文章编号 1674-2915(2011) 03-0213-20

机载激光 3D 探测成像系统的发展现状

张健张 雷 曾 飞 王 旭 赵嘉鑫 田海英 任 航 李俊峰

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 , 吉林 长春 130033)

摘要:机载激光 3D 探测成像是通过激光主动成像产生目标的角-角-距、角-角-速度 3D 图像的一种新的探测成像技术。 本文重点阐述了机载激光 3D 探测成像系统的原理、功能和系统的组成。介绍了该系统在军事和民用两大领域的应用, 详细地讨论了近几年机载激光 3D 探测成像技术的国内外发展现状及动态,总结了该项技术的发展方向。认为国外的机 载激光 3D 探测系统正向远距离、高分辨率、轻量化、低功耗、高实时性和人眼安全方向发展,而目前国内的相关研究仍处 于实验室阶段,与国外相比还存在一定差距。文章最后以用户需求为例,从设计的角度对机载激光 3D 探测成像系统进 行了分析,讨论了该系统在测距机制、扫描机构、探测器、数据处理和显示等方面的处理。

关 键 词:机载 3D 探测成像系统; 激光探测; 激光雷达; 3D 成像 中图分类号:TN958.98; TJ765.332; TJ439.2 文献标识码: A

Development status of airborne 3D imaging lidar systems

ZHANG Jian , ZHANG Lei , ZENG Fei , WANG Xu , ZHAO Jia-xin , TIAN Hai-ying , REN Hang , LI Jun-feng

(Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences , Changchun 130033 , China)

Abstract: Airborne 3D imaging lidar is a new technique to produce a angle-angle-distance , angle-angle-velocity 3D image by laser imaging. This article emphasizes the mechanism , functions and configurations of the airborne 3D imaging lidar systems as well as their applications which includes both the military and civil fields. Then , it states the current situation and developing directions of the airborne 3D imaging lidar system in detail. It summarizes that the airborne 3D imaging lidar in foreign couritries will make advances on long distance , high resolution , low power consume , real time and laser safety , However , the current domestic research is still at the laboratory stage , and there is still a gap compared with other foreign countries. Some of the key technologies need to be solved. Finally , by taking a 3D image lidar system from a user for an example , it analysizes the requrirements of the system for the range measurement , scanning structures , detectors and dada processing and display.

Key words: airborne laser 3D imaging system; laser detection; laser radar; 3D imaging

收稿日期:2011-01-12;修订日期:2011-03-13

1 引 言

激光探测成像是通过激光束对目标进行照 射,目标的反射回波由探测器接收,通过信号处理 获取目标至探测器的距离和速度等信息,进而获 得区别于背景的距离图像和多普勒(速度)图 像^[1]的一种新型探测成像技术。机载激光3D 探 测成像系统即为利用激光进行探测成像的设备, 该设备通过对地面目标进行主动成像与距离测 量,产生含目标和景物的3D 图像。由于该系统 具有全天时工作、隐蔽性好、可紧凑和小型化以及 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 藏探测和自导引导弹等技术领域^[2]。

本文首先分析了机载激光 3D 探测成像系统 的原理、关键技术及应用情况,然后对国外近 10 年内在机载激光 3D 探测成像系统方面的发展现 状及研究动态进行分析和总结,并指出该系统的 发展方向。最后,系统地对机载激光 3D 探测成 像系统的设计提出了一些可行的建议。

2 原理及关键技术分析

激光探测成像系统是一种利用激光光波探测 目标位置的电子设备,它可以采用非相干的能量 接收方式,主要是以脉冲计数为基础;也可以采用 相干接收方式接收信号,通过后置信号处理实现 相干探测^[3]。

机载激光 3D 探测成像系统是一种在高敏感 光探测器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 到的物体实时进行 3D 建模^[4]。图1所示为一种 机载激光 3D 探测成像系统的原理框图,它主要 由激光发射/接收光学系统、陀螺稳定平台、激光 发射/接收系统、数据处理与显示系统和视轴稳定 控制系统等5部分组成,其中激光发射/接收系统 由激光器及其控制电路、探测器、计时电路等组 成。机载激光 3D 探测成像系统通过机载导航系 统确定空间位置和姿态,同时由激光发射和接收



图 1 机载激光 3D 探测成像系统原理图 Fig. 1 Mechanism chart of airborne 3D imaging lidar system 系统获取地面激光脚点到发射装置的空间距离和 矢量方向,利用导航参数作为基准计算出地面点 的地理坐标位置^[4]。

国外激光探测成像技术从辐射源种类上可以 分为3类: CO₂激光成像探测、二极管泵浦固体激 光探测成像和半导体激光探测成像。CO₂激光探 测成像系统的激光器为 CO₂激光器,由于其体积、 成本及抗震性等方面的缺点,逐渐被后两种技术 所替代。二极管泵浦固体激光探测成像系统采用 高重复频率、高峰值功率的二极管泵浦固体激光 器和高灵敏度的雪崩光电二极管/PIN(APD/ PIN)探测器,大多采用直接探测方式,可实现高 分辨率的距离成像。半导体激光成像探测系统具 有体积小、重量轻、成本低、寿命长、可靠性高和功 耗低等优点,它采用半导体激光器或半导体激光 器阵列,探测器采用 APD/PIN 或 APD 阵列,大多 采用直接探测方式,具有测距和目标 3D 轮廓成 像功能^[5]。

机载激光 3D 探测成像系统的工作过程如 下:首先由激光控制单元控制激光器发射出激光 脉冲 通过发射光学系统压缩激光光束的发散角 后 根据测量点的密度 控制扫描镜摆动将激光脉 冲射向地面目标。同时有极少量的激光能量,作 为计时起始触发脉冲输送给激光接收系统。目标 回波的激光脉冲经接收光学系统照射在探测器 上,计时电路停止计时。这样,通过计算激光脉冲 的飞行时间(Time of Flight ,TOF)得到目标与系统 之间的距离。同时根据 INS/GPS 系统和平台姿 态得到目标的方位角和俯仰角,即可得到目标的 角-角-距 3D 坐标。由数据处理与显示系统依据 相应的算法,根据各测点的 3D 坐标,绘制出目标 的 3D 图像,并实时显示出来。

机载激光 3D 探测成像系统作为一种主动成 像设备 利用探测器感知回波信号得到与景物之 间的距离信息 ,而得到的距离、姿态等数据信息需 要通过处理才能得到 3D 图像。因此 ,光源、探测 器和数据处理等是它的主要组成部分 ,这里对这 些关键技术进行简要的分析。

机载激光 3D 探测成像系统的关键参数为脉 宽、重复频率、激光头尺寸、单脉冲能量等。激光 束脉宽决定了机载激光 3D 探测成像系统的距离 分辨率 脉宽越小 距离分辨率越高。激光器重复 频率的选择与机载激光 3D 探测成像系统的工作 方式即扫描方式密切相关。一般来说 脉冲重复 频率越高 ,地面测点密度越大 ,得到的 3D 图像的 分辨率越高。激光器尺寸是另外一个重要的参 数 ,因为机载激光 3D 探测成像系统要求紧凑、轻 量和小型化 ,因此激光器的体积和重量都是越小 越好。而单脉冲能量则越高越好 ,因该参数值越 高 ,回波信号的能量就越大 ,可以满足长距离的探 测要求。激光器波长主要考虑安全性 ,很多研究 机构和公司都应用了对人眼安全的激光器。

机载激光 3D 探测成像接收系统的灵敏度取 决于采用的探测技术和探测器件的灵敏度 其整 体性能和探测器的输出噪声及输出信噪比密切相 关。APD 探测器具有带宽高、噪声小、动态范围 大、具有电流增益和可靠性好等优点 是机载激光 3D 探测成像系统中最常用的探测器之一^[6]。 APD 的材料通常基于 Si, GaAs 以及 InGaAs。 Si-APD适用于 850 nm ,后两种工作于 1 300 和 1 550 nm波长。APD 探测器阵列有线阵和面阵之 分 国外面阵 APD 像素已经达到了 128 × 128。美 国麻省理工学院的林肯实验室目前已经开发出 32 × 32 APD 阵列,工作于盖革模式,即 APD 接收 单个光子产生的电子一空穴对就可以激发雪崩现 象 产生一个大的电流脉冲。该 APD 阵列与快速 的 CMOS 数字计时转换电路集成在一起,探测器 单光子敏感度可以达到纳秒以下的计时精度。整 个集成的 APD/CMOS 阵列是一个紧凑、低功率和 全固态的模块。APD 探测器阵列是发展激光 3D 探测成像技术的一项非常重要的关键技术,目前 大面阵的 APD 探测器阵列国外均对中国禁运。

