

空天陆海一体化测绘技术在南海岛礁调查中的应用展望

张更垒¹, 田振环^{2,3,4*}, 杨娜娜⁵, 王 威^{3,4}, 史经昊², 刘 强¹

¹山东省煤田地质局物探测量队, 山东 济南

²中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛

³山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南

⁴山东省富铁矿勘查技术开发工程实验室, 山东 济南

⁵中国科学院空天信息创新研究院齐鲁空天信息研究院, 山东 济南

收稿日期: 2023年10月13日; 录用日期: 2023年11月12日; 发布日期: 2023年11月20日

摘 要

本文首先分析南海岛礁及周边海域地形地貌的特殊性和测绘作业存在的难点: 远海岛礁远离大陆、高度分散、测绘基准信息匮乏、珊瑚礁地貌复杂特殊、地形水深变化剧烈, 以及周边地缘政治环境复杂, 针对性地总结了远海岛礁地形测量的关键技术和进展。介绍一种“空-天-陆-海”一体化的水陆地形立体观测技术体系, 该系统通过整合目前不同水陆地形探测方法技术优势, 优化探测方法组合模式, 把无人船载多波束测深系统、激光扫描测量系统、无人机测量系统及卫星多光谱遥感测量等进行技术整合, 实现对远离大陆的岛礁及周边海域高精度、全覆盖、一体化、立体测绘。该测绘作业模式能够极大地提高远海测绘的工作效率, 对维护国家海洋权益和南海区域经济发展急需的精确远海岛礁地理信息的获取, 以及加强海战场环境保障能力具有积极意义。

关键词

远海岛礁, 水深地形测绘, 陆海空天一体化, 数据融合, 无人机, 无人船, 多光谱遥感

Application Prospect of Space-Air-Land-Sea Integrated Surveying and Mapping Technology in the Investigation of Islands and Reefs in the South China Sea

Genglei Zhang¹, Zhenhuan Tian^{2,3,4*}, Nana Yang⁵, Wei Wang^{3,4}, Jinghao Shi², Qiang Liu¹

*通讯作者。

文章引用: 张更垒, 田振环, 杨娜娜, 王威, 史经昊, 刘强. 空天陆海一体化测绘技术在南海岛礁调查中的应用展望[J]. 海洋科学前沿, 2023, 10(4): 233-244. DOI: 10.12677/ams.2023.104024

¹Geophysical Prospecting and Surveying Team of Shandong Bureau of Coal Geology, Jinan Shandong

²College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

³No. 1 Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan Shandong

⁴Shandong Engineering Laboratory for High-Grade Iron Ore Exploration and Exploitation, Jinan Shandong

⁵Qilu Research Institute, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Jinan Shandong

Received: Oct. 13th, 2023; accepted: Nov. 12th, 2023; published: Nov. 20th, 2023

Abstract

The paper first analyzes the particularity and difficulties of topographic and geomorphological surveying and mapping island reefs and surrounding waters in the South China Sea: islands and reefs are far away from the mainland, highly dispersed, lack of surveying and mapping datum information, complex and special coral reef landforms, dramatic changes in topography and water depth, and complex surrounding geopolitical environment. The key technologies and progress of topographic survey of offshore islands and reefs are summarized. This paper introduces a “Space-Sky-Land-Sea” integrated three-dimensional observation technology system of water and land terrain. The system integrates the technical advantages of different water and land terrain detection methods, optimizes the combination mode of detection methods, and integrates the unmanned ship-borne multi-beam sounding system, laser scanning measurement system, UAV measurement system and satellite multi-spectral remote sensing measurement to achieve high-precision, full-coverage, integrated and three-dimensional mapping of islands and reefs far from the mainland and surrounding sea areas. This surveying and mapping operation mode can greatly improve the efficiency of far-sea surveying and mapping, which is of great significance for safeguarding national maritime rights and interests and the acquisition of accurate far-sea island and reef geographic information urgently needed for the economic development of the South China Sea, as well as strengthening the environmental support capacity of the sea battlefield.

Keywords

Offshore Islands and Reefs, Water Depth Topographic Mapping, Land-Sea-Air-Space Integration, Multi-Source Data Fusion, UAV, Unmanned Ship, Multi-Spectral Remote Sensing

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

南海岛礁及其附近海域自古为中国领土,在 03°58'~21°04'N、109°36'~117°50'E 范围内,分布着东沙、西沙、中沙、南沙四大群岛,包括 200 多个岛、礁、洲、沙、滩[1]。其不仅拥有丰富的海洋资源,战略地位还极其重要,对支撑南海区域经济发展、维护国家海洋权益和构建南海海洋治理体系具有十分关键的作用。但由于地理位置偏远、地缘环境复杂等诸多因素,南海大量岛礁长期脱离我国管控,且大多属于无人远海岛礁,开发利用缓慢。鉴于南海周边严峻的海岛礁形势,近年来,尤其 2013 年后,随着国际形势的变化以及我国经济技术实力的发展,逐步加速推进南海岛礁的建设[2]。建造多功能人工岛等海岛礁开发活动需要高精度和高分辨率的水上水下地形数据等基础地理信息,但南海岛礁多位于远离大陆的

