

多源数据融合技术在高精度海洋地形测绘中的应用研究

孟 蝶

天津市地质研究和海洋地质中心, 天津

收稿日期: 2026年8月16日; 录用日期: 2026年9月9日; 发布日期: 2026年9月16日

摘 要

高精度海洋地形数据是海洋资源开发和环境保护的重要基础信息。传统单一测量手段在复杂海洋环境下, 往往难以兼顾覆盖范围、测深精度、探测深度与作业效率等多重需求, 多源数据融合技术为这一难题提供了可行的解决思路。本文梳理了海洋地形测绘中主要采用的遥感及测量数据源, 并分析了卫星雷达测高、机载激光测深、声呐测深、合成孔径雷达与光学遥感各类数据的特点与局限性; 进一步阐述了加权、地统计学、多尺度与深度学习等四类关键融合方法; 在此基础上, 构建了一套多源数据协同处理的技术流程。研究旨在突破单一数据源的固有局限, 为高精度海洋测绘工程实际工程应用提供技术参考。

关键词

多源数据融合, 海洋地形测绘, 卫星测高, 机载激光测深, 深度学习, 水深反演

A Study on the Application of Multi-Source Data Fusion Technology in High-Precision Marine Topographic Surveying

Die Meng

Tianjin Geological Research and Marine Geological Center, Tianjin

Received: August 16, 2026; accepted: September 9, 2026; published: September 16, 2026

Abstract

High-precision marine topographic data constitute vital foundational information for the development of marine resources and environmental protection. In complex marine environments, traditional

single-source surveying methods often struggle to meet multiple requirements simultaneously, such as coverage, bathymetric accuracy, detection depth and operational efficiency; multi-source data fusion technology offers a viable solution to this challenge. This paper reviews the primary remote sensing and surveying data sources used in marine topographic mapping, and analyses the characteristics and limitations of various data types, including satellite radar altimetry, airborne laser ranging, sonar bathymetry, synthetic aperture radar and optical remote sensing. It further elaborates on four key fusion methods: weighted fusion, geostatistical fusion, multi-scale fusion and deep learning. Building on this, a technical workflow for the collaborative processing of multi-source data has been established. The research aims to overcome the inherent limitations of single data sources and provide a technical reference for practical applications in high-precision marine surveying projects.

Keywords

Multi-Source Data Fusion, Marine Topographic Surveying, Satellite Altimetry, Airborne Laser Bathymetry, Deep Learning, Bathymetric Inversion

Copyright © 2026 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

海洋覆盖了地球表面约 71%的面积,蕴藏着丰富的生物、矿产和空间资源,是支撑我国经济发展的关键核心领域。准确把握海底地形及其变化不仅是海洋科学开发的重要前提,更是航道维护、港口工程建设和海洋灾害风险评估等涉海工作不可或缺的基础数据支撑[1]。近年来,随着全球海洋经济的快速发展和“海洋强国”战略的逐渐推进,行业与科研领域对高精度、大范围、动态化的海洋地形地貌的需求日益增强。

相较于陆地测绘,海洋地形测绘面临的环境更为复杂。其中,包括海水介质对电磁波产生强烈的吸收与散射效应,制约了光学与微波遥感的水下探测深度;潮汐、波浪、海流等海面动态变化会产生大量环境噪声,增加了观测数据精准解译的难度;单一测量手段存在固有短板,无法兼顾综合测绘需求,例如传统船载多波束声呐测绘精度较高,但作业效率低、经济成本高,且受船吃水深度限制,无法完成浅滩、近岸浅水区域的测绘工作;卫星遥感虽可实现大范围观测,但受限于水体穿透能力与空间分辨率。

多源遥感测绘数据融合技术,为实现高精度、大范围覆盖与低成本的海洋地形测绘提供了有效路径。该技术通过整合星载、机载、船载多类观测平台,融合主被动遥感、声学等多种传感器观测数据,实现不同数据源的优势互补,有效弥补单一测量手段的固有短板。近年来,随着 SWOT 宽幅卫星测高技术、机载激光测深系统等新型测绘装备与遥感技术的迭代更新,以及深度学习等人工智能算法在地学数据分析领域的深度应用,多源遥感数据融合技术在高精度海洋测绘领域的应用价值与发展潜力愈发凸显。

本文系统梳理海洋地形测绘的主流数据源类型,并总结各类数据融合算法与数据处理流程,开展系统性分析与探究。

2. 主要数据源分析

当前海洋地形测绘的主要数据源包含卫星测高数据、机载激光测深数据、船载声呐测深数据、光学遥感数据及合成孔径雷达(SAR)数据,各类数据依托不同观测平台与传感器获取,具备差异化的技术优势与适用场景,同时存在固有局限。厘清各类测绘数据源的技术特性、适用范围与数据短板,是科学制定