机载激光 3D 探测成像系统的另一个重要的 性能指标是其运行速度,运行速度与实时性密切 相关。为此,有必要配备合适的数据处理与显示 系统以实时地显示 3D 图像。机载激光 3D 探测 成像系统得到的数据为目标的角-角-距等信息, 需要通过数据处理将角-角-距数据转换到笛卡尔 坐标系中。该阶段可将数据存储到 1D 的哈希表 中,每个 3D 像素的坐标对应唯一的寻址整数。 由于在测量时间范围内,感兴趣空间中大部分的 3D 像素是空值,所以这种较为稀疏的数据结构非 常适合于单个光子的计数。在接收到所有的测量 脉冲后,所有非空的3D像素集合于哈希表中。 由于 APD存在噪声,因此,需要根据设定的阈值 去除较小值的3D像素。在目标背景中,需要检 测地面以作为目标的参考。该步骤完成后,在3D 图像中形成了地面网格。由于 APD 的响应速度 快,但衰减较慢,这会形成图像上的"余辉"。为 增加信噪比,需要用去卷积算法抑制"余辉"效 应,增强图像判读效果。

不难看出,对于机载激光 3D 探测成像系统 的研制及指标提升主要在于关键技术上的突破, 不仅需要致力于激光器和探测器技术的发展,开 发可用于 3D 图像处理与显示的硬件和软件系 统,还要考虑 INS/GPS 系统的性能以提高机载激 光 3D 探测成像系统技术指标。

3 在军事及民用领域的应用

由于激光探测成像技术具有抗干扰及抗隐身 能力强和较高的距离、角度和速度分辨率等突出 优点,在军事和民用领域都有着广阔的应用前景。 目前,部分激光探测成像系统已经投入使用,而有 些仍处于实验室研制和探索阶段。

- (一)机载激光 3D 探测成像系统在军事领域 的应用
- (1) 用于侦察的机载激光 3D 探测成像系统

激光 3D 探测成像系统分辨率高,可以采集 3D 数据,如方位角-俯仰角-距离、方位角-俯仰角-多普勒速率等,获得距离图像、速度图像等,有潜 力成为重要的侦察手段。1992 年,美国海军开始 了"辐射亡命徒(Radiant Outlaw)"工程。该系统 利用一个强健、紧凑的机载传感器组件进行多模 式识别,该传感器包含一个稳定激光探测成像系 统,可以识别目标表面振动和微多普勒信号,得到 距离图像,进行高分辨率主动激光 3D 探测成像, 从而用于军事侦察^[7]。最近,美国麻省理工学院 林肯实验室研究的机载激光 3D 探测成像系统传 感器可以穿透浓密的树叶,对隐藏其下和伪装的 军事目标进行成像。因此,利用机载激光 3D 探 测成像系统得到的 3D 图像对于军事侦察具有重 大的意义。

(2) 障碍回避机载激光 3D 探测成像系统

直升机近地飞行时,地物是直升机最严重的 威胁,特别是电力线、铁塔、钢缆以及树木等低观 测性目标^[8]。障碍回避机载激光 3D 探测成像系 统就是应用于直升机低空飞行防撞和躲避障碍的 设备 利用激光主动成像 在任何照度下对直升机 前面和下面的空间进行 3D 成像,从而提示直升 机避开障碍和危险。美国 Fibertek 公司成功研制 了用于直升机防撞的机载激光探测成像系统 其 激光器为二极管泵浦固体激光器,波长为 1.54 µm。从 1994 年起, Fibertek 公司已经在 UH-IH 直升机上进行了大量挂飞试验,成功实现 了对障碍物的探测成像^[9]。德国戴姆勒一奔驰 宇航公司研制了 Hellas 障碍探测激光探测成像系 统视场为32°×32°,能探测距离为300~500 m、 直径1 cm 以上的电线和其他障碍物(取决于角度 和能见度)^[8]。

(3) 大气监测机载激光 3D 探测成像系统

机载激光 3D 探测成像系统可以探测气溶 胶、云粒子的分布,也可以进行大气成分、污染环 境气体的探测,能对主要污染源、污染环境物的扩 散以及沙尘暴过程等进行有效监控。在高空投掷 炸弹和其它兵器时遇到的一个问题是,风干扰向 下的弹道。美国空军器材司令部进行的弹道风计 划利用机载激光 3D 探测成像系统实时提供投 掷区风场的信息,以便通过调整投掷点来补偿风 的影响。该计划的目标是测量飞机和地面间的实 时 3D 风场图,从而允许从 3 000 m 以上的高空精 确投掷。据称,作战用机载激光 3D 探测成像系统须将硬件小型化,可使空投精度提高 2 倍以上。 机载激光 3D 探测成像系统探测紊流阵风的能 力,可以为未来的军用和民用飞机提供更好的阵 风缓和系统^[10]。

(4) 制导机载激光 3D 探测成像系统

激光制导又称激光波束制导,有着广泛的应 用前景,可用于地-空、空-空、地-地导弹等多种类 型的导弹制导^[11]。目前,利用机载激光 3D 探测 成像系统的主动激光寻的制导已成为各国研究的 热门。美国陆军正在研制的"网火"武器系统中 的巡飞攻击导弹(LAM),装有能够自动确认目标 的主动激光探测成像导引头,能够连续扫描直径 500~600 m,分辨率达150 mm,使得LAM在飞行 高度230 m、飞行速度400 km/h时还能自动辨认 目标^[12]。

(5) 水下探测机载激光 3D 探测成像系统

利用蓝绿激光在水中传输窗口效应,从机载 平台上对水下目标快速探测、定位和成像的激光 探测成像系统已经开始装备部队。由于波斯湾战 争的需要,美国 Kaman 公司研制发展了 Magic Lantern 激光探测成像系统,安装在 SH-2F 直升机 上,它能够在 140 ~ 320 m 的海上高度运行,当发 现水雷信号时,可以成角-角-距图像,并在显示屏 上显示,最终通过该系统配置的一个终端破坏装 置将水雷破坏。水下激光探测成像系统也可以装 在无人潜水器中,美国海军在 20 世纪 90 年代中 期研制出一种可装在无人潜水器中的 LVIS 水雷 目视激光识别系统,该系统识别距离为 12 m,可 进行行扫描成像^[13]。

(二)机载激光 3D 探测成像系统在民用领域 的应用

机载激光 3D 探测成像系统在民用领域也有 着非常重要的应用。在地形测绘方面 ,机载激光 3D 探测成像系统可以直接获取高精度的 3D 信 息 ,能全面反映地表信息 ,同时能够对大范围、沿 岸岛礁海区、不可进入地区、系数植被下层进行探 测成像。在森林资源勘察方面 ,机载激光 3D 探 测成像系统可以高精度地提供森林水平和垂直的 信息 ,可以为森林调查和经营管理提供诸如大范 围森林高度、林下地形和截面垂直分布的直接测 量数据。另外 ,机载激光 3D 探测成像系统在海 洋勘探、灾害管理、大气环境监测和考古学等方面 都有着非常重要的应用。

综上所述,无论是在军事还是民用方面机载 激光探测成像设备都发挥着极其重要的作用,应 用前景广阔,因此,许多国家都在竞相发展这项技术。

4 发展现状及动态

机载激光 3D 探测成像系统的先进技术主要 集中在美国和欧洲部分发达国家。最近几年,其 发展主要体现在激光器、探测器件、数据处理算法 和电路等方面。

4.1 美国机载激光 3D 探测成像系统的发展现状

美国麻省理工学院的林肯实验室(MIT Lincoln Laboratory) 很早就致力于激光探测成像技术 的研究。其最早的激光探测成像系统为高功率、 长距离的 Firepond(火池)激光探测成像系统,它 可用于太空目标监视和弹道导弹防御等战略军事 领域。林肯实验室从 1975 年开始研究机载激光 3D 探测成像系统,代表成果为红外机载雷达系统 (Infrared Airborne Radar System, JRAR)^[14]。

IRAR 系统发展经历了技术发展和实验室论 证、车载系统测试以及飞行测试 3 个阶段。在飞 行试验中, IRAR 系统安装在 Gulfstream G-1 飞机 上,如图 2(a)所示。机载系统对一个飞机库进行 了被动红外、激光距离和激光强度成像,如图 2 (b)所示,其中激光距离图像的测距精度为 1 m。 机载 IRAR 系统利用其前视激光探测成像系统对 Bourne 大桥进行成像,得到绝对距离值,则距离



(a) IRAR 系统安装于 Gulfstream G-1 飞机 (a) IRAR system mounted at Gulfstream G-1 airplane



