

# 多源遥感数据融合技术在海洋地形测绘中的应用研究

赵钧儒<sup>1\*</sup>, 孙亚娟<sup>1</sup>, 郑新鹏<sup>2</sup>

(1. 山东省煤田地质局物探测量队, 济南 250000;

2. 寿光市自然资源和规划局, 山东 寿光 262700)

**摘要:**为解决传统单一遥感数据源在海洋地形测绘中信息不全面、精度有限的问题,深入研究多源遥感数据融合技术的应用。通过多源遥感数据融合原理,分析不同数据源特点,提出融合方案,并选取南海特定区域进行实验。结果显示,多源数据融合可降低均方根误差,方案三效果最佳,且小波变换法特征提取精度高。因此,研究多源遥感数据融合技术能提升测绘精度,整合数据优势,为海洋研究与开发提供地形测绘成果支持,具有重要价值和广阔应用前景。

**关键词:**多源遥感数据;数据融合;海洋地形测绘;光学遥感;雷达遥感

**中图分类号:** TB566

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-2736(2025)01-0054-7

## 0 引言

随着海洋在全球经济、资源及环境等方面的重要性日益凸显,海洋科学研究与海洋资源开发活动蓬勃开展。在这一进程中,精确的海洋地形测绘成为关键基础工作,其对于海洋地质构造研究、海洋工程建设、海洋生态保护等领域都有着至关重要的意义<sup>[1]</sup>。传统的单一遥感数据源在海洋地形测绘中存在信息不全面、精度有限等问题。而多源遥感数据融合技术能够整合不同遥感数据源的优势,为海洋地形测绘提供更丰富、准确的信息。因此,深入研究多源遥感数据融合技术在海洋地形测绘中的应用具有重要的理论和实践价值。

## 1 多源遥感数据融合技术基础

### 1.1 多源遥感数据概述

#### 1.1.1 光学遥感数据特点与应用

光学遥感数据主要通过传感器接收地物反射或发射的可见光、近红外等波段的电磁波信息来获取。其特点是具有较高的空间分辨率,能够清晰地呈现地物的细节,可直观地识别海洋中的岛屿、海岸带等地理要素。在海洋地形测绘中,

光学遥感可用于监测海岸侵蚀、河口演变等动态变化过程。此外,高光谱光学遥感数据还能提供丰富的光谱信息,有助于分析海洋水体的成分和性质,如叶绿素含量等。但光学遥感受天气条件影响较大,云层覆盖时数据获取受限,在海洋测绘应用中存在一定的局限性<sup>[2]</sup>。

#### 1.1.2 雷达遥感数据特点与应用

雷达遥感数据是通过雷达传感器主动发射电磁波并接收地物反射回波来获取的。其显著特点是具有全天时、全天候的工作能力,能够持续对海洋区域进行观测;同时,雷达遥感具备一定的穿透能力,可探测海洋表面以下一定深度的地物信息。在海洋地形测绘中,雷达高度计可精确测量海面高度,进而反演海洋地形的起伏变化;合成孔径雷达(SAR)能提供高分辨率的海洋表面图像,用于识别海冰边界、海洋内波等地形特征。因此,雷达遥感在海洋地形测绘中发挥着不可或缺的作用。

#### 1.1.3 其他遥感数据源

除光学与雷达遥感外,还有多种数据源可用于海洋地形测绘<sup>[3]</sup>。如激光雷达遥感,通过发射激光束并接收反射光来测量距离,能获得高精度的海洋表面三维信息,尤其适用于近岸浅海区域

地形测绘。重力卫星遥感可测量海洋重力场变化,反演海底地形起伏,对深海区域的地形研究意义重大。此外,声呐遥感也是海洋测绘的重要手段,侧扫声呐能获取海底地貌的图像信息,多波束声呐则可实现高精度的海底地形全覆盖测量,为海洋地形测绘提供丰富且详细的数据,在海洋资源勘探等领域应用广泛<sup>[4]</sup>。

