

doi: 10. 6046/zrzyg. 2021007

引用格式: 吴芳,金鼎坚,张宗贵,等. 基于 CZMIL 测深技术的海陆一体地形测量初探[J]. 自然资源遥感,2021,33(4):173 – 180. (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.)

基于 CZMIL 测深技术的海陆一体地形测量初探

吴 芳¹, 金鼎坚¹, 张宗贵¹, 冀欣阳¹, 李天祺¹, 高 宇²

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心,北京 100083; 2. Teledyne Optech, Inc., Ontario L4K5Z8, Canada)

摘要: 常规区域性水深测量方法主要是利用船载的声学探测技术,但是由于船体无法进入沿岸浅水区域和岛礁密集区域,故近海岸区域常存在数据空白。机载激光雷达测深技术的出现和发展能有效解决这一问题,成为一种快速高效的水深及海底地形测探方法。以机载激光雷达测深仪 CZMIL Nova 系统为例,介绍其海陆地形一体化的测量技术特点和影响因素,及其在岛屿海陆一体地形测量的初步应用情况。

关键词: 机载激光雷达测深; CZMIL; 遥感; 海岸带; 地形

中图法分类号: TP 79 文献标志码: A 文章编号: 2097 – 034X(2021)04 – 0173 – 08

0 引言

海洋测绘是一切海洋经济开发与国防活动的基础,海洋中的海岛、岛礁及其周边海底地形测量是海洋测绘最基本的任务之一^[1]。传统的海底地形测量主要是利用船载单波束/多波束等方法,虽然具有较高的测量精度,但是由于船体无法进入沿岸水产养殖、浅水和岛礁密集水域,无法满足高精度近岸海底地形测量的需求。

机载激光雷达测深测量是集激光测距、全球定位系统(global positioning system,GPS)定位/姿态测量、航空摄影等多种技术于一体的新型主动机载激光测绘,可应用于海滩和海岸线、浅海编图、海岛、岛礁、水下障碍物的调查,是高效获取高精度近岸海底地形的重要技术,尤其对“人下不去、船上不来”海岸带的海陆一体化测量更具优势^[2-4]。

针对海岸带综合地质调查工作的需求,中国自然资源航空物探遥感中心于 Teledyne Optech 公司定制了新一代 CZMIL Nova 机载激光雷达测深测量系统,该系统集成了测深激光雷达、CASI – 1500h 高光谱成像仪、Phase One iXU – RS1000 数字相机等多种遥感传感器。依托中国地质调查局海岸带综合地质调查工程,开展了机载激光雷达测深测量系统的

试生产工作。本文基于机载激光雷达测深系统 CZMIL Nova,以岛屿海陆一体地形测量的初步应用为例,介绍其海陆地形一体化测量方法原理、影响因素和技术流程。

1 机载激光雷达测深系统

机载激光雷达测深技术在国外一些海洋国家发展比较迅速,如美国、瑞典、澳大利亚、加拿大等,已研制出多种较为成熟的机载激光雷达测深系统,并配备相应的数据处理软件。其中,代表性的有 Teledyne Optech 公司的 CZMIL 系列、Leica 公司的 Hawk Eye 系列、RIEGL 公司的 VQ 系列和 Fugro 公司的 LADS 系列。这些机载激光雷达测深系统具有大功率、高精度、高效率、测深能力强的特点^[5-6]。根据文献[1 – 16]归纳总结各种系列产品代表性测深设备的标称技术指标,详细指标见表 1。从设备的扫描宽度、激光频率、最大探测水深、测深精度、激光测点密度等技术指标可以看出这些设备各有优势。本文以 CZMIL Nova 系统为例,介绍机载激光雷达测深系统在海陆一体地形测量应用上的方法原理、影响因素和技术流程。表中, K_d 为机载激光雷达水深测量系统测深工作波长处的漫衰减系数; d 为测量深度(单位: m); 2σ 表示 2 倍中误差。

收稿日期: 2021 – 01 – 08; 修订日期: 2021 – 05 – 18

基金项目: 高分专项(民用)项目“高分航空载荷自然资源调查应用示范”(编号: 04 – H30G01 – 9001 – 20122)和中国地质调查局项目“渤海海岸带航空物探遥感调查及应用”(编号: DD20160150)共同资助。

第一作者: 吴 芳(1980 –),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为航空遥感技术在地质调查中的应用。Email: 4402744@qq. com。

