

# 基于马尔科夫分割的单极化SAR数据洪涝水体检测方法

唐德可<sup>①②③</sup> 王峰<sup>\*①②</sup> 王宏琦<sup>①②③</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

<sup>②</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>③</sup>(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

**摘要:** 我国是个洪涝灾害多发的国家, 每年7月、8月份洪涝灾害时常发生。因此, 实现洪涝受灾区域的水体快速检测对灾害救援和评估具有重要的意义。高分3号SAR卫星数据采用主动式对地观测技术, 全天时、全天候成像的特点在洪涝减灾应用中具有明显的优势。以湖南省洪涝灾害区域快速检测为目的, 该文提出基于高分3号单极化SAR数据的洪涝区域水体快速检测方法, 包括SAR预处理, 顾及SAR分布特性且保边缘的马尔科夫模型洪涝水体提取, 基于SAR几何构象模型的阴影虚警干扰去除等步骤, 并利用人工检测结果进行相对精度评价。测试结果表明, 所提方法可以实现洪涝受灾区域的快速、精确提取。

**关键词:** SAR; 高分3号卫星; 马尔科夫随机场; 洪涝; 减灾

**中图分类号:** TP7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2019)03-0619-07

**DOI:** 10.11999/JEIT180420

## Single-polarization SAR Data Flood Water Detection Method Based on Markov Segmentation

TANG Deke<sup>①②③</sup> WANG Feng<sup>①②</sup> WANG Hongqi<sup>①②③</sup>

<sup>①</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

<sup>②</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>③</sup>(Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** China is a flood disaster-prone country, where floods occur frequently every year, from July to August. Therefore, rapid disaster detection and assessment of floods affected areas is of great significance. GF-3 SAR satellite data has obvious advantages of all-day, all-weather imaging characteristics in flood disaster reduction applications because of its active observation technology. For the purpose of rapid water detection in flooding area, a rapid detection method of flood area based on GF-3 single-polarized SAR data is proposed, including SAR preprocessing, flood extraction based on Markov random fields, shadow false alarm removal. Its detecting accuracy is evaluated with manual detection result. The test results show that this method can realize the rapid and accurate extraction of waters in flood disaster area.

**Key words:** SAR; GF-3; Markov Random Field (MRF); Flood disaster; Disaster reduction

### 1 引言

高分3号(GF-3)卫星是我国首颗自主研制的C频段多极化合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)卫星, 具有全天时、全天候对地观测的能力<sup>[1]</sup>。受气候地理条件和社会经济因素的影响, 我国洪涝灾害具有范围广、发生频繁、突发性强、损失大的特点, 洪涝受灾面积年均 $8.9 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 直接经济损失上百亿元<sup>[2]</sup>。受灾区域常常伴有复杂

的天气条件, 减灾救灾具有时效性的要求, 因此灾区信息快速提取是最需要也是最适合应用SAR卫星遥感技术的领域之一。随着遥感技术的不断进步, 尤其是高分3号卫星的成功发射, SAR卫星遥感技术在减灾救灾中发挥越来越重要的作用<sup>[3]</sup>。在SAR洪涝灾区水体信息提取方面, 常用的方法是基于全极化SAR数据进行的<sup>[4]</sup>, 但全极化SAR数据的获取量有限, 常常不能满足灾害应急的快速响应要求。以高分3号数据为例, 仅有全极化条带1/2和波模式可进行全极化成像, 其最大标称成像幅宽小于40 km。因此, 单极化SAR数据洪涝区域水体快速提取方法

收稿日期: 2018-05-03; 改回日期: 2018-10-24; 网络出版: 2018-11-02

\*通信作者: 王峰 wfeng\_gucas@126.com

具有重要的减灾应用价值。

针对洪涝灾害区域快速提取水体的需求, 本文提出一种基于高分3号单极化SAR数据的洪涝区域水体快速提取方法。首先, 对L1A级SAR影像进行预处理, 快速完成幅度数据生成、图像可视化增强和滤波处理等步骤; 其次, 基于改进马尔科夫随机场进行灾区水体提取, 然后进行小斑块去除和基于DEM数据的阴影检测降低虚警率, 提高提取结果的正确率。上述步骤实现过程中采用了基于空间重叠的分块并行技术, 保证处理效率。将自动快速检测结果与人工标注结果进行比较分析, 验证本文提出检测方法的准确性。

