

张倩,梅赛,石波,等. 船载水上水下一体化测量技术及应用——以舟山册子岛为例[J].海洋地质前沿,2019,35(9):69-75.

# 船载水上水下一体化测量技术及应用

## ——以舟山册子岛为例

张倩<sup>1</sup>,梅赛<sup>2,3\*</sup>,石波<sup>1</sup>,赵钊<sup>2,3</sup>,于得水<sup>2,3</sup>,董凌宇<sup>2,3</sup>,单瑞<sup>2,3</sup>

(1 山东科技大学测绘科学与工程学院,青岛 266590;2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所,青岛 266071;  
3 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室,青岛 266071)

**摘要:**近年来,船载水上水下一体化测量技术在海洋测绘领域发展迅速。该技术主要通过多波束水深测量系统、激光扫描系统、定位定姿系统等设备的集成,实现水上水下一体化无缝测量。以舟山册子岛区域为例,利用船载水上水下一体化测量技术,成功实现了水上水下一体化无缝测量,并完成了水深及地形成果整合,阐明该技术在应用中的优缺点,并探讨了船载水上水下一体化测量技术在海岸带地质调查的应用前景及发展方向。

**关键词:**水上水下一体化测量;多波束水深测量系统;海岸带地质调查;实时动态定位;三维地形;三维激光扫描仪

中图分类号:P714+.8;P736

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.09011

## 0 引言

在新时期条件下,海岸带不仅是推进生态文明建设、实施国家重大战略、开展自然资源综合管理的主战场,也是探索转型的综合试验场。海岸带是海洋和大陆相互作用的区域,作为人类生存发展的重要区域,海岸带的综合保护与利用事关国计民生与可持续发展,加强海岸带地质调查的意义重大。同时,海岸带作为中国实施海洋强国战略、“一带一路”战略、实现东部地区率先优化发展的重要支撑带,是促进海陆统筹、提高海洋资源

开发能力、保护海洋生态环境、推进生态文明建设的主战场。在“陆海统筹、以陆促海、以北带南”的工作方针指引下,海岸带地质调查工作逐步形成了“陆海并重,南北并进”的新格局,也给我国海岸带地质调查工作提出了新的要求<sup>[1]</sup>。

随着沿海地区经济社会的快速发展,其周边区域的工业化、城镇化水平得到了迅猛提升,与此同时,海平面上升、地面沉降、海水倒灌、河道淤积、地基不稳、海岸侵蚀、滑坡塌陷、土地盐渍化、地震、风暴等各种自然灾害发生也变得更加频繁。一方面,经济的发展严重破坏了原有的自然环境;另一方面,全球环境变化也严重影响到海岸带的地质环境。海岸带资源环境问题也越来越凸显,如地面沉降、地面塌陷、活动断裂、湿地退化、地下水资源短缺、海水入侵、海底滑坡、浅层气、海岸侵蚀淤积等问题不断出现;海平面变化和台风、风暴潮等极端气候事件的发生,也对海岸带安全构成了威胁。海岸带人类生存发展的重要区域。因而,开展海岸带地质调查具有重要意义。

收稿日期:2019-05-21

基金项目:中国地质调查局项目(DD20191003);国家自然科学基金(41506119)

作者简介:张倩(1992—),女,在读硕士,主要从事海洋测绘、地球物理方面的研究工作.E-mail:408666509@qq.com

\* 通讯作者:梅赛(1985—),男,硕士,助理研究员,主要从事海洋地球物理调查与研究方面的工作.E-mail:meisai2000@163.com

目前,海岛礁的地形、海岸带的侵蚀、水中构筑物的腐蚀、港口航道的建设,以及江河、湖泊、水库的状况都需要用到水上水下地形数据。但是,传统的测绘方法具有耗时长且劳动强度大,并且在一些地区很难同时获取水上水下数据,平面和垂直基准不统一,工作效率低和成果精度低不能满足实际生产需求等缺点。

