

机载激光 3D 探测成像系统的关键技术

孟庆季 张续严 周 凌 王 超

(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:介绍了机载激光 3D 探测成像系统的应用领域和国内外发展现状,概括了小型无人机载激光 3D 成像检测系统(JIGSAW)、机载激光测深系统(LADS)、直升机 3D-LZ Imaging LADAR 及机载对地高分辨详查系统的基本组成、技术指标以及各自的特点。阐述了激光 3D 成像系统的工作原理与扫描方式的分类,并重点对其单元核心技术即激光测距系统、激光光轴控制与指向测量系统、数据图像处理技术与显示系统进行了研究。最后,简单综述了机载激光 3D 探测成像系统的发展前景。

关键词:机载激光 3D 探测成像系统;激光测距系统;激光光轴控制;指向测量系统;数字图像处理
中图分类号:V243.5; TN958.98 文献标识码:A

Key technologies of airborne laser 3D detection imaging system

MENG Qing-ji, ZHANG Xu-yan, ZHOU Ling, WANG Chao

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

Abstract: This paper introduces the applications and development of laser 3D detection imaging systems at home and abroad and reviews the basic compositions and technical configurations of the JIGSAW system, LADS system, helicopter 3D-LZ Imaging LADAR and the airborne high-resolution detailed investigation system. Especially, it gives different characteristics of these systems. Furthermore, it describes their working principles, different scanning modes and emphasizes the core technologies of these systems, including laser ranging, laser optical axis control, pointing measurement and data processing & image display. Finally, this paper outlines the developing prospects of the airborne laser 3D imaging detection systems.

Key words: airborne laser 3D detection imaging system; laser ranging system; laser optical axis control; point measurement system; digital image processing

1 引言

机载激光 3D 探测成像系统集成光、机、电技术于一体,从组成上可分为激光测距系统、陀螺稳定平台、GPS/INS(全球定位/惯性导航)组合导航系统、数据处理与 3D 显示系统等。对比传统探测载荷系统,机载激光 3D 探测成像系统具有以下优点:(1)主动照明,具备全天候能力;(2)电磁干扰能力强,对背景有极强抑制能力,不易受环境温度及阳光的影响;(3)抗隐身能力强,能穿透一定的遮蔽物、伪装和掩体;(4)具有高的距离、角度和速度分辨率,能同时获得目标的多种图像(如距离像、距离-角度像等),图像信息量丰富,易于目标识别等。

机载激光 3D 探测成像系统能够快速精确地获得地面的 3D 测量信息,与有人/无人机平台相结合在地形测绘、森林调查、夜间军事侦察、夜间搜寻与救援、军事伪装识别和 underwater 目标探测诸多领域有着广泛的应用。

2 国内外发展现状

2.1 国外现状

国外发达国家开展激光成像探测技术的研究较早,目前已经取得了相对丰硕的成果。

机载激光 3D 探测成像系统伴随着激光的问世一同发展。美国麻省理工学院(MIT)的林肯实验室是世界上激光探测成像领域比较前沿的研究中心,其主要从事激光 3D 成像系统的关键技术及系统技术研究。2004 年已经成功研制出 32×32 焦平面成像阵列(FPA)激光 3D 成像系统,该系统采用固体光纤泵浦激光器(530 和 780 nm),激光测距频率为 8 ~ 10 kHz,采取了扫描工作方式来扩大视场角^[1]。

美国先进科技公司(Advanced Scientific Concepts Inc.)也公布了激光 3D 成像雷达的原型样机(图 1),该样机采用 128×128 InGaAs PIN 阵列来实现激光飞行时间的测量^[2]。

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



图 1 激光 3D 成像雷达的原型样机

Fig. 1 Original prototype of laser 3D imaging system

耗、小型化的实时激光 3D 成像系统,其具有 30 Hz 的成像帧频, $124 \text{ pixel} \times 160 \text{ pixel}$,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^[3]。

另外,美国雷神公司和洛克希德马丁公司也都致力于下一代无人车激光 3D 成像雷达的研究,其采用的面阵雪崩光电二极管(APD)探测器等单元技术均极大地推进了激光 3D 成像雷达的发展^[4]。

机载激光 3D 成像系统不但包括激光 3D 成像技术,还包括 INS/GPS 组合导航、陀螺稳定平台、数据的处理与 3D 显示等技术,其涉及学科更广、技术难度更大。下面介绍几个国外最新的机载激光 3D 成像系统:

(1) 小型无人机载激光 3D 探测成像传感(JIGSAW)系统

2007 年资料报道的 JIGSAW 系统为美国高级防御研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)和美国陆军夜视和电子传感器管理局(The U. S. Army Redcomcerdec Night Vision and Electronic Sensors Directorate, NVESD)研制的一种集成、轻型的,可以用来对植物遮蔽下的隐秘目标进行成像的激光 3D 成像系统,旨在得到更高分辨率的成像及对遮蔽物体的识别能力,计划装备于 DP-5X 型无人机^[5,6]。系统基本结构如图 2 所示。

JIGSAW 系统可分为平台上系统与平台下系统。30 cm(12 in)的稳定平台(内含光子计数直接探测型激光 3D 成像系统、传感器控制电路及

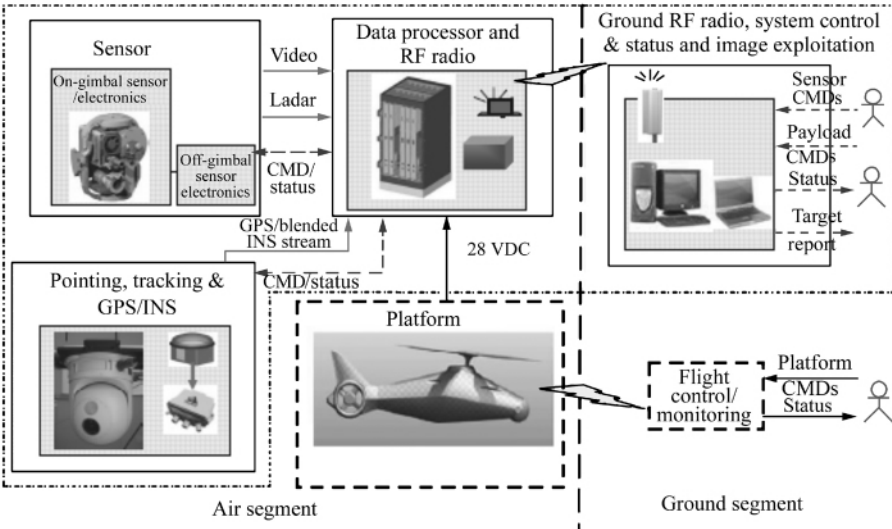


图 2 JIGSAW 系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of JIGSAW system

