引文格式：赵保成,徐健,徐坚,等. 基于无人船的多波束系统水下地形测量应用[J]. 地理空间信息, 2023, 21(9): 65-68. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.09.016

基于无人船的多波束系统水下地形测量应用

赵保成[1]，徐　健[1]，徐　坚[1]，肖　潇[1]
（1. 长江科学院 空间信息技术应用研究所，湖北 武汉 430010）

摘　要：为解决多波束测深过程中测区水域租用船只难、水下测深单元安装校准步骤繁琐、测量船难以严格按照预设航线航行等问题，开展了基于多波束测深技术和无人船技术的水下地形测量研究。简要介绍了多波束系统的主要组成部分、工作原理，分析了将多波束系统与无人船技术相结合并应用在水下地形测量中的诸多优势及其关键技术，在湖北省巴东县链子溪进行了将多波束测深系统搭载于无人船上的工程实践。结果表明，多波束测深技术与无人船技术的结合应用，简化了测深设备安装校准流程，提高了作业效率。

关键词：多波束测深；水下地形测量；测深单元；安装校准；无人船
中图分类号：P234.2　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）09-0065-04

Application of Underwater Topographic Survey of Multi-beam Echo Sounder System Based on Unmanned Ship

ZHAO Baocheng[1], XU Jian[1], XU Jian[1], XIAO Xiao[1]
(1. Spatial Information Technology Application Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: In the process of using multi-beam echo sounder system, it often encountered problems such as difficulty in renting boats in the survey area, cumbersome installation and calibration steps of the echo sounder unit and difficulty for surveying ships to strictly follow the preset route. In order to solve the above problems, we carried out the underwater topographic survey based on multi-beam echo sounder technique and unmanned ship technique. We briefly introduced the main components and working principles of multi-beam echo sounder system, discussed the advantages of combining multi-beam echo sounder system with unmanned ship in the underwater topographic survey, and analyzed the key technology of it. Finally, we carried out the engineering practice in Lianzixi, Badong County, Hubei Province. Practical results show that the combined application of multi-beam echo sounder technique and unmanned ship technique can simplify the installation and calibration process of sounding equipment and improve operational efficiency.

Key words: multi-beam echo sounder, underwater topographic survey, echo sounder unit, installation calibration, unmanned ship

水下地形数据是水利工程建设、水资源综合利用管理和水环境保护等工作的研究基础。如何高效获取高精度水下地形数据是目前测绘领域中的热点问题。水下地形测量主要包括水上定位和定位点水深测量[1-3]两个关键技术。随着卫星导航定位技术的发展，卫星定位法已成为水上定位的主流方法[4]。根据测量水深工具的发展，水深测量技术大致经历了3个阶段，即传统测深方法（测深杆、锤）、声波测深方法（单波束测深、多波束测深）、遥感技术测深方法（光学遥感、微波遥感、激光）。由于声波在均匀介质中具有良好的穿透性和弱衰减性，因此声波测深成为目前测深的主流方法。随着多波束测深技术的不断成熟，越来越多的测绘单位开始应用多波束系统进行水下地形测量实践活动[5-7]。多波束测深系统集现代电子计算机技术、空间定位技术、数字化传感器技术、软件技术、网络技术、数字制图技术等于一体，将传统水下地形测量方式从点、线扩展到面，大大提升了工作效率[8-9]。然而，在多波束测深系统的使用过程中，往往会遇到现场测量水域租用船只难、设备安装与校准工序复杂且耗时、测量船难以按照预设测线航行等问题，严重影响了水下地形测量作业效率。近年来无人机、无人船控制技术快速发展，测绘工作者将多种测量传感器集成到无人控制设备上，进行大范围测量工作，并取得了良好的作业效果[10-15]。为了较好地解决

收稿日期：2022-04-22；修回日期：2022-06-21。
项目来源：国家重点研发计划资助项目（2018YFD1100405）；长江科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费资助项目（CKSF2019410+KJ、CKSF2019411+KJ、CKSF2019528+KJ）；湖北省自然资源厅科技计划资助项目（ZRZY2021KJ10）。
第一作者简介：赵保成（1990—），工程师，研究方向为测绘科学与技术在水利行业中的应用，E-mail：515524535@qq.com。

传统多波束测深系统应用过程中出现的问题，本文将无人船控制技术与多波束测深系统相结合，充分发挥各自优势，进一步提高工作效率，更好地服务于水下地形测量工作。

1 多波束系统简介

1.1 多波束系统构成

多波束系统利用同时发射和同时接收若干定向脉冲窄波束的声波换能器对水底地形进行数据采集[16-18]，主要包括4个子系统：①导航定位系统，提供位置、时间等信息；②姿态罗经系统，提供测量设备的姿态信息；③声呐系统，获取水深信息；④数据采集、处理子系统，对采集数据进行后处理，输出最终成果图。

