

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106247

固态激光雷达传感器技术及无人机载测深应用*

徐梦溪¹ 陆云扬² 谈晓珊² 施建强¹

(1.南京工程学院 南京 211167; 2.水利部南京水利水文自动化研究所 南京 210012)

摘要: 无人机搭载固态激光雷达传感器施测水深和水下地形技术是近年来新发展的一种测量手段。本文综述和介绍固态激光雷达传感器技术,以及在近海、岛礁和内陆江河湖库的水深测量及水下-陆地一体化地形测绘的应用现状和发展前景。首先介绍水体中光波传播特性、水面光波反射特性,介绍无人机载双频激光雷达测深原理;然后,综述目前典型的机载海洋测深 ALB 系统和无人机挂载固态激光雷达测深系统及其应用情况;最后,总结分析无人机挂载激光雷达测深系统在施测应用中的技术难点问题,并结合固态激光雷达测深技术和应用现状对其发展前景进行了展望。

关键词: 机载激光雷达;固态激光雷达传感器;无人机;水深测量;水下地形测绘

中图分类号: TP732 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Solid-state LiDAR sensor technology and bathymetry application of UAV

Xu Mengxi¹ Lu Yunyang² Tan Xiaoshan² Shi Jianqiang¹

(1. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China)

Abstract: The technology of measuring water depth and underwater terrain with solid-state laser radar sensor is a new measurement method developed in recent years. The solid-state LiDAR sensor technology, as well as their application status and development prospect of water depth measurement, underwater and land integrated topographical surveying in offshore, reefs and inland rivers/lakes/reservoirs are reviewed and introduced. This paper first introduces the propagation characteristics of light waves in water and reflection characteristics of light waves on water surface, and the bathymetry principle of dual-frequency LiDAR (light detection and ranging) based on UAV (unmanned aerial vehicle). Then, the present typical airborne LiDAR bathymetry (ALB) systems and UAV-mounted solid-state LiDAR bathymetry systems are reviewed. Finally, the technical difficulties in measuring application of UAV-mounted LiDAR bathymetry system are summarized and analyzed, in addition, the development prospect of solid-state LiDAR bathymetry technology and its application are pointed out.

Keywords: airborne LiDAR system; solid-state LiDAR sensor; unmanned aerial vehicle; water depth measurement; underwater topographical surveying

0 引言

在海洋、水生态环境、水文水资源监测,以及地球物理学、河流动力学科学研究等领域,水深/水位是最重要的监测要素之一。目前使用的测量技术手段主要包括常规的海洋浮标、河道水尺、浮子式水位计、压力式水位计、超声波水位计、微波雷达水位计等固定站点的测深(或测水位),以及基于船载平台的主动式声学探测、星载平台的被动式光学/微波遥感等区域性测深等。对于区域性或水文全断面的测深,声学探测(特别是多波束测深系统)是应用最广的测量

技术,但对于浅水区(搭载仪器的船只无法进入或甚低流速、狭窄水面等区域)的测深应用存在较大困难。光学遥感易受水体透明度及海-气/河-气界面复杂光学环境的影响,微波遥感易受海流/水流和风速条件的影响,测量的应用严重受限。另外,超大尺度下相对极低分辨率的星载遥感测验成果目前尚无法满足监测应用业务的要求。

以飞机等空中移动载体为平台的激光雷达海洋测深 (airborne LiDAR bathymetry, ALB),作为一种新型的主动式海洋测深技术,克服了船载声学海洋测深周期长、机动性差、测深精度低、测区范围有限等缺点,具有传感器不接触

收稿日期:2021-03-31

* 基金项目:国家自然科学基金(61401195)、南京工程学院科研基金(ZKJ201907)项目资助

水体、空中机动作业覆盖面广和快速高效等明显优势。机载激光雷达测深的应用始于 1968 年由美国雪城大学 (Syracuse University) Hickman 和 Hogg 等建立的海洋测深试验系统^[1]。目前美国、加拿大、俄罗斯、瑞典等国家已形成了系列化商用机载激光雷达测深系统,测量精度普遍达到了国际水道测量组织 (International Hydrographic Organization, IHO) 的标准,在深度小于 50 m 的浅海区域水深测量、珊瑚礁监测、海洋水下考古、海面油污监测以及鱼群监测等领域得到了广泛应用^[2-4]。

近年来,随着小型化集成化的固态式激光雷达传感器、片上系统芯片 SoC (system on a chip) 和轻量级嵌入式 AI (artificial intelligence) 感知算法等技术的发展,以及相应的高性价比产品不断推向市场,另外无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 代替飞机或直升飞机实现便捷高效的施测作业,为浅水区 (水深小于 5 m 的海岸潮间带地区、海岸/河口浅滩/泥淤/多礁等区域) 的测深应用推广提供了支持,也开辟了内陆江河湖库、江河源头细小水流河段、自然灾害突发事件中水文应急抢测等新的测量应用领域。