数据采集方案、构建多源数据融合体系的重要前提。

2.1. 卫星测高数据

卫星雷达测高技术[2]通过精确测量卫星到瞬时海面之间的距离,结合精密定轨技术反演获取海面高度信息,进而通过地转平衡与重力异常关系推算深海海底地形。自1978年SEASAT卫星发射以来,该技术经历了TOPEX/Poseidon、Jason系列、CryoSat-2、SARAL/AltiKa等多代测高卫星的迭代发展。近年来,2020年发射的Sentinel-6 Michael Freilich卫星和2022年发射的SWOT (Surface Water and Ocean Topography)卫星进一步将海面高度测量精度推进到厘米级水平。其中,SWOT卫星采用创新的Ka波段雷达干涉测量技术,实现了对海面地形的二维高分辨率宽幅成像,其空间分辨率可达1公里以下,为大洋海底地形反演提供了革命性的数据来源。

卫星测高数据的优势在于全球覆盖能力强和时间连续性强,适合大范围深海区域的宏观地形反演;但其空间分辨率相对声呐测深较低,且在近岸复杂海域受陆地信号干扰,精度会显著下降。

2.2. 机载激光测深数据

机载激光测深系统(Airborne LiDAR Bathymetry, ALB)通常同时发射两种波长的激光:1064 nm的近红外激光用于探测海表面,532 nm的蓝绿激光凭借较强的水体穿透能力到达海底,通过精确解算两束激光的回波时间差即可计算出水深值[3]。其实际探测能力主要取决于水体透明度、悬浮物浓度、海面状态、底质反射率、激光能量和飞行参数等。典型的机载激光测深系统如Riegl VQ-880-G、Leica Chiroptera 4X等,在清澈水体和良好海况下,部分深水型系统可达到数十米探测深度。

ALB技术适用于近岸浅水区、海岸带、珊瑚礁及岛礁等复杂环境的测绘,能够实现水陆一体化三维测量,有效弥补了船载声呐因吃水限制无法进入浅水区、光学卫星无法有效穿透水体的困难。然而,ALB的穿透能力受水体浊度显著制约,在水质较差条件下,探测深度与测量精度会明显下降,应用场景也会因此受限。

2.3. 声呐测深数据

声呐测深技术通过发射声波脉冲并接收海底反射信号,依据声波往返时间与水中声速的乘积计算水深,是目前中深海精细地形测绘的主流手段。按波束形式可分为单波束声呐与多波束声呐两类:单波束声呐结构简单、成本较低,适合断面测量与航道普查,但空间覆盖率有限,效率较低;多波束测深系统一次发射可形成上百至数百个波束,实现条带式全覆盖扫测,能够获取高密度的海底地形点云数据,是目前工程测量、海底地貌调查和深海精细测绘的主要技术手段[4]。

声呐测深技术的优势在于测深精度高、可作业深度大,但调查效率取决于船速、条带宽度、测线密度和海况,且在极浅水区(水深小于5 m)因吃水与波束张角约束,往往存在测量空白。此外,声速剖面变化、船体姿态误差以及潮位改正精度等因素也会对成果的测量精度产生影响。

2.4. 光学遥感数据

卫星遥感水深反演主要利用不同水深和底质条件下水体出射辐射的变化估计浅水水深[5]。经典算法包括Stumpf对数比值模型、Lyzenga多波段线性模型,以及近年来兴起的随机森林、支持向量机、卷积神经网络等机器学习反演模型。WorldView-3、Sentinel-2和高分系列等影像可为大范围浅水区快速调查提供数据支持。

光学遥感水深反演的优势是获取成本低、时相丰富、覆盖面广,适合大范围浅水区的快速普查与变化监测;但其局限性在于反演精度受底质类型、水体悬浮物浓度及云层遮挡的影响较为突出,反演水深

范围受水体光学特性制约，且需要结合实测水深数据进行模型训练与精度验证。

2.5. 合成孔径雷达数据

合成孔径雷达具有全天候、全天时观测能力，能够穿透云层，不受光照条件限制。在适宜的潮流和风场条件下，浅水地形会通过水动力过程调制海表流速和短重力波，从而在 SAR 影像中形成与沙脊、浅滩或潮沟相关的纹理。基于这一机制，可结合潮流数值模型、SAR 影像和控制水深开展浅海地形反演[6]。TerraSAR-X、Sentinel-1、GF-3 等 SAR 卫星为浅海地形动态监测提供了重要数据支撑。