开阔海域,尤其是远海和敏感海域,测绘地理信息严重匮乏。此外,除了极个别火山岩岛礁,其余海岛礁基本为生物成因的珊瑚礁,地貌复杂、水深地形多变[3],这对地形地貌测量技术提出了更高要求。同时,急剧增加的南海相关军民海洋活动对岛礁及周边复杂海域进行高精度、全覆盖、一体化、立体测绘的需求更加迫切。

近年来,随着测深、测距和定位等陆地和海洋测绘理论和技术的发展,以及无人船、无人机等平台的进步,为了提高陆海接合部测量效率和精度,降低测绘成本,国内外不断研究和完善陆海一体化测绘理论技术体系,并进行实际应用[4] [5] [6]。首先提出的是以船载平台为基础的多波束测深系统、三维激光扫描系统和高精度导航定位系统同步测量技术集成方案,并得到广泛应用,比较成熟的软硬件集成案例比如国外的丹麦 Reson 公司和荷兰 QPS 公司[4],中国的中海达、云洲智能等为代表的测绘公司和相关科研机构[7] [8]。虽然船载集成方案能够实现水上水下地形数据的无缝融合,但由于侧向扫描测量方式的限制,容易造成高点盲区及水上水下遮挡区域的数据缺失[8]。此外,搭载激光测深系统(LiDAR)的机载平台集激光测距、航空摄影、位置和姿态测量等多种高新技术于一体,无需进行数据融合,真正实现了陆海一体化无缝测量,但受激光测深原理的限制,存在测量深度有限、测区水质水文条件要求高、接收信号弱噪声大、数据后处理困难等缺点[9] [10] [11]。考虑到上述两种方案的优缺点,有学者提出基于无人船载多波束测深、三维激光扫描系统和无人机航空测量一体化立体测绘系统集成方案,合理利用测区潮差,可有效减少盲区,实现同步一体化立体测量[4] [12] [13]。虽然在系统集成化程度、误差纠正及补偿、基准转换、无缝拼接、多源数据融合和数据后处理技术等方面,还需要大量的研究,但相关技术突破和工程实践为解决具有复杂地形地貌的远海岛礁的高精度测绘奠定了基础。针对南海岛礁的特点,分析其测绘工作难点,探索一种较完善的集成方案解决上述问题则尤为必要。

2. 南海岛礁及周边海域地形地貌测绘的难点

2.1. 海岛礁远离大陆,高度分散,缺少测绘基准信息

南海岛礁由 280 多个岛屿、沙洲、暗沙和暗礁组成,散布在面积超过 200 万平方千米的海域里,其中央是水深超过 4000 米的南海海盆,相互之间距离较远、高度分散。按分布位置,可分为四大群岛:东沙群岛、西沙群岛、中沙群岛和南沙群岛,其中东沙群岛位置最北、岛礁最少(10 多个)、距离最近的大陆港口也有 200 多千米,而位置最南、岛礁最多(约 200 个)、分布最广的南沙群岛中心距离海南岛至少 1000 千米。所以,这些海岛礁数量众多、分布广,远离大陆,而且基本为远海岛礁,大多不易登岛测绘,人工施测难度非常大,存在大片测绘空白区,历史基础地理信息严重缺失,尤其是高精度的、统一的测绘基准几乎没有建立,通常也不会有长时间序列的历史水位记录,这给这些海岛礁的精确的地形地貌测绘带来了相当的难度。

2.2. 珊瑚礁地貌复杂,地形水深变化剧烈

不同于非生物成因的海岛礁,在内外营力的共同作用下,以造礁石珊瑚和其他附礁生物的遗骸堆积形成的南海岛礁有着复杂独特的地形地貌(图 1)。远海珊瑚礁的形态以环礁为主,生长在岛屿或海底火山上面的珊瑚礁,形态多样。由于地盘下沉或海水上升,珊瑚上长之后四周连接如环,有呈正圆形,有呈椭圆形。环内水浅叫做礁湖,环礁如有间断,便成为礁湖与外海沟通的通道,水下暗礁还会发育脊槽地貌,脊槽的延伸方向基本与礁缘垂直。环礁露出水面的残破片断,称为沙洲岛屿。

传统地貌学研究和地形实测资料分析认为,南海珊瑚礁地貌总体形态基本为“上截锥型”,即呈全部或部分被上截了顶部的锥形,上小下大,礁外坡以正几度至几十度倾角向海底延伸,礁顶为一些堆积和侵蚀造成的小型起伏。珊瑚礁周边的局部地段受波浪、潮流、海流等水动力作用,会出现溶蚀、滑塌

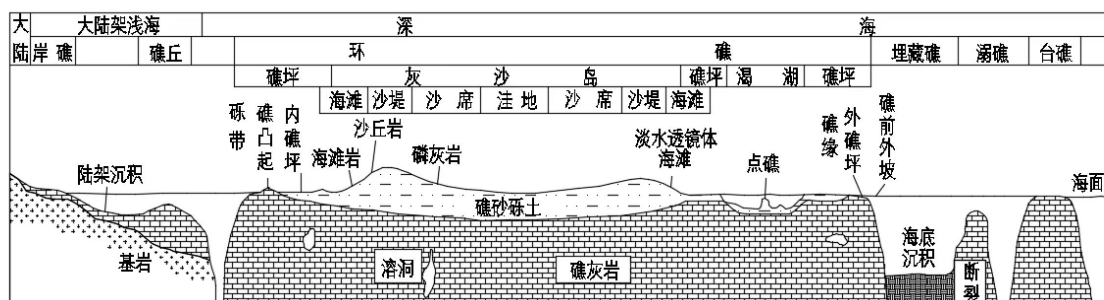


Figure 1. The geological and geomorphic model for coral reefs in South China Sea [14]