传统意义上的海岸带测量主要分为水上和水下地形测量2个方面。传统的测绘手段一般是使用GPS RTK、全站仪完成水上地形测绘;使用单波束、多波束测深仪完成水下地形测量。这种水上、水下分开的测量方式存在很多的问题,如基准不统一,工作效率低、仪器操作比较复杂等。同时,在测绘对象比较复杂的情况下无法做到全覆盖,分开测量的效率较低,水上水下统一起来也会比较困难。由于多波束测深仪声波无法到达岸边,三维激光无法穿透水面,导致近岸区域存在一定宽度的空白,难以生成水上水下一体化的地形图,因而获取连续、无缝且坐标统一的水上水下点云和地形数据尤为困难<sup>[2-3]</sup>。

船载水上水下一体化测量技术是近年来的一项新技术,这项技术是通过将多波束水深测量系统、激光扫描系统、定位定姿系统进行集成,根据GNSS提供的位置信息和惯导提供的姿态信息,解算出水下多波束点云、水上激光扫描点云在指定坐标系下的坐标,可应用于岛礁、海岸工程、水中构筑物等测绘<sup>[4-6]</sup>。因此,研究水上水下一体化测量系统,对于提高测量效率、统一测量基准、提高测量精度有重要意义。笔者通过船载水上水下一体化测量技术在舟山册子岛的应用实例进行分析,证明了船载水上水下一体化综合测量技术的发展,可实现水上水下一体无缝测量,为数字化水利、智能型航道、海岛礁测绘等提供数据基础,在陆海垂直基准统一融合下开展测绘应用以及海岸带地质调查等方面具有深远意义<sup>[7]</sup>。

## 1 水上水下一体化测量系统组成及系统集成

### 1.1 水上水下一体化测量系统的组成

水上水下一体化测量系统的主要传感器包

括:激光扫描仪、多波束测深仪、组合导航系统(GNSS/INS)<sup>[8-11]</sup>。

船载水上测量器件采用RIEGL VZ-1000激光扫描仪进行高速、高分辨率、高精度的三维移动测量(图1),其具有的全波形回波技术(Waveform Digitization)和实时全波形数字化处理和分析技术(On-line Waveform Analysis),具有进行高精度高速激光测距及可同时探测到多重目标细节信息的能力。在该系统中,VZ-1000激光扫描仪固定在传感器稳定平台上,控制其不在水平方向的轴旋转,使激光只能在垂直面内进行扫描。其扫描距离可达1 400 m,在100 m距离处,一次单点扫描的精度为5 mm,垂直方向的扫描视场角为30°~130°,每秒可发射高达300 000点的纤细激光束,提供高达0.000 5°的角分辨率。该扫描仪采用对人眼安全的I级激光,支持PC或笔记本操作,总重量<10 kg,相关技术参数详见表1。



图1 RIEGL VZ-1000 三维激光扫描仪

Fig.1 A 3D laser scanner of RIEGL VZ-1000

船载水下测量使用SONIC 2024多波束测深仪,系统具有60 kHz的信号带宽,并且具有较高分辨率、数据精度以及图像质量。SONIC 2024具有在线连续调频的能力,可以在200~400 kHz范围内实时在线选择20多个工作频率。在测量过程中可以根据实际环境调整系统频率,从而达到最佳的量程和条带覆盖宽度效果。在10°~160°范围内,用户可以根据实际作业情况灵活选择合适的覆盖角度。多波束测深仪由船舷安装的发射换能器模块、接收换能器模块以及舱室安装

的声呐接口单元(SIM)组成。当选择一个较窄的覆盖扇区时,所有的声学水深点集中在这个窄条

带内以增加系统的分辨率检测细小的水底特性,其硬件构成和主要技术指标如图 2 和表 2 所示。

表 1 RIEGL VZ-1000 主要技术指标

Table 1 Main technical parameters of RIEGL VZ-1000

激光发射频率/kHz	最大扫描速率/s	最大扫描距离(反射率为 90%)/m	最大扫描距离(反射率为 20%)/m	测距精度/m	视场角/(°)
70	29 000	1 200	560	10	30~130
100	42 000	1 000	470		
150	62 000	800	380		
300	122 000	450	270		



