

doi: 10.6046/zrzyyg.2022436

引用格式: 崔子伟,徐文学,刘焱雄,等. 机载激光测深数据获取及处理技术现状[J]. 自然资源遥感,2023,35(3):1-9. (Cui Z W, Xu W X, Liu Y X, et al. Current status of the acquisition and processing of airborne laser sounding data[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(3): 1-9.)

机载激光测深数据获取及处理技术现状

崔子伟^{1,2}, 徐文学², 刘焱雄², 郭亚栋², 孟祥谦¹, 蒋正坤²

(1. 山东科技大学海洋科学与工程学院, 青岛 266590; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061)

摘要: 水下地形测量是测绘科学的重要分支,与人类开展海洋、湖泊等作业密切相关。在探测浅水区水下地形时,传统声学方法面临船体搁浅风险,被动光学方式则存在测量精度低等缺陷。机载激光测深技术的出现为解决浅水水深测量难题提供了新的手段,其在近岸区域应用可填补浅水区水下地形数据空白。文章首先简要介绍了机载激光测深系统的组成和原理;其次,对激光测深数据的获取做了说明,并重点讨论了机载激光测深数据处理的关键技术,包括波形数据处理、误差修正和点云数据处理等;最后,总结了机载激光测深存在的技术难点及未来的发展趋势。

关键词: 机载激光测深; 激光测深数据获取; 波形数据处理; 误差修正; 点云数据处理

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)03-0001-09

0 引言

随着人类活动范围不断扩大,水域尤其是近岸区的开发逐渐被世界各国关注,掌握近岸水深及水下地形具有重要意义。近岸浅水区通常是礁石、淤泥等复杂环境,开展作业时效率低、难度大、危险性高,故浅水区长期存在大量测深数据空白。当前,测深技术主要分为声学 and 光学 2 类。声学测深主要包括船载声呐单波束和多波束技术^[1-2],由于发射角限制,船载声呐在浅水区测深效率低且面临搁浅风险。被动光学测深技术主要有卫星遥感反演和双介质摄影测量^[3-5],卫星遥感反演可大范围测量水深,但测量精度较低;双介质摄影测量精度不高且缺乏对星载立体影像浅水测深的系统性理论和实践案例。机载激光测深技术利用蓝绿光(波长为 470 ~ 580 nm)在水中衰减系数较小的特性进行浅水区域水下地形测量,具有测量精度高、安全性高、效率高和可进行水陆一体化测量等优点,为浅水区域数据不完善等问题提供了新的解决方案,可作为声学测深在浅水区域测量的有效补充。

迄今为止,机载激光测深系统已经过几十年更新换代。1968 年,美国 Hickman 和 Hog 制造了世界

上第一台激光海水深度测量系统,后续 NASA 成功研制了机载激光水深测量器 (airborne LiDAR bathymetry, ALB),后又推出了具有高速数据记录能力和扫描功能的机载海洋激光雷达系统 (airborne oceanographic LiDAR, AOL)^[6-7]。20 世纪 80 年代后,机载激光测深系统的高速数据记录能力和扫描功能更加完善,定位定姿等技术也融入其中,出现了 Hawk Eye 系列和 LADS 系列等代表产品^[8-10]。21 世纪,机载激光测深系统迈入商业化阶段,世界上实力较强的厂商有美国 Velodyne LiDAR、瑞典 Hexagon AB、奥地利 RiegI 和加拿大 Teledyn Optech 等。国内于 20 世纪 90 年代开展相关研究,中国科学院上海光学精密机械研究所先后研发了三代机载测深系统,第三代 Mapper5000 双频系统已顺利完成南海实验。此外,海军测绘研究所、自然资源部第一海洋研究所、桂林理工大学、深圳大学和山东科技大学等单位也开展了机载激光测深设备研制工作^[8-10]。2017 年,中国自然资源航空物探遥感中心采购了 CZMIL Nova II 系统,并开展实验分析了此系统在我国海岸带区域的应用潜力^[11]。2020 年末,国家标准化管理委员会与国家市场监督管理总局联合发布了《机载激光雷达水下地形测量技术规范》(GB/T 39624—2020)^[12],进一步规范了作业标准。

收稿日期: 2022-11-17; 修订日期: 2023-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目“机载激光测深回波波形分解及折射率改正方法研究”(编号: 41871381)、“基于机载激光测深数据的海底 DEM 生成及底质分类研究”(编号: 41401573)和国家卫星海洋应用中心项目“机载激光雷达测深”(编号: 20CINC-024051-01)共同资助。

第一作者: 崔子伟 (1998-),男,硕士研究生,研究方向为机载激光测深数据处理。Email: lucky_cuiwei@163.com。

通信作者: 徐文学 (1980-),男,博士,副研究员,研究方向为激光扫描数据处理、海洋测绘。Email: xuwx@fio.org.cn。

由于知识产权保护及技术封锁等原因,国内的机载激光测深系统研制依旧处于试验研究阶段,许多核心技术都未彻底攻克。同时,相比快速发展的硬件系统,机载激光测深数据获取及处理的过程还存在诸多难题。因此,本文对机载激光测深技术进行了较为完整的综述,首先简要介绍了机载激光测深的系统组成和测深原理,然后对数据获取和数据处理进行了系统阐述和深入分析,并在此基础上总结了机载激光测深存在的技术难点及未来的发展趋势。