SAR 影像数据的优势是不受云雾和日照条件干扰，在恶劣天气下作业能力突出；但 SAR 水深反演并非雷达信号直接穿透海水，其适用性取决于海底地形、潮流、风速、波浪和海面等条件。当风速过低或过高时，地形引起的海面调制信号可能难以识别。该方法一般适用于潮流作用显著、地貌特征较清楚的浅海区域，尚不能作为普适性高精度水深测量手段。

为清晰呈现各类数据源的技术特性与适用场景差异，将上述五类数据源在空间分辨率、测深范围、覆盖能力、作业成本、时效性及主要优势、局限性等方面进行对比，如表 1 所示。

Table 1. Comparison of main data source features for topographic mapping
表 1. 地形测绘主要数据源特性对比

类型	空间分辨率	测深范围	覆盖能力	作业成本	时效性	主要优势	主要局限
卫星雷达测高	1~25 km	全海域	全球覆盖	低	周期性观测	全球覆盖、时间序列长	空间分辨率低、近岸精度差
机载激光测深	0.5~2 m	0~50 m	中等	高	按需飞行	水陆一体化、浅水高精度	受水质约束、深度受限
声呐测深	分米~米级	5 m~万米以深	条带式覆盖，效率较低	高	按航次	精度高、深度大	极浅水盲区、效率受海况影响
光学遥感	0.3~30 m	0~20 m	大范围、全球可获取	低	卫星过境周期	成本低、覆盖广	受云雾、底质、水质制约
合成孔径雷达	1~25 m	浅海	大范围、全天候	中	卫星过境周期	全天候、穿云雾	依赖水动力条件、适用性有限

3. 关键数据融合技术方法

多源数据融合的核心目标是最大限度地发挥各数据源的优势[7]，抑制误差，从而获得综合精度与可靠性均优于任何单一数据源的地形产品。根据融合策略的不同，主要方法可归纳为加权融合方法、地学统计融合方法、深度学习融合方法和多尺度融合方法四类。

3.1. 加权融合方法

加权融合方法的基本思想是依据各数据源的质量(精度)指标，为其分配相应的权重，通过加权平均生成融合结果。常用的加权融合算法包括基于方差分量估计的加权法和空间自适应加权方法等[8]。该方法计算效率高、物理含义明确，是工程实践中应用最为广泛的基础融合策略。但在工程应用中为提高融合

质量,应根据水深、离岸距离、水体透明度和波束入射角等情况构建空间变化权重,而不是仅为每类数据设置固定权重。

3.2. 地统计学融合方法

地统计学融合方法是通过变异函数描述空间变量的相关结构,并据此进行最优线性无偏估计。克里金(Kriging)插值是经典的地统计融合算法,在多源数据融合中,通常采用协同克里金(Co-Kriging)算法[9]。该算法可将高精度但分布稀疏的数据(如单波束实测水深)作为主变量,将连续覆盖但精度较低的遥感反演水深作为辅助变量,通过建立交叉半方差函数模型,实现两种尺度数据的最优无偏估计,从而有效提升了无实测数据区域的地形预测能力。

3.3. 多尺度融合方法

不同测量手段获取的地形数据,在尺度表征上存在显著差异。其中,卫星测高数据主要反映大尺度、大范围海底地形信息,多波束声呐与机载激光测深数据精度高,能够精细刻画亚米级至米级的局部地貌细节。在数据融合处理过程中,若直接将低分辨率数据重采样至高分辨率,则容易产生不符合实际地形的地貌结构;反之,将高精度实测数据统一降尺度处理,则会损失海沟边缘、海底沙波和礁体构造等关键地形细节信息。

多尺度融合算法能够有效解决各类测量数据源空间分辨率不匹配的问题[10]。常见的方法主要包括小波变换融合、拉普拉斯金字塔融合、经验模态分解等。该类方法的核心思路是对原始地形数据分解出低频背景分量与高频细节分量,在保留高分辨率测深数据地貌细节特征的基础上,融合低分辨率卫星数据的低频地形背景信息,实现不同尺度地形信息的优势互补。

3.4. 深度学习融合方法

随着人工智能技术的发展,深度学习凭借强大的非线性建模与特征提取能力,在海洋地形多源数据融合领域得到广泛应用[11]。与传统线性模型相比,深度学习能够表征光谱信息、水体环境、海底底质与水深之间复杂的非线性耦合关系。当前,卷积神经网络、U-Net、生成对抗网络和 Transformer 等模型已被应用于遥感水深反演、点云去噪、地形缺失区域重建和地形超分辨率重建等研究场景。需要指出的是,深度学习对高质量训练样本量要求较高,对于样本不足区域,可采用迁移学习策略或空间邻域自适应,但仍需要少量实测水深数据进行校准。

