

无人机机载激光测深技术在 内河滩险测量中的应用^{*}

夏 波, 朱运权

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 内河天然航道滩险测量中, 传统测量方法成果类型单一、精度效率低、人员安全无法保证。在无人机机载激光测深技术原理和方法的基础上, 根据内河航道滩险测量特点, 从探测能力、波浪改正、极浅水测量、飞行条件等多方面对其适用性进行论证, 得出该技术灵活高效, 可以提供高密度水陆地形点云数据, 大大提高工作效率和成果精度, 可以满足内河航道滩险测量需求, 但需在提高极浅水测量精度、水质条件影响、回波识别处理技术、水面大比降影响等方面进行更深入的研究。

关键词: 无人机; 激光测深; 蓝绿光; 内河航道; 滩险测量

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S1-0133-05

Application of airborne laser bathymetry technology of UAV in inland waterway beach hazard survey

XIA Bo, ZHU Yun-quan

(Sichuan Transportation Surveying & Design Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: In the measurement of inland waterway beach hazard, the traditional measurement method has the problems of single type of results, low accuracy and efficiency, and unguaranteed personnel safety. Based on the principles and methods of UAV airborne laser bathymetry technology, this paper demonstrates its applicability in terms of detection capability, wave correction, very shallow water measurement, flight conditions and other aspects based on the characteristics of inland waterway beach hazard measurement. It concludes that the technology is flexible and efficient, it can provide high-density terrain point cloud data on water and land, which greatly improves the efficiency and accuracy of results, and it can meet the needs of inland waterway beach hazard measurement, but more deeper research is needed to improve the accuracy of very shallow water measurement, the impact of water quality conditions, echo identification processing technology, and the impact of large specific drop on the water surface.

Keywords: UAV; laser bathymetry; blue and green light; inland waterway; beach risk measurement

2021年,《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》发布,成渝两地双圈建设拉开序幕,明确了以长江干线为主通道、建设重要支流为骨架的航道网络。航道网络建设离不开天然航道测绘数据的支撑,四川拥有金沙江、嘉陵江、岷江等多条长江上游重要支流,内河航运潜力巨大。在这些内河航道测量中,滩险整治测量是保证通航条件的

首要内容。在内河航道滩险测量中,目前一般采用全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)结合单波束测深仪技术、测深杆、测深锤等仪器和工具,效率和精度均存在一定缺陷。随着无人机激光测深技术研究的深入,其应用于内河航道滩险测量的可能性逐渐增大,将可以实现使用一种设备解决水陆联测问题,大大提

收稿日期: 2022-06-13

*基金项目: 四川省交通勘察设计研究院有限公司科技项目(232022015)

作者简介: 夏波(1986—),男,高级工程师,从事工程测量无人机遥感及激光雷达应用研究。

升内河航道滩险测量效率。

1 无人机技术与航道测量的结合

近年无人机技术发展迅速，无人机平台具有灵活作业、无需专门起降场、转场方便、成本低等特点，能快速获取大范围、大区域地表原始数据，广泛应用于资源调查、电力巡检、公路勘察、地灾监测等多个领域^[1]。目前，无人机可以搭载正射相机、倾斜相机、红外光束激光雷达、多光谱相机等各种测绘模块，随着高精度惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 在无人机上适配安装，无人机航测技术更加平民化、简单化，通过无人机航测技术可以生产高精度的数字正射影像、地面点云成果、数字线划图、实景三维模型等多种高精度数字化测绘产品。

在内河航道滩险测量方面，已可使用无人机航测技术替代人工测量陆域地形、水工构造物、水边线等任务，大大降低了内河航道滩险测量中人员的危险；但在水下地形测量方面，无人机常规搭载的测绘功能模块还无法满足。常规水下测量载体均为船只，而行船安全受制于天气、水流方向、水流速度、航道礁石等诸多因素，且船速直接影响测量效率的提升。随着轻小型激光测深雷达商用化研究的深入，使用无人机激光测深技术完成水陆联测成为一种可能。

2 激光雷达测深技术

2.1 发展概述

激光雷达 (light detection and ranging, LiDAR) 是采用光电探测技术手段的主动遥感设备，搭载飞行器后可快速大面积直接获取目标地物地表高精度的三维坐标、强度、点云回波信息等数据，在工程测量新技术中，LiDAR 已在高精度地形图测绘、三维矢量数据获取方面具有巨大优势。20世纪60年代，机载激光测深系统开始研制，第1台具备可操作性的机载激光测深系统诞生于20世纪80年代^[2]。目前国外较为成熟的商业机载激光雷达测深系统有 OPTECH 公司的 CZMIL、RIEGL 公司的 VQ-880-G、LEICA 公司的 HawkEye 等^[3]。这些机载

