

# 基于加权混合SPF主动轮廓的SAR图像水陆分割

沈嘉程<sup>1</sup>, 韩斌<sup>1</sup>, 鲍秉坤<sup>2\*</sup>

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏南京 210003; 2. 南京邮电大学计算机学院, 江苏南京 210023)

**摘要:** 针对现有主动轮廓模型(Active Contour Model, ACM)无法进行准确高效的SAR(Synthetic Aperture Radar)图像水陆分割的难题, 提出一种基于加权混合符号压力(Signed Pressure Force, SPF)主动轮廓的新模型. 该模型将中值拟合中心和均值拟合中心结合起来, 建立新的混合符号压力函数, 以抑制干扰边缘的影响. 通过设计基于绝对中位差的自适应权重, 实现自动调节内外拟合中心的比例系数, 以更合理地描述灰度差异. 此外, 计算平滑后图像梯度信息构建边缘引导函数并引入到SPF函数中, 以进一步提高分割性能和演化效率. 在实际SAR图像上进行分割实验, 结果表明: 与相关实验模型相比, 提出模型在保持高效的同时能获得更加准确的分割结果, 其中Dice相似系数(Dice Similarity Coefficient, DSC)至少提高6%.

**关键词:** 水陆分割; SAR图像; 主动轮廓模型; 混合符号压力函数; 绝对中位差

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.62325206, No.61936005, No.62201281); 江苏省自然科学基金(No.BK20220392); 南京邮电大学引进人才自然科学研究启动基金(No.NY222004)

**中图分类号:** TP391; P237

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2024)06-2000-11

**电子学报URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20230119

## Water-Land Segmentation in SAR Image Using Weighted Hybrid SPF Based Active Contour

SHEN Jia-cheng<sup>1</sup>, HAN Bin<sup>1</sup>, BAO Bing-kun<sup>2\*</sup>

(1. School of Communications and Information Engineering,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China;

2. School of Computer Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

**Abstract:** To solve the problem that the existing active contour models (ACM) cannot accurately segment the synthetic aperture radar (SAR) water-land images, a new ACM based on the weighted hybrid signed pressure force is proposed. The median fitting center and mean fitting center are combined to establish a new hybrid signed pressure function, which can suppress the influence of interference edges. The adaptive weights based on the absolute median difference are designed to automatically adjust the coefficients of the inner and outer fitting centers, which can describe grayscale differences more reasonably. Moreover, the gradient information of the smoothed image is calculated to construct an edge guidance function and introduced into the SPF function to further improve segmentation performance and evolution efficiency. Segmentation experiments are conducted on real SAR images and the results show that compared with the related ACMs, the proposed model can perform accurate segmentation with high efficiency and stability, and the Dice similarity coefficient (DSC) is improved by at least 6%.

**Key words:** water-land segmentation; SAR image; active contour model; hybrid SPF function; absolute median difference

**Foundation Item(s):** National Natural Science Foundation of China (No.62325206, No.61936005, No.62201281); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No.BK20220392); Natural Science Research Start-up Foundation of Recruiting Talents of Nanjing University of Posts and Telecommunications (No.NY222004)

## 1 引言

遥感图像技术是利用人造卫星或其他飞行装置来收集地球表面目标的图像信息的一种技术,传统实地测绘技术成本高、效率低、数据不易统计,而遥感图像技术具有大面积成像和实时处理等特点,数据获取能力优秀,可以克服实地测绘的不足。因此,遥感图像技术在地理资源勘查、地面测绘、气象观测和目标侦查等领域应用广泛<sup>[1,2]</sup>。合成孔径雷达具有全天时、全天候的特点<sup>[3]</sup>,其拍摄的 SAR 图像在遥感图像技术中有十分重要的地位。SAR 图像水陆分割利用计算机对 SAR 图像进行处理,从而分割水陆两区域。SAR 水陆图像背景复杂、包含特征丰富,此外,因其相干成像的原理,SAR 卫星成像过程会受到多种因素的干扰<sup>[4]</sup>。以上这些特点使得 SAR 图像水陆分割任务成为一个具有挑战性的问题。

SAR 图像水陆分割方法主要有基于边缘和基于区域的方法。基于边缘的方法的核心思路是通过图像梯度找到海岸线图像中显著的边缘。边界跟踪算法<sup>[5,6]</sup>通过分析图像中不同区域像素的正态分布来设置阈值从而区分图像区域类型。然后使用边界跟踪算法绘制出不同区域边界轮廓。后续工作将边缘连接应用到检测算法中<sup>[7]</sup>。文献<sup>[8]</sup>使用小波变换的思想,根据水陆边界的特有频率实现分割。基于边缘的算法简单、易操作,但是其分割结果依赖于平滑、滤波和阈值选择,因此有一定局限性,一般应用于精度要求较低的情况。

基于区域的方法从图像总体出发,从区域的角度对图像的像素进行分类,从而找到区域的分界线。基于区域合并的提取方法<sup>[9,10]</sup>通过区域的统计特征合并区域。文献<sup>[11]</sup>在区域合并的基础上,使用了 K 聚类方法自适应地合并区域。但是,区域合并的方法会导致与背景区域相似的目标区域被算法忽略,造成孤立区域。马尔可夫分割方法<sup>[12,13]</sup>利用马尔可夫随机场的概念和模拟退火算法分割 SAR 水陆图像。该方法使用模拟退火算法求解被图像能量泛函的最小值。然而,该方法对像素分类有一定误差且计算量较大。基于区域的方法通用性低,计算量大,难以应对复杂的图像。

主动轮廓模型是当下图像分割性能较好的方法之一,相较于前面提到的边缘跟踪<sup>[5-8]</sup>、区域合并<sup>[9-11]</sup>、马尔可夫<sup>[12,13]</sup>等方法,主动轮廓模型方法有平滑性好、运算高效、易于建模等特点,因此,其在 SAR 图像水陆分割领域中应用广泛<sup>[14]</sup>。主动轮廓模型根据模型的演化方式可分为基于边缘和基于区域的主动轮廓模型。基于边缘的主动轮廓模型根据图像的边缘信息作为曲线演化的驱动力,使曲线逼近目标轮廓。基于区域的主动轮廓模型通过计算轮廓内外部的图像像素灰度的差异性来驱动曲线演化,能量泛函最小即实现区域像素类

内方差最小,从而达到分割目的。测地线主动轮廓(Geodesic Active Contours, GAC)模型<sup>[15]</sup>是最经典的基于边缘的主动轮廓模型之一,该模型通过边缘检测函数来引导曲线的演化,最终使曲线停止于高梯度的目标边缘。IMGAC(Improved Geodesic Active Contours)模型<sup>[16]</sup>根据自适应阈值得到分割的粗略估计,然后将窄带模型和 GAC 模型结合实现水陆分割。文献<sup>[17]</sup>利用四叉树方法得到优化的初始轮廓线。文献<sup>[18,19]</sup>使用区域生长方法得出初始轮廓,然后设计了边缘修正模型对 Canny 算子检测到的边缘进行修正。文献<sup>[20]</sup>则使用了指数的加权平均数比率边缘算子和滑动窗口算法,并将两者与 ACM 方法结合。基于边缘的主动轮廓方法对初始轮廓敏感、弱边缘检测效果差,从而导致分割性能和效率不稳定。另外,对边缘的预处理虽然能有效去除干扰边缘影响,但也会导致一定程度的细节缺失。