热控等)采用4轴机构,结合INS/GPS组合导航系统实现激光3D成像系统视轴的高精度稳定、指向控制与感知。平台下系统包括系统控制器、电源、高速数据处理器和高数数据传输系统(3D图像向地面控制站的实时传输等)。

(2) 机载激光测深系统(LADS)

2008年的JANE防务周刊报道了机载激光测深系统(LADS)。LADS安装在固定翼飞行器上用于探测深海,初期为澳大利亚政府的防务科学与技术部门设计,早于1998年已服役。系统参数如表1所示,其基本组成可分为^[7]:

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameter

Parameters	Configurations
Laser wavelength	532 nm(Green) 1 064 nm(IR)
Flying altitude	500 m
Sounding density	5 m × 5 m
Depth sounding rate	900 Hz
Positional accuracy	3 m
Swath width	240 m
Depth range	0 ~ 70 m
Survey speed	90 m/s
Scan rate	18 times/s

1) 稳定激光平台(Stabilized laser platform): 900 Hz的全固态红外激光器安装在稳定平台上,

以便隔离机体的俯仰、横滚、航向的姿态运动。

2) 机载捷联惯导系统: 为系统提供重要的位置、姿态基准信息。

3) 机载激光控制与数据获取软件与设备: 实时记录激光测距信息、精确的位置信息与姿态信息(INS/GPS)、稳定平台的角度信息等,为地面设备的后处理完成测量数据的收集。

4) 数据处理软件和设备。

(3) 直升机3D-LZ Imaging LADAR

2010年的最新资料报道,直升机3D-LZ Imaging LADAR在2008被确定为解决直升机漂移控制与危险感知的核心技术^[8]。该项目由美国空军研究实验室的相关部门负责研究,已经成功完

表 2 系统参数

Tab. 2 System parameter

Parameters	Configurations
Laser wavelength	1.5 μm
Maximum range	608 m
Range accuracy	1 cm
Azimuthal scan angle	60°
Angle accuray	0.001 rad
Elevation scan angle	± 30°
Elevation scan rate	150 mrad/s
Azimuthal line scan	150 line/s
Pixels scan rate	1.5-million pixels

成飞行实验。由于系统工作距离短,直升机飞行姿态相对稳定,所以直升机 3D-LZ Imaging LADAR 没有安装在稳定平台上,而是直接由 INS 惯导系统、激光 3D 成像系统、扫描系统组成,并结合了图像处理系统与显示系统。系统相应参数如表 2 所示,系统结构如图 3 所示。

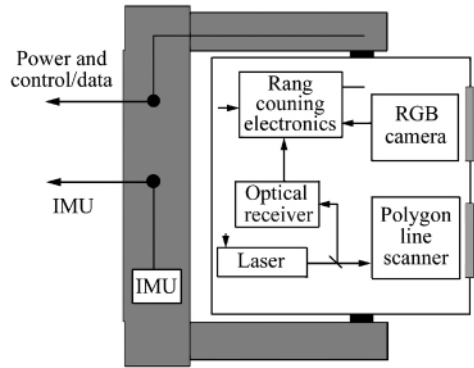


图 3 3D-LZ LADAR 系统结构图
Fig. 3 3D-LZ LADAR system block diagram

(4) 机载对地高分辨详查系统

记载高分辨详查是高分辨缩放技术的基本前提。美国国家生态观测网(National Ecological Observatory Network, NEON) 为了掌握和预测大地气候的变化、土地用途变化、植被生态情况等^[9], 研制了适应于低空飞机的遥感详查系统。系统载荷包括高分辨的机载成像光谱仪、机载激光成像系统和高分辨相机。辅助系统包括差分 GPS 和 INS。其激光成像系统的主要指标如表 3 所示。

表 3 系统参数
Tab. 3 System parameter

Parameters	Configurations
Laser pulse repetition frequency	> 70 kHz
Flying altitudes	1 000 ~ 2 500 m
Effective spatial resolution	< 1 m
Scan angle	35°
Angle accuracy	0. 001 rad
Gimbal scan rate	> 50 Hz

上面介绍的 4 个机载激光 3D 成像系统,由于工作任务的不同技术方案也不尽相同。JIG-SAW 项目的主攻目标是:(1) 研制一种小型、集成、低功耗的 3 代无人机机载激光 3D 成像系统。

(2) 探讨系统在遮蔽环境下进行目标的识别与探测的可行性。(3) 推进数据的实时传输与处理技术在项目中的应用。

LADS 系统采用特定波长的激光器实现对海洋深度的勘察,更具有大视场范围,并且测量数据为后处理,不要求图像信息的实时传输与处理。

直升机 3D-LZ Imaging LADAR 系统成像距离近,在系统稳定平台结构选择上大大简化,直接由 INS 惯导系统、激光 3D 成像系统、扫描系统组成,并必须要求时时图像处理与显示系统。

机载对地高分辨详查系统要求得到更加丰富的遥感信息,其激光成像系统要求更高的分辨率,载机工作高度较 LADS 高,对导航系统、扫描控制系统的要求也更高。

2.2 国内现状

国内激光 3D 探测成像系统(LADAR)研究起步较晚,目前处于前期阶段。主要有:电子部 27 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 μm 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 frame/s,帧分辨率为 32 pixel × 32 pixel,作用距离为 2 km,回波强度等级为 16 级。

整体而言,国内机载激光 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,相关报道十分有限。

3 工作原理

以 MIT 林肯实验室研制的基于盖革模式雪崩光电二极管(APD)阵列的激光 3D 成像系统为例,原理如图 4 所示^[10, 11]。高重频脉冲激光发散光束,照明整个欲成像的场景;反射回的光照射到 2D APD 阵列上,APD 阵列测得返回的光到达时间,而不是回波强度;每个像元给出距离值,从而对每一激光脉冲,激光 3D 成像系统获得角-角-距 3D 像。

