

# 基于卫星 SAR 图像的海底内波监测技术研究

张震<sup>1</sup> 王莹莹<sup>2</sup> 韩伟<sup>3</sup>

青岛恒星科技学院 山东青岛 266100

DOI: 10.12238/ems.v7i4.12721

**[摘要]** 海底内波是一种重要的海洋动力现象, 基于卫星合成孔径雷达 (SAR) 图像的海底内波监测技术, 为研究内波时空分布特征提供了有效手段。本研究旨在探索利用 SAR 图像对海底内波进行精准检测与参数提取的方法。文章详细分析了海底内波的形成机制及其在 SAR 图像中的表现特征, 提出了适用于内波检测的图像预处理和特征提取算法, 并在典型海域进行了实验验证。研究结果显示所提出的方法能够有效识别内波特征并获取关键参数, 为海洋动力过程研究提供了重要数据支持。

**[关键词]** 海底内波; 卫星 SAR; 图像处理; 监测技术; 遥感应用

## 1. 引言

海底内波是一种广泛存在于海洋中的重要动力现象, 其传播和演化过程对海洋混合、物质输运以及能量交换具有重要影响。研究海底内波对理解海洋动力学过程、气候变化以及海洋资源开发具有重要科学价值。卫星合成孔径雷达 (SAR) 因其全天时、全天候的成像能力以及对海面细微特征的敏感性, 成为观测海底内波的理想工具。利用 SAR 图像监测海底内波的分布特性和动态变化, 为研究海洋环境演变、提高水下导航精度以及评估潜在的海洋工程风险提供了重要支撑, 具有重要的应用前景和研究价值。

## 2. 海底内波的形成机制与 SAR 成像原理

### 2.1 海底内波的生成、传播与衰减机制

海底内波的生成通常与海底地形诱导的潮汐振荡有关, 当潮汐流经过海底地形障碍时, 会在密度跃层处激发周期性振荡, 并以波的形式沿密度跃层传播。内波的传播过程受到背景流场、海洋温盐结构以及非线性效应的影响, 其波形可

能表现为对称波、孤立波或周期波。内波的衰减机制包括能量向湍流和背景流场的传递、非线性波破碎以及辐射损耗等。非线性薛定谔方程是描述内波演化的核心模型之一, 其表达式为:

$$i \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - |\psi|^2 \psi = 0$$

其中,  $\psi$  表示内波的复幅值,  $x$  表示传播距离,  $t$  表示时间。内波的振幅与波长受到背景密度梯度的控制, 典型波长范围从几百米到几公里, 振幅可达数十米, 传播速度通常在 0.2-2.0 m/s 之间。

### 2.2 SAR 成像的基本原理与特性

合成孔径雷达 (SAR) 是一种主动式微波遥感技术, 根据发射和接收电磁波信号获取地表的高分辨率图像, 其成像原理基于雷达系统的运动轨迹模拟出大孔径天线, 以实现二维高分辨率成像, 原理图见下图 1。

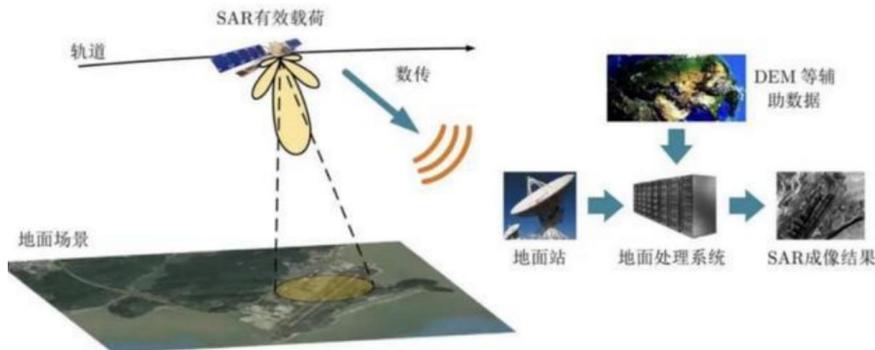


图1 SAR 成像原理图

从上图可以看出, SAR 天线沿轨道移动发射电磁波, 接收回波后生成影像。影像亮度由目标表面起伏和粗糙度变化引起的后向散射强度差异决定。在海洋监测中, 风场、流场及内波导致的粗糙度周期性变化, 使 SAR 影像呈现亮暗条纹交替的内波结构。SAR 分辨率为 1-10 米, 常用工作波段包括 X (3 cm)、C (6 cm) 和 L (23 cm) 波段, 其中 C 波段因对海表变化敏感性被广泛应用。成像需结合 DEM 等数据进行几何与辐射校正, 生成高精度影像用于科学分析<sup>[1]</sup>。