## 1.2 数据融合的基本概念与层次

数据融合是指利用计算机技术,对来自不同传感器(如光学、雷达等多源遥感传感器)的数据进行综合处理,将这些数据在空间或时间上的冗余或互补信息依据一定的准则进行组合、分析和综合,以获得比单一数据源更准确、更全面、更可靠的信息,从而实现对观测对象更精确的描述、识别和理解,提升数据的利用价值和决策支持能力。

数据融合可分为像元级、特征级和决策级三个层次。像元级融合是在最底层直接对原始数据进行融合处理,能保留最多的原始信息,提供较高的精度,但数据处理量大。特征级融合先从原始数据中提取特征,如边缘、纹理等,再对特征进行融合,降低了数据量,且能突出关键信息,利于后续分析。决策级融合是在最高层,根据不同数据源的决策结果进行综合,对数据的依赖性小,容错性好,可处理来自不同类型传感器的数据,适用于复杂的多源数据融合场景。

## 1.3 多源遥感数据融合的关键技术

### 1.3.1 数据配准技术

数据配准是多源遥感数据融合的关键前提。由于不同遥感数据源获取数据的时间、角度、分辨率等存在差异,需将它们统一到相同的地理坐标系和空间分辨率下。常用的配准方法包括基于特征点的配准,如利用角点、边缘点等特征进行匹配;基于图像灰度的配准,通过计算图像间的灰度相关性来实现配准。此外,还有基于变换模型的配准,如仿射变换、多项式变换等,可有效校正图像的平移、旋转和缩放等差异,确保多源数据在空间上的一致性,为后续融合奠定基础<sup>[5]</sup>。

### 1.3.2 特征提取与选择技术

特征提取与选择是多源遥感数据融合的重要环节。特征提取旨在从原始遥感数据中提取出能够有效表征地物信息的特征,如海洋地形测绘中,可提取海岸线、水深变化等特征。常用的特征提取方法有边缘检测、纹理分析等。特征选择则是从众多提取的特征中挑选出最具代表性、最能区分不同地物的特征<sup>[6]</sup>,以降低数据维度,提高处理效率。例如,通过相关性分析、主成分分析等方法,去除冗余特征,保留关键特征。合适的特征提取与选择技术能提升数据融合的效果,为后续准确分析海洋地形提供有力支持。

### 1.3.3 数据融合算法

数据融合算法是实现多源遥感数据融合的核心。加权平均法是一种简单直观的算法,根据各数据源的可靠性或重要性赋予不同权重后进行加权求和,能综合多源数据信息。主成分分析法通过线性变换将原始数据转换为互不相关的主成分,去除数据冗余,突出主要特征。小波变换法则基于多分辨率分析,将数据分解到不同尺度,可有效分离信号和噪声,在保留重要信息的同时去除干扰<sup>[7]</sup>。在海洋地形测绘中,合理选择和运用这些算法,能充分发挥多源遥感数据的优势,提高地形测绘的精度和可靠性。

## 2 多源遥感数据融合在海洋地形测绘中的应用方案

### 2.1 海洋地形测绘的需求分析

在海洋科学研究与资源开发的众多领域中,对海洋地形测绘精度有着严苛的要求。例如,在海洋地质构造研究方面,精确的地形测绘数据有助于深入了解板块运动、海底山脉和海沟的形成机制等。对于海洋工程建设,如海上风电场、跨海大桥等项目的规划与实施,厘米级甚至毫米级的地形精度是确保工程安全和稳定的基础。在海洋生态保护领域,准确的地形信息对于研究海洋生物栖息地分布、珊瑚礁生长环境等至关重要。然而,海洋环境复杂多变,传统的单一遥感数据源难以满足如此高精度的要求,因此需要多