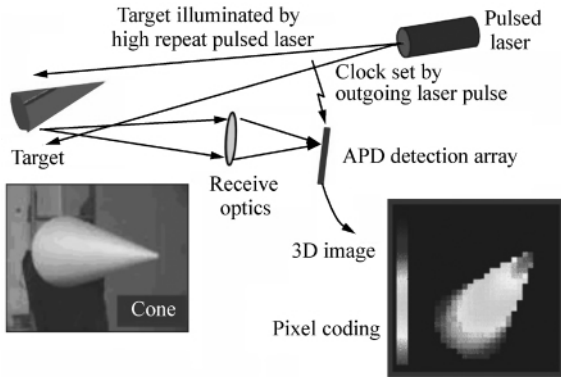


图4 盖革模式 APD 阵列的激光 3D 成像雷达原理图

Fig. 4 Schematic diagram of Geiger-mode APD array laser 3D imaging radar

区别于传统光学系统的探测光强,无论是基于焦平面成像(如 APD 阵列)还是单像元扫描,激光 3D 成像系统均是探测每个像元上激光发射到返回的传播时间,结合激光光束的空间指向角信息,形成角-角-距测量数据,进而处理得到 3D 图像。

机载激光 3D 成像系统在激光光轴的空间指向控制与获取上与其它激光成像系统区别较大,也是机载成像系统的核心技术难点之一^[12]。机载激光 3D 成像系统的工作原理如图 5 所示。

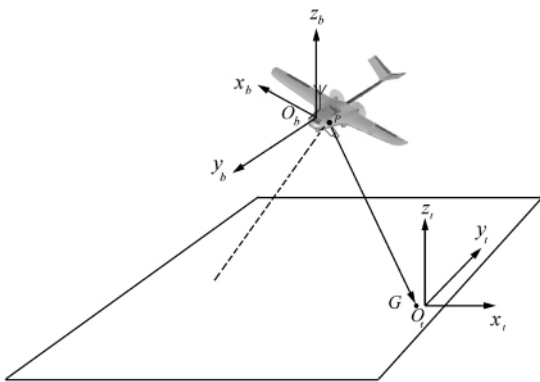


图5 机载激光 3D 成像系统原理图

Fig. 5 Schematic diagram of airborne laser 3D imaging system

图 5 中简要介绍了两个坐标系分别为地理坐标系(t 系)、机体坐标系(b 系):

t 系($O-x_t, y_t, z_t$): 以地面某点 O 为原点, Ox_t ,

Oy_t, Oz_t 轴分别指向东、北、天空 3 个方向;

b 系(O_b-x_b, y_b, z_b), 其中 $O_b y_b$ 为横滚轴, $O_b x_b$ 为俯仰轴向, $O_b z_b$ 为航向轴。 b 系是个虚拟坐标系,为研究方便,可以认为捷联惯导测量坐标系、稳定平台测量坐标系与机体坐标系重合,统一为 b 系 $O_b-x_b y_b z_b$ 。

扫描过程中,光轴的实时指向 PG_b 在 $O_b-x_b y_b z_b$ 中可以得到(由陀螺稳定平台的角度测量信息、摆扫镜的角度测量信息通过坐标变化得到)。 P 点在地理系中的位置 $[X_p, Y_p, X_p]$ 可由全球 GPS 或差分 GPS(DGPS) 精确获得。

机载 INS 可以测量得到飞机实时的姿态,即 b 系到 t 系的转移矩阵 C_b^t ,由此可以得到 $PG_t = C_b^t PG_b$,即地理系下光轴的指向信息。 P 点到 G 点的距离可以由激光测距得到,所以由此可以解算得到 G 点的地理系坐标。

机载激光 3D 成像系统在此基础上通过机载方式对目标进行持续的采样,其实现方式主要分为扫描式激光 3D 成像技术与推扫式激光成像技术两种。

4 单元关键技术

机载激光 3D 成像系统由于测距载体载机自身的运动(质点运动、姿态运动),激光测距方向的扫描控制与感知,载机位置姿态的感知(INS/GPS)都是机载激光 3D 成像系统的关键技术。全系统关键技术一般可以分为总体关键技术和单元关键技术。由于机载激光 3D 成像系统分为稳定平台、激光发射/接收测距系统、INS/DGPS 组合导航系统等,所以系统必然设计分系统间误差分配、多系统安装误差标定补偿等系统集成的总体关键技术。

此外,研制过程中系统的单元技术更为核心,从工作目标上分为激光测距系统、激光光轴控制与指向测量系统、数据图像处理与显示系统。

4.1 激光测距系统

激光测距系统是激光 3D 成像系统的核心。可以概括为激光光源、探测器(G-APD 阵列探测器)、激光发射/接收光学系统。

4.1.1 激光光源

激光发射系统设计的主要指标有:发射激光的峰值功率、脉冲宽度、重复频率和发散角等。由激光3D成像系统距离方程可知,APD探测器上接收到的激光回波的峰值功率和发射激光的峰值功率成正比,即发射激光的峰值功率越高,APD探测器上接收到的激光回波的峰值功率也越高,从而作用距离也越远。所以为了提高作用距离,应尽可能采用峰值功率高的激光器。

激光脉冲宽度减小有利于提高时刻鉴别精度,有利于减少半导体激光器发热从而能提高重复频率。但激光脉冲宽度越小意味着相应的电信号带宽越宽,从而要求APD探测器、跨阻放大电路和压控放大电路的带宽越宽,半导体激光器的驱动电源输出电流脉冲越窄,所以选择激光脉冲时要综合考虑。作为激光测距系统的关键部件,激光器的选择十分关键。

(1) 半导体激光器

半导体激光器的应用已经覆盖了整个光电子学领域。美国是半导体激光器泵浦技术开发应用较早、进展最快的国家,日本、英国和德国的西门子公司早在1988~1989年就提供了高功率半导体激光器系列产品用作泵浦光源,目前国外用半导体激光器叠层阵列泵浦Nd:YAG激光器,输出功率可达到1000 W,未来工业和国防应用的半导体激光泵浦技术将产生巨大变革^[13]。

利用半导体激光器泵浦Nd:YAG(0.946 μm),Nd:YAG(1.06 μm),Nd:YVO₄(1.3 μm),Nd:YAG(1.3 μm),Nd:BEL(LaBe₂O₃)(1.07 μm),Ho:YAG(2.1 μm),Er:YLF(2.3 μm),Nd:玻璃(1.06 μm)和Er:玻璃(1.3 μm ,1.5 μm)近年来都有许多报道,有些已经商品化^[14]。