为克服上述的缺陷,基于区域的主动轮廓模型分割方法被提出,该种类方法设定基于图像灰度特征的能量泛函,然后通过迭代求解能量泛函的最小值实现曲线演化<sup>[21,22]</sup>,从而完成 SAR 图像水陆分割。文献<sup>[23]</sup>使用了 L1 范数和中位数拟合中心构建了改进的能量泛函,有效抑制了干扰区域和相干斑噪声。文献<sup>[24]</sup>提出了一种基于交叉熵(Cross Entropy, CE)的主动轮廓模型,虽然对于特定任务,CE 模型的精确性较高,但是 CE 模型适应性不强,分割性能不稳定。选择性二元高斯滤波正则化水平集(Selective Binary and Gaussian Filtering Regularized Level Set, SBGFRLS)<sup>[25]</sup>将区域灰度特征建模思想和 GAC 模型结合,该方法提出了符号压力(Signed Pressure Force, SPF)函数。该模型对弱边缘图像的分割效果优秀,能较好地保持边缘的细节,然而其对复杂图像分割效果差,对干扰仍然敏感。根据上述问题,文献<sup>[26]</sup>构建了中值拟合中心来减少干扰边缘的影响。文献<sup>[27]</sup>引入了归一化的全局最小绝对差值作为轮廓内外区域的拟合中心的加权系数,充分利用了内外区域的差异信息。WHRSF(Weighted Hybrid Region-based Signed Pressure Force)模型<sup>[28]</sup>使用了全局和局部相结合方法,同时将中值拟合中心引入到 SPF 函数中,这些改进方法提高了对灰度复杂图像的分割性能。文献<sup>[29]</sup>将 SPF 模型应用到水陆分割任务中,同时对初始轮廓设置进行改进。然而,目前基于区域的分割方法易被图像中的干扰边缘影响,造成误分割,因此对 SAR 水陆图像的分割效果不理想,此外,复杂建模也会导致计算复杂度提高,从而影响计算效率。

针对上述 SAR 图像水陆分割方法中误分割较多导致的分割准确性不高以及计算效率不理想等问题,提出了一种加权混合符号压力主动轮廓模型:

(1)将均值拟合中心和中值拟合中心结合,建立新的混合拟合中心,该拟合中心可以有效抑制水陆区域干扰,同时也保证稳定的分割性能;

(2)设计了基于绝对中位差的自适应权重,自动调节内外拟合中心的比例系数,以更合理地描述区域灰度特征和引导轮廓演化,提高模型演化效率的同时减少了误分割;

(3)构建了一种边缘引导函数,计算平滑后图像梯度信息并引入到本文提出模型中,抑制干扰并提供额外的演化梯度,进一步提高模型演化效率和分割准确性.

## 2 相关工作

### 2.1 SBFRLS 模型

选择性二元高斯滤波正则化水平集模型提出了符号压力(SPF)函数<sup>[25]</sup>,该函数把轮廓内外区域的灰度均值作为驱动中心,通过计算图像灰度值和驱动中心差值来驱使曲线朝目标边界演化,并且在每次迭代中使用高斯核函数对水平集函数进行平滑.SPF函数表达式如下所示:

$$\text{SPF}(f(x)) = \frac{f(x) - \frac{c_1 + c_2}{2}}{\max\left(\left|f(x) - \frac{c_1 + c_2}{2}\right|\right)} \quad (1)$$

其中, $f(x)$ 为输入图像, $c_1$ 和 $c_2$ 分别为轮廓内外区域的灰度平均值,两者可以通过以下公式计算:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{\int_{\Omega_1} H(\varphi) f(x) dx}{\int_{\Omega_1} H(\varphi) dx} \\ c_2 = \frac{\int_{\Omega_2} (1 - H(\varphi)) f(x) dx}{\int_{\Omega_2} (1 - H(\varphi)) dx} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $H(\varphi)$ 是正则化 Heaviside 函数, $\varphi$ 是水平集函数,它们区分了轮廓内外区域.SBFRLS模型将原来GAC模型的边缘停止函数替换为SPF函数,因此迭代方程可以表示为

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \text{SPF}(f(x)) \left( \text{div} \left( \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right) + \alpha \right) |\nabla \varphi| + \nabla \text{SPF}(f(x)) \cdot \nabla \varphi \quad (3)$$

在式(3)中, $\alpha$ 是一个控制演化速率的正常数.为减少计算量,在每次迭代中,模型都会使用高斯核函数会对水平集函数进行平滑,所以迭代方程可以表示为

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \text{SPF}(f(x)) \cdot \alpha |\nabla \varphi| \quad (4)$$

从上述介绍可以看出,该模型的分割效果主要取

决于图像的灰度值与演化曲线内外区域拟合中心的差值.然而,模型在建立SPF函数的时候假设图像内部和外部区域的强度是均匀的,在演化过程中该性质导致模型对灰度复杂的SAR图像的分割性能难以保证.

### 2.2 RBSPF 模型

文献[30]借鉴SPF的思想构建了能量泛函,从另一种角度利用SPF函数本身衡量图像灰度和均值拟合中心的差异来驱动曲线向物体边界演化.其能量泛函的水平集表达式为

$$E_g(\varphi) = - \int_{\Omega} \frac{f(x) - \frac{c_1 + c_2}{2}}{c_1 - c_2} H(\varphi) dx \quad (5)$$

根据变分理论和梯度下降法求解上式,得到迭代方程:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{f(x) - \frac{c_1 + c_2}{2}}{c_1 - c_2} \delta(\varphi) \quad (6)$$

其中, $\delta(\varphi)$ 为 $H(\varphi)$ 求导后的结果.但是,正因为采用了类似于SBFRLS模型的思路,RBSPF模型没有很好地改善SPF模型的缺点,分割性能仍然不够理想.