激光雷达设备质量大、售价高，真正能在工程上应用并不现实。

2019年，ASTRALiTe 公司推出的 edge™ 小型地形和水深扫描激光雷达可以探测 0~5 m 深度，质量约 5 kg，并成功使用大疆 M600 Pro 多旋翼进行了搭载飞行。2021年底，RIEGL 公司的 VQ-840-G 无人机水深激光雷达中国首飞使用六轴多旋翼搭载，提供超过 2.5 Secchi 深度的穿透力，测量速率 50~200 kHz，测深改正前达 7.5 m。无人机激光测深雷达的推出使得无人机激光测深技术在工程应用方面具有了一定的可行性。

2.2 理论和方法

激光测深利用水中光波的传播特性，即蓝绿光波段 0.47~0.58 μm 区间存在一个能量衰减程度相对较小的透射窗口^[4]，发射大功率窄波束脉冲(蓝绿光)测量水底，发射低功率宽波束脉冲(红外光)测量水面。如同时向水面发射 532 nm 波长的蓝绿光束和 1 064 nm 波长的红外光束，蓝绿光穿透水体，到达水底被反射，红外光不能穿透水体，被水面反射，通过记录 2 束激光发射到接收的时间差，分别计算发射中心到水面和水底的距离^[5](图 1)。结合入射角、水体折射率、飞行姿态、波浪信息等数据进行联合解算，最终确定水底高程值。

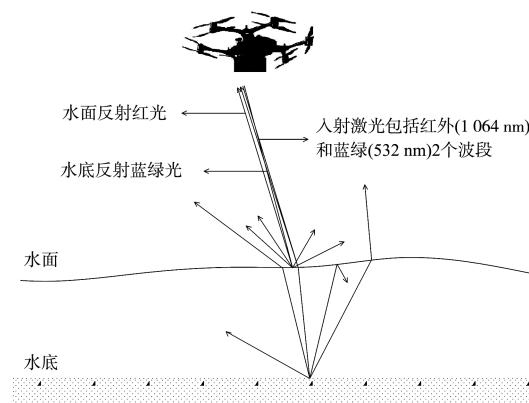


图 1 无人机激光测深技术原理

3 内河航道滩险测量现状

3.1 水深测量方法

3.1.1 单波束测深仪联机 GNSS 定位

单波束测深仪联机 GNSS 定位方法是内河航道

测量中最常用的方法。实际操作过程中, 通常将单波速测深仪安装在测船上, 同时安装 GNSS 接收机, 且定位中心应与测深中心一致, 当其偏差大于 0.3 mm 时应进行归心改正^[6]。由于单波束测深仪数据采集时波束是单一的, 直接决定了只有执行航线下的地形地貌数据能被采集, 而测线间的地形数据只能通过航线布设密度进行内插, 难免造成部分水下特殊突变地貌的遗漏。在极浅水区域单波束测深仪可测量至 0.3 m, 但受载体船只通行限制, 极浅水区域能否测量需看测船能否通行。

3.1.2 多波速测深系统

多波速测深系统也是利用声波回声技术原理实现水下地形测量。与单波束测深仪相比, 多波束测深系统具有测量范围大、速度快、精度和效率高等优点^[7]。多波速测深范围从点线扩展到面, 推动水下测深发展到立体测深和自动成图^[8], 避免了水下特殊突变地貌的遗漏。多波束测深系统包括声呐探头、多信号控制处理系统、辅助设备、数据处理软件。多波速系统工作时, 沿航迹方向发射开角窄的波束、沿垂直航迹方向发射开角宽的波束, 获得测量船瞬时位置、姿态、航向、声速等数据, 综合声波测量, 定位、船姿、声速剖面和潮位等信息计算波束脚印的坐标和深度^[9]。多波速测深系统对仪器安装、测船吃水和航道安全航行等要求均较高, 在内河航道上难以铺展应用的最大原因是内河航道滩多、航道水深相对较浅, 对于多波速测量而言, 浅水区域易受礁石滩段遮挡, 测量存在盲区, 全面性不足。在内河航道滩险整治中, 礁石滩段众多, 制约了多波速测深系统优势的发挥。

3.1.3 其他方法

在内河航道滩险测量中, 对于单波束测深仪和多波束测深系统都无法到达的浅水区域, 常用测深杆方法施测。测深杆自身有刻度, 需要人工操作, 只能在水流速度较小的区域进行。在内河航道礁石错乱、水流陡降的滩险区域, 船只和人

员无法到达, 关键区域水深测量依然存在盲区。

3.2 滩险陆域测量方法

内河滩险整治测量中, 因航道深度相对较浅, 水位变化直接决定着行船安全, 滩险陆域地形测量也相当重要。常规手段有实时动态载波相位差分技术 (Real-time kinematic, RTK)、全站仪免棱镜、无人机摄影测量方法^[10]。这些传统方法均难以操作: RTK 测量需要人员到达现场, 当出现航道水毁后, 丁坝礁石区域难以行走, 水位未降至一定程度水工构造物难以裸露; 全站仪免棱镜技术受角度限制; 无人机摄影测量高程误差相对较大。

