

无人机载 LiDAR 测深系统进行海岸带测绘的可行性分析

宿殿鹏^{1,2}, 阳凡林^{1,2}, 陈亮³, 王仕强⁴, 陈雨³, 陈涛⁴

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590; 2. 自然资源部 海洋测绘重点实验室, 山东 青岛 266590; 3. 中测瑞格测量技术(北京)有限公司, 北京 100125; 4. 北斗智云(天津)科技有限公司, 天津 300160)

摘要: 如何快速获取高精度、全覆盖的海岸带浅水地形数据一直是海洋测绘的难点之一。无人机载 LiDAR 测深是一种有效的海岸带水陆地形一体化测量技术, 利用 RIEGL VQ-840-G ALB 系统在山东青岛海域开展了无人机载 LiDAR 测深实验。基于获得的青岛实测 ALB 数据, 从海底点密度、最浅探测深度、最大探测深度、测深精度四个方面定量分析无人机载 LiDAR 测深系统的测量性能, 并进一步分析了无人机载 LiDAR 测深系统对海岸带测绘的可行性。实验结果表明, 该无人机载 LiDAR 测深青岛实验的水深点密度达 603 个/m², 最浅探测深度仅 0.16 m, 最大探测深度(基于平均海面)达 6.14 m; 通过与船载单波束测深数据和陆上 RTK 数据对比, 水下测深精度为 17.6 cm, 陆上高程精度为 5.2 cm, 能够满足海岸带测绘的要求, 相关成果可以为我国无人机载 LiDAR 测深技术研究与应用提供参考。

关键词: 无人机载 LiDAR 测深; RIEGL VQ-840-G 系统; 最浅探测深度; 最大探测深度; 测深精度; 海岸带一体化测绘

中图分类号: P229

文献标志码: A

Feasibility analysis of UAV-airborne LiDAR bathymetry system for coastal zone mapping

SU Dianpeng^{1,2}, YANG Fanlin^{1,2}, CHEN Liang³, WANG Shiqiang⁴, CHEN Yu³, CHEN Tao⁴

(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Key Laboratory of Oceanic Surveying and Mapping, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Qingdao, Shandong 266590, China; 3. RCG Geosystems (Beijing) Co. Ltd, Beijing 100125, China; 4. Beidou Geocloud Company Limited, Tianjin 310160, China)

Abstract: How to quickly obtain high-accuracy and full-coverage shallow water terrain data of coastal zones has always been one of the difficulties of surveying and mapping. UAV-airborne LiDAR bathymetry is an effective measurement technique for the integrated measurement of land and water terrain in coastal zones. By using the RIEGL VQ-840-G ALB system, the UAV-airborne LiDAR bathymetric experiment was carried out in the sea area of Qingdao, Shandong Province. Based on the obtained ALB data in Qingdao, the measurement performance of the UAV-ALB system was quantitatively analyzed from four aspects (bottom point density, minimum detection depth, maximum detection depth, and bathymetric accuracy). Then, the feasibility of the UAV-ALB for coastal zone mapping was further analyzed. The experimental results show that the bottom point density of this UAV-airborne LiDAR bathymetry reaches 603/m², with the minimum detection depth of only 0.16 m and the maximum detection depth (based on the average seasurface) of 6.14 m. Through comparison with shipborne single beam sounding data

收稿日期: 2022-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(52001189, 41930535); 山东科技大学科研创新团队支持计划项目(2019TDJH103)

作者简介: 宿殿鹏(1988—), 男, 山东莱州人, 副教授, 博士, 主要从事机载 LiDAR 测深数据处理与应用方面研究。

阳凡林(1974—), 男, 湖北荆州人, 教授, 博士, 主要从事海底地形测量和海洋定位导航方面研究, 本文通信作者。

E-mail: flyang@126.com

and onshore RTK data, it is found that the underwater bathymetric accuracy is 17.6 cm and the onshore elevation accuracy is 5.2 cm. Meeting the requirements of coastal zone mapping, the proposed technique can provide some reference for the research and application of UAV-ALB technology in China.

Key words: UAV-airborne LiDAR bathymetry; RIEGL VQ-840-G system; minimum detection depth; maximum detection depth; bathymetric accuracy; integrated surveying and mapping of coastal zones

海底地形数据可为生态环境保护、灾害防治、旅游开发以及交通规划提供基础地理数据支撑^[1],也是相关海洋科学研究、海洋工程应用、海洋军事决策的重要数据来源^[2]。然而,由于海岸带、海岛礁周边浅水海域地形变化大、环境复杂,采用常规的海洋测绘方式效率低、成本高、难度大、风险高,会存在一定的测量空白区域(图 1)。如何突破复杂浅水海域快速高精度测量,成为当前亟待解决的海洋测绘技术问题。



图 1 复杂浅水区域传统水下测量方式的局限性

Fig. 1 Limitations of traditional underwater survey methods in complex shallow water area