1.2 多波束测深技术原理

多波束系统的核心部件是声呐系统，由声波的发射换能器和接收换能器组成，接收换能器与测量船的航迹方向垂直，发射换能器与测量船的航迹方向平行。多波束系统能一次性获取垂直于测量船航迹方向的水下地形点三维坐标。随着测量船向前推进，线转变成面，就形成了对水下地形的全覆盖式扫测。

2 多波束系统与无人船技术结合的优势

1）智能化程度高。无人船受程序控制，集成了先进的自动控制系统、传感器系统，能根据预设的航速、航线进行自动巡航，且能根据测区水域外界环境的变化智能调整测量船的运行状态，因此无人船比有人船运行更加稳定，更有利于多波束系统在水下地形测量中发挥最大效用。

2）船体轻、易于携带。无人船体积小、船体轻、易于携带，可随多波束设备一起运输到测量水域，免去了在测区现场租用船只的麻烦。多波束系统与无人船相结合是高原无人区湖泊、山区饮用水源水库、封闭式输水干渠等特殊水域精确水下地形测量最优的解决方案。

3）测量设备安装方式固定、工作效率高。测量设备安装与校准是多波束系统水下地形测量活动最重要的前期准备工作。无人船可根据使用的多波束设备各子系统的形状尺寸定制安装方案，子系统之间的相对位置关系是预先设计好的，只需在首次使用时进行校准即可。设备下水开机即可工作，真正做到了随到随测，能显著提高工作效率。

4）安全性高。测量人员能在岸上的安全区通过计算机远程控制无人船进入危险性较大的测区水域进行水下地形测量，减小了安全事故发生风险，保护了测量人员的生命财产安全。

3 多波束系统与无人船技术结合的关键技术

3.1 无人船技术

无人船需根据自身搭载多波束系统的特点进行特殊化定制，重点表现为：

1）续航。多波束系统的各子系统耗电能力强，因此供电问题一直是应用中的重点。在有人船上的传统应用中，各子系统通常由发电机供电，而无人船船体小、空间局促，采用加装充电电池的方式为多波束系统供电，使用内燃机为无人船提供动力，在船航行的同时可为电池反向充电。

2）无人船智能控制。水上作业环境复杂，测量过程中无人船碰撞障碍物、触礁、搁浅风险较大，为保障设备安全和水下测绘任务的顺利完成，无人船需具备智能控制能力，即智能避障能力、智能决策能力、航线规划能力。首先无人船通过多源传感器感知周围障碍物（障碍物大小、距离、方位角等），然后由无人船主机控制单元根据水中障碍物信息，判断障碍物是否影响无人船安全航行，同时对是否重新规划航线做出决策。

3.2 远程控制声呐测量参数技术

在利用多波束测深系统进行水下地形数据采集时，技术人员需根据测区水体的水深、流速、浑浊度等条件的实时变化及时调整声呐探头的增益、功率、频率、幅宽等测量控制参数，以此稳定水底的回波信号，从而确保水深数据采集的准确性。为解决远程控制声呐测量参数问题，选择在无人船上集成工控机系统，工控机上安装多波束测量软件包和远程控制软件，将工控机与无人船岸基控制系统的网络地址设置在同一网段下，岸上的测量人员即可通过无线传输协议同时控制测量船和工控机，从而对多波束系统进行实时控制，进行高精度水下地形测量活动。无人船技术与多波束系统相结合的原理见图1。

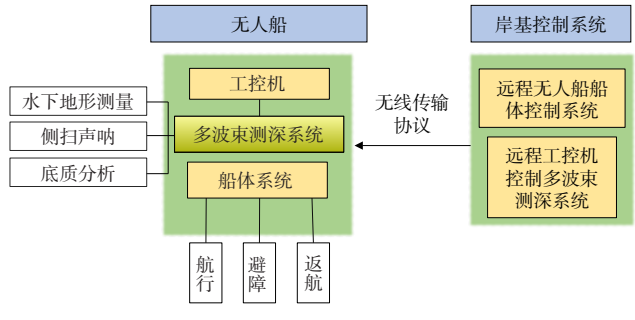


图1 无人船技术与多波束系统相结合的原理图

4　应用实例

4.1　实验区概况

链子溪位于湖北省巴东县，长度约为5 km，河道两岸均为高山，属于典型的高山峡谷河流；地处三峡水库库区内，具有水流流速小、水质清澈、水面宽与水深比小（均值约为2∶1）等特点。该工况十分适合采用多波束进行水下地形测量。