二极管激光测距仪开发较早,小于1 km测量距离的商用测距仪已达到实用水平,用于测距报警系统、航海浮标测距、集装箱检查等。GaAs激光测距仪以每秒数千次的脉冲重复频率工作,在距离几公里内精度可达几厘米。上世纪80年代,美国科顿公司的M931型半导体激光测距夜视仪将单目夜视装置和GaAs半导体激光器集为一体,测程超过1 km,重量为1.3 kg。美国国际激

光系统公司的GR500型激光测距机,采用GaAs激光器,重复频率为2 kHz,脉宽为40 ns,发散角为5~50 mrad,测程为3230 m,重量为10 kg。美国轻型反坦克武器激光测距机采用GaAs激光器,输出功率为40 W,脉宽为70 ns,发射角为10 mrad,重复频率为5.7 kHz,测距>500 m。随着半导体激光泵浦固体激光器的发展,美国麦道公司已将它引入军用市场,90年代初开始在F/A-18战斗机上进行试验,并投入生产。用气冷的激光二极管泵浦Nd:YAG,输出波长为1.064 μm 或532 nm,脉冲能量达200 mJ,工作温度为-35 $^{\circ}\text{C}$ ~+60 $^{\circ}\text{C}$,该装置的重量为4.5~5.7 kg^[15,16]。

(2) 微片激光器

美国的林肯实验室已经开发出与3D雷达成像系统高度兼容的尖端激光器,其中用途最多的一种叫做微片激光器,如图6所示。其主要采用ND-YAD泵浦和Cr⁴⁺泵浦,被动调Q方式,关键水平在于谐振腔的长度约为1 mm,仅支持小于增益带宽的纵向模式激光器。小型激光器的另一个分支技术是它的输出脉冲宽度<1 ns,作为激光3D成像系统最佳的脉冲宽度^[10]。

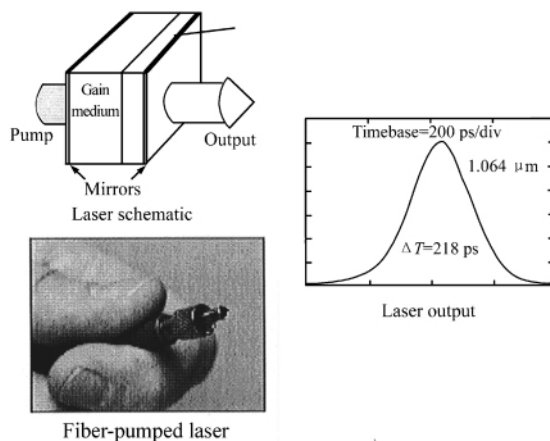


图6 微片激光器

Fig. 6 Mini size laser

微型激光器发展的目标是增加单一脉冲的输出能量。目前激光器可以达到脉冲重复频率为1 kHz,输出能量为250 J。而脉冲宽度低于ns量级(380 ps)的激光器正在研制中^[10]。

如图7所示,根据微片激光器重复频率和单

一脉冲输出能量的经验关系,最高的光子计数效率对应激光器有一个非常高的重复频率。这样一来,单一脉冲能量会非常小,并且主控振荡器的放大率也应该适当对应。在这种情况下,整个系统的主要振荡将来自于微片激光器^[11]。

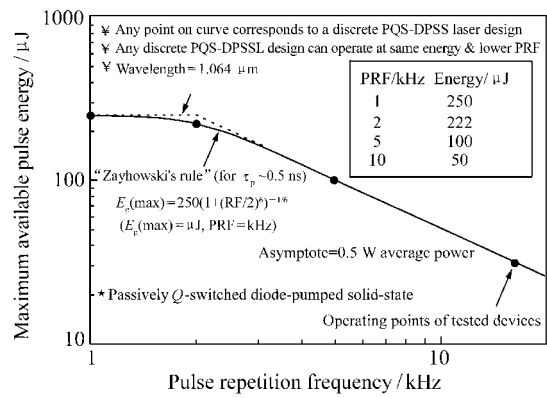


图7 微片激光器的输出性能

Fig. 7 Output performance of mini size laser

4.1.2 直接探测距离的阵列接收技术—G-APD 阵列探测器

工作在盖革模式下 G-APD 的反向偏置电压高于雪崩电压。如果接收到一个光子,会发生雪崩现象,使电流达到最大值,这个过程通常是瞬态的(不到 1 ps)。G-APD 阵列探测器兼具单光子探测灵敏度和皮秒级时间分辨率两大特点,适用于对极微弱光目标的 3D 成像探测。同时, G-APD 阵列探测器又是一种全固态的光电探测器件,不仅体积小、重量轻、可靠性高,而且还可利用现有的微光电子工艺实现规模化生产。

近来,林肯实验室开发了一种 32 × 32 阵列的 Si 基 G-APD 探测阵列(如图 8 所示)。鉴于此阵列探测器设计为用于微弱光目标角-角距 3D 成像,因此各像元电路的功能只为测量光子的到达时间^[17]。G-APD 的每个像元均采用平面结构。像元光敏面尺寸为 30 ~ 50 μm,像元间距为 100 μm。每个像元均有相应的电路单元,电路单元是一种数字计时器,具有类似于秒表的功能;每个像元的计数器均按规定的程序对公共的时钟脉冲计数,只要发现有单光子入射某像元,该像元探测器输出的雪崩电流脉冲就将终止相应计数器单元的计数并保存结果,用于读出。

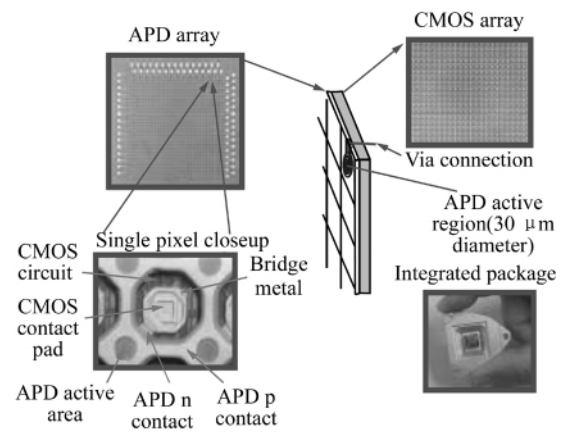


图8 32 × 32 APD 阵列探测器

Fig. 8 32 × 32 APD array detector

4.1.3 激光发射/接收光学系统

光学系统由两部分组成:发射光学单元和接收光学单元。其中,发射单元主要实现激光扩束、分光和光线的准直输出;接收单元主要实现光线接收、准直和聚焦成像。激光发射系统对激光器的输出光束进行准直,准直方法主要有:单透镜法、组合透镜法、渐变折射率透镜法等。采用组合透镜法可以保证一定精度的准直效果,同时避免过于复杂的结构。图 9 给出了 MIT 林肯实验室采用的光学系统原理图^[10]。