机载 LiDAR 测深(airborne LiDAR bathymetry, ALB)同时具备水陆地形测量功能,具有测量效率高、覆盖面广、水陆两用等诸多优势。其测深能力受水质限制,理论最大测深一般不超过 70 m^[3],可以解决复杂浅水水域测量的技术难题,特别适用于浅水海岸带附近区域等复杂地形的快速探测^[4],实现海岸线水上水下地形的无缝拼接^[5]。由于机载 LiDAR 测深和船载声学测深(图 2)在测量区域和测量范围方面具有一定的互补性,将二者数据融合可以获得水上水下全覆盖三维地形数据(图 2(c))。早期多采用有人机搭载测深 LiDAR 设备获取水陆一体化空间数据^[6-7],随着技术发展,目前出现了体积更小、质量更轻的便携式测深 LiDAR 和无人机平台,无人机载 LiDAR 测深系统应运而生。相较于有人机载 LiDAR 测深系统,无人机载 LiDAR 测深(UAV-borne LiDAR bathymetry, UAV-ALB)作业空域申请更为方便,成本控制也更有效^[8]。现阶段,无人机载 LiDAR 测深系统在国内尚未得到广泛应用。

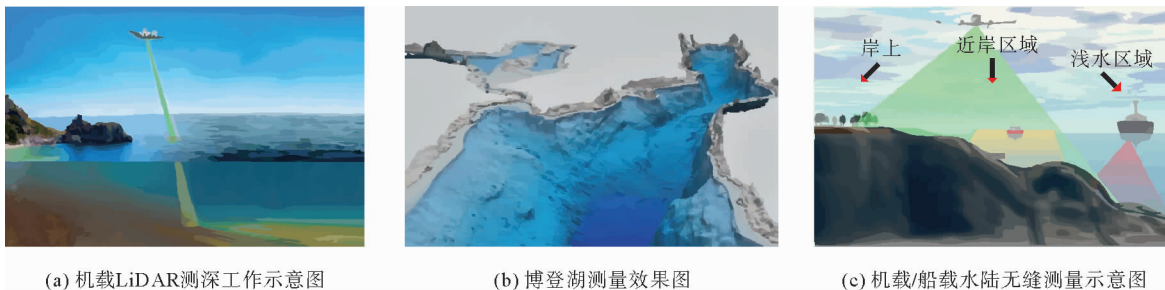


图 2 机载 LiDAR 测深机理及应用

Fig. 2 Principle and application of airborne LiDAR bathymetry

为全面深入了解、验证无人机载 LiDAR 测深系统测量性能及其适用性,特别是在我国海岸带区域作业

的可行性,利用 RIEGL VQ-840-G ALB 系统,在山东青岛开展了无人机载 LiDAR 测深综合实验,获得一批有价值的测量数据。从测点密度、最浅探测深度、最大探测深度和测深精度 4 个方面定量分析无人机载 LiDAR 测深系统的测量性能,并进一步分析采用无人机载 LiDAR 测深系统进行海岸带测绘的可行性。

1 测深原理及典型设备

1.1 测深原理

机载 LiDAR 测深是一种主动式遥感测量技术,利用蓝绿色激光能够穿透水体的传播特性实现水深测量。海水对波长为 520~535 nm 的绿激光吸收最弱,因此该波长被称为“海洋光学窗口”^[9]。基于这一光学特性,研发出机载 LiDAR 测深系统,按照激光波段数量分为单色激光机载 LiDAR 测深和双色激光机载 LiDAR 测深。

以单色激光机载 LiDAR 测深为例,利用装在飞机下部的激光发射器(波长为 532 nm 的绿光)向水面以扫描测量的方式发射激光脉冲,激光束以一定倾斜角入射至海面。532 nm 绿色激光既透气也透水,因此在大气-水界面发生折射效应,光束通过在水体中的光路传输到达海底,并在海底界面发生反射,沿着路径返回,被激光接收器所接收。通过信号检测、处理获得绿激光从海面、海底返回的时间差,结合绿激光的入射角、大气-水界面折射角等因素进行综合计算,即可得到测量点的瞬时水深值(图 3)。

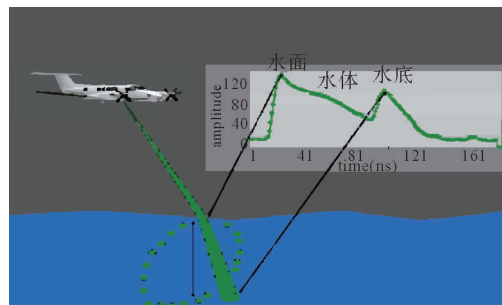


图 3 单色激光机载 LiDAR 测深原理图

Fig. 3 Working schematic of monochrome airborne LiDAR bathymetry

通过与卫星-惯导组合定位系统(global navigation satellite system/inertial navigation system, GNSS/INS)测得的实时位置信息、姿态信息(侧滚角、俯仰角和航向角)、潮汐数据等进行数据融合处理,即可得到测量点在地理坐标系下的坐标和基于深度基准面的水深值^[10]。