1 激光雷达测深原理

激光雷达即 LiDAR (light detection and ranging)。LiDAR 源自两个英文单词 light 和 radar (radio detection and ranging)。激光雷达也被称为光成像、探测和测距 (light imaging, detection and ranging), 是一种通过发射激光束、测量反射或发射激光信号的到达时间及强弱程度等参数,以探测目标距离/位置/运动状态等特征量的雷达系统,具有波长短、准直性高等性能优势。

激光雷达测量水深是基于光波传播特性对于水体穿透能力大于 1 倍的透明度,即 >1 Secchi Depth (水的透明度是指光线透过水能到达的深度,一种评价水清澈程度的指标) 为基础的。已有的研究证明,蓝绿光波段 (波长 450~580 nm) 透射海水能力强,类似于大气的透光窗口,表现出衰减系数最小的特性^[1-2]。双频 LiDAR 系统利用蓝绿光在海水中透射能力强的传播特性,激光穿透水体形成水底的回波;同时利用近红外波段 (波长 780~2 526 nm) 对水面具有高反射率的传播特性,发射近红外激光经水面形成反射波,以实现水下地形和水深的双频一体化测量。

无人机挂载的 LiDAR 测深系统主要包括无人机挂载平台、固态激光雷达传感器、美国全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 接收机 (或其他卫星导航系统接收机)、惯性导航单元和地面数据处理仪器等,其功能包括发射激光脉冲、记录回波讯号、距离测量 (飞行时间、光速)、精确计算回波位置、归算水平面及深度等。以海洋测深应用为例,考虑到激光在空气和海水中不同的传播速度,以及盐度、温度、压强、杂质等不同海水环境下不同水质的水体折射率等因素, LiDAR 测深的公式可表示为^[5]:

$$h = \frac{1}{2}c \times \frac{\Delta t}{n} \quad (1)$$

式中: h 表示水深; c 表示激光在空气中的传播速度; Δt 为接收海面回波信号与海底回波信号的时间间隔; n 为海水折射率 (近似取值 $n = 1.33 \sim 1.34$)。进一步考虑入射角的影响因素,水中激光的传播斜距公式可表示为^[6]:

$$R_s = \frac{c \Delta t K(\theta)}{2n} \quad (2)$$

式中: R_s 为水体中激光的传播斜距; $K(\theta)$ 为入射角 θ 的光径因子。

无人机挂载的 LiDAR 双频激光光路如图 1 所示。LiDAR 光源采用蓝绿光和近红外光双频激光器,向水体发射出蓝绿光和近红外光 (大多采用 532 和 1 064 nm 波长) 两束激光。接收通道有蓝绿光和近红外光通道,以及拉曼红光通道等。测量中为降低激光入射角所造成的干扰影响,通常采用较低功率的宽波束近红外激光脉冲探测水面,采用大功率的窄波束蓝绿激光脉冲探测水底。蓝绿激光束一部分经水面反射,另一部分透射 (穿入) 水体中。透射水体中的蓝绿激光一部分到达水体底部并向上反射,一部分被散射,一部分会产生拉曼 (Raman) 效应,辐射出红光。近红外激光束经水面大部分被反射,入射水体的部分多被水体吸收,少部分形成反/散射。通过计算近红外光水面反射和蓝绿光水底反射间的接收时间差,并解算测量过程中的量测误差 (激光测深、导航定位、波浪影响等误差等) 和系统误差 (传感器挂置误差、时间同步、数据内插、坐标转换、深度归算等误差),在此基础上求得各个激光测点的空间位置信息及深度值。无人机飞行测量过程如图 2 所示,图 2 中用实心圆点代表水面测量点,空心圆点代表水底测量点。

