# 顾及轮廓信息和 DRLSE 模型的遥感影像瞬时水边线快速提取

杨志海<sup>1</sup>, 王广军<sup>1</sup>, 高智雄<sup>2</sup>, 冯 磊<sup>3</sup>, 梁四海<sup>4</sup>

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京 100083; 2. 中核第七设计研究院有限公司,山西 太原 030012;
3. 中国地质调查局 自然资源航空物探遥感中心,北京 100083; 4. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083)

摘要:针对利用传统瞬时水边线提取方法处理高分辨率遥感影像存在提取结果不连续、效率不高和无法同时提取多片水域等问题,提出了一种顾及轮廓信息和距离正则化水平集演化(distance regularized level set evolution, DRLSE)模型的遥感影像瞬时水边线快速提取方法,并将其应用于福建泉州附近海域瞬时水边线提取。首先,使用 DRLSE 模型提取地物轮廓信息,以解决经典阈值方法水边线提取结果不连续问题;其次,利用 DRLSE 模型的初始矩形轮廓中心位置和周长信息,对噪声点等轮廓进行自动 剔除,并提取多片水域,以提高瞬时水边线提取后处理效率。研究结果表明:相较于泛洪算法、Canny 算子和 CV(Chan-Vese)模型,应用本方法进行大陆海岸线瞬时水边线提取更高效,且提取结果连续、精度更高。

关键词:瞬时水边线; DRLSE 模型; 初始轮廓信息; 泛洪算法; Canny 算子; Chan-Vese 模型 中图分类号: P229; P748 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2023)4-0079-10 DOI: 10.11759/hykx20221102001

水边线是水体与陆地的分界线<sup>[1]</sup>,在遥感影像 上表现为传感器成像时刻的瞬时水边线<sup>[2]</sup>。瞬时水边 线提取是基于遥感技术提取海岸线的前提<sup>[3]</sup>,其结 果对于海岸带科学管理具有重要意义。

近些年来,米级和亚米级星载高分遥感技术的发 展,为瞬时水边线精细提取提供了新的技术手段<sup>[4]</sup>。 尽管目视解译结果的精度较高,但受限于目视解译 的效率,科研人员一直致力于利用计算机进行瞬时 水边线的自动化或半自动化提取。利用计算机进行 瞬时水边线的自动化或半自动化提取,其实质是依 据水陆两侧地物光谱或纹理等差异进行图像分割或 分类,并由此产生了多种分割和分类方法,如经典 的阈值分割法、边缘检测法,以及近些年发展起来 的深度学习<sup>[5]</sup>等算法。经典的阈值分割法有密度分 割法<sup>[6]</sup>、大津法<sup>[7]</sup>和泛洪算法<sup>[8]</sup>等,在此基础上,自 适应阈值化方法<sup>[9]</sup>,以及大津法与影像分割技术相 结合方法<sup>[10]</sup>也被应用于瞬时水边线或海岸线提取。 阈值分割法中,阈值的选取直接影响分割的效果<sup>[11]</sup>。 当两种地物的像素值相近,对比度不强时,使用阈 值分割方法难以做到有效分割。此外,由于阈值分割 法是对影像进行逐像素分类, 高分遥感数据中的噪声 会导致阈值分割出的瞬时水边线不连续。而常用的 边缘检测法是利用边缘检测算子,如 Laplacian<sup>[12]</sup>、 Prewitt<sup>[13]</sup>、Roberts<sup>[14]</sup>和 Canny 算子<sup>[15-16]</sup>进行瞬时水 边线提取。利用边缘检测算子在进行复杂海岸带瞬 时水边线提取时,同样容易受高分遥感影像中礁石 和白浪等噪声影响,导致瞬时水边线提取结果产生 断裂,因此后续常采用数学形态学对边缘检测算子 提取结果进行优化,以消除孔洞和毛刺,使提取结 果连续,但同时也带来瞬时水边线提取结果进一步 出现偏差,以及提取效率显著降低等问题。此外,最 近发展起来的深度学习算法也被应用于遥感影像瞬 时水边线提取,如通过升级残差网络为主干网络,