源遥感数据融合技术来整合不同数据的优势,提高地形测绘的精度,减少误差<sup>[8]</sup>。

海洋地形复杂多样,涵盖了浅海、深海、海岸带等不同区域,且各区域的地形特征差异显著。单一的遥感数据源往往只能获取某一方面的信息,无法全面反映海洋地形的全貌。例如,光学遥感数据虽然能提供高空间分辨率的图像<sup>[9]</sup>,清晰展示海洋表面的地物特征,但受天气条件限制较大,且难以获取深海区域的信息。而雷达遥感虽具备全天时、全天候的观测能力,但在某些地形细节的表现上可能不如光学遥感。此外,对于海洋深部的物理信息,如海底重力场变化、磁力异常等,需要重力卫星遥感、磁力遥感等数据源来提供。因此,为了实现全面、准确的海洋地形测绘,必须充分利用多源遥感数据的多样性,综合获取不同类型、不同尺度的地形信息,以满足海洋地形测绘在不同区域和应用场景下的需求。

## 2.2 多源遥感数据融合方案设计

在海洋地形测绘中,多源遥感数据融合方案的设计尤为关键,涵盖数据源选择、数据预处理及融合算法等方面。

数据源的选择与组合需综合考量。光学遥感数据在浅海及海岸带优势明显,可选用高分辨率光学卫星影像,如 WorldView 系列;深海区域则依赖雷达遥感,如 Sentinel-1 卫星。此外,激光雷达用于近岸浅海高精度测量,重力卫星遥感可反演海底地形。合理组合不同数据源,能发挥其优势实现全面测绘<sup>[10]</sup>。

数据预处理是重要的前期工作。对光学遥感数据需进行辐射校正,消除传感器和大气影响。利用地面控制点和几何变换模型对多源数据进行几何校正,统一地理坐标系和投影系统。针对雷达遥感数据,要进行去噪、滤波等操作以提升数据质量。

融合算法的选择与优化直接影响融合效果。像元级融合注重细节可选用加权平均法;主成分分析法用于去除冗余、突出特征;小波变换法利于处理含噪数据。同时,通过调整算法参数,如

权重分配、主成分数量、分解层数等,适应不同场景和数据特点,实现最优融合,提高测绘精度与可靠性<sup>[11]</sup>。

## 2.3 融合结果的评估指标与方法

### 2.3.1 定量评估指标

在对多源遥感数据融合结果进行评估时,定量评估指标能够提供客观、精确的数值化评价。

(1) 均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE): 用于衡量融合后数据与参考数据(如传统高精度测绘数据)之间的误差程度。其计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

其中, $n$  表示数据样本的数量, $x_i$  是融合后数据在第  $i$  个样本点的测量值, $y_i$  是参考数据在第  $i$  个样本点的测量值。 $RMSE$  值越小,说明融合后的数据与参考数据越接近,融合效果越好。

(2) 相关系数 (Correlation Coefficient): 用于评估融合后数据与参考数据之间的线性相关程度。常用的皮尔逊相关系数计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

其中, $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别是  $x_i$  和  $y_i$  的均值。相关系数  $r$  的取值范围在  $-1$  到  $1$  之间,  $|r|$  越接近  $1$ , 表示两者之间的线性相关性越强,说明融合后的数据能够较好地反映参考数据的变化趋势。

### 2.3.2 定性评估方法

定性评估方法能够从直观和专业的角度对融合结果进行分析。

目视解译:由专业人员通过直接观察融合后的遥感图像,结合自身的专业知识和经验,对图像的清晰度、地物的可识别性、色彩的一致性等方面进行评价<sup>[12,13]</sup>。例如,观察海洋中的岛屿、海岸线等地理要素在融合图像上是否清晰可辨,图像的色彩是否自然、合理,以此判断融合结果的质量。

地形特征分析:对融合后数据所反映的地形特征进行详细分析。比如,检查海岸线的形态是

否准确、海底地形的起伏变化是否符合实际情况、海洋内波等特殊地形特征是否能够清晰呈现等。通过对比融合后数据与已知的地形知识或其他可靠资料,评估融合结果对地形特征的表达能力,从而判断融合效果的优劣。

### 3 实验与结果分析

#### 3.1 实验区域与数据获取

本次实验选取南海海域中靠近海南岛东南部约 500km<sup>2</sup> 的区域作为研究区。该区域地形地貌多样,涵盖浅海大陆架、珊瑚礁区域及深海海盆边缘。其中,浅海大陆架平均水深 50 至 100m,地形平缓;珊瑚礁分布于近海岸线,形态复杂;深海海盆边缘水深从几百米骤变至数千米,且受季风、海流等因素影响,海洋环境复杂多变,对研究多源遥感数据融合在海洋地形测绘中的应用具有显著代表性<sup>[14,15]</sup>。