4 无人机激光测深技术的应用

4.1 项目可行性研究

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新发展的一种测量手段^[11]。在海洋测绘中, 机载激光雷达测深的应用研究相对领先, 但深度探测能力依然有限。激光雷达测深系统研究对象均为水体, 内河航道淡水与海水在水温、水质、底质方面虽然存在一定差异, 但光波在水中的传播特性依然适用。无人机搭载轻小型激光测深雷达的商用推出, 真正将激光雷达测深系统推向工程应用, 以下结合激光雷达测深系统特点与内河航道滩险测区特点进行探讨分析。

4.1.1 探测能力

从公开试验数据看, 无人机搭载轻小型水深激光雷达的测深能力可达 5 m 左右, 如 RIEGL 公司的 VQ-840-G 无人机水深激光雷达水深测量值为 5.0~5.5 m。内河航道滩险测量中, 滩险区域水深低于 5 m(图 2), 理论上可满足无人机搭载轻小型水深激光雷达测深能力, 但激光雷达测深受水质、河流底质、悬浮物等各种因素影响。金沙江、岷江、嘉陵江均属长江上游支流, 水质状况优于下游长江干流, 航道平均水质长期维持在Ⅱ类水质标准, 轻小型水深激光雷达测深能力还需进一步验证。

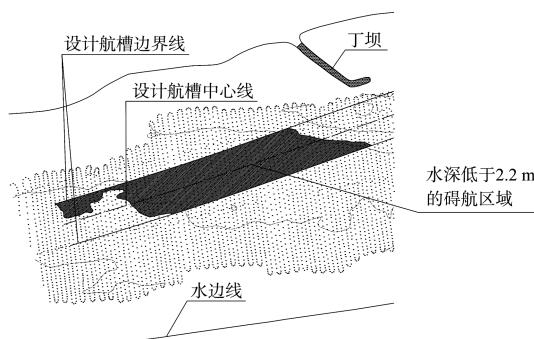


图 2 嘉陵江西门滩航道水深

4.1.2 波浪改正分析

海洋测绘中，必须考虑激光脉冲在水面的入射瞬间由波浪和潮汐作用造成的水位变化对其测深精度的影响^[12]。相较于海浪，内河航道的水面波动更为平静，虽然没有潮汐，但内河航道上下游水位具有水位比降特征，特别是在内河航道滩险段落，滩上、滩中、滩下的相对比降受瞬时流量的变化而呈现不规则性，故应在水位变化不大时进行高精度水深数据的采集。

4.1.3 极浅水区域适应性分析

受洪水冲刷和航道整治影响，内河航道滩险段会存在极浅水区域。而在海洋激光雷达测深过程中，由于激光的传播速度快，对于小于 2 m 的极浅水区域，可能出现海面和海底回波信号交叠的现象^[13]。改进提取水下激光条纹的方法并建立折射补偿的水下激光测量模型可以提高浅水测量精度^[14]。根据最新 RIEGL 公司 VQ-840-G 水深激光雷达测试报告，使用全波形数据处理提取算法和混合噪声剔除法后，可以解决在极浅水区域的回波信号混叠情况。

4.1.4 气象因素

雨雾天气时不宜使用无人机激光测深系统，因为激光在传播过程中遇到水汽会加强光的散射，造成无回波信号或混乱的回波信号；大风天气也会威胁飞行安全。相较于船只作为测量平台的方法，无人机激光测深系统最大的优势是可在夜晚作业，且由于没有光照影响，激光雷达探测能力更加出色。

4.1.5 飞行条件

在低空航测领域，无人机飞行更加灵活。内

河航道水面相对开阔，执行航线需注意跨江电缆和桥梁设施，其灵活的飞行能力可支持水面低空数据采集。

4.2 工程应用存在的问题

4.2.1 内河航道应用

水质情况决定着激光测深精度。受工业发展和环境影响，内河航道水质下降较快，且呈周期性变化，嘉陵江下游段水质有时甚至低于Ⅳ类水质。现有无人机激光测深技术能否完成任务受制条件较多，还需改进激光测深探测能力，优化回波处理技术。

4.2.2 工程实践精度

内河航道滩险水深测量中，水位改正是求解精确水深值的重要环节。无人机激光测深技术具有作业响应快、水陆联测效率高等特点，但激光测深最大特点是入射水面角度不同，造成光的折射路径也不同。在内河航道滩险测量中，滩上、滩下比降大，近距离比降有时会超过 1 m，还需进一步研究论证内河比降对于激光测深实际精度的影响。