(b) 机载系统对防飞机库所成 3 种类型的像(b) Three kinds of images of hangar from airborne system

图 2 机载 IRAR 系统及所成图像

Fig. 2 Airborne IRAR system and its applications to imaging 像可以转换到任意的视角,因此创意地提出多维 图像处理,得到3D甚至更多维度的图像。Bourne 大桥的3D前视图如图3所示,图中的插图为转 换得到的大桥俯视图。这个阶段系统的激光器为 CO₂激光器,采用主动和被动 HgCdTe 探测器阵 列。随着研究的进展,研究者开始对机载 IRAR 系统工作在垂直于或接近垂直于地面的视角感兴 趣,实现了利用高角度和距离分辨率的激光探测 成像系统穿透树叶和伪装进行成像以及对垂直打 击的武器进行制导。因此,人们发展了 GaAs 激 光器和 Nd: YAG 激光器的俯视 IRAR 系统,俯视 距离约为 100 m,空间分辨率为 15 cm,测距精度



图 3 Bourne 大桥的 3D 前视图及俯视图 Fig. 3 3D forward and overhead views of Bourne bridge





也为15 cm。基于 GaAs 激光器的机载 IRAR 系统 的相对距离精度为15 cm,系统对伪装下的坦克 进行成像,得到的角-角-距3D 图像如图4 所示。 由于 GaAs 系统无法穿透高度高的树林,林肯实 验室发展了基于 Nd: YAG 微芯片激光器的绝对测 距激光探测成像系统,距离精度为15 cm,并发展 了实时处理器^[14]。综上所述,IRAR 系统经历了 CO₂激光器、GaAs 激光器和 Nd: YAG 微芯片激光 器 3 个阶段,主动探测器为 HgCdTe 探测器阵列, 距离精度达到了 15 cm。

为了使机载激光 3D 探测成像系统具有在单 激光脉冲下捕获景物的完整 3D 图像,并具有成 千上万的像元、体积小、重量轻、功耗低等特性,林 肯实验室积极发展激光器和探测器技术。激光器 技术基于被动 Q 开关泵浦二极管固态微芯片激 光器;探测器技术基于林肯实验室开发的盖革模 式 APD 阵列,每个像元都集成了计时电路^[15]。

林肯实验室首先研制了一个车载激光 3D 探 测成像系统 Gen-I。激光器为微芯片激光器,激 光波长为 532 nm 脉冲重复频率为1 kHz,单脉冲 能量为 30 µJ。探测器为 4 × 4 盖革模式 APD 阵 列,外部计时电路,通过测量每个像元 TOF 的方 法得到与目标之间的距离。在高探测概率的情况 下测得单像素距离精度为 2.0 cm。该系统的光 学头及光学系统示意图如图 5 所示。系统具有一 对单轴扫描镜,它们指引 4 × 4 APD 阵列的视场 达到更大的面积,以产生 32 pixel × 32 pixel(帧频 为 4.5/s) 或 128 pixel × 128 pixel(帧频为 0.6/s) 的目标图像。接收光学系统的变焦透镜允许像元 视场在 0.2 ~ 2 mrad 之间变化。整个 Gen-I 系统 被安装在一个汽车上,并在室外进行了成像试验,



图 5 林肯实验室实验性激光探测成像系统 Gen-I Fig. 5 Experimental imaging lidar Gen-I in Lincoln Laboratory

其中对 Chevrolet Astro 面包车所成的 3D 图像如 图 6 所示^[15~17]。



图 6 Gen-I 系统所成的 3D 图像 Fig. 6 3D image produced by Gen-I system

紧接着实验室又研制了第二代机载激光 3D 探测成像系统 Gen-II。Gen-II系统的光学系统及 机械结构如图 7 所示。Gen-II系统由一个波长为



532 nm的放大倍频微芯片激光器激发一个钛--蓝 宝石激光器(长度为25.4 mm),产生波长为 800 nm的激光。最初的激光器性能规格要求脉冲

重复频率为 8~10 kHz, 单脉冲能量为 20 μJ,通 过增加激光放大器使激光器输出单脉冲能量升级 到150 JLJ。接收光学系统设计允许激光波长在 800 nm~1.5 µm 之间变化 这将允许升级后的系 统可以工作在 1.06 µm 的波长下 在这个波长下 APD 阵列具有很好的敏感性。像元视场达到了 250 µrad ,且可工作于几千米以外。系统包含一 个两轴扫描镜 视场角超过 ± 20°。Gen-Ⅱ系统使 用 32 × 32 全集 APD 管阵列,即与计时电路集成 在一起,像元间距为100 µm,每个像元激活面积 的直径为 30 μm。为了使返回信号集中于探测器 每个像素的激活区域,在探测器阵列前面集成安 装了 32 × 32 小透镜阵列。在数据采集和处理方 面,也随着Gen-I系统不断发展,已经证明系统在 极低的信号水平下可对隐蔽目标产生高质量的 3D 图像的光子计数的效果^[15]。

在发展 Gen-I 和 Gen-II 系统的同时,林肯实 验室还集成了一个加强版的机载激光 3D 探测成 像系统。该系统采用 32 × 32 Si-APD 阵列作为接 收器 不再需要小透镜。激光器采用工作波长为 532 nm 的倍频微芯片激光器。该加强版系统的 发射光束经扩束后被分为 32 × 32 细束,这样分离 的目的是与接收器像元视场相匹配。系统扫描镜 也是一个两轴扫描镜。该系统的总重量约为 9 kg ,系统结构如图 8 所示^[15]。发展该加强版系 统的直接目的是减小尺寸和降低阵列读出电路的 功率需求和激光器驱动功率。



图 8 加强版激光 3D 探测成像系统 Fig. 8 Promotional 3D imaging lidar system

在加强版系统基础上,林肯实验室研制了第

三代机载激光 3D 探测成像系统 Gen-Ⅲ。Gen-Ⅲ 系统采用脉冲重复频率为 5~10 kHz 的被动 0 开 关固态倍频 Nd: YAG 微芯片激光器,工作波长为 532 nm; 探测器采用工作于盖革模式的 32 × 32 APD 阵列,像素间距为100 μm,与 COMS 计时电 路集成在一起,CMOS时钟频率为500 MHz。 Gen-Ⅲ系统光学设计参数如表1所示。光学系统 及机械结构如图 9 所示,整个传感器的尺寸为 20 cm × 20 cm × 22 cm ,重量约为 6 kg。由 Gen-Ⅲ 系统对距离 500 m 处一个坦克成像得到的 3D 点 云图如图 10 所示。林肯实验室还进行了树叶穿 透能力试验 由其给出的图像可以看出 Gen-Ⅲ系 统能够对隐蔽在浓密树林中的目标进行成像 具 有重要的军事意义。对于机载激光 3D 探测成像 系统未来的发展 文章中指出: 增大焦平面阵列的 像元尺寸,如128×128;发展Ⅲ-V族材料的盖革 模式 APD 阵列,以响应更长波长的激光,如波长 在1 500 nm左右对人眼安全的激光;提高激光脉 冲的能量;整个机载激光 3D 探测成像系统能更 小更轻(低于1 kg)等等^[18]。



图 9 Gen-III LADAR 试验台光学系统示意图及实物图片 Fig. 9 Sketch of optical system for Gen-III airborne 3D imaging lidar system and its entity figure

表1	Gen-III系统的光学设计参数	þ

Tab. 1 Optical design parameters for	Gen-m	system
--------------------------------------	-------	--------

参数	规格
激光波长	532 nm
接收孔径	7.5 cm
有效焦距	30.0 cm
孔径焦距比	<i>f</i> /4.0
焦平面阵列像素数目	32 × 32
视场(32×32)	10.3 mrad $\times 10.3$ mrad
距离分辨率	15 cm
远场传输模式	32×32 点列 ,与探测器阵列匹配
激光和成像速率	$5\ 000 \sim 10\ 000 / s$



图 10 距离 500 m 处一个坦克的 3D 图像 Fig. 10 3D image of a tank at distance of 500 m

表 2 对林肯实验室的三代机载激光 3D 探测 成像系统(包括加强版系统)性能进行了对比。 通过对比可以看出 在激光器方面 林肯实验室一 直在发展微芯片激光器,不断地提高其单脉冲能 量和脉冲重复频率等指标;探测器为工作于盖革 模式的 APD 阵列,不断地增大其像元,并将计时 电路集成于其上;值得注意的是在这几代产品中 光学系统的变化:在 Gen-II 系统中,为了使回波 信号能集中于每个像元的激活区域,在探测器前 面集成了一个 32 × 32 的小透镜阵列 而在加强版 和 Gen-Ⅲ系统中则利用激光发射光学系统中的 衍射分光镜将扩束后的激光束分成 32 × 32 细光 束阵列,从而高效地照亮 32 × 32 APD 阵列每个像 元各自的视场,与32×32小透镜阵列相比,该方 法照明照度包含更好的几何耦合,减少背景杂光 干扰,提高角分辨率;在重量上,林肯实验室研制 机载激光 3D 探测成像系统的趋势是重量更轻, 结构更紧凑。对于距离分辨率指标,Gen-III系统 达到了15 cm。