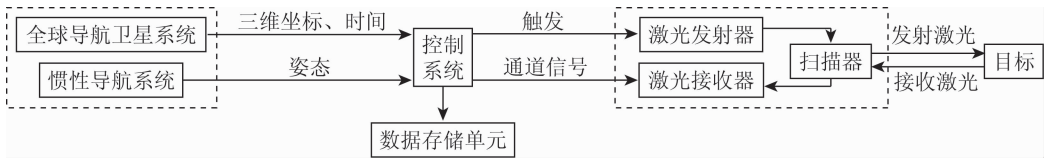


图 1 机载激光测深系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the airborne LiDAR bathymetry system

激光扫描系统包括激光测距单元和扫描器,激光测距单元(激光发射器和接收器)确定距离、回波等信息,扫描器确定激光发射方向,其扫描方式主要有圆形、椭圆形和直线式扫描^[14]。POS 包括全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)和惯性导航系统(inertial navigation system, INS),GNSS 提供实时、全天候和全球性的导航定位服务,INS 用来测定激光发射时刻激光扫描仪的俯仰角、侧滚角及航向角等姿态信息。控制系统负责协调各部件工作,使其保持高精度的时间同步,确保系统正常运行。数据存储单元用来保存各类数据,包括位置、姿态、时间、回波次数及回波强度等。

1.2 机载激光测深原理

机载激光测深系统利用蓝绿光能穿透水体的特性进行水下地形测量,当前主要分为单频和双频测深系统。单频测深系统的激光发射器发射 532 nm 蓝绿光,蓝绿光到达水面时部分发生反射、散射、折射,进入水体的能量被部分吸收或散射后,到达水底再反射回接收器(如图 2 所示);双频测深系统则增加近红外通道以准确探测水面^[10]。在不考虑更多复杂参数的情况下,机载激光测深的水深计算公式^[15]可简化为:

$$D = \frac{c\Delta t \cos\beta}{2n} \quad (1)$$

式中: D 为测得的水深; c 为蓝绿光在空气中传播速度; Δt 为水面与水底回波往返时间差; β 为激光脉冲折射角; n 为水体折射率(不同波长光的水体折射率不同,水体折射率随温度升高而减小,随盐度增大而增大)。

1 机载激光测深技术

1.1 机载激光测深系统

机载激光测深系统是集成激光光学、定位定姿、信号处理等多种先进技术于一体的综合系统(图 1)。除飞行平台外,系统主体包括激光扫描系统、定位定姿系统(position and orientation system, POS)、控制系统和数据存储单元。此外,部分系统可搭载高光谱相机和数字摄像机等用于获取同步影像数据^[13]。

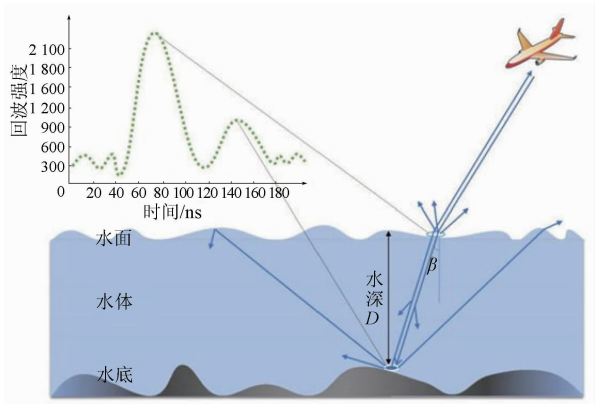


图 2 单频机载激光测深原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of single-wavelength airborne LiDAR bathymetry

2 机载激光测深数据获取

水下地形的数据获取比陆地更为复杂,涉及到设备、大气、水文环境和水底底质等多种影响,具备测量条件后方可开展机载激光测深数据采集的系列工作。

2.1 影响因素

设备因素如飞行距离需保持在基站作用范围内,飞行器与基站之间距离过大使定位信号不稳定,进而影响采集精度^[16]。除设备因素外,自然因素对数据采集产生更多的影响。空气中漂浮的灰尘等微粒凝结成较大颗粒时,激光脉冲遇到它会产生回波^[14]。良好的水文环境有助于外业工作的开展,水面的气泡或浮游生物会导致激光难以穿透水面或水体^[16]。不同底质的激光反射率具有差异性,图 3 展

示了底质分别为沙滩、砂质、海草和珊瑚时不同波长的反射率^[17]。

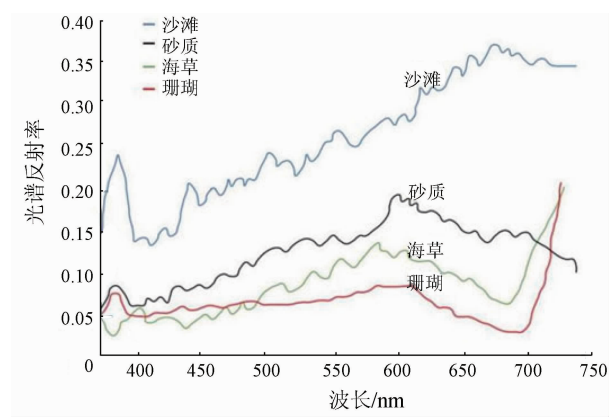


图 3 不同底质光谱反射率曲线^[17]

Fig. 3 In-situ optical reflectance spectra of various substrates^[17]

