光成像雷达能高精度成像物体表面结构,可反映出目标的空间表面结构,有利于目标识别

和跟踪。

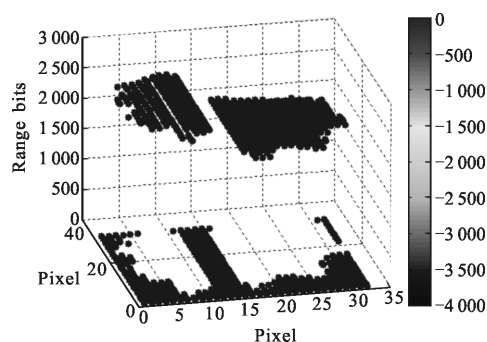


图 6 点云显示结果

Fig.6 Points cloud displaying result

3 结论

以国内自研的 32×32 像元 InGaAs 材料 Gm-APD 面阵探测器为核心器件,搭建了 1.57 μm 激光主动成像实验平台,在重复频率 1 kHz、单脉冲能量 2 mJ 条件下获得了 3.9 km 目标的轮廓像;对 720 m、1.1 km 处建筑物顶部进行凝视成像,获得较为清晰的目标表面结构的距离像。实验结果表明,1 570 nm 面阵 APD 激光成像雷达成像性能良好,能够实现远距离目标遥感探测,具备实际应用的研究条件。

参考文献:

- [1] Aull B F, Loomis A H, Besse P A, et al. Geiger-mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, 13(2): 335-350.
- [2] Kutteruf M R, Lebow P. 1 541 nm GmAPD LADAR system [C]//SPIE, 2014, 9080: 908006.
- [3] Xu Lu, Zhang Yong, Zhang Yu, et al. Four Gm-APD photo counting imaging lidar to improve detection performances[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (9): 2583-2587. (in Chinese)
徐璐, 张勇, 张宇, 等. 四 Gm-APD 探测器提高激光雷达探测性能的研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(9): 2583-2587.
- [4] Rothman J, Foubert K, Lasfargues G. High operating temperature SWIR HgCdTe APDs for remote sensing [C]// SPIE, 2014, 9254: 92540P.
- [5] Piccione B, Jiang Xudong, Itzler M A. Spatial modeling of optical crosstalk in InGaAsP Gerger-mode APD focal plane arrays[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10635-10648.
- [6] Mark Entwistle, Itzler M A, Chen J, et al. Geiger-mode APD camera system for single photo 3-D LADAR imaging [C]//

- SPIE, 2012, 8375: 83750D.
- [7] Liu Junliang, Li Yongfu, Zhang Chunfang, et al. Single-photo detector based on GPQC with balanced APD-PIN junction capacitance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3181-3185. (in Chinese)
刘俊良, 李永富, 张春芳, 等. 基于 APD-PIN 结电容平衡电路的门控单光子探测器 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3181-3185.
- [8] Marino R M, Davis W R. Jigsaw: A foliage-penetrating 3D imaging laser radar system [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, 15(1): 23-36.
- [9] Bongki Mheen, Jae-Sik Shim, Ki Soo Kim, et al. Three-dimensional eyesafe laser radar system based on InGaAs/InP 4 × 4 APD array [C]//2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2011: 934-936.
- [10] Jeff Beck, James McMurdy, Mark Skokan, et al. A highly sensitive multi-element HgCdTe e-APD detector for IPDA lidar applications[C]//SPIE, 2013, 8739: 87390V.
- [11] Verghese S, McIntosh K A, Liao Z L, et al. Arrays of 128 × 32 InP-based Geiger-mode avalanche photodiodes[C]//SPIE, 2009, 7320: 73200M.
- [12] Jack M, Chapman G, Edwards J, et al. Advances in LADAR components and subsystems at raytheon [C]//SPIE, 2012, 8353: 83532F.
- [13] Zheng Lixia, Wu Jin, Zhang Xiuchuan, et al. Sensing detection and quenching method for InGaAs single-photon detector[J]. *Acta Phys Sin*, 2014, 63(10): 104216. (in Chinese)
郑丽霞, 吴金, 张秀川, 等. InGaAs 单光子探测器传感检测与淬灭方式[J]. 物理学报, 2014, 63(10): 104216.
- [14] Mo Caiping, Gao Xinjiang, Wang Bing. InGaAs four-quadrant photo-detector [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2004, 25(1): 19-21. (in Chinese)
莫才平, 高新江, 王兵. InGaAs 四象限探测器 [J]. 半导体光电, 2004, 25(1): 19-21.
- [15] Gao Xinjiang, Zhang Xiuchuan, Chen Yang. Device model and its numerical simulation of InGaAs/InP SAGCM-APD [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(5): 617-622. (in Chinese)
高新江, 张秀川, 陈扬. InGaAs/InP SAGCM-APD 的器件模型及其数值模拟[J]. 半导体光电, 2007, 28(5): 617-622.