图 1. 南海典型岛礁地质地貌模式图[14]

而发育为大小不一的洞穴,造成局部地段的内凹,如南海多处水深 10 m 范围内的礁缘边坡上就分布着类似的海蚀洞[3]。据此有研究提出还应该存在另外一种“蘑菇型”地貌,认为这种类型的礁体形态呈蘑菇状,礁外坡为内凹形[15]。目前虽尚未发现类似的地貌,也不确定珊瑚礁体在深水区是否也发育局部内凹的地形,但是浅水局部地段内凹的地貌是确定的,这对目前常用的多种地形地貌测量方式提出了挑战。

无论是那种类型,礁外坡都极其陡峭,向海几公里,水深会从 0 m 急剧下降到 1000 m,要求选用的水深测量仪器具有很宽的量程、较高的精度和合适的声速校准方法。此外,岛礁周围存在大量的礁盘区,此类型区域周边水深极浅(高潮时小于 2 米),小型船舶亦无法进入,且处于常规水深测量仪器的盲区。同时,还需要考虑一体化测绘方式,满足对快速变化的陆海地形地貌高精度、全覆盖的测量需求。

2.3. 周边复杂的地缘政治环境

由于其重要的战略地位和经济价值，在百年未有之大变局下，预计未来南海地缘政治和安全环境或更趋复杂严峻，某些具有战略支撑的重要争议岛礁的测量工作不可避免的受到限制，有人船舰和飞机不宜进入敏感海域，更难实施人工登岛作业，需要尽量采用远距离、无人的测量方式。

3. 远海岛礁测量的关键技术和进展

针对上述南海岛礁及周边海域地形地貌的特殊性和测绘作业的特点，需要有效解决以下关键技术难题：

3.1. 测绘基准建立方法

测绘基准是远海岛礁整个测绘工作的基础和起算依据,可提供设备及传感器的高精度位置定位及检核点的精确检核、测量数据的精确校正、不同源数据成果的坐标转换、以及作为岛礁规划开发的基准数据。但南海岛礁远离大陆,借用传统手段无法传递高精度的、统一的测绘基准。建立远海岛礁测绘基准需要突破超长距离快速精密定位、海域大地水准面精化与无缝垂直基准等技术。

大地测量基准的建立可采用高精度的静态 GPS 定位技术, 将已建成的陆地三维定位基准扩展到远海岛礁, 形成能满足各种海洋定位要求的基准体系。对于高潮时可出露水面的较大的岛礁, 除了使用 GNSS 定位技术, 建立与大陆统一的海岛礁大地基准, 可结合已建成的 CORS 系统, 同步进行测区静态数据采集, 统一解算, 获得高精度的定位数据。此外, 还可在岛上布设测量控制点, 对周边的较小岛礁测量控制[16]。对于不宜登岛和高潮位时礁盘全部淹没的独立岛礁, 可以直接采用星站差分系统进行控制测量, 星站差分系统主要包括基于 GPS 和北斗的全球高精度增强系统, 主流有 Veri Pos、Starfire、Omni Star 和中国精度。

对于远海岛礁高程系统的情况,使用大地水准面作为参考面来完成这种远距离的高程基准传递。首先通过星站差分系统获得岛礁上某控制点的大地高,再结合现有陆地和海洋重力模型计算该位置的高程异常值,就可求取该点的正常高,从而实现高程基准从大陆传递到南海岛礁上[17]。其中,地球重力模型通常选用目前精度最高的美国 EGM2008 模型[16][18][19]。高程基准和深度基准之间的转换,则可进一步利用同一位置的正常高和已知当地潮高基准面,从而获得改正常数。

3.2. 特殊地形地貌的测量技术

目前,岛礁及周边水域的地形探测手段较多,最传统常见的方式是利用 RTK GPS 实时差分技术结合单波束测深系统即可获得较为精确的水深地形数据[20][21]。利用双介质航空摄影、机载激光、机载 INSAR、卫星遥感等高新技术亦可高效获取大面积的浅水地形资料[22][23][24]。然而,上述的地形探测方式受制于自身测量方式或资料获取方式,难以获取内凹型地貌的水深、地形信息。

多波束测深仪在前进中可以向其两侧发射扇形的声波信号,同时获取上百个测点的水深数据,具有宽扫幅、高密度测点的优势,窄波束、先进的检测技术和精密的声线改正方法也保证了其数据的高精度[25]。原理与单波束测深仪相同,不过,其接收换能器由多个水声探测器件组成,除了同单波束测深一样接受垂直于海底的反射波,还能够接受其他角度的回波,通过斜距改正后得到水深值[26],这一特点使其足以获取岛礁浅水区内的凹地段的水深数据。对于珊瑚礁尤其是内凹地段的水深测量时,需选用横向分辨率较高的测深仪,在地形相对复杂或水深较浅的地段,建议加密测线,提高测量精度[27],由于多波束的目标探测能力主要随航速变化,实际测量时需对航速进行控制。目前,多波束测深系统仍是获取珊瑚礁周边地形、水深的主要手段[28][29][30]。随着 GPS RTK 实时差分技术的日臻成熟,利用其无需验潮模式的水深测量的特点与多波束测深系统配套使用,可实时得到测点的高程,原理是在岸上定点安置基准站,在船体上架设 RTK 流动站和测深设备,通过接受基准站及 GPS 卫星信号的同时,能够实时得到流动站的坐标,经过后续的处理,可得到水深值[31][32],利用此法,可快速获取珊瑚礁水域实时的水深数据。