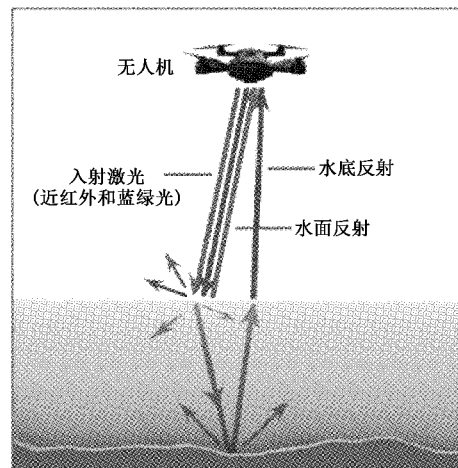


图 1 LiDAR 双频激光光路

2 固态激光雷达传感器技术

激光雷达传感器按有无机械旋转部件可分为机械旋转式和固态式两大类激光雷达传感器。机械旋转式激光雷达经过不断迭代升级,技术已趋成熟,它采用机械部件和电机

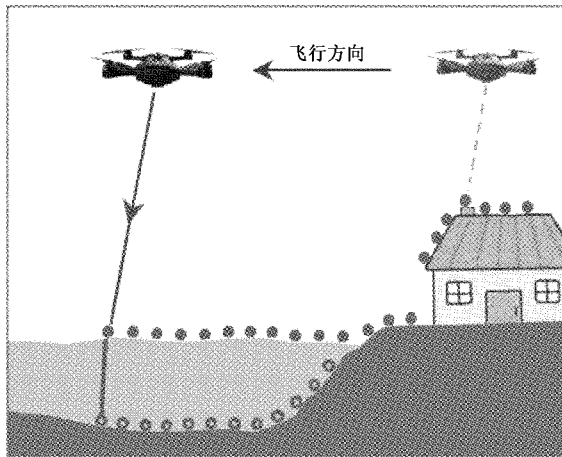


图 2 无人机飞行测深过程

伺服驱动的光束扫描方式,包括定位方向(水平方向)和俯仰方向(垂直于水平面方向)的旋转扫描,雷达通光口径大,扫描角度大,最远测距长,但体积大,扫描速度慢、光路调试和装配工艺要求高。固态式激光雷达传感器区别于机械扫描式的技术方案,从光束操控角度来说,主要有 3 种主流技术^[7-10]: 微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)、面阵闪光(Flash)、光学相控阵(optical phased array, OPA)技术,其产品具有小型化集成化、性价比高、适应性强等特点,已经成为勘探测绘、汽车驾驶、海洋与环境以及机器人和无人机等应用市场发展的新趋势^[2,11-14]。

1) MEMS 微机电系统技术。采用微电子工艺(如氧化、光刻、扩散、沉积和蚀刻等)和硅基芯片集成设计机械旋转部件,通过具有平整光学镜面的 MEMS 微振镜(又称 MEMS 扫描芯片)实现激光束偏转,降低机械装配工艺要求,实现产品量产,具有较高的角分辨率和帧速率(类似机械雷达的高转速)的优势,但缺点是高精度高频振动控制难度大,实现 360°扫描较为困难。二维扫描的 MEMS 微振镜是激光雷达的核心器件,可以通过电热效应、静电效应、电磁效应和压电效应驱动,而其光源多采用光纤激光器设计。准确地说, MEMS 激光雷达传感器并不算是完全消除机械的纯固态技术方案,而是设计采用 MEMS 微振镜扫描单元提高集成度,扫描单元变成了微振镜,微缩了机械旋转部件。

2) Flash 面阵闪光技术。被视为当前商用的主流技术路线,同时,在 MEMS 与 OPA 技术之间其争议和潜力并存。Flash 技术方案类似于焦平面成像原理,通过发射能够覆盖整个探测区域的面阵激光束,经高灵敏度光电接收器接收回波光子信号,一次性实现整个探测区域的成像,再经过信号处理完成对探测区域的图形绘制。发射的面阵激光照射到被测物体上,探测器光学系统接收物体对入射光产生的散射,进入焦平面上排列的感光元件阵列,将接收到的光信息进行光/电转换,记录照射到物体(通常具有三维空间属性)不同部位的光子飞行时间信息,最后输出具有深度信

息的 3D 图像。这里,焦平面探测器阵列决定了系统性能的优劣。Flash 传感器属于一种基于微电子工艺的非扫描式 3D 成像技术方案,具有成像速度快、集成度高、适合量产等优点,缺点是激光功率受限使得探测距离近、角分辨率较低、无法实现 360°成像。

3) OPA 光学相控阵技术。是一种无需机械扫描的全固态激光雷达技术方案,类似于相控阵雷达(phased array radar, PAR)通过调节控制发射阵列中每个发射单元的相位,合成不同相位波束,形成一个接近笔直的激光波束主瓣(主光束),实现对不同方向的扫描。OPA 作为一种新型光束指向控制技术是近年来的研究热点,具有无惯性器件、扫描速度快、精度高(可达到毫米级)、可自由控制扫描区域等优点,缺点是核心元器件 OPA 阵列加工难度高,在最大功率方向易形成旁瓣而分散激光能量,影响探测距离和角分辨率,以及提高单位时间内测量的点云数据困难等。OPA 传感器系统的激光器功率均分到多路相位调制器阵列,通过光学天线发射激光阵列,在空间远场相干叠加形成主光束。通过调节由多个光源组成的各发射单元时间差和不同相位,合成控制具有特定方向的主光束,形成对被测区域不同相角的光束扫描探测。

代表性的国内外厂商及固态 LiDAR 传感器技术应用情况如表 1 和 2 所示。

3 无人机挂载固态激光雷达测深系统及应用

3.1 海洋测深 ALB 系统到无人机挂载固态 LiDAR 系统的发展及测深应用

在无人机之前,空中移动载体采用的是飞机,相比于船载的声学多波束测深系统,由于机载 LiDAR 海洋测深 ALB 系统快速机动和高效全覆盖的优势,在海岸带及岛礁水域的测深和水下地形测绘应用已成为成熟有效的手段。以飞机为空中移动载体的 ALB 机载双频 LiDAR 系统集成激光雷达、全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS, 包括美国 GPS、中国 BeiDou、俄罗斯 GLONASS 和欧盟 GALILEO 四大系统)、惯性导航系统等。ALB LiDAR 关键技术涉及光学系统设计、成像扫描、控制系统、多线单元装调、信号/数据校准等方面。在测距方式上, LiDAR 主要有脉冲调制(pulsed modulation)的时间飞行法(time of flight, TOF)、三角测距法和调频连续波(frequency modulated continuous wave, FMCW)方式,脉冲调制 TOF 与三角测距法属于非相干测量, FMCW 则属于相干测量,相干测量方式可同时获得距离和被探测目标的瞬时速度。在海洋测深 ALB 领域,国内外代表性的机载双频 LiDAR 海洋测深系统如表 3 所示。