表 2	林肯实验室三代机载激光 3D 挠	采测成像系统性能对比

Tab. 2 Performance contrast among three 3D imaging lidar systems in Lincoln laboratory

	Gen-I	Gen-II	加强版	Gen-III
激光器	微芯片激光器	放大的倍频微芯片激光器	倍频微芯片激光器	被动 Q 开关固态倍频
		激发一个钛-蓝宝石激光器		Nd:YAG 微芯片激光器
	波长: 532 nm	波长:800 nm	波长:532 nm	波长:532 nm
	重复频率:1 kHz	重复频率:8~10 kHz		重复频率:5~10 kHz
	单脉冲能量:30 μJ	单脉冲能量:150 μJ		单脉冲能量:33 μJ
探测器	工作于盖革模式的	32×32 全集成	32×32 硅 APD	工作于盖革模式的 32 × 32
	4×4 APD 阵列	APD 阵列	阵列	APD 阵列
	像素数目:32×32	像素数目:32×32	像素数目:32×32	像素数目:32×32
	(帧频 4.5/s);	探测器前集成安装	发射光束被转换成	计时电路: CMOS 计时电路
		32×32 小透镜阵列	一连串光束 /与像元	与探测器集成一体
	128×128(帧频 0.6/s)	计时电路: 与探测器	视场匹配	像元间距:100 μm
	计时电路: 外部	集成在一起		远场传输模式:32×32 点列,
		像元间距:100 μm		与探测器阵列匹配
视场	像元视场: 0.2~2 mrad	像元视场: 250 μrad		视场: 10.3 mrad × 10.3 mrad
		视场角: > + / -20°		
扫描镜	一对单轴扫描镜	两轴扫描镜	两轴扫描镜	两轴扫描镜
质量			9 kg	6 kg

美国国防部高级研究计划局(DARPA)等部 门正在进行一种高分辨率成像和高隐蔽目标识别 的小型机载激光 3D 探测成像传感器(JIGSAW) 的开发。JIGSAW 系统最大的优点是对极度模糊 的目标具有高分辨率成像与识别功能,能够收集 隐藏在浓密森林中地面目标的多角度、高分辨率 的 3D 图像,并能够把隐藏的有威胁的目标图像 提供给地面的指挥官。林肯实验室主要负责 JIG--SAW 机载激光 3D 探测成像系统传感器部分的研 制。该传感器主要由以下几部分组成:短脉冲被



图 11 JIGSAW 系统结构图 Fig. 11 System structure of JIGSAW system

动 Q 开关倍频固态 Nd: YAG 微芯片激光器,平均 工作功率为 0.25 W: 盖革模式 32 × 32 单光子计 数硅 APD 阵列,单光子探测效率 > 20%,它与高 速 CMOS 读出集成电路桥键连接; 平台是有着精 确地理信息的 30 cm(12 in) 万向节系统(集成有 GPS/INS);自动化的传感器和智能遥控电子设备 和软件:专用机载处理器,可提供近实时的数据收 集和 3D 点集数据处理及存储能力; 高带宽 RF 数 据通信无线电设备;用于平台/传感器控制的地面 模块控制站;状态监视;3D 成像视觉及开发系统。 各模块之间的逻辑关系如图 11 所示。JIGSAW 传感器参数如表 3 所示。IIGSAW 系统总重为 45 kg 传感器的重量为 13.6 kg 是一个模块化的 系统,可以安装在有人机和无人机上。该系统集 成在载人 UH-I 直升机上进行了飞行试验,对多 种浓密树叶遮蔽和伪装的军事目标景物进行了成 像,所成图像中这些目标均能很容易地被识别。 图 12 为地面试验中 JIGSAW 系统对距 离150m处的各种静态校准目标所成的3D图 像;图 13 为飞行试验中对一个军用卡车所成的 3D 图像^[2,19]。



- 图 12 JIGSAW 系统对距离 150 m 处的各种静态校准 目标所成 3D 图像
- Fig. 12 3D images from JIGSAW system for several kinds of static adjustment targets at distance of 150 m

表 3 JIGSAW 传感器系统关键参数

Tab. 3	Critical	parameters	of	JIGSAW	sensor	system
		1		~		•

	数值	
名义范围	150 m	
望远镜放大率	750	固定值
能视域	10.8°	使用集成扫描器(两个旋转的 Risley 棱镜)
激光波长	532 nm	
激光远场光束模式	32×32 点阵	与探测器瞬时视场阵列对准
激光脉冲宽度	300 ps	半最大值全宽度(FWHM)
激光脉冲和原始成像率	16 000 Hz(最大值)	只在 32 × 32 阵列上成像
输出激光脉冲能量	4 μJ(最大值)	可以减弱
接收孔径直径	7.5 cm	
有效焦距	300 mm	
相对孔径	f/4.0	
焦平面阵列的像元数	32×32	
投影 100μm 像素间距	333 µrad	
瞬间横向距离采样	在 150 m 范围内 5 cm	<7.5 cm 目标
		(<7.5 cm goal)
焦平面视场(32×32)	10.1 mrad × 10.1 mrad	
距离分辨率	40 cm	>7.5 cm 目标
焦平面距离采样速率	有效值2 GHz	(500 GHz plus vernier bits)
瞬时能视域	10.1 mrad × 10.1 mrad	在 150 m 范围内 1.51 m 的正方形
		(32×32 阵列)



- 图 13 飞行试验中 JIGSAW 系统对一个军用卡车所成 的 3D 图像
- Fig. 13 3D image from JIGSAW for a military truck in flight test

由于气溶胶的遥感有很多商业和防卫应用, 如放射物监视或生物战剂的探测,为了调查光子 计数激光探测成像系统对薄的或低密度气溶胶云 进行远距离探测和成像的敏感性和有效性,林肯 实验室开发了一个可移动主动成像激光探测成像 系统(Mobile Active Imaging LIDAR system, MAIL)。该系统的激光器为被动Q开关倍频固 态 Nd: YAG 微芯片激光器 脉冲重复频率为 14~ 16 kHz,平均输出功率低于64 mW;探测器为工作 于盖革模式的 32 × 32 APD 二极管探测器阵列, 用于单光子计数和测距。该系统传感器的关键参 数与 JIGSAW 完全相同,如表 3 所示。传感器紧 凑、强健 最大的优势是对功率孔径积的需求减少 了多于一个数量级。MAIL 系统如图 14 所示。 MAIL 传感器是为了从一个低空机载平台上对硬 目标进行成像而设计和发展的 然而 ,它在论证对 气溶胶释放的高分辨率空间-时间的成像时工作 得非常好 已经论证了探测和跟踪少量气溶胶的 能力^[20]。

在数据处理与显示方面,林肯实验室已经开 发了一种能够实时产生、显示和分析机载激光 3D 探测成像系统数据的图像处理原型系统。采用了 一系列新颖算法将粗糙的数据转换成清晰的 3D 图像。这些算法能够降噪、进行地面识别、探测器 响应反卷积和照明模式再归一化。该系统同样能 够在屏幕上将静态目标从动态目标中区分开来。 为了达到信息的实时处理,研究人员将这些算法 在一个 Linux 集群中并行处理,论证了将图像生 成算法、多处理器通信软件和集群计算硬件结合



图 14 可移动主动成像激光探测成像传感器系统 Fig. 14 Mobile positive imaging lidar sensor system

在一起的方法具有产生可操作的实时 3D 成像能 力。此外,还讨论了未来工作的发展方向,包括自 动识别移动的人、在机载平台上的实时探测以及 机载激光 3D 探测成像系统和视频成像的结合等 等^[21]。