1.2 典型无人机载 LiDAR 测深商业系统

最早开展无人机 LiDAR 测深系统研发的是奥地利 RIEGL 公司,相继推出了 RIEGL BDF-1 和 RIEGL VQ-840-G 系统,在国外浅水及岸线地形测量工作中得到应用,包括国外海军浅水测图等任务(表 1)。近几年我国中科院上海光机所也开始着手研制国产无人机 LiDAR 测深系统 Mapper4000U,并于 2021 年研发成功,已在福建漳州、山东青岛、海南万宁等地进行海试,获得了一批有价值的的数据。

1) RIEGL BDF-1 是一款专为水深测量设计的激光测深仪(图 4(a)),专为无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)系统设计,紧凑、轻小的设计使其可以方便搭载于无人机平台上。其为线扫描模式(类似于船载单波束测量),在 4 kHz 的激光发射频率下,根据飞行速度和平均比率的不同,测量点间的距离为 1~10 cm^[11],成为获取内陆水体剖面数据的理想工具。

表 1 典型商业无人机载 ALB 系统技术指标^[11-12]

Tab. 1 Technical index of typical commercial UAV-airborne LiDAR bathymetry system

制造商,年份 系统	红外 激光	绿光 激光	扫描频率		最大探测 深度	最浅探测 深度/m	测量精度/m	测点密度	光斑/cm	重量/kg
			地形 /kHz	水深 /kHz						
RIEGL,2014 BDF-1		1	4	4	1 Secchi	—	0.02	点间隔 0.1m (线扫描)	5 cm @50 m	5.3
RIEGL,2020 VQ-840-G	选配	1	200	200	2.5 Secchi@50 kHz	—	0.02	>100 pts/m ²	10cm @100m	12

2) RIEGL VQ-840-G 是一款完全集成的紧凑型机载激光扫描仪(图 4(b)),能够同时进行水文和地形测量。该系统集成了经过原厂检校过的 GNSS/INS 系统,其紧凑而轻巧的设计可适用于多种飞行平台,包括无人机平台。通过强大的脉冲激光光源,发射狭窄的绿色可见激光束,激光束以椭圆扫描模式偏转,以极小变化的入射角打入水面^[12],实现高分辨率的水下地形测量。



图 4 典型商业无人机 LiDAR 测深系统^[11-12]

Fig. 4 Typical commercial UAV-airborne LiDAR bathymetry system

2 实验与分析

2.1 实验概况

为充分验证无人机载 LiDAR 测深系统在我国进行海岸带测绘的可行性,山东科技大学测绘与空间信息学院组织开展了无人机载 LiDAR 测深综合实验(图 5)。本次实验是国内首次使用 RIEGL VQ-840-G 无人机载 LiDAR 测深系统(中测瑞格提供)进行海岸带水陆地形测绘,旨在通过测深实验分析 UAV-ALB 系统的测深性能,为国内无人机载测深 LiDAR 海岸带测绘提供参考。

本实验于 2021 年 10 月 22 日在青岛胶州湾入海口南侧海岸(图 5(a))进行,该测区水质相对清澈,实测赛奇盘平均深度 2.6 m(图 5(e))。此次综合实验,RIEGL VQ-840-G 系统的采集频率设为 50 kHz,航高 50 m,航速 5~6 m/s,激光发散角 1 mrad,扫描天底角 20°;共设计飞行了两个航次,航次一和航次二分别采集了 10 条和 9 条航带的测量数据;惯性导航系统采用 APPLANIX APX20。对采集的数据已进行了多传感器标定校准、点云去噪、测深折射改正、航带间系统误差剔除等数据后处理。此外,还同步采集了航空照片(图 5(f),照片曝光间隔为 2 s)。同时,为验证 RIEGL VQ-840-G 的测量性能,分别利用船载单波束测深仪(single beam echo sounder, SBES)、实时动态测量(real-time kinematic, RTK)采集了水下点和陆上点。

