

基于SVM的海洋内波图像预选方法

陈捷, 于振涛, 李婷婷, 余路

海军潜艇学院, 山东 青岛

收稿日期: 2023年12月15日; 录用日期: 2024年1月11日; 发布日期: 2024年1月19日

摘要

针对海量海洋卫星SAR数据处理和海洋内波应用急需, 研究SAR海洋图像内波预选方法。根据SAR图像内波明暗条纹的周期性、延展性、独立性等特点, 提取内波特征向量, 通过支持向量机对这些特征向量进行训练, 根据训练集开展SAR海洋图像自动内波预选。通过对典型含内波SAR图像的测试可知, 本文提出的SVM与内波多特征结合的方法可有效预选含内波的海军SAR图像区域, 预选结果与人工目视结果高度一致, 可极大减轻人工处理工作量, 为后续内波深入处理和应用奠定基础。

关键词

支持向量机(SVM), 海洋内波, 功率谱特征, 条纹延展性特征

SVM Based Pre Selection Method for Internal Wave Images

Jie Chen, Zhentao Yu, Tingting Li, Lu Yu

Navy Submarine Academy, Qingdao Shandong

Received: Dec. 15th, 2023; accepted: Jan. 11th, 2024; published: Jan. 19th, 2024

Abstract

The SVM based method for ocean internal wave image pre selection is urgently needed for massive ocean satellite SAR data processing and ocean internal wave applications. Therefore, research on SAR ocean image internal wave pre selection methods is needed. Based on the periodicity, extensibility, independence, and other characteristics of the internal wave light and dark stripes in SAR images, internal wave feature vectors are extracted. These feature vectors are trained using support vector machines, and automatic internal wave pre selection of SAR ocean images is carried out based on the training set. Through testing typical SAR images containing internal waves, it can be concluded that the method proposed in this paper, which combines SVM with multiple features of internal waves, can effectively pre select areas of marine SAR images containing internal waves. The pre selection results are highly consistent with manual visual results, which can greatly reduce the workload of manual processing and lay the foundation for subsequent in-depth processing and application of internal waves.

Keywords

Support Vector Machine (SVM), Ocean Internal Waves, Power Spectral Features, Stripe Elongation Features

Copyright © 2024 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

近几年,我国合成孔径雷达卫星技术高速发展,合成孔径雷达也逐渐从军用领域转到商用领域,从陆地扩展到海洋。2020年12月发射升空的“海丝一号”卫星是我国首颗面向海洋和海岸带观测的SAR遥感卫星[1],SAR卫星也正在向小型化、星座化发展[2],随着大量商用SAR卫星和星座的发射升空,基于SAR图像的海洋内波研究必将进入新纪元,海量SAR卫星数据的涌入将对数据处理和应用带来挑战和机遇[3]。

以往的海洋内波SAR处理大多是人工选取含海洋内波的图像后进行进一步的处理,例如提取波长、波向、振幅、波速等参数[4][5][6]。由于海洋图像的多变性和复杂性,从海量SAR图像中预选含有内波的图像仍具有较大的挑战性。关于SAR图像的内波研究大多集中在某些特定图像和某些特定海区[7][8],基于SAR图像的海洋内波批量检测、处理和统计产品制作在海洋遥感领域一直发展较为滞后。