2.2 数据采集

采集数据前应合理的项目规划并做好相应准备,在获得航飞数据后及时检查数据(图 4)。

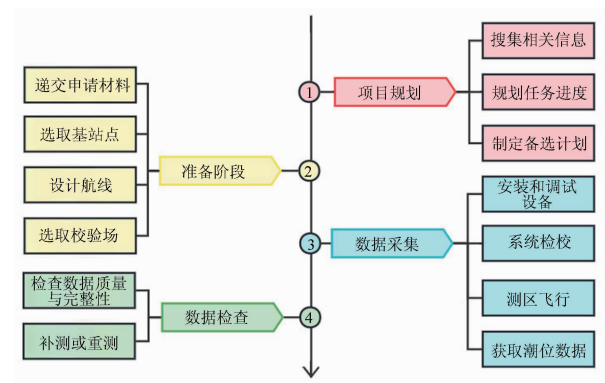


图 4 机载激光测深数据获取流程

Fig. 4 Flowchart of airborne LiDAR bathymetry data acquisition

项目规划需搜集目标区域的天气、气候、经纬度和地貌等资料,据此制定工作计划及应对意外状况的备选计划。准备阶段首先向有关部门递交申请材料,得到批准后展开后续工作;选取基站点主要考虑基站不能距离作业区过远,基站上空无高压线和鸟群等危险因素或明显遮挡物,随着科学发展出现的虚拟基站技术则简化了自架实体基站的工作;设计航线时根据最终成果要求设定航高、飞行范围、扫描频率等参数,确定航线间隔并保证相邻条带间的重叠度要求,计算出飞机加速、减速、掉头的位置,最优化航线可减少飞机持续直线航行导致的惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)的误差累计;选取校验场时,对多通道系统来说,至少有 1 个负责修正陆域和浅水域的陆地校验场和 1 个负责修正浅水域与深水域的水上校验场,陆地校验场应具备明

显建筑物目标,水上校验场应为水质清澈的岸线区域^[18]。正式作业首先安装与调试设备,排除故障,设置相应参数;校验场飞行的目的是进行系统检校,解算俯仰、侧滚、航向角偏移与距离偏移等,后续应用于误差改正;测区飞行应以安全为首,提醒在场人员激光对眼睛的危害性^[19],机载平台启动后要激活惯导^[20];飞行期间需同步测量潮位数据,用于后续修正水深值。飞行结束后,及时查看获取到各类数据的质量及完整性,若出现数据缺失或错误,启动备选计划补测或重测。

3 机载激光测深数据处理

机载激光测深系统采集的原始数据主要包括: POS 数据、基站数据、码盘数据、波形数据、辅助数据(影像、视频数据)等^[21],经过数据预处理、波形数据处理、误差修正、点云数据处理后,获取水陆全覆盖地形图,如图 5 所示。

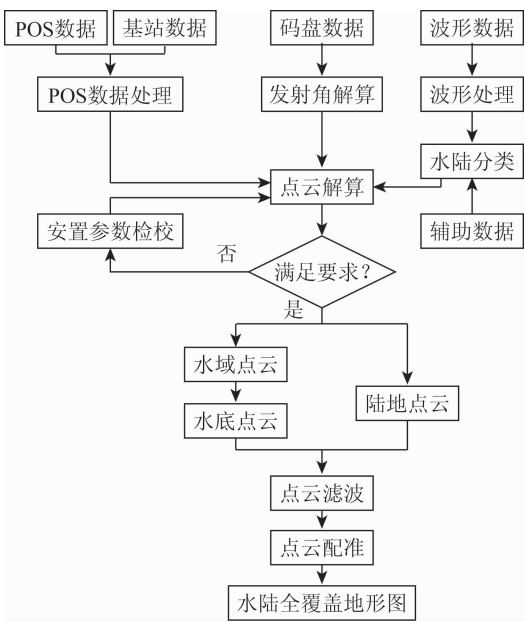


图 5 机载激光测深数据处理流程

Fig. 5 Flowchart of airborne LiDAR bathymetry data processing

3.1 数据预处理

数据预处理主要包括 POS 数据处理和安置参数检校过程。

3.1.1 POS 数据处理

POS 利用动态后处理差分技术(post processed kinematic, PPK),根据机载 GNSS 接收机和基站数据计算激光脉冲发射时刻的初始位置,再通过 IMU 数据获取飞行平台的姿态变化增量,应用卡尔曼滤波器和反馈误差控制迭代获取激光脉冲发射时刻的空

间位置和飞行平台的侧滚角、俯仰角及航向角数据。

3.1.2 安置参数检校

安装 IMU 时无法保证 IMU 与激光扫描仪坐标系完全平行,导致机载激光测深系统存在距离和角度安置参数误差^[22]。设备出厂时已进行系统安置参数检校,但应用阶段依然需要检校过程,传统方法为人工解算,把航带分为同向或异向、等高或异高,结合校验场中的明显目标,一般按侧滚角、俯仰角、航向角的顺序校正,通过经验公式多次迭代,尽量消除不同航带同名点间差异。人工解算难免出现偏差,因此很难分辨出真正意义上的同名点,黎东等^[23]提出一种基于共面约束的自动检校方法,于点云中自动提取尖顶或房屋顶平面,建立连接平面关系,基于激光脚点坐标计算公式和共面约束条件,通过平差解算得安置误差参数。

3.2 波形数据处理

机载激光测深系统常用记录方式为全波形回波,波形数据处理主要涉及波形去噪、反卷积、波峰探测与数值模拟方法。由于激光脉冲在水中和空气中传播特性存在差异,还需利用波形数据实现水陆分类,为后续数据处理奠定基础。