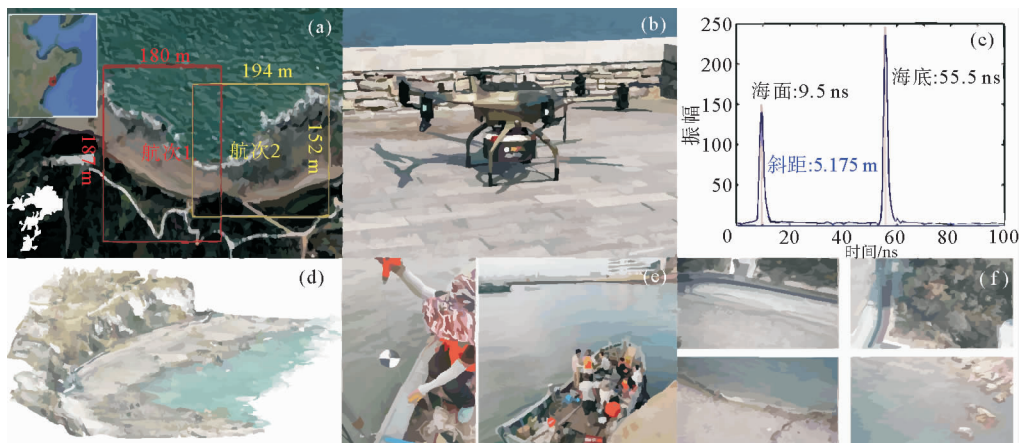


图 5 无人机载 LiDAR 测深综合实验概况

Fig. 5 Comprehensive experiment of UAV-airborne LiDAR bathymetry system

2.2 实验结果分析

2.2.1 测点密度

测点密度可直接反映地形地物的空间分布特点,对海岸带实景三维模型构建等工作至关重要。为了解点云密度情况,对陆地点、海面点、海底点的密度特征进行了统计。如表 2 和图 6 所示,RIEGL VQ-840-G 在陆地和水下均具有极高的测点密度,可以满足后续海岸带点云数据应用的需求。

相对于有人机,无人机搭载 LiDAR 测深系统的飞行高度(50~100 m)相对较低,飞行速度(旋翼 5 m/s)较小,测点密度相对较大、测量效率相对偏低。当然,由于其重量较小,对于无人机测量的稳定性要求高,测量时要尽量选择良好的海况(海面风速小于 5 m/s)。

2.2.2 最浅探测深度

受发射激光脉冲波宽和接收器接收带宽的限制,对于水深小于 2 m 的极浅水区域,ALB 海面波形和海底波形容易混叠在一起,造成位置识别困难,很大程度上限制了 ALB 的最小深度探测能力,甚至会在水陆交界处留下数据空白带。因此,最浅探测深度是影响 ALB 测深性能的关键因素之一。为确定 RIEGL VQ-840-G 的最浅探测深度,通过遍历查询采集的波形,分析其最浅探测深度(图 7)。

表 2 点云密度统计
Tab. 2 Point cloud density statistics

类型	密度/(pts/m ²)
陆地	563
海底	603
海面	1 080

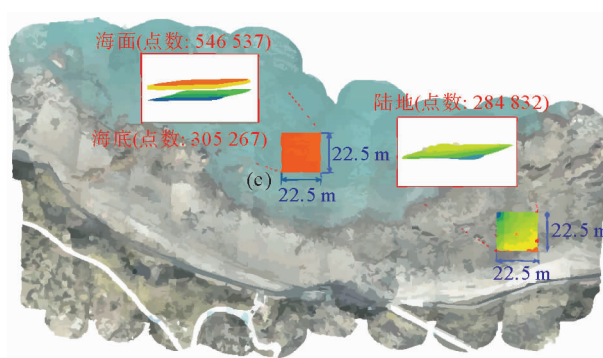


图 6 RIEGL VQ-840-G 采集点云密度统计
Fig. 6 Density statistics of point cloud captured by RIEGL VQ-840-G

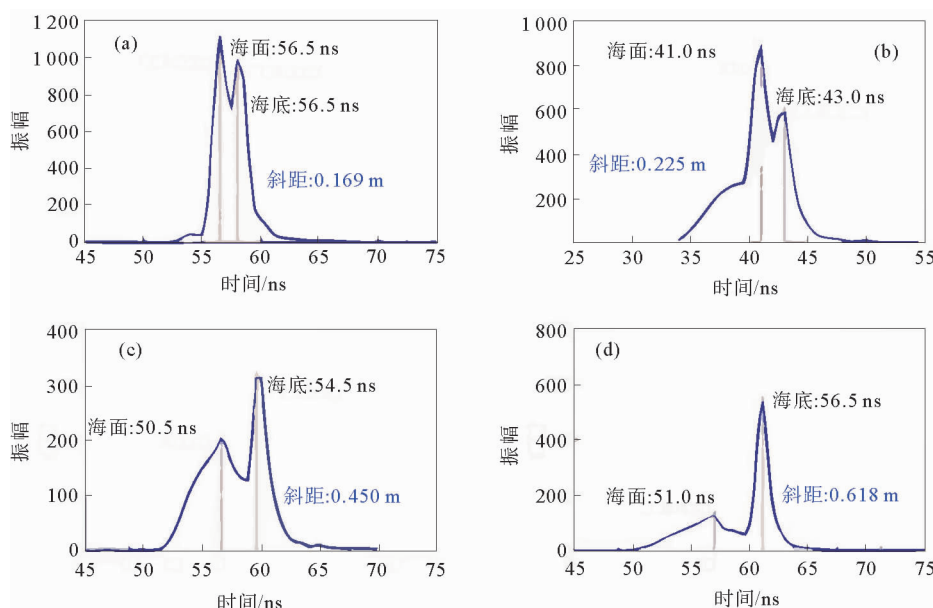


图 7 水下斜距小于 1 m 的典型波形
Fig. 7 Typical waveforms with underwater slant distances less than 1 m

