

文章编号:1001-5078(2013)09-986-04

· 综述与评论 ·

激光 3D 成像系统主被动探测技术的研究进展

唐晓燕^{1,2}, 高昆¹, 倪国强¹

(1. 北京理工大学 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081; 2. 南阳理工学院电子与电气工程学院, 南阳 473004)

摘要:随着探测器件技术的进步, 新概念的主/被动 3D 成像技术将主被动探测技术优势有机结合起来, 能同时获得目标更加丰富的图像信息(如距离像、强度像、距离-角度像等), 从而为正确识别和跟踪目标提供更多的决策信息, 大大提高了目标识别概率和可靠性。本文首先介绍了激光 3D 成像系统的发展现状, 重点介绍了林肯实验室研制的 Gen-III 系统和美国航空航天局的自主精确着陆和危险的检测避免技术项目的 3D 闪光激光雷达系统, 接着结合 HgCdTe 雪崩光电二极管(APD)器件的特点介绍了下一代激光 3D 成像系统主被动探测技术的发展。最后对激光 3D 成像系统主被动探测技术的未来应用前景进行了展望。

关键词:激光三维成像; 主被动探测; 红外焦平面; APD 阵列

中图分类号: TP958.98 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.09.05

Development of active/passive detection technology in 3D imaging lidar system

TANG Xiao-yan^{1,2}, GAO Kun¹, NI Guo-qiang¹

(1. Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Electronics and Electrical Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

Abstract: With the development of detectors, 3D imaging lidar system can obtain distance, intensity, distance-angle image of objects by combining the advantages of active and passive detection. The produced images provide much decision information for proper identifying and tracking object so that target recognition probability and reliability are improved. Firstly, current development state of 3D imaging lidar system is introduced, which focuses on Gen-III system in Lincoln library and 3D flash laser radar system in Autonomous Precision Landing and Hazard Detection Avoidance Technology (ALHAT) by NASA. Next generation of 3D imaging laser radar systems is described through analyzing the characteristic of HgCdTe avalanche photodiode (APD) detector. Finally, the developing prospects of the active/passive detector technology in 3D imaging lidar systems are outlined.

Key words: 3D imaging lidar; active and passive detection; infrared focal plane; APD array

1 引言

光电信息获取分为主动和被动两种方式。被动式探测方式通过探测目标的可见/红外辐射实现目标探测、识别, 由于其本身不发射任何特征信号, 隐蔽性好等优点, 在军事上得到极其广泛的应用^[1]。相对被动光学探测技术而言, 主动光学探测技术因其受环境束缚小而受到人们的广泛的关

注。近年来, 激光 3D 探测成像系统得到迅速发展, 激光 3D 探测成像系统是一种在高敏感探测器

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60702017); 国防科技重点实验室基金资助项目(No. J20110502)资助。

作者简介:唐晓燕(1979-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事遥感技术研究。E-mail: tangxy97@sina.com

收稿日期: 2013-05-27

基础上发展起来的新技术,这样的探测系统能够测量出极小量的反射激光,并对所扫描的物体实时进行3D建模。由于该系统具有全天时工作、隐蔽性好、紧凑和小型化以及可以伪装识别等优点,已广泛应用于军事侦察、长距离瞄准、大面积3D地形测绘、机器人导航、水下矿藏探测和自导导弹等技术领域^[2-5]。

随着光电对抗技术、光电隐身技术的发展,目标的可探测性越来越弱,为了实现目标的有效探测,一种发展趋势是将被动探测与主动探测有效结合起来,实现所谓的主/被动3D成像探测。这种探测手段可以同时获得目标的多种图像(如距离像、强度像、距离-角度像等),图像信息量丰富,自动目标识别算法大为简化,目标区分能力突出,易于判别目标类型,能够为正确识别和跟踪目标提供更多的决策信息,提高目标识别概率和可靠性,可以广泛应用于天文观察、卫星跟踪、洲际导弹预警、激光武器以及常规防空武器预警等领域^[6]。本文结合主被动探测器技术的发展,介绍了国内外主被动探测系统的发展动态,并对激光成像探测的最新发展趋势进行展望。

2 激光3D成像雷达系统的研究现状

在激光3D成像雷达系统研究方面,麻省理工学院林肯实验室处于领先的地位。美国国防部和美国空军从20世纪90年代开始资助麻省理工学院林肯实验室进行适用于弹道导弹防御的三维激光成像

技术研究;另一个具有代表性的是受美国高级计划研究局(DARPA)资助的用于无人机平台的Jigsaw激光三维成像雷达系统,其主要目的是通过成像发现、识别隐藏于植被或伪装的目标。