5 结论

1) 无人机机载激光测深技术作为一种新式测量方法，相对于传统测量方法，在人员安全保障、成果类型多样化以及精度效率方面均具有较大优势。

2) 现阶段无人机激光测深技术可以应用于内河航道滩险测量，为航道水底三维地理数据的获取提供更高效的技术方法。

3) 受探测能力、水质条件、回波信号处理技术、水面大比降等影响，无人机激光测深结果的准确度和可靠度方面应进一步提高与改善。

4) 现有无人机机载激光测深系统数据有其局限性，应针对不同地形场景，研发一个高效、智能的数据处理算法。

5) 今后可在无人机激光测深技术与多传感器集成(如 CCD 或多光谱传感器)、与多源数据相融合(如卫星 SAR 数据)以及发展轻小型水深激光雷达等方面进行深入研究，服务于国土资源遥感、

内河以及海洋滩险地形测绘与环境监测、地灾监测及防灾减灾、水运交通等领域。

参考文献:

- [1] 江木春, 韩亚民, 林剑锋. 无人机机载激光雷达测绘技术在航道整治工程中的应用[J]. 水运工程, 2022(4): 157-160, 165.
- [2] 申二华, 张永生, 李凯, 等. 圆锥扫描式机载激光测深系统扫描轨迹建模与分析[J]. 测绘科学技术学报, 2016, 33(1): 53-58.
- [3] 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.
- [4] 罗韬. 海洋测绘新技术与误差研究[J]. 地球, 2016(7): 199.
- [5] 徐广袖, 翟国君, 吴太旗, 等. 机载激光测深作业的关键技术问题[J]. 海洋测绘, 2019, 39(2): 45-49, 66.
- [6] 中交天津航道局有限公司. 水运工程测量规范: JTS 131—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

- [7] 宋志宏, 周刚炎, 周凤珍. 多波束测深系统及其比测试验[J]. 水文, 2002, 22(2): 42-45.
- [8] 裴洪超. 利用多波束测深仪及无人船等测量白石水库[J]. 经纬天地, 2018(3): 60-64.
- [9] 梁向棋. 机载激光测深技术在长江航道水深测量中的应用[J]. 中国水运(航道科技), 2018(2): 77-80.
- [10] 崔书珍, 李建, 冯大福. 大比例尺数字测图的发展与展望[J]. 北京测绘, 2015(1): 134-137.
- [11] 徐梦溪, 陆云扬, 谈晓珊, 等. 固态激光雷达传感器技术及无人机载测深应用[J]. 电子测量技术, 2021, 44(15): 89-96.
- [12] 王鑫, 潘华志, 罗胜, 等. 机载激光雷达测深技术研究与进展[J]. 海洋测绘, 2019, 39(5): 78-82.
- [13] 吴俣昊, 崔子浩, 高阳, 等. 无人机载激光线扫描浅滩三维成像研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(2): 143-147.
- [14] 张熠星, 尚建华, 贺岩. 机载激光测深技术的研究进展[J]. 激光技术, 2018, 42(5): 588-592.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 124 页)

参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 商剑平, 刘春泽, 唐颖, 等. 船闸通过能力研究综述[J]. 水运工程, 2018(7): 103-108.
- [3] 吴澎, 商剑平. 船闸通过能力的计算机仿真分析方法研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013: 354-363.
- [4] 胡晓琴. 岷江下游船闸通过能力研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.

- [5] 黄海鸥, 张玮, 李晓春. 基于排队理论的京杭运河船闸通过能力研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, 33(3): 604-607.
- [6] 张玮, 顾丹平, 王启明. 盐邵线扬州段通航分析与仿真研究[J]. 水运工程, 2015(5): 122-127.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 132 页)

参考文献:

- [1] 颜红亮, 周坤, 李鸿忠. 船闸工程金属结构模块设计 BIM 技术应用[J]. 水运工程, 2021(8): 163-168.
- [2] 李玲君, 陈璐. BIM 技术在船闸三角闸门设计中的应用[J]. 水运工程, 2019(6): 147-151.
- [3] 樊金甲, 孟成成, 潘国华, 等. BIM 技术在船闸工程投资管理中的应用[J]. 水运工程, 2021(3): 168-173.
- [4] 刘江林, 宋文涛, 徐军辉, 等. 广东北江蒙里枢纽二线船

- 闸工程 BIM 解决方案[J]. 水运工程, 2018(8): 135-139, 149.
- [5] 张耀坤. BIM 技术在犍为船闸工程施工监理的管控应用[J]. 水运工程, 2021(12): 11-13.
- [6] 周超, 何英发. BIM 技术在船闸施工中的应用研究[J]. 价值工程, 2022, 41(7): 163-165.

(本文编辑 武亚庆)