## 3 提出模型

### 3.1 基于混合拟合中心的SPF函数

SAR图像本身的特点决定了其背景的复杂性,特别是对于自然地形和人工建筑等所形成的干扰边缘,经典SPF函数使用均值作为拟合中心易受干扰边缘影响,导致主动轮廓模型产生误分割.因此,引入了中值拟合中心,但是单纯地使用中值拟合中心会导致分割特定背景图像时出错,导致分割性能不稳定.因此,采用了中值拟合中心和均值拟合中心加权的方案,来提高图像分割时的稳定性.改进的混合SPF(Hybrid SPF, HSPF)函数表达式为

$$\text{SPF}_H(f(x)) = \frac{1}{C} \left[ \lambda_1 \left( f(x) - \frac{c_1 + c_2}{2} \right) + \lambda_2 \left( f(x) - \frac{m_1 + m_2}{2} \right) \right] \quad (7)$$

$$C = \max \left[ \lambda_1 \left( f(x) - \frac{c_1 + c_2}{2} \right) + \lambda_2 \left( f(x) - \frac{m_1 + m_2}{2} \right) \right] \quad (8)$$

其中, $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 为正常数,要求两者和为1,且 $\lambda_2$ 恒大于 $\lambda_1$ . $c_1$ 和 $c_2$ 分别为轮廓内外区域的灰度平均值. $m_1$ 和 $m_2$ 分别为轮廓内外区域的灰度中值,两者可以通过以下公式计算:

$$\begin{cases} m_1 = \text{median}(f(x) \in \{x \in \Omega | \varphi(x) \geq 0\}) \\ m_2 = \text{median}(f(x) \in \{x \in \Omega | \varphi(x) < 0\}) \end{cases} \quad (9)$$

使用中值作为拟合中心,对于主动轮廓模型分割有以下作用:(1)对于构成单一的区域:海洋和河流等区域在 SAR 图像中一般呈现较暗、灰度分布比较均匀,在水况复杂的区域,海面表面的后向散射系数会变得十分复杂,从而会出现明显的块状斑点和条纹等干扰区域,中值拟合中心可以抑制噪声对分割的影响;(2)对于构成复杂的区域:城市和山区等陆地区域往往有着更复杂的构成,中值拟合中心可以有效地减少其中突出边缘的影响,减少误分割.最后,均值拟合中心对于灰度均匀区域和弱边缘区域的分割效果较好,加入均值拟合中心可以保证模型在相应区域分割性能的稳定.

### 3.2 边缘引导加权混合 SPF 函数

此外,因为 SAR 图像中简单和复杂区域间的差异:简单区域灰度差异小,复杂区域灰度差异大,因此在经典 SPF 中的拟合中心项对于内外均值采用相同的常数权重不够合理.因此设计了自适应权重,通过衡量内外轮廓的差异性在演化中调整内外轮廓拟合中心的权重.得到的加权混合 SPF (Weighted Hybrid SPF, WHSPF)函数表达式如下所示:

$$\text{SPF}_{\text{WH}}(f(x)) = \frac{1}{C} \left[ \lambda_1 \left( f(x) - \sum_{n=1,2} w_n c_n \right) + \lambda_2 \left( f(x) - \sum_{n=1,2} w_n m_n \right) \right] \quad (10)$$

$$C = \max \left| \lambda_1 \left( f(x) - \sum_{n=1,2} w_n c_n \right) + \lambda_2 \left( f(x) - \sum_{n=1,2} w_n m_n \right) \right| \quad (11)$$

其中,  $w_1$  和  $w_2$  为自适应权重,其计算方式如下所示:

$$\begin{cases} w_1 = \frac{d_1}{d_1 + d_2} \\ w_2 = \frac{d_2}{d_1 + d_2} \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $d_1$  和  $d_2$  是轮廓内外区域的灰度绝对中位差:

$$\begin{cases} d_1 = \frac{1}{\Omega_1} \int_{\Omega_1} |f(x) - m_1| dx \\ d_2 = \frac{1}{\Omega_2} \int_{\Omega_2} |f(x) - m_2| dx \end{cases} \quad (13)$$

通过使用基于绝对中位差的自适应权重,在每次迭代时都会根据轮廓内外的灰度差异来调整内外中值

和均值对于拟合中心的影响程度,这样提高了模型的演化效率.同时该权重更好地描述内外区域的灰度特征,提高了模型对复杂情况的自适应性,因而一定程度上可以提高模型的分割性能.

为了更好地引导曲线演化,在 SPF 函数中引入一个边缘引导函数(Edge-Guided Function, EGF),其边缘引导函数表达式如下所示:

$$G_{\text{EGF}} = \frac{\theta}{1 + \beta \cdot \nabla(G * f(x))} \quad (14)$$

式中,  $\theta$  和  $\beta$  为预先设定的正常数,  $f(x)$  为分割图像,  $G * (\cdot)$  表示高斯滤波操作,  $\nabla(\cdot)$  表示求图像梯度操作.将该边缘引导函数引入式(16)中,边缘引导加权混合(Edge-Guided Weighted Hybrid)SPF 函数和迭代方程表示如下所示:

$$\text{SPF}_{\text{EGWH}}(f(x)) = \frac{1}{C} G_{\text{EGF}} \left[ \lambda_1 \left( f(x) - \sum_{n=1,2} w_n c_n \right) + \lambda_2 \left( f(x) - \sum_{n=1,2} w_n m_n \right) \right] \quad (15)$$

$$C = \max \left| \lambda_1 \left( f(x) - \sum_{n=1,2} w_n c_n \right) + \lambda_2 \left( f(x) - \sum_{n=1,2} w_n m_n \right) \right| \quad (16)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \text{SPF}_{\text{EGWH}}(f(x)) \cdot |\nabla \varphi| \quad (17)$$

通过观察该边缘引导函数可以发现:当曲线位于灰度分布均匀的区域,该函数值会较大;当曲线位于位于干扰边缘时,边缘引导函数也会提供额外的演化梯度;而当曲线接近目标边缘时,较大的图像梯度会让该函数值迅速减小.因此使用该函数可以减少干扰边缘的影响,同时提高模型的演化效率.

### 3.3 算法实现

为了更好地说明该模型的实现过程,将模型的主要步骤使用伪代码表示,如算法 1.

#### 算法 1 提出模型的伪代码

1. 输入:图片  $f(x)$ , 设定初始化水平集  $\varphi_0$
2. 设置相关参数  $\beta, \theta, \lambda_1, \lambda_2$
3. WHILE  $|\varphi_{n+1} - \varphi_n| \geq \zeta$  DO
4. 分别根据式(2)和式(9)计算轮廓内外的均值  $c_1$  和  $c_2$  和中值  $m_1$  和  $m_2$
5. 根据式(12)和式(13)计算轮廓内外拟合中心权重  $w_1$  和  $w_2$
6. 根据步骤 4 和 5 计算的参数以及式(14)、(15)和(16)计算 SPF 函数
7. 根据式(17)更新水平集
8. END WHILE
9. 输出:最终结果  $\varphi = \varphi_{n+1}$

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验准备

为了说明提出模型在 SAR 图像水陆分割任务中的有效性,选取了两组 SAR 图像进行水陆分割实验,实验图像的大小和成像设备信息如表 1 所示. 实验进行的条件为: CPU 型号为 Intel(R) Core(TM) i7-10700F, 主频 2.90 GHz, 内存 32 GB; 仿真软件为 MATLAB R2016a; 操作系统为 Windows 11. 选取原始 SAR 图像以及 6 个对比实验模型进行实验, 6 个模型分别是 CV 模型<sup>[31]</sup>、CE 模型<sup>[23]</sup>、IMGAC 模型<sup>[16]</sup>、文献[29]中的改进 SPF(Improved Signed Pressure Force, IMSPF)模型、WHRSPF 模型<sup>[28]</sup>和提出模型. 将原始图像使用上述主动轮廓模型进行分割, 根据分割后的轮廓将原始图像转换为二值图像, 最后的实验结果如图 1 和图 2 所示.