近年来海洋测深 ALB 成功应用的案例包括^[15-20]:

1) 美国地质勘探局(USGS)使用 EAARL 系统(由美国国家航空航天局 NASA 开发)完成了佛罗里达州比斯坎湾国家公园水深、水下植被、珊瑚礁和沙质海滩以及浅海水下

表 1 国外厂商及固态 LiDAR 传感器技术应用

序号	生产厂商/网址	固态技术	应用领域
1	美国 Velodyne https://velodynelidar.com/products/	混合固态 MEMS	汽车驾驶、安防、测绘、导航、无人机应用
2	美国 Quanergy https://quanergy.com/products/	OPA	汽车驾驶、安防、测绘、工业自动化
3	美国 ASTRALiTe https://www.astralite.net/edgelidar	MEMS、Flash	首推世界小型无人机测浅水深和地形图绘制
4	加拿大 Leddar Tech https://leddartech.com/	MEMS Flash、OPA	汽车驾驶、安防、测绘、交通、导航定位
5	奥地利 Riegl http://www.riegl.com/nc/products/	MEMS、Flash	首推世界无人机 LiDAR, 无人机测水深
6	荷兰/澳大利亚 Fugro 公司 https://www.fugro.com/about-fugro/	MEMS	大中型无人机平台测水深
7	德国 SICK https://www.sick.com/cn/zh/	混合固态 MEMS	工业自动化、测绘、汽车驾驶
8	德国 IBEO https://www.ibeo-as.com/en/products/	MEMS	汽车驾驶、工业自动化、测绘
9	德国 MICRODRONES https://www.microdrones.com/en/	MEMS、Flash	无人机 LiDAR 测水深和地形图绘制
10	瑞士 Leica Geosystems https://leica-geosystems.com/products/	混合固态、Flash	大型无人机平台测水深
11	以色列 Oryx Vision https://www.crunchbase.com/organization/	纳米天线阵	汽车驾驶、交通
12	以色列 Airobotics https://www.airoboticsdrones.com/sca-ports/	MEMS	无人机应用
13	以色列 Innoviz https://innoviz.tech/innovizone/	MEMS	无人机应用、汽车驾驶、交通
14	美国 TetraVue https://tetravue.webflow.io/	Flash	汽车驾驶、安防
15	美国 Ouster https://ouster.com/products/	MEMS	汽车驾驶、工业自动化
16	美国 Trimble https://www.trimble.com/	混合固态、Flash	无人机应用
17	美国 Headwall https://www.headwallphotonics.com/	混合固态	无人机应用
18	美国 YellowScan https://www.yellowscan-lidar.com/	混合固态	无人机应用

表 2 国内厂商及固态激光雷达传感器技术应用

序号	生产厂商/网址	固态技术	应用领域
1	中国速腾聚创 http://www.robosense.cn/rslidar/	MEMS OPA	汽车驾驶、无人机应用
2	中国禾赛科技 https://www.hesai.tech.com/zh/	混合固态	汽车驾驶、无人机应用
3	中国北科天绘 https://www.isurestar.com/	Flash	测绘、汽车、无人机应用
4	中国北醒光子 http://www.benewake.com/domain/detail/	Flash	测绘、汽车驾驶、无人机应用
5	中国台湾 Opus http://www.opusmicro.com/	MEMS	3D 成像、汽车驾驶

表 3 机载双频 LiDAR 海洋测深系统

序号	激光雷达 LiDAR 系统	研制生产单位
1	EAARL(experimental advanced airborne re-search LiDAR)系统	美国国家航空航天局(NASA)(2001年)
2	CZMIL(coastal zone mapping and imaging LiDAR)系统	美国/加拿大 Teledyne Optech 公司(2013年)
3	SHOALS (scanning hydrographic operational airborne LiDAR system)系统	加拿大 Optech 公司(2005年)
4	Aquarius ALTM/Gemini ALTM 系统	加拿大 Optech 公司(2012年)
5	Hawk Eye III 深水激光测深系统	德国 Leica(徠卡)公司(2014年)
6	Chiroptera II 浅水激光测深系统	核心技术来源于 2013 年收购的瑞典 AHAB
7	Dragon Eye 双头倾斜陆地激光扫描系统	(Airborne Hydrography AB)公司
8	RIEGL VQ-820/880-G 系统	奥地利 Riegl 公司(2011年)
9	LADS MK3 系统	荷兰/澳大利亚 Fugro 公司(2015年)
10	Map-per5000 系统	中科院上海光学精密机械研究所(2017年)