表 1 典型机载激光测深雷达系统主要技术指标
Tab.1 Main technical specifications of typical ALB system

类别	技术指标	CZMIL Nova	Hawk Eye III	VQ-880G	LADS MK III
一般指标	工作航高/m	400 ~1 000	400 ~600	600 ~1 600	400 ~1 000
	飞行速度/kts	140 ~175	140 ~175	140 ~175	125 ~175
测量指标	激光扫描频率/kHz	水深 70/10 地形 80	水深 35/10 地形 500	550	512/1.5
	最大测深	浅水 2.0/ K_d	浅水 2.2/ K_d	1.5 secchi	标称 3.0 secchi
		深水 4.2/ K_d	深水 4.0/ K_d		最深可达 80 m
	测深精度	$\sqrt{0.3^2 + (0.013d)^2}$ m, 2σ	$\sqrt{0.3^2 + (0.013d)^2}$ m, 2σ	0.025 m	0.5 m
	测点密度	水深 0.8 m×0.8 m 陆地 0.3 m×0.3 m	水深 0.8 m×0.8 m 陆地 0.1 m×0.1 m	标称 69 pts/m ²	2 m×2 m

2 CZMIL 机载激光雷达测深系统

2.1 CZMIL 机载激光雷达测深原理

CZMIL Nova 系统的测深激光雷达在进行测量作业时同时发射 1 064 nm(近红外波段)和 532 nm(绿波段)的大能量、窄脉冲、高保真度的激光^[8]。其中红外波段不易穿透海水从而探测到水面后就进行回波;而波长处于 0.47~0.58 μm 之间的绿光穿透海水时的衰减最小,穿透性强且方向性好,可探测

到海底,并被海底反射最终被传感器接收^[9]。通过测量激光在海面和海底的往返时间差,即可利用水中光速计算出海面至海底的瞬时水深值;通过系统获取的定姿定位参数计算激光在陆地和海底的三维坐标,即可得到海陆一体地形数据,机载激光测深原理示意图 1^[10]。图中波形图中第 1 个波峰代表水面回波信号;第 2 个波峰代表水底回波信号,2 个波峰之间的时间差即为激光在海面和海底的往返时间差。

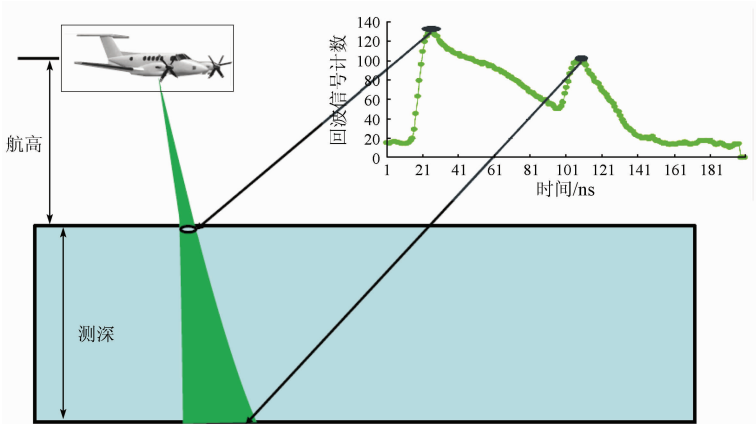
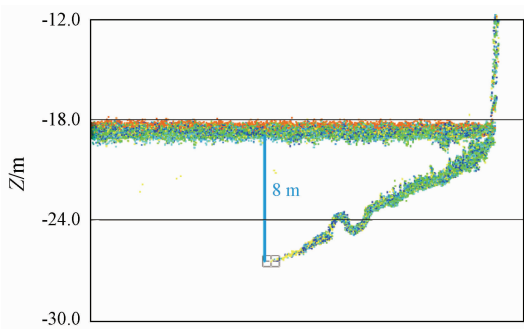


图 1 机载激光测深原理图^[10]

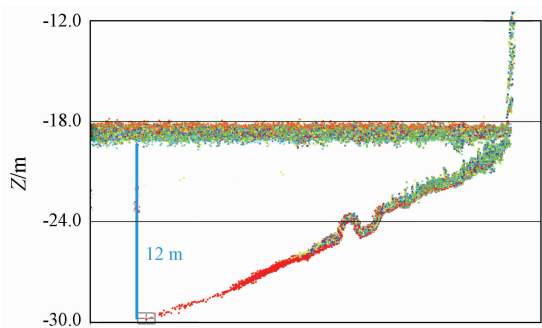
Fig.1 Schematic diagram of bathymetric survey^[10]