4.2　外业施测

实验采用的多波束设备型号为RESON-T50-R，且为双头安装；工作频率为400 kHz，波束数量为1 024（双探头），测深范围为0.5~450 m，测距精度为6 mm，波束最大开角为165°。

1）设备安装与校准。将多波束测深设备安装于定制的无人船上，确保各子系统连接紧固。无人船下水后，对设备进行通电检查测试，确认正常后在指定水域进行横摇、纵摇、艏摇校准工作。

2）测量工程项目建立。无人船岸基控制系统通过电台与船上的工控机建立链接，测量人员远程控制多波束测量控制软件PDS2000建立测量工程项目文件，主要对项目的坐标系统、船型文件、测量界面配置进行一系列设置。

3）测线布设。实验区具有水面宽与水深比小的特点，多波束扫测有效范围更大。理论上，只需一条沿着河流深泓线的测线便能完成整个河段的水下地形测量，但为了防止出现数据空洞区，实验共布设两条测线，沿河流深泓线往返各一条。

4）具体施测。无人船按照预设测线文件自动航行，测量人员通过岸基控制系统远程实时调节多波束测量控制参数，同时监控船的油量、电池电量（为多波束设备供电）、吃水深度等信息，保证测量工作顺利进行。

5）设备回收。水下地形数据采集工作完成后，无人船自动返航，组织人员将无人船吊装上岸。拆卸多波束设备，导出原始测量数据，最后将设备装箱。

4.3　内业数据处理与水下地形三维重建

内业数据处理流程为：①新建船型文件，输入声呐、导航定位、姿态罗经各系统之间的偏移量；②导入原始测线文件和声速剖面数据，对原始数据进行声速改正；③对原始点云数据进行线编辑，剔除测线中的噪点；④对测线文件合成的表面模型进行面编辑，进一步剔除表面模型上的误差点；⑤导出水下地形数字高程模型（图2）。

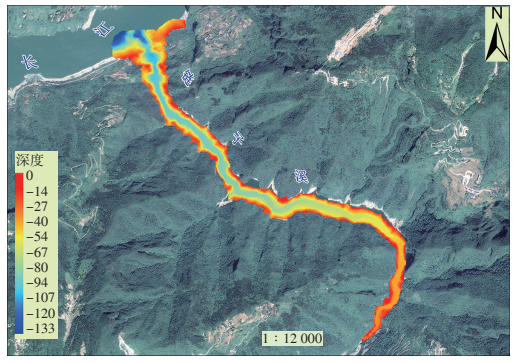


图2　链子溪水下地形数字高程模型

4.4　成果数据验证

采集水深数据时，在已知水深（真值）的水域设置5条垂直于主测深线的检查测线，各检查测线均具有重叠部分。根据同名点的不同水深数据计算多波束测深的内、外符合精度，内符合精度反映观测值之间的离散度（精密度）；外符合精度反映观测值与真值之间的偏差程度（精确度）。二者的计算公式为：

$$m_{\text{内符合}}=\frac{\sqrt{[\Delta^1\Delta^1]}}{n-1} \tag{1}$$

$$m_{\text{外符合}}=\frac{\sqrt{[\Delta\Delta]}}{n} \tag{2}$$

式中，n为检查点个数；Δ^1为同名点观测值与观测值最大似然估计值的较差；Δ为观测值与真值的较差。

精度统计结果见表1、2，可以看出，多波束测深内、外符合精度均在厘米级，完全满足测绘大比例尺水下地形图的要求。

表1　精度检查表

检查测线序号	检查点数/个	内符合精度/±cm	外符合精度/±cm
1#	100	5	6
2#	150	4	5
3#	150	4	4
4#	200	5	7
5#	200	3	5

表2　相邻测线重叠区域精度检查表

相邻测线序号	检查点数/个	内符合精度/±cm
1#和2#	50	8
2#和3#	50	9
3#和4#	50	7
4#和5#	50	5

5　结　语

多波束系统将水下地形测量方式从点、线扩展到面，大大提高了工作效率，同时测量成果的精度也得到了极大提升；将多波束系统与无人船技术相结合，充分利用无人船机动灵活、智能化程度高的特点，解决了传统多波束系统使用场景中租用船只难、安装校

准工序复杂且耗时、测量船难以按照预设测线航行的问题；通过在无人船上集成工控机系统，使测量人员可在岸上远程实时调节多波束系统的测量参数，确保了水底回波的稳定性。多波束系统与无人船技术的结合使多波束系统的应用场景更加广泛，进一步提高了水下地形测量的工作效率。