收稿日期: 2022-11-02; 修回日期: 2022-12-16

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A 类)子课题"祁连山冻土 水文变化及其对供水安全的影响"(XDA20100103);中国地质调查局地 调项目"海洋地质信息系统建设及产品开发"(DD20191006)

<sup>[</sup>Foundation: Subproject of Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences "Permafrost Hydrological Change and its Impact on Water Supply Security in Qilian Mountains", No. XDA20100103; Geological Survey Project of China Geological Survey "Marine Geological Information System Construction and Product Development", No. DD20191006]

作者简介:杨志海(1996—),男,山东曹县人,硕士研究生,主要从事 遥感信息处理与应用, E-mail: zhihaiy666@163.com; 王广军(1976—), 黑龙江齐齐哈尔人,通信作者,博士,副教授,主要从事国土与环境遥 感方面的研究, E-mail: wgj@cugb.edu.cn

经过全局卷积网络、密集连接网络和解码器网络配合,产生海陆分割结果<sup>[17]</sup>,但深度学习过于依赖样本的数量,且受计算机硬件条件限制,耗费的时间成本较高。

主动轮廓模型最初由 Kass 提出,可以实现指定 地物初始轮廓自动演化运动到目标边界,称之为 Snake 模型<sup>[18]</sup>。但 Snake 模型容易忽略地物边缘的微 小特征, 该模型各项参数的调整过程比较复杂<sup>[19-20]</sup>. 目初始化结果对地物边缘收敛的准确性影响较大<sup>[21]</sup>。 Malladi 等<sup>[22]</sup>首次将水平集方法引入主动轮廓模型中, 提出了水平集活动轮廓模型。由 Chan 和 Vese 提出 的 CV 模型<sup>[23]</sup>也通过了水平集方法对模型进行改进。 该类模型能够表示复杂拓扑结构的轮廓和处理拓扑 结构变化,但其在演化的过程中需要不断地重新进 行初始化水平集函数。李纯明等人为了避免上述弊 端,提出距离正则化的水平集演化模型(distance regularized level set evolution, DRLSE)<sup>[24]</sup>, DRLSE 模 型对水平集公式重新进行定义,在零水平集区域使 水平集函数规则化, 解决了模型中初始轮廓重复进 行初始化的问题, 使得影像分割效率大大提高<sup>[25]</sup>。但 是, 使用 DRLSE 模型提取出的地物轮廓线, 包含噪 声轮廓线(如沿海养殖场和货轮等轮廓), 需要后期 人工辅助处理,才能得到瞬时水边线,导致基于 DRLSE 模型的瞬时水边线提取效率较低。

综上所述,本文在兼顾精度和效率的基础上, 提出一种顾及轮廓信息和DRLSE模型的瞬时水边线 快速提取方法,可有效地实现瞬时水边线分离提取, 并保证瞬时水边线提取结果的连续性。

## 1 研究区概况和数据预处理

#### 1.1 研究区概况

本文的研究区是福建泉州,位于福建东南部, 北部与莆田、福州接壤,南部紧邻漳州、厦门,西部 紧靠龙岩和三明,东与台湾岛隔海相望,地理范围 为117°25′~119°05′E,24°30′~25°56′N,研究区位置示 意图如图1所示。

泉州境内溪流密布,沿岸的入海河流众多。河流 所携泥沙常年堆积,给泉州沿海带来了丰富的淤泥 质海岸线。淤泥质岸线土质肥沃,为沿海滩涂养殖、 开辟盐场等生产活动提供了极为便利的条件。除淤 泥质岸线外,经实地调研,基岩岸线、砂质和人工岸 线也多有分布,自然岸线和人工岸线共同构成了泉 州丰富的岸线资源。

#### 1.2 数据获取和预处理

本文选取了研究区 2016 年 3 月 6 日高分二号 (GF-2)多光谱数据, 空间分辨率为 4 m, 图幅大小为 45 km×45 km。首先, 根据文件自带的参数进行辐射 定标, 将 DN(Digital Number)值转化为辐射亮度; 其 次, 基于 ENVI FLAASH 大气校正模块进行大气校 正, 以减弱由于大气散射和吸收等造成的衰减; 最后, 利用 ASTER GDEM 数据(第二版)基于 C-correction 模 型<sup>[26]</sup>对大气校正后的数据进行进一步地形校正, 以 弱化地形影响。