图 2 SONIC 2024 多波束硬件部分

Fig.2 The hardware of SONIC 202 multi-beam system

船载姿态和位置系统使用 SPAN-LCI 分体式闭环光纤组合导航系统。其主要性能指标如表 3、4 所示。

### 1.2 船载水上水下一体化系统集成

船载水上水下一体化测量系统通过对一体化测图装置的多传感器升降平台设计实现测量系统的硬件集成,该系统满足测量船可以在不同工况条件下改变传感器上下位置的要求。该系统为了实现多传感器的协同数据采集、点云实时显示等目的,设计了数据采集显控软件框架。通过对点云数据进行预处理、数据内插、空间配准等步骤,

表 2 SONIC 2024 主要技术指标

Table 2 Main technical parameters of SONIC 2024

航向精度/(°)	信号宽度/kHz	量程分辨率/cm	工作频率/kHz	波束角度	覆盖宽度/(°)	约束个数	最大量程/m	发射速率/Hz
0.008	60	1.25	200~400 实时可选	可变:0.5° x 1°@400 kHz, 1° x 2° @200 kHz	10~160 实时可选	256	500	最大 75

表 3 SPAN-LCI 的组合导航主要技术指标

Table 3 Main technical parameters of integrated navigation SPAN-LCI

定位精度/cm	数据更新率	俯仰角、横滚角精度/(°)	航向角精度/(°)
水平方向 1 高程方向 2	200 Hz (INS 测量、速度、位置、姿态)	0.005	0.008

表 4 IMU 主要技术指标

Table 4 Main technical parameters of IMU

陀螺类型	陀螺输入范围	陀螺零偏稳定性	陀螺标度因数	陀螺角随机游走	加速度计量程	加速度计零偏稳定性	加速度计标度因数
闭环光纤陀螺	±800 °/s	<1.0°/h	100×10 <sup>-6</sup>	<0.05°/√h	±40 g	<1.0 mg	250×10 <sup>-6</sup>

对多源数据进行融合解算,从而得到点云产品,最后解决了不易到达岛礁地形测量、涉海单位海岸带和滩涂地形测量问题。该系统实现了海岸线上下一体化测量,克服了传统的测量技术限制,很大程度上提高了测量效率,为智慧航道、数字水利、码头、岸线及远海岛礁和众多工程建设所需的高精度三维测量问题提供了全新的测量技术手段<sup>[12]</sup>。

同步控制器的作用是为系统中的激光扫描仪、多波束测深仪等传感器提供相应的同步信号,以及记录相应动作,并为后期的数据处理提供一个时间基准。

同步控制器与监控端通信,由监控端发送操作指令(配置参数、同步初始化、同步数据采集、暂停工作、结束当前任务等);同步控制器实时接收GNSS接收机PPS脉冲,PPS脉冲及其所对应的时间报文用于同步板时间更新。系统上电后,PPS脉冲实时接收,当同步控制器接收到监控端同步数据采集指令后,在同步板上记录下工作时间、事件信息并进行GNSS时间打标,并将记录事件实时发送给监控电脑。

同步控制器检测GNSS接收机Event out发出的PPS脉冲,随后串口或网口会接收到PPS的时间信息,解析后获得PPS的时间信息,等待检测下一次Event out发出的PPS脉冲,检测到后,将上一次的PPS时间加上1s,从而获取精确的时间信息。

硬件同步控制器接收PPS脉冲并解析PPS脉冲产生的GPS时间,从而硬件同步控制器内部的时间系统同步到GPS时间;

硬件同步控制器内部每隔1000ms向GPS接收机输出一个MARK EVENT脉冲,并记录脉冲产生时控制器内部的时间;

GNSS接收机接收MARK EVENT脉冲,并记录MARK EVENT产生的GPS时间;

将硬件同步控制器内部记录的MARK EVENT时间与GNSS接收机记录的时间做差,即可计算出硬件同步控制器的时间同步精度。

## 2 水上水下一体化测量实施系统

### 2.1 一体化平台安装

由于车载综合测量系统包含的传感器比较多,

因此正确的安装操作对于系统正常运行起着至关重要的作用。如果换能器或激光扫描仪安装不稳定,这会导致波束位置计算错误,而这种错误在后期处理中很难进行修复。该系统安装采用侧舷安装的方式进行,使用钢丝绳将多波束平台前后及绕船底将多波束平台紧紧的固定在船体上,使多波束及各个传感器与船只固定为一体,保证传感器真实反映出船体的各种姿态变化,保证数据准确<sup>[13]</sup>。