## 2 流程设计和实现

常规获取的高分3号数据为L1A级产品, 无法直接应用计算机视觉技术进行洪涝灾区提取, 需要通过图像预处理得到地理编码的强度图像; 为了提高运算效率, 在尽量不损失有用信息的情况下, 将16位强度图转换为8位图像, 通过边缘保持滤波方法增强均质区域的一致性; 最后, 通过自动阈值分割得到初步提取结果, 去除小斑块和山体阴影的虚警, 就可以得到最终的洪涝灾区水体范围, 实现过程中采用基于空间重叠的分块并行策略, 新提出的适用于单极化SAR图像水体快速提取的整体处理流程如图1所示。

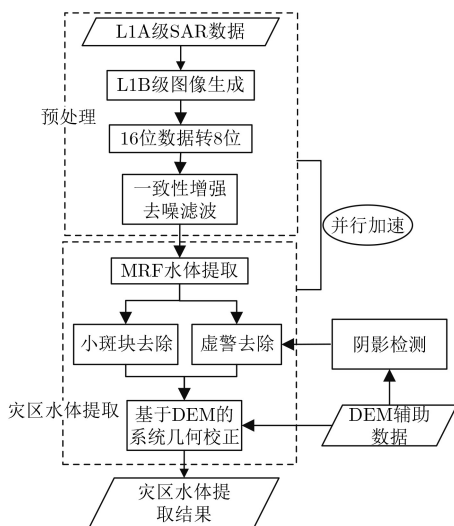


图1 洪涝灾区水体自动提取流程图

### 2.1 图像预处理

高分3号L1A级数据又称为复数据产品, 保留了雷达幅度、相位和极化信息。图像预处理步骤将L1A图像转换为强度图, 并进行降位和可视化处理, 强度转换公式为

$$DN = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (1)$$

其中,  $I$ 和 $Q$ 分别表示L1A级产品的实部和虚部,  $DN$ 表示转换后的辐射强度值。

强度图像是按照16位格式存储的, 绝大多数像素值极低, 这些像素表征的是场景结构信息, 包含了洪涝区域水体的信息; 少数具有强散射值的像素对应场景中的强散射点, 并不能提供有用信息。基于上述分析, 采用负指数可视化变换方法将16位强度图像转换为8位图像<sup>[5]</sup>, 可以保持低强度值场景结构信息, 其转换公式为

$$p' = 255 \times (1 - e^{-kp}),$$

$$k = \frac{\sqrt{2} \times \lg 2}{\sqrt{(1 + \lg 2) \times R}}, R = \frac{\sum p^2}{H \cdot W} \quad (2)$$

其中,  $p$ 是16位强度图像的灰度值,  $H$ 和 $W$ 表示图像的高度和宽度,  $p'$ 是转换为8位存储后图像的灰度值,  $k$ 为负指数变换参数。

为了提高匀质区域的一致性, 同时保持边缘结构的完整性, 降低相干斑噪声的影响, 采用一种针对超声和雷达图像相干斑噪声设计的相干斑抑制各向异性扩散滤波算法SRAD(Speckle Reducing Anisotropic Diffusion)<sup>[6,7]</sup>, 其偏微分方程可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \partial I(x, y, t) / \partial t &= \text{div}[c(q) \nabla I(x, y, t)] \\ I(x, y, 0) &= I_0(x, y), (\partial I(x, y, t) / \partial n)|_{\partial \Omega} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中,  $I_0(x, y)$ 是待滤波图像,  $I(x, y, t)$ 是在图像域 $\Omega$ 处理后尺度为 $t$ 的图像,  $\nabla$ 是梯度算子,  $\text{div}$ 是散度算子,  $\partial \Omega$ 是 $\Omega$ 的边界,  $n$ 代表 $\partial \Omega$ 的外法线方向,  $c(q)$ 是扩散系数, 如式(4)所示。

$$c(q) = \frac{1}{1 + [q^2(x, y, t) - q_0^2(t)] / [q_0^2(t)(1 + q_0^2(t))]} \quad (4)$$

其中,  $q_0(t)$ 是相干斑尺度函数, 对于普通单视图像取 $q_0=1$ 。  $q(x, y, t)$ 是变量的即时系数:

$$q(x, y, t) = \sqrt{\frac{(1/2)(|\nabla I|/I)^2 - (1/4^2)(\nabla^2 I/I)^2}{[1 + (1/4)(\nabla^2 I/I)^2]}} \quad (5)$$