3.2.1 波形去噪

噪声可分为外界背景噪声与系统内部噪声,全波形数据处理首要过程通常是波形去噪。高斯滤波是一种线性平滑滤波器,能降低数据尖锐变化,本质是将波形与高斯函数进行卷积计算。移动平滑要选择合理窗口长度,取窗口内平均值作为该点数据,滑动窗口得到所有点的平均值。Savitzky - Golay (S - G) 滤波可看作移动加权平滑滤波算法,基于局部数据多项式拟合,通过滑动窗口对所有数据平滑处理^[24]。小波去噪首先对信号进行小波分解得到系数,筛选小于所设阈值的系数,从而达到去噪目的,由其衍生出的自适应阈值小波去噪方法则优化了阈值选取范围,避免了去除有效信号的问题。

3.2.2 反卷积

接收波形可视为系统发射波形与目标反射截面的卷积,反卷积可理解为其逆向过程,由接收波形反算目标反射截面。傅里叶反卷积 (Fourier transform deconvolution, FTD) 是最简的反卷积算法,通过傅里叶变换在频域中直接进行逆滤波去除发射信号,但其受噪声干扰大,维纳滤波反卷积 (Wiener filter deconvolution, WFD) 则是 FTD 的改进^[25]。理查德森 - 露西反卷积 (Richardson - Lucy deconvolution, RLD) 最初是一种图像复原算法,派生自贝叶斯理论,属于极大似然估计法,该算法也可用于波形数据处理^[26]。非负最小二乘算法 (nonnegative least

squares, NNLS) 是在时域内计算使波形估计值与实际波形间平方误差最小的非负解,实质是将反卷积转化为矩阵分解问题^[27]。

3.2.3 波峰探测

波峰探测可获取全波形数据的峰值位置,常规方法有极大值检测和平均方差函数 (average square difference function, ASDF) 等。极大值检测即查找波形中局部极大值点,得到结果后应剔除无效极大值点。ASDF 则是通过计算发射波形与接收波形的相关性,将相关性极大值点作为信号位置^[28]。

3.2.4 数值模拟

数值模拟的核心是以合适的函数拟合波形。激光在穿透水面前于空气中传播,较严格遵守高斯函数规律,因此常用高斯函数^[29]拟合水面,若考虑激光穿透水面瞬间发生的衰减作用,可将水面回波表示为高斯与指数函数的卷积^[30]。针对水底回波,拟合方法还有韦伯分解函数^[31]等。水深较浅时可忽略水体后向散射的影响,仅考虑水面和水底回波,但水体回波影响较大时,可利用三角形函数、四边形函数和指数函数来拟合水体回波^[32-33]。数值模拟本质是最优化问题,初始参数的选择与后续迭代求解模型的算法都很关键,常用的求解参数方法有非线性阻尼最小二乘方法 (levenberg - marquardt, LM) 和期望最大化方法 (expectation - maximization, EM)^[34]等。

3.2.5 算法组合及改进

波形去噪可降低噪声,但无法真正提取信息。反卷积则是从目标反射截面中检测有效回波并提取相关信息。波峰探测能提取峰值,但可能提取伪极大值。数值模拟将波形参数优化后提取信号特征,间接确定信号位置,但需可靠的初始参数与算法。由于水文环境过于复杂,单一方法难以满足信息提取精度要求时,有研究则进行了方法的组合及改进,例如:基于 B 样条的方法^[35]、由粗到精检测方法^[36]、基于分层异构模型的拟合算法^[37]、顾及水面、水体和水底 (surface, volume, bottom, SVB) 算法^[38]和极浅水波形分解方法^[39]等。

3.2.6 水陆分类

机载激光测深系统可同时测定水域与陆地,从众多数据中识别水陆波束成为数据处理关键。水陆分类混淆区域往往是泥滩或极浅水域,蓝绿激光回波信号易发生重叠,增加红外光辅助通道可准确探测陆地,多波段激光的组合使用可提高分类精度^[40]。王丹韵等^[41]提出的基于单频机载激光测深海陆回波自动分类方法不借助其他波段激光也可实现分类。此外,基于波形的分类方法还有 Ji 等^[42]根

据不同波形形态特征提出的随机森林特征选择模型,以及胡善江等^[43]提出的基于深度学习的海陆波形分类等。影像辅助法和基于点云的分类也可进行水陆识别,影像辅助法借助相机和卫星等获取的影像资料从点云中匹配瞬时分界线,但可能存在影像与点云数据时间不同步的问题^[44]。基于点云的分类方法则有 Smeekaert 等^[45]提出的支持向量机模型(support vector machines,SVM),以及王晓阳^[46]提出的三维点云高程阈值分类法等。

3.3 误差修正

机载激光测深涉及的技术复杂,削弱误差影响是确保该技术有效性的前提,误差来源可分为系统本身、外部环境和其他因素^[47-49],具体如表1所示。

表1 机载激光测深误差分析

Tab.1 Error analysis of airborne LiDAR bathymetry

误差项		误差源
系统本身	量测时间误差	各部件工作时间并非完全同步,脉冲位置估计和非线性信号处理导致检测时间不准确
	设备安置误差	系统扫描轴偏转、IMU 角度不平行
外部环境	光速测量误差	不同介质中光速不同,但光速数值较大且在浅水测深,所以此影响较小
	大气传输误差	在大气中传输因吸收或散射导致能量损耗
	波浪潮汐变化误差	激光入射瞬间波浪和潮汐变化导致瞬时水深偏差
	折射误差	大气与水密度不同产生折射现象,大气与水面间的折射现象影响较大,而在水体中的影响相对较小
	水中散射误差	散射效应主要分为后向散射效应和前向散射效应
	不规则地形起伏误差	水下地形不规则,具有不同坡度、曲率和粗糙度
其他因素	数据计算精度误差	处理数据时涉及到矩阵坐标变换等复杂过程,产生计算精度误差