## 2 研究方法

本文提出的顾及轮廓信息和DRLSE模型的瞬时 水边线快速提取方法,主要包括:首先对预处理后 的遥感数据,基于 DRLSE 模型,在目标水域标定矩 形初始轮廓,据此向地物轮廓边缘处演化,得到瞬 时水边线粗提取轮廓(包括影像的外边缘轮廓),之 后利用初始轮廓信息(周长和中心位置),消除噪声 点轮廓和部分离岸岛礁对粗提取结果的影响,获得 瞬时水边线的精确结果。

#### 2.1 基于 DRLSE 模型水边线信息粗提取

基于 DRLSE 模型的水边线信息粗提取主要包括 以下内容:

(1)增强对比度

DRLSE 模型将图像梯度信息作为边界停止的条件,对于弱边界的地物目标边缘信息,容易产生边缘泄露问题。因此使用 DRLSE 模型对地物边缘轮廓提取前,强化感兴趣地物与周围地物的对比度十分重要。本文利用归一化差异水体指数<sup>[27]</sup>(normalized difference water index, NDWI)增强水体和其他地物的对比度:

$$I_{\rm NDWI} = \frac{(B_{\rm Green} - B_{\rm NIR})}{(B_{\rm Green} + B_{\rm NIR})}$$
(1)

式中, *I*<sub>NDWI</sub> 代表归一化差异水体指数, *B*<sub>Green</sub> 和 *B*<sub>NIR</sub> 分别对应于 GF-2 数据的绿光波段和近红外波段。

(2)选取初始矩形轮廓

在 DRLSE 模型中,初始轮廓是一个封闭矩形, 该封闭矩形在 DRLSE 模型中作为输入条件, DRLSE 模型的演化过程可以认为是由初始矩形轮廓演化到 地物边缘轮廓的一个过程。本文将初始矩形轮廓选 定在水体区域任意范围内,以便后续利用初始矩形 轮廓的周长和中心位置对提取出的地物轮廓进行筛 选,从而直接得到目标地物(瞬时水边线)边缘信息。

(3)提取水边线信息

由于 DRLSE 模型<sup>[24]</sup>的本质是以图像的梯度信 息作为边缘检测的标准,因此,DRLSE 模型也是边 缘检测算子的一种方法,其能量泛函公式如下所示:

$$E(\phi) = \mu \int_{\Omega} p(|\nabla \phi|) dx + \lambda \int_{\Omega} g \delta(\phi) (|\nabla \phi|) dx + \alpha \int_{\Omega} g H(-\phi) dx,$$
(2)

式中,g(x,y)表示边缘停止函数,可用如下公式表示:

$$g(x,y) = \frac{1}{1 + |\nabla G_{\delta} \times I(x,y)|^2},$$
(3)

式中,  $G_{\delta}$ 是参数  $\delta$  的高斯核; I(x, y)为图像函数。

式(2)中,能量泛函第 1 项为惩罚能量项,也称 之为距离正则化项。该项是 DRLSE 模型区别于传统 水平集的主要内容。其中  $\mu$ 、 $\lambda$ >0 和  $\alpha \in \mathbb{R}$  分别为各 能量项的常系数,  $P(|\nabla \Phi|)$ 为双阱势函数,如下所示:

$$p(|\nabla\phi|) = \begin{cases} \frac{1}{(2\pi)^2} (1 - \cos(2\pi |\nabla\phi|)), & \text{in } \mathbb{R} |\nabla\phi| \leq 1 \\ \frac{1}{2} (|\nabla\phi| - 1)^2, & \text{in } \mathbb{R} |\nabla\phi| \geq 1. \end{cases}$$
(4)

能量泛函第 2 项为长度能量项,其中 δ(·)为 Dirac 函数,其计算在水平集演化过程中的轮廓线积 分。长度能量项可以光滑水平集演化过程中的主动 轮廓,减少及避免了零水平集尖点、角点和奇异点的 产生。当长度能量项达到最小时,运动演化的曲线会 稳定停留在地物边界附近。

能量泛函第 3 项为面积能量项,也称为区域能量项。其中  $H(\cdot)$ 为 Heaviside 函数。该项计算主动轮廓内的加权面积。当g = 1时,该项为演化的零水平集内部面积,该项的主要目的是零水平集距离目标边界较远时,可以加快演化速度<sup>[28]</sup>。