CZMIL Nova 系统采用特殊的多通道接收器架构,共有 3 个接收器。1 个红外通道实现陆地和水面回波探测^[11-13];1 个深水通道用于深水回波探测;7 个浅水通道用于浅水和陆地回波探测。这样可得到 9 个通道的激光脉冲,这种分段探测器方法既保证了浅水区的分辨率和密度,又保证了较大的探测深度。采集某测试点的浅水通道、深水通道激光测深剖面图,并从剖面中量测水面至水底实际测量深度(图 2)。图中红色标识为深水通道接收激光信号;其余颜色为各浅水通道接收激光信号。从图 2(b)中可以明显看出,深水通道相比较于浅水通道(图 2(a)),可探测到更深海底的回波信号。



(a) 测试点浅水通道实际测深(测量水深可达 8 m)

图 2-1 机载水深测量系统激光地形测量剖面分析
Fig.2-1 Profile analysis of ALB system based on topographic survey



(b) 测试点深水通道实际测深(测量水深可达 12 m)
图 2-2 机载水深测量系统激光地形测量剖面分析

Fig. 2-2 Profile analysis of ALB system based on topographic survey

2.2 CZMIL 机载激光雷达测深系统产品

CZMIL Nova 系统集成了 3 种传感器,因此该系统在海岸带及岛礁调查中能够通过一次飞行同时获取多种数据,并通过配套的 HydroFusion 软件高自动化生成海岸带地区海陆一体的三维地形和其他不同层次的产品。其代表性的数据产品有海岸带地形、海底底质分类以及水体的光学参数等,从 CZMIL 的官方介绍 (<http://www.teledyneoptech.com>) 和 HydroFusion 软件说明^[6]中可以分析出,根据处理的程度该系统产品可以分为 4 级,其中有些产品的制作需要结合其他专业应用软件和另行开发算法实现。本文主要对系统海陆一体地形产品制作展开方法技术介绍。

1) L0, 原始级。主要包括激光(light detection and ranging, LiDAR)原始数据、高光谱原始数据、数字相机原始影像,此外还包括机载定位定向系统

(position orientation system, POS)数据、地面 GPS 基站数据等辅助数据,由外业飞行直接获取。

2) L1, 基础级。主要包括 LiDAR 三维点云、高光谱正射影像、数字相机正射影像等,是系统机载测深测量最主要和最基本的产品。

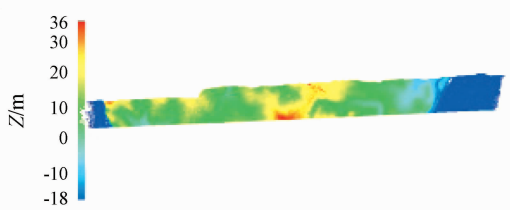
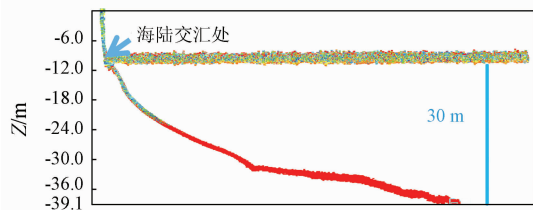
3) L2, 成果级。在基础级产品的基础上,经过大量人工操作而处理生成的产品。

基于 LiDAR 三维点云,可生成 LiDAR 高程影像图(即海陆一体地形)、LiDAR 裸露地表数字高程模型、水陆分类图、LiDAR 底部反射图、等深线图及实时水深图等,需要结合其他专业软件完成。基于高光谱正射影像,开展水色遥感研究,可生成相关参数图件。

4) L3, 应用级。在基础级产品和成果级产品的基础上,针对具体的应用,经过多传感器融合处理或经过遥感解译而生成的产品。

2.3 CZMIL 系统海陆一体地形测量

CZMIL Nova 系统开展海陆一体地形测量,主要是利用其单绿激光测量陆地和水下地形的能力(近红外激光在水中没有回波,用于陆地测量),从而达到陆地与水体一体化量测(图 3(a))。利用获取的激光雷达数据,探测每个雷达波形中的陆地、水面-水底位置,然后利用飞机的定位定姿数据和激光的指向信息,计算出激光的三维椭球坐标,生成 WGS-84 椭球坐标系下标准 LAS 格式的 point cloud 数据。将点云数据进行噪声点去除和人工编辑,仅保留陆地和海域水底有效地形数据,通过对不同高程的渲染制作海陆一体地形产品(图 3(b))。



(a) 海陆一体地形剖面 (b) 海陆一体地形数据

图 3 CZMIL Nova 海陆一体地形测量

Fig. 3 Land and sea integrated topographic survey (CZMIL Nova)