本文结合内波明暗条纹的周期性、延展性、波群独立性等特点,提取几类特征,作为支持向量机的判决向量。通过对大量图像进行训练,最终实现海洋内波图像区域预选。

2. 内波图像预选流程

SAR图像海洋内波图像的预选流程如图1所示。

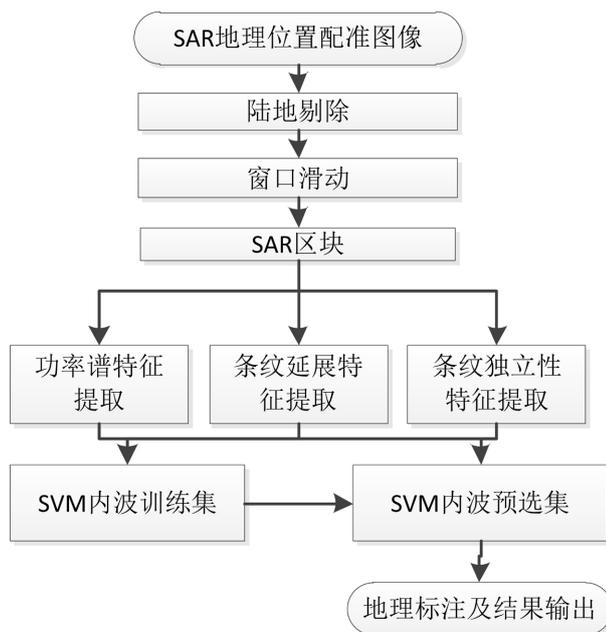


Figure 1. Internal wave image pre selection process

图 1. 内波图像预选流程

内波图像预选的主要过程和机理是：

1) SAR 图像中存在大量的陆地、海陆交界或存在岛屿的图像，这些图像会对后续处理造成干扰，因此图像经地理位置配准后，可根据陆地岛屿分布信息，将图像中的陆地和岛屿部分剔除，纯陆地图像不予处理，海陆皆有的图像将陆地或岛屿部分置零，以避免对后续内波预选检测的影响。

2) 根据图像分辨率和内孤立波典型空间分布范围，设置滑动窗口大小。为了避免在滑动的过程中有漏检的区域，可采取部分重叠的方式进行滑动，后续对每个滑动窗口图像区块进行分块处理。内波的空间分布范围在几百平方公里到几千平方公里，为了能够较好的定位内波区域，可采用中等大小的窗格，例如 25 平方公里左右的滑动窗口。

3) 对 SAR 区块图像进行傅里叶变换，求取归一化功率谱。并根据内波波波长范围，将波长范围内的功率谱值累加，作为功率谱特征值。

4) 对 SAR 图像区块进行灰阶归一化，再分别进行低灰度二值化和高灰度二值化处理，提取图像块中的暗区域和亮区域特征，再提取根据独立区域的外接椭圆离心率并将其排序，分别在暗区二值图和亮区二值图中选取排序居前的 3 个条纹离心率作为延展性特征值。

5) 在步骤 4 基础上，进一步提取暗区二值图和亮区二值图中独立区域的个数以及离心率居前的三个条纹的斜率差作为独立性特征值。

6) 人工选取典型内波区域和海洋背景区域各约 100 块，按照步骤 3~步骤 5 所述提取特征，作为训练样本集，输入 SVM 中进行训练，得到训练样本的特征向量矩阵。

7) 对待检测图像，按照步骤 1 至步骤 5 处理和提取特征后，输入到 SVM 中进行检测，对待检测各图像区域是否为内波区进行判决。

8) 对包含内波的区块进行地理标注，作为内波预选产品为后续地面精细处理提供基础数据。

3. 内波多特征提取与 SVM 训练

3.1. 功率谱特征

一维信号的功率谱可由求一维信号的傅立叶变换并对其求模平方得到，将傅立叶变换扩展到二维情况。数字图像是二维离散信号，为在图像处理中应用傅立叶变换，必须引入离散傅立叶变换的概念[9]。为此，我们关注二维情形，二维的离散函数的傅立叶变换为

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp[-j2\pi(ux/M + vy/N)] \quad (1)$$

式中 u 、 v 为频率分量， x 、 y 为空间图像变量，且 $u = 0, 1, 2, \dots, M-1$ ， $v = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 、 M 、 N 分别是图像的高和宽。

功率谱是图像的重要特征，它的大小反映了图像 $f(x, y)$ 各个空间频率分量的强度大小。对于幅图像，其二维功率谱的建立步骤为：

1) 对图像进行二维快速傅立叶变换，得到频谱为 $F(u, v)$ 。

2) 对频谱进行平移，将频域的原点移到图像的中心，得到频谱 $F\left(u \times \frac{M}{2}, v \times \frac{N}{2}\right)$ 。