美国空军研究实验室(AFRL)军需品部研究 和发展机载激光 3D 探测成像系统传感器和自导 引导弹接近 25 年之久,最近成功完成了 3D-LZ (Landing Zone) 直升机机载激光 3D 探测成像系 统的飞行测试论证。3D-LZ 传感器的成像和显示 系统可以在直升机接近、着陆和离开盲视环境时 为飞行员提供高保真度的图像。3D-LZ 机载激光 3D 探测成像传感器由 1.5 µm 纤维激光器、多边 形扫描器、InGaAs APD 光学接收器、彩色数字照 相机和距离计数电路等部分组成。该传感器装在 万向支架上 在万向支架上装有光纤陀螺惯性测 量单元。3D-LZ 传感器的能视域为方位角方向 60° 俯仰方向 30°。方位线扫描率为 150 line/s, 产生150 000/s 测量点的净持续信息率; 俯仰扫 描角速率为 150 mrad/s,产生在方位和俯仰方向 上均为1 mrad 的等价扫描间隔。因此,一个完整 的 60° × 30° 的扫描共有 1.5 × 10⁶ pixel。多处理 器控制的距离计数电路子系统包括一个数字激光 脉冲飞行时间距离计数器、多边形扫描器和万向 支架控制系统以及真彩色化功能模块。3D-LZ 系 统结构框图如图 15 所示。3D-LZ 系统最大工作 距离约为 61 m 距离精度为 1 cm。3D-LZ 系统集 成安装到 EH-60 黑鹰直升机上,于 2009 年6 月进 行了第一次飞行测试 加图 16 所示。测试中在几 乎100% 灰尘阻碍环境下成功地在贯穿整个着陆





Fig. 15 Frame of 3D-LZ airborne 3D imaging lidar system

和起飞过程中为飞行员提供了连续的图像。这些 结果非常有前景,而且奠定了机载激光 3D 探测 成像系统在应对直升机盲视环境下为首要技术方 案的地位,下一步将增加系统的"透视"能力,并 增加一些诸如电缆探测和报警等附加特征^[22 23]。





自从 1996 年以来,美国部队工程师军团 (USACE)开展了一系列关于海岸线探测的激光 探测成像系统的研究,并为此成立了联合机载激 光探测成像海洋测量专业技术中心(JALBTCX)。 海防测绘和成像激光探测成像系统(Coastal Happing and Imaging Lidar,CZMIL)是最近几年专门 为 USACE 的国际海岸线绘图项目所设计的新一 代机载绘图系统,该系统可在产生海滩和浅水海

底高分辨率 3D 图像的同时完成海底分类和水柱 描述。CZMIL 系统的数据获取系统由机载激光 3D 探测成像传感器、商用成像光谱仪和商用数字 量测摄影机 3 部分组成。由于 CZMIL 系统的数 据采集频率很高(高达70kHz),需要开发一个紧 凑、高能量、短脉冲长度和高重复频率的激光器, 该绿光激光器增益介质为 Nd: YVO4, 脉冲持续时 间接近2 ns 重复频率为 10 kHz。系统所需激光 波长为 1 064 nm 和 532 nm 532 nm 激光束的输 出脉冲能量为 3.0 mJ。CZMIL 希望能够综合机 载激光 3D 探测成像系统和图像传感器,产生高 度自动化的浅海探测信息产品。CZMIL 将改造 现有的硬件和软件 以解决浊度和浅水现有系统 的局限性 提高数据的环境应用 充分利用先进的 激光、扫描仪和接收器技术、信号处理和数据融合 算法。同时保持准确的深度测量能力。CZMIL系 统的一些关键需求如表 4 所示。CZMIL 的制造在 2010年完成 2011年开展了现场试验^[24 25]。

表4 CZMIL 的关键需求

Tab. 4	Critical	demands	of	CZMIL
--------	----------	---------	----	-------

种类	需求
数据处理需求	能够完成数据处理、编辑、产生产
	品和元数据的自动和集成软件。软
	件在 COTS 硬件上运行。
探海测量	达到最大值(KDMax) : 3.75(白天) ,
	4.0(晚上) (ρ=0.15)
	深度范围:0~30 m
	垂直精度: $[0.3^2 + (0.013d)^2]^{1/2} m 2\sigma$
	水平精度:(0.35+0.05d) m 2σ
	空间密度:2 m
地形测量	垂直精度: ±0.15 m 2σ
	水平精度: ±1.0 m 2σ
	空间密度:0.7 m
光谱测量	光谱分辨率:36 通道 ,375~1 050 nm
	空间分辨率:1 m
分幅摄像机	分辨率:0.2 m
红绿蓝图像	定位精度:2.0 m

美国 Advanced Scientific Concepts, Inc. (ASC)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 成像系统可以穿过尘土、雾、烟或其它模糊状况进 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。如今 基于 ASC 专利技术 的 3D 摄像机利用单个激光脉冲即可捕获全帧 (128 pixels × 128 pixels) 3D 点云数据,高达60 frame/s。ASC 共有3种3D 闪光激光探测成像系 统: DragonEye ,TigerEye 和便携式。DragonEye 空 间相机是一个轻量、小尺寸的系统,TigerEve 是一 个小尺寸的集成 3D 闪光激光探测成像摄像机, 它又有 TE-2809-PC、TE-2845-PC 和 TE-2445-PC 等几个系列。DragonEye 和 TigerEye 的一些基本 参数列于表5中 通过表5可以看出 ASC 公司的 机载激光 3D 探测成像系统的探测器采用 InGaAs APD 阵列 达到了 128 pixel × 128 pixel 激光为 I 类视觉安全激光 视场大、结构紧凑、体积小、重量 轻。

表 5 DragonEye 和 TigerEye 的基本参数 Tab. 5 Basic parameters of DragonEye and TigerEye

参数	DragonEye	TigerEye
激光器	单脉冲能量:	单脉冲能量:
	$2.5 \sim 7 \ \mathrm{mJ}$	$2.5 \sim 7 \ \mathrm{mJ}$
	波长为 1 570 nm ,	波长为 1 570 nm ,
	I类视觉安全激光	I类视觉安全激光
探测器	128×128 InGaAs	128×128 InGaAs
	APD 阵列	APD 阵列
像素	128×128	128×128
		128×64
视场角	$45^{\circ} \times 45^{\circ}$	$3^{\circ} \times 3^{\circ}; 8.6^{\circ} \times 8.6^{\circ};$
		$45^{\circ} \times 22^{\circ}; 45^{\circ} \times 45^{\circ}$
作用距离	1.5 km(更远则依赖	1 100 m($3^{\circ} \times 3^{\circ}$);
	于扩散器/透镜的	450 m($8.6^\circ \times 8.6^\circ)$;
	选择)	150 m($45^{\circ} \times 22^{\circ}$);
		60 m($45^{\circ} \times 45^{\circ}$)
电源	24 V DC 35 W	24 V DC
		TE-2809-PC: 2 kg
尺寸及重量	11.2 cm \times 11.9 cm \times	11 cm $\times 15$ cm \times
	13.2 cm	10.7 cm
	约3 kg	TE-2845-PC: 1.6 kg
		11 cm \times 11.3 cm \times
		10.7 cm
测距精度	距离偏差	
	$< \pm 10$ cm	

4.2 欧洲机载激光 3D 探测成像系统的发展现 状

为了为火星探测做准备 欧洲航天局(ESA) 将激光 3D 探测成像技术作为可预见性的重要技 术之一,它可以为宇宙飞船制导、导航和控制系统 提供重要的信息。欧洲航天局与两个工业团队签 订了合同分别发展和论证着陆应用和交汇与对接 应用的激光 3D 探测成像传感器技术,目前均处 于加工和测试阶段。着陆应用的机载激光 3D 探 测成像传感器的性能要求如表6所示。该激光 3D 探测成像试验台采用 TOF 测量方法,由激光 器、光学系统、扫描系统、探测器和控制电路等组 成。其中激光器重复频率为 12 kHz 激光波长为 532 nm。探测器为带有典型 TOF 读出集成电路 的1×256 硅单光子 APD 阵列。扫描系统的扫描 镜具有两轴运动 由一个常平架结构的镜架支撑。 数据处理的一个重要特征即使用超分辨率网格方 法,可以实时处理设备生成的海量数据。试验台

表 6 着陆应用的机载激光 3D 探测 成像传感器的性能要求

 Tab. 6
 Performance requirements of detection

 lidar in airborne laser 3D imaging system

	<u> </u>
--	----------

参数	性能要求
最大距离	5 000 m
最小距离	10 m
视场	$> 20^{\circ} \times 20^{\circ}$
角/空间分辨率	在300 m时<0.25 m
测距精度	<5 m(5 km);
	<0.1 m(300 m);
	<0.02 m(10 m)
帧频	>1 Hz
着陆垂直速度	50 m/s(5 000 m) ;
	<5 m/s(5 m)
着陆水平速度	50 m/s(5 000 m) ;
	<5 m/s(5 m)
着陆车相对于地面的	. 20 / . 0 050 /
空间方位角/角速度	< 2° / <0.05°/s
安全地点着陆尺寸	$>5 m \times 5 m$
当地安全斜度/粗糙度	$<\!10^\circ$ $/<\!0.5$ m