由于不存在理想化的 Dirac 函数和 Heaviside 函数,因此通常使用如下公式进行表示<sup>[29-30]</sup>:

$$\delta(x) = \begin{cases} \frac{1}{(2\pi)^2} (1 - \cos(2\pi x)), & |x| \le \varepsilon \\ 0, & |x| > \varepsilon \end{cases}$$
(5)  
$$H(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{x}{\varepsilon} + \frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi x}{\varepsilon} \right) \right) & |x| \le \varepsilon \\ 1, & |x| > \varepsilon \\ 0, & |x| > -\varepsilon \end{cases}$$
(6)

式中, ε为光滑参数, 其值一般为 1.5。

使用 DRLSE 模型提取各个地物的轮廓,由于引 人了惩罚能量项,有效避免了主动轮廓在演化过程 中的不规则运动,同时该模型不需进行重复初始化, 大大提高了图像分割效率<sup>[31]</sup>。为方便水平集方法在 计算机中具体实现,使用的数值求解方法为有限差 分法。在有限差分法实现数值求解过程中,时间步长  $\Delta t$ 应满足 CFL<sup>[32]</sup>(Courant Friedrichs Lewy)收敛条件, 以保证函数的收敛性。Toure 等人在使用 DRLSE 模 型进行海岸线提取时,将参数设置为 $\mu$ =0.2,  $\lambda$ =5,  $\alpha$ =3,  $\Delta t$ =1<sup>[33]</sup>。考虑到两者研究背景一致性,本文使用相同 参数进行实验。观察 DRLSE 模型主动轮廓的运动演 化过程,当 DRLSE 主动轮廓运动到指定地物边界, 且在地物边缘附近无明显移动,则停止迭代。由此可 得到水体和地物之间的边缘轮廓线。相较于传统水 平集方法, DRLSE 模型可以随着目标的演化自动进行 合并或者分裂,并且其演化速度也得到很大提高。此 外惩罚能量项的增加, 解决了 DRLSE 模型重新初始 化的问题。

#### 2.2 水边线信息精确提取

基于 DRLSE 模型提取出的轮廓中,不但包含目 标水边线,还受噪声点轮廓、货轮轮廓、内陆湖泊轮 廓以及沿海养殖场轮廓等影响。在 DRLSE 模型中,水 体的初始矩形轮廓是 DRLSE 模型的输入条件。为此, 本文对 DRLSE 模型的初始矩形轮廓的作用进行拓展, 一方面利用最小初始矩形轮廓周长可以删除噪声轮 廓与周长数值较小的非水体轮廓,加快解算速度; 另一方面根据该初始矩形轮廓的几何中心与地物轮 廓面域之间的关系,可以在诸多轮廓中选取出目标 水体轮廓。

(1)基于初始轮廓的几何中心的筛选

若矩形轮廓的几何中心 X<sub>i</sub>位于地物轮廓 C<sub>i</sub>构成 的面域外,表明该轮廓并非水体轮廓, 剔除 C<sub>i</sub>,反之, 则保留此轮廓。

(2)基于初始轮廓的周长轮廓的筛选

首先需要剔除噪声点轮廓和小周长轮廓。取矩 形轮廓的周长最小值 *C*<sub>min</sub>=min{*C*},将其作为轮廓剔 除的标准。若第 *i* 个边缘轮廓的周长小于矩形轮廓最 小值,则剔除该轮廓;反之,则保留该轮廓。一般来 说,使用轮廓的几何中心这一属性即可完成筛选过 程,但是使用选定的影像数据试验时,结果显示该 算法的运行效率低、时间长。因此,先使用初始轮廓 的轮廓周长筛选,再基于初始轮廓的几何中心的筛 选,可有效降低数据冗余度,提高算法运行速度。

经过以上的判断筛选,将得到的地物轮廓与影像的外框矩形轮廓相重叠的地物轮廓线剔除,进而得到最终的目标瞬时水边线。

## 3 实验结果与分析

#### 3.1 瞬时水边线提取

为了验证顾及轮廓信息和DRLSE模型的遥感影像瞬时水边线快速提取方法效果,采用研究区预处理后的GF-2数据进行实验分析。实验硬件环境: CPU为 Inter(R)Core(TM)i5-7300HQ,主频为 2.50 GHz,内存为16 GB;软件环境为ENVI 5.3,集成开发工具Visual Studio(2019),以及在此基础上开发的DRLSE模块。

