

· 施 工 ·



无人机激光雷达测绘在长江口水域的应用

薛 为¹, 王建雄², 王 露³, 王长永²

(1. 交通运输部长江口航道管理局, 上海 200003; 2. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120;
3. 长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局, 上海 200136)

摘要: 为了探寻无人机激光雷达在长江口水域滩涂地形测量的应用效果, 在探究无人机激光雷达测量原理的基础上, 在长江口水域不同区域开展无人机激光雷达实地测量。通过数据计算及对比分析发现, 测量数据受滩涂植被覆盖影响较大, 植被覆盖造成滩涂泥面线判读困难。选取秋冬寒冷时节开展无人机激光雷达测量有利于提高数据的精度; 对于常年植被覆盖较好的区域, 建议采取多次飞行测量的方式, 提高有效数据量。此外, 在进行无人机激光雷达数据测量时, 应同步开展 GNSS-RTK 等传统手段测量, 以验证数据准确性, 并结合无人机摄影数据判别各类地物要素。

关键词: 长江口; 滩涂; 激光雷达; 植被

中图分类号: U652.4; P228.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)06-0230-07

Application of UAV LiDAR mapping in waters of Yangtze Estuary

XUE Wei¹, WANG Jianxiong², WANG Lu³, WANG Changyong²

(1. Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau, Ministry of Transport, Shanghai 200003, China;
2. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China;
3. Changjiang River Estuary Bureau of Hydrological and Water Resources Survey,
Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Shanghai 200136, China)

Abstract: To explore the application effect of UAV LiDAR in beach topography measurement in the Yangtze Estuary waters, UAV LiDAR field measurements are carried out in different areas of the Yangtze Estuary waters on the basis of exploring the principle of UAV LiDAR measurement. Through data calculation and comparative analysis, it is found that the measured data are greatly affected by the vegetation cover of the mudflat, which makes it difficult to read the mudline of the mud flat. Selecting colder seasons such as autumn and winter to carry out UAV LiDAR measurements is conducive to improving the accuracy of the data, while some areas covered with good perennial vegetation are recommended to be measured by multiple flights to improve the effective data volume. In addition, when carrying out UAV LiDAR data measurements, it is necessary to synchronize traditional means such as GNSS-RTK measurements to verify the accuracy of the data, and the combination of UAV photographic data is conducive to the discrimination of various types of feature elements.

Keywords: Yangtze Estuary; mud flat; LiDAR; vegetation

长江口水域自徐六泾往下至口外 30 m 等深线处, 总长约 160 km, 平面呈现出“三级分汊, 四口入海”的格局; 长江口作为中等潮汐强度河口, 同时受到径、潮流共同作用, 在此情形下, 长江口水域的河床地貌演变较为复杂^[1]。长江口自徐六

泾往下各类大小滩涂、沙体约有 18 座, 由于潮汐作用, 这些沙体的一部分处于潮间带上, 即高潮位时过水、低潮位时出滩。近年来, 随着激光雷达在滩涂测量的不断应用, 对于其测量原理研究、测量方法优化和数据处理分析也在不断推进。

收稿日期: 2024-08-12

作者简介: 薛为 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口航道与水文泥沙监测研究。

在测量原理方面, 测量误差主要来源于测量平台的惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 和全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS), 为了提升测量精度, 将两个单元进行组合导航, 并同步周期参数, 定位精度将得到显著提升。而在深海海洋测量中, 无人机激光雷达的测量主要是利用双色激光雷达测深系统, 其使用两种激光器, 分别是波长 1 064 nm 的红外激光和波长 532 nm 的蓝绿激光, 这两束激光具有高功率、窄脉冲的特点, 根据两个激光束记录的间隔差确定水深^[2]。对于激光雷达测量数据处理, 水面和水底反射峰的搜索算法是水深计算的核心, 目前并不存在适合所有环境的单一算法, 必须针对特定的环境和条件, 选择合适的算法, 甚至需要综合使用多种算法提高精度^[3]。在无人机成像模块, 相关研究认为, 应进一步攻克高脉冲能量宽谱段激光光源、高效多波段分光接收技术、高灵敏度微弱光探测技术难题, 发展更高能量超连续谱激光, 优化多通道同步探测接收; 针对无人机高光谱激光雷达海量数据, 应研究更加高效的在线全波形解算方法, 并基于高性能计算或者云计算技术, 提高回波强度精准解算能力^[4]。