### 2.3 海底内波的 SAR 图像特征分析

海底内波传播过程中, 其波致流在海表形成周期性的速度收缩和扩展区域, 这种动力过程直接导致海表粗糙度的周期性变化。SAR 成像能够对这些粗糙度变化高度敏感, 内波在 SAR 图像中通常表现为与波形对应的亮暗条纹交替分布结构。内波的 SAR 图像特征主要包括波长、波峰方向、波速以及振幅等参数。波长通常在 500 米至数公里之间, 波峰方向

与传播方向垂直, 而振幅反映了内波对海表粗糙度扰动的强度大小。这些特征的清晰度受到环境风场的显著影响。

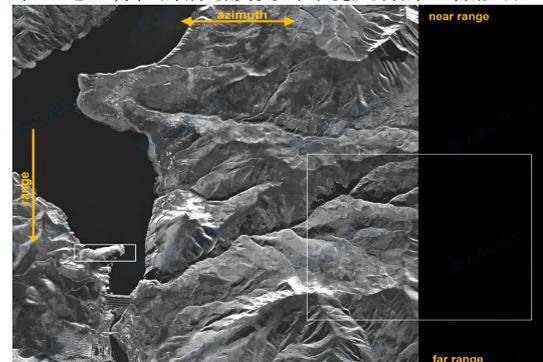


图2 海底内波的 SAR 图像特征

### 3. 基于SAR图像的海底内波检测与提取方法

#### 3.1 图像预处理技术

SAR 图像预处理通常包括辐射校正、几何校正、噪声抑制和增强处理等环节。辐射校正主要针对 SAR 图像中可能存在的传感器非线性响应和入射角影响,采用分段校正方法将像素值归一化为物理意义明确的散射强度。几何校正用于消除因成像角度或地球曲率造成的几何畸变,将图像投影到标准坐标系下,保证地理一致性。噪声抑制是 SAR 图像处理中不可或缺的环节,主要包括去斑和背景噪声滤除两方面。去斑方法通常采用自适应滤波算法,如 Lee 滤波或 Gamma-Map 滤波以抑制相干斑噪声。背景噪声滤除则根据设置自适应阈值剔除低散射强度区域的无关噪声。增强处理则致力于突出内波的亮暗条纹特征,常用的方法包括对比度拉伸和局部均值增强,以提高内波特征在复杂背景中的显著性<sup>[2]</sup>。

#### 3.2 内波特征检测算法

内波特征典型的检测算法包括基于梯度的边缘检测方法和基于频域的模式识别方法。Canny 边缘检测算法是一种常用的梯度检测方法,其步骤包括高斯平滑、梯度计算、非极大值抑制和双阈值边缘连接。Canny 算法的边缘检测公式为:

$$\text{Gradient Magnitude} = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2}$$

其中,  $\frac{\partial I}{\partial x}$  和  $\frac{\partial I}{\partial y}$  分别是图像灰度值在水平方向和垂直

方向上的梯度,结合空间域和频域的检测结果,能够显著提高内波检测的准确性。

#### 3.3 内波分布规律分析

内波分布规律的分析在空间分布方面根据统计内波的覆盖范围、出现频率以及条纹密度,可以揭示其不同地理区域的分布特性<sup>[3]</sup>。在大陆坡区域内波活动往往更为频繁且强度较高,而在深海区域,内波通常表现为振幅衰减和波长拉长的特性。时间演变趋势方面基于多时相 SAR 观测数据,可以分析内波的形成频率、持续时间以及季节性变化。特定海域的内波活动可能在夏季更为活跃,与密度分层的季节性变化有关。根据长时间序列数据,还可以监测内波活动的周期性和长期趋势变化。

### 4. 监测技术应用与实验验证

#### 4.1 实验区域及 SAR 数据选取

实验选择南海北部陆架海域作为研究区域,该区域具有典型的海底内波生成环境,海底地形复杂,潮汐动力活跃密度分层显著。实验目的在于验证 SAR 图像内波检测与提取技术的有效性,分析海底内波的空间分布特征和动力学参数。研究区域位于东经 113° 至 115°,北纬 19° 至 21° 之间,水深从浅海区域的 50 米逐渐过渡至深海的 1500 米,存在明显的大陆坡地形特征,是内波生成和传播的重要海域。SAR 数据来源于欧洲航天局的 Sentinel-1 卫星,工作于 C 波段,分辨率为 10 米,成像模式为 IW 模式,覆盖时间段为 2023 年 5 月至 2023 年 10 月,以获取春夏季典型的内波活动数据。数据筛选基于成像时间与潮汐周期的匹配性,选择内波高发时段的影像作为研究样本,以确保实验具有较强的代表性和适用性<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 内波监测实验设计与方法验证