动植物生活环境状况的科学考察。

2) 美国 Florida Atlantic 大学 Charles W. Finkl 研发团队采用加拿大 Optech 公司 SHOALS 系统, 对美国佛罗里达东南珊瑚礁区由海岸至离岸 6 km 的海域的地形进行全面的测量, 并完成了大量地貌特征的识别。

3) 荷兰/澳大利亚 Fugro 公司 LADS MK3 系统和奥地利 Riegl 公司 VQ-820-G 系统, 在新西兰北部 Motiti 岛周边海域进行了组合试验, 利用 LADS MK3 系统对近海浅水区及陆面地形测量, 结合 VQ-820-G 系统对较深海域进行测量, 实现了海洋和陆地的一体化测量。

4) 德国 Leica 公司/瑞典 AHAB 公司 Hawk Eye III 系统可同时采集水深和地形数据, 实现陆地和海面的无缝测量, 2005 年投入使用以来, 至今已经在欧洲和美洲多个区域完成了多项近岸海域的测量工作。

5) 加拿大 Optech 公司 Aquarius ALTM 小型机载 LiDAR 是专门为沿海和内河航道测绘而设计的系统, Aquarius(水瓶座)浅水地形测图系统与 Gemini(双子座)三维激光测图系统配合使用, 可对陆地和相对较浅水域实现一体化测量, 同时获取陆面和水域的完整数据, 已在世界许多地区得到应用。

6) 国家海洋局第一海洋研究所先后采用 Aquarius ALTM 系统和瑞典 AHAB 公司的 Hawk Eye II 系统在南海岛礁海域进行了机载测量实验, 获得了大量水上水下地形测量数据资料。

7) 中国地质调查局自然资源航空物探遥感中心使用 CZMIL NOVA II 系统应用于海岸带地质调查。CZMIL 系统是由美国/加拿大 Teledyne Optech 公司开发的新一代机载 LiDAR 测深系统, 具有国际领先水平, 集成了高光谱成像仪和数码相机, 采用了圆扫描方式, 具有较强的抗风浪、浅水和浑水施测作业能力。

8) 中科院上海光学精密机械研究牵头开发完成的国产 Map-per5000 定型产品, 在南海岛礁实施测深应用, 获得了岛礁及周围 0.25~51 m 水深区域三维地形数据。

9) 江苏省测绘工程院等单位, 以运-12 飞机为平台搭载 Teledyne Optech 公司 CZMIL 系统, 对水体较为浑浊的江苏骆马湖(III 类水, 接近富营养化)进行了内陆湖泊测深试验。飞机从淮安涟水机场起飞, 共采集到 18 条航线的测深数据, 包括原始激光点云和影像数据、定位定向(POS)数据、GPS 数据、航迹文件、检校数据等。在激光穿入湖水底部的反射率较低、漫射衰减系数(K_d)较高情况下, 系统仍能够成功探测到湖底数据, 水深测量精度(除湖区采沙作业集中区域外)达到了 CZMIL 系统标称的精度指标。

飞机搭载 LiDAR 系统的 ALB 应用, 受到仪器设备价格昂贵、运行维护成本高等限制。近年来发展的无人机挂载小型集成化固态 LiDAR 以及轻量级嵌入式数据处理软件, 为海岸、岛礁及河口地区的推广应用, 特别是对于内陆江河湖库水深测量以及灾害突发事件中水文应急抢测提供了新颖测量手段。

无人机挂载 LiDAR 传感器分轻量级(约 15 kg 左右)和超轻量级(约 5 kg 左右)两类。ASTRALiTe、Riegl、Fugro、Velodyne、MICRODRONES 等公司新近推出了多款无人机挂载 LiDAR 系统, 典型商用无人机挂载 LiDAR 水深及地形测量系统及其应用案例主要有^[21-25]。

1) 美国 ASTRALiTe 公司 EDGETM 系统是世界上首推的小尺度地形测量和水深扫描 LiDAR 系统, 总重约 5 kg (外形尺寸 27 cm×23 cm×19 cm), 可挂载小型无人机, 能够同时探测 0~10 m 深度(清澈水体下)的水下物体(或水下构筑物)和水深, 能够实现陆-水(land-to-water)亚厘米级精度的无缝测量, 并可输出形成水下场景的 3D 图像, 可广泛应用于小溪/河流/池塘/湖泊、近岸/沿海环境、水资源管理、自然灾害评估和恢复、水下基础设施探查、工业用围池、军事后勤等领域。EDGETM 系统主要技术参数: 续航时间最大可达 60 min(电池供电), 数据接口 USB 闪存驱动, 容量 1 GB/10 mins, 激光安全等级 3R。LiDAR 传感器技术参数: 测量精度/重复精度 10 mm/5 mm, 蓝绿激光