### 2.2 受灾区域提取

马尔科夫随机场(Markov Random Field, MRF)模型可以有效地刻画影像的空间上下文信息, 其自动化程度高, 且分割效率高, 在SAR图像分割中得到广泛应用。在贝叶斯理论框架下的基于MRF模型的图像分割算法, 可以归结为求解最大后验概率

$$\hat{X} = \arg \max P(X|y) = \arg \max P(y|X)P(X) \quad (6)$$

其中,  $\hat{X}$ 为估计标记图像,  $P(y|X)$ 表示已知分割类别为 $X$ 时 $y$ 的条件概率分布;  $P(X)$ 表示类别 $X$ 的先验概率。

以块斑为分析单元可以有效地改善图像处理结果<sup>[8]</sup>，在初始分割结果上构建区域邻接图(Region Adjacency Graph, RAG)，采用区域MRF算法，实现洪水提取。如图2所示，对于一幅经过预处理后的洪涝图像，通过分型网络演化算法<sup>[9]</sup>分割得到图像块斑，利用RAG描述各个块斑的属性及相邻块斑间的关系，构建区域MRF模型。通过最小化目标函数，使得同一类别的 $R_i$ 具有相同的标记 $X_s$ 。单极化SAR数据的统计特性符合Gamma分布，基于Gamma分布构建特征模型的能量函数 $E_f$ 为

$$E_f = \sum_{s \in S} V_1(x_s) = \sum_{i=1}^n \sum_{s \in R_i} \left[ \frac{l}{u_{x_s}} - (l-1) \ln y_s + l \ln u_{x_s} \right] \quad (7)$$

其中，整幅图像用 $S$ 表示， $l$ 为图像的视数， $y_s$ 表示像素 $s$ 的灰度值， $n$ 为块斑总数， $R_i$ 表示第 $i$ 个块斑， $u_{x_s}$ 表示类别 $x_s$ 的均值。

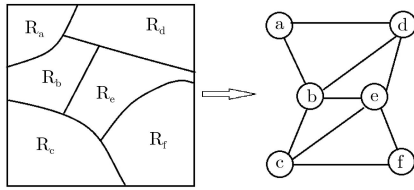


图2 RAG示意图

空间上下文模型用 $E_s$ 表示，即

$$E_s = \sum_{\langle s, t \rangle \in C} V_2(x_s, x_t) = \beta \sum_{\langle s, t \rangle \in C} [1 - \delta(x_s, x_t)] \quad (8)$$

其中， $\langle s, t \rangle$ 表示相邻块斑 $s, t$ 的邻域系统， $C$ 为 $S$ 上所有的邻域系统的集合， $\beta$ 为常数。

因此得到目标函数：

$$E = E_f + E_s = \sum_{i=1}^n \sum_{s \in R_i} \left[ \frac{l}{u_{x_s}} - (l-1) \ln y_s + l \ln u_{x_s} \right] + \beta \sum_{\langle s, t \rangle \in C} [1 - \delta(x_s, x_t)] \quad (9)$$

另外，参数 $\beta$ 控制分割过程中相邻块斑属于不同标记的惩罚程度。为了提升水体边缘提取的准确性，本文提出一种边缘保持的区域MRF模型，利用相邻区域的灰度均值差来构建惩罚函数<sup>[10]</sup>：

$$g(\nabla_{st}) = e^{-(\nabla_{st}/K)^2} \quad (10)$$

其中， $\nabla_{st}$ 为相邻区域 $R_s$ 和 $R_t$ 的灰度均值差。 $K$ 控制惩罚函数的衰减速度，定义为

$$K^{(t+1)} = \begin{cases} f(2t), 0 \leq t < 50 \\ 1.1K^{(t)}, t \geq 50 \end{cases} \quad (11)$$

其中， $t$ 为迭代次数， $K^{(0)} = 0$ ， $K$ 可以动态调整惩罚程度，随着不断迭代， $K$ 值不断增大，惩罚程度随之减小，最终趋近于1。

将惩罚函数代入到目标函数式(9)中，可以得到最终的能量函数：

$$E = E_f + E_s = \sum_{i=1}^n \sum_{s \in R_i} \left[ \frac{l}{u_{x_s}} - (l-1) \ln y_s + l \ln u_{x_s} \right] + \beta \sum_{\langle s, t \rangle \in C} [1 - \delta(x_s, x_t)] \cdot e^{-(\nabla_{st}/K)^2} \quad (12)$$

采用迭代区域生长算法对目标函数进行优化求解，可以得到初步标记的洪涝受灾区域的二值化图像。但由于噪声等因素的干扰，标记结果中会存在零星的“小碎片”干扰；另一方面，大于一定面积的水域更有可能是洪涝灾害区域，因此，可以通过标记区域的面积去除部分零星干扰的虚警结果。