误差修正的研究方向主要分为综合修正和单一误差改正。赵建虎等^[50]采用逐步回归法构建了一种改进的顾及水深、水体含沙量、波束扫描角和传感器高度等参数的深度偏差修正模型,可满足国际海道测量组织的规定标准;叶修松等^[51]着重讨论了IMU 姿态测量误差影响,并结合扫描角误差、测距误差和平台坐标系原点误差进行了计算分析;Yang 等^[52]提出了一种基于海面剖面 and 射线追踪的空气-水面折射校正方法,首先利用最小二乘法和波浪谱拟合 3D 海面,再根据海面坡度,通过追踪空气与水面分界处的每个激光传输路径来校正激光点地理位置偏差;Xu 等^[53]则采用基于维度特征的邻域自适应方法计算激光脉冲入水瞬间的海面法向量,并结合激光脉冲传播的几何模型进行顾及海面波动的折

射误差改正。

3.4 点云数据处理

生成初始点云后,还需进行去噪、滤波和配准等处理。点云去噪针对随机且无规律的离群点,如飞鸟、云等明显高于或低于目标地物的点;点云滤波是从点云数据中分离地面点和非地面点的过程;点云配准则是将航带点云拼接为完整测区点云的过程。

3.4.1 点云滤波

目前主流的点云滤波算法有:数学形态学滤波、坡度滤波、内插滤波、基于不规则三角网滤波和布模拟滤波等方法^[54-55],但针对海底数据的点云滤波方法还较少。Yang 等^[56]提出一种双向布模拟滤波方法,首先建立传递迭代趋势面以消除负异常及实现海底地形连续表示,根据坡度、深度标准偏差、高斯曲率和粗糙度特征因子计算海底地形复杂度;再计算子区域地形复杂度和自适应距离阈值并获取自定义参数;最后进行分区域滤波,建立基于双向布模拟滤波方法的滤波面。

3.4.2 点云配准

水面开阔导致水域目标物不如陆地标志清晰,且针对机载激光测深数据的点云配准技术尚未成熟^[57]。目前,Yang 等^[58]和 Wang 等^[59]研究利用平差实现声学 with 机载激光测深数据的融合,对系统偏差进行精度补偿;Ji 等^[60]提出由粗到精航带拼接模型可解决点云密度低等导致的航带拼接困难,根据重叠区域不同特征利用不同算法对水域和陆域分类配准;Xu 等^[61]提出基于特征曲线的数据配准方法,解决了数据特征稀疏、点云密度低和特征提取困难等配准难题。

4 总结与展望

近年来,机载激光测深硬件设备趋于小型化、简单化与多功能。小型化意味着系统重量轻,方便携带与搭载;简单化是对内部传感器等进行改进,降低硬件结构复杂度;多功能即获取全波形数据、点云数据、光谱数据和影像数据等多元数据。机载激光测深技术的硬件研制日益完善,也出现了一些具备基础功能的商业化数据处理软件,但商业化数据处理软件不能完全满足需求,且在数据处理方面还需解决如下问题:

1)在较深水域,水底信号微弱且受噪声影响,难以准确分辨真实水底位置;在极浅水域,则出现水底和水面波峰叠加的情况,如何从冗杂的波形中分解或提取出有效信号成为波形数据处理的关键。