3) 根据图像频谱计算图像功率谱 $\left|F\left(u \times \frac{M}{2}, v \times \frac{N}{2}\right)\right|^2$ 。

图像二维功率谱具有如下特征[10]：

1) 图像二维功率谱的中心对应图像的低频，反映了图像灰度均值的大小，自然图像的主要能量都集

中在低频区域;

2) 图像二维功率谱图像关于图像中心对称;

3) 图像空间域中的纹理方向在二维功率谱中对应为图像灰度变化的方向, 恰好与纹理方向垂直。

将二维图像功率谱按照波数积分, 可得到一维波数 - 功率谱, 按照内波波长的典型分布, 再分成几个波长区间对功率谱进行积分, 本文中, 按照波长 400~800 米、800~1500 米、1500~2500 米、2500~4000 米共四个谱段, 提取功率谱特征。

3.2. 明暗条纹延展特征

海洋立波在 SAR 图像中往往表现为明暗相间的条纹, 根据成像入射角的不同和内波性质的不同, 某些内波表现为明条纹位置, 某些内波表现为暗条纹为主。不管是哪种内波, 均会在某个方向上具备一定的延展特征, 若用一个外接椭圆去标注内波的某条条纹, 则该外接椭圆均有较大的离心率。因此, 可先对图像提取明条纹或暗条纹, 对其中的每个独立条纹计算其外接椭圆离心率, 用离心率数值表示内波条纹的延展特征。由于图像中除内波条纹外还有其他条纹, 因此可以根据椭圆离心率对图像条纹进行排序, 取排名居前的 3 条条纹线离心率作为特征。

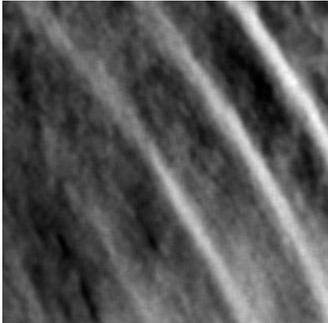
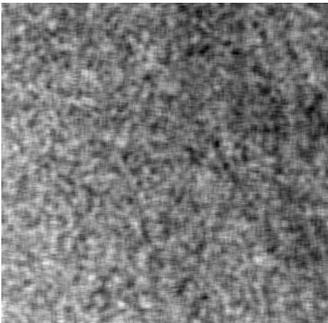
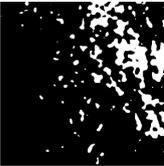
3.3. 波群独立性特征

海洋内孤立波一般会表现为几条近乎平行的条纹, 为了避免其他现象如舰船尾迹、浅海地形、海洋锋面对内波预选的干扰, 可将明暗区域独立区数量、取排名居前的 3 条条纹线的倾斜角度差异等作为内波条纹的平行性特征参数, 取条纹倾斜角度差最小值和最大值作为特征。

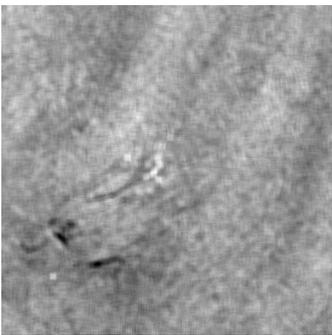
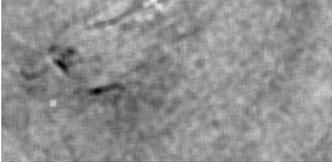
如表 1 所示为选取三类典型训练样本, 分别为典型内波、典型无现象海面、典型其他海洋干扰图像, 分别按照 3.1 节至 3.3 节所述提取功率谱特征, 延展特征, 独立性特征中的独立区数量、条纹线倾斜角度等特征。

Table 1. Typical training sample feature

表 1. 典型训练样本特征量

图像	暗区及亮区	功率谱特征	延展特征	独立区数	平行性特征
		0.1885 0.0532 0.0131 0.0036	0.9774 0.9767 0.9751	16	1.6 5.7
			0.9981 0.9979 0.9939	3	0.6 3.1
		0.1544 0.1731 0.1395 0.0166	0.9535 0.9481 0.9441	88	9.1 87.2
			0.9535 0.9481 0.9441	93	10.1 43.2