实验模型的对应参数如下. CV、CE: 长度约束项权

重  $\mu=0.01 \times 255 \times 255$ , 面积约束项权重  $\nu=0$ , 内外部能量项权重  $\lambda=1$ , 迭代速率控制参数  $\Delta t=0.1$ . IMGAC:  $\Delta t=0.1$ . IMSPF, WHRSPF, HSPF 以及提出模型:  $\Delta t=0.1$ . 提出模型中的常数,  $\lambda_1=0.1, \lambda_2=0.9, \theta=1, \beta=0.01$ .

### 4.2 水陆分割实验

实验主要选取了海陆和河流 SAR 图像进行实验, 首先对 SAR 图像本身进行分析: 观察实验图片可以发现: 海陆和河流图像的灰度分布不均匀且灰度特征差异巨大, 图像可以分为海洋/河流区域和陆地区域. 海洋/河流区域通常亮度较低, 有块状斑点和条纹以及一些孤立岛屿和船只, 整体相对简单; 而陆地区域通常亮度较高, 有山体阴影、地形脉络等干扰边缘信息, 易被模型误分割. 另外, 水陆边界部分细节较多, 凹凸不平且有弱边缘现象, 分割时容易造成细节缺失.

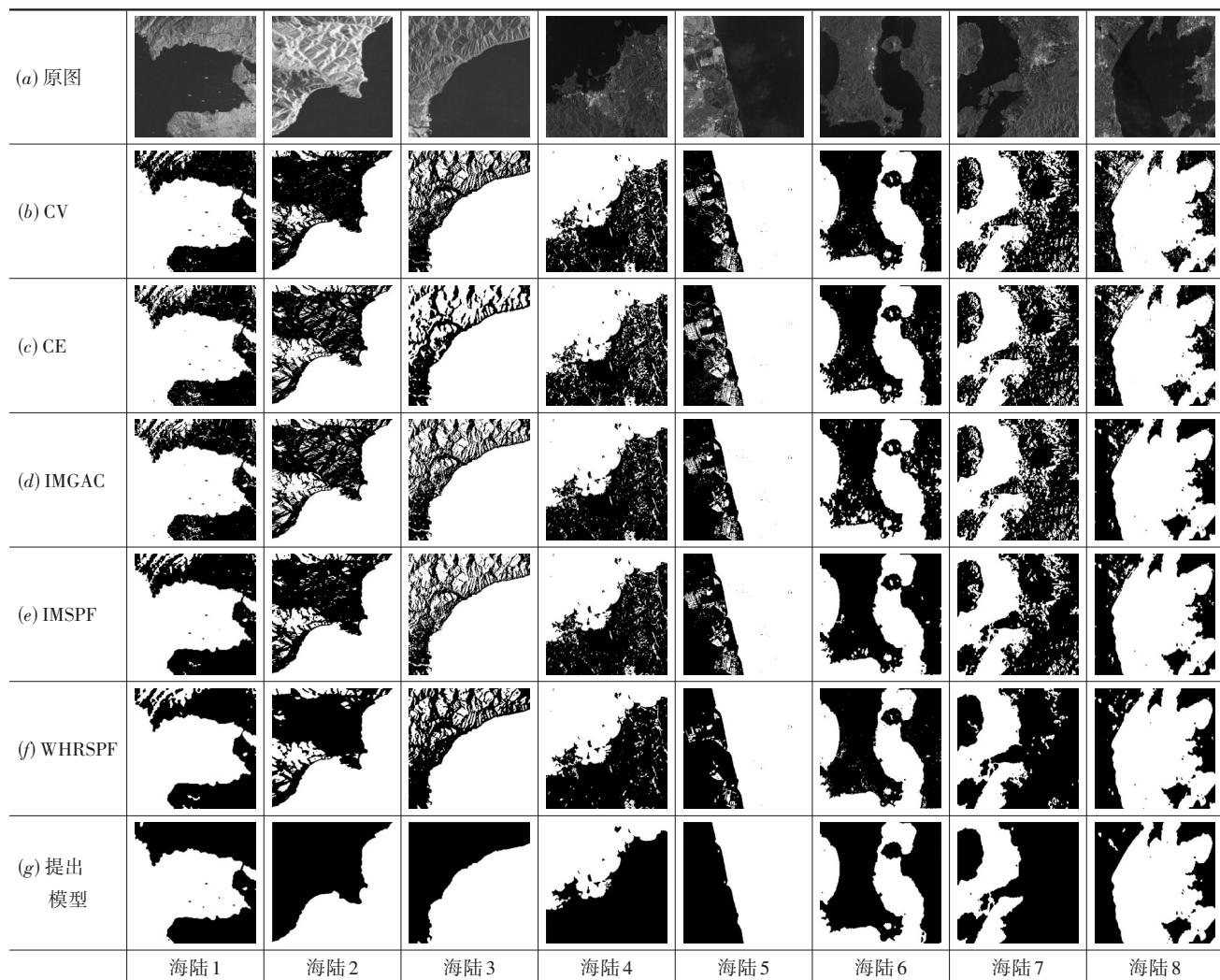


图 1 海陆 SAR 图像及实验模型的海陆分割结果

表 1 实验图像大小和成像设备信息

	海陆图 1~海陆图 3	海陆图 4~海陆图 8	河流图 1~河流图 2	河流图 1~河流图 8
原图大小	400×400	800×800	600×600	300×300
成像设备	Sentinel-1A	ALOS-PALSAR	ALOS-PALSAR	Radarsat-2
分辨率	10 m	10 m	10 m	3 m
波段	C 波段	L 波段	L 波段	C 波段
入射角	30°~40°	20°~30°	20°~30°	20°~50°