2) 优化测深精度需对激光传播路径的各类误差进行修正处理,同时要兼顾误差修正算法的空间复杂度与时间复杂度。

3) 水下地形的点云滤波和点云配准等技术尚未成熟,且部分算法依旧参考陆域的处理方法,可能导致数据质量不佳,进一步提高水下地形点云密度对数据处理方法有更高要求。

随着机载激光测深技术的不断发展,未来机载激光测深系统需突破测量水下地形的单一功能,实际应用于水体参数反演、底质分类和目标探测等。国际上机载激光测深系统已体现出巨大的经济效应,因此,我国开展高性能机载激光测深系统研发及数据处理研究,对岛礁、河流和海岸带等监管与保护工作具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] Harold K F. Multibeam bathymetric sonar: Sea beam and hydro chart[J]. Marine Geodesy, 1980, 4(2): 77–93.
- [2] 王文杰. 基于单波束多波束测深系统的海洋航道测量方法[J]. 电子测量技术, 2019, 42(8): 45–51.
Wang W J. Sea channel survey method considering single beam multi beam bathymetric system[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(8): 45–51.
- [3] 曹彬才. 遥感测深数据处理方法研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2017.
Cao B C. A study of remotely-sensed data processing in bathymetry[D]. Zhengzhou: PLA Strategic Support Force Information Engineering University, 2017.
- [4] 马毅, 张杰, 张靖宇, 等. 浅海水深光学遥感研究进展[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(3): 331–351.
Ma Y, Zhang J, Zhang J Y, et al. Progress in shallow water depth mapping from optical remote sensing[J]. Advances in Marine Science, 2018, 36(3): 331–351.
- [5] Wright A E, Conlin D L, Shope S M. Assessing the accuracy of underwater photogrammetry for archaeology: A comparison of structure from motion photogrammetry and real time kinematic survey at the east key construction wreck[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(11): 849.
- [6] Muirhead K, Cracknell A P. Airborne LiDAR bathymetry[J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(5): 597–614.
- [7] 陈文革, 黄铁侠, 卢益民. 机载海洋激光雷达发展综述[J]. 激光技术, 1998(3): 21–26.
Chen W G, Huang T X, Lu Y M. Survey of airborne oceanic LiDAR[J]. Laser Technology, 1998(3): 21–26.
- [8] 翟国君, 吴太旗, 欧阳永忠, 等. 机载激光测深技术研究进展[J]. 海洋测绘, 2012, 32(2): 67–71.
Zhai G J, Wu T Q, Ouyang Y Z, et al. The development of airborne laser bathymetry[J]. Hydrographic Surveying Charting, 2012, 32(2): 67–71.
- [9] 秦海明, 王成, 刁晓环, 等. 机载激光雷达测深技术与应用研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(4): 617–624.
Qin H M, Wang C, Xi X H, et al. Development of airborne laser bathymetric technology and applications[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(4): 617–624.
- [10] 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.
Liu Y X, Guo K, He X F, et al. Research progress of airborne laser bathymetry technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(9): 1185–1194.
- [11] 李奇, 王建超, 韩亚超, 等. 基于 CZMIL Nova 的中国海岸带机载激光雷达测深潜力分析[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(1): 184–190. doi:10.6046/gtzyyg.2020.01.25.
Li Q, Wang J C, Han Y C, et al. Potential evaluation of China's coastal airborne LiDAR bathymetry based on CZMIL Nova[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(1): 184–190. doi:10.6046/gtzyyg.2020.01.25.
- [12] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 39624—2020 机载激光雷达水下地形测量技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. GB/T 39624—2020 Technical specification for underwater topographic survey of airborne LiDAR[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2020.
- [13] 王丹韵. 机载激光测深回波信号探测技术研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2018.
Wang D D. Research on signal detection for airborne LiDAR bathymetry[D]. Zhengzhou: PLA Strategic Support Force Information Engineering University, 2018.
- [14] 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.
Xu G X, Zhai G J, Wu T Q, et al. The key technical issues on airborne LiDAR bathymetry operation[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2019, 39(2): 45–49.
- [15] 叶修松. 机载激光水深探测技术基础及数据处理方法研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2010.
Ye X S. Research on principle and data processing methods of airborne laser bathymetric technique[D]. Zhengzhou: PLA Strategic Support Force Information Engineering University, 2010.
- [16] 吴芳, 金鼎坚, 张宗贵, 等. 基于 CZMIL 测深技术的海陆一体化地形测量初探[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(4): 173–180. doi:10.6046/zrzyyg.2021.10.07.
Wu F, Jin D J, Zhang Z G, et al. A preliminary study on land-sea integrated topographic surveying based on CZMIL bathymetric technique[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(4): 173–180. doi:10.6046/zrzyyg.2021.10.07.
- [17] 曾凯, 许占堂, 杨跃忠, 等. 浅海底质高光谱反射率测量系统的设计及应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(2): 579–585.
Zeng K, Xu Z T, Yang Y Z, et al. Design and application of reflectance measurement system for sea bottom in optically shallow water[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(2): 579–585.
- [18] 金鼎坚, 吴芳, 于坤, 等. 机载激光雷达测深系统大规模应用测试与评估——以中国海岸带为例[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(s2): 9–23.
Jin D J, Wu F, Yu K, et al. Large-scale application test and evaluation of an airborne LiDAR bathymetry system: A case study in China's coastal zone[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49