参考文献

[1] 陆俊. 多波束系统在水下探测中的应用[D]. 南京:河海大学,2006

[2] 吴英姿. 多波束测深系统地形跟踪与数据处理技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2001

[3] 陆秀平,黄谟涛,翟国君,等. 多波束测深数据处理关键技术研究进展与展望[J]. 海洋测绘,2016,36(4):1-6

[4] 陈玉莹,王照锋. 极浅水深与岸边地形一体化快速测量及数据整合方法研究[J]. 测绘与空间地理信息,2022,45(3):212-214

[5] 任建福,韦忠扬,张治林,等. EM2040C 多波束系统在采砂量监测中的应用[J]. 测绘通报,2021(10):136-140

[6] 王茂枚,周广宇,陈楠,等. 基于高分辨率的多波束测量方案研究[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(增刊2):385-389

[7] 杨波. 多波束数据接收与处理系统的研究与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013

[8] 陈璞然. 多波束测深系统在1∶2 000水下测量中的应用分析[J]. 北京测绘,2018,32(5):583-585

[9] 赵钢,王冬梅,黄俊友,等. 多波束与单波束测深技术在水下工程中的应用比较研究[J]. 长江科学院院报,2010,27(2):20-23

[10] 李家彪. 多波束勘测原理技术与方法[M]. 北京:海洋出版社,1999

[11] 刘经南,赵建虎. 多波束测深系统的现状和发展趋势[J]. 海洋测绘,2002,22(5):3-6

[12] 叶斌,陈立波,罗正龙,等. 无人船测量系统在河道清淤中的应用[J]. 地理空间信息,2017,15(11):21-23

[13] 袁建飞. 无人测量船在水下地形测量中的应用研究[J]. 北京测绘,2017,31(4):69-72

[14] 赵薛强. 无人船水下地形测量系统的开发与应用[J]. 人民长江,2018,49(15):54-57

[15] 高艳. 无人船在水下地形测量中的应用与探讨[J]. 城市勘测,2019(4):173-175

[16] 穆仁国. 浅水多波束测深侧扫系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008

[17] 马延霞. 多波束条带测深系统测深精度评估方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007

[18] 佫炜. 便携式浅水多波束测深系统及其模拟电路设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006

（上接第64页）

Nighttime Light Images[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2021,46(6):1-14

[10] Yu B C, Liu Y X, Chen G. Urban Spatial Structure of Port City in South China Sea Based on Spatial Coupling Between NighttimeLight Data and POI[J]. Geo-information Science,2018,20:854-861

[11] Pan S D. Spatial Coupling Between Housing Development and Economic Growth Based on Nighttime Light Remote Sensing and Residential POI[J]. Geo-information Science, 2017,19:646-652

[12] Zheng H H, Gui Z F, Li F, et al. Urban Build-up Area Extraction Method Based on Nighttime Light Images and Point of Interest Data[J]. Geogr Geo-information Science, 2019,35:31-38

[13] 涂丽莹,张正鹏,卜丽静,等. POI与夜光FCM-STP指数融合的城市建成区提取方法[J]. 遥感信息,2021,36(5):124-133

[14] 武新宇,孙立双,谢志伟,等. 遥感影像与POI数据相结合的城市建成区提取适用性研究:以沈阳市为例[J]. 测绘通报,2019(11):134-136

[15] 张扬,郑凤娇,刘艳芳,等. 基于POI与不透水表面指数的城市建成区提取[J]. 地理科学,2022,42(3):506-514

[16] Zhou B, Lapedriza A, Xiao J. Learning Deep Features for Scene Recognition Using Places Database[C]//Proceeding NIPS,2014:487-495

[17] Zhang Q, Wang Y, Liu Q, et al. CNN Based Suburban Building Detection Using Monocular High Resolution Google Earth Images[C]//Proceeding IGARSS, 2016: 661-664

[18] Zhang Z, Wang Y, Liu Q, et al. A CNN Based Functional Zone Classification Method for Aerial Images[C]//Proceeding IGARSS,2016:5 449-5 452

[19] Zhang Z X, Liu Q J. Road Extraction by Deep Residual U-Net[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018,15(5):749-753

[20] Lüscher P, Weibel R. Exploiting Empirical Knowledge for Automatic Delineation of City Large-scale Topographic Databases[J]. Computers Environment and Urban Systems, 2013,37:18-34

[21] Albuquerque A O D, Júnior O A D C, Carvalho O L F D. Deep Semantic Segmentation of Center Pivot Irrigation Systems from Remotely Sensed Data[J]. Remote Sensing, 2020,12(13):2 159-2 183

[22] Mnih V, Hinton G E. Learning to Detect Roads in High-resolution Aerial Images[C]//Proceeding ECCV,2010:210-223