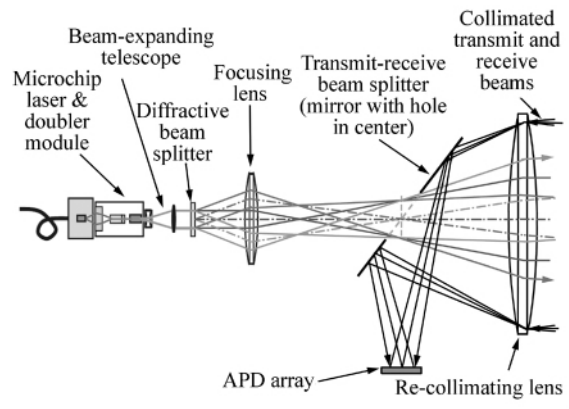


图9 组合透镜法的激光发射/接受系统光路图

Fig. 9 Optical pathway of laser emission/receiving system

图 9 中激光器波长为 532 nm, 32 × 32 APD 探测器,发射系统焦距 $f = 300$ mm,口径 $D = 11$ mm。该系统基于 APD 阵列的闪光雷达是一种非扫描

激光 3D 成像系统,并设计了一套正交光栅衍射分光光学系统。利用伽利略望远镜对 532 nm 脉冲激光进行准直扩束;针对 APD 阵列的特点,使用 2D 正交光栅和聚焦透镜对扩束光进行衍射分光,光斑经发射-接收分光镜和发射透镜后照明 APD 像元的瞬时视场;利用发射-接收分光镜使发射光路与接收光路分开。

4.2 激光光轴控制与指向测量系统

激光光轴控制与指向测量系统主要由包括 INS/GPS 组合导航系统,陀螺稳定平台和激光扫描控制系统等组成^[18]。

4.2.1 INS/GPS 组合导航系统

载机的精确位置和姿态是机载激光 3D 成像系统测量数据的重要组成部分,载机位置姿态的精确测量设备即为 INS/GPS 组合导航系统。

因 INS/GPS 组合导航系统的 INS 和 GPS 均为全球方位、全天候段的导航设备,能提供十分完整的导航数据,可优势互补。INS 主要具备实时

性好、分辨率高、自主性强的优点,但也同时具有误差随时间发散、技术复杂、价格昂贵的缺点。GPS(或者格洛纳斯、北斗)与 INS 相比具有价格低廉、误差不发散、位置精度高的特点,但同时 GPS 的实时性、分辨率及自主性较差^[19]。

组合导航系统可以综合两种导航系统的优点,结合先进的数据融合滤波技术可以大大提升单系统的能力。区别于传统组合导航系统,成像补偿用组合导航系统精度要求更高,我国在这方面技术差距很大。

表 4 给出了国内外应用于合成孔径雷达(SAR)成像运动补偿的组合导航系统参数。如加拿大 APPLANIX 公司的 SAR 运用挠性陀螺惯性测量单元(IMU)/GPS 组合导航系统 POS/AV510,POS/AV510 应用于美国 Sandia 国家实验室研制的 Lynx SAR,使 Lynx SAR 实现了 0.1 m 分辨率^[20],具体参数见表 4,其中 C/A 与 DGPS 是卫星导航中不同的定位解算方式。

表 4 POS/AV510 系统参数
Tab. 4 POS/AV510 system parameters

POS/AV510	C/A	DGPS	Post-processing
Position accuracy/m	4.0 ~ 6.0	0.5 ~ 2.0	0.05 ~ 0.3
Velocity accuracy/(m · s ⁻¹)	0.05	0.05	0.005
Post-processing/(°)	0.008	0.008	0.005
Roll and pitch accuracy/(°)	0.070	0.05	0.008

我国目前唯一用于成像运动补偿类的组合导航系统是北航与航空 618 所联合研制的基于 SINS/DGPS 的机载 SAR 运动补偿系统 SARMC,系统精度较国外差距较大,具体参数如表 5 所示。

表 5 SARMC 系统参数
Tab. 5 SARMC system parameters

SARMC	C/A	DGPS
Position accuracy/m	5 ~ 15	1 ~ 3
Velocity accuracy/(m · s ⁻¹)	0.3	0.1
Post-processing/(°)	0.03	0.02
Roll and pitch accuracy/(°)	0.2 ~ 0.3	0.1

可见 INS/GPS 组合导航系统是实 现高分辨率成像系统的关键技术。

4.2.2 陀螺稳定平台

陀螺稳定平台用以隔离载机的俯仰、横滚、航向姿态运动,为有效载荷(激光 3D 成像系统的测距系统)提供良好的工作环境,针对不同任务需求的激光 3D 成像系统,对陀螺稳定平台的要求也不同。

2.1 节提到的直升机激光 3D 着陆成像系统采用了单轴(俯仰轴)稳定,并且该俯仰轴集合了俯仰扫描功能,另有摆扫镜进行水平摆扫。采用该结构可以有效降低系统的成本,光轴控制精度满足直升机的工作要求。

澳大利亚政府支持的 LADS 系统,激光 3D 成像系统的测距系统安装在 3 轴稳定平台中(要求隔离俯仰、横滚、航向运动),摆镜为横向摆扫,随着载机的前进推扫成像^[21]。

美国的 JIGSAW 系统则采用高精度的 4 轴稳定平台,可在 GPS/INS 组合导航系统的辅助下提供高精度的视轴稳定控制和高精度的激光指向信息测量^[22-23]。

而用于航天器的激光 3D 成像系统,由于航天器的运动姿态稳定,一般激光 3D 成像系统的测距系统直接捷联安装在载体上,需要根据要求设计摆镜的光轴摆扫方式,可以不用稳定平台。

机载稳定平台的结构形式有别于传统航空吊舱稳定平台的要求,相近于航空相机稳定平台结构,旨在隔离载机的俯仰、横滚运动。航空吊舱中常见的光电陀螺稳定平台形式有:2 轴 2 框架稳定平台、2 轴 4 框架稳定平台、3 轴 3 框架稳定平台。文献[24]给出了国内外机载光电平台的主要性能指标对比列表。