无人机激光雷达测量的难点是对植被的分辨, 因植被会阻碍激光的穿透, 从而无法捕捉到真实的地面高程, 目前植被地形分类主要采用滤波的方法^[5]。相关研究表明, 布料模拟滤波在多类型植被覆盖滩涂区域不仅滤波精度高, 而且通用性较强, 是构建滩涂高精度数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 的首选滤波方法。而在植被森林的激光雷达测量中, 基于较低密度的点云数据, 使用分位数法可以较好地进行林分平均高的估计, 这一技术用于树高估计是可行的, 精度均高于 87%, 总体平均精度为 90.59%, 其中阔叶树的精度高于针叶树的精度^[6]。

长江口水域滩槽的稳定有利于整体河势的稳定, 因此在水域地形测量时, 准确掌握滩涂形态、面积变化情况是十分重要的。传统的滩涂测量方法有 GNSS-RTK (real-time kinematic 实时动态定位)

测量法, 航空摄影测量法等, 而长江口水域滩涂面积大, 植被生长茂密, 环境复杂, 测量条件恶劣, 传统的测量方法实施难度较大。无人机平台搭载激光雷达测量技术不受扫描角度及地形条件影响, 具有视野广、精度高、效率高等优势, 且无人机激光雷达搭载的航空摄影可以同步获取水域影像数据, 目前已在水域滩涂、整治建筑物、海岛测绘等方面展开了应用^[7]。在长江口水域无人机激光雷达测量中, 探究其数据处理方法, 分析高植被覆盖区段的处理, 有助于提高测量效率, 提升数据准确性。

1 无人机激光雷达测量原理

在无人机激光雷达测量过程中, 一般情况下 IMU 采样频率高于 GNSS 设备, IMU 单元运用捷联惯导更新算法解算获得载体的姿态、速度和位置信息, 加速度计按照一定频率计算一次横滚角和俯仰角; 随后采用最优卡尔曼滤波进行姿态、速度和位置组合计算, 更新系统的姿态、速度和位置, 并对系统进行反馈校正。三维坐标激光扫描的工作过程实际上就是一个不断重复的数据采集和处理的过程, 无人机激光测量系统见图 1。其主要测量方法是向地面发射激光脉冲, 并采集时间信号、强度信息和角度信息。根据激光测距法, 计算出无人机与地物的距离和角度, 进而分解计算出 x 、 y 、 z 轴上的坐标增量, 得到地物点的坐标。对于激光扫描仪而言, 采样点是系统局部坐标, 通过坐标转换得到实际坐标, 如图 2 所示, 转换公式为:

$$\begin{cases} x_s = S \cos \theta \cos \alpha \\ y_s = S \cos \theta \sin \alpha \\ z_s = S \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: S 为无人机到地物 P 点的距离; x_s 为地物 P 点在 x 轴方向的坐标距离; y_s 为地物 P 点在 y 轴方向的坐标距离; z_s 为地物 P 点在 z 轴方向的坐标距离; θ 为地物 P 点与坐标原点的连线在 xz 平面内与 z 轴正方向之间的夹角; α 为地物 P 点在 xy 平面内的投影与 x 轴正方向之间的夹角。