(1)基于 DRLSE 模型水边线粗提取

利用归一化差异水体指数(NDWI)增强水体和其 他地物的对比度,得到归一化差异水体指数效果图 如图 2(a)。DRLSE 模型初始轮廓需要手动选取,为 了进行多片不连通海域瞬时水边线的提取,本文开 发的DRLSE模型可以同时进行多个不连通海域的初 始矩形轮廓选取。手动选取 DRLSE 模型的初始矩形 轮廓如图 2(b)所示,该轮廓在影像中使用黑色矩形 表示。选取方式为使用矩形在水体内部任意处进行 标定即可。该遥感影像中有两块彼此隔离的水体面 域,使用初始矩形轮廓分别标定,记录初始矩形轮 廓的中心点坐标,可以确定水体面域位置。同时这两 块初始矩形轮廓属性信息可用作后续其他轮廓筛选 的条件。



(a) NDWI

(b) 初始矩形轮廓选取

(c) DRLSE模型运行结果



DRLSE 模型的运行结果如图 2(c)所示,得到水边线 粗提取结果如图 3(a)所示,可以看出,图中不但包含目标 瞬时水边线信息,还包括噪声点如轮船等、海陆分割线轮 廓、岛屿轮廓、内陆湖泊轮廓以及沿海养殖场轮廓。



图 3 水边线提取结果 Fig. 3 Extraction results of water edge lines

(2)顾及轮廓信息的瞬时水边线精确提取

DRLSE 模型提取过程中的轮廓部分属性如表1所示,该轮廓属性包括了轮廓几何中心像元点坐标和轮廓周长,其中轮廓周长为轮廓像元点个数。初始矩形轮廓1 和轮廓2分别对应图2(b)中上、下两个轮廓,沿海养殖场轮廓和岛屿轮廓是算法运行之后产生的部分水体轮廓。初始矩形轮廓的周长始终小于水体真实轮廓

周长,因此小于该周长的噪声点轮廓和部分岛屿轮廓 可有效剔除。养殖场等零星地物轮廓可使用初始矩形 轮廓的几何中心像元位置进行判断,若初始矩形轮廓 的几何中心位于该轮廓包围的面域内,可确定该轮廓 为水体轮廓,若初始矩形轮廓的几何中心不在轮廓包 围的面域内,则该轮廓为非水体轮廓进行剔除。通过上 述的筛选,得到最终的水边线信息如图 3(b)。

#### 表1 轮廓属性

Tab. 1 Contour attributes

属性	初始矩形轮廓1	初始矩形轮廓 2	沿海养殖场轮廓	岛屿轮廓
几何中心点像元坐标	(5 918, 1 095)	(3 644, 4 870)	(5 348, 1 432)	(4 833, 3 082)
轮廓周长(像元)	658	2808	1675	325

#### 3.2 结果评价

为了验证本文方法的有效性,选取泛洪算法、 Canny算子和CV模型三种方法和本方法对比方法进 行比较分析,如图 4 所示。研究区中涉及四类典型海 岸带,图 5(a)、图 5(f)、图 5(k)和图 5(p)框选区域分 别对应人工岸线、砂质岸线、基岩岸线和淤泥质岸 线,其后分别对应 4 种方法的瞬时水边线提取结果。 将目视解译提取出的水边线作为基准线,对水边线 提取结果进行定性分析。

对于边界清晰、形状规则的人工海岸区域[图 5(b)—图 5(e)],4种方法均能够以较高的精度提取人

工岸线区域的水边线,误差在 1~2 个像元。对于亮度 较强的砂质海岸[图 5(g)—图 5(j)],除 Canny 算子外, 泛洪算法和 CV 模型与本文方法所提取的水边线与 基准线较为接近,误差在 2~3 个像元,提取出的水边 线结果符合一般误差要求。对于边界清晰度较低、 岸线曲折的基岩海岸[图 5(1)—图 5(o)],泛洪算法和 Canny 算子不能较为准确地提取出水边线,而 CV 模 型和本文方法仍能保证误差在两个像元以内浮动。 对于边界不清晰,且与水体颜色相近的淤泥质海岸 [图 5(q)—图 5(t)],其他 3 种对比方法提取出的水边 线均较差,而本文方法仍然能较准确地提取淤泥质 瞬时水边线。