传统的侧扫声呐在海洋地形的测量方面有着广泛的应用,它同样能够向单侧或双侧同时发射一定倾斜角度、频率的超声波脉冲,并对回波进行接收,随着测量船的前行,根据事先设定后的炮点间隔,结合获得的影响,进行相互衔接后即可获得海底地貌。然而,由于所得图像是海底回波信号,难以测得准确测深,对于珊瑚礁水下立体形态的勘查,多数情况下需要通过记录信号进行粗略计算,凭借主观判读来进行解析,实际应用不大。三维实时声学成像声呐系统在传统的侧扫声呐基础上,增加了图像的深度信息,能够准确获取目标物距离、水平、垂直三维空间坐标信息[33][34],具有代表性的是美国的 EchoScope 系列三维声呐,该系统主要由声呐头、电脑终端及设备载体三部分构成,声呐头与电脑终端通过以太网链路连接,声呐头有声波发射和接受部分组成,实际探测中可同时形成上万个声学波束,接受阵为多个水听器组成的矩阵,使用相控阵技术,经过软件处理形成三维影像[35]。该类系统受水质、水动力的影响较小,能够在重度浑浊、水动力条件强烈、水下地形复杂的水域环境中进行准确探测[36],在实际的水下三维结构物、堤坝、管道等检查中,效果显著[37]。通过配备 GPS 导航定位系统和姿态稳定系统,该系统应用在测船上还可对探测对象进行不间断的连续探测。珊瑚岛礁周边地形复杂、水动力强烈,利用该系统可完全满足珊瑚礁水下立体形态尤其是内凹地段形态的获取,不过,截至目前,尚未有在珊瑚礁海域应用的报导。

激光扫描测量技术是上世纪九十年代开始广泛应用的测量技术[38],利用激光测距原理,实现对目标物的地理位置信息的快速精确密集的获取,目前多应用于陆地大比例尺地形测量。近年来发展的基于 PPP 技术的船载三维激光地形测量系统由三维激光扫描子系统、影像采集子系统、导航定位定姿子系统、集

成控制与保障子系统、数据处理与应用子系统等组成,既能做到无接触、全覆盖三维测量,还可实现无高程基准的船载地形测量和与水深测量成果的无缝拼接[39],适用于珊瑚礁水上地形特别是内凹形态的测量。

总之,针对珊瑚礁特殊地形地貌的工程测量,水下部分可选用多波束测深系统或三维实时声学成像声呐系统;水上部分可使用船载三维激光扫描测量系统。

3.3. 水陆一体化测量技术

岛礁的礁盘、礁外坡等水陆结合部一直是开展海洋测绘的困难区域,目前常规测量方法需要分别进行多波束全覆盖水深测量和水上部分三维激光扫描测量,完成各自的数据处理之后,再利用合适数据处理方法将两种测量数据进行融合[40]。这不仅要花费更多的人力、物力和财力,而且由于是各自在不同测量载体平台独自进行数据采集,较多的测量进程,特别是各自采用独立的定位及姿态测量系统,会给最终的测量成果带来更多的误差源,从而影响测量结果的准确度。近些年,随着各项技术发展,国内外一些设备生产厂商开始尝试为客户提供多波束测深系统和三维激光扫描系统同步测量技术方案,并取得了成功应用[41][42]。但是,多波束水下扫描和船载激光扫描同步测量,虽然有效解决了二者水陆分界线的地形数据有机拼接,但仍存在以下问题:船载激光对水上部分只能进行侧向扫描,被扫描对象顶部的区域容易造成扫描盲区;当测区周边地形水浅且潮差较小时,船载激光测量与多波束测量成果之间存在浅水部分盲区;缺失基准点的区域,测量成果绝对精度较低,难以满足工程需要[43]。自本世纪初发展起来的小型无人机航空测量技术手段可对被测对象实现空中俯视扫描[44],通过搭载倾斜摄影、机载激光雷达测量等设备可以有效弥补以上技术缺陷,这种技术目前在测绘领域得到了广泛应用[45][46][47]。此外,卫星遥感技术的发展也可高效获取岛礁高程和反演大面积水域的浅水地形[48]。

综合分析,利用无人机(倾斜摄影测量、机载 LiDAR 等)与无人船(声学测深、激光扫描仪等)相结合的方式,可有效解决礁盘区水深较浅和水陆结合部地形变化剧烈等测量的问题,实现水陆一体化测量。

4. 空天陆海一体化测绘系统及应用展望

南海岛礁及周边海域可分为岛礁水上部分、浅水部分或水陆结合部和深水区域(图 2),现有测绘方法中的每一种都有其局限性,运行效果依测量条件而定。目前,多波束全覆盖测量、三维激光扫描测量及无人机航空测量和卫星遥感测量则分别代表了目前水下、陆地和空域空间地理位置信息数据获取的较为常用和先进的技术方法,根据岛礁及周边海域的特点,需要将这几种测绘手段综合利用,扬长避短,形成高度协同的陆海空天一体化测量系统(图 3),才能满足远海岛礁及周边复杂海域各区域的测绘要求,真正达到高效率、高精度、全覆盖、一体化、立体测绘的效果。