波长 532 nm, 水体穿透能力 >1.5 Secchi Depth, 典型测深 10~20 m, 最大测深 40 m, 激光脉冲发射频率 20 kHz(可订购定制), 交叉扫描(cross-track)方式, 扫描速率 70 Hz(可订购定制), 扫描范围 $\pm 15^\circ$ 。惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU, 配备 GPS 和 PPK 双天线)技术参数: 横滚/俯仰角精度 0.05° , 航偏 0.2° 。EDGE™ 系统不仅在海岸带和海岛浅水域得到应用, 而且推广应用到内陆江河湖库。如, 在夏威夷 Oahu 岛周边清澈的浅水域(从数厘米到超过 5 m 的水深区域), 采用中国大疆无人机 DJI matrice 600pro(一款六轴六桨无人机, 无风环境下最大水平飞行速度: 65 km/h, 最大飞行海拔高度: 2 500 m)挂载, 实现了以厘米级分辨率连续对陆地(码头/植被/沙滩等)、水下特征(珊瑚/岩石/铺设的 $\Phi 15$ cm 的管道等)的测量绘图。还有, 在美国西部科罗拉多(Colorado)州的水库水下地形测量等应用。

2) 奥地利 Riegl 公司 BathyCopter 系统是世界上第一款具有测深能力的无人机 LiDAR 系统, 也称为水深测量无人机载扫描系统, 已成功应用于美国科罗拉多河与蓝河交汇处的水深剖面与河流断面流量及河岸测绘, 以及其他地区的河流水文断面数据获取与断面地形生成、水库周期性测量、运河测量、水利工程辅助测量等领域。BathyCopter 系统集成了固态 LiDAR 传感器、IMU/GNSS 单元(采用加拿大/美国 Applanix Trimble 公司的 APX 15 UAV 定位定向 POS 产品)、内置相机 Sony Alpha 6000 以及配备数据采集控制和数据处理软件等。BathyCopter 系统技术参数: 翼臂展开尺寸为 $192\text{ cm} \times 182\text{ cm} \times 47\text{ cm}$, 续航时间最大可达 30 min(24VDC 电池供电), 激光等级 2M 级, 测量速率 4 kHz, 水体穿透能力 >1 (Secchi Depth)。

3) 奥地利 Riegl 公司 RIEGL BDF-1 是一款专为水深测量设计的水深测量雷达, RIEGL BDF-1 技术参数: 外形尺寸 $140\text{ mm} \times 179\text{ mm} \times 448\text{ mm}$, 裸重约 5.3 kg, 激光脉冲频率 4 kHz, 激光波长 532 nm, 最大测距 50 m, 水体穿透能力 >1.5 Secchi Depth, 重复精度 20 mm。采用 Riegl 公司 RiCOPTER 无人机系统挂载 BDF-1 激光雷达, 集成倾斜补偿单元、IMU/GNSS 辅助惯性导航单元和控制单元, 应用于河流地带的测量, 国外已有成功应用的报道。在国内, 被授权代理 RIEGL BDF-1 产品经销商(中测瑞格公司)采用 DJI 大疆如风系列 WIND 8 无人机(一款八轴八桨工业级防风无人机, 无风环境下最大水平飞行速度: 65 km/h, 最大飞行海拔高度: 2 500 m)挂载 RIEGL BDF-1, 选取多条飞行路线, 对北京郊区一条不太清澈水体且水底多处生长水草的河段(河宽约 90 m)进行实验测试, 获取了水深 <2 m 的多个断面深度剖面数据, 这是 RIEGL BDF-1 产品在国内的一个实测案例。

4) 美国 Velodyne 公司(国际 LiDAR 业界领先公司) VLP-16 三维激光扫描仪, 重量轻(裸重不足 1 kg), 适宜无人机挂载。激光波长 903 nm, 测量频率 5~20 Hz, 测距达

100 m, 垂直视场 $\pm 15^\circ$, 水平视场扫描 360° , 每秒高达 30 万个点数据输出, 支持两次回波接收, 可测量第一次回波和最后一次回波的距离值和反射强度值, 100 M 快速以太网接口, 支持外接 GPS。国外已有应用于农业、林业、水利、电力和矿山等测量领域的报道。在国内, 自然资源部第一海洋研究所、山东电力工程咨询院等单位采用大疆无人机 DJI matrice 600pro 挂载 VLP-16 激光扫描仪、IMU/GNSS 单元(选用 Applanix Trimble APX-15 UAV), 以及数据采集和导航与处理应用软件(选用荷兰 QPS 公司 QINSY 软件包)组成海岸监测系统, 对位于山东半岛南部海阳市附近约 10 km 长的砂质海岸飞行施测作业, 获取了约 2 km^2 沿岸点云数据。