#### 研究报告 REPORTS





此外,使用 Canny 算子获取到的研究区地物边 缘轮廓数量大(总共2049个轮廓),后期需要人工从 诸多边缘信息中目视判读出海岸带瞬时水边线位置, 之后使用矢量编辑器对其进行删除操作,人工作业 量大,且提取出的地物轮廓边缘非连续如图4(b),水 边线提取效率低;而泛洪算法和 CV 模型只能处理 一片连通水域。采用本文提出的瞬时水边线快速提 取方法,一方面解决了边缘提取算法中边缘非连续 性的问题,另一方面集成了地物轮廓边缘信息的提 取以及轮廓筛选的功能,可实现对指定瞬时水边线

最后, 在现有运行平台下, 记录各方法模型对

应研究区一景 GF-2 瞬时水边线提取时间,并将提取 的水边线按 300 m 间距进行抽样,计算这些点到基 准线的欧式距离,采用均方根误差对提取结果位置 精度进行定量评价,如表 2 所示。

从4种海岸水边线提取结果来看,在人工海岸上, 本文和其他 3 种方法提取结果的均方根误差均小于 10 m,说明这几种方法均对人工海岸水边线提取效果 较好。针对砂质海岸,Canny 算子提取结果的均方根 误差为 133 m,效果较差,而泛洪算法、CV 模型和本 文方法分别为 13 m、5 m 和 4 m。对于基岩海岸,泛 洪算法和 Canny 算子的均方根误差较大,这是因为水 和岩石混合、边界模糊,而 CV 模型和本文方法的均

### 研究报告 REPORTS



Fig. 5 Comparison of extraction results of instantaneous water lines in four typical coastal zones

#### 表 2 精度评定 Tab. 2 Accuracy evaluation

	人工岸线	砂质岸线	基岩岸线	淤泥质岸线	运行时间/a
	均方根误差/m	均方根误差/m	均方根误差/m	均方根误差/m	运行时间/8
泛洪算法	10	13	42	372	17.07
Canny 算子	10	133	66	442	4.12
CV 模型	10	5	5	110	28 801.40
本文方法	3	4	5	31	7.31

方根误差较小,均为5m。对于淤泥质海岸,其他三种 方法提取结果均方根误差均较大,但本文方法的均方 根误差相对较小,均方根误差为31m,总体来说,4种 方法对淤泥质海岸瞬时水边线提取结果均较差。从运 行时间上来看,CV模型运行的时间最长,原因是该模 型需要不断地进行初始化。而泛洪模型、Canny 算子 和本文方法运行时间较短。由提取精度、运行时间以 及后期处理的工作量上可以看出,本文方法提取水边 线能在保证精度的基础上有更高的效率。

## 4 结论和讨论

针对经典算法用于高分影像瞬时水边线提取结

果不连续、效率不高和无法同时提取多片水域等问题,提出了顾及轮廓信息和 DRLSE 模型的遥感影像瞬时水边线快速提取方法,并以福建泉州一景高分2 号 4 m 多光谱数据为例进行了验证。结果表明,将初始轮廓信息(周长和中心位置)引入 DRLSE 中,可有效消除噪声点轮廓等对瞬时水边线提取结果的影响,效率更高,且保证了瞬时水边线提取结果的连续性。目视解译的结果表明,采用本方法提取结果的精度 要优于泛洪算法、Canny 算子,而 CV 模型虽然在精度上有较好的表现,但是耗时较长,在本文选取的研究区实验中运行时间为 28 801.4 s,而本文方法只耗费了 7.31 s,在效率上远远高于 CV 模型。