目前,林肯实验室已经完成了第三代三维成像激光雷达(Gen-III系统)的研制,如图1所示^[7]。

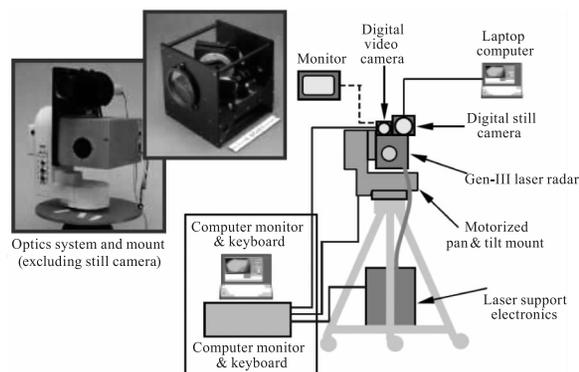


图1 Gen-III激光3D雷达成像系统主要组成部件

Gen-III系统采用工作在盖革模式的 32×32 像元APD阵列作为探测器,具有单光子探测灵敏度。光源采用了532 nm被动调Q二极管泵浦固体倍频微片激光器(功率33 μJ ,脉冲宽度700 ps,重复频率10 kHz)作为光源,通过调整扫描器的扫描间隔进行角分辨率调整,实现了单个激光脉冲完成一幅完整的3D图像。该系统的光学参数如表1所示^[7],具有高帧频、高距离分辨率和小型化等优点。除军事用途外,还可以用于机器人视觉、自主车辆驾驶、精确加工控制等领域。

表1 Gen-III系统的光学系统参数

参数	激光波长	接收孔径	有效焦距	孔径焦距比	焦平面阵列像素数	视场(32×32)	距离分辨率	远场传输模式	激光和成像速率
规格	532nm	7.5cm	30.0cm	f/4.0	32×32	10.3×10.3 mrad	15 cm	32×32 点列	5000 ~ 10000/s

美国先进科技公司(Advanced Scientific Concepts Inc., ASC)也致力于与增强成像和其应用相关的工程技术研究。目前,该公司的主要产品为3D闪光激光探测成像传感器和相机。ASC的闪光激光探测成像系统采用InGaAs APD阵列,达到了 128×128 像元,可以穿过尘土、雾、烟或其他模糊状况进行成像,在任何照度情况下可以对距离为5 cm ~ 5 km的景物进行成像^[8]。

瑞典的CSEM开发了另外一种激光3D成像系统FPA传感器,并致力于开发一种集成、低功耗、小型化的实时激光3D成像系统,其具有30 Hz的成像帧频, 124×160 像元,每个像元均可以通过测量信号(激光调制产生)的相位差来得到激光的传输时间。目前该系统主要应用于无人车辆成像,测量距

离较近^[9]。2008年瑞典Folke Isaksson等人利用立体摄影技术,并采用帧间快速匹配算法进行机载对地3D测量。载机以100 m/s的速度在500 m的高空处飞行,其得到的3D图像的空间分辨率为0.1 m,距离分辨率为0.2 m^[9]。

目前,美国航空航天局的自主精确着陆和危险的检测避免技术(Autonomous Precision Landing and Hazard Detection Avoidance Technology, ALHAT)项目为了在月球和其他行星上的精确安全着陆^[10-11],正在积极发展3D闪光激光雷达技术。月球探测需要在完全黑暗危险的地形下着陆,如岩石或者被遮盖的火山口。该项目的研究为未来机器人和人类在月球探测车提供先进的技术,以支持在月球表面上安全,精确着陆。ALHAT APD

探测器要达到的性能指标和读出电路(ROIC)具体性能要求如表2所示。

表2 ALHAT APD 探测器要达到的性能指标

阵列大小	像素尺寸 / μm	像素间距 / μm	量子效率 /%	波长中心 / μm	增益	带宽 /GHz
256 × 256	60	60	70	1.5	20	1

国内激光3D成像探测系统研究起步较晚,主要有:中国电子科技集团公司第二十七研究所研制的直升机防撞激光3D成像系统,系统采用半导体泵浦的YAG激光器,利用两个谐振镜进行扫描;华中科技大学研制的海洋探测激光3D成像系统,系统采用YAG调Q倍频激光器,利用卵形螺旋扫描方式;哈尔滨工业大学研制的障碍物回避用激光3D成像系统,已研制出实验室样机,采用 $1.06\ \mu\text{m}$ 半导体泵浦YAG激光器,利用两个谐振镜进行扫描成像,成像速率为 $7\ \text{fr/s}$,帧分辨率为 32×32 ,作用距离为 $2\ \text{km}$,回波强度等级为16级^[9]。北京理工大学光电学院目前承研了机载三维选通成像光子计数激光雷达关键技术研究的国家高技术研究发展计划项目,成像系统技术指标接近国际先进水平。总之,国内激光3D成像系统方面的研究已经取得一定的成果,但与国外相比存在较大差距^[9]。