3 CZMIL 海陆一体地形测量影响因素

结合本次机载激光雷达海陆一体测量试生产项目,要保证激光点云地形成果的准确性和完整性,规划数据获取任务时需考虑以下几项关键问题。

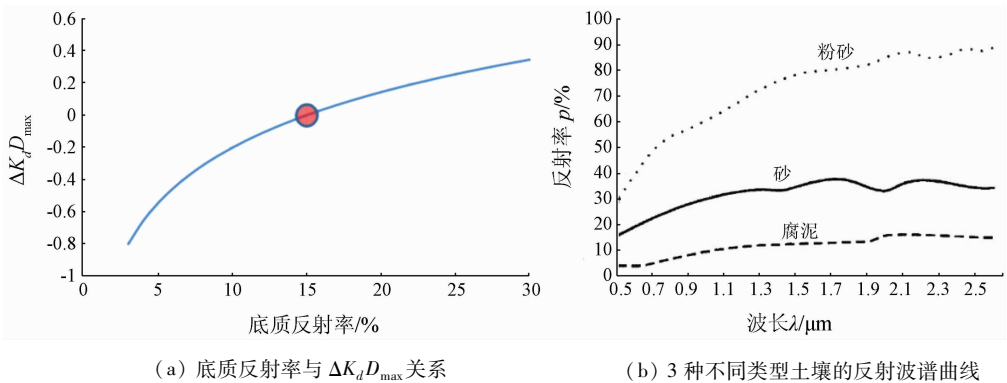
3.1 海底底质对测量的影响

在进行激光测深的时候,海底底质的反射率对测量结果将产生很大的影响。不同区域的底质

特征会有很大的差异,这会造成底部反射光强度的不同,给运用激光遥感技术测量水深的精度造成很大的影响。图 4(a)为 Optech 公司提供的底部反射率与 $\Delta K_d D_{max}$ 的关系,可以看出,在底部反射率降到 10% 以后, $K_d D_{max}$ 将下降 0.2; 在底部反射率为 15% 时,对 $K_d D_{max}$ 无影响,指向“0”(图中红点处),所以 CZMIL 系统标称的最大测深计算公式,是在底部反射率达到 15% 时才有效。从 3 种不同类型土壤的反射波谱曲线(图 4(b))看出,在

波长为 532 nm 的光谱内,砂(粗砂)的反射率大约为 15%;腐泥(淤泥)的反射率约为 5%;粉砂(细砂)的反射率约为 30%。因此,当海底为较亮的砂子时,按照公式计算 $D_{\max}$ 会比预测较大,若海底为

污泥时, $D_{\max}$ 会比预测值小。不过,相对海底底质而言,海水清澈度对仪器最大测深的影响要重要的多。



(a) 底质反射率与 $\Delta K_d D_{\max}$ 关系

(b) 3 种不同类型土壤的反射波谱曲线

图 4 底质反射率曲线(摘自中心仪器测试报告)

Fig. 4 Bottom reflectivity curves (taken from test report of AGRS)

3.2 系统最大探测深度

最大探测深度是激光测深系统的重要技术指标,在测量作业开展前,需对系统在测区内水体的最大探测深度进行评估,根据系统测深能力进行合理的航线设计,避免无效的飞行作业。该项技术指标可用两种方法来衡量。

1)圆盘透明度(secchi disc depth,SDD)。将圆盘沉入水中,直至其模糊看不清,量测此时圆盘所处深度,重复多次取其均值,此深度即为 secchi depth,也称海水的圆盘透明度。表 1 可见,典型机载激光雷达测深系统中,最大探测深度为圆盘透明度的 2~3 倍。

2)利用水体 532 nm 波段的漫衰减系数(K_d (532))和水体底部反射率来表征,经验计算公式为:

$$D_{\max} = n / K_d(532), \tag{1}$$

式中: $D_{\max}$ 为最大探测深度; n 为最大测深系数,当海底反射率达到 15% 的情况下,一般在 2~4 之间。 $K_d(532)$ 越大,激光测深系统的可探测深度越小;水底反射率越高,激光测深系统的可探测深度越大^[14]。根据 CZMIL 官方标称 $D_{\max} = 3.5 / K_d(532)$ (白天); $D_{\max} = 5.0 / K_d(532)$ (夜间),代入经验公式,计算得到系统在不同清澈度水体白天和黑夜的最大探测深度,见表 2,预估设备在测区最大深测能力时可参考。

表 2 CZMIL 系统最大探测深度(Optech,2013)

Tab.2 Statistics of the maximum detection depth(Optech,2013)

水质情况	K_d 值	$D_{\max}$ (白天)/m	$D_{\max}$ (夜间)/m
非常洁净	0.07	50	71
洁净	0.10	35	50

(续表)