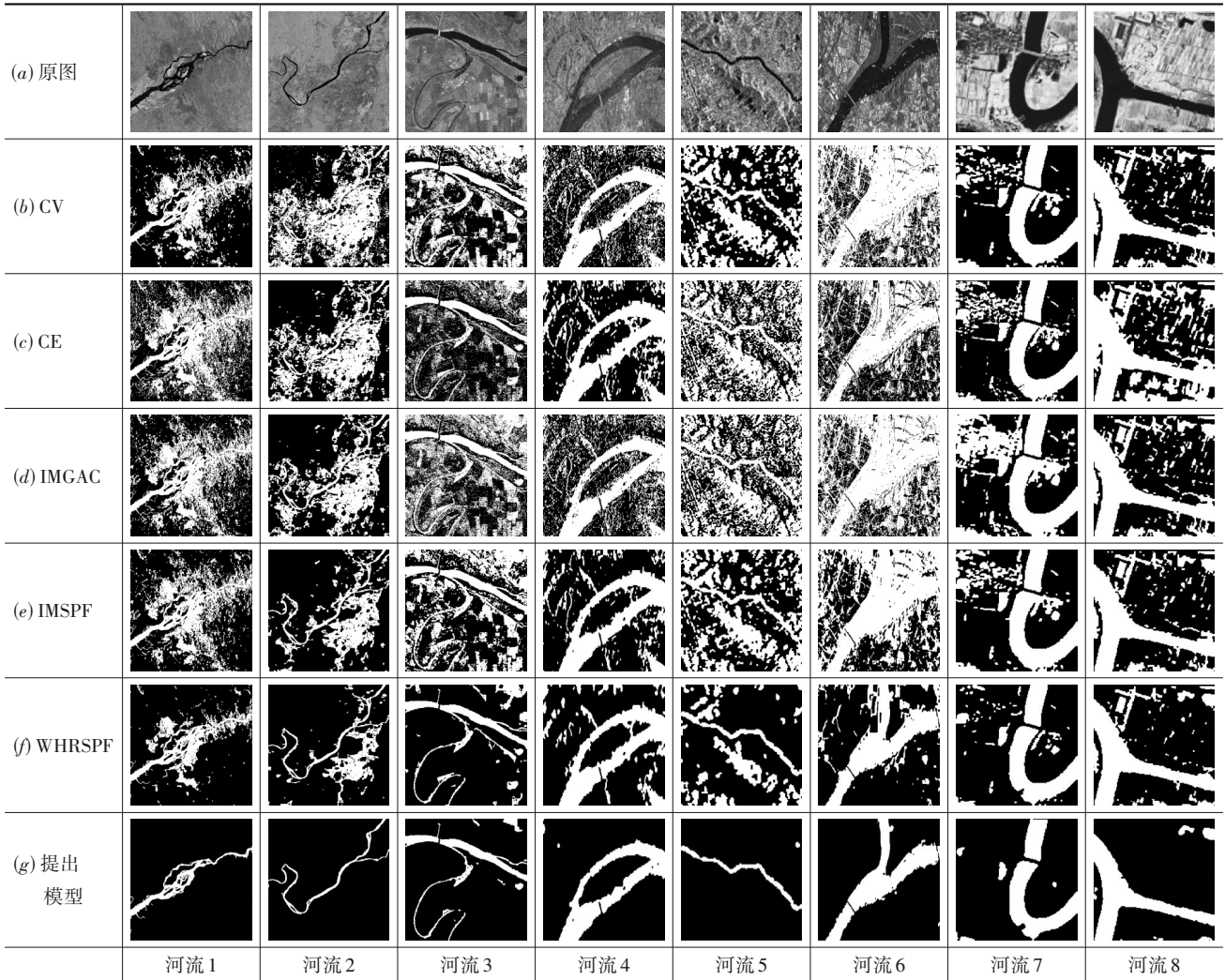


图 2 河流 SAR 图像及实验模型的河流分割结果

### 4.3 实验结果讨论

图 1 和 2 中的 (a) 为原图, (b)、(c)、(d)、(e)、(f) 和 (g) 分别是 CV 模型、CE 模型、IMGAC 模型、IMSPF 模型、WHRSPF 模型和提出模型的实验结果。

从分割结果可以看到, 前三个模型的分割结果都不理想, CV 模型在海陆图像中相较于 CE 模型分割效果更好, CE 模型采用了交叉熵建模, 对于陆地复杂的地形, CE 模型的演化有更多的不稳定性, 而 CV 模型使用区域灰度均值建模, 易受干扰边缘影响。IMGAC 模型是基于边缘的方法, 对干扰边缘十分敏感, 所以也出现了

大量误分割区域。IMSPF 模型和 CV 模型都采用了均值拟合中心, 因此可以看出均值拟合中心对于复杂水陆图像的分割性能不理想。WHRSPF 模型引入的中值拟合中心缓解了误分割的情况, 但是在局部项的影响下, 还是造成了一定数量的误分割, 采用局部灰度特征反而增加了误分割区域, 因此, 局部项对于水陆分割反而出现了较大的副作用。在误分割情况中, 水域斑点和条纹以及山体阴影和地形轮廓分别是造成水陆区域分割的主要原因。提出模型引入了混合拟合中心, 另外加入了边缘引导函数和自适应权重, 通过实验结果可以看

到,该模型在有效保持边缘细节和连续性的情况下,避免了绝大部分误分割情况。

为了更详细地说明提出模型的分割性能的优越性,图3展示了 WHRSPF 模型的水域斑纹和山体阴影的误分割情况并将典型情况放大展示,同时加入了提出模型的分割结果进行比较,图中红色曲线为两个模型的分割结果,黄色和绿色方框则框出了 WHRSPF 误分割的区域以及提出模型相对应的区域。水域因为其复杂情况造成了一定数量斑纹状干扰区域,这些干扰区域往往相较于正常水面具有较高灰度值,与周围会产生不明显的弱边缘,对于弱边缘处理能力差的模型会造成误判,而提出模型弱边缘处理能力较强,能很好地避免上述情况。由于山体阴影区域在 SAR 图像中呈现较暗的区域,对于全局性不足和抗干扰能力差的模型会造成误分割,而提出模型的混合拟合中心和自适

应手段能够合理地提取图像中陆地水域的特征,保持了良好的全局性和抗干扰性,在保证小块水域识别的前提下避免了绝大部分的山体阴影误分割情况。

#### 4.4 定量评价

为了更加客观地评估该提出模型的分割性能,选择了 Dice 相似系数和虚警率(False Alarm, FA)来定量评价分割的精确度,两者的计算公式如下:

$$DSC = \frac{2TP}{FP + 2TP + FN} \quad (18)$$

$$FA = \frac{FP}{TP + FP} \quad (19)$$

其中,TP 表示正确提取的海洋/河流(目标)区域;FP 表示错误提取的海洋/河流(目标)区域;TN 表示正确划分的陆地(背景)区域;FN 表示错误划分的陆地(背景)区域。根据上述两式,分别计算实验图片对应实验结果的 Dice 相似系数和虚警率。

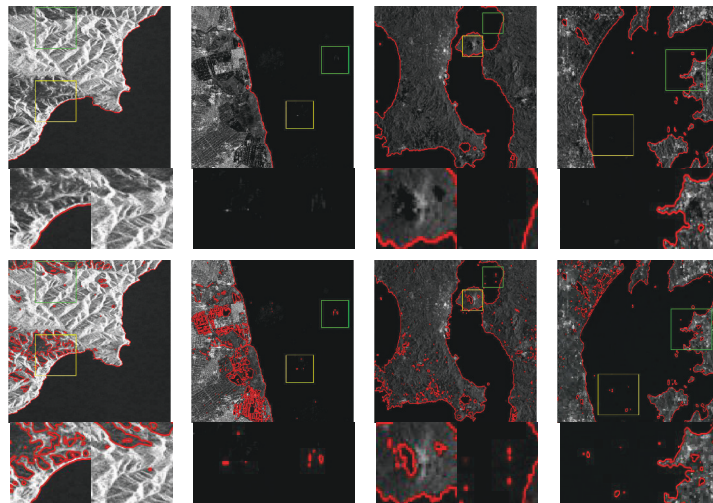


图3 误分割情况举例(红色曲线为两个模型的分割结果,黄色和绿色方框为 WHRSPF 模型误分割的区域以及提出模型相对应的区域)