3 下一代激光3D成像雷达系统

采用主动成像激光雷达进行目标识别可提高作用距离。在传统脉冲照射激光雷达中,采用被动红外焦平面探测器宽视场搜索、激光主动探测进行窄视场目标识别是下一代激光3D成像雷达系统的发展模式。

主动、被动探测由不同的探测器件来完成,各自有独立的信号处理系统和光学系统,整体系统十分复杂,主/被动光路同轴校准十分困难。如图2所示^[12],向同一个HgCdTe构建的APD器件加不同的工作偏压,可在APD工作模式和红外焦平面探测器模式之间切换,用在主/被动激光雷达系统中,APD模式用于接收人眼安全的短波主动激光雷达信号;红外焦平面探测器模式用于探测中波红外信号,系统采用同一个信号处理和光学系统,整个系统被大简化,HgCdTe APD用于激光主/被动成像成为研究热点。国际上多个研究机构研制成二维成像和三维成像激光雷达,目前已达到演示样机阶段^[13]。

2008年,英国SELEX Sensors and Airborne Systems (SELEX S&AS)公司研制出了Swan探测器^[12],可以在热成像和激光选通3D成像两种模式进行电子切换。先用大视场的热成像来进行目标定位,然后用窄视场的激光3D成像来对目标进行识

别。焦平面大小为 320×256 ,探测器采用HgCdTe APD和一个专门设计的CMOS多路复用器来执行快速门限和光子信号捕获。同年,DRS Sensors & Targeting Systems公司也研制出了中波红外(MWIR)HgCdTe电子激发APD阵列(e-APD),具有 $3 \sim 5\ \mu\text{m}$ 波段进行被动成像模式和 $1.5\ \mu\text{m}$ 的主动模式。焦平面阵列大小为 128×128 ^[14],当偏压为 $13.5\ \text{V}$ 时,增益可达1000倍,读出速率为 $5\ \text{MHz}$,峰值功耗 $<55\ \text{mW}$ 。

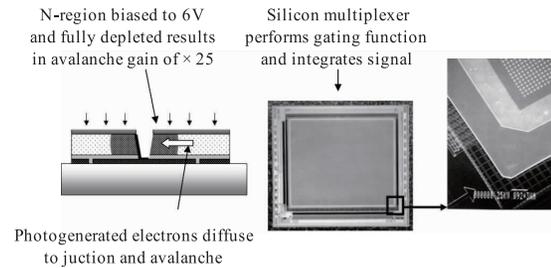
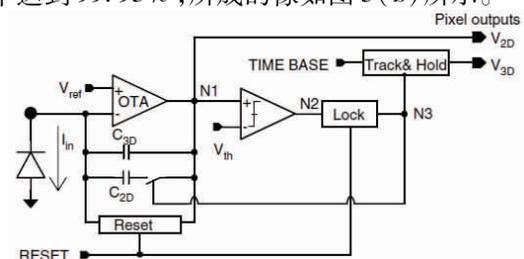


图2 采用HgCdTe工艺构建的APD阵列

2012年,法国原子能委员会的电子信息技术研究所(CEA/LETI)研制出了 $30\ \mu\text{m}$ 间距的红外焦平面,具有热成像和3D激光雷达两种模式的样机^[15],其中焦平面探测器是基于CEA/LETI的HgCdTe APD阵列技术,阵列规模 320×256 ,在每个像素的读出电路中集成了双采样电容、阈值比较和时基跟踪/保持电路,分别用于被动成像(2D)和主动成像(3D)输出电压采样,如图3(a)所示。

CEA/LETI对该样机进行了实验测试,在被动模式下,焦平面工作温度为 $80\ \text{K}$,噪声等效温差(NETD)为 $30\ \text{mK}$, $50\ \text{mV}$ 反向偏压下,光生电流有效率达到 99.93% ,所成的像如图3(b)所示。



(a) 读出电路原理图



(b) 在APD反向偏压(50mV)下NUC后的热像

图3 CEA/LETI的HgCdTe APD阵列

在 APD 模式下探测器的工作温度为 200K, 电子倍增周期为 200ns, 增益为 20 ~ 100, 30m 场景距离的距离噪声为 11cm, 距离不一致性为 9cm。

4 结 论

激光主动成像探测具有较高的距离、角度和速度分辨率, 突破了传统的成像概念, 能同时获得目标的强度像、距离像等多种图像, 图像信息量丰富, 具有目标区分能力突出的优点, 此外还具有抗电磁干扰和抗隐身能力强的特点, 很适于激光成像雷达、制导及引信等武器系统的应用。近年来, 国外军事强国如美、英、法和瑞典等国, 非常重视激光成像探测技术的研究, 已研制出多种激光成像探测系统原理样机, 许多已装备部队。

