

doi: 10. 6046/gtzyyg. 2018. 04. 10

引用格式: 郭拯危,王乐,宋国磊. 基于混合模糊的 SAR 图像水陆分割算法[J]. 国土资源遥感,2018,30(4):62-67. (Guo Z W,Wang L,Song G L. SAR image land and water segmentation algorithm based on hybrid fuzzy [J]. Remote Sensing for Land and Resources,2018,30(4):62-67.)

基于混合模糊的 SAR 图像水陆分割算法

郭拯危,王 乐,宋国磊

(河南大学计算机与信息工程学院,开封 475000)

摘要: 针对丹江口水库复杂环境背景下的水陆分割,提出一种基于混合模糊的 SAR 图像水陆分割算法。首先,该算法以统计 SAR 图像的灰度特征作为分割参数,采用自适应多阈值最大类间方差法(maximum between-class variance,OTSU)对库区水陆进行粗分割;然后,以各均匀区域的灰度均值作为初始化聚类中心的模糊 C 均值算法进行聚类迭代得到分类结果;最后,采用连通区域法,将邻域内较小的像素对象删除,从而实现水陆的精分割。通过对哨兵 1A 的 GRDH 数据实验表明,该方法对于地物种类和支流较多的内陆水域 SAR 图像有较好的分割效果。

关键词: 水陆分割;多阈值 OTSU;模糊聚类;丹江口水库

中图法分类号: TP 751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2018)04-0062-06

0 引言

合成孔径雷达(synthetic aperture Radar, SAR)是一种通过发射波束,并接收回波来探测目标的主动式雷达。相比于光学图像来说,SAR 图像受时间与天气干扰极小,能够在夜间或者云、雨、雾霾等天气下采集到目标影像。SAR 技术的发展,使得人们能够更加方便、可靠地了解目标区域的信息,这对于国民经济的发展和国防建设来说十分重要^[1]。

水域作为 SAR 图像中一类非常重要的目标,在进行水域面积计算及水域相关目标识别时,水陆分割是极为关键的第一步。由于丹江口水库流域面积广阔、支流繁多且地物种类复杂^[2],针对丹江口水库区域的 SAR 图像水陆分割的研究极少。目前利用阈值分割理论,通过对最大类间方差(maximum between-class variance,OTSU)算法的改进或采用小波变换、边界追踪技术和滤波等技术相结合来完成水陆分割,在海洋边界和河道等方面取得了较好的分割效果^[3-11],但 SAR 图像分割至今并没有被普遍认可的通用分割算法。随着数学理论的发展,数学形态学和模糊理论被相继提出^[12-14]。由于数学形态学和模糊理论本身在图像分割方面无法完成有效的分割,而经典的分割算法对于噪声抑制和运行

时间上又存在较大的屏障,因此常将二者相结合来解决图像分割中噪声抑制和运行时间等问题。如倪维平等^[15]提出的将马尔可夫随机场模型和数学形态学相结合的分割算法在运算速度、迭代次数和分割精度方面都有了较好的改进;叶海军^[16]将边缘检测与腐蚀、膨胀算子相结合,在对图像的预处理和控制虚假边缘信息方面得到了较好的效果;安健等^[17]将一维 OTSU 与核聚类相结合,首先把 SAR 图像划分成若干个互不重叠的子区域,再利用核聚类对子区域间像素进行聚类,得到较好的分割效果。另外,在模糊理论中引入水平集、分水岭和蚁群等算法,在降低运算时间及噪声处理上均有较多的成果^[18-19]。目前已有算法在噪声处理及分割精度上有较大的改进和突破,但一般都仅限于某些特定环境背景,如河道和海洋边界等。对于具有地物种类丰富和支流繁多特征的 SAR 图像,无法完成较为精细的分割。针对上述问题,本文提出了多阈值 OTSU 与模糊理论相结合的水陆分割算法。