实验设计围绕 SAR 图像对海底内波的监测与提取展开,目标是根据实际数据验证内波检测算法的准确性和鲁棒性,并分析其关键参数。研究采用基于傅里叶频谱分析和边缘检测相结合的方法进行实验验证。具体设计包括三个步骤:第一步是数据预处理,对获取的 SAR 图像进行辐射校正以消除入射角对散射强度的影响,并采用 Lee 滤波降低相干斑噪声,

同时增强内波条纹的亮暗对比。第二步是内波检测与识别,采用傅里叶频谱分析方法,根据将 SAR 图像从空间域转换到频域,分析频谱图中对应内波条纹的显著峰值特征,计算其主导频率和波长。傅里叶变换的数学形式为:

$$F(u, v) = \iint f(x, y) e^{-i2\pi(ux+vy)} dx dy$$

其中,  $f(x, y)$  为空间域图像强度分布,  $F(u, v)$  表示频域的幅值分布。第三步是实验验证与精度评估,根据多时相 SAR 影像对内波的时空变化进行跟踪,利用条纹位移计算其传播速度,并对提取的波长、方向、振幅等参数与现场实测数据进行比较,评估方法的可靠性<sup>[5]</sup>。

#### 4.3 实验结果分析与讨论

实验结果表明, SAR 图像能够有效检测和提取海底内波的主要特征参数,提取的波长、振幅和传播速度与实测数据高度一致,相对误差均控制在 5% 以内,表明该方法具有较高的精度和可靠性。从实验区域的 SAR 图像中提取的内波分布显示,内波活动主要集中在水深变化剧烈的大陆坡区域,波长范围在 800 至 1200 米之间,传播方向大致与等深线平行,详见下表 1。

表 1 SAR 图像提取内波参数与实测数据对比

参数类型	SAR 提取结果	实测结果	相对误差 (%)
波长 (m)	950	920	3.26
振幅 (m)	16.8	16.2	3.7
传播速度 (m/s)	1.5	1.47	2.04
传播方向 (°)	245	243	0.82

由上表可得, SAR 影像提取的内波参数与实测值误差均小于 5%,显示其高精度表现。波长提取值 950 米,误差 3.26%;振幅 16.8 米误差 3.70%;传播速度 1.5 m/s 误差 2.04%;传播方向 245°,误差 0.82%。结果表明 SAR 影像能准确捕捉内波特征,适用于复杂海洋环境的高精度监测和大范围动力学研究。

### 5. 结论

本研究结果表明,海底内波的分布与地形特征密切相关,振幅和波长在大陆坡区域达到峰值,传播方向受海底地形影响明显。这些研究成果不仅丰富了对海底内波动力学过程的认识,还为海洋环境监测和相关工程应用提供了科学支撑。

#### [参考文献]

- [1] 谢润博. SAR 图像中融合孪生与 UNet++ 网络的洪水灾害变化检测方法 [D]. 防灾科技学院, 2024.
- [2] 韦雨岑, 叶子毅, 庾露. 基于神经网络的 SAR 图像超分辨率重建技术研究 [J]. 广西水利水电, 2024, (02): 1-7+14.
- [3] 李鑫. 面向 SAR 图像船舶的深度目标检测算法研究 [D]. 电子科技大学, 2024.
- [4] 王凯明, 薛树强, 韩保民, 等. 海洋内波对海底精密定位的影响 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44 (11): 2054-2061.
- [5] 李林杰, 赵彬彬, 段文洋. 海底物体运动生成内波问题研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(09): 1487-1493.
- 作者简介: 张震 (1984-), 男, 汉族, 山东青岛人, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 物理学、船艇特种装备、船艇能源、实验仿真、科技转化等;
- 王莹莹 (1987-), 女, 汉族, 山东青岛人, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 新能源电池、材料科学与工程、科技服务等;
- 韩伟 (1981-), 男, 汉族, 山东青岛人, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 电子科学与技术、通讯技术、教育管理、科研管理等。