由于镜面反射，受灾区域水体在GF3号SAR图像中呈现为低反射率。但是，SAR传感器依据侧视几何关系成像，在高程起伏剧烈区域可能出现无反射信号的阴影，从图像无法区分水体和山体遮挡阴影区域，产生虚警。因此，为了进一步提升洪涝灾害区域检测的准确性，本文提出一种采用几何构象方法去除地形遮挡引起阴影的新方法。地形起伏遮挡引起的阴影在距离向的几何关系如图3所示<sup>[11]</sup>， $a_0 \sim a_1$ 区域是由于 $A_0$ 山体遮挡形成的阴影，以阴影区域中的物方点 $A$ 为例分析其几何关系。在距离星下点 $O$ 距离为 $N$ 的位置，假设出现阴影现象的临界高程为 $h'$ ，那么则有如式(13)，式(14)的关系：

$$\tan \theta = \frac{N_0}{H - h_0} = \frac{N}{H - h'} \quad (13)$$

$$h' = H - \frac{(H - h_0)N}{N_0} \quad (14)$$

其中， $H$ 为卫星高度， $N_0$ 和 $N$ 为距离星下点的距离， $h_0$ 为 $A_0$ 点目标的高程值，可以通过DEM文件获取。因此，在 $N_0$ 山体的远距端 $N$ 处有阴影现象发生的条件为

$$h < h' \quad (15)$$

其中， $h$ 为 $A$ 点的实际高程值，可以通过DEM数据获取。

基于高分3号卫星成像时刻的卫星位置信息以及观测区域的DEM文件，通过上述距离向阴影区域几何关系，可以模拟得到阴影区域分布图。与洪涝灾区检测结果比对，去除检测结果中由地形起伏

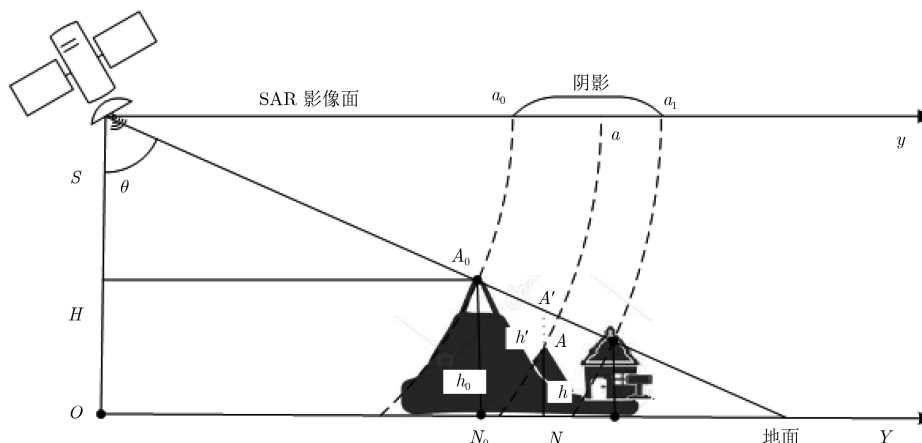


图3 SAR阴影区域几何关系示意图

引起的阴影区域,降低虚警率,得到更为准确的洪涝灾区检测结果。如图4所示,从图4(a)和图4(c)中可以看出,待检测区域地形起伏复杂,而且水域夹杂在山脉之间,基于图像灰度信息进行洪涝灾区检测的难度较大。

图4(b)中标注的是基于图像处理方法自动提取洪涝灾区的结果,可以完整地提取图像中的水体区域,但是出现了大量山体阴影区域的虚警。图4(d)中灰色标注的是基于几何关系自动去除的阴影区域,检测正确率提升明显。在图4(e)的局部放大图中,椭圆标注的是实际存在水体的区域,在对应的图4(f)中,对应的水体区域检测结果正确。尤其是图4(e)中标注3区域,水体和阴影交叠在一起,通过本文提取的阴影区域方法,可以较好地地区分水体和阴影,明显提升洪涝灾区的自动检测精度。

### 2.3 并行加速策略设计

为了提高洪涝灾害的提取速度,需要进行分块并行处理。直接分块的处理方式,在部分需要考虑

全局统计信息步骤会产生分块边缘过渡不均匀的问题,影响处理质量。为了保证并行处理结果的效果,采用一种部分重叠分块的处理方式,保证处理后拼接结果的一致性,部分重叠分块处理过程如图5所示。

对于一副尺寸为 $W \times H$ 的图像,部分重叠分块并行处理过程如下:

(1)将图像分割成多个尺寸为 $w \times h$ 的切片,以图中切片 $I$ 为例,切片与上下左右4个方向的切片( $I_u, I_d, I_l, I_r$ )之间均有 $2d$ 宽度的重叠;

(2)采用前文提到的算法处理模块并行处理各个切片 $I$ ;

(3)将处理后小块中间尺寸为 $(w-2d) \times (h-2d)$ 的图像块存储到结果图像中;

(4)重复步骤(2),步骤(3),迭代处理各个切片块,拼接处理后的切片即可得到完整的处理结果图。

在并行加速处理中,分块处理的数量主要取决于计算设备的并行计算核数,建议分块的数量略小

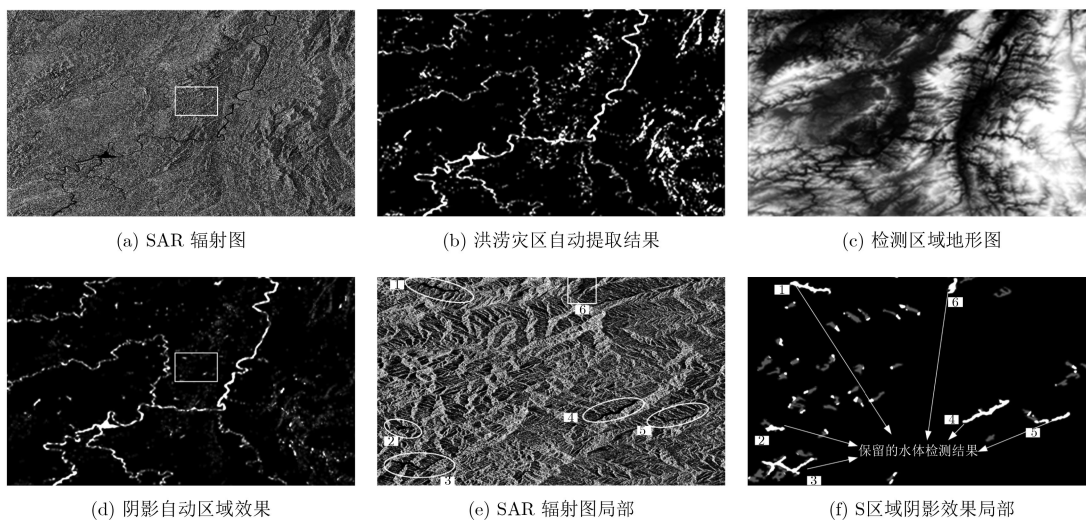


图4 SAR阴影区域检测结果示意图

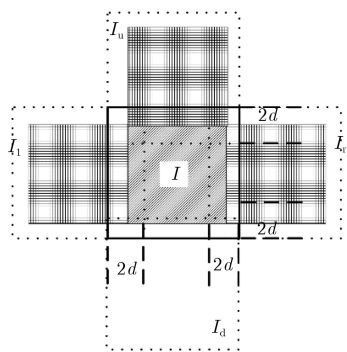


图5 部分重叠处理过程示意图

于计算机的并行计算核数的整数倍，可以最大地发挥计算性能，例如针对36核CPU，建议的分块数是30个，针对64核CPU，建议的分块数是56个。另一方面，为了兼顾处理效率和处理效果，建议块间重叠率为15%~20%。

图6分别展示了高分3号数据采用直接分块和部分重叠分块SRAD滤波处理后的结果，对比图6(a)未滤波图像，SRAD滤波处理可以在保持边缘结构清晰的情况下去除斑点噪声干扰，增加匀质区域的一致性；但是，图6(b)中直接分块滤波结果存在明显的分块效应，图6(c)中采用部分重叠分块处理可以避免分块效应对后续信息提取的影响。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 检测准确率测试

以2017年7月3日湖南省岳阳市暴雨过后一幅高分3号精细条带II模式的数据为例，图像产品号为(GF3\_KAS\_FSII\_004729\_E109.9\_N27.3\_20170703\_L1A\_HHHV\_L10002458404)，影像标称分