1 基本理论和方法

1.1 自适应多阈值 OTSU 分割算法

单阈值 OTSU 算法的基本思想是类间方差取最大值时,对应的灰度值 T 便是所选定的阈值。将单

收稿日期: 2017-05-16; 修订日期: 2017-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于高分辨星载 SAR 图像的丹江口水库安全与水环境监测研究”(编号: U1604145)资助。

第一作者: 郭拯危(1963-),女,研究生导师,主要从事网络协议、空间信息处理等方面研究。Email: henugzw@foxmail.com。

通信作者: 宋国磊(1992-),男,硕士研究生,主要从事 SAR 图像处理研究。Email: henusgl1992@qq.com。

阈值的 OTSU 算法加以推广,对于 n 类分割,各类别的概率、均值、方差和类间差分别标记为 w_k, μ_k, σ_k^2 ($k = 1, 2, \cdots, n$) 和 σ_w^2 , 各分割阈值的组合标记为 $T = \{t_l \mid l = 1, 2, \cdots, n-1\}$, 则有

$$w_k = \sum_{i=t_l}^{t_{l+1}} p_i, \tag{1}$$

$$\mu_k = \sum_{i=t_l}^{t_{l+1}} ip_i / w_k, \tag{2}$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=t_l}^{t_{l+1}} (i - \mu_k)^2 p_i / w_k, \tag{3}$$

式中: p_i 为 L 级灰度图像中灰度值为 i 的像素占总像素的比重, L 为灰度级; $t_l (1 < t_l < L)$ 为各分割阈值。则多阈值类间差为

$$\sigma_w^2 = \sum_{k=1}^n w_k \sigma_k^2. \tag{4}$$

无论是单阈值还是多阈值分割,算法所计算得到的类内差都是针对图像本身灰度特性离散程度的一种度量方式。根据这种明确的描述方式可以得到,如果类内差越小,则说明图像本身各像素点之间的灰度差异就越小。故对于一幅灰度级为 L 的 SAR 图像,利用 $n (n < L - 1)$ 阈值 OTSU 将 SAR 图像分割成 $n + 1$ 个均匀区域;从灰度级上来看,降低了 SAR 图像的整体灰度梯度,为后续模糊聚类减少了迭代次数及运行时间。

1.2 模糊 C 均值算法

传统的模糊 C 均值 (fuzzy C - means, FCM) 算法中,模糊划分矩阵 U 的计算会随着样本数与聚类数目的增加而增加,从而导致需要大量的运算时间和存储空间,降低了分割的效率。对于给定的 SAR 图像来说,其灰度级是一定的,而聚类中的聚类样本数量就取决于灰度级的数目。因此,如果将多阈值分割计算得到的各均匀区域的灰度均值代替像素点进行聚类将会大大减少聚类的样本数,从而减少运算耗时,提高分割效率。

设灰度级为 L 的图像,多阈值 OTSU 粗分割后的各区域灰度均值为 N (即初始化聚类中心集合)。现把图像灰度级作为样本集,将其分为 C 个不同的类别,那么 C 个类别分别对应的聚类中心为 c , 每个像素点 i 属于某一类 j 的隶属度为 μ_{ij} , 并且所有的 μ_{ij} 取值在 $[0, 1]$ 区间之内。由此定义模糊聚类的特征函数和约束条件,即

$$\sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^N \mu_{ij}^m \|x_j - c_i\|^2, \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^C \mu_{ij} = 1 (j = 1, 2, \cdots, N). \tag{6}$$

则更新 μ_{ij} 和 c_i 等式分别为

$$\mu_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^C [d(x_j, c_i) / d(x_j, c_k)]^{2/(m-1)}}, \tag{7}$$

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^N (\mu_{ij})^m x_j}{\sum_{j=1}^N (\mu_{ij})^m} (i = 1, 2, \cdots, C), \tag{8}$$

式中: N 为样本数目; C 为图像分割类别数; J 为 FCM 的价值函数; x_j 为图像中某一点的灰度值; μ_{ij} 为样本元素 i 属于第 j 类子集合的隶属度; c_i 为第 i 类聚类中心; d 为数据点与聚类中心的欧几里德距离; m 为控制模糊度的权重指数,且 $m \in (1, \infty)$ 。