从表2和3可以看出,提出模型在每张图都得到了最高的 Dice 相似系数和最低的虚警率,且 Dice 相似系数相较于其他对比模型至少提高6%。提出模型在复杂 SAR 图像的分割性能相较于简单 SAR 图像提升更大。综合两项定量指标,提出模型在 SAR 图像水陆分割任务的准确度方面有较大优势。

为了对比模型中的计算效率,将实验中的计算时间列于表4中。CE模型因其较高的计算复杂度导致计算时间不稳定,对于地形复杂的 SAR 图像会大幅增加计算时间。WHRSPF模型需要计算局部项,计算复杂度略高。提出模型增加了区域中值、自适应权重和边缘引导函数的计算,增加了一定的计算复杂度,但是因为上

表2 海陆分割结果的 Dice 相似系数和虚警率

单位:%

模型	海陆图1	海陆图2	海陆图3	海陆图4	海陆图5	海陆图6	海陆图7	海陆图8
	DSC/FA	DSC/FA	DSC/FA	DSC/FA	DSC/FA	DSC/FA	DSC/FA	DSC/FA
CV	92.40/6.32	92.34/15.62	92.40/6.32	89.98/18.19	90.03/8.53	91.39/6.02	88.10/24.77	89.40/15.38
CE	90.31/12.43	73.60/28.11	90.31/12.43	88.31/20.93	89.10/10.91	89.79/13.43	90.04/19.07	90.31/13.41
IMGAC	90.45/12.16	85.82/29.05	90.45/12.16	93.07/12.94	91.07/7.99	90.21/11.67	91.55/10.86	91.19/11.13
IMSFP	91.19/7.09	90.13/20.21	91.19/7.09	92.36/14.17	91.59/6.01	91.19/7.09	91.80/9.81	91.82/7.59
WHRSPF	92.51/4.22	92.94/10.52	92.51/4.22	93.13/10.13	92.96/3.46	93.01/4.92	92.45/8.35	92.86/4.31
提出模型	<b>99.74/0.33</b>	<b>99.87/0.23</b>	<b>99.74/0.33</b>	<b>99.42/1.12</b>	<b>99.81/0.94</b>	<b>99.59/0.50</b>	<b>99.39/1.03</b>	<b>99.45/0.89</b>

表 3 河流分割结果的 Dice 相似系数和虚警率

单位:%

模型	河流图 1	河流图 2	河流图 3	河流图 4	河流图 5	河流图 6	河流图 7	河流图 8
	DSC/FA	DSC/FA	DSC/FA	DSC/FA	DSC/FA	DSC/FA	DSC/FA	DSC/FA
CV	27.34/84.16	29.03/83.02	61.70/80.66	76.84/54.13	63.00/89.94	47.45/72.93	77.16/3719	73.34/42.10
CE	23.93/86.41	19.23/89.36	75.81/72.77	81.23/48.78	49.80/92.47	63.31/65.16	75.88/3891	61.99/55.08
IMGAC	31.21/81.51	21.82/87.76	61.23/80.79	75.81/55.25	51.92/92.17	49.25/72.05	61.48/5562	71.87/45.10
IMSPF	37.08/77.24	16.20/91.19	66.79/78.07	86.33/40.87	63.00/89.94	58.37/67.73	73.88/4142	76.66/37.85
WHRSPF	52.05/64.82	41.46/73.85	91.33/41.64	89.01/35.77	82.84/80.49	89.17/35.21	87.72/2187	83.81/27.86
提出模型	<b>99.63/0.73</b>	<b>96.41/6.94</b>	<b>98.75/11.85</b>	<b>99.73/0.95</b>	<b>99.86/3.27</b>	<b>99.68/1.07</b>	<b>98.73/5.57</b>	<b>98.29/3.37</b>

表 4 分割所需的计算时间

单位:s

模型	海陆图 1	海陆图 2	海陆图 3	海陆图 4	海陆图 5	海陆图 6	海陆图 7	海陆图 8	河流图 1	河流图 2	河流图 3	河流图 4	河流图 5	河流图 6	河流图 7	河流图 8
	CV	2.69	3.68	2.39	10.92	8.94	8.69	9.80	9.25	7.94	8.17	3.45	2.65	3.11	2.73	3.09
CE	2.78	5.71	5.01	16.61	14.83	15.90	14.72	16.05	13.82	13.75	5.56	7.29	6.42	7.12	6.49	7.08
IMGAC	2.99	3.86	2.31	9.10	8.72	9.66	9.70	8.79	7.06	8.52	4.82	3.04	3.58	3.24	3.38	3.21
IMSPF	2.73	1.82	2.02	8.21	10.84	12.19	9.81	9.68	7.54	7.64	3.27	2.45	3.02	2.43	2.61	2.87
WHRSPF	3.01	4.78	4.63	10.13	9.85	10.19	10.06	9.98	8.94	9.38	3.34	3.21	3.34	2.71	3.10	3.54
提出模型	3.12	3.31	3.05	8.09	9.11	8.56	9.48	9.57	6.91	7.90	3.01	2.57	2.96	2.89	2.94	2.82

述改进提高了模型的演化效率,使曲线能快速向目标边缘迭代,同时也减少了干扰区域的无效演化,因此提出模型的计算时间能保持较低水平.综合分割准确度和计算时间,提出模型在计算效率方面有一定优势.

#### 4.5 消融实验

本文提出模型主要包含 3 部分:混合拟合中心,自

适应权重和边缘引导函数.为了验证模型各个部分的有效性,增加了消融实验.分别使用 SPF<sup>[25]</sup>(采用均值拟合中心),HSPF(采用混合拟合中心),WHRSPF(采用混合拟合中心和自适应权重)和提出模型(采用混合拟合中心、自适应权重和边缘引导函数),实验结果及其定量评价如图 4 和表 5 所示.

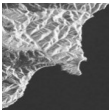




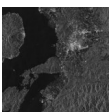




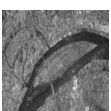




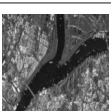




实验图 1					
实验图 2					
实验图 3					
实验图 4					
	(a) 原图	(b) SPF 模型	(c) HSPF 模型	(d) WHRSPF 模型	(e) 提出模型

图 4 消融实验分割结果

观察实验结果可以发现,使用均值拟合中心的 SPF 模型对于实验图像中的干扰区域产生了大量误分割.而 HSPF 模型加入了混合拟合中心,提高了模型的抗干扰能力,可以避免绝大部分误分割,但是对于一些强干扰区域,仍然会存在误分割.WHRSPF 模型加入了自适

应权重,该权重能更合理地描述图像灰度特征,提高了分割效果.提出模型在加入边缘引导函数和自适应权重后,消除了干扰边缘信息,提高了模型对于复杂情况的自适应性,进一步减少了误分割,达到准确的分割结果.