3.5. 融合方法的选择与组合

不同融合方法的选择应由数据特征、测绘目的和成果精度要求共同决定。对于数据源较少、误差模型明确且工程时效性要求较高的项目,可采用加权融合方法;对于实测水深稀疏、辅助遥感数据连续覆盖且空间相关性较强的区域,可采用地统计学融合方法;对于数据分辨率差异明显的大范围区域,适宜采用多尺度融合;对于光谱、水体和底质关系复杂、训练样本相对充足的浅水区,可引入深度学习模型。

4. 多源数据融合处理流程

建立标准、规范的多源数据协同处理技术流程,是保障地形融合成果精度的关键。一套完整的多源地形数据融合技术流程通常主要包括以下五个主要步骤:数据获取与预处理、时空基准统一、数据配准与一致性检验、多源数据融合建模与地形重构、精度评价与成果应用。总体技术流程如图 1 所示。

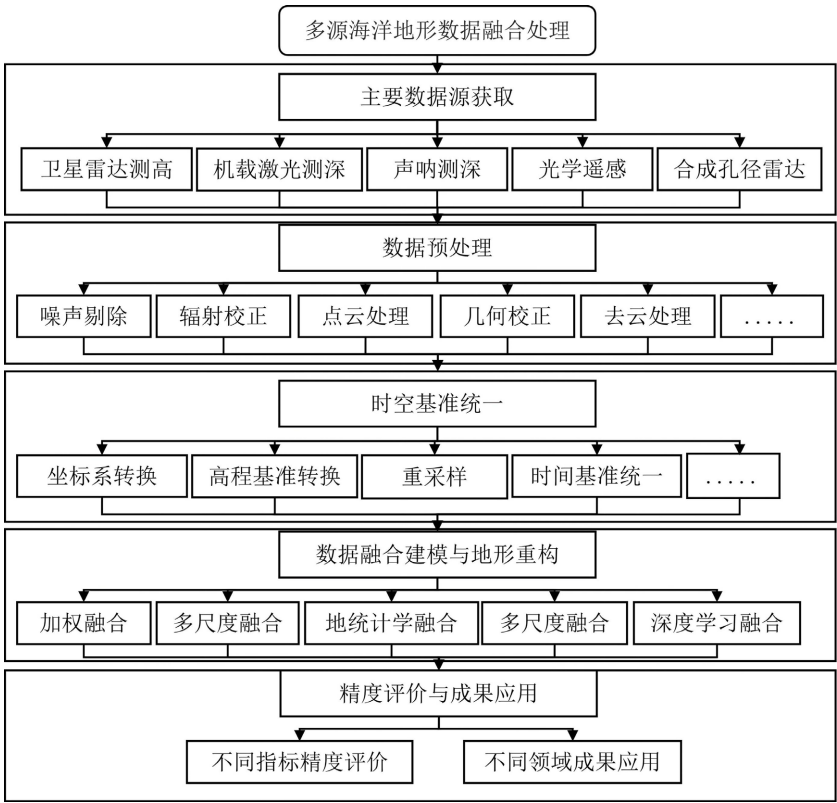


Figure 1. Process flow for multi-source data fusion processing
图 1. 多源数据融合处理技术流程

4.1. 数据获取与预处理

根据研究区域的地理环境特征(水深范围、水质条件、水下地形复杂度)与测绘项目技术指标要求(平面/高程精度、空间分辨率、覆盖范围),应制定合理的多源数据协同获取方案。为有效提高观测数据的质量,需针对不同观测数据来源特性开展差异化数据预处理工作,剔除无效观测值、消除系统误差。其中,机载激光测深数据需进行条带解算、点云分类、异常点剔除等,提取有效的地形点云信息;声呐测深数据需进行噪声剔除、姿态改正及等距采样等;光学遥感影像需进行辐射定标、去云处理、几何校正及影像镶嵌和裁剪等,获取研究区域有效影像;SAR 影像需进行辐射定标、斑点噪声抑制及几何校正、辐射归一化处理等。