由铝制成,系统目前质量为8 kg,未来版本质量将为6 kg。系统的功能框图如图17 所示,在框图



图 17 着陆应用的机载激光 3D 探测成像系统功能框图 Fig. 17 Function frame of 3D imaging lidar system for landing

中 较为有特点的是光学系统的结构设计。其中, 激光接收系统采用的是一组变焦镜头,它对无穷 远到1m距离内成像像质都很好。变焦镜头结构 紧凑,其与探测器距离很近,非常方便集成在一 起。接收系统的口径限制在 50 mm,这对于探测 距离为5 000 m 的情况已经完全够用,在变焦镜 头前放有一个带宽为1 nm 的干涉滤波器,主要是 为了屏蔽掉背景返回的光子。用于交汇与对接应 用的激光 3D 探测成像试验台的性能估计如表 7 所示。该试验台也是基于 TOF 测量方法,采用了 包括纤维激光器的单通道激光测距仪,探测器采 用 InGaAs APD,共轴发射/接收光学系统,扫描系 统也采用具有方位和俯仰扫描方向的常平架安装 的扫描镜。在未来的空间应用中传感器质量可能 低于 7 kg,功率损耗低于45 W^[26]。

瑞士 Leica Geosystems 公司 Leica ALS 系列激 光 3D 探测成像传感器是市场上发展最快的激光 3D 探测成像传感器。ALS 系列产品有 ALS40, ALS 50, ALS 60和 ALS 道路测绘仪等。Leica

表7 交汇与对接应用的激光 3D 探测 成像传感器的性能估计 Tab.7 Performance estimation of imaging

lidar system for rendezvous applications

参数	性能预测
视场	$20^{\circ} \times 20^{\circ}$
踪模式时的帧频	1 Hz
获取持续时间	<1 min
最小工作距离	≤ 1 m
最大工作距离	≥5 000 m
距离测量精度 3σ	5 000 m > $R \ge 2000$ m:
	$\Delta R \leqslant 0.000$ $15R+0.25~{\rm m}$
	2 000 m > $R \ge 150$ m:
	$\Delta R \leq 0.0002 \ 43R + 0.064 \ \mathrm{m}$
	150 m > $R \ge 10$ m:
	$\Delta R \leq 0.000$ 425 R + 0.035 8 m
	$10 \mathrm{m} > R \ge 1 \mathrm{m}$:
	$\Delta R \leqslant 0.002~22R+0.017$ 8 m
角度测量精度 3σ	0.2°
激光脉冲峰值功率	200 W
激光脉冲频率	30 kHz
角度测量精度 3σ 激光脉冲峰值功率 激光脉冲频率	$\Delta R \le 0.000 \ 15R + 0.25 \text{ m}$ $2 \ 000 \ \text{m} > R \ge 150 \text{ m}:$ $\Delta R \le 0.0002 \ 43R + 0.064 \text{ m}$ $150 \ \text{m} > R \ge 10 \text{ m}:$ $\Delta R \le 0.0002 \ 425R + 0.035 \text{ 8 m}$ $10 \ \text{m} > R \ge 1 \text{m}:$ $\Delta R \le 0.002 \ 22R + 0.017 \text{ 8 m}$ 0.2° $200 \ \text{W}$ $30 \ \text{kHz}$

ALS50-II系统是 ALS50 系统的第二代产品,其进 行了如下改进: 脉冲重复频率为 150 kHz ,系统精 度可达到 11 cm(包括 GPS 误差);飞行高度限值 为地平面以上 200~6 000 m,扫描速率高达 90 Hz; 集成了 IPAS GPS/惯性测量工具; 体积减 小 54% 质量减少 33 kg,可靠性提高。最新产品 ALS60 是一个可以从各种机载平台上获取地形和 回波信号强度数据的激光 3D 探测成像系统,典 型配置如下:二极管泵浦激光器;28 V 直流电源 供应;大孔径、小惯量、高速扫描镜 标准扫描镜是 为距地面 5 000 m 高空使用而设计的,视场角为 75°;4个距离计数电路板;回波信号强度/自动增 益控制(AGS)设定捕捉卡;集成扩展图像阵列分 辦率(1 280 pixel ×1 024 pixel) 数字照相机,能自 动进行数据注释。ALS60 后处理之后产生的数据 横向位置精度为 7~64 cm, 垂直位置精度为 8~ 24 cm。系统总重量(最大值)为 103.7 kg。2010 年10月,Leica Geosystems 公布了点密度倍增技 术飞行试验成功的消息,该新奇的扫描系统使用 单个激光器和扫描机构获得以前系统2倍多的数 据采集能力。这项新技术将集成到 ALS 系列机 载激光 3D 探测成像系统中。

奥地利 Riegl 公司对激光扫描成像设备的设 计、发展和生产有着 30 年的经验,其机载激光 3D 探测成像系统使用了最新发展的最先进的激光器 和信号处理技术,非常紧凑、重量轻且性价比高, 均满足在航空测量中最具挑战性的需求。该公司 机载激光 3D 探测成像系统有 LMS-Q240i, LMS-Q560 ,LMS-Q680i ,LMS-VQ480 和 LMS-VQ580 等 型号,这里主要介绍其最新的两款产品LMS-Q680i和LMS-VQ580。LMS-Q680i是一款机载长 距离激光 3D 探测成像系统,可以对无限数目的 目标回波进行全波形分析 ,允许在高度变化的状 况下操作 因此适宜于复杂地形的航空测量。该 设备可以安装在单发动机或双发动机飞机、直升 机和无人机上。LMS-VQ580 是 V-系列机载激光 3D 探测成像系统 利用一个窄的近红外激光束和 快速线扫描机构提供高速、非接触数据获取。 LMS-VQ580 是一个紧凑、轻量化的设备,可以以 任意的方向甚至在空间受限的条件下安装在直升 机或无人机上,且只需一个电源。LMS-Q680i和 LMS-VQ580的技术特征列于表8中,由表8可以

看出,Riegl 公司生产的机载激光 3D 探测成像系统的最大特点即激光器脉冲重复频率非常高,因此地面测点数目多,可以得到信息量更大、分辨率更高的 3D 图像。

表 8 LMS-Q680i 和 LMS-VQ580 的技术特征

Tab. 8 Technique parameters for LMS-Q680 and LMS-VQ580

特征	LMS-Q680i	LMS-VQ580
激光器	视觉安全激光 脉	视觉安全激光 脉
	冲重复频率为	冲重复频率达
	400 kHz	300 kHz
	(80 ~400 kHz)	(50~300 kHz)
扫描镜	多边形旋转扫描镜,	多面多边形旋转
	扫描速度达到	扫描镜 最大有
	200 line/s ($10 \sim$	效测量频率为
	200 line/s);地	150 000 point/s
	面测量点为	
	$266\ 000\ \mathrm{point/s}$	
视场	60°	60°(可选)
角分辨率	0.001°	0.001°
测距精度	20 mm	25 mm
最小作用距离	30 m	10 m
体积	$480\times\!212\times\!230~\mathrm{mm}$	$\varPhi 222 \times 360.5~\mathrm{mm}$
质量	17.5 kg	12 kg

德国 TopoSys 公司激光探测成像系统主要有 以下几个型号: Falcon Ⅰ, Falcon Ⅱ, Falcon Ⅲ, Harrier 56 和 Harrier 24。Falcon Ⅱ是 TopoSys 发 展的机载系统 传感器中还含有被动红绿蓝/近红 外(RGB/NIR) 线扫描成像传感器。Falcon Ⅲ是 最新的高端机载激光 3D 探测成像系统 ,为需要 高密度和高可靠性高度模型的应用而设计,可应 用于 3D 城市模型和城市规划、森林存量、水利仿 真、洪水防护和道路测绘。HARRIER 56 和 HAR-RIER 24 是分别集成了 Riegl 公司生产的 LMS-Q560、LMS-Q240 激光探测成像传感器和一个数 字照相机的设备。表9给出了 Falcon II 和 Falcon Ⅲ系统的一些技术参数。TopoSys 在 Falcon Ⅲ系 统中使用一个玻璃光纤扫描器 在光纤扫描器中, 激光通过一个线性排列的玻璃光纤束指向地面, 其回波由具有相同设计的另外一个线性排列的玻 璃光纤束接收。图 18 为光纤扫描器的工作原理 冬。