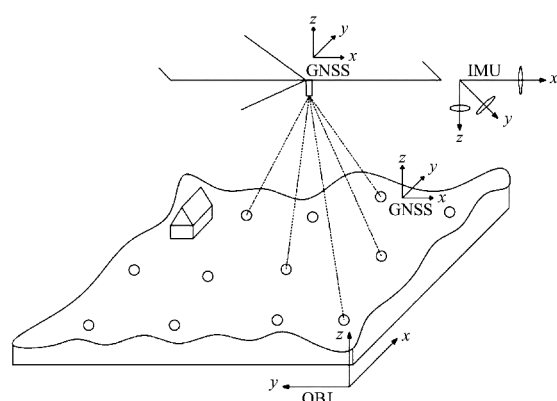


图 1 无人机激光雷达测量系统
Fig. 1 UAV LiDAR measurement system

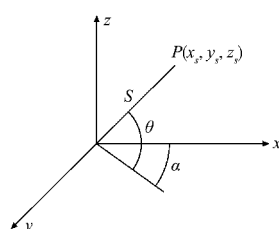
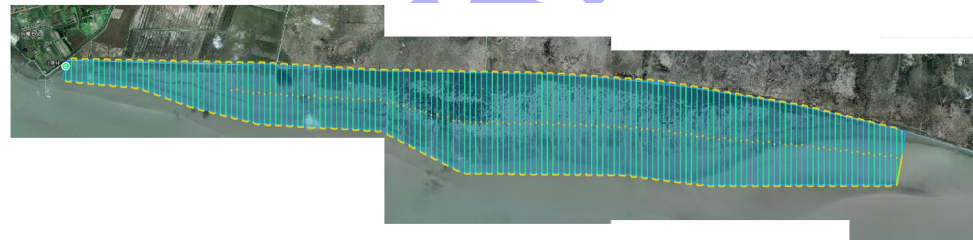


图 2 激光雷达测量坐标转换
Fig. 2 LiDAR measurement coordinate conversion

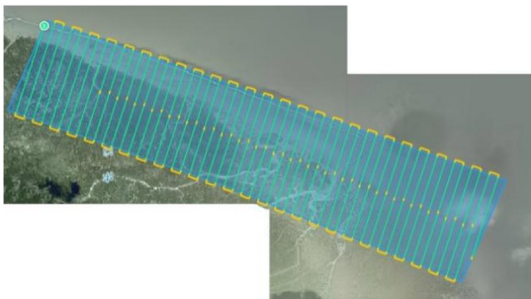
2 数据采集与计算

2.1 数据采集

无人机激光雷达测量区域为长江口北槽北导堤 1#~4#丁坝、北槽南导堤坝田区域和九段沙滩地等高滩水域，测量区域航线规划见图 3。测量航线设计根据精度要求、测区宽度、作业效率设定，航线布设采用往返航线，采用垂直航道方向设计，少部分采用平行航道方向设计，保证航向重叠度 60% 以上，旁向重叠度 30% 以上。航高一般控制在 200 m 左右，航速控制在 10 m/s 以内。在植被茂密区域加密航线，使得原始扫描点云密度不少于 80~100 个/m²，见图 3。在激光雷达测量的同时，采用数码相机拍摄影像照片，像片航向重叠度 60% 以上，旁向重叠度 30% 以上，像片旋偏角不大于 12°，影像地面分辨率在 0.2 m 以内，影像色彩模式采用 24 位色，影像清晰，满足外业全要素精确测绘和室内判读的要求，无人机激光雷达测量流程见图 4。