尽管本方法对于给定的研究区中人工岸线、砂 质岸线和基岩岸线瞬时水边线提取结果较好,但在 淤泥质岸线区域的提取精度仍有待提高。在其他地 区的研究发现,当影像空间分辨率进一步提高时(如 优于 1 m 时),影像中的白浪或泡沫等对瞬时水边线 提取结果影响较大,导致提取的瞬时水边线偏差较 大,因此对于更高空间分辨率的遥感数据,应探讨其 他白浪去除方法,以获取较好的提取结果。此外,本 文给出的是大陆海岸线瞬时水边线提取方法,对于岛 屿海岸线瞬时水边线提取,可以对本方法和程序进行 修改,以适应岛屿海岸线瞬时水边线提取工作。

#### 参考文献:

- 傅姣琪,陈超,郭碧云. 缨帽变换的遥感图像水边线 信息提取方法[J]. 测绘科学, 2019, 44(5): 177-183.
   FU Jiaoqi, CHEN Chao, GUO Biyun. Water boundary information extraction method of remote sensing image based on silk hat transform[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(5): 177-183.
- [2] 杨立君,张荣春,姜杰,等.滩涂水边线 Landsat-5影像提取方法——以长江口崇明东滩为例[J].海洋学报,2021,43(3):146-156.
  YANG Lijun, ZHANG Rongchun, JIANG Jie, et al. Landsat 5 image extraction method of beach water

Landsat-5 image extraction method of beach water boundary: A Case study of Chongming East Beach in Yangtze Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(3): 146-156.

- [3] 申家双, 翟京生, 郭海涛. 海岸线提取技术研究[J]. 海洋测绘, 2009, 29(6): 74-77.
  SHEN Jiashuang, ZHAI Jingsheng, GUO Haitao. Research on extraction technology of coastline[J]. Ocean Surveying and Mapping, 2009, 29(6): 74-77.
- [4] VOS K, HARLEY M D, SPLINTER K D, et al. Subannual to multi-decadal shoreline variability from pub-

licly available satellite imagery[J]. Coastal Engineering, 2019, 150: 160-174.

- [5] AGHDAMI-NIA M, SHAH-HOSSEINI R, ROSTAMI A, et al. Automatic coastline extraction through enhanced sea-land segmentation by modifying Standard U-Net[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 109: 102785.
- [6] LUO K, DING B, LONG G. Analysis of Ningyuan Estuary coastline transition based on the multi-resource remote sensing image[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2018(4): 187-192.
- [7] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [8] WANG Z, WANG Z, LI H, et al. A modified approach of extracting landfast ice edge based on Sentinel-1A InSAR coherence image in the Gulf of Bothnia[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(10): 1076.
- [9] AEDLA R, DWARAKISH G S, REDDY D V. Automatic shoreline detection and change detection analysis of netravati-gurpurrivermouth using histogram equalization and adaptive thresholding techniques[J]. Aquatic Procedia, 2015, 4: 563-570.
- [10] KULELI T, GUNEROGLU A, KARSLI F, et al. Automatic detection of shoreline change on coastal Ramsar wetlands of Turkey[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(10): 1141-1149.
- [11] CHAI Y, REN J, HWANG B, et al. Texture-sensitive superpixeling and adaptive thresholding for effective segmentation of sea ice floes in high-resolution optical images[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, 14: 577-586.
- [12] SÁNCHEZ-GARCÍA E, BALAGUER-BESER Á, ALMONACID-CABALLER J, et al. A new adaptive image interpolation method to define the shoreline at sub-pixel level[J]. Remote Sensing, 2019, 11(16): 1880.
- [13] PREWITT J M. Object enhancement and extraction[J]. Picture Processing and Psychopictorics, 1970, 10(1): 15-19.
- [14] 康牧, 许庆功, 王宝树. 一种 Roberts 自适应边缘检测 方法[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(10): 1240-1244.
  KANG Mu, XU Qinggong, WANG Baoshu. A Roberts adaptive edge detection method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(10): 1240-1244.
- [15] YASIR M, SHENG H, FAN H, et al. Automatic coastline extraction and changes analysis using remote sensing and GIS technology[J]. IEEE Access, 2020, 8: 180156-180170.
- [16] 盛辉, 张驰, 万剑华. 基于多时相遥感数据的海岸线

自动提取方法[J]. 海洋科学, 2021, 45(5): 16-22.

SHENG Hui, ZHANG Chi, WAN Jianhua. Automatic coastline extraction method based on multi-temporal remote sensing data[J]. Marine Sciences, 2021, 45(5): 16-22.