### 2.2 船载水上水下一体化测量系统标定

由于激光扫描仪和多波束测深仪在采集数据时,并不是直接使用IMU的输出姿态和GNSS天线的位置,而是需要对各个传感器之间的实际空间位置偏差进行补偿<sup>[14]</sup>。因此,在系统进行作业之前,激光扫描仪、多波束测深仪与组合导航系统之间的空间相对位置关系需要通过工业测量系统标定得出,换句话说,人们需要分别得到扫描仪和多波束测深仪两传感器中心相对于惯性测量单元中心的3个平移参数、3个旋转参数以及一个尺度变换参数,即外参数。

外参数的获取方法主要分为直接法和间接法两类。直接法是利用直接测量的方式进行多传感器空间位置与姿态的标定;间接法是通过构建检校场或通过一系列已知的控制点,结合系统数学模型来解算杆臂值与姿态角。笔者采用的经纬仪工业测量系统标定法属于直接测量法,其基本原理为:利用经纬仪工业测量系统硬件,然后结合各个传感器的设计参数,直接测量各个传感器表面的特征点以提取激光扫描仪、多波束测深仪和惯导的中心,构建各个传感器独立坐标系,最后通过整体标定获得各个传感器准确的杆臂值与姿态角。

### 2.3 水上水下一体化测量系统检校

多波束系统的校准内容主要包括安装校准和数据校准。安装校准的过程是在测船坐标系内进行,即计算各子系统的安装与设计安装的偏差数据;数据校准的过程是在测船坐标系和大地坐标系之间进行,即修正测船坐标系在大地坐标系上运动所产生位移和旋转变化。从检校的目的来看,安装校准需要在正式测量前完成,其目的是消除由于多波束各子系统安装偏差所引起的系统内部固有误差;数据校准是在数据处理过程中完成,

其目的是将各种动态数据正确归位。

多波束换能器的安装偏差是安装校准中最主要的内容,其校准参数正确与否,将直接影响测绘质量的好坏。假设测船坐标系的 X-Y 平面水平,换能器的安装偏差主要包括横摇偏差、纵摇偏差和艏摇偏差。

横摇偏差检校方法是在绝对水平的海底进行一条测线的往返测量,从而得到 2 个倾斜方向相反的海底面,这 2 个海底面的交角等于 2 倍的横向偏差角。但是在实际校准中,该校准计算过程需要多次重复,直到两个平面重合为止。

纵摇偏差校准应选择一个孤立目标或地形突变较大的地方进行,利用同线反向同速度穿过目标测量的测量方法。如果存在纵摇偏差,那么孤立目标在多波束数据叠加图上出现的会是 2 个分离的目标,通过量取两目标间的距离,接下来就计算出纵摇角偏差。

艏摇偏差能够使测点位置以中央波束为原点的旋转位移,中心波束位移为零,边缘波束位移最大。文中利用这一特点,可以选择线性目标作为校准目标,如管道线或线性陡坎等。假如测区内没有线性目标,那么选一个海底孤立目标,以孤立目标为中心布设两条平行线,线间距约为最大覆盖宽度的 2/3 倍,然后同向匀速测量,求出艏摇偏差角。

### 3 水上水下一体化多传感器数据融合

#### 3.1 组合导航数据处理获取 POS 数据

GNSS 数据和 INS 数据联合进行紧组合解算,得到当前时间点处惯导中心的位置和姿态。利用 Inertial Explorer 软件实现数据的融合解算,结算包括 3 个流程:分别为数据准备、数据解算和数据输出。

数据准备包括基准站的数据准备和流动站的数据准备;数据解算主要包括原始数据转换、GNSS 解算、TC 解算、GNSS/INS 组合解算、平滑处理和数据分析。

#### 3.2 激光扫描仪、多波束测深仪与 POS 融合

GNSS/INS 组合导航提供扫描仪运动轨迹

与姿态参数,利用这些参数可对激光扫描仪、多波束测深仪数据进行匹配与融合,从而计算目标点的三维坐标,这一过程即为数据预处理。数据预处理主要是对 POS 数据进行内插处理,利用同步信息获取激光扫描仪、多波束测深仪位置与姿态参数。最后对以上数据进行空间整合、时间整合、姿态改正等解算目标点坐标。