4.1. 岛礁水上地形测量

由于南海大部分岛礁面积较小,地形起伏也不大,植被覆盖也较少,除了常规的碎步测量手段,还比较适合无人机航测,通过搭载倾斜摄影测量、机载 LiDAR 设备,或通过地面三维激光扫描等技术,可快速对岛礁进行三维建模,提高工作效率。具体情况可根据现场作业环境和技术装备来定。

4.2. 浅水部分或水陆结合部地形测量

在岛礁的礁盘及浅水区,为保证岛礁地形的无缝衔接,充分发挥无人新型海洋测绘平台的优势,多平台、多设备进行联合作业,通过无人船搭载多波束测深系统、三维激光扫描仪和导航定位惯性导航等定位和定姿系统、以及数据实时采集和处理系统,形成多传感器集成平台,再结合无人机搭载倾斜摄影测量、机载 LiDAR 设备及测量控制采集软件,组成一体化测绘系统,主要包括大地测量子系统、船载子



Figure 2. The zoning map of coral reefs and surrounding waters in the South China Sea

图 2. 南海岛礁及周边海域分区示意图

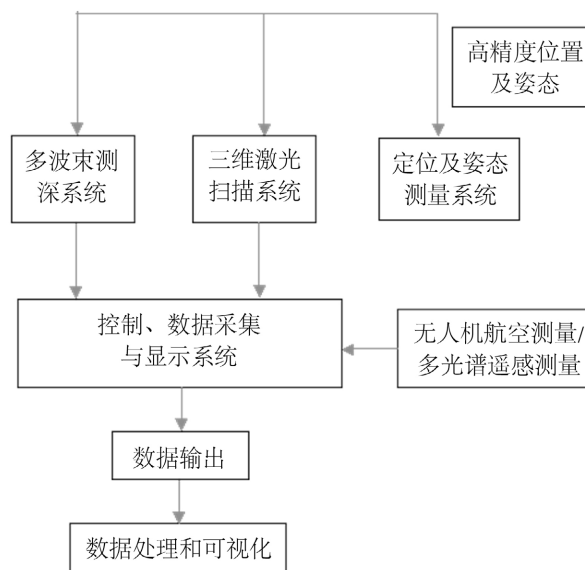


Figure 3. Land-sea-air-space integrated measurement system integration diagram

图 3. 陆海空天一体化测量系统集成示意图

系统、机载子系统和数据子系统。实现水下多波束和水上船载激光扫描同步测量，同时利用无人机测量系统完成部分高点盲区及激光遮挡区域的地形补测，可同时采集岛礁高密度点云数据、浅水地形数据，以及结合部的全景影像等。

其中，无人船系统具有多传感器集成、同步控制、多源测量数据配准融合处理等技术，一次性形成把定位数据、水深数据和三维激光扫描数据形成统一坐标和基准的三维地形数据。而无人机系统根据相应的测量数据，可以进一步生成数字高程模型、数字正射影像、三维场景等多样化数字产品。

4.3. 深水区域的水下地形测量

船载高分辨率多波束测量是目前解决深水区海底地形精密勘测的主要技术手段，此技术和产品已相当成熟，在国内外得到广泛应用。多波束测深系统具有测量速度快、测量精度高、测量范围大、测量效

率高的优点，并且实现了把测深技术从点扩展到面，甚至发展到立体测深和自动成图，特别适用于进行远海岛礁周边大面积海域的高分辨率测绘。

4.4. 小比例尺大范围测绘

远海岛礁及周边海域工程建设之前的规划阶段，需要大范围小比例基础地理信息。利用遥感卫星数据可以方便快速地对大面积水域实现实时、同步、连续的监测，已成为水深地形测绘的重要补充手段，尤其在水质洁净的南海海域，尤其适合进行多光谱遥感水深反演。多光谱遥感数据具有以下几个特点：波段少、带宽较宽、数据数量级小、获取经济成本低、覆盖面积广、适用于大面积的宏观信息提取。此外，随着卫星遥感技术的不断发展，反演精度平均相对误差可低至 15% [49]。目前最先进的民用商业卫星——美国 WorldView-3 的影像的分辨率已经达到 0.31 m。特别是我国高分辨率对地观测系统重大专项已成功实施、用户能够按需获取任意海区多种卫星遥感影像。

卫星多光谱影像水深反演方法的核心是建立遥感影像像元的光谱辐射值与实测水深值之间的关系模型。线性回归模型是常用的水深反演模型，根据所用的多光谱图像波段数，线性回归水深反演模型可分为三类：单波段线性回归模型，两波段比值线性回归模型、多波段组合线性回归模型。但是遥感影像像元的光谱辐射值与实测水深值之间并不是简单的线性关系，而是十分复杂的非线性关系。可利用机器学习技术，采用基于水体特征参数的神经网络水深反演模型(图 4)。