表5 消融实验结果的Dice相似系数和虚警率 单位:%

模型	实验图1	实验图2	实验图3	实验图4
	DSC/FA	DSC/FA	DSC/FA	DSC/FA
SPF模型	84.22/27.19	84.12/27.40	71.71/44.01	57.39/59.75
HSPF模型	92.37/13.99	93.80/11.68	83.87/26.92	93.06/7.88
WHSPF模型	99.22/1.55	97.24/2.68	90.18/12.80	97.11/5.47
提出模型	<b>99.87/0.23</b>	<b>99.39/1.03</b>	<b>99.73/0.95</b>	<b>99.68/1.07</b>

#### 4.6 参数讨论

提出模型的混合拟合中心中的均值拟合中心 $\lambda_1$ 和中值拟合中心的权重 $\lambda_2$ 需要人为设定,本节通过实验来讨论两者权重对于水陆分割性能的影响,将提出模型中的 $(\lambda_1, \lambda_2)$ 分别设置为 $(0.9, 0.1)$ 、 $(0.5, 0.5)$ 、 $(0.1, 0.9)$ 和 $(0, 1)$ ,其分割结果如图5所示,同时实验结果的定量评价如表6所示.

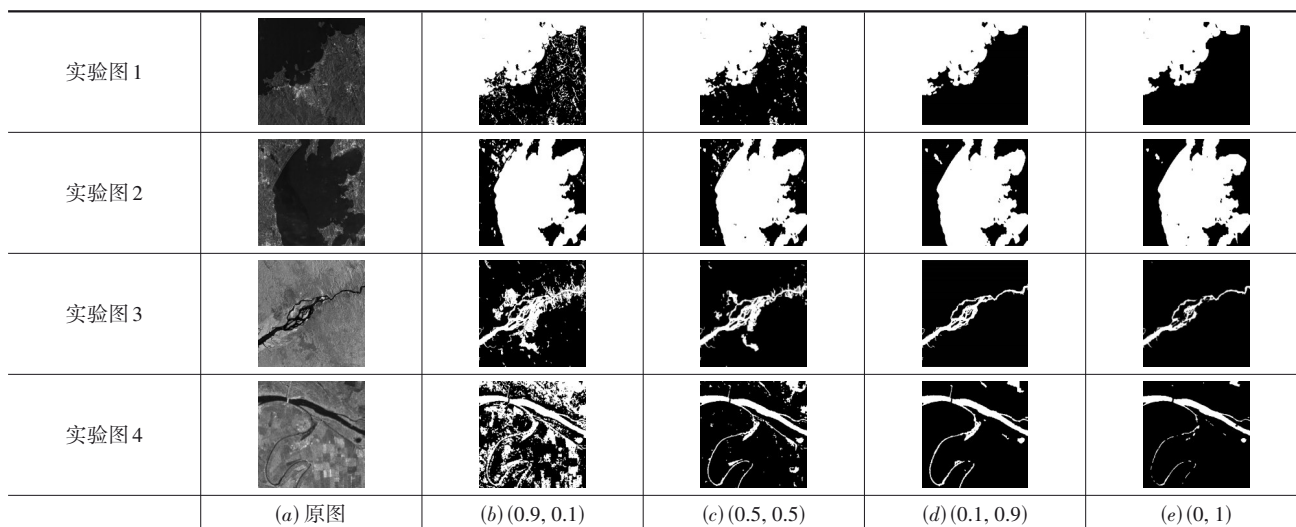


图5 参数讨论实验结果

从表6的定量评价可以看到,随着中值拟合中心权重的提高,Dice相似系数逐步提高,虚警率逐步降低.当 $\lambda_1=0.1, \lambda_2=0.9$ 时,两个评价指标达到最优值.但是当中值拟合中心完全主导时,模型分割呈现出次优的结果.

表6 参数讨论实验结果的Dice相似系数和虚警率 单位:%

参数	实验图1	实验图2	实验图3	实验图4
	DSC/FA	DSC/FA	DSC/FA	DSC/FA
(0.9, 0.1)	90.81/16.83	95.87/7.93	61.84/45.22	72.83/42.73
(0.5, 0.5)	94.34/10.91	97.80/4.31	72.53/33.1	81.56/31.14
<b>(0.1, 0.9)</b>	<b>99.42/1.12</b>	<b>99.45/0.89</b>	<b>99.63/0.73</b>	<b>98.75/11.85</b>
(0, 1)	97.41/1.53	98.17/1.19	88.44/1.33	82.41/15.52

根据上述分析可知,当模型参数设置为 $\lambda_1=0.1, \lambda_2=0.9$ 时,提出模型可以获得较为优越的分割性能,但针对少数SAR图像,上述参数需要依据具体图像特征

图5中(a)为原图,(b)、(c)、(d)和(e)分别为提出模型参数设置为 $(0.9, 0.1)$ 、 $(0.5, 0.5)$ 、 $(0.1, 0.9)$ 和 $(0, 1)$ 的分割结果.在提出模型中,中值拟合中心主要用来降低干扰区域的影响,使模型能够向目标边缘正确演化,而均值拟合中心则保证模型在灰度均匀区域和弱边缘区域的演化稳定性.通过实验结果可以发现,当均值拟合中心占主导时,模型易被显著的干扰边缘影响造成误分割.当中值拟合中心占主导时,模型取得了更优的分割效果.但是当完全使用中值拟合中心时,水陆边界附近出现了一些水域被过分割的现象.因此单纯使用中值拟合中心难以保证分割性能的稳定,仍然需要一定权重的均值拟合中心来保证灰度均匀区域和弱边缘区域分割性能的稳定.当 $\lambda_1=0.1, \lambda_2=0.9$ 时,提出模型可以达到最佳分割效果,兼顾了抗干扰性和稳定性.

进行微调,即参数 $\lambda_1=0.1+\eta, \eta \in (-0.05, 0.05)$ ,参数 $\lambda_2$ 作出相应的调整.

#### 5 结论

为了实现准确高效的SAR图像水陆分割,提出了一种加权混合符号压力主动轮廓模型.该模型由自适应加权的均值拟合中心和中值拟合中心组成,中值拟合中心有效抑制了干扰区域,均值项则保证了模型分割的稳定性.此外,设计了基于轮廓内外像素的绝对中位差的自适应权重,以调节区域内外权值,提高了演化效率和分割性能.最后,构建了边缘引导函数并引入到创新SPF函数中,能够进一步抑制干扰边缘的影响和提高演化效率.实验结果表明:与现有的主动轮廓模型相比,提出模型能够高效准确地分割SAR水陆图像,在准确性和效率两方面都有一定优势,其中Dice相似系数提升至少6%.然而,该模型使用了简单的高斯平滑图

像的梯度构建边缘引导函数,可以采用更合理的图像参数来构建引导函数;模型中 SPF 函数中的中值和均值拟合中心的权重是人为设定,可以继续研究自适应权重的方法;本文提出模型的适用分割对象主要是水面后向散射系数相对复杂的 SAR 图像,对于水面后向散射系数十分复杂的图像分割性能还有待提升,未来可以构建全新形式的 SPF 函数,同时探索新的灰度特征描述来进一步提高模型的抗干扰性,另外,可以加入预处理来减弱某些强干扰的影响。