软件功能设计的主要实现目标是对一体化测量系统的点云数据进行初步处理,实现点云数据的可视化及可视化过程中空间数据的提取。其主要完成的功能包括:点云坐标转换、点云数据分块功能、点云数据读取显示功能、点云数据提取、点云数据导出和特征数据导出等。

## 4 实例分析

本次试验,利用该套系统在舟山册子岛进行了水上水下一体化测量,主要对册子岛沿岸进行了整体测量,最终生成的一体化综合测量成果图(图 3)。

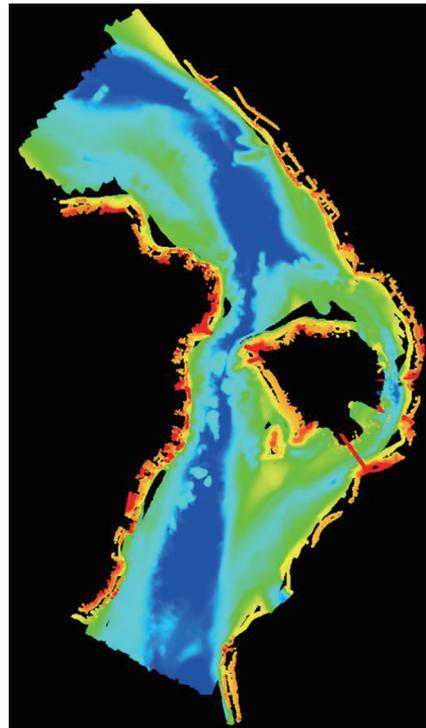


图 3 册子岛水上水下一体化整体成果图

Fig.3 Integral image of under and above water survey around the Cezi island

同时,在测量过程中,选取局部重点区域,测量船贴岸边进行数据采集,经过数据处理部分重点地物可以完成水上水下的无缝拼接,其成果如图4所示。

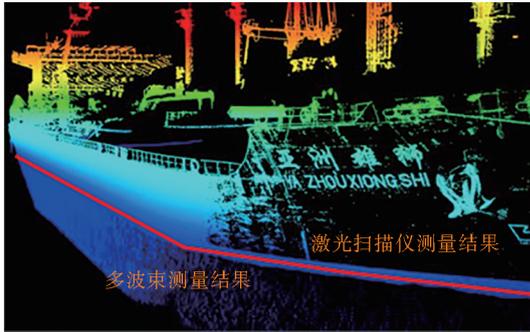


图4 重点区域局部成果

Fig.4 The image of key area

根据对册子岛水上水下一体化整体成果图和重点区域局部成果图进行分析,可以看出船载水上水下一体化测量技术在册子岛区域的应用,其采集数据比较完整,实现了平面和垂直基准的统一,重点地物已经达到水上水下无缝拼接状态。船载激光点云位置及高程精度符合1:2000测图地形测量的基本精度要求,点云重复测量精度优于5 cm@100 m,水深精度优于0.1 m,符合相关测量规范要求。

水上水下一体化测量技术在舟山册子岛的成功应用,也对我国的海岸带地质调查具有重要意义。由于海岸带环境地质问题日益突出,海岸带的侵蚀、水中构筑物的腐蚀,对水上下地形数据的需求也随之增加,然而,水上水下一体化测量技术的成功应用,能够很好地将重点地物进行水上水下无缝拼接,因而研究水上水下一体化测量技术对开展海岸带环境地质调查具有重要意义。

## 5 结束语

笔者采用的水上水下一体化测量系统集成方法是利用一体化测图装置的多传感器升降平台设计进行测量系统的硬件集成,满足测量船在不同工况条件下改变传感器上下位置的要求。该系统设计了数据采集显控软件框架,用来实现多传感

器的协同数据采集、点云实时显示等目的。然后对点云数据进行预处理、数据内插、空间配准等步骤,对多源数据进行融合解算,从而得到点云产品,解决很难到达岛礁地形测量、滩涂地形测量等问题。该系统有效的实现了海岸线上一体化测量,克服了传统的测量技术限制,在很大程度上提高了测量效率,为智慧航道、数字水利、码头、岸线及远海岛礁和众多工程建设所需的高精度三维测量问题提供了全新的测量技术手段。