表9 Falcon II 和 Falcon III的技术参数对比

Fig.	9	Contrast	of	technique	paremeters	for

J	fal	con	Ш	and	Fa	con	Ш

参数	Falcon II	Falcon III
激光器	波长:1 560 nm;	
	脉冲重复频率:	
	83 kHz	
	视觉安全距离 0.5m	视觉安全距离:
		>0.27 m
扫描系统	扫描宽度:14.3°	光束发散角:0.7 mrad
	扫描频率:653 Hz	扫描频率:
		$165 \sim 415 \ \mathrm{Hz}$
视场		固定 28°
工作距离	1 600 m	$30\sim 2~500~{\rm m}$
测量频率	83 kHz(有效)	$50 \sim 125 \text{ kHz}$
距离分辨率	0.019 5 m	0.010 m
垂直及		垂直:
水平精度		<0.1 m(绝对)
		水平: <0.2 m(绝对)
体积	$39~\mathrm{cm}\times47.5~\mathrm{cm}$	$40~\mathrm{cm}\times40~\mathrm{cm}$
	$\times 45 \text{ cm}$	$\times 45 \mathrm{~cm}$
质量	41 kg	40 kg



图 18 光纤扫描器工作原理

Fig. 18 Operating principle of a fiber scanner

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 探测路径及得到的 3D 效果图如图 19 所 示。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^[27]。

以上为国外近 10 年机载激光 3D 探测成像 系统技术的发展现状,有一些机载激光 3D 探测



图 19 机载立体摄影的探测路径及得到的林区 3D 效 果图

Fig. 19 Detecting path for airborne stereo and 3D effect figure

成像系统设备已经进入实用阶段,发挥着重要的 作用。可以看出,国外的机载激光3D探测成像 系统朝着紧凑型、轻量化、小型化、低功耗、高分辨 率、高可靠性、高实时性、大焦平面阵列像元尺寸、 高灵敏度探测器件、远距离探测、高脉冲能量的小 型激光器、人眼安全和多功能化等方向发展。

5 设计考虑与建议

通过近几年机载激光 3D 探测成像系统的发 展可以看到,国外正在大力发展该项技术,测距精 度都在厘米级,如用于直升机盲视的 3D-LZ 机载 激光 3D 探测成像系统的测距精度已达到 1.0 cm。在设计机载激光 3D 探测成像系统时, 需要考虑的因素很多,本文从系统设计角度对其 进行了分析。

从用户的需求考虑,一方面是要求系统测距 精度要高;另一方面是图像覆盖的范围广和图像 的分辨率要高;其次,用户也希望系统能够结构紧 凑、质量轻。下面针对某用户提出的指标进行分 析,主要性能指标如表10所示。

表 10	某机载激光 3D	探测成像系统主要性能指标

Tab. 10 Key indicators of an airborne 3D imaging lidar system

指标名称	要求
	半导体泵浦 YAG 激光器,
	波长1 064 nm
定位精度	3 m
测高精度	1 m
扫描宽度	240 m
工作高度	500 m
扫描方式	对称机下点左右摆扫
测高密度	$2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$
工作航速	100 m/s
数据处理与显示时间	与测量时间比例为1:1

从测距体制来分,激光 3D 探测成像系统可 以分为直接探测方式和相干探测方式两类,相干 探测对激光器的相干性要求比较高,如前文介绍, 目前用直接探测方式的比较多。对于直接探测的 测距体制,主要包括脉冲激光测距和连续波激光 测距两种。脉冲激光测距通过测量激光脉冲飞行 时间计算目标到接收机的距离;连续波激光测距 通过测量发射的调制激光束和接收的调制回波信 号之间的相位差来获得目标点距离。连续波激光 测距可获得较高的测距精度,但存在测距时间长 和作用距离近等缺点^[6] 因此,机载激光 3D 探测 成像系统多采用脉冲激光测距体制。

对于脉冲激光测距体制的机载激光 3D 探测 成像系统,其测距精度与总体的时间测量误差、视 轴稳定精度和光学系统等因素有关。总体时间测 量误差与探测器连接的计时电路有关,主要包括 两个方面,即时刻鉴别误差和时间间隔误差,目 前,时刻鉴别误差可以达到 ns 以下的精度,时间 间隔测量误差可以达到 ps 级^[6]。对于单元探测 器,一般都配有后续计时电路,也可以自行设计, 通过选择适当的方法设计计时电路可以达到分米 级到厘米级的精度。对于面阵和线阵 APD 探测 器阵列,均依赖国外进口,部分配有计时电路,但 大像素的 APD 阵列国外对中国禁运。视轴稳定 控制也影响测距精度,视轴稳定精度高则实际测 点偏离理想测点的程度就小。综上,对于表 10 中 的测高精度 1 m 是可以满足的。

为了得到大范围、高分辨率的 3D 图像 机载 激光 3D 探测成像系统需要利用激光扫描器。目 前激光扫描器主要有4种:光栅扫描、声光扫描、 电光扫描和光机扫描^[6]。国外的机载激光 3D 探 测成像系统的扫描方式多采用光机扫描方式,一 般利用光学扫描元件的摆动或转动来实现激光束 的发射或接收。表 10 显示,测高密度为 2 m × 2 m(即在2 m × 2 m 的范围内要有一个测点) 根 据扫描宽度 240 m 和航速 100 m/s, 可以计算得测 高频率为6 kHz,即激光器脉冲重复频率最小为 6 kHz(一般根据要求的数据重合率,再对激光器 的脉冲重复频率进行计算和选择)。这是激光器 选择的一个重要指标 ,此外还要考虑到单脉冲能 量等指标 这与后续的光学系统设计有关。对于 摆镜结构 若地面测点的分布要求均匀 一般采用 两轴的扫描镜结构,以补偿飞机飞行速度的影响。 在本系统中 如果采用单个像素的探测器 计算可 知摆镜的摆动频率太高,受到惯量的限制达不到 该测高密度要求 因此需要考虑线阵或面阵的探 测器。如果采用转镜作为扫描元件,由于连续旋 转不存在摆动频率限制等问题,可以考虑其可行 性 对转镜结构需在体积和重量上给予限制。机 载激光 3D 探测成像系统的扫描范围与扫描元件 摆动范围、飞行高度等因素有关 需要结合系统的 机械结构和光学设计综合考虑。为了得到分辨率 高的 3D 图像,增加地面测点的密度是一个很好 的办法。根据探测器的不同其所能探测的地面测 点密度的水平有着较大差别。

机载激光 3D 探测成像系统探测器的选择要 与激光器波长匹配,以保证对回波信号的敏感性。 探测器一般为 APD, APD 有单元 APD、线阵 APD 和面阵 APD。采用单元 APD 每次只能探测一个 像素,结合光学系统设计,该种系统也可以得到较 高的物方分辨力。由于扫描镜的摆扫速度不能太 快,进一步提高地面测点的密度已十分困难,除非 采用降低飞行速度等方法。而采用线阵 APD 或 面阵 APD 探测器阵列,单次可以探测更多的测 点,可以增加地面测点的密度,得到高分辨率的 3D 图像。但采用线阵或面阵 APD,一方面单次探 测的测点增多,需要将激光束进行分光或采用其 他办法将激光照射到地面目标上,同时回波信号 还要与探测器的相应像元相对应,这对光学设计 提出了要求;另一方面,由于线阵或面阵 APD 像 元数目多,而每个像元要集成计时电路,这方面的 关键技术目前国内还未掌握。在信噪比方面,线 阵和面阵 APD 的要求也要比单元 APD 高了很 多。目前国外面阵 APD 已经做到了128 × 128 阵 列 将发射的激光束分成128 × 128 细束从而使这 些激光束的回波信号与探测器的每个像元对应。 探测器的选择还要配合光学设计,好的光学系统 可以使机载激光3D 探测成像系统得到更高质量 的图像。同时,在利用面阵 APD 探测器阵列时, 每一帧图像之间要考虑重叠率的问题,保证每帧 之间有一定的重叠,从而保证探测时不会出现测 点的丢失。

在数据处理与显示方面,需要对 INS/GPS 系 统的数据、陀螺、编码器和计时电路所得到的数据 进行处理,得到测点的角-角-距信息,从而拟合成 图像在屏幕上显示出来。数据处理与显示时间做 到与测量时间比例为1:1 对硬件和软件要求都很 高。考虑到该系统的数据量较大,可以先将数据 进行实时存储,再通过数据处理将角-角-距3D 图 像在机上或地面准实时显示出来。

在设计机载激光 3D 探测成像系统时,还需

要考虑到整体的尺寸和质量,尽量做到轻量、紧 凑。同时,还要考虑到热控方面的问题,以保证整 机的性能。热控的两个主要方面即激光器和探测 器阵列,应尽量在结构设计时就将热控相关问题 考虑其中。