- (s2):9-23.
- [19] 颜炳玉. 激光对人体的损伤,激光产品的分级标准及安全防护措施[J]. 应用激光,1987(4):172-176.
Yan B Y. The damage of laser to human body and the methods of protection[J]. Applied Laser,1987(4):172-176.
- [20] 王成,习晓环,杨学博,等. 激光雷达遥感导论[M]. 北京:高等教育出版社,2022:50.
Wang C,Xi X H,Yang X B,et al. Introduction to LiDAR remote sensing[M]. Beijing:Higher Education Press,2022:50.
- [21] 王越. 机载激光浅海测深技术的现状和发展[J]. 测绘地理信息,2014,39(3):38-42.
Wang Y. Current status and development of airborne laser bathymetry technology[J]. Journal of Geomatics,2014,39(3):38-42.
- [22] 曲直,卢秀山,左建章,等. 机载POS系统中惯性测量单元精度检校方法[J]. 测绘科学,2011,36(5):131-133.
Qu Z,Lu X S,Zuo J Z,et al. Calibration method of IMU on airborne POS[J]. Science of Surveying and Mapping,2011,36(5):131-133.
- [23] 黎东,王成,习晓环,等. 共面约束的机载LiDAR IMU安置角误差自动检校方法[J]. 测绘科学,2017,42(9):98-103.
Li D,Wang C,Xi X H,et al. An automatic bore-sight calibration method for airborne LiDAR based on co-planar constraints[J]. Science of Surveying and Mapping,2017,42(9):98-103.
- [24] 王延存. 机载激光雷达全波形数据处理研究[D]. 青岛:山东科技大学,2019.
Wang Y C. Research on full-waveform data processing of airborne LiDAR system[D]. Qingdao:Shandong University of Science and Technology,2019.
- [25] Jutzi B,Stilla U. Range Determination with waveform recording laser systems using a Wiener filter[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2006,61(2):95-107.
- [26] Biggs D S C,Anderws M. Acceleration of iterative image restoration algorithms[J]. Applied Optics,1997,36(8):1766-1775.
- [27] Lawson C L,Hanson R J. Solving least squares problems[M]. Englewood Cliffs,NJ:Prentice-Hall,1974:50-60.
- [28] Wagner W,Roncat A,Melzer T,et al. Waveform analysis techniques in airborne laser scanning[C]// International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing,2007,36(3):413-418.
- [29] 姚春华,陈卫标,臧华国,等. 机载激光测深系统的最小可探测深度研究[J]. 光学学报,2004(10):1406-1410.
Yao C H,Chen W B,Zang H G,et al. Study of the capability of minimum depth using an airborne laser bathymetry[J]. Acta Optica Sinica,2004(10):1406-1410.
- [30] Wong H,Antoniou A. Characterization and decomposition of waveforms for laser 500 airborne system[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,1991,29(6):912-921.
- [31] Abdallah H,Bailly J S,Baghdadi N N,et al. Potential of space-borne LiDAR sensors for global bathymetry in coastal and inland waters[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2013,6(1):202-216.
- [32] 李凯,张永生,童晓冲,等. 不同函数拟合水体后向散射波形对激光测深精度的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(4):548-554.
Li K,Zhang Y S,Tong X C,et al. The impact of different fitting functions for water backscatter waveforms on the accuracy of laser sounding[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2018,43(4):548-554.
- [33] 丁凯. 单波段机载测深激光雷达全波形数据处理算法及应用研究[D]. 深圳:深圳大学,2018.
Ding K. Airborne LiDAR bathymetry full waveform data processing methods and application study[D]. Shenzhen:Shenzhen University,2018.
- [34] 郭锴,刘焱雄,徐文学,等. 机载激光测深波形分解中LM与EM参数优化方法比较[J]. 测绘学报,2020,49(1):117-131.
Guo K,Liu Y X,Xu W X,et al. Comparison of LM and EM parameter optimization methods for airborne laser bathymetric full-waveform decomposition[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2020,49(1):117-131.
- [35] Shen X,Li Q,Wu G,et al. Decomposition of LiDAR waveforms by B-spline-based modeling[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2017,128(3):182-191.
- [36] 王丹韵,徐青,邢帅,等. 一种由粗到精的机载激光测深信号检测方法[J]. 测绘学报,2018,47(8):1148-1159.
Wang D D,Xu Q,Xing S,et al. A coarse-to-fine signal detection method for airborne LiDAR bathymetry[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2018,47(8):1148-1159.
- [37] 亓超,宿殿鹏,王贤昆,等. 基于分层异构模型的机载激光测深波形拟合算法[J]. 红外与激光工程,2019,48(2):114-121.
Qi C,Su D P,Wang X K,et al. Fitting algorithm for airborne laser bathymetric waveforms based on layered heterogeneous model[J]. Infrared and Laser Engineering,2019,48(2):114-121.
- [38] Roland S,Gottfried M,Martin P,et al. Design and evaluation of a full-wave surface and bottom-detection algorithm for LiDAR bathymetry of very shallow waters[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2019,150:1-10.
- [39] Yang F,Qi C,Su D,et al. An airborne LiDAR bathymetric waveform decomposition method in very shallow water: A case study around Yuanzhi Island in the South China Sea[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2022,109:102788.
- [40] Guenther G C,Larocque P E,Lillycrop J W. Multiple surface channels in scanning hydrographic operational airborne LiDAR survey (SHOALS) airborne LiDAR[C]//Proceedings of 1994 International Society for Optical Engineering. Bergen, Norway: SPIE,1994:422-431.
- [41] 王丹韵,邢帅,徐青,等. 单频机载激光测深海陆回波自动分类方法[J]. 测绘学报,2022,51(5):750-761.
Wang D D,Xing S,Xu Q,et al. Automatic sea-land waveform classification method for single-wavelength airborne LiDAR bathymetry[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2022,51(5):750-761.
- [42] Ji X,Tang Q,Xu W,et al. Island feature classification for single-wavelength airborne LiDAR bathymetry based on full-waveform parameters[J]. Applied Optics,2021,60(11):3055-3061.
- [43] 胡善江,贺岩,陶邦一,等. 基于深度学习的机载激光海洋测深海陆波形分类(英文)[J]. 红外与激光工程,2019,48(11):165-172.
Hu S J,He Y,Tao B Y,et al. Classification of sea and land waveforms based on deep learning for airborne laser bathymetry[J]. In-