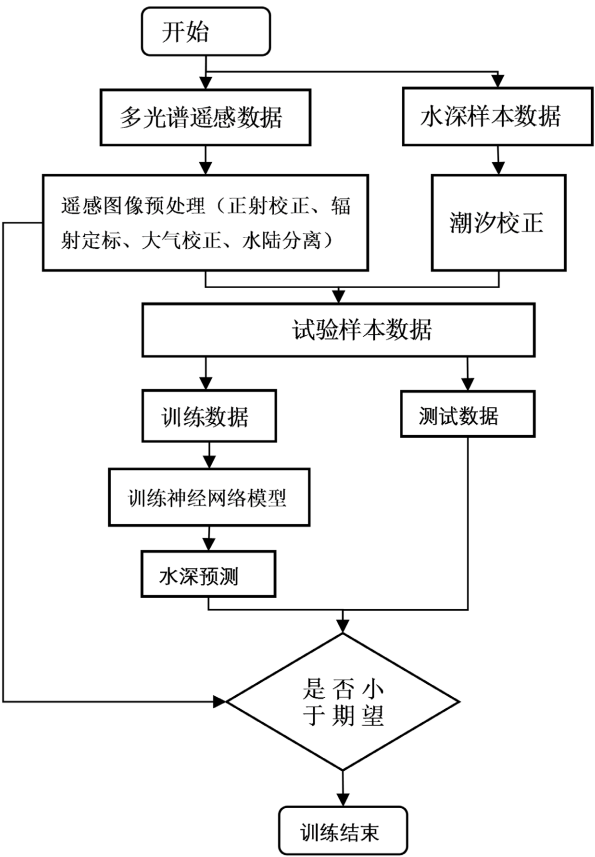


Figure 4. Flow chart of multi-spectral remote sensing water depth inversion based on neural network model

图 4. 基于神经网络模型的多光谱遥感水深反演流程图

4.5. 多源水深地形数据的融合和可视化

虽然各种方式都能获取准确的海岛礁及周边海域地形测量数据成果,但是由于不同作业手段在效率、精度及可靠性和适用性上都存在较大的差异。比如,航天航空遥感平台的最高分辨率能够达到米级甚至分米级,船载平台在浅水区的水深测量精度能够达到分米或厘米级,陆地测量中使用的 GNSS 或三维激光扫描仪可达厘米级甚至毫米级。不同的地形测量数据获取方式、数据精度、分辨率和数据模型等方面都存在不一致的情况。而海岛礁及海底的三维地形最终成果通常以规则格网或不规则三角网数字高程模型(DEM)来表达,并增加纹理与地质等属性信息。

使用地理信息数据处理方法能融合来自空(遥感水深反演数据)、天(无人机倾斜摄影及机载 LiDAR 数据)、陆(陆地 GNSS RTK 实测数据)、海(无人船三维激光扫描、多波束水深测量数据)等多源地形数据,其中包括点云数据的生成、数据过滤掩码、基准统一、坐标转换以及空间插值方法的使用等。再对融合后的数据进行精度评估,从统计模型和空间分布上分析融合方法造成的海岛礁地形探测误差,增强数据后期使用的可靠性和可信度。最后,生成统一的远海岛礁及周边海域数字地形模型,并对数据成果进行可视化展示、制图与管理应用。

4.6. 实施步骤和流程

整个陆海空天一体化测量方案实施步骤包括:大范围小比例尺制图、大比例尺测量方案制定、集成系统安装和校准、外业采集、内业处理、精度分析和数据成果制作。

首先,利用测区卫星多光谱影像,反演水深地形,制作岛礁及周边较大范围的小比例尺水深地形图;然后根据卫星遥感获取的信息,结合历史数据,制定测区大比例尺高精度测绘方案,主要包括基准站的位置、测区的划分、无人船测线和无人机航线的设定等;外业采集前,进行集成系统的安装,主要是将船载或机载各个不同采样频率的传感器设备时间空间坐标统一,并需要精确标定,固定于刚性结构中。系统组建完成后还需选择示范区,验证集成系统的可靠性和精确度,同时进行数据采集和处理模块的调试;外业开始前,按照设计方案建立 GNSS 固定站为无人船和无人机提供基准,或直接采用星站差分系统进行控制测量。然后根据测区具体情况设置各传感器的参数及设备初始化,再依照规划线路进行测量;内业处理主要利用系统配套的数据处理软件,基于定位定姿数据,通过坐标转换、基准改正、加密抽稀、拼接裁切、数据融合等,把获取的多传感器数据形成统一地理坐标系下的点云数据和影像数据;再从单传感器和整个系统的角度,进行数据精度评定与分析;最后利用成图软件,制作满足工程建设及应用的的不同比例尺的水深地形数据模型和可视化图件。

4.7. 系统测量精度主要影响因素分析

分析整个测量过程可知,影响远海岛礁陆海空天一体化立体测绘系统测量精度的主要因素包括硬件和软件两个方面。

硬件方面首先是各子模块,即各个传感器自身测量精度和校准误差。为了提高整体测量精度,应选择精度较高的各子模块。特别是定位和定姿模块,需要向三维激光测量系统、多波束测深系统和无人机测量系统同步提供位置及姿态信息,这直接关系到系统集成成功与否和最终的数据融合质量;然后是集成系统的安装精度。除了各传感器的安装精度,还需要关注各传感器之间的相对位置精确测量;此外,各个测量模块安装误差的动态校准效果也是影响因素之一。