4.2. 时空基准统一

由于多源数据来自不同平台、传感器与观测时段,必须在进入融合流程前统一其时空基准。空间基准统一涉及坐标系转换(如将不同椭球体坐标统一至 WGS-84、CGCS2000 或地方工程坐标系)、高程基准转换(将椭球高、大地水准面高与深度基准面进行统一归算,常用的深度基准面包括理论最低潮面、平均大潮低潮面等)以及地图投影一致化处理(确保各数据在同一投影坐标系下叠合);时间基准统一则需通过潮位改正模型,将不同时刻观测的水深数据归算至同一深度基准面。此外,还需对各数据来源进行空间分辨率的重采样,以匹配目标融合网格的尺度,同时在重采样过程中注意保持地形细节信息不被过度平滑。

4.3. 数据配准与一致性检验

数据配准是保证多源数据空间套合精度、进而保障融合结果精度的关键环节。对于光学影像与 SAR

影像,可采用基于特征点匹配的自动配准算法,在纹理丰富的近岸区域通常可获得亚像素级的配准精度;在纹理较少的开阔水域,则需借助精确定轨数据或地面控制点辅助配准。对于点云数据配准,可采用迭代最近点算法实现精细配准。配准完成后,应在数据重叠区域系统开展一致性检验,通过统计分析各数据源之间的差值分布评估相对精度,判断是否存在系统性偏差。若检验发现某数据源存在明显的系统性偏差,应构建相应的偏差改正模型进行统一校正后,方可进入后续融合步骤。

4.4. 数据融合建模与地形重构

依据研究区域的空间特征与精度需求,选择适宜的融合方法构建融合模型,并基于融合结果重构规则格网的数字地形产品,是整个流程的核心技术环节。在区域分层融合策略上,应充分考虑不同数据源的最优适用水深区间,在近岸浅水区,可优先采用机载激光测深数据,辅以卫星反演测深与声呐测深数据;在深水区则以卫星测高与声呐测深数据融合为主。融合建模完成后,采用适当的插值与重建算法(如自然邻域插值、径向基函数插值、克里金插值)生成规则格网的数字地形模型。

4.5. 精度评价与成果应用

精度评价应采用未参与融合过程的独立检查点数据(如独立布设的水下控制点、交叉测线数据等)对融合结果进行精度评价,主要精度评价指标包括决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MAPE)等。经精度检验合格的高精度地形产品,方可输出服务于航海导航、海洋工程建设及数字孪生海洋等应用领域。

5. 结论

本文分析了卫星测高、机载激光测深、船载声呐、光学遥感和 SAR 数据在海底地形测绘中的观测机制、适用范围和主要误差,并对加权、地统计学、多尺度和深度学习融合方法进行了比较。在此基础上,提出了包括数据获取与预处理、时空基准统一、数据配准与一致性检验、数据融合建模与地形重构、精度评价一体的处理流程。

参考文献

- [1] 余德坤. 无人机和无人船相结合的陆海一体化地形测绘[J]. 北京测绘, 2025, 39(12): 1794-1799.
- [2] 孙中苗, 管斌, 翟振和, 等. 海洋卫星测高及其反演全球海洋重力场和海底地形模型研究进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 923-934.
- [3] 林少凯, 欧阳永忠, 洪黎丹, 等. 一种面向海底陡坡的 ALB 点云滤波与恢复方法[J]. 海洋测绘, 2026, 46(2): 14-19.
- [4] 江林生. 无人机结合无人船在复杂河道地形测绘中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2026, 49(7): 100-103.
- [5] 程亮, 楚森森, 李满春, 等. 卫星遥感浅海水下地形信息提取方法综述[J]. 现代测绘, 2024, 47(6): 1-5, 16.
- [6] 崔宜德, 汪胜, 于暘, 等. 基于多特征输入深度学习的浅海水下地形 SAR 卫星遥感[J]. 空间科学学报, 2025, 45(2): 424-436.
- [7] 张智宇, 王文鑫, 刘欣缘, 等. 星基主被动协同水深反演研究进展: 方法、应用与挑战(特邀)[J]. 光学学报, 2026, 46(12): 140-157.
- [8] 卜宪海, 谭新月, 张建兴, 等. 多源数据频率域加权融合的深海高精度海底地形模型构建——以格陵兰岛南部海域为例[J]. 海洋学报, 2025, 47(8): 101-115.
- [9] 何荣莉, 王德, 田信鹏, 等. 基于深度神经网络残差克里金的黄河三角洲近海水下地形高精度构建[J]. 地球科学与环境学报, 2026, 48(4): 620-632.
- [10] 杨光义, 李卓鸿, 黄和, 等. 基于地形约束的多尺度 DEM 融合[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(3): 292-299.
- [11] 张世殊, 李青春, 黎昊, 等. 融合多源遥感数据和改进后 MaskR-CNN 深度学习模型的复杂高原地形区冰湖智能识别[J]. 地球科学, 2025, 50(8): 3132-3143.