[17] 王彬, 王国宇. 基于改进的深度学习网络的 SAR 图 像瞬时海岸线自动提取算法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(8): 2108-2115.
WANG Bin, WANG Guoyu. Automatic shoreline extraction from SAR images based on improved deep learning network[J]. Systems Engineering and Elec-

tronics, 2021, 43(8): 2108-2115.

- [18] KASS M, WITKIN A, TERZOPOULOS D. Snakes: Active contour models[J]. International Journal of Computer Vision, 1988, 1(4): 321-331.
- [19] YU H, HE F, PAN Y. A novel segmentation model for medical images with intensity inhomogeneity based on adaptive perturbation[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(9): 11779-11798.
- [20] 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.
- [21] ZHAO Y, RADA L, CHEN K, et al. Automated vessel segmentation using infinite perimeter active contour model with hybrid region information with application to retinal images[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2015, 34(9): 1797-1807.
- [22] MALLADI R, SETHIAN J A, VEMURI B C. Shape modeling with front propagation: A level set approach[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(2): 158-175.
- [23] CHAN T F, VESE L A. Active contours without edges[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2): 266-277.
- [24] LI C, XU C, GUI C, et al. Distance regularized level set evolution and its application to image segmentation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(12):

3243-3254.

- [25] LI C, XU C, KONWAR K M, et al. Fast distance preserving level set evolution for medical image segmentation[C]//Nanyang Technological University. 2006 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Singapore: IEEE, 2006: 1-7.
- [26] TEILLET P, GUINDON B, GOODENOUGH D. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1982, 8(2): 84-106.
- [27] GAO B-C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 257-266.
- [28] 戴铭. 基于水平集方法的活动轮廓模型在图像分割中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
  DAI Ming. Application of active contour model based on level set method in image segmentation[D]. Guang-zhou: South China University of Technology, 2020.
- [29] CHAN T F, VESE L A. Active contours without edges[J]. IEEE transactions on image processing, 2001, 10(2): 266-277.
- [30] LIU Y, HE C, GAO P, et al. A binary level set variational model with L1 data term for image segmentation[J]. Signal Processing, 2019, 155: 193-201.
- [31] 刘成. 基于水平集的含噪图像分割算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
  LIU Cheng. Research on segmentation algorithm of noisy image based on level set[D]; Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [32] GILBOA G, SOCHEN N, ZEEVI Y Y. Forward-andbackward diffusion processes for adaptive image enhancement and denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(7): 689-703.
- [33] TOURE S, DIOP O, KPALMA K, et al. Coastline detection using fusion of over segmentation and distance regularization level set evolution[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018, XLII-3/W4: 513-518.

# Fast extraction of instantaneous waterline from remote sensing based on contour information and DRLSE model

# YANG Zhi-hai<sup>1</sup>, WANG Guang-jun<sup>1</sup>, GAO Zhi-xiong<sup>2</sup>, FENG Lei<sup>3</sup>, LIANG Si-hai<sup>4</sup>

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. CNNC 7th Design and Research Institute Co., LTD., Taiyuan 030012, China; 3. Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 4. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

#### Received: Nov. 2, 2022

Key words: instantaneous waterline; DRLSE model; initial contour information; flood fill algorithm; Canny algorithm; Chan-Vese model

Abstract: To solve the problems of the discontinuous extraction, low efficiency and inability to extract multiple water areas simultaneously in traditional methods for extracting the instantaneous water lines from high-resolution remote sensing images, a fast extraction method of the instantaneous waterline is proposed, which considers contour information and distance regularization level set evolution (DRLSE) model, and the method is applied to extract instantaneous waterline of the sea area near Quanzhou City, Fujian Province. Firstly, DRLSE model is used to extract ground contour information to solve the problem of discontinuous waterline by classical threshold methods; Then, the center position and perimeter information of the initial rectangle of DRLSE model is used with the noise points and other undesired contours are automatically eliminated, and multiple water areas are extracted, thus the post-processing efficiency of instantaneous waterline of continental coastline compared with Flood fill algorithm, Canny algorithm and CV model, and the extraction results are continuous and more accurate.

(本文编辑:丛培秀)