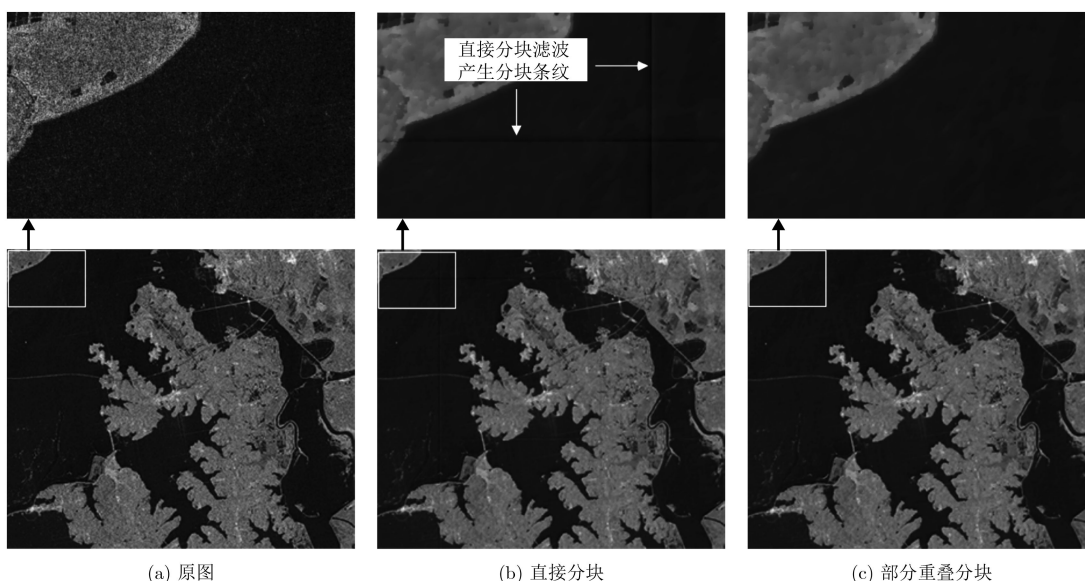
辨率为10 m，标称成像带宽为100 km，成像区域地形起伏较小，阴影对洪涝灾害影响较小。通过本文提出的自动处理算法提取洪涝灾害发生区域，并与人工标注的结果进行提取精度对比，提取结果如图7所示。

为了验证阴影区域去除算法的有效性，以2017年8月16日湖南省怀化市暴雨过后一幅高分3号全极化条带I模式的数据为例，图像产品号为(GF3\_KAS\_QPSI\_005364\_E113.5\_N28.7\_20170816\_L1A\_AHV\_L10002546376)，影像标称分辨率为8 m，标称成像带宽为30 km，成像区域地形起伏较大，阴影区域对洪涝灾区自动提取影响明显。通过本文提出的自动处理算法提取洪涝灾害发生区域，并与人工标注的结果进行提取精度对比，提取结果如图8所示。

从图7，图8中可以看出，自动提取与人工标注提取结果在大面积水体区域的提取结果基本一致，在小面积水体提取方面，自动处理算法相对于人工处理可以提取精确的水体区域。

受灾区域水体检测是一个二分类问题，将水体作为正例(positive)，那么有如下的定义：(1)True Positives(TP)，被正确地划分为正例的个数；(2)False Positives(FP)，被错误地划分为正例的个数；(3)False Negatives(FN)，被错误地划分为负例的个数；(4)True Negatives(TN)，被正确地划分为负例的个数。本文中采用的评价指标如下：

(1)正确率(accuracy)，表示检测正确的样本数除以所有的样本数，计算公式为  $A = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN}$ ，通常来说，正确率越高，