6 结束语

机载激光 3D 探测成像系统被公认为目前最 有潜力的复杂背景下的目标探测方式。本文较为 详细地介绍了机载激光 3D 探测成像系统的原理 与应用情况,通过分析近几年国外该系统的发展 动态,可知国外的机载激光 3D 探测成像系统的发展 动态,可知国外的机载激光 3D 探测成像系统正 朝着远距离、高分辨率、轻量化、低功耗、高实时性 和人眼安全等方面发展。结合一个用户需求的机 载激光 3D 探测成像系统的指标对该系统进行了 系统设计考虑,讨论了该系统在测距机制选择、扫 描机构、探测器选择和数据处理与显示方面的一 些问题。目前国内的相关研究仍处于实验室阶 段,与国外存在着一定的差距,还需要攻破一些关 键技术。可以肯定,在不久的将来,机载激光 3D 探测成像系统在军事和民用两大领域都会发挥重 大的作用和优势。

参考文献:

- [1] 王春晖,王骐,尚铁梁. 长波红外激光成像雷达技术的研究进展[J]. 激光与红外 2001 31(3):133-135.
 WANG CH H, WANG Q SHANG T L. State of the art of long wave infrared laser imaging radar [J]. Laser Infrared 2001, 31(3):133-135. (in Chinese)
- [2] VAIDYANATHAN M ,BLASK S ,HIGGINS T ,et al. Jigsaw phase Ⅲ: a miniaturized airborne 3-D imaging laser radar with photo-counting sensitivity for foliage penetration [J]. SPIE 2007 6550: 65500N-1-65500N-12.
- [3] 戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社 2002. DAI Y J. *The Principle of Lidar* [M]. Beijing: National Defence Industry Press 2002. (in Chinese)
- [4] 章大勇 ,吴文启 ,吴美平. 机载激光雷达系统标定方法 [J]. 光学 精密工程 2009 ,17(11): 2806-2813.
 ZHANG D Y ,WU W Qi ,WU M P. Calibration technology of airborne lidar [J]. *Opt. Precision Eng.* ,2009 ,17(11): 2806-2813. (in Chinese)
- [5] 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. SUN ZH H ,DENG J H ,YAN X W. Progress and current state of the development of laser imaging detection system and its key techniques [J]. Sci. Technol. Rev. 2008 26(3):74-79. (in Chinese)
- [6] 胡春生. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学 2005.
 HU CH SH. Investigation into the high-speed pulsed laser diode 3D-imaging ladar [D]. *Changsha: National University of Defense Technology* 2005. (in Chinese)

- [7] SHEN C N , WAEBER B , GIRATA L et al. . Project radiant outlaw [J]. SPIE , 1994 2272: 63-74.
- [8] 郑永超 赵铭军 张文平 等. 激光雷达技术及其发展动向[J]. 红外与激光工程 2006 35(增刊): 240-246. ZHENG Y C, ZHAO M J, ZHANG W P, et al.. Trend of laser radar technology development [J]. Infrared and Laser Eng. 2006 35(s): 240-246. (in Chinese)
- [9] 赵远 蔡喜平 刘剑波 等. 二极管泵浦固体激光雷达技术及其应用 [J]. 红外与激光工程 2001 30(1):47-50. ZHAO Y CAI X P LIU J B *et al.*. Diode-pumped solid state laser radar technology and its applications [J]. *Infrared and Laser Eng.* 2001 30(1):47-50. (in Chinese)
- [10] 屈平 杨培根 孟敏 等.应用广泛的激光雷达[J].探测与定位 2004(2):15-20.
 QU P ,YANG P G MENG M *et al.*. Broad applications of lidar [J]. *Detection and Localization*, 2004(2):15-20. (in Chinese)
- [11] 王德,李学千.半导体激光器的最新进展及其应用现状[J].光学 精密工程 2001 9(3):279-283.
 WANG D LI X Q. New progress in semiconductor lasers and their applications [J]. Opt. Precision Eng. 2001 9(3): 279-283. (in Chinese)
- [12] 王狂飙. 激光制导武器的现状、关键技术与发展 [J]. 红外与激光工程 2007 36(5):651-655.
 WANG K B. Status quo key technology and development of laser guided weapon [J]. Infrared and Laser Eng. 2007 36 (5):651-655. (in Chinese)
- [13] 徐啟阳 杨坤涛,王新兵,等. 蓝绿激光雷达海洋探测[M]. 北京: 国防工业出版社 2002. XU Q Y, YANG K T, WANG X B *et al.*. Blue-Green Lidar Ocean Survey[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [14] GSCHWENDTNERA B ,KEICHER W E. Development of coherent laser radar at Lincoln Laboratory [J]. Lincoln Lab. J. 2000 12(2): 383-396.
- [15] HEINRICHS R M AULL B F MARINO R M et al. Three-dimensional laser radar with APD arrays [J]. SPIE 2001, 4337: 106-117.
- [16] ALBOTA M A ,AULL B F ,FOUCHE D G et al. Three-dimensional imaging laser radars with geiger-mode avalanche photodiode arrays [J]. Lincoln Lab. J. 2002, 13(2): 351-370.
- [17] ALBOTA M A ,HEINRICHS R M ,KOCHER D G *et al.* Three-dimensional imaging laser radar with a photon counting avalanche photodiode array and microchip laser [J]. Appl. Opt. 2002 A1(35):7671-7678.
- [18] MARINO R M STEPHENS T ,HATCH R E et al. A compact 3D imaging laser radar system using Ceiger-mode APD arrays: system and measurements [J]. SPIE 2003 5086: 1-15.
- [19] MARINO R M ,DAVIS W R ,RICH G C ,et al. . High-resolution 3D imaging laser radar flight test experiments [J]. SPIE 2005 5791:138-151.
- [20] MARINO R M ,RICHARDSON J ,GANIER R et al. Photon-counting lidar for aerosol detection and 3-D imaging [J]. SPIE 2009 7323:73230H-I-73230H-I0.
- [21] CHO P ,ANDERSON H ,HATCH R et al. . Real-time 3D ladar imaging [J]. SPIE 2006 6235: 62350G-1-62350G-1-2.
- [22] SAVAGE J ,HARRINGTON W ,MCKINLEY R M *et al.*. 3D-LZ helicopter lidar imaging system [J]. SPIE 2010 ,7684: 768407-1-768407-9.
- [23] SZOBOSZLAY Z P ,MCKINLEY Dr R A ,BRADDOM LTC S R *et al.*. Landing an H-60 helicopter in brownout conditions using 3D-LZ displays [C]. American Helicopter Society 66th Annual Forum ,Phoenix ,AZ ,May 11-13 2010.
- [24] TUELL G ,BARBOR K ,WOZENCRAFT J. Overview of the coastal zone mapping and imaging lidar (CZMIL): a new multi-sensor airborne mapping system for the U.S. ArmyCorps of Engineers [J]. SPIE 2010 ,7695: 76950R-I -76950R-8.
- [25] PIERCE J W ,FUCHS E ,NELSON S et al. Development of a novel laser system for the CZMIL lidar [J]. SPIE 2010, 7695: 76950V-1-76950V-6.
- [26] CAMO J P do ,MOEVIUS B ,PFENNIGBAUER M ,et al. . Imaging LIDARs for space applications [J]. SPIE ,2008 , 7061:70610J-4-70610J-42.

[27] ISAKSSON F ,BORG J ,Hanlund L. 3D rapid mapping [J]. SPIE 2008 6946: 6946D-1-6946D-9.

作者简介:张 健(1986—),男,山东济南人,研究实习员,主要从事航空光学遥感设备结构设计方面的研究。 E-mail: zjian000@163.com

《发光学报》

EI 收录中文核心期刊

《发光学报》是中国科学院长春光学精密机械与物理研究所与中国物理学会发光分会共同主办的 中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业研究方向的综 合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊 要目总览》评为"物理学类核心期刊",并于2000年同时被评为"无线电电子学、电信技术类核心期 刊"。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版》、《中国期刊网》和"万 方数据资源系统"等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯 《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰"Elsevier Bibliographic Databases"和"EI"确 定为源期刊。2001年在国家科技部组织的"中国期刊方阵"的评定中,《发光学报》被评为"双效期刊"。 2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金"择重"资助。2004年被选入《中国知识资源总库 •中国科技精品库》。

本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》为双月刊,A4开本,I44页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年240元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国物理学会发光分会

地 址: 长春市东南湖大路 3888 号 《发光学报》编辑部

邮 编:130033

电话: (0431) 86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126. com

国内统一刊号: CN 22-1116/04 国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国际标准门与·1551 1000-7052

国内邮发代号: 12-312

国外发行代号: 4863BM

http://www.fgxb.org

232