5) 德国 MICRODRONES 公司(镁科众思公司) mdLiDAR3000LR 系统。MICRODRONES 公司是全球知名的垂直起降四旋翼无人机系统开发商, mdLiDAR3000LR 基于 MICRODRONES 重载 md4-3000 飞行平台设计, 集成了奥地利 Riegl 公司的 RIEGL VUX-1 UAV 激光雷达测深传感器和外加 IMU/GNSS 单元 Applanix Trimble APX-20, 以及配备的测量设备软件和数据处理软件。RIEGL VUX-1 AUV 传感器是一种轻小、紧凑型激光扫描系统, 主要技术参数: 测量精度/重复精度 10 mm/5 mm, 激光脉冲发射频率高达 550 kHz, 最大扫描速度 200 线/s。Applanix APX-20 主要参数: IMU 横滚/俯仰角精度 0.015° 、航偏 0.035° , IMU 采样速率 200 Hz, 水平位置精度误差小于 0.05 m, 垂直位置精度误差小于 0.1 m。2020 年全新推出的 mdLiDAR3000LR 系统在美国阿肯色州奥扎克(OZARKS)山脉山谷中 Big Creek 河流地区得到应用, 该施测任务由美国 Crafton Tull 工程测量公司完成, 通过对地形崎岖、植被茂密的测区(大约 0.65 km^2)飞行多架次施测作业, LiDAR 直接穿透树冠和其他干扰碎片, 有效收集地面数据, 构建了测区 3D 数字地形图。在国内贵州地区, 对长达 1.3 km 的河道进行了实测, 获取了该河段高密度 LiDAR 数据, 以及彩色点云数据资料的生成。

3.2 无人机挂载固态 LiDAR 系统测深应用存在的问题分析

以飞机/直升飞机为载体的海洋测深 ALB 技术、仪器设备研制及其应用, 发展历史长, 技术较为成熟。相对于海洋测深 ALB, 无人机挂载固态 LiDAR 传感器及其集成技术发展和测深应用历史短, 但技术研究、仪器设备研制等发展迅速, 业界先进公司/厂商的产品近年来不断推出。在我国, 用于无人机测深的固态 LiDAR 传感器、惯性测量单元 IMU、数据采集和导航与处理应用软件等核心装置/软件包均采用国外产品。国内掌握完全自主可控技术的无人机测深系统商用产品, 明显落后于国外先进水平。国内单位/公司在浅海/海滩/近岸岛礁和内陆江河湖库等无人机测深系统的应用案例中, 在系统级上多是采用大疆公司的无人机作为空中移动载体, 集成国外的商用传感器和

IMU 等产品实现测深应用, 或者直接采用全套国外公司软硬件产品。这与海洋测深 ALB 领域不同, 2017 年已有研制定型的国产 Map-per5000 机载双频 LiDAR 测深系统。

LiDAR 双频测深原理是以蓝绿光波段在海水/清水中传播衰减最小的光学传播窗口, 以及近红外波段对水面具有高反射率特性为基础的, 原理简单, 但技术实现和仪器设备研制较复杂。在施测应用方面, 需要控制仪器设备本身的激光测距、导航定位等分系统的量测误差以及分系统间匹配集成的误差。对于浅海及岛礁水域的测深和水下地形测绘应用, 已验证了无人机挂载固态 LiDAR 传感器测深系统的可行性和优越性, 但受海水透明度、天气和大气物理异常、强烈海面波动等环境因素影响, 激光的指向性、在海水中的散射/折射/反射特性等变化会增加量测误差控制的困难, 需要在提升仪器设备性能的同时, 深入开展硬件和数据采集及导航与处理应用软件联合的量测误差控制技术等相关研究。

在内陆江河湖库的施测应用, 例如, EDGE™ 系统在美国西部科罗拉多 (Colorado) 州的水库水下地形测量, BathyCopter 系统在科罗拉多河与蓝河交汇处的水深深度剖面与河流断面流量及河岸地形绘制中的应用, RIEGL BDF-1 系统在北京郊区河段的试验测试, 长委长江下游水文水资源勘测局开展的无人机 LiDAR 比测实验等都是近 2 年来的案例。与海洋测深相比, 江河湖库的施测应用, 还处于起步阶段。江河湖库水体浑浊度高, 蓝绿激光穿透能力被严重衰减, 测量深度受限是推广使用的关键。另外, 水质、含沙量变化等改变了蓝绿光与近红外光的透射和反射传播特性, 大大降低了测量数据的可信度, 直接影响施测的可行性, 甚至导致一些特定区域和场合 (如高流速且复杂流态河段、复杂水底地质环境、洪水期水文应急抢测等) 应用不可行。例如在江苏骆马湖的测深应用, 对于湖区采沙作业造成的高悬沙水质环境和水底沙坑区域 (深度超过 5 m, 水底光反射率极低、漫射衰减系数 K_d 大), 即使是飞机搭载大功率激光源的 LiDAR 系统, 获取数据的可信度差, 甚至无数据。还有 RIEGL BDF-1 产品在北京郊区河流的应用, 其有效数据的获取在水清条件下测量深度也仅有 1.8 m。因此, 在轻量化固态 LiDAR 传感器激光发射功率等受限情况下, 需要重点开展不同内陆水体蓝绿光与近红外光传播特性、蓝绿光透射衰减最小传播窗口、近红外光最佳反射波段、水底低反射率与漫射衰减系数大造成的斜距量测误差控制等相关研究。