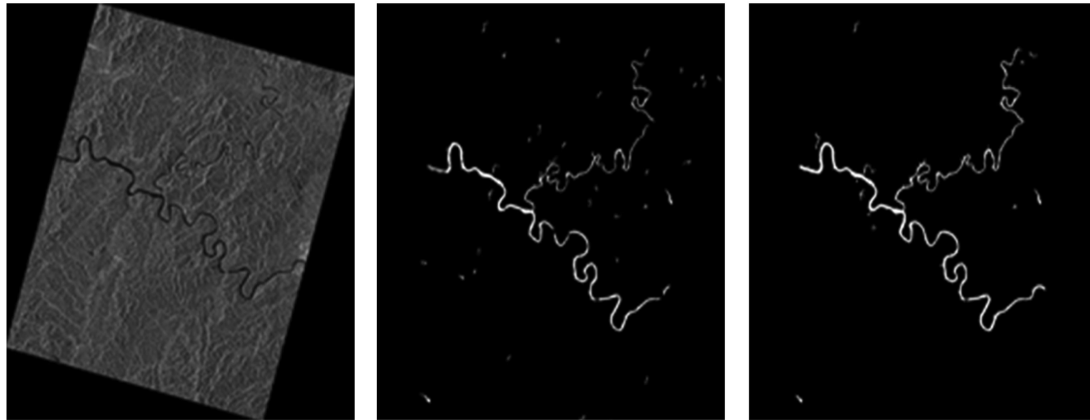


(a) 原图

(b) 直接分块

(c) 部分重叠分块

图6 直接分块滤波与部分重叠分块结果对比

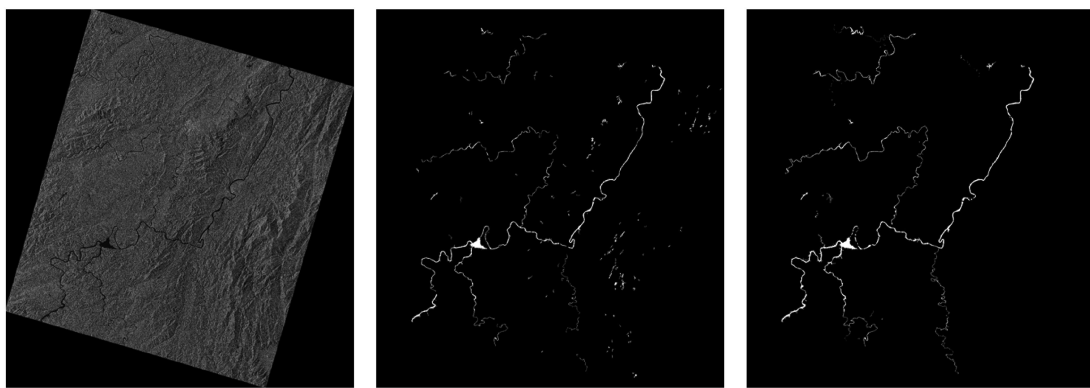


(a) 单极化强度图

(b) 洪涝灾区自动检测结果

(c) 人工标注洪涝结果

图7 湖南省岳阳市地区洪涝灾区水体检测试验



(a) 单极化强度图

(b) 洪涝灾区自动检测结果

(c) 人工标注洪水检测结果

图8 湖南怀化地区洪涝灾区水体检测试验

检测效果越好。

(2)精确率(precision),表示所有被检索到的样本中是正确检索样本的比例,计算公式为 $P = \frac{TP}{TP + FP}$ ,通常来说,精确率越高,检测效果越好。

(3)召回率(recall),表示的是样本中的正例被正确检测出来的概率,计算公式为 $R = \frac{TP}{TP + FN}$ ,通常来说,召回率越高,检测效果越好。

图7和图8对应的湖南省岳阳市和怀化市地区灾区水体提取的分析结果如表1所示。

与人工提取结果比较,自动水体提取的正确率可以达到99%以上,在存在山体阴影干扰的区域,通过基于DEM数据的阴影检测方法,水体检测精确率可以达到80%以上,召回率75%以上,可以满足快速灾害提取的要求。

表1 灾区水体自动提取结果质量分析(%)

数据区域	正确率	精确率	召回率
湖南岳阳	99	88	75
湖南怀化	99	81	78

### 3.2 运行效率测试

以湖南省岳阳市一幅高分3号全极化条带I模式的数据为例,基于多个型号计算机进行实验,验证并行处理的运行效率,采用的计算机型号包括:(1)Intel(R) Core(TM) i3-3110M, 4核CPU, 2.4 GHz主频;(2)i7-4770, 8核CPU, 3.4 GHz主频;(3)Intel(R) Xeon(R) E5-2670 V3, 36核CPU, 2.3 GHz主频;(4)Intel(R) Xeon(R) E7-4850 V3, 64核CPU, 2.2 GHz主频,各个算法模块分别在不同硬件设备基础上进行运行效率测试,结果如表2所示。随着可用并行核心数量的增加,运算量较大处理模块的运行时间呈近似线性降低的趋势,在64核CPU条件下,采用本文方法进行水体自动提取时间约为36 s,为高效快速获取洪涝灾区的水体信息提供了快捷的实现方式,为快速进行灾后救援和灾情评估提供有力的支持。

## 4 结束语

针对洪涝灾区水体信息的快速检测问题,本文提出了一种基于高分3号单极化SAR数据的洪涝灾区水体快速提取方法。首先,对L1A级数据进行预

表2 灾区水体自动提取效率分析(s)

计算硬件	生成1B	转换8位	一致性滤波	受灾区域提取	去除阴影	地理编码	总时间
4核CPU	1	1	713	2	43	2	762
8核CPU	1	1	218	1	15	1	237
36核CPU	1	1	55	1	8	1	67
64核CPU	1	1	27	1	5	1	36