续表

		0.1627 0.1037 0.0729 0.0073	0.9402	6	48.7
			0.8984		132.1
		0.1627 0.1037 0.0729 0.0073	0.9255	59	9.4
			0.9162		150.2
			0.9105		

3.4. 支持向量机训练

支持向量机(SVM)是一种经典的机器学习方法,能够很好地解决多维特征二分类问题。本文中,共提取4项功率谱波段特征,6项明暗条纹延展性特征,6项波群独立性特征,共计16项特征,利用RBF核函数进行训练,得到训练样本的特征向量矩阵,保存到模式库中。

4. 数据测试

利用支持向量机训练得到的特征向量矩阵,对某新型SAR卫星数据进行内波图像预选,数据空间分辨率为50米,选取了两景典型内波图像,采用SVM测试的结果如图2、图3所示,其中图像区块大小为 512×512 像素,对应实际海域大小为 25.6×25.6 km,标注为“T”的区域为检测得到的内波区域。

由图2、图3结果可知,通过本文提出的内波区特征及SVM训练方法,可准确定位含有内波的区域,定位结果与人工目视判定高度吻合。

另外,利用本文方法对以往收集的ERS-2、Envisat卫星SAR数据进行内波自动检测,共收集了232景海洋图像,其中含内波83景,不含内波的海洋图像149景,利用本文方法检测到内波78景,按景计数检测率为94%,149景不含内波的图像中,检测到虚警28景,虚警率为19%,检测为虚警的图像,有

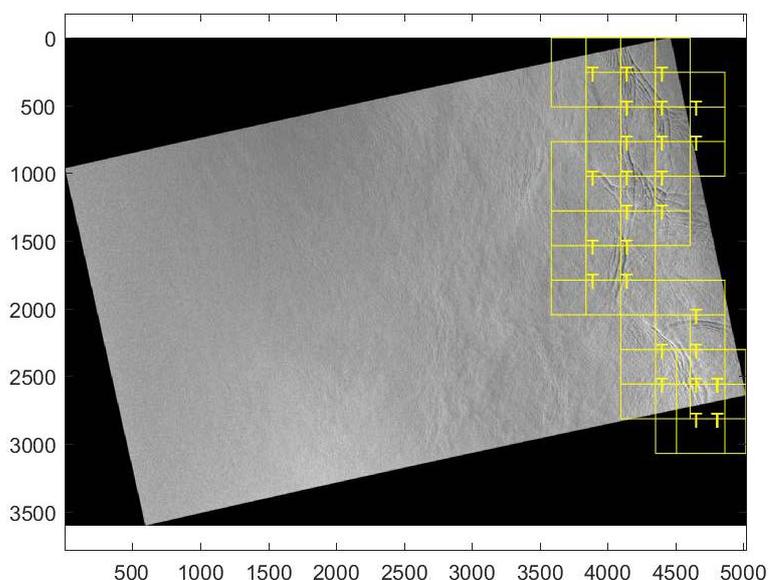


Figure 2. Pre selection and annotation of internal wave images (first scene)

图2. 内波图像预选及标注(第一景)

23 景中只检到了一个图像块, 这种虚警可进一步通过限制检到的图像块数限制来剔除。重新设置一景图像中检测块阈值为 ≥ 2 , 重新统计, 检测到内波 77 景, 虚警 5 景, 检测率 93%, 虚警率 3%。