2 混合模糊的 SAR 图像分割算法

丹江口水库属于内陆人工湖,水面流动较缓,水面平滑。因此降低了后向散射,对比陆地,水域在 SAR 图像所表现为暗区;其周边区域地物种类较多, SAR 图像中灰度级较高。因此本文通过 3 步来处理 SAR 图像:①通过自适应多阈值 OTSU 对 SAR 图像进行灰度梯度降级并计算各区域的灰度均值;②将各区域的灰度均值作为模糊聚类的聚类中心进行聚类迭代,以更有效地降低噪声对于分割结果的影响;③采用连通区域法,将邻域内小于预先设定好的面积阈值的像素点对象进行滤除,从而实现水陆的精分割。

2.1 SAR 数据及预处理

采用数据源为 Sentinel - 1A 卫星的 Level - 1 地距多视影像 (ground range detected, GRDH), 影像成像方式为干涉宽幅 (interferometric wide swath, IW) 模式,极化方式为 VV。数据预处理主要包括辐射校正和斑点噪声抑制。

由于 Level - 1 影像没有进行辐射定标,辐射偏差较大,所以需要数据定标。辐射定标之后得到影像地物雷达后向散射系数。定标公式^[20]为

$$value(i) = \frac{|DN_i|^2}{A_i}, \tag{9}$$

式中: $value(i)$ 为后向散射系数值; $|DN_i|$ 为原数据灰度值; A_i 为根据查找表中定标算法选择其中的 $\beta_{Nought}(i)$, $\sigma_{Nought}(i)$ 或 $\gamma(i)$ 值。

在 SAR 成像过程中,由于相干成像系统的缺陷,不可避免地会产生类似于噪声的相干斑。相干

斑的存在大大降低了对 SAR 图像感兴趣区域的分析和解译能力。因此,相干斑抑制是 SAR 图像分割的首要且重要环节。本文采用 ENVI5.3 中的 Refined Lee 滤波器进行斑点噪声消除,因为 Refined Lee 在有效抑制斑点噪声的同时可以较大幅度地保留图像边缘信息^[21]。

2.2 算法步骤及流程

算法流程如下:①输入经过预处理的 SAR 图像 I ;②提取图像 I 的灰度统计直方图信息,得出所有出现的谷值与峰值,并记为 V ;③利用多阈值 OTSU,将 V 作为参数,对图像进行灰度梯度降级,并计算各区域的灰度均值 G ,得到粗分割之后的图像 I' ;④将图像 I' 作为新的输入数据集,并设置目标函数精度 $\alpha(\alpha=0.000\ 1)$ 、模糊指数 $m(m=2)$ 和最大迭代次数 $T_m(T_m=15)$,当前迭代次数 t 为 0;⑤根据 G ,设置初始化模糊聚类中心 $c_i(i=1,2,\cdots,n)$, n 为初始化聚类数目;⑥由式(3)—(4)更新模糊划分矩阵 $U=\{\mu_{ij}\}$ 和聚类中心 $C=\{c_i\}$;⑦基于式(5)和式(10)计算 $temp$,即

$$temp = |J_{(t)} - J_{(t-1)}|, \tag{10}$$

当 $temp < \varepsilon$ 或 $t > T_m$,结束聚类,否则 $t = t + 1$,转到第⑥步;⑧得出分类结果 I'_{result} ;⑨再将 I'_{result} 作为输入数据,采用 8 邻域连通区域方法,移除 I'_{result} 中面积小于等于单个像素点的对象,从而得到精分割结果 I_{result} 。