处理,通过可视化降位和结构保持各向异性滤波方法提高待处理数据的图像质量,为后续信息提取提供基础;其次,为了更好地拟合SAR数据的特性,采用Gamma分布改进马尔科夫随机场模型,为了精确提取水体边缘,利用相邻区域的灰度均值差来构建惩罚函数;为了有效提高水体检测结果的准确率,根据SAR构象几何模型,设计了基于DEM数据的阴影虚警去除方法。遥感数据具有覆盖范围大的特点,本文设计了有效的并行加速策略,在不影响提取质量的前提下,可有效提升处理效率。

对湖南省岳阳和怀化地区洪涝灾区高分3号数据进行水体提取实验,与人工提取结果进行对比,验证了本文方法在洪涝灾害监测中的有效性,可以满足洪涝灾害水体信息快速提取的需求。在实际业务运行中,可以将自动洪涝区域水体提取与人工处理相结合,减少人工处理工作量,提高提取效率,并通过人工确认保证提取结果的准确性。

### 参考文献

- [1] 张庆君. 高分3号卫星总体设计与关键技术[J]. 测绘学报, 2017, 46(3): 269–277. doi: 10.11947/j.AGCS.2017.20170049. ZHANG Qingjun. System design and key technologies of the GF-3 satellite[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(3): 269–277. doi: 10.11947/j.AGCS.2017.20170049.
- [2] 张薇, 杨思全, 王磊, 等. 合成孔径雷达数据减灾应用潜力研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(6): 904–911. ZHANG Wei, YANG Siqian, WANG Lei, et al. Review on disaster reduction application potentiality of synthetic aperture radar[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(6): 904–911.
- [3] 胡德勇. 遥感技术在防灾减灾中的应用[J]. 高科技与产业化, 2013, 3(11): 44–47. HU Deyong. Application of remote sensing technology in disaster prevention and mitigation[J]. *High-Technology and Industrialization*, 2013, 3(11): 44–47.
- [4] 邓滢, 张红, 王超, 等. 结合纹理与极化分解的面向对象化SAR水体提取方法[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(4): 714–723. DENG Ying, ZHANG Hong, WANG Chao, et al. An Object-oriented water extraction method based on texture and polarimetric decomposition feature[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(4): 714–723.
- [5] 周广益, 钟华, 杨健. 基于负指数变换和 Mean-shift 算法的 SAR 图像可视化方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2011, 51(7): 983–987. doi: 10.12000/JR17024. ZUOU Guangyi, ZHONG Hua, and YANG Jian. Visualization method for SAR images based on a negative exponential transformation and mean-shift algorithm[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2011, 51(7): 983–987. doi: 10.12000/JR17024.
- [6] YU Y and ACTION S T. Speckle reducing anisotropic diffusion[J]. *IEEE Transactions on image processing*, 2002, 11(11): 1260–1270. doi: 10.1109/TIP.2002.804276.
- [7] 王峰, 尤红建. 基于级联变换的光学和SAR图像配准算法[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(4): 486–492. doi: 10.11972/j.issn.1001-9014.2015.04.18. WANG Feng and YOU Hongjian. Robust registration method of SAR and optical remote sensing Images based on cascade transforms[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, 34(4): 486–492. doi: 10.11972/j.issn.1001-9014.2015.04.18.
- [8] BLASCHKE T, HAY G J, KELLY M, et al. Geographic object-based image analysis-towards a new paradigm[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2014, 87(1): 180–191. doi: 10.11972/j.issn.1001-9014.2015.04.18.
- [9] BENZ U C, HOFMANN P, WILLHAUCK G, et al. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2011, 58(3): 239–258.
- [10] YU Q and CLAUSI D A. IRGS: Image segmentation using edge penalties and region growing[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2008, 30(12): 2126–2139.
- [11] 丁赤飏, 刘佳音, 雷斌, 等. 高分3号SAR卫星系统级几何定位精度初探[J]. 雷达学报, 2017, 6(1): 11–16. doi: 10.12000/JR17024. DING Chibiao, LIU Jiayin, LEI Bin, et al. Preliminary exploration of systematic geolocation accuracy of GF-3 SAR satellite system[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 11–16. doi: 10.12000/JR17024.

唐德可: 男, 1980年生, 高级工程师, 博士生, 研究方向为动态目标识别与监视应用。

王峰: 男, 1988年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为多源遥感图像识别处理。

王宏琦: 男, 1964年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为遥感图像目标检测和识别。