a) 北槽北导堤坝田区域



b) 北槽南坝田区域



c) 九段沙区域

图 3 长江口区域航线规划
Fig. 3 Planning of navigation routes in Yangtze Estuary area

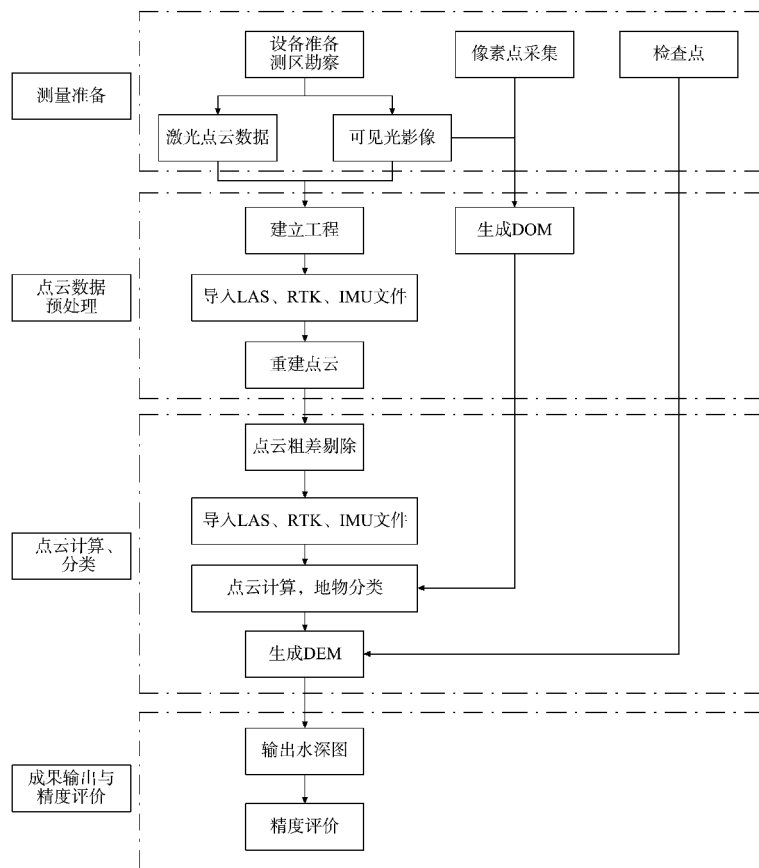


图4 无人机激光雷达测量流程

Fig. 4 Measurement process of UAV LiDAR

2.2 数据计算

数据采集完成后, 对所采集的数据进行GNSS、IMU和系统中所提的各类参数进行联合解算, 获取点云坐标数据。数据处理的主要内容是空三加密、点云数据处理。空三加密指影像采集完成后利用空三软件加载影像姿态测量系统(position and orientation system, POS)数据、相机校正参数、相控点坐标。

利用像片数据作为像控加密的原始数据, 逐片进行相对定向, 再按区域网进行绝对定向后, 进行光束法区域网整体平差, 得到加密点成果。点云数据处理主要包括: POS数据预处理, 将激光雷达数据文件、惯导位置姿态数据和基站同步观测数据文件做事后差分预处理; 将精确的航迹信息与激光雷达数据进行差分处理, 并做航带点云拼接及平差处理得到高精度点云数据; 点云滤波, 通过点云滤波软件将点云分离出地面点, 并通过人工处理将一些误分类的点进行正确分类,

以保证后续高程点提取及断面特征点数据的采集精度。

2.3 数据分析

将解算后的点云数据进行展点处理和地物划分, 长江口水域地物划分种类主要包括水域、植被、滩涂和整治建筑物几类。针对长江口水域滩涂地形的特点, 有两类较为难以判别的地物类型。

第一类是高含沙水域, 在长江口水域河床地形测量过程中, 滩涂和水域相连。一种是打到水面点反射回来由传感器接收; 另一种是穿透水面点几乎沿原方向打向水下地物点。因此, 发射一束激光脉冲反射回来, 传感器会接收两重回波。泥土、土壤具有一个重要特性, 即随着土壤成分含水量的增加, 其对电磁波波谱的反射力明显下降, 直到含水量达到一定程度时光谱反射率为0。由于长江口部分水域水体含沙量较高, 会产生一定稀疏的回波, 这类回波并非来自河床泥面的反射, 属于失真数据, 从而造成水陆边界不够清晰

的情况发生。针对此种情形,通常需结合无人机同步拍摄的影像数据进行判别,勾勒出滩涂与水域的分界线,从而区分滩涂数据与水域数据。

第二类是高植被群所覆盖的滩地,由于长江口水域常年气温适宜,加之长江口水域部分滩涂高出滩的部分较为稳定,因此长江口水域滩涂上的植被生长茂盛,形态较高。这类地形在进行无人机激光雷达扫测时,雷达波束会被植被顶部反射回来,从而不易确定实际滩涂的顶面高程位置。此种情况下,一方面可以采用 GNSS-RTK 测量法代替无人机激光测量,但此法存在效率低、工作量大等情况;另一方面,在用无人机激光雷达测量高植被群的滩涂时,通常需对测量区域进行多次飞行,从而提高滩涂激光雷达点的穿透率。在该类型区域数据处理过程中,滩涂面和植被顶的高差一般达到 2 m,从而导致高差数据也达到 2 m。在点云滤波过程中,需将非实际点进行剔除,经典滤波方法主要有坡度滤波、渐进式数学形态学滤波和布料模拟滤波等,大部分应用于城市、森林等场景,在滩涂这种表面淤陷、多类型茂密植被交替覆盖的特殊区域的应用则相对较少。