- frared and Laser Engineering, 2019, 48(11): 165 – 172.
- [44] Fernandez – Diaz J C, Glennie C L, Carter W E, et al. Early results of simultaneous terrain and shallow water bathymetry mapping using a single – wavelength airborne LiDAR sensor [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 7(2): 623 – 635.
- [45] Smeeckaert J, Clément M, David N. Classification of water surfaces using airborne topographic LiDAR data [C]// International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS), 2013, XL – 1/W1: 321 – 326.
- [46] 王晓阳. 基于机载激光测深波形和点云数据的水陆分类研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
Wang X Y. Water – land classification based on waveform and point cloud data of airborne LiDAR bathymetry [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021.
- [47] 王鑫, 潘华志, 罗胜, 等. 机载激光雷达测深技术与进展 [J]. 海洋测绘, 2019, 39(5): 78 – 82.
Wang X, Pan H Z, Luo S, et al. Bathymetric technology and research status of airborne LiDAR [J]. Hydrographic Surveying Charting, 2019, 39(5): 78 – 82.
- [48] Su D, Yang F, Ma Y, et al. Propagated uncertainty models arising from device, environment, and target for a small laser spot airborne LiDAR bathymetry and its verification in the South China Sea [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(5): 3213 – 3231.
- [49] Patrick W, Hans – Gerd M, Katja R, et al. Analysis and correction of ocean wave pattern induced systematic coordinate errors in airborne LiDAR bathymetry [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 128: 314 – 325.
- [50] 赵建虎, 吴敬文, 赵兴磊, 等. 一种改进的机载激光测深深度偏差模型 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2019, 44(3): 328 – 333.
Zhao J H, Wu J W, Zhao X L, et al. A correction model for depth bias in airborne LiDAR bathymetry systems [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(3): 328 – 333.
- [51] 叶修松, 张传定, 王爱兵, 等. 机载激光水深测量误差分析 [J]. 测绘科学技术学报, 2008, 25(6): 400 – 402.
Ye X S, Zhang C D, Wang A B, et al. Analysis of the airborne laser scanning bathymetry errors [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2008, 25(6): 400 – 402.
- [52] Yang F, Su D, Ma Y, et al. Refraction correction of airborne LiDAR bathymetry based on sea surface profile and ray tracing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(11): 6141 – 6149.
- [53] Xu W, Guo K, Liu Y, et al. Refraction error correction of airborne LiDAR bathymetry data considering sea surface waves [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 102: 102402.
- [54] 杨安秀. 基于多元地形特征的机载 LiDAR 点云抽稀算法研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.
Yang A X. A point cloud thinning method of airborne LiDAR based on multivariate terrain features [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.
- [55] Zhang W, Qi J, Wan P, et al. An easy – to – use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation [J]. Remote Sensing, 2016, 8(6): 501.
- [56] Yang A, Wu Z, Yang F, et al. Filtering of airborne LiDAR bathymetry based on bidirectional cloth simulation [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 163: 49 – 61.
- [57] 张凡, 徐文学, 唐玲, 等. 机载激光测深数据配准方法比较 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 2021, 13(6): 678 – 685.
Zhang F, Xu W X, Tang L, et al. Comparison of airborne LiDAR bathymetry data refistration methods [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 13(6): 678 – 685.
- [58] Yang F, Su D, Zhang K, et al. Mosaicing of airborne LiDAR bathymetry strips based on Monte Carlo matching [J]. Marine Geophysical Research, 2017, 38(3): 303 – 311.
- [59] Wang X, Yang F, Zhang H, et al. Registration of airborne LiDAR bathymetry and multibeam echo sounder point clouds [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 20(3): 1 – 5.
- [60] Ji X, Yang B, Tang Q, et al. A coarse – to – fine strip mosaicing model for airborne bathymetric LiDAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(10): 8129 – 8142.
- [61] Xu W, Zhang F, Jiang T, et al. Feature curve – based registration for airborne LiDAR bathymetry point clouds [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 112: 102883.

Current status of the acquisition and processing of airborne laser sounding data

CUI Ziwei^{1,2}, XU Wenxue², LIU Yanxiong², GUO Yadong², MENG Xiangqian¹, JIANG Zhengkun²

(1. College of Ocean Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Abstract: As an essential branch of surveying and mapping science, underwater topographic surveys are closely related to human operations in oceans and lakes. For underwater topography detection in shallow – water areas, conventional acoustic methods face the hull stranding risk, and passive optical methods have low survey accuracy. The airborne laser sounding is a novel means for bathymetric surveys in shallow – water areas, and its application in offshore areas can fill the gap of underwater topography data in shallow – water areas. This study presents a brief

introduction to the composition and principle of the airborne laser sounding system, followed by a description of laser sounding data acquisition. Furthermore, this study highlights the critical processing technologies for airborne laser sounding data, including waveform data processing, error correction, and point cloud data processing. Finally, this study summarizes the technical difficulties and developmental trends of airborne laser sounding.

Keywords: airborne laser sounding; laser sounding data acquisition; waveform data processing; error correction; point cloud data processing

(责任编辑: 张 仙)

=====

下 期 要 目

王子浩	基于空间模糊 C 均值聚类 and 贝叶斯网络的抗噪声遥感图像变化检测
易邦进	基于时间序列 InSAR 技术的滇缅边境山区地质灾害隐患探测
肖 晖	质量引导下的最小二乘相位解缠算法
袁 红	基于遥感数据的川西高原光伏开发适宜性研究
李新同	基于深度学习的闽浙赣 GPM 降水产品降尺度方法
陈 健	基于 Sentinel - 2 数据多特征优选的农作物遥感识别
何苏玲	基于多模型的县域土地利用/土地覆盖模拟
黄 卓	基于生态系统服务变化的河西地区生态修复分区
杜晓川	基于 GF - 2 影像和随机森林算法在花岗伟晶岩提取中的应用
张治梅	土壤盐渍化对滨海湿地生态环境质量的影响——以黄河三角洲为例
王 宁	基于多源异构数据斜坡地质灾害隐患易发性评价研究——以龙岗区为例
钟骁勇	基于多源环境变量和随机森林模型的江西省耕地土壤 pH 值空间预测制图
王月香	基于遥感的城市扩张方向和类型的热效应
李 雷	融合超像素和多属性形态学轮廓方法的高光谱图像分类
田 钊	居民碳排放的遥感监测与分析