3 实验结果及讨论

实验采用数据为丹江口水库 2016 年 10 月份影像数据,图像大小为 923 像素 $\times$ 597 像素,研究区内包括林地等植被区、水库区与居民区等不同区域。除本文算法外,采用 8 种其他分割算法做对比,分别为:FCM 算法、OTSU 算法、区域分裂合并算法、MRF(markov random field)算法、水平集 + 数学形态学算法、二维 OTSU 算法、OTSU + 核聚类算法和蚁群 + 聚类算法。预处理后的图像及各种算法的实验结果如图 1 所示。

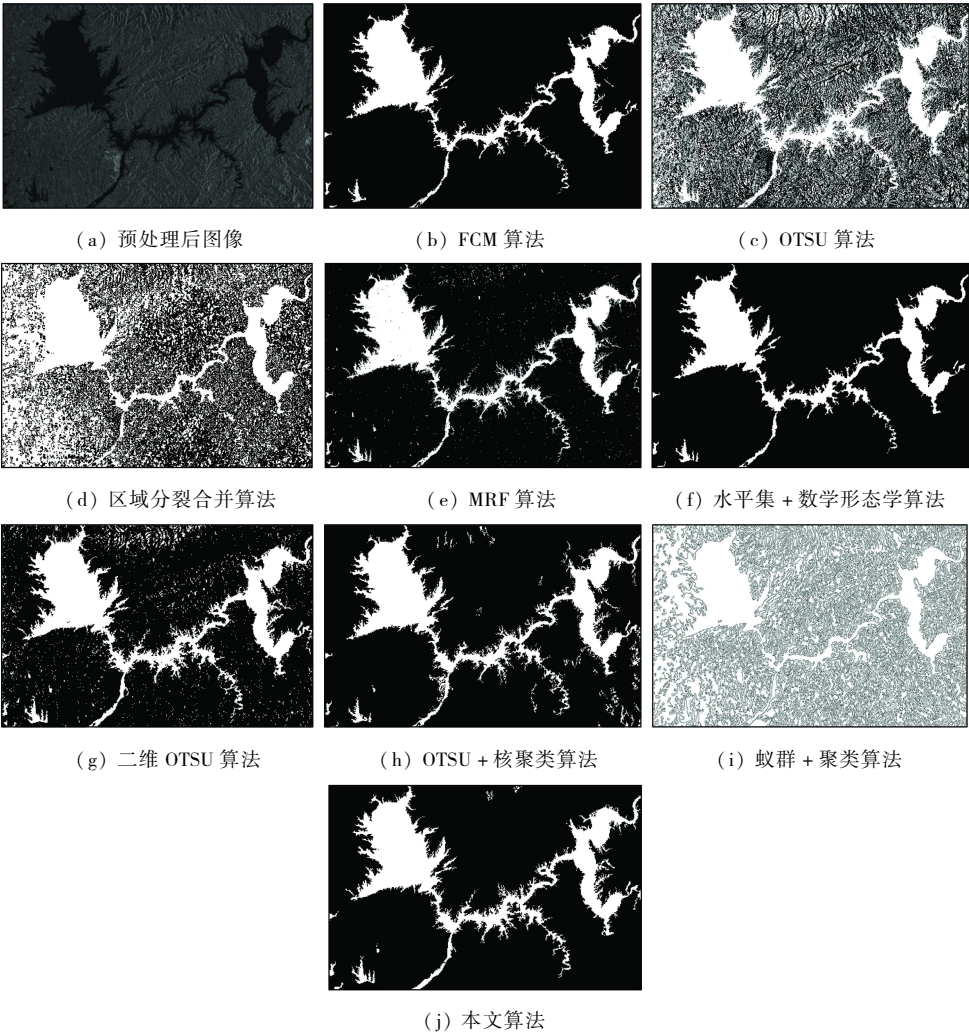


图 1 2016 年 10 月份水库分割结果

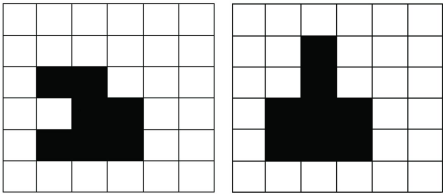
Fig. 1 Reservoir segmentation results in October, 2016