比较适合机载激光 3D 成像系统的机构形式为 3 框架 3 轴稳定平台系统(也可去掉方位轴)。该平台是一个有 3 个自由度的系统:方位、俯仰、横滚,可以隔离飞机方位、俯仰、横滚方向的运动,即消除了机载环境对成像的干扰,提供了较好的成像环境。

为了进一步消除各种大气现象和空气动力现象颤振、扰流、抖振、结冰等引起的振动所产生的视轴瞄准线的晃动,提高图像质量和指向精度,可采用一种内框架减振系统。该系统采用模块式组合方式,具有灵活性和通用性,方便安装调试^[25]。另外为了解决 2 轴、3 轴光电平台中陀螺仪的解耦问题,提高光电平台的稳定性,文献[26]给出了 2 轴平台正割解耦的算法,并给出了 3 轴平台正弦解耦的算法以及基于 ARM 单片机的解耦软硬件处理技术。

以文献[27]给出的光电侦察吊舱的平台结构为例(图 10),光电侦察设备固定在方位框内,方位轴、俯仰轴与横滚轴既起方位框、俯仰框与横滚框及基座之间的连接作用,又同时实现了 3 个方向的运动,其中横滚轴与俯仰轴消除机载环境的运动干扰,目标的稳定跟踪由方位轴与俯仰轴来完成。光电探测器的角位置跟踪误差由位置外环来补偿,速度内环用来消除环境干扰和角速度指令跟踪。

4.3 数据图像处理与显示系统

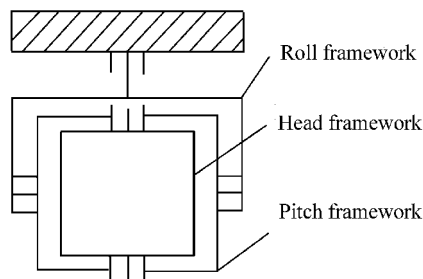


图 10 3 轴 3 框架示意图

Fig. 10 Schematic diagram of three framework three axes

4.3.1 数据处理技术

机载激光 3D 成像系统测量的数据处理技术涵盖多个方面,包括动态 GPS 数据后处理、INS 和 GPS 组合姿态确定、不同传感器观测值的时间系统同步处理、激光脚点 3D 坐标计算、坐标系统的变换、系统误差的改正、粗差的剔除、数据的滤波分类,还包括 DEM/DTM 的生成以及后续的地物提取、建筑物 3D 重建、3D 模型建立等高级处理技术。其中激光脚点坐标的计算需要 3 组数据:系统检校和安置参数、激光测距值及位置和姿态数据。为计算出数字高程模型及地物提取,先将激光脚点数据进行坐标转换,然后进行滤波分类,即地面点与非地面点分开。通过数据滤波后,能内插生成数字高程模型(DEM),以及后续的地物提取、建筑物 3D 重建、3D 模型等高层次处理。

在国外,机载激光 3D 成像系统测量技术已经相当成熟,硬件技术与系统问题研究基本解决,但相应的数据处理的算法还处于前期研究阶段,其中如何消除系统误差对 3D 激光脚点坐标的影响、激光 3D 成像系统数据的滤波分类以及地物识别和提取是关键研究内容^[28]。

目前中国科学院遥感应用研究所采用一种组合 CCD 图像和稀疏激光测距数据的建筑物 3D 信息提取的方法。该方法采用高分辨率的航空 CCD 图像和机载激光扫描测距数据准确而自动地提取了大部分建筑物的 3D 信息,并充分考虑了 CCD 图像的高分辨率特性和激光扫描测距数据的 3D 特性,做到互相补充。通过 CCD 图像提取建筑物的轮廓信息,并根据激光测距数据提取

建筑物的高度信息,二者结合起来重建了建筑物的3D信息^[29]。

4.3.2 测量误差处理

机载激光3D成像系统的测量误差主要包括:激光扫描测距误差、GPS动态定位误差、INS姿态测量误差、动态时延误差、二类高程误差、扫描角误差、激光束发散角所产生的系统误差和系统集成综合误差。为了提高机载激光3D成像系统的测量精度,最大可能地降低各种系统误差的影响,通常采用建立误差改正模型、仪器检校和条带平差改正的方法^[30,31]。

4.3.3 数据滤波和分类

从激光脚点数据点云中提取数字地面高程模型(DTM/DEM),需要将其中的地物数据脚点去掉,即进行激光3D成像系统的滤波。在进行地物提取和物体的3D重建过程中,植被数据点和人工地物点的区分,以及城市建筑物数据点云的提取,即为激光3D成像系统的数据分类。研究如何从激光数据点云中分离出地形表面激光脚点数据子集,以及区分不同地物激光脚点数据子集,就是数据的滤波和分类,有时滤波和分类是同时进行的。

目前,用于机载激光3D成像系统测量数据滤波的方法多是基于3D激光脚点数据的高程突变信息进行的,大致可以分为形态学滤波法、移动窗口法、高程纹理分析法、迭代线性最小二乘内插法、基于地形坡度滤波等几种方法。但是几乎每种方法都有自身的缺陷,有待改进,有些方法需要分步反复迭代进行。通常所有的方法都强调高程低的脚点属于地面脚点,高程较高的脚点不在地面上,这样会带来一定的系统误差。所以滤波算法一般采用半自动或人工操作方式,能否设计出一种简单、实用、稳健的滤波算法,是机载激光3D成像系统数据处理中必须解决的关键问题之一。图11给出的是城区内机载激光3D成像系统数据滤波前后的对比图,结果表明,滤波算法能够优先过滤出大型建筑物^[32]。

如果要进行地物提取,就必须在滤波的基础上对地物脚点进行分类,以实现机载激光3D成像系统自动提取地面目标。目前绝大多数算法都是先将原始数据直接内插成规则格网的距离图