选择 4 组水下斜距小于 1 m 的典型波形进行分析,如图 7(a)所示,海面与海底的时间差仅为 1.5 ns,对

应的水下斜距最小值约为 0.169 m。顾及绿光进入水体后的入射角 θ ，由斜距 L 计算垂向水深 h ($h = L \cos\theta$)，其最小测深值约为 0.16 m。通过分析知，在现有硬件条件下，研究确定一种极浅水波形分解算法，如何将海表面和海底反射信号从叠加的测深回波信号中准确分离出来，是进一步提高 ALB 系统最浅探测能力的关键所在。

2.2.3 最大探测深度

最大探测深度是衡量 ALB 测深能力的关键指标之一，严格意义上，其为 ALB 所能探测的最深海底点与平均海面间的高差。通常，ALB 实验开始前，需要测量赛奇盘深度，以指导 ALB 测线布设等测前工作，进而提高测量效率和效果。如表 1 所示，RIEGL VQ-840-G 的最大探测深度为 2.5 倍的赛奇盘深度(@50 kHz)。为验证其指标的准确性，选择垂直于海岸的剖面进行显示(图 8)。由于海面点云具有一定的厚度，因此在计算时平均海面高程使用海面点云的平均高程予以表示，最深海底点便是海底点云中高程最低点。

经计算，测区平均海面高程为 3.394 m，海底最深点高程为 -2.746 m，该数据中 ALB 最大探测深度(基于平均海面)即为 6.14 m。本次实验同步采集的赛奇盘平均深度为 2.61 m，因此本次 ALB 实验的最大测深约为 2.4 倍赛奇盘深度，基本满足系统规定指标。此外，风、浪、太阳辐射等环境因素也对 ALB 测深能力有重要影响^[13]。值得注意的是，此处获得的最大探测深度是基于平均海面的，最大穿透深度要大于 6.14 m。通过此次实验可知，在实际海岸带测绘作业中，可先进行赛奇盘深度的测量工作，选择有利于机载 LiDAR 测深的作业海域、作业季节，有针对性地开展海岸带机载 LiDAR 测深工作，以提升测绘效率、降低作业成本。

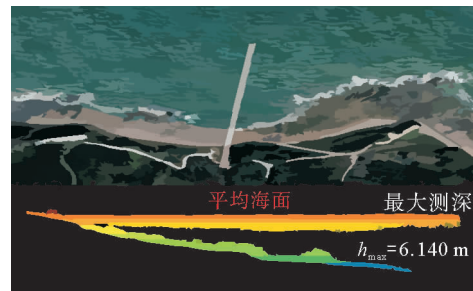


图 8 包含最深海底点的点云剖面

Fig. 8 Point cloud profiles containing the deepest seafloor points

2.2.4 测深精度

为评估 ALB 测量稳定性并验证测深精度，分别计算 ALB 航带间同名点误差，以及将 ALB 数据与船载单波束测深、陆上 RTK 同名点间对比，进行 ALB 数据内符合与外符合精度分析。其中，航带间同名点对比采用反距离加权(inverse distance weight, IDW)确定相邻航带间的同名点，再进行高程(水深)对比。不同数据源间数据对比则是将 RTK 与 SBES 点作为真值，选取临近的三个 ALB 点进行 IDW 处理，确定同名点后再进行高程(水深)对比。对比精度采用同名点间高差的标准差进行衡量：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{p,i} - X_{o,i})^2}{n}} \quad (1)$$

式中， $X_{p,i}$ 与 $X_{o,i}$ 代表第 i 组同名点对， n 代表同名点对数量。

1) 内符合精度

本实验相邻航带间均具有 30% 左右的重叠区域。为分析航带间偏差，验证 ALB 探测同一区域的稳定性，在各相邻航带间选取一定数量的同名点，计算其内符合精度。选取并计算航次一采集 10 条航带的相邻航带间误差，其统计结果见表 3、表 4。

表 3 与表 4 分别统计了各相邻航带间陆地和海底的 22 对同名点高差的最大值、最小值、平均值与标准差。对陆地点进行比较，仅有一对相邻航带同名点间标准差较大，为 15.3 cm，其他各航带重叠部分同名点标准差均小于 7 cm；对水下点进行比较分析，大多航带间高差最大值小于 20 cm，最小值仅为 0.1 cm，平均值与标准差均小于 10 cm。综上，RIEGL VQ-840-G 相邻航带间具有较高的内符合精度，系统测量结果具有较好的鲁棒性。