软件方面主要包括:由于南海远海岛礁缺失洋测绘基准基础设施,设立的临时基准站和所选用的地球重力模型带来的基准传递误差;多传感器集成使得整套测量系统的数据采集和处理过程的不确定性增大,比如各传感器采集时间和空间未能严格同步对准、不同采样频率和不同分辨率的数据融合算法等都

会带来误差,最终影响到测量成果的精度。

因此,在各种测量传感器合理选型的基础上,要严格按照安装和校准要求,采用与系统相匹配的数据后处理软件和合适的数据融合算法,尽可能减少数据采集和处理过程种的误差,确保并提高系统获取测量数据的精度。

5. 结束语

为最大程度保证南海岛礁及周边海域三维地形数据的精确性、完整性、多用性,通过详细分析其地形地貌的特殊性和测绘作业的难点,针对性整合不同水陆地形探测方法技术优势,优化探测方法组合模式,把卫星多光谱影像水深反演、船载多波束测深系统、激光扫描测量系统、惯性导航系统、无人机测量系统及控制采集软件等子系统进行技术组合,提出“空-天-陆-海”一体化的水陆地形立体观测技术体系。该集成系统能把获得的遥感反演水深、无人机航测、船载水深测量及陆地测量成果等多源数据,通过坐标转换、基准改正、加密抽稀、拼接裁切、数据融合和精度评估等一系列技术手段,形成不同比例尺的水深地形数据模型和可视化图件,可满足从前期规划到工程建设等不同目的的需求,真正实现对远离大陆的海岛礁及周边海域高效率、高精度、全覆盖、一体化、立体测绘。

在新形势下,随着南海自由贸易区的推进,加快开发建设南海岛礁及周边海域,实现其可持续发展能够提升我国在南海海洋秩序中的话语权与主导力。“陆-海-空-天”一体化测绘作业模式极大地提高远海测绘的工作效率和保障数据精度,能够为维护国家安全、海洋权益和海防建设等急需的准确远海岛礁地理信息的获取,以及加强海战场环境保障能力提供技术支撑。

基金项目

鲁煤地科字(2022) 51 号“岛礁水上水下三维实景数据一体化测绘关键技术研究”。

参考文献

- [1] 中国地名委员会. 我国南海诸岛部分标准地名[M]. 北京: 地名委员会, 1983.
- [2] 陈韶阳, 肖利, 刘娜, 等. 可持续发展视角下的南海岛礁评估分类[J]. 热带地理, 2022, 42(7): 1039-1049.
- [3] 赵焕庭, 王丽荣, 宋朝景. 南海珊瑚礁地貌模型研究[J]. 海洋学报, 2014, 36(9): 112-120.
- [4] 丁继胜, 陈义兰, 杨龙, 等. 陆海空一体化立体测绘技术[J]. 海洋科学前沿, 2019, 6(2): 93-98.
- [5] 吴琼, 刘胜震, 杨盼, 等. 水上水下一体化测绘关键技术研究[J]. 地理空间信息, 2020, 18(1): 32-35.
- [6] 丁仕军, 祝明然. 融合新型多技术的陆海过渡带地形测绘[J]. 测绘通报, 2020(10): 79-84.
- [7] 李清泉, 朱家松, 汪驰升, 等. 海岸带区域船载水岸一体综合测量技术概述[J]. 测绘地理信息, 2017, 42(5): 1-6.
- [8] 石硕崇, 周兴华, 李杰, 等. 船载水陆一体化综合测量系统研究进展[J]. 测绘通报, 2019(9): 7-12, 17.
- [9] Saylam, K., Brown, R.A. and Hupp, J.R. (2017) Assessment of Depth and Turbidity with Airborne Lidar Bathymetry and Multiband Satellite Imagery in Shallow Water Bodies of the Alaskan North Slope. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 58, 191-200. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.02.012>
- [10] 郭春海, 张英明, 丁忠明. 无人机机载 LiDAR 在沿海滩涂大比例尺地形测绘中的应用[J]. 测绘通报, 2019(9): 155-158.
- [11] 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(z2): 1-15.
- [12] 李庆松. 基于无人机机载激光和无人船多波束下水陆一体化三维测量技术应用和探讨[J]. 水利技术监督, 2021(11): 42-45.
- [13] 梁冲. 基于机载 LiDAR 与无人船多波束的水陆一体化测量技术研究[J]. 水利技术监督, 2022(6): 70-74.
- [14] 赵焕庭, 温孝胜, 孙宗勋, 等. 南沙群岛自然综合体的形成和发展初探[C]//中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛及其邻近海区地质地球物理及岛礁研究论文集(二). 北京: 科学出版社, 1994: 226-239.