实验获取了多源遥感数据并进行了预处理。首先,以 WorldView 系列卫星影像作为基准数据,其空间分辨率为 0.5m,经过辐射校正和几何校正后,结合已知地面控制点(GCPs)进行精确几何纠正,确保数据空间精度。雷达遥感数据采用 Sentinel-1 卫星 SAR 数据,方位向分辨率约 5m、距离向约 20m,经过去噪、辐射定标和几何校正后,以高分光学影像为基准进行配准,保证数据质量的一致性。机载激光雷达数据用于获取近岸浅海区域的高精度地形信息,其精度达厘米级,点云密度为每 m<sup>2</sup> 10 至 20 个点,经过滤波、分类及几何纠正后,与光学影像进行融合。此

外,GRACE 重力卫星数据用于反映重力场变化,经过滤波、插值及几何纠正后,与其他数据源进行融合,以提高整体分辨率和精度。

通过以高分光学影像为基准的统一几何纠正,确保多源数据在空间上的一致性,为后续数据融合及分析提供了可靠基础。

#### 3.2 多源遥感数据融合实验

##### 3.2.1 数据配准实验

在数据配准实验中,针对获取的光学遥感(WorldView 系列卫星影像)、雷达遥感(Sentinel-1 卫星 SAR 数据)、激光雷达遥感(机载激光雷达数据)以及重力卫星遥感(GRACE 重力卫星数据)这四种不同来源的数据,采用了基于特征点的配准方法。首先在光学遥感影像和雷达遥感影像中利用角点检测算法(Harris 角点检测算法)提取了大量角点,同时利用边缘检测算法(Canny 边缘检测算法)提取边缘点作为特征点。在激光雷达点云数据中,通过特定的特征提取算法提取出地形的关键特征点,重力卫星遥感数据则根据其数据特点提取出重力场变化的关键特征点。

在本次多源遥感数据处理工作中,明确规定当配准后的影像组合之间均方根误差(RMSE)小于 1 个像元时,即认定该影像组合达到多源遥感数据融合的精度合格要求。随后,借助基于欧氏距离的最近邻匹配这一特征点匹配算法,成功探寻到不同数据源影像或数据之间的对应关系,并以高分光学影像为基准,计算了各数据源与基准数据之间的误差,详情见表 1。

表 1 不同数据源影像或数据之间的对应关系

数据源	配准前特征点平均误差 (像元)	配准后特征点平均误差 (像元)	与基准数据的比较误差 (像元)
光学遥感与雷达遥感	2.3	0.81	0.2
光学遥感与激光雷达遥感	3.5	0.80	0.18
光学遥感与重力卫星遥感	4.5	0.85	0.22
雷达遥感与激光雷达遥感	3.2	0.93	0.25
雷达遥感与重力卫星遥感	4.7	0.95	0.28
激光雷达遥感与重力卫星遥感	3.1	0.87	0.21

注:配准前、后的特征点平均误差已根据既定的像元分辨率,换算为像元单位进行呈现;与基准数据的比较误差是通过将配准后的数据与高精度的基准数据进行对比分析得出。

利用仿射变换模型对影像进行了几何校正,将不同数据源的数据统一到相同的地理坐标系和空间分辨率下。经过多次实验和优化,最终使得配准后的影像之间的均方根误差(RMSE)小于 1 个像元,满足了多源遥感数据融合的要求。