在长江口水域滩涂测量过程中,植被滤波可采用点云剖面分析的方法^[8]。由于激光无法有效穿透茂密植被,点云噪声主要集中在植被覆盖度高的区域,结合数字正射影像图(digital orthophoto map, DOM),可有效地对植被覆盖度高的区域进行点云过滤处理。密集点云数据的细节特征和内部轮廓不易探寻,借助点云矢量化工具对点云数据进行矢量处理。完成点云数据处理后,再根据计划测线提取拟处理断面,可将断面数据转换成 Drawing(DWG)格式数据。将 DWG 文件按断面导入 CAD 之类的软件,手工分离出地面点与非地面点,提取出泥面高程,即可得到过滤后的真实地形数据,数据提取见图 5。该方法效率较低,但较自动处理准确度高。由于夏季植被生长较为茂盛,目前长江口一些滩涂地形的测量选择避开该时段。

完成数据地物分类后,即可搭建整体模型轮廓,然后进行噪声点处理,无人机激光雷达所测

数据即可满足测量要求,与其他数据进行整合,组成整个水域测量数据,并以此生成数字高程模型,进而生成等深线水深图^[9]。

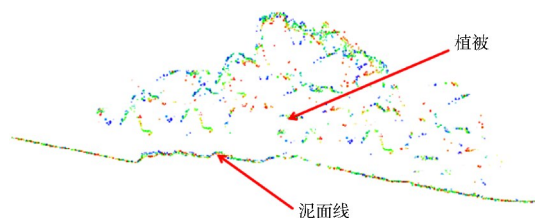


图 5 植被覆盖区域泥面提取

Fig. 5 Extraction of mud surface in planted areas

3 测量结果分析

3.1 误差分析

目前,长江口水域 GNSS-RTK 高程的测量精度均能达到 5 cm 以内,一些性能较好的仪器测量精度可达 1.5 cm,基本达到三、四等水准测量要求^[10]。为对比验证无人机激光雷达测量数据和 GNSS-RTK 所测点位数据,在长江口北槽北导堤 1[#]~4[#]丁坝、北槽南导堤坝田区域不同时期同步采集 16~18 个检查点,九段沙滩地同步采集 20 个检查点,共计 54 个检查点数据,对比结果见表 1。

表 1 检查点误差统计
Tab. 1 Error statistics of checkpoints

类别	RTK 采集坐标 z/m	点云实测 坐标 z/ m	高程 较差/ m	误差 百分比/ %	中误差/ m
第 1 次 北槽 N ₁ -N ₄ 、 南坝田	14.743	14.796	0.053	0.36	0.079
	14.632	14.504	-0.128	0.87	
	14.750	14.785	0.035	0.24	
	15.007	15.090	0.083	0.55	
	14.623	14.598	-0.025	0.17	
	16.323	16.420	0.097	0.59	
	16.463	16.399	-0.064	0.39	
	15.704	15.771	0.067	0.43	
	15.286	15.249	-0.037	0.24	
	13.962	13.995	0.033	0.24	
	16.489	16.384	-0.105	0.64	
	16.862	16.921	0.059	0.35	
	16.771	16.722	-0.049	0.29	
	14.966	15.031	0.065	0.43	
	15.604	15.501	-0.103	0.66	
	15.071	15.187	0.116	0.77	