3.1 目视解译

从主观方面评价实验结果可以看出,OTSU 算法、区域分裂合并算法和 MRF 算法在对噪声抑制上效果较差,且区域分裂合并算法有严重的误分割现象(图 1(c)—(e));二维 OTSU 算法在噪声抑制上较一维 OTSU 有明显改进,但对环境复杂的丹江口库区 SAR 图像的水陆分割仍旧受噪声干扰严重(图 1(g));水平集与数学形态学算法虽在噪声处理方面具有较好的效果,但对于局部区域的支流存在漏分割(图 1(f));由于 SAR 图像的噪声主要是斑点噪声,OTSU + 核聚类算法中所使用的线性核聚类和高斯核聚类,在抑制噪声方面效果一般,对于支流及居民区部分存在误分割(图 1(h));FCM 算法仅利用了图像中的灰度信息,因此算法本身对于噪声没有较好的抑制(图 1(b));文献[22]中提出的算法,由于自适应蚁群算法的引入在算法运行时间上有了较大提升,对于小区域的分割结果取得了较好效果(小区域环境背景单一),但对于丹江口水库大区域 SAR 图像来说,并不适用(图 1(i));本文算法结果在支流与其他非水域区域分割中相比较于其他算法得到了精度较高的结果(图 1(j))。

3.2 整体精度及 Dice 系数定量分析

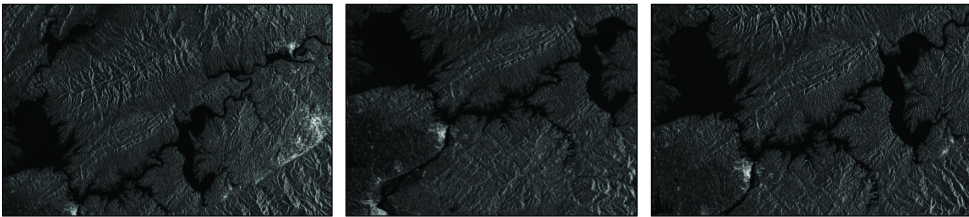
采用文献[23]和文献[24]中所使用的客观评价标准,将本文算法与现有的分割算法从分割准确率 A 、召回率 R 、总体精度指标 F 以及 Dice 系数方面进行分析。 A 和 R 分别是分类里面的度量值,一般用来评估分类结果的好坏。这 2 个指标的计算示意图如图 2 所示。该图为图像中某一部分像素分布图,其中黑色为目标区域。



(a) 带人工标记的原图像 (b) 分割后的图像

图 2 分类指标示意图

Fig. 2 Image of classification index



(a) 2016 年 3 月 (b) 2016 年 6 月 (c) 2017 年 5 月

图 3 不同时期水库图像

Fig. 3 Reservoir images in different periods

$A = (TP + TN)/(TP + FN + FP + TN) , \tag{11}$

$R = TP/(TP + FN) , \tag{12}$

式中: TP 为被找到的相关样本(6 块); FP 为被找到的不相关样本(2 块); FN 为相关未找到的样本(1 块); TN 为不相关未被找到的样本(33 块)。

另外, F 值(F -measure)为总体精度,同一性能评价度量指标,即

$F = (\alpha + 1)AR/(\alpha A + R) , \tag{13}$

式中 α 为影响因子。 F 值避免了过度追求查全率和精度的情况, F 值的高低可以评价分割算法的优劣。

评价指标结果如表 1 所示。

表 1 SAR 图像分割评价结果指标

Tab. 1 SAR image segmentation evaluation indexes			
算法	A	R	F
本文算法	0.892 8	0.920 3	0.906 4
FCM	0.782 5	0.974 0	0.867 8
OTSU	0.951 7	0.358 7	0.521 0
水平集 + 数学形态学	0.801 7	0.971 0	0.878 2
区域分裂合并	0.840 2	0.302 3	0.444 6
MRF	0.847 1	0.514 1	0.639 9
OTSU + 核聚类	0.843 9	0.858 9	0.851 3
二维 OTSU	0.886 0	0.960 6	0.840 3
蚁群 + 聚类	0.892 4	0.225 9	0.360 5