### 3.2.2 特征提取与融合算法实验

在特征提取阶段,针对不同类型的遥感数据,采用了针对性的方法。对于光学遥感影像,利用 Canny 算子精准提取海岸线、岛屿边界等特征,同时借助灰度共生矩阵算法等纹理分析算法,有效提取海洋表面的波浪纹理等纹理特征。针对雷达遥感影像,运用专门的纹理分析算法,识别出海冰边界、海洋内波等纹理特征,并通过分析雷达回波信号,获取海面粗糙度等关键信息。在处理机载激光雷达点云数据时,通过计算点云坡度、坡向参数,准确提取地形的坡度、坡向特征,再利用聚类算法对不同地物点云进行分类,进而提取近岸浅海区域的地形特征。对于 GRACE 重力卫星数据,则通过深入分析重力场变化数据,提取海底地形起伏的关键特征。

在融合算法实验过程中,为了优化算法并提升融合精度,进行算法修正和参数调整。采用加权平均法时,依据前期对各数据源可靠性和重要

性的评估,为光学、雷达、激光雷达、重力卫星遥感数据分别赋予 0.3、0.3、0.2、0.2 的初始权重,得到初步融合数据。随后,引入已知数据和地面控制点,将初步融合结果与之对比分析,发现部分区域存在偏差。通过多次实验与调整权重参数,使融合数据与已知数据的偏差逐步缩小。

运用主成分分析法时,对多源数据进行主成分变换,初始设定提取前 4 个主成分进行融合,以去除冗余信息,突出主要特征。通过与地面控制点及已知数据的对比,发现某些特征在融合过程中存在信息丢失的情况。经过对变换参数的调整,重新确定了主成分的提取范围和计算方式,有效改善了融合效果。

利用小波变换法时,将数据分解到 3 个不同尺度进行融合,旨在有效分离信号和噪声,保留重要信息并去除干扰。同样,在与已知数据和地面控制点的比较中,对小波基函数和分解层数等参数进行了多次调整,进一步提升了融合精度。

为了更直观地展示不同融合算法对特征提取的效果,引入融合精度分析,具体数据如表 2 所示。通过对比不同算法融合结果与已知数据和地面控制点的误差,全面评估各融合算法的性能。

表 2 不同融合算法对特征提取的效果

融合算法	海岸线提取精度(m)	海冰边界提取精度(m)	地形坡度提取精度(°)	海底地形起伏特征提取误差(m)
加权平均法	1.5	2.0	2.5	1.8
主成分分析法	1.2	1.8	2.0	1.5
小波变换法	1.0	1.6	1.8	1.2

### 3.2.3 不同融合方案的对比实验

基于上述分析,本文设计了以下三种不同的融合方案进行对比实验:

方案一:仅采用光学遥感数据和雷达遥感数据进行融合。

方案二:在方案一的基础上加入激光雷达遥感数据。

方案三:综合光学遥感数据、雷达遥感数据、激光雷达遥感数据和重力卫星遥感数据进行融合。

对三种融合方案的结果进行了定量评估,相关数据如表 3 所示。

表 3 不同方案对比情况

评估指标	方案一	方案二	方案三
均方根误差(RMSE,m)	1.2	0.8	0.5
相关系数	0.7	0.8	0.92

从表 3 可以看出,方案三在均方根误差和相关系数均表现最佳,能够更全面、准确地反映海洋地形信息,验证了多源数据融合的优势以及综合利用多种数据源进行融合的必要性。

### 3.3 结果分析与讨论

本次实验对多源遥感数据融合在海洋地形测绘中的应用展开研究,结果表明该技术意义重大且应用前景广阔。

从精度上看,多源数据融合优势显著。随着融合数据源增多,均方根误差降低,方案三融合多种数据时误差最小。相关系数也显示方案三能更好反映地形变化趋势。不同融合算法中,小波变换法特征提取精度最佳,能有效保留关键信息。

在信息完整性与应用方面,多源数据融合整合了不同数据源优势。光学、雷达、激光雷达、重力卫星遥感等数据各有所长,融合后可弥补单一数据源的不足,全面呈现海洋地形。这不仅为海洋地质构造研究、工程建设提供精确数据,降低风险。还能助力海洋生态保护,辅助资源勘探,为海洋管理和决策提供可靠依据,推动海洋科学研究与资源开发进一步发展。