续表1

类别	RTK 采集坐标 z/m	点云实测 坐标 z/ m	高程 较差/ m	误差 百分比/ %	中误差/ m
第 2 次 北槽 N ₁ -N ₄ 、 南坝田	21. 143	21. 181	0. 038	0. 18	0. 093
	20. 866	20. 838	-0. 028	0. 13	
	20. 981	21. 046	0. 065	0. 31	
	15. 088	15. 217	0. 129	0. 85	
	19. 704	19. 566	-0. 138	0. 70	
	20. 591	20. 535	-0. 056	0. 27	
	19. 510	19. 617	0. 107	0. 55	
	19. 532	19. 489	-0. 043	0. 22	
	19. 348	19. 271	-0. 077	0. 40	
	14. 890	14. 765	-0. 125	0. 84	
	19. 487	19. 414	-0. 073	0. 37	
	15. 303	15. 190	-0. 113	0. 74	
	13. 500	13. 405	-0. 095	0. 70	
	12. 598	12. 689	0. 091	0. 72	
	12. 763	12. 660	-0. 103	0. 81	
	13. 425	13. 521	0. 096	0. 72	
	13. 005	12. 872	-0. 133	1. 02	
	14. 208	14. 271	0. 063	0. 44	
九段 沙滩地	15. 697	15. 834	0. 137	0. 87	0. 103
	15. 856	15. 748	-0. 108	0. 68	
	15. 582	15. 488	-0. 094	0. 60	
	16. 110	16. 225	0. 115	0. 71	
	15. 573	15. 511	-0. 062	0. 40	
	15. 819	15. 896	0. 077	0. 49	
	15. 829	15. 743	-0. 086	0. 54	
	15. 188	15. 285	0. 097	0. 64	
	15. 207	15. 249	0. 042	0. 28	
	15. 555	15. 424	-0. 131	0. 84	
	15. 596	15. 491	-0. 105	0. 67	
	15. 691	15. 784	0. 093	0. 59	
	14. 775	14. 646	-0. 129	0. 87	
	16. 014	16. 099	0. 085	0. 53	
	16. 046	15. 953	-0. 093	0. 58	
	15. 398	15. 496	0. 098	0. 64	
	15. 777	15. 904	0. 127	0. 80	
	16. 468	16. 337	-0. 131	0. 80	
	15. 879	15. 952	0. 073	0. 46	
	16. 987	16. 928	-0. 059	0. 35	

表 1 中的误差百分比均未超过 1%, 处于正常误差范围。根据北槽 N₁~N₄、南坝田区域的数据可知, 同一区域不同时间段通过两种观测方法所得数据的误差有一定差异, 主要是由于长江口季节性差异明显, 不同季节的植被状态有较大差异。

一般夏季植被覆盖更加茂盛, 且高度较大, 对无人机激光雷达测量影响更大, 因此中误差更大。而九段沙区域属于常年出水的滩地, 一年四季均有较为茂盛的植被覆盖, 受其影响, 误差较其他区域偏大。因此, 针对植被覆盖较为茂盛的滩涂水域, 应选择秋冬季等温度较低的时节开展无人机激光雷达测量, 且应开展多次飞行测量, 通过提高基数数量提高植被穿透率, 从而增加有效数据量。

参照 CH/T 8023—2011《无人机激光雷达数据处理技术规范》^[11]中对于数字高程模型相对于野外控制点高程中误差的规定, 对 3 组统计数据的高程较差进行分析, 各组数据的中误差值均满足 1:500~1:2 000 比例尺测图的 0.2~0.4 m 精度要求。与 GNSS-RTK 高程测量相比, 无人机激光雷达测量的总体误差较大, 但依然满足测量要求。经过处理, 长江口水域无人机激光雷达测量成果形式主要为三维水深数据和水深地形图, 见图 6。

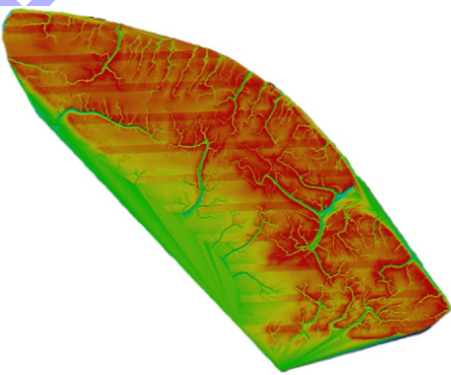


图 6 长江口滩涂地形
Fig. 6 Beach topography in Yangtze Estuary

3.2 技术优势

无人机激光雷达在长江口水域滩涂测量中, 主要有以下优势:

- 1) 主动化系统。无人机激光雷达测量属于主动系统, 可以选择特定区域和特定潮时在长江口开展测量, 基本不需要测量现场辅助, 且不需要大量的地面控制点。
- 2) 测量效率高。无人机激光雷达测量可以获取的数据量大, 是传统 RTK 测量效率的数倍之多, 且平面和高程精度高, 满足测量要求。
- 3) 多系统融合。目前长江口水域所用的无人