表 3 航带重叠区域陆地同名点高程误差统计表(陆地云)

Tab. 3 Elevation errors of land corresponding points in strip overlap areas

重叠航带水深对比	对比同名点数	最大值/cm	最小值/cm	平均值/cm	标准差/cm
H_1 H_2	22	24.2	1.6	14.6	15.3
H_2 H_3	22	5.3	1.5	3.3	3.5
H_3 H_4	22	13.2	1.3	3.6	4.4
H_4 H_5	22	2.8	0.1	0.8	1.0
H_5 H_6	22	6.9	0.1	1.1	2.0
H_6 H_7	22	9.0	0.7	5.9	6.5
H_7 H_8	22	5.3	0.1	1.3	1.9
H_8 H_9	22	4.3	0.1	1.7	2.1
H_9 H_{10}	22	9.4	0.1	2.2	3.2

表 4 航带重叠区域海底同名点水深误差统计表(海底云)

Tab. 4 Bathymetric errors of the seabed corresponding points in strip overlap areas

重叠航带水深对比	对比同名点数	最大值/cm	最小值/cm	平均值/cm	标准差/cm
H_1 H_2	22	8.4	0.5	4.4	5.2
H_2 H_3	22	21.1	0.2	6.1	7.7
H_3 H_4	22	15.4	0.1	8.9	8.7
H_4 H_5	22	31.6	0.7	7.4	10.4
H_5 H_6	22	9.4	0.1	4.4	5.3
H_6 H_7	22	18.9	0.1	8.5	9.7
H_7 H_8	22	13.4	0.4	5.2	6.3
H_8 H_9	22	13.7	0.5	7.1	8.2
H_9 H_{10}	22	13.1	0.1	3.9	5.5

2) 外符合精度

为验证 RIEGL VQ-840-G 系统测量点的外符合精度,通过目前较为成熟的陆上与水下地形测绘手段(RTK 与 SBES)所采集数据分别与 ALB 点云进行对比分析。本次 ALB 实验测区内分布有一定数量的 RTK 测量点(图 9 中黑色点)与 SBES 测深点(图 10 中黑色点),从中各选取 20 对同名点进行对比,计算同名点高差(图 11),统计高差(水深)最大值、最小值、平均值和标准差,如表 5 所示。

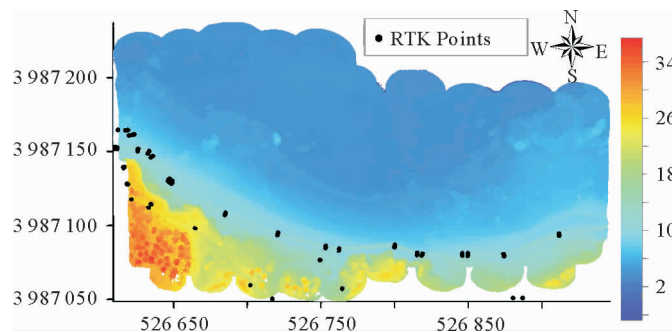


图 9 ALB 点云与 RTK 点相对分布

Fig. 9 Relative distribution between ALB point cloud and RTK points

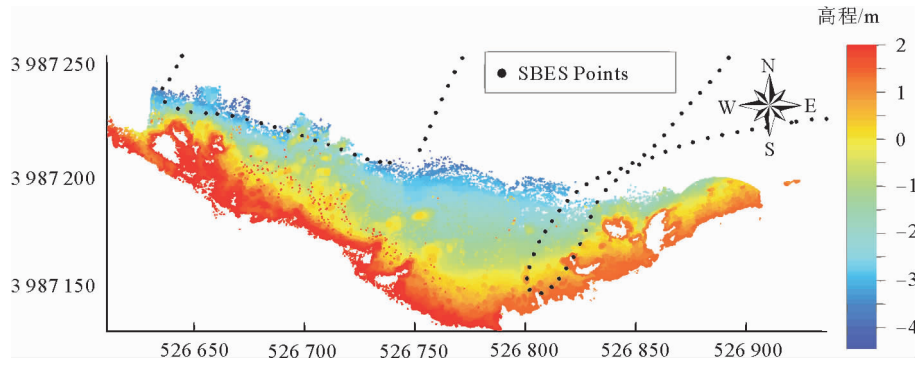


图 10 ALB 海底点与 SBES 点相对分布

Fig. 10 Relative distribution between ALB seabed points and SBES point

综合表 5 和图 11 可知,ALB 所测陆地点与 RTK 点间高差最大值为 8.8 cm,最小值为 1.0 cm,均值与标准差分别为 4.4、5.2 cm,说明 RIEGL VQ-840-G 具备较好的陆地点测量精度。根据《海洋工程地形测量规范》^[14],0~15 m 水深范围,单波束的主、检点位水深对比时重合深度点的不符值限差 < 0.3 m,且超限的点数不超过参加对比点总数的 25%。RIEGL VQ-840-G 无人机载 LiDAR 测深系统测深数据与 SBES 数据进行对比,水深差最大值为 38.7 cm,最小值为 2.6 cm,水深差平均值与标准差分别为 14.4、17.6 cm,较大水深差出现次数较少(图 11),大多数的对比水深差在 20 cm 以下,表明 RIEGL VQ-840-G 具备较好的水下地形测量精度。