- [15] 李决龙. 珊瑚岛礁淡水资源开发理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [16] 杨新发, 薛广南. 远距离海岛礁测量方法探析[J]. 测绘通报, 2017(S2): 12-15.
- [17] 黄漠涛, 欧阳永忠, 陆秀平, 等. 南海海域岛屿高程基准确定与计算[J]. 海洋测绘, 2002, 22(2): 14-17.
- [18] 王建成, 沈清华, 王小刚. 基于 EGM2008 模型的陆海高程基准统一方法[J]. 地理空间信息, 2018, 16(11): 101-103, 109.
- [19] 李炜, 李华山. EGM2008 模型在远距离水位观测中的应用研究[J]. 港工技术, 2021, 58(3): 112-115.
- [20] 赵晓龙, 孙永福. RTK 与测深联合技术及其在近海工程勘察中的应用[J]. 海岸工程, 2007, 26(3): 47-54.
- [21] 李东升, 黄腾, 刘为东, 等. GPS RTK 在海岛(礁)测量中的应用[J]. 现代测绘, 2011, 34(4): 3-4, 21.
- [22] Höfle, B. and Rutzinger, M. (2011) Topographic Airborne LiDAR in Geomorphology: A Technological Perspective. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 55, 1-29. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2011/0055S2-0043>
- [23] 申家双, 翟京生, 翟国君, 等. 海岸带地形图及其测量方法研究[J]. 测绘通报, 2007(8): 29-32.
- [24] 盛琳, 王双亭, 周高伟, 等. 非线性模型岛礁礁盘遥感水深反演[J]. 测绘科学, 2015, 40(10): 43-47.
- [25] 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.
- [26] 申家双, 潘时祥. 沿岸水深测量技术方法的探讨[J]. 海洋测绘, 2002, 22(6): 60-65.
- [27] Zieger, S., Stieglitz, T. and Kininmonth, S. (2009) Mapping Reef Features from Multibeam Sonar Data Using Multiscale Morphometric Analysis. *Marine Geology*, 264, 209-217. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.06.002>
- [28] Hovland, M. and Risk, M. (2003) Do Norwegian Deep-Water Coral Reefs Rely on Seeping Fluids? *Marine Geology*, 198, 83-96. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(03\)00096-3](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(03)00096-3)
- [29] Harris, P.T., Heap, A.D., Marshall, J.F. and McCulloch, M. (2008) A New Coral Reef Province in the Gulf of Carpentaria, Australia: Colonisation, Growth and Submergence during the Early Holocene. *Marine Geology*, 251, 85-97. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.02.010>
- [30] Somoza, L., Ercilla, G., Urgorri, V., et al. (2014) Detection and Mapping of Cold-Water Coral Mounds and Living Lophelia Reefs in the Galicia Bank, Atlantic NW Iberia Margin. *Marine Geology*, 349, 73-90. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.12.017>
- [31] 王建忠, 王玉龙. 多波束与 RTK 三维水深测量技术的联合应用[J]. 测绘工程, 2014, 23(4): 65-68.
- [32] 王宝江. 基于多波束测深系统的 RTK 三维水深测量技术应用研究[J]. 北京测绘, 2014(6): 48-51.
- [33] 刘天宝, 吴晓潭, 黄勇, 等. 三维成像声呐图像重建研究[J]. 声学技术, 2015, 34(4): 358-361.
- [34] 李斌, 金利军, 洪佳, 等. 三维成像声纳技术在水下结构探测中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015(3): 184-188, 192.
- [35] 戴林军, 郝晓伟, 吴静, 等. 基于三维成像声纳技术的水下结构探测新方法[J]. 浙江水利科技, 2013, 41(3): 62-65.
- [36] 杨志, 王建中, 范红霞, 等. 三维全景成像声呐系统在水下细部结构检测中的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 59-62.
- [37] Davis, A. and Lugsdin, A. (2005) High Speed Underwater Inspection for Port and Harbour Security Using Coda Echoscope 3D Sonar. *Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE*, Washington DC, 18-23 September 2005, 2006-2011.
- [38] 刘经南, 张小红. 激光扫描测高技术的发展与现状[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(2): 132-137.
- [39] 李凯峰, 徐卫明, 陆秀平, 等. 船载三维激光扫描海岸岛礁地形测量技术体系构建[J]. 海洋测绘, 2020, 40(3): 35-39.
- [40] Parrott, D.R., Todd, B.J., Shaw, J., et al. (2008) Integration of Multibeam Bathymetry and LiDAR Surveys of the Bay of Fundy, Canada. *Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference and National Surveyors Conference 2008*, Wolfville, November 2008, 1-15.
- [41] Kingham, K. (2017) Combining Multibeam Systems & Laser Scanning Data. RESON PDS2000 Software.
- [42] Conforti, D. (2019) Combined Laser/Multibeam Sonar Survey of Sydney Harbor. Teledyne Optech.
- [43] 李超, 李明, 盛岩峰, 等. 基于无人机和无人船的岛礁地形测绘技术[J]. 海洋测绘, 2021, 41(3): 52-56.
- [44] 毕凯, 李英成, 丁晓波, 等. 轻小型无人机航摄技术现状及发展趋势[J]. 测绘通报, 2015(3): 27-31, 48.
- [45] 段柏文. 无人机航空测量在地形测绘中的应用[J]. 资源信息与工程, 2018, 33(2): 135-136.
- [46] 王歌. 无人机航空摄影测量在地形图测绘中的应用[J]. 地矿测绘, 2023, 6(1): 16-18.

- [47] 段隆辉. 无人机航空摄影测量在小区域测绘中的应用研究[J]. 装备制造技术, 2018(7): 140-142.
- [48] 盛琳, 王双亨, 周高伟, 等. 非线性模型岛礁礁盘遥感水深反演[J]. 测绘科学, 2015, 40(10): 43-47.
- [49] 马毅, 张杰, 张靖宇, 等. 浅海水深光学遥感研究进展[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(3): 331-351.