机激光雷达测量方法融合航空摄影测量技术, 激光测量与摄影测量相互协同、相互融合, 进一步提高了数据准确度。

4) 自动化程度高。整套观测系统集成先进的遥感和 GNSS 技术, 所得数据可直接作为地理信息系统的数据库。

4 结论

1) 无人机激光雷达在滩涂水域的测量受植被生长、覆盖影响较大, 因此选取在秋冬季节测量更有利于提高测量精度。

2) 无人机激光雷达测量波束具有正射和斜射的功能, 为波束倾斜测量提供基础。对于一些常年植被覆盖较茂盛的区域或者隐蔽性较高的区域, 建议采用多次飞行测量模式, 提高穿透率, 增加有效数据量。

3) 在实际测量过程中, 需要采取 GNSS-RTK 等测量模式与无人机测量数据进行对比, 评估数据精确性, 并结合无人机摄影数据, 以便更好地协助判别各类地形要素。

参考文献:

- [1] 交通运输部长江口航道管理局. 长江口深水航道治理工程实践与创新[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau, MOT. Practice and innovation in the Yangtze estuary deepwater channel improvement project [M]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [2] 刘昱辰, 陈斌, 金鼎坚. 基于机载激光雷达测深技术的海底底质分类研究进展[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(5): 495-505.
LIU Y C, CHEN B, JIN D J. Research progress in seabed sediment classification based on airborne Lidar bathymetry technology[J]. Advances in geosciences, 2023, 13(5): 495-505.
- [3] 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.
LIU Y M, DENG R R, QIN Y, et al. Data processing methods and applications of airborne LiDAR bathymetry[J]. National remote sensing bulletin, 2017, 21(6): 982-995.
- [4] 龚威, 史硕, 陈博文, 等. 机载高光谱激光雷达成像技术发展与应用[J]. 光学学报, 2022, 42(12): 29-40.
GONG W, SHI S, CHEN B W, et al. Development and application of airborne hyperspectral LiDAR imaging technology[J]. Actaoptica sinica, 2022, 42(12): 29-40.
- [5] 刘帅, 栾奎峰, 谭凯, 等. 基于无人机 LiDAR 点云的多类型植被覆盖滩涂地形滤波[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(6): 1272-1283.
LIU S, LUAN K F, TAN K, et al. Multi-type vegetation coverage tidal flat terrain filtering based on UAV LiDAR point cloud [J]. Remote sensing technology and application, 2021, 36(6): 1272-1283.
- [6] 庞勇, 赵峰, 李增元, 等. 机载激光雷达平均树高提取研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(1): 152-158.
PANG Y, ZHAO F, LI Z Y, et al. Forest height inversion using airborne lidar technology [J]. National remote sensing bulletin, 2008, 12(1): 152-158.
- [7] 郭清风, 张峰, 范巍. 关于 Lidar 数据的滩涂、海岸带主要地物提取方法[J]. 地理空间信息, 2011, 9(4): 25-27.
GUO Q F, ZHANG F, FAN W. Method of feature extraction from Lidar data in coastline and tidal flat [J]. Geospatial information, 2011, 9(4): 25-27.
- [8] 任璘婧. 变化的长江口滩涂湿地景观与生态系统服务功能[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
REN L J. Changing salt marsh landscape and its ecosystem service at the Yangtze estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [9] 彭认灿, 董箭, 贾帅东, 等. 数字水深模型建模技术研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1575-1587.
PENG R C, DONG J, JIA S D, et al. Research progress and prospect of digital depth model constructing technology [J]. Actageodaetica et cartographica sinica, 2022, 51(7): 1575-1587.
- [10] 陈为民, 张旭东, 符华年, 等. GPS 高程测量代替等级水准测量的应用研究[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2013, 38(7): 828-831.
CHEN W M, ZHANG X D, FU H N, et al. Application research of GPS elevation survey instead of grade leveling[J]. Geomatics and information science of Wuhan University, 2013, 38(7): 828-831.
- [11] 机载激光雷达数据处理技术规范: CH/T 8023—2011[S]. 北京: 测绘出版社, 2012.
Specifications for data processing of airborne LIDAR: CH/T 8023—2011 [S]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2012.

(本文编辑 王传瑜)