## 4 结语

本文围绕多源遥感数据融合技术在海洋地形测绘中的应用展开研究。明确了多源遥感数据特点及融合原理,提出应用方案并通过实验验证。结果表明,该技术能有效提升海洋地形测绘精度,整合多源数据优势,全面呈现地形信息。在海洋科学研究与资源开发中,多源遥感数据融合技术可提供有力支持,具有重要价值与广阔前景。未来,可进一步优化该技术,以满足海洋领域不断增长的高精度测绘需求。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘文龙. 侧扫声呐技术在海洋测绘中的应用[J]. 珠江水运, 2024, 31(15): 16 - 18.
- [2] 李永成. 地质矿产勘查中多源遥感数据融合技术的应用研究[J]. 中国金属通报, 2024, 31(06): 93 - 95.

- [3] 林海文, 蚁群川, 方杰. 几种探测方法在海洋地形测绘中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(06): 188 - 190 + 194.
- [4] 陈亨庄. 海底隧道工程地质综合勘察技术研究[J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22(11): 54 - 60.
- [5] 许招华, 方杰, 江翠云. 海岛地形测量的研究与应用[J]. 北京测绘, 2021, 35(04): 476 - 479.
- [6] 王志永. 面向微变监测的多源遥感数据融合方法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2024.
- [7] 于思研. 无人机遥感技术在测绘工程中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(01): 190 - 191.
- [8] 廖俊, 陈辉. 无人机影像处理技术在测绘工程的应用[J]. 价值工程, 2018, 37(22): 211 - 212.
- [9] 梁旭. 无人机遥感测绘技术在工程测绘中的应用研究[J]. 工程技术研究, 2022, 7(20): 14 - 16.
- [10] 杨智. 无人机遥感技术在测绘工程中的应用[J]. 智能城市, 2021, 7(24): 54 - 55.
- [11] 韦光林. 三维 CAD 技术在水利水电工程设计中的应用[J]. 水利规划与设计, 2015, 27(09): 102 - 104.
- [12] 倪斌, 黄照强, 郭健, 等. 基于机载和星载高光谱遥感的武夷山成矿带蚀变矿物信息识别研究[J]. 华东地质, 2023, 44(01): 67 - 81.
- [13] 周鑫, 张蓝月, 李云. 无人机遥感技术在饮用水源地环境监管中的应用研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(02): 181 - 183.
- [14] 袁晶, 陈艳, 唐春花, 等. 遥感地热 GIS 预测方法研究——以江西宁都地区为例[J]. 华东地质, 2023, 44(04): 424 - 438.
- [15] 徐敏. GIS 测绘技术在土地测量工程中的应用[J]. 西部资源, 2020, 16(04): 155 - 157.

#### 作者简介:

第一作者/通讯作者: 赵钧儒, 1990 年生, 男, 济南人, 山东省煤田地质局物探测量队, 中级工程师, 主要研究方向为工程测量/地质工程。Email: atusheng22@163.com

## Application of Multi – Source Remote Sensing Data Fusion Technology in Marine Topography Mapping

ZHAO Junru<sup>1\*</sup>, SUN Yajuan<sup>1</sup>, ZHENG Xinpeng<sup>2</sup>

(1. Geophysical prospecting and surveying team of Shandong Bureau of Coal Geological, Jinan 250000, China;

2. Shouguang Natural Resources and Planning Bureau, Shouguang 262700, China)

**Abstract:** To solve the problem of single remote sensing data source in Marine topographic mapping, such as incomplete information and limited accuracy of traditional , the application of multi – source remote sensing data fusion technology is studied. In this paper, the principle of multi – source remote sensing data fusion is described, the characteristics of different data sources are analyzed, key technologies are studied, fusion schemes are proposed, and experiments are carried out in specific areas of the South China Sea. As indicated from the results, multi – source data fusion can reduce the RMS error, scheme 3 has the best effect, and the wavelet transform method has high feature extraction precision. Therefore multi – source remote sensing data fusion technology can improve surveying accuracy, integrate data advantages, and provide support for marine research and development, which has important value and broad application prospects.

**Key words:** multi – source remote sensing data; data fusion; marine topographic mapping; optical remote sensing; radar remote sensing