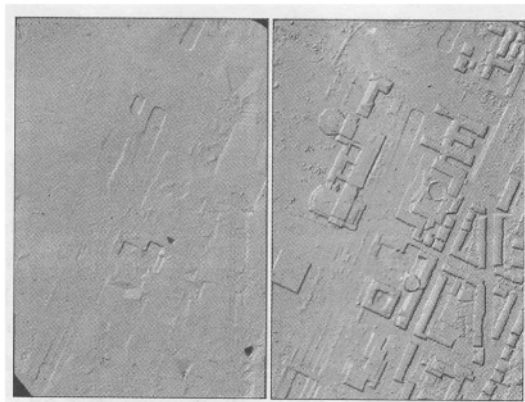


图11 数据滤波前后对比图

Fig. 11 Data comparison before and after filtering

像,在此基础上进行基于高程纹理特征的分类。即利用2D GIS数据进行分类;基于小波变换和尺度空间理论进行分类以及利用局部直方图分析技术并融合激光强度信息进行分类。图12是机载激光3D成像系统数据经过滤波分类后的效果图,图中所示的车辆和植被被过滤了,保留了地形的特征线^[32]。



图12 数据滤波分类效果图

Fig. 12 Classification effect of data filtering

4.3.4 激光回波信号强度与激光脚点高程的融合

机载激光3D成像系统的测量系统不仅能提供数据点的高程信息,且越来越多的系统能够提供激光回波信号的强度信息。激光脉冲打到相同的物质表面时,其回波信号的强度较为接近,而每种物质对激光信号的反射特性是不一样的。利用介质材料的反射率能够确定激光回波的能量值,从而对不同介质材料进行标定。根据这一特点,能够方便地区分不同的地物,如道路、沙石、草地和

灌木丛等。

图 13 右侧为扫描区域真实的相片 左侧为激光 3D 成像系统数据融合激光强度信息和高程信息进行分类后的效果图。将系统的激光回波信号

的强度信息与激光脚点高程信息融合,进而实现数据的分类,能够提高系统对地形的测量精度,目前此问题在国际上还处于研究阶段^[33]。



图 13 融合强度信息滤波分类结果

Fig. 13 Classification results of aggregation strength information

4.3.5 建立 3D 模型

机载激光 3D 成像系统技术的发展已有 20 多年的历史,但利用机载激光 3D 成像系统数据进行 3D 重建的研究并不多。目前主要有以下几种方法:1995 年 Weidner 等人从高空分辨率的数字表面模型中自动提取规则棱柱形房屋模型;1999 年 Haala 等人联合多光谱影像和激光 3D 成像系统数据进行建筑物和树的模型提取;1999 年 Mass 等人基于分析激光脚点点云的矩不变提出了从机载激光 3D 成像系统数据中自动提取建筑物模型的方法。

激光脚点数据经过滤波和分类后,形成一系列彼此分开的点群信息标定其地物属性,这样就确定了屋顶激光脚点集,并采用扫描带法分离出每个建筑物的激光脚点集。通过分析这些激光脚点间的几何拓扑关系,利用 3D Hough 变换就能重建出屋顶的表面形态。将分类得到的房屋激光脚点垂直投影到 xy 平面,这些投影点的几何构形

就反映了建筑的边界、外形、大小、方位等几何参数^[34]。

5 结束语

本文对机载激光 3D 探测成像系统的国内外发展现状进行了总结,并介绍了激光 3D 成像系统的工作原理,重点对系统的单元关键技术进行了详细的剖析。机载激光 3D 成像技术能够提供极高的角分辨率和距离分辨率,还可以合成目标的高分辨率 3D 图像,而且 3D 图像的生产周期短,因而在军事(例如导弹的精确制导等)和民用领域(例如公路铁路勘探等)具有极高的应用价值。除了文中探讨的单元关键技术,还需考虑系统的重量、体积以及成本等多方面因素。机载激光 3D 成像作为一种新兴技术,具有传统技术无法比拟的优点,必将在未来的国防和国民经济中占有越来越重要的地位。

参考文献:

- [1] JUBERTS M, BARBERA A. Status report on next generation LADAR for driving unmanned ground vehicles [J]. *SPIE*, 2004, 5609: 1-12.
- [2] MAARTEN U H, VENABLE D, SMEARCHECK M. Use of 3D laser radar for navigation of unmanned aerial and ground vehicles in urban and indoor environments [J]. *SPIE* 2007, 6550: 65500C.
- [3] STONE W C, JUBERTS M, DAGALAKIS N *et al.*. Performance analysis of next-generation LADAR for manufacturing,

- construction, and mobility [G]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology (NIST) 2004.
- [4] JUBERTS M, BARBERA A. Status report on next generation LADAR for driving unmanned ground vehicles [J]. *SPIE*, 2004, 5609: 1-12.
- [5] PEREIRA J, MOEBIUS B, PFENNIGBAUER M *et al.*. Imaging LIDARs for space applications [J]. *SPIE* 2008, 7061: 706100J.
- [6] VAIDYANATHAN M, BLASK S, HIGGINS T *et al.*. Jigsaw phase III: a miniaturized airborne 3-D imaging laser radar with photon-counting sensitivity for foliage penetration [J]. *SPIE* 2007, 6550: 65500N.
- [7] ANTHES J P. Non-scanned LADAR imaging and applications [J]. *SPIE*, 1993, 1936: 11-22.
- [8] SAVAGE J, HARRINGTON W, MCKINLEY A R *et al.*. 3D-lz helicopter ladar imaging system [J]. *SPIE* 2010, 7684: 768407.
- [9] BRIAN R J, THOMAS U K, MICHELE K. Development of airborne remote sensing instrumentations for NEON [J]. *SPIE* 2010, 7809: 780901.
- [10] RICHARD M M, TIMOTHY S, ROBERT E H *et al.*. A compact 3D imaging laser radar system using Geiger-mode APD arrays: system and measurements [J]. *SPIE* 2003, 5086: 1-12.
- [11] RICHARD M M, BRIAN F A, RICHARD M M *et al.*. Three-dimensional laser radar with APD Array [J]. *SPIE* 2001, 4377: 217-228.
- [12] LI S K, XUE Y Q, LIU ZH. A new airborne remote sensing platform for generating geocoding image without ground control point [J]. *IEEE*, 1997: 1987-1989.
- [13] 李学千, 张兴德. 高功率半导体激光器的进展及其在军事上的应用 [J]. 光学 精密机械, 1993(2): 1-5.
LI X Q, ZHANG X D. Development and application in military of high power semiconductor laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1993(2): 1-5. (in Chinese)
- [14] 王德, 李学千. 半导体激光器的最新进展及应用现状 [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)
- [15] 付有余. 激光测距与跟踪系统低噪声电子设计方法 [J]. 光学 精密工程, 2000, 8(3): 250-253.
FU Y Y. Low noise electronic design method for laser range finding and tracking system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 250-253 (in Chinese).
- [16] 何兴仁. 大功率半导体激光器及其在军事上的应用 [J]. 半导体情报, 1995, 32(3): 26-33.
HE X R. High power semiconductor laser and its application in military [J]. *Semiconductor Information*, 1995, 32(3): 26-33. (in Chinese)
- [17] MUGUIRA M R. Range determination for scannerless uImaging: US 6088086 [P]. 2000-11-11.
- [18] SLOBODAN N V. Suppression of torsional oscillations in a high-performance speed servo drive [J]. *IEEE*, 1998, 45(1): 1-8.
- [19] 房建成. 先进导航技术讲座 [Z]. 北京航空航天大学, 2006: 23-32.
FANG J CH. Advanced navigation technology lecture [Z]. Beijing: Beijing Aeronautics and Astronautics University, 2006: 23-32. (in Chinese)
- [20] MARCELO C, ALGRAIN D, EHLERS E. Suppression of gyroscope noise effect in pointing and tracking system [J]. *SPIE*, 1994, 2221: 1-8.
- [21] BO L. Nonlinear induced disturbance rejection in inertial stabilization systems [J]. *SPIE*, 1996, 2739: 1-8.
- [22] 石红生, 卢广山. 一种新型状态观测器在陀螺稳定平台中的应用 [J]. 电光与控制, 1999(1): 24-28.
SHI H SH, LU G SH. Application of a new type state observer in gyro stabilized platform [J]. *Electronics Opt. Control*, 1999(1): 24-28. (in Chinese)
- [23] 王合龙, 朱培申, 姜世发. 陀螺稳定平台框架伺服系统变结构控制器的设计和仿真 [J]. 电光与控制, 1998(2): 24-29.
WANG H L, ZHU P SH, JIANG SH F. Design and simulation of framework servo system variable structure controller of