激光雷达主动/被动成像系统, 由于采用同一个信号处理和光学系统, 整个系统被大简化, 有利于减小系统体积和降低成本。且其可用大视场的热成像来进行目标定位, 用窄视场的激光 3D 成像来对目标进行识别, 大大提高目标识别概率和提高可靠性。因此激光雷达主/被动成像成为被认为是目前最具潜力的复杂背景下的目标探测模式。在不久的将来, 激光雷达主/被动成像将在军民两大领域扮演越来越重要的角色。

参考文献:

- [1] Liu Wu, Sun Guozheng. The status quo, developments and military application analysis of the multi-color IR focal plane arrays[J]. Infrared Technology, 2004, 26(3): 1 - 4. (in Chinese)
刘武, 孙国正. 多色红外焦平面器件的现状、发展趋势及军事应用分析[J]. 红外技术, 2004, 26(3): 1 - 4.
- [2] Zhang Jian, Zhang Lei, Zeng Fei, et al. Development status of airborne 3D imaging lidar systems[J]. Chinese Optics, 2011, 4(3): 213 - 232. (in Chinese)
张健, 张雷, 曾飞, 等. 机载激光 3D 探测成像系统的发展现状[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 213 - 232.
- [3] Sun Zhihui, Deng Jiahao, Yan Xiaowei. Progress and current state of the development of laser imaging detection system and its key techniques[J]. Science & Technology Review, 2008, 26(3): 74 - 79. (in Chinese)
孙志慧, 邓甲昊, 闫小伟. 国外激光成像探测系统的发展现状及其关键技术[J]. 科技导报, 2008, 26(3): 74 - 79.
- [4] de Haag M U, Venable D, Smearcheck M. Use of 3D laser radar for navigation of unmanned aerial and ground vehicles in urban and indoor environments[C]//Defense and Security Symposium. International Society for Optics and Photonics, 2007: 65500C - 65500C.
- [5] Zang Bo, Xing Mengdao, Tang Yu. Study on new systems and new technologies of imaging lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39S(5): 157 - 163. (in Chinese)
臧博, 邢孟道, 唐禹, 等. 激光成像雷达新体制和新方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39S(5): 157 - 163.
- [6] Cai Xiping, Yu Changbin, Chen Lei, et al. State-of-the-art of three - dimensional imaging laser radar [J]. Ome Information, 2008, 25(7): 31 - 35. (in Chinese)
蔡喜平, 于长滨, 陈雷, 等. 三维成像激光雷达的发展动态[J]. 光机电信息, 2008, 25(7): 31 - 35.
- [7] Marino R M, Stephens T, Hatch R E, et al. A compact 3D imaging laser radar system using geiger-mode APD arrays-system and measurements [C]//Aero Sense 2003. International Society for Optics and Photonics, 2003: 1 - 15.
- [8] Mcmanamon P F. Review of ladar: a historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology [J]. Optical Engineering, 2012, 51(6): 060901 - 1 - 060901 - 13.
- [9] Meng Qingji, Zhang Xuyan, Zhou Ling, et al. Key technologies of airborne laser 3D detection imaging system [J]. Chinese Optics, 2011, 4(4): 327 - 339. (in Chinese)
孟庆季, 张续严, 周凌, 等. 机载激光 3D 探测成像系统的关键技术[J]. 中国光学, 2011, 4(4): 327 - 339.
- [10] Jack M, Chapman G, Edwards J, et al. Advances in ladar components and subsystems at raytheon [C] //SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2012: 83532F - 83532F - 17.
- [11] Mckeag W, Veeder T, Wang J, et al. New developments in HgCdTe APDs and LADAR receivers [C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2011: 801230 - 801230 - 14.
- [12] Baker I, Owton D, Trundle K, et al. Advanced infrared detectors for multimode active and passive imaging applications [C]//SPIE Defense and Security Symposium. International Society for Optics and Photonics, 2008: 69402L - 69402L - 11.
- [13] Liu Xingxin. Status of HgCdTe avalanche photodiode arrays [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(9): 909 - 913. (in Chinese)
刘兴新. 碲镉汞雪崩光电二极管发展现状 [J]. 激光与红外, 2009, 39(9): 909 - 913.
- [14] Beck J, Woodall M, Scritchfield R, et al. Gated IR imaging with 128 x 128 HgCdTe electron avalanche photodiode FPA [J]. Journal of Electronic Materials. 2008, 37(9): 1334 - 1343.
- [15] de Bormiol E, Rothman J, Guellec F, et al. Active three-dimensional and thermal imaging with a 30 - μm Pitch 320 x 256 HgCdTe avalanche photodiode focal plane array [J]. Optical Engineering, 2012, 51(6): 61301 - 61305.