水质情况	K_d 值	$D_{\max}$ (白天)/m	$D_{\max}$ (夜间)/m
一般洁净 1	0.15	23	33
一般洁净 2	0.20	18	25
浑浊	0.30	12	17
非常浑浊	0.50	7	10

3.3 气象条件影响

机载激光雷达测深能力还会受到测区水体周围环境的影响,如风浪、雨雪、云雾、赤潮等。大风引起的海浪等同于浑浊水体,海浪打到岸边会形成白涌浪(白色的泡沫),光在气泡里面不停折射,能量极大损失,无法穿透泡沫达到海底。因此,在一些近岸沙滩(易起碎浪)和悬崖处,在浪大的时候用激光测量海底点易丢失。另外,赤潮也是一个影响激光采集的因素,赤潮是海水中某些浮游植物、原生动物或细菌爆发性增殖或高度聚集而引起水体变色的一种有害生态现象。由于水中浮游生物/藻类的生长,导致系统可能无法穿透这些藻类,并将这些生物/藻类的特征反映到点云,形成水中的噪点层。

因此,在激光雷达测深作业前,需要综合考虑天气、气候等因素,并非任何水域都能得到理想的测深结果,避免大风大浪时开展飞行作业,才能保证海陆一体地形测量的连续性。

3.4 数据获取需注意问题

按照 Optech 对仪器出厂培训的要求,为保证获取的点云数据最终处理精度,对地面基站布设和机载 POS 系统提出相应要求。同步 GPS 基站的布设或连续运行的 CORS 站的选择,应考虑基站或 CORS 站离作业飞行区最远的距离应控制在 30 km 范围内。每个架次飞行作业后需预检查 POS 解算数据

的以下几个指标,确保各项指标均在限差范围内: L1/L2 载波信号无失锁情况,飞机的定位定姿数据解算结果应符合 POS 系统数据处理的精度要求(《GB/T 27919—2011 IMU/GPS 辅助航空摄影技术规范》);同时,CZMIL 系统对相对航高的反应较灵敏,不同的作业高度需选用不同的模式文件(mode file),要求飞行员在作业过程中保持计划的航高,允许的航高上下浮动范围为 $\pm 30\text{ m}$ 。

4 岛屿海陆一体地形测量初步应用

本文结合“海岸带综合地质调查工程”海陆一体地形测量实际生产应用经验,对 CZMIL 系统的数据获取、数据分析和结果分析进行介绍,技术流程见图 5。

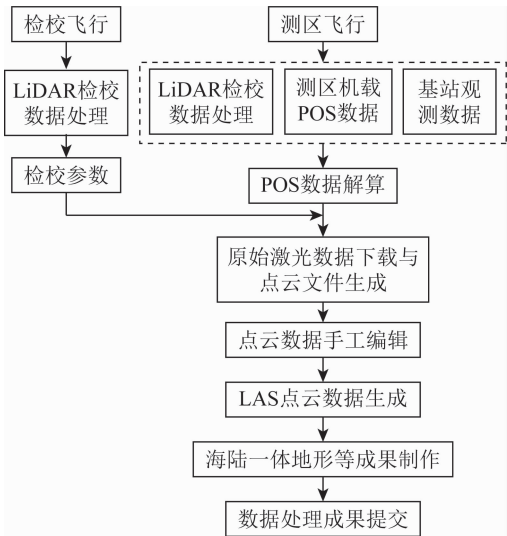


图5 机载激光雷达测深技术流程

Fig.5 Technology flow of ALB survey

4.1 工作区概况

工作区位于北海市北部湾海域中部,为一个距陆地约 50 km 的海岛。海岛形近似于圆形,东西宽约 6 km,南北长约 6.5 km,面积约 25 km²。该岛位于沿海大陆架之上,岛的南半部以海蚀地貌为主,北半部则以海积地貌为主。岛的地势为南高北低,海拔最高约 79 m,自南向北逐渐倾斜,逐渐过渡到平坦宽阔的海滩。海域水体较为清澈,根据反演的 K_d 值可知,CZMIL 系统在该区最大测深预估可达 15 m,具有较大应用潜力。

4.2 海陆一体地形测量

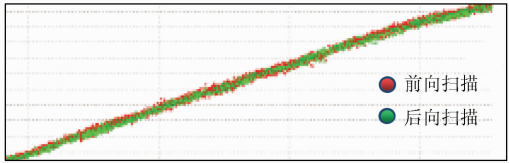
4.2.1 数据获取

飞行平台选用运 - 12 E 型飞机,飞行高度为 400 m,航线间距约为 200 m(相邻航带重叠 30%),飞行速度平均为 220 km/h,测量时间为秋季。在飞