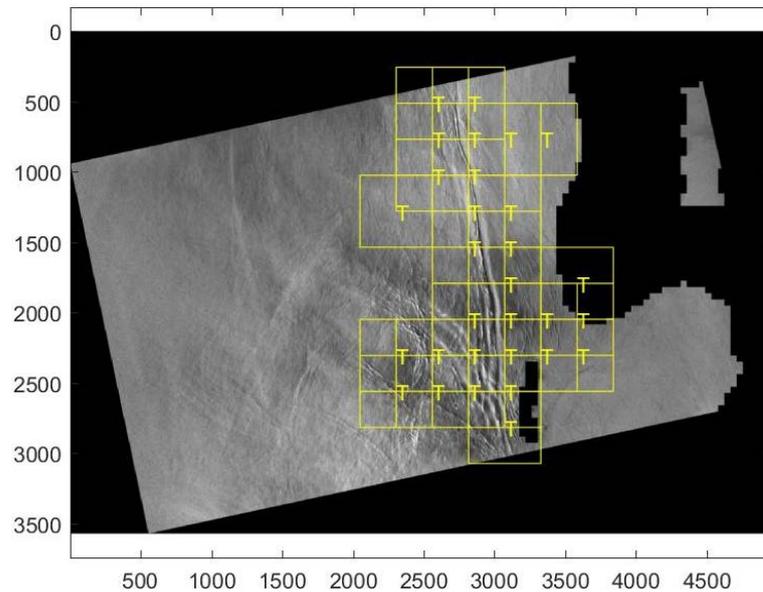


Figure 3. Pre selection and annotation of internal wave images (second scene)
图 3. 内波图像预选及标注(第二景)

5. 总结

海洋内波区域预选属于图像的二分类问题, 采用基于 SVM 的特征向量训练和检测方法能够快速识别区块图像是否含有内波。SVM 训练和检测的有效性关键在于进入训练的特征向量能否抓住海洋内波的关键信息。本文提出的功率谱特征、延展特征、独立区数、平行性特征从频率域、空间域多个方面将内波在图像中表现的关键信息提出出来, 测试结果表明, 本文提出的内波图像预选方法能够高效准确地识别内波区域, 可极大程度节约人力判图的时间成本, 为后续海量卫星图像快速处理和应用奠定了良好的基础。

参考文献

- [1] 谢婷, 王怡人, 吕素娜, 耿旭朴. 海丝一号卫星及其应用展望[J]. 卫星应用, 2021(10): 40-44.
- [2] 张永贺, 张旭, 王韶波, 等. 微小型 SAR 卫星发展现状及分析[J]. 航天器工程, 2022, 31(5): 119-125.
- [3] 李凉海, 刘善伟, 周鹏, 万勇. SAR 卫星组网观测技术与海洋应用研究进展[J]. 海洋科学, 2021, 45(5): 145-156.
- [4] 滕建斌. 海洋观测数据采集发送预警系统设计及开发[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2020. <https://doi.org/10.27275/d.cnki.gsdku.2020.000813>
- [5] 韩鹏, 钱洪宝, 李宇航, 揭晓蒙. 内波的生成、传播、遥感观测及其与海洋结构物相互作用研究进展[J]. 海洋工程, 2020, 38(4): 148-158. <https://doi.org/10.16483/j.issn.1005-9865.2020.04.017>
- [6] 温静涵, 何宜军, 陈忠彪. 基于 X 波段海洋雷达的南海西北部内波参数特征研究[J]. 海洋科学, 2022, 46(9): 55-63.
- [7] 孟俊敏, 孟祥花, 萨和雅, 等. 海洋内波遥感探测中的数学问题[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2021, 50(4): 283-287.
- [8] 张洪生, 郑应刚, 王有强. 基于 VMD 对 SAR 海洋内波参数的自动反演[J]. 海洋工程, 2021, 39(3): 1-10. <https://doi.org/10.16483/j.issn.1005-9865.2021.03.001>
- [9] 肖宇, 张杰, 马永山. 基于功率谱 AR 模型的 3D 激光虚拟图像重建研究[J]. 激光杂志, 2021, 42(3): 140-144. <https://doi.org/10.14016/j.cnki.jgzz.2021.03.140>
- [10] 万众, 熊智, 邢丽, 李一博. 一种基于功率谱估计的图像相位匹配方法[J]. 航空计算技术, 2017, 47(3): 18-23.