仅从 10 月库区影像分割结果及性能指标数据可以看出,本文分割算法优于其他 8 种算法。

为进一步讨论本文算法的适用性,另对 3 幅其他相同格式,不同时期、不同大小的该库区影像进行分类,所有图像信息如表 2 所示。

表 2 丹江口水库 SAR 影像信息表

Tab. 2 SAR images information of Danjiangkou Reservoir		
时间	图像大小	备注
2016 年 3 月	768 像素 × 519 像素	汉水流域西向河道和丹江流域与老灌河流域
2016 年 6 月	611 像素 × 578 像素	东南向汉水流域河道,延伸至老河口市
2016 年 10 月	923 像素 × 597 像素	东南向汉水流域河道,延伸至七里崖
2017 年 5 月	817 像素 × 574 像素	东南向汉水流域河道,延伸至七里崖及部分西向汉水河道

其他 3 幅不同时期水库影像如图 3 所示。

Dice 系数 (dice similarity coefficient, Dice - DSC) 又称 Dice 重复率, 是一种集合相似度的衡量指标, 即

$$DSC = \frac{2N(S_g \cap S_m)}{N(S_g) \cup N(S_m)}, \quad (14)$$

式中: S_g 表示原始图像目标域的面积; S_m 表示算法分割后图像目标域的面积; $N()$ 表示在该区域像素点的个数; DSC 为 Dice 系数, 其值越接近 1, 则分割的结果越好。

本文采用的 GT (groud truth) 图像为丹江口水库 SAR 图像的人工分割结果, 如图 4 所示。

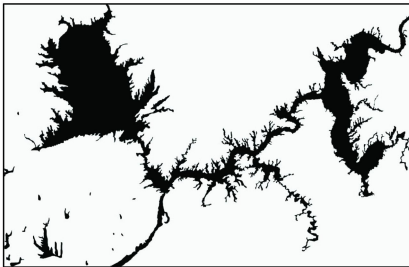


图 4 人工分割结果
Fig. 4 Image of ground truth

不同时期该库区分割结果的 Dice 系数如表 3 所示。

表 3 不同时期 SAR 图像分割结果 Dice 系数

Tab. 3 Dice - DSC of SAR images at different periods

算法	2016 年 3 月	2016 年 6 月	2016 年 10 月	2017 年 5 月
本文算法	0.980 3	0.966 2	0.963 6	0.940 9
FCM	0.895 6	0.933 0	0.925 9	0.918 3
OTSU	0.309 6	0.438 2	0.654 3	0.412 1
水平集 + 数学形态学	0.971 1	0.929 6	0.956 1	0.940 0
区域分裂合并	0.695 1	0.657 2	0.585 2	0.606 9
MRF	0.593 1	0.948 1	0.954 6	0.933 8
OTSU + 核聚类	0.721 5	0.866 8	0.941 8	0.850 5
二维 OTSU	0.338 9	0.513 0	0.855 9	0.493 1
蚁群 + 聚类	0.320 8	0.381 9	0.374 5	0.372 8

从 Dice 系数可以看出, 对于不同时期和包含不同流域的图像, 本文算法的分割效果在整体上均高于文中对比的其他算法。结果表明, 本文算法具有较好的适应性与精确性, 适用于地物种类丰富、支流较多的 SAR 图像, 且分割结果均能有效克服噪声抑制和阴影对水域分割的影响。

4 结论

1) 针对丹江口水库 SAR 图像的水陆分割问题, 提出了基于 SAR 图像的混合模糊水陆分割算法, 将模糊聚类与最大类间方差法进行了改进和有效结合, 优化了聚类中心的选择, 改善了分割效果。在噪