#### 参考文献

- [1] 杨曦,张鑫,郭浩远,等.基于不变特征的多源遥感图像舰船目标检测算法[J].电子学报,2022,50(4):887-899.  
YANG X, ZHANG X, GUO H Y, et al. Invariant features based ship detection model for multi-source remote sensing images[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(4): 887-899. (in Chinese)
- [2] 肖进胜,张舒豪,陈云华,等.双向特征融合与特征选择的遥感影像目标检测[J].电子学报,2022,50(2):267-272.  
XIAO J S, ZHANG S H, CHEN Y H, et al. Remote sensing image object detection based on bidirectional feature fusion and feature selection[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(2): 267-272. (in Chinese)
- [3] 韩超垒,杨志伟,张庆君,等.距离-多普勒-频带域 3D-AWP-MRF 分类辅助的 SAR-GMTI 杂波抑制方法[J].电子学报,2021,49(12):2339-2348.  
HAN C L, YANG Z W, ZHANG Q J, et al. A multichannel SAR-GMTI clutter suppression method assisted by range-doppler-band 3D-AWP-MRF classification[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(12): 2339-2348. (in Chinese)
- [4] FERRENTINO E, BUONO A, NUNZIATA F, et al. On the use of multipolarization satellite SAR data for coastline extraction in harsh coastal environments: the case of solway firth[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, 14: 249-257.
- [5] BASELICE F, FERRAIOLI G. Unsupervised coastal line extraction from SAR images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(6):1350-1354.
- [6] DEMCHEV D, VOLKOV V, KAZAKOV E, et al. Sea ice drift tracking from sequential SAR images using accelerated-KAZE features[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(9): 5174-5184.
- [7] XIANG Y, WANG F, WAN L, et al. An advanced multi-scale edge detector based on Gabor filters for SAR imagery[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(9): 1522-1526.
- [8] JAKKA T K, REDDY Y M, RAO B P. GWDWT-FCM: Change detection in SAR images using adaptive discrete wavelet transform with fuzzy C-mean clustering[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2019, 47(3): 379-390.
- [9] 谢明鸿,张亚飞,付琨.基于种子点增长的 SAR 图像海岸线自动提取算法[J].中国科学院研究生院学报,2007,24(1):93-98.  
XIE M H, ZHANG Y F, FU K. Algorithm of detection coastline from SAR images based on seeds growing[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2007, 24(1): 93-98. (in Chinese)
- [10] 侯旺,杨夏.基于分步区域增长算法的图像自动分割方法[J].光学与光电技术,2010,8(6):6-8.  
HOU W, YANG X. Methods of image automatic segmentation based on step region-growth[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2010, 8(6): 6-8. (in Chinese)
- [11] LIU Z L, LI F, LI N, et al. A novel region-merging approach for coastline extraction from sentinel-1A IW mode SAR imagery[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(3): 324-328.
- [12] LIU C, ABERGEL R, GOUSSEAU Y, et al. LSDSAR, a Markovian a contrario framework for line segment detection in SAR images[J]. Pattern Recognition, 2020, 98: 107034.
- [13] MIGNOTTE M. A fractal projection and Markovian segmentation-based approach for multimodal change detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(11): 8046-8058.
- [14] TIAN B, LI Z, ZHANG M, et al. Mapping thermokarst lakes on the Qinghai-Tibet Plateau using nonlocal active contours in Chinese GaoFen-2 multispectral imagery[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(5): 1687-1700.
- [15] PARAGIOS N, DERICHE R. Geodesic active contours and level sets for the detection and tracking of moving objects[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(3): 266-280.
- [16] WAN J, YONG B, ZHOU X. Water extraction from SAR images based on improved geodesic active contour[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2022, 194(10): 698.
- [17] ZHANG H, ZHANG B, GUO H, et al. An automatic coastline extraction method based on active contour model[C]//2013 21st International Conference on Geoinfor-

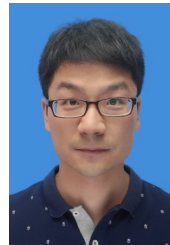
- ematics. Piscataway: IEEE, 2013: 1-5.
- [18] ZHU Z, TANG Y, HU J, et al. Coastline extraction from high-resolution multispectral images by integrating prior edge information with active contour model[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(10): 4099-4109.
- [19] ZHANG T, YANG X, HU S, et al. Extraction of coastline in aquaculture coast from multispectral remote sensing images: Object-based region growing integrating edge detection[J]. Remote Sensing, 2013, 5(9): 4470-4487.
- [20] LUO S, SARABANDI K, TONG L, et al. Unsupervised multiregion partitioning of fully polarimetric SAR images with advanced fuzzy active contours[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 58(2): 1475-1486.
- [21] KASS M, WITKIN A, TERZOPOULOS D. Snakes: Active contour models[J]. International Journal of Computer Vision, 1988, 1(4): 321-331.
- [22] LI C, XU C, GUI C, et al. Level set evolution without re-initialization: A new variational formulation[C]//2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2005: 430-436.
- [23] HAN B, WU Y, SONG Y. A novel active contour model based on median absolute deviation for remote sensing river image segmentation[J]. Computers and Electrical Engineering, 2017, 62: 209-223.
- [24] SONG Y, WU Y, DAI Y. A new active contour remote sensing river image segmentation algorithm inspired from the cross entropy[J]. Digital Signal Processing, 2016, 48: 322-332.
- [25] ZHANG K, LEI Z, SONG H, et al. Active contours with selective local or global segmentation: A new formulation and level set method[J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(4): 668-676.
- [26] GUO B, CUI J, GAO B. Water boundary detection for SAR images using region-based active contours with salient edge energy[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2022, 50(8): 1531-1546.
- [27] HAN B, WU Y. Active contours driven by global and local weighted signed pressure force for image segmentation[J]. Pattern Recognition, 2019, 88: 715-728.
- [28] FANG J, LIU H, ZHANG L, et al. Active contour driven by weighted hybrid signed pressure force for image segmentation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 97492-97504.
- [29] WEI X, ZHENG W, XI C, et al. Shoreline extraction in SAR image based on advanced geometric active contour model[J]. Remote Sensing, 2021, 13(4): 642.
- [30] DONG F, CHEN Z, WANG J. A new level set method for inhomogeneous image segmentation[J]. Image and Vision Computing, 2013, 31(10): 809-822.
- [31] CHAN T F, VESE L A. Active contours without edges[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2): 266-277.

### 作者简介



**沈嘉程** 男, 1999年1月出生, 江苏常熟人, 现为南京邮电大学在读硕士研究生, 研究方向为遥感图像处理.

E-mail: shenjiacheng\_0115@163.com



**韩斌** 男, 1990年2月出生, 安徽马鞍山人, 现为南京邮电大学副教授, 研究方向为遥感图像处理、机器学习、目标检测等.

E-mail: njupt.bh@foxmail.com



**鲍秉坤** 女, 1982年4月出生, 安徽六安人, 现为南京邮电大学计算机学院、软件学院、网络空间安全学院副院长、教授、博士生导师, 研究方向为多媒体计算、社交多媒体、计算机视觉、人工智能等.

E-mail: bingkunbao@njupt.edu.cn