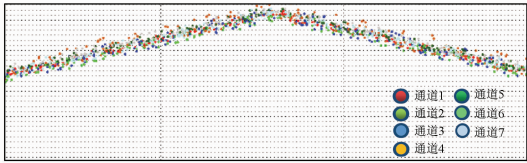
行的同时,地面采用 Trimble R5 型接收机同步开展 GNSS 基准站观测,用于机载 POS 数据的差分解算。该工作区采集到的 LiDAR 测深数据包括 LiDAR 原始数据、机载 POS 数据和地面 GPS 基站数据。对每个架次数据进行预处理,开展机载 POS 数据与地面基站数据联合解算和质量检查,确保数据结果精度满足相关规范精度要求,将最后结果用于激光数据的处理。

4.2.2 数据检校

本文所用数据检校结果见图 6。系统在飞机上安装之后进行激光检校,需解算出激光 9 个接收通道在陆域与海域的扫描角偏移、俯仰和翻滚角偏移、距离偏移以及测深偏离等参数,用于对设备进行标校处理,保证各通道接收激光无偏差,且激光数据与测量控制数据无偏差。在陆地和水域分别布设检校场,陆地检校场用于校正陆地通道,以及其和浅水通道的偏差;水域检校场用于校正激光测深偏差,以及浅水通道和深水通道的偏差^[15-16]。需要说明的是,系统在交付使用前,Optech 公司利用美国的检校场对设备开展了出厂检校,利用提供的检校文件作为初始值,微小调动个别参数后,通过选取同一地物激光剖面发现单通道各扫描方式之间激光数据吻合较好,浅水各通道激光数据已无偏差(图 6)。即可利用此检校文件开展后续处理工作。



(a) 单通道激光检校情况



(b) 多通道激光检校情况

图6 激光经检校后效果

Fig.6 Calibration result of laser

4.2.3 精度评定

影响激光雷达测深精度的因素比较多,进行精确的精度验证较为困难。本次作业采取的精度验证方法非常粗略,根据收集到的多波束数据分布情况,选定工作区以外另一水质清澈水域作为测试样区,进行了激光测量精度的评估。通过区域内 30 m 深度附近 40 个点数量的多波束测深数据,并将测深数据转化为 WGS - 84 系统下的椭球高,保证其与激光

点云数据代表相同的地理意义。在多波束测深数据点有效半径范围内,与激光点云数据进行比较,统计平均误差、标准差和均方根误差,精度均在系统标称范围内(表3)。

表 3 测试区激光测量精度统计

Tab.3 Statistics of laser measurement accuracy in test area (m)					
统计参数	深度	平均误差	标准差	RMSE	系统标称精度
数值	30	-0.304	0.211	0.369	0.492

4.2.4 数据处理与产品制作

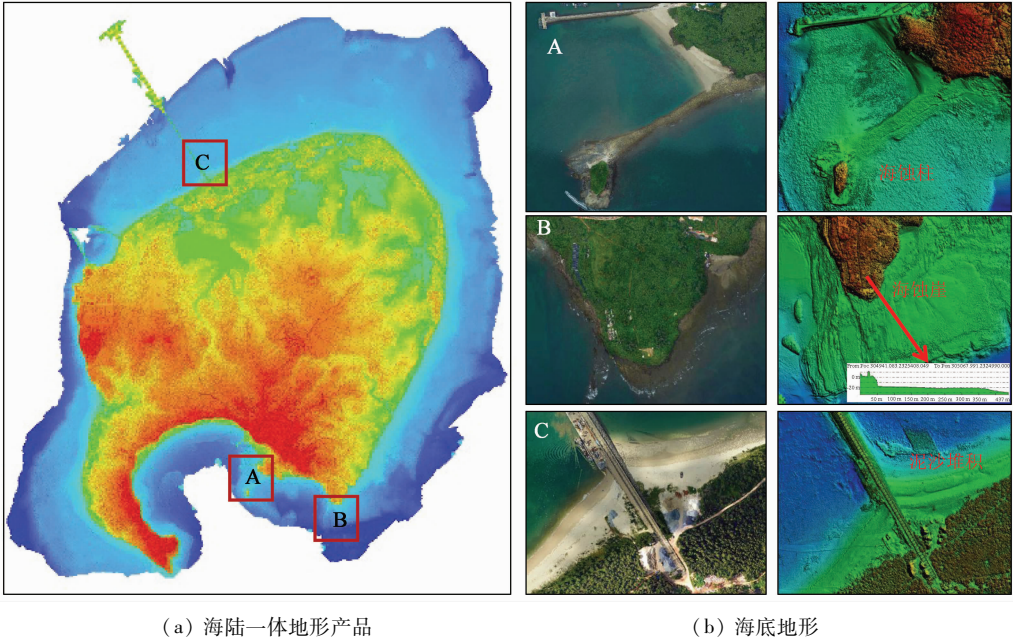
利用设备配套的 HydroFusion 等软件完成机载激光雷达数据处理,生成工作区海陆一体地形产品,以高程渲染图表现,主要包含以下 4 个步骤:

- 1)原始数据下载和同步。利用机载 POS 解算结果、飞行设计文件、系统参数等文件,完成原始激光雷达数据下载,及其与机载 POS 数据的融合处理。
- 2)激光点云生成。利用下载的激光雷达数据,探测每个雷达波形中的陆地、水面和水底位置,利用

飞机的定位定姿数据和激光的指向信息,计算陆地、水面和水底的激光三维椭球坐标,生成 WGS-84 椭球坐标系下标准格式的 LAS 点云数据。

3)激光点云人工编辑。对每条航带的三维激光点云数据进行模型建立,也可按区域范围(block)生成点云模型,导入到 HydroFusion 软件的 CME (CZMIL Manual Editor) 模块中进行噪声点人工去除,生成只包括陆地、海底地形的 LAS 点云数据。

4)海陆一体高程渲染图生成。利用地理信息系统软件,对点云数据进行二次编辑,保留可成图数据,删除局部离散的散点;对点云数据进行栅格化处理,生成规定采样间隔的海陆一体数字高程图,并按照高程值对其进行渲染处理,叠加山体阴影,生成具有立体、彩色效果的海陆一体高程渲染图,以供后续应用解译使用。本次制图对于陆域点云编辑较为粗略,高程图例最高值选取为统计陆域地表高程最大值。在沿岸选取 3 处海陆区域,清晰可见海底地形细节(图7)。



(a) 海陆一体地形产品 (b) 海底地形

图 7 海陆一体地形产品应用

Fig. 7 Application of land and sea integrated topographic products

4.2.5 数据分析

分别在岛的南岸和北岸选取典型地貌特征区域,分析其在影像和激光水深数据上的特点,见图7中标识 A—C 区域。

1) A 区域。A 区域位于南湾港口东侧,该处有一大型海蚀柱。从海底地形数据上可见其四周为海蚀崖,南部崖脚前缘形成海蚀平台,平台较为平坦;而东部崖脚海蚀平台堆积有许多崩塌下来的大岩块。结合影像数据可见海蚀柱顶部生长杂草、树等

绿色植物。

2) B 区域。潮间带附近的岩石在海浪和潮汐的交相侵蚀下遭到破坏,形成呈层分布的海蚀洞穴,当洞穴上部的岩石失去支持后沿垂直节理断裂或崩溃下来,便形成陡峭的海蚀崖。B 区域为湾仔一带,海蚀地貌比较典型,这些海蚀崖高度在 20 ~ 50 m 之间,坡度略陡峭;得到红色箭头处的地形剖面,可以看出,该处的海蚀平台落差有近 20 m,平缓较长一段平台后,又有一个 10 m 内的小落差。

3)C 区域。C 区域位于岛北部,海底地形较为平坦,海底地貌主要有水下岸坡和砂质堆积。其中,水下岸坡呈带状环岛分布,坡度较大,海积微地貌景观清晰可见,从海底地形数据纹理信息看底质粒度较粗。

5 结 论

本文介绍了机载激光雷达测深系统 CZMIL Nova 的基本情况和测深原理,结合工程试生产任务,对系统的海陆一体地形测量技术进行了分析阐述,梳理出影响测量质量的关键问题,总结出数据获取、数据处理及海陆一体地形产品制图等步骤流程。利用系统获取的海底地形数据,结合一些影像数据,可对海底地貌进行有效分析解译,填补了近岸地区因“人下不去,船上不来”的数据空白,扩展了我国大陆海岸带及岛礁机载激光测深调查工作的应用领域。

实际作业中发现,影响激光测深效果主要因素是水质的清澈度,同时也受底部反射率、飞行稳定性、作业环境条件等其他因素影响。在工程项目实施前,应综合考虑这些影响因素,对激光测深潜力进行分析判断,合理规划测深作业区域。

本次研究结果对国内开展机载激光雷达测深工作规划、技术研究和行业应用具有参考价值。为更加深度挖掘和利用好数据,加强研究浑浊水域激光测深效果提升方法和数据处理方法优化,加大与国内相关行业的合作;通过国内产学研多部门合作,进一步推进国内机载激光雷达水深测量技术的应用与推广。

志谢:在项目研究和本文编写过程中,得到了张永军教授的指导和帮助,余学中教授、王建超教授的鼎力支持;野外飞行队员于坤、李勇志、张文凯等人的辛苦付出,在此一并表示衷心感谢。

参考文献 (References) :

[1] 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.