水上水下一体化测量系统的出现及推广,是对传统测量方式的有效补充,该系统解决了目前依托水体的测绘应用缺乏有效的采集设备和技术方案的现状,这也就使得该系统在远离陆地岛礁、石油平台变形监测等人工难以施测的地方作用明显。该系统突破了多传感器集成、同步控制、多源测量数据配准融合处理和水上水下三维地形可视化管理等技术,同时利用多波束测深仪、激光扫描仪等设备来获取水下、水下三维地形,能够给国情普查、海岛礁测绘提供数据、应用和管理决策支持及技术解决方案,同时水上水下一体化测量系统在海岸带地质调查方面的作用显得尤为重要。

### 参考文献:

- [1] 印 萍. 科技创新引领海岸带地质调查打开新局面[N]. 中国自然资源报, 2017.
- [2] 宿殿鹏, 阳凡林, 冯成凯, 等. 船载多传感器一体化测量数据实时存储方法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 6(38): 591-597.
- [3] 余建伟, 刘守军. 中海达船载水上水下一体化三维移动测量系统[J]. 测绘通报, 2013, 7(1): 119-120.
- [4] 卜宪海. 基于激光点云约束的多波束低掠射波束几何改正[D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
- [5] 彭 涛. 水上水下一体化测量技术探析[J]. 居舍, 2018(33): 178.
- [6] 边志刚, 王 冬. 船载水上水下一体化综合测量系统技术与应用[J]. 港工技术, 2017, 1(54): 109-112.
- [7] 宿殿鹏, 阳凡林, 石 波, 等. 船载多传感器综合测量系统点云实时显示技术[J]. 海洋测绘, 2015, 6(35): 29-32.
- [8] 赵 巍. 浅谈 SeaBat 8125 多波束测深系统应用问题及处理方法[J]. 测绘与空间地理信息, 2011, 34(4): 241-244.
- [9] Horvei B, Nilsen K E. A new high resolution wideband multibeam echo sounder for inspection work and hydrographic mapping[C]//OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE. IEEE, 2010: 1-7.
- [10] Shi B, Lu X S, Yang F L, et al. Shipborne over-and un-

- der-water integrated mobile mapping system and its seamless integration of point clouds [J]. *Marine Geodesy*, 2017, 40(2/3): 104-122.
- [11] 罗 茵. 车载水上水下一体化测量的应用[J]. *海洋与渔业*, 2018, 6: 51-52.
- [12] 巩维屏, 滕忠雪. 多波束测深技术在工程实际中的应用[J]. *东北水利水电*, 2018(10): 61-62.
- [13] 李 鹏, 林 杰, 李 欢. 空地一体化地形测量[J]. *测绘通报*, 2018(2): 160-163.
- [14] 陈 科, 王 冲, 闻 平, 等. 利用多传感器集成和数据融合实现水上水下一体化测绘[J]. *测绘通报*, 2017(3): 76-79.

## INTEGRATED SHIPBOARD MEASUREMENT TECHNOLOGY AND ITS APPLICATION ABOVE AND UNDER WATER: A CASE FROM CEZI ISLAND OF THE ZHOUSHAN ISLANDS

ZHANG Qian<sup>1</sup>, MEI Sai<sup>2,3\*</sup>, SHI Bo<sup>1</sup>, ZHAO Zhao<sup>2,3</sup>,  
YU Deshui<sup>2,3</sup>, DONG Lingyu<sup>2,3</sup>, SHAN Rui<sup>2,3</sup>

(1 Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2 Qingdao Institute of marine geology, CGS, Qingdao 266590, China; 3 Laboratory for Marine

Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China)

**Abstract:** In recent years, the integrated shipboard measurement technology of above and under water integration has rapidly developed in marine geological survey and mapping. The technology aims to realize seamless measurement above and under water through integration of multi-beam water depth measurement system, laser scanning system and positioning system. Taking the Cezi island as an example, this paper provided a successful case for the seamless measurement above and under water, which realized the integration of water depth and topographic results. The advantages and disadvantages of this technology as well as its future application are clarified and discussed.

**Key words:** integrated measurement technology above and underwater; multi-beam water depth measurement system; coastal geological survey; real-time dynamic positioning; three-dimensional terrain; 3D laser scanner