声较多且包含较多细小支流的水域遥感影像中有较大优势。

2) 采用 4 景不同时期的丹江口水库影像进行实验验证, 结果表明本文算法对于背景环境复杂、噪声较大的 SAR 图像能得到较好的效果, 且有良好的适应性。

3) 本文的不足之处表现在模糊聚类中各类与聚类中心相似度的计算上。传统相似度计算采用的是欧式距离, 在今后的进一步研究中, 可以考虑在本文基础上相似度计算过程中加入其他相关因子进一步细化各类差别, 改善影像分割效果, 提高遥感影像分割质量。

参考文献 (References):

[1] 文江平, 胡岩峰, 王无敌, 等. 一种有效的 SAR 图像水陆分割方法[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(2): 108 - 110.
Wen J P, Hu Y F, Wang W D, et al. An efficient method of land and water segmentation for SAR images [J]. Sichuan Ordnance Journal, 2010, 31(2): 108 - 110.

[2] 李 璐. 南水北调中线水源区多尺度生态环境综合评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
Li L. Integrative Assessment of Ecological Environment at Different Scale in Water Source Region of the Middle Route Project Under South - to - North Water Diversion [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.

[3] 李景刚, 黄诗峰, 李纪人. ENVISAT 卫星先进合成孔径雷达数据水体提取研究——改进的最大类间方差阈值法[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(3): 139 - 145.
Li J G, Huang S F, Li J R. Research on extraction of water body from ENVISAT ASAR images: A modified Otsu threshold method [J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(3): 139 - 145.

[4] 安成锦, 牛照东, 李志军, 等. 典型 Otsu 算法阈值比较及其 SAR 图像水域分割性能分析[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9): 2215 - 2219.
An C J, Niu Z D, Li Z J, et al. Otsu threshold comparison and SAR water segmentation result analysis [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32(9): 2215 - 2219.

[5] 安成锦, 陈曾平. 基于 Otsu 和改进 CV 模型的 SAR 图像水域分割算法[J]. 信号处理, 2011, 27(2): 221 - 225.
An C J, Chen Z P. SAR water segmentation based on Otsu and improved CV model [J]. Signal Processing, 2011, 27(2): 221 - 225.

[6] 尹奎英, 刘宏伟, 金 林. 快速的 Otsu 双阈值 SAR 图像分割法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(6): 1760 - 1765.
Yin K Y, Liu H W, Jin L. Fast SAR image segmentation method based on Otsu adaptive double threshold [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011, 41(6): 1760 - 1765.

[7] 赵向文, 靳国旺, 许竞轩, 等. 基于多阈值大津法直方图分割的 SAR 数据伪彩色量化方法[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(6): 445 - 449.
Zhao X W, Jin G W, Xu J X, et al. Pseudo - color quantization of SAR data based on multi - threshold Otsu method of histogram seg-

- mentation [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2012, 29(6): 445–449.
- [8] 杨旭. 遥感影像的自适应阈值法水陆分割研究[J]. 科技资讯, 2013, 11(5): 42–43.
- Yang X. Adaptive threshold method for land water segmentation based on remote sensing images [J]. Science and Technology Information, 2013, 11(5): 42–43.
- [9] 曹亮. 基于 Otsu 理论的图像分割算法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- Cao L. The Study of Image Segmentation Algorithm Based on Otsu Method [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [10] Lee J S, Jurkevich I. Coastline detection and tracing in SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(4): 662–668.
- [11] Niedermeier A, Romaneessen E, Lehner S. Detection of coastlines in SAR images using wavelet methods [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2270–2281.
- [12] Rocca M R D, Fiani M, Fortunato A, et al. Active contour model to detect linear features in satellite images [C]//The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2004, 35(3): 446–450.
- [13] Erteza I A. An Automatic Coastline Detector for Use with SAR Images [R]. United States: Sandia Report, 1998.
- [14] Sternberg S R. Grayscale morphology [J]. Computer Vision Graphics and Image Processing, 1986, 35(3): 333–355.
- [15] 倪维平, 严卫东, 边辉, 等. 基于 MRF 模型和形态学运算的