[2] 刘焱雄,郭 锴,何秀风,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.

[3] 翟国君,王克平,刘玉红. 机载激光测深技术[J]. 海洋测绘,

2014,34(2):72-75.

Zhai G J,Wang K P,Liu Y H. Technology of airborne laser bathymetry[J]. Hydrographic Surveying and Charting,2014,34(2):72-75.

[4] 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 and Charting,2012,32(2):67-71.

[5] 刘智敏,杨安秀,阳凡林,等. 机载 LiDAR 测深在海洋测绘中应用的可行性分析[J]. 海洋测绘,2018,38(4):43-47.
Liu Z M,Yang A X,Yang F L,et al. The feasibility analysis for the airborne LiDAR bathymetry application in marine surveying and charting[J]. Hydrographic Surveying and Charting,2018,38(4):43-47.

[6] CZMIL HydroFusion Manual & CZMIL Operation Manual[Z]. Canada:Teledyne Optech Inc. 2017.

[7] 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,2018,55(8):082801.
He Y,Hu S J,Chen W B,et al. Research progress of domestic airborne dual-frequency LiDAR detection technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress,2018,55(8):082801.

[8] Tuell G,Barbor K,Wozencraft J. Overview of the coastal zone mapping and imaging LiDAR (CZMIL): A new multi-sensor airborne mapping system for the U. S. army corps of engineers [C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering,2010.

[9] 毕世普,别 君,张 勇. 机载 LiDAR 在海岸带地形测量中的应用[J]. 海洋地质前沿,2012,28(11):59-63.
Bi S P,Bie J,Zhang Y. Application of airborne LiDAR to coastal topographic survey[J]. Marine Geology Letters,2012,28(11):59-63.

[10] 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:解放军信息工程大学,2010.
Ye X S. Research on principle and data processing methods of airborne laser bathymetric technique [D]. Zhengzhou: Information Engineering University,2010.

[11] Fuchs E,Tuell G. Conceptual design of the CZMIL data acquisition system (DAS): Integrating a new bathymetric lidar with a commercial spectrometer and metric camera for coastal mapping applications [C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering,2010.

[12] 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.

[13] Tuell G,Barbor K,Wozencraft J. Overview of the coastal zone mapping and imaging LiDAR (CZMIL): A new multi-sensor airborne mapping system for the U. S. Army Corps of Engineers [C]//SPIE,2010,7695:76950R.

[14] 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.

Wang Z W,Zhu S C,Lu G,et al. CZMIL airborne laser sounding system and its testing evaluation in Luoma Lake[J]. Journal of Marine Sciences,2017,35(3):20-26.

[15] CZMIL Calibration Survey Requirements[Z]. Canada:Teledyne Optech Inc. 2017.

[16] 亓发庆,黎广钊,孙永福,等. 北部湾涠洲岛地貌的基本特征[J]. 海洋科学进展,2003,21(1):41-50.

Qi F Q,Ni G Z,Sun Y F,et al. Basic geomorphologic features of the Weizhou Island of the Beibu Bay[J]. Advances in Marine Science,2003,21(1):41-50.

A preliminary study on land – sea integrated topographic surveying based on CZMIL bathymetric technique

WU Fang¹, JIN Dingjian¹, ZHANG Zonggui¹, JI Xinyang¹, LI Tianqi¹, GAO Yu²
(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural and Resources, Beijing 100083, China; 2. Teledyne Optech, Inc., Ontario L4K5Z8, Canada)

Abstract: Conventional methods for regional bathymetry mainly use shipborne acoustic detection technologies. However, since the hull cannot access the coastal shallow waters and the areas with dense islands and coral reefs, there is no available data of near – coastal areas. These problems can be effectively solved with the emergence and development of airborne lidar bathymetric technology, which has become a fast and efficient method for water – depth and submarine topographic exploration. Based on the airborne laser sounder CZMIL Nova, this paper introduces the characteristics and influencing factors of the land – sea integrated technologic surveying and its preliminary application in the land – sea integrated topographic surveying of islands.

Keywords: airborne laser bathymetry; CZMIL; remote sensing; coastal zone; topography

(责任编辑: 李 瑜)