4 结 论

无人机挂载固态 LiDAR 传感器测深系统作为一种新颖测量手段, 在水深小于 5 m 的海岸潮间带地区、海岸/河口浅滩/泥淤/多礁等地区, 显示了广泛的应用前景, 进一步的工作需要在提升仪器设备性能的同时, 深入开展量测误差控制技术等方面的研究。在内陆江河湖库、江河源头

细小水流河段、自然灾害突发事件中水文应急抢测等领域, 同样具有潜在和诱人的应用前景。但如何突破浑浊水体激光测深技术困境, 还需要重点开展不同内陆水体蓝绿光透射衰减最小传播窗口、近红外光最佳反射波段选择、减少或降低复杂流态河段以及复杂水底环境下量测误差等相关研究。

参考文献

- [1] 刘永明, 邓孺孺, 秦雁, 等. 机载激光雷达测深数据处理与应用[J]. 遥感学报, 2017, 21(6): 982-995.
- [2] 刘焱雄, 郭锴, 何秀凤, 等. 机载激光测深技术及其研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(9): 1185-1194.
- [3] PAN Z, GLENNIEL C, HARTZELL P, et al. Performance assessment of high resolution airborne full waveform LiDAR for shallow river bathymetry [J]. Remote Sensing, 2015, 7(5): 5133-5159.
- [4] DONEUS M, DONEUS N, BRIESE C, et al. Airborne laser bathymetry-detecting and recording submerged archaeological sites from the air [J]. Journal of Archaeological Science, 2012, 40(4): 2136-2151.
- [5] 周立. 海洋测量学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [6] 赖旭东. 机载激光雷达基础原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 25-34.
- [7] 陈敬业, 时尧成. 固态激光雷达研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 41-51.
- [8] 范娜娜, 王懋, 温少聪, 等. 基于二维 MEMS 振镜的激光雷达系统的光学设计[J]. 光学技术, 2020, 46(3): 290-294.
- [9] 魏雨, 蒋世磊, 孙国斌, 等. 固态面阵激光雷达接收光学系统设计[J]. 中国光学, 2020, 13(13): 517-526.
- [10] HECK M J R. Highly integrated optical phased arrays: Photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering[J]. Nanophotonics, 2017, 6(1): 93-107.
- [11] 李卫硕, 孙剑, 陈伟. 基于 BP 神经网络机器人实时避障算法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 204-211.
- [12] KANTHARAJU 4P, HUSSAIN S A, BETHANBOTLA S, et al. Autonomous vehicle control using Lidar and camera with CAN network [J]. Instrumentation, 2018, 5(4): 1-10.
- [13] 杨祖培. 一种新型海缆区界目标位置检测算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(8): 28-32.
- [14] 辛守庭, 岳玉霞, 李利军, 等. 基于机器学习的无人机载 LiDAR 数据处理系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 39-45.
- [15] FINKL C W, BENEDET L, ANDREWS J L. Interpretation of seabed geomorphology based on

- spatial analysis of high-density airborne laser bathymetry[J]. *Journal of Coastal Research*, 2005, 21(3): 501-514.
- [16] BANKS K W, RIEGL B M, SHINN E A, et al. Geomorphology of the Southeast Florida continental reef tract (Miami-Dade, Broward, and Palm Beach Counties, USA) [J]. *Coral Reefs*, 2007, 26 (3): 617-633.
- [17] 许宝华, 刘世振. 机载 Li DAR 测量技术在潮间带测量中的应用[J]. *人民长江*, 2019, 50(11): 95-98.
- [18] 彭琳, 刘焱雄, 邓才龙, 等. 机载激光测深系统试点应用[J]. *海洋测绘*, 2014, 34(4): 35-42.
- [19] 贺岩, 胡善江, 陈卫标, 等. 国产机载双频激光雷达探测技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 8: 1-11.
- [20] 王宗伟, 朱士才, 卢刚, 等. CZMIL 机载激光测深系统及其在骆马湖测深试验评估[J]. *海洋学研究*, 2017, 35(3): 20-26.
- [21] ASTRALiTe, Inc. EDGE LiDAR[EB/OL]. <https://www.astralite.net/edgelidar>.
- [22] QUADRAS N, KEYSERS J. Emerging trends in bathymetric lidar technology [J]. *Hydro International*, 2018: 18-19.
- [23] 中测瑞格测量. RIEGL BDF-1 无人机水深测量雷达, 中国首测 [EB/OL]. <https://kuaibao.qq.com/s/20191111A0DTK300? refer=spider>.
- [24] Microdrones. 案例 | mdLiDAR3000LR 无人机激光雷达方案应用于贵州省某河道测量项目[EB/OL]. <https://x-droners.com/uav/info/2010130002>.
- [25] 高兴国, 田梓文, 麻德明, 等. 无人机 LiDAR 系统在砂质海岸监测中的应用[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(3): 468-472.

作者简介

徐梦溪, 博士, 副教授, 主要研究方向为信息获取与处理、图像处理、信息系统集成与应用。

E-mail: xumx@njit.edu.cn