- gyro stabilized platform[J]. *Electronics Opt. Control* ,1998(2) : 24-29.
- [24] 贾平 张葆. 航空光电侦察平台关键技术及其发展[J]. 光学 精密工程 2003 ,11(1) : 82-88.
JIA P ZHANG B. Critical technologies and their development for airborne opto-electronic reconnaissance platforms [J].
Opt. Precision Eng. 2003 ,11(1) : 82-88. (in Chinese)
- [25] 甘至宏. 光电吊舱内框架减振系统设计[J]. 光学 精密工程 2010 ,18(9) : 2036-2043.
GAN ZH H. Design of inner frame vibration absorbing system for optoelectronic pod [J]. *Opt. Precision Eng.* 2010 ,18
(9) : 2036-2043. (in Chinese)
- [26] 陈占军 葛文奇 李英 等. 光电平台中陀螺解耦问题的研究[J]. 光学 精密工程 2008 ,16(9) : 1712-1715.
CHEN ZH J ,GE W Q LI Y *et al.* . Research of gyro decoupling problem on photo-electric platform[J]. *Opt. Precision
Eng.* 2008 ,16(9) : 1712-1715. (in Chinese)
- [27] 邹志峰 闫峰. 机载光电侦察稳定平台系统分析[J]. 机械工程师 2007 ,16(4) : 39-40.
ZOU ZH F ,YAN F. Analysis for the system of air borne optoelectronic reconnaissance platforms [J]. *Mechanical Eng.* ,
2007 ,16(4) : 39-40. (in Chinese)
- [28] 李清泉 李必军 陈静. 激光雷达测量技术及其应用研究[J]. 武汉测绘科技大学学报 2000 25(5) : 387-392.
LI Q Q ,LI B J ,CHEN J. Research on laser range scanning and its application[J]. *J. Wuhan Technical University Sur-
veying and Mapping* 2000 25(5) : 387-392. (in Chinese)
- [29] 尤红建 张世强. 组合 CCD 图像和稀疏激光测距数据的建筑物三维信息提取[J]. 光学 精密工程 2006 ,14(2) :
297-302.
YOU H J ZHANG SH Q. Reconstructing 3D buildings based on airborne CCD image and laser scanning rangefinder data
[J]. *Opt. Precision Eng.* 2006 ,14(2) : 297-302. (in Chinese)
- [30] 章大勇 吴文起 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 Q ,WU M P. Calibration technology of airborne lidar [J]. *Opt. Precision Eng.* 2009 ,17(11) :
2806-2813.
- [31] 刘经南 张小红 李征航. 影响机载激光扫描测高精度的系统误差分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版 2002 27
(2) : 111-117.
LIU J N ZHANG X H LI ZH H. Analysis of systematic error influencing the accuracy of airborne laser scanning altimetry
[J]. *Geomatics and Information Sci. Wuhan University* 2002 27(2) : 111-117.
- [32] 刘经南 张小红. 利用激光强度信息分类激光扫描测高数据[J]. 武汉大学学报·信息科学版 2005 30(3) : 189-
192.
LIU J N ZHANG X H. Classification of laser scanning altimetry data using laser intensity [J]. *Geomatics and Information
Sci. Wuhan University* 2005 30(3) : 189-192.
- [33] 张小红 刘经南 李征航. 3-D 机载激光扫描测高数据滤波和分类研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版 2002 27
(增刊) : 181-183.
ZHANG X H ,LIU J N ,LI ZH H. Research on the filter and classification of 3-D airborne laser scanning altimetry Data
[J]. *Geomatics and Information Sci. Wuhan University* 2002 27(s) : 181-183.
- [34] 张玉方 程新文 欧阳平 等. 机载 Lidar 数据处理及其应用综述[J]. 工程地球物理学报 2008(1) : 119-124.
ZHANG Y F ,CHENG X W ,OUYANG P *et al.* . The data processing technology and application of airborne LIDAR [J].
Chinese J. Eng. Geophysics 2008(1) : 119-124.

作者简介:孟庆季(1984—)男,吉林伊通人,硕士,研究实习员,主要从事激光雷达相关技术方面的研究。

E-mail: mengqingji@163.com

张续严(1985—)男,吉林长春人,硕士,研究实习员,主要从事激光雷达相关技术方面的研究。

E-mail: zhangxuyan@163.com

周凌(1984—)男,安徽黄山人,博士,助理研究员,主要从事激光雷达相关技术方面的研究。

E-mail: hszl007@163.com