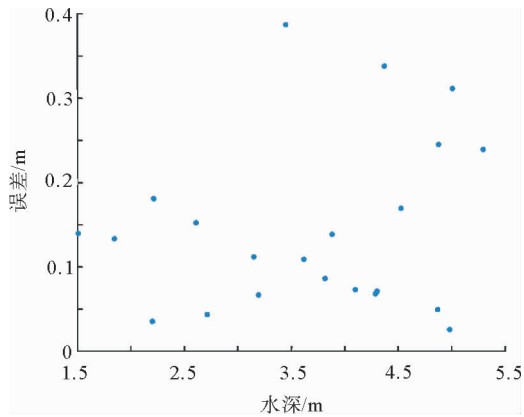


图 11 ALB 与单波束同名点误差随水深分布

Fig. 11 Error distribution of corresponding points between ALB and SBES

表 5 ALB 水上水下点云成果精度对比

Tab. 5 Accuracy comparison of ALB point cloud above water and underwater

精度对比	对比同名点数	最大值/cm	最小值/cm	平均值/cm	标准差/cm
陆地点云(与 RTK 对比)	20	8.8	1.0	4.4	5.2
水下点云(与 SBES 对比)	20	38.7	2.6	14.4	17.6

3 讨论

利用无人机载 LiDAR 测深系统进行海岸带测绘前需制定详细的测量方案,包括测量时间的选择、天气情况的考虑、系统参数的设置和辅助数据的采集等。另外,还需要针对性的对采集的数据进行精细化处理。本研究提出几条实验经验与建议,旨在为无人机载 ALB 数据采集、数据误差改正提供参考。

1) 扫描轴偏角的大小直接决定着 ALB 测量精度,系统安装时要做到扫描轴偏角尽量小或确定其具体的轴系偏转角度,建议实验前进行多传感器标定。

2) ALB 测深误差随海面倾角的增大而增大,并随扫描天底角的增大而增大。其中,海面风速决定着海

面倾角的变化,风速越大,海面倾角越大。因此,测量时要尽量选择良好的海况(海面风速小于 5 m/s)。另外,较大的扫描天底角会影响测量精度,较小的天底角则会降低测量效率。在保证测深精度和测量效率的前提下,建议扫描天底角设置为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 。

3) 水体折射率精度影响 ALB 测深精度。通过计算,10 m 水深情况下,水体折射率分别采用 1.330 和 1.334 时,测距相差约 4 cm。因此,为了获得较为准确的水体折射率,测量实验设计时建议采用温盐深(conductivity temperature depth, CTD)剖面仪采集测区水域的 CTD 数据作为辅助数据。

4) 无人机载 LiDAR 测深数据处理对于获得高精度数据至关重要。对于激光指向误差,可以通过规范系统安装来避免一部分,另一部分可以通过系统校准来校正;对于水面折射误差,可以利用基于水面模型和光线追踪的 ALB 折射改正方法进行修正。如果需要更精确的地形数据,还需要考虑水体散射误差、水体折射误差、不规则水底地形起伏误差等^[15]。

4 结论

为了评估无人机载 LiDAR 测深系统进行海岸带测绘的可行性,基于 RIEGL VQ-840-G 无人机载 LiDAR 测深实验获得的数据,分别从测点密度、最浅探测深度、最大探测深度、测深精度 4 个方面定量分析了无人机载 LiDAR 测深系统的测量性能,得到以下结论。

1) RIEGL VQ-840-G 无人机载 LiDAR 测深青岛实验的水深点密度达 603 个/ m^2 ,最浅探测深度仅有 0.16 m,最大探测深度(基于平均海面)达 6.14 m,水下测深精度达 17.6 cm(与船载单波束测深数据对比),陆上高程精度为 5.2 cm(与陆上 RTK 数据对比)。

2) 实验对比结果能够满足海岸带测绘的要求,说明无人机载 LiDAR 测深系统应用于海岸带等浅水区域水陆一体化测绘是可行的,相关成果也可为我国机载 LiDAR 测深技术的研发与应用提供相应参考。

参考文献:

- [1]朱正任,冯成凯,徐琪尧,等.基于小波分析的多波束声呐图像角度响应改正方法[J].山东科技大学学报(自然科学版),2021,40(2):31-40.
ZHU Zhengren, FENG Chengkai, XU Qiyao, et al. Angular response correction method of multibeam sonar images based on wavelet analysis[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2021, 40(2): 31-40.
- [2]吴自银,阳凡林,李守军,等.高分辨率海底地形地貌:可视计算与科学应用[M].北京:科学出版社,2017.
WU Ziyin, YANG Fanlin, LI Shoujun, et al. High-resolution submarine topography: Visual computation and scientific applications[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [3]GUENTHER G C, BROOKS M W, LAROCQUE P E. New capabilities of the "SHOALS" airborne lidar bathymeter[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 73(2): 247-255.
- [4]王丹蒨,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 Dandian, XING Shuai, XU Qing, et al. Automatic sea-land waveform classification method for single-wavelength airborne LiDAR bathymetry[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 51(5): 750-761.
- [5]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 Yanxiong, GUO Kai, HE Xiufeng, et al. Research progress of airborne laser bathymetry technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(9): 1185-1194.
- [6]宋越,李厚朴,翟国君.机载激光测深波形去噪算法对比分析[J].测绘学报,2021,50(2):270-278.
SONG Yue, LI Houpu, ZHAI Guojun. Comparative analysis of airborne laser bathymetric waveforms denoising algorithms [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(2): 270-278.
- [7]彭琳,刘焱雄,邓才龙,等.机载激光测深系统试点应用研究[J].海洋测绘,2014,34(4):35-42.
PENG Lin, LIU Yanxiong, DENG Cailong, et al. Experiment of airborne laser bathymetry[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(4): 35-42.
- [8]MANDLBURGER G, PFENNIGBAUER M, SCHWARZ R, et al. Concept and performance evaluation of a novel UAV-borne topo-bathymetric LiDAR sensor[J/OL]. Remote Sensing, 2020, 12(6): 986. DOI: 10.3390/rs12060986.
- [9]GUO K, LI Q Q, WANG C S, et al. Development of a single-wavelength airborne bathymetric LiDAR: System design and

- data processing[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2022,185:62-84.
- [10]胡善江,贺岩,陈卫标,等.机载双频激光雷达系统设计和研制[J].红外与激光工程,2018,47(9):89-94.
HU Shanjiang,HE Yan,CHEN Weibiao,et al.Design of airborne dual-frequency laser radar system[J].Infrared and Laser Engineering,2018,47(9):89-94.
- [11]RIEGL Incorporated.Datasheet RIEGL BDF-1 [DB/OL].[2019-05-31].http://www.riegl.com/products/unmanned-scanning/bathycropter/.
- [12]RIEGL Incorporated.Datasheet RIEGL VQ-840-G[DB/OL].[2022-03-15].http://www.riegl.com/nc/products/airborne-scanning/produktdetail/product/scanner/63/.
- [13]SU D P,YANG F L,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/OL].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2019.DOI:10.1109/TRGS.2019.2951144.
- [14]中华人民共和国国家标准.GB/T 17501—2017,海洋工程地形测量规范[S].
- [15]XU W X,GUO K,LIU Y X,et al.Refraction error correction of airborne LiDAR bathymetry data considering sea surface wave[J/OL].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2021,102.DOI:10.1016/j.jag.2021.102402.

(责任编辑:高丽华)

(上接第 10 页)

- [17]韩中含,徐白山,杨成林,等.基于 Planet 多光谱影像的南海岛礁水深反演研究[J].测绘与空间地理信息,2020,43(12):139-142.
HAN Zhonghan,XU Baishan,YANG Chenglin,et al.Research on reef depth retrieval of South China Sea Island based on planet multispectral image[J].Geomatics and Spatial Information Technology,2020,43(12):139-142.
- [18]刘唐,江涛,李昂,等.基于神经网络和不同立地质量的森林蓄积量遥感估测[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(2):25-35.
LIU Tang,JIANG Tao,LI Ang,et al.Remote sensing estimation of forest stock volume based on neural network and different site quality[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2019,38(2):25-35.
- [19]金保明,卢光毅,王伟,等.基于弹性梯度下降算法的 BP 神经网络降雨径流预报模型[J].山东大学学报(工学版),2020,50(3):117-124.
JIN Baoming,LU Guangyi,WANG Wei,et al.Research on BP neural network rainfall runoff forecasting model based on elastic gradient descent algorithm[J].Journal of Shandong University(Engineering Science),2020,50(3):117-124.
- [20]陈浩林,张保庆,秦学彬,等.海上 OBC 地震勘探高精度潮汐校正方法[J].石油地球物理勘探,2014,49(增 1):1-4.
CHEN Haolin,ZHANG Baoqing,QIN Xuebin,et al.High resolution tide correction method for seismic OBC prospecting[J].Oil Geophysical Prospecting,2014,49(S1):1-4.
- [21]TOLLENAERE T.SuperSAB:Fast adaptive back propagation with good scaling properties[J].Neural Networks,1990,3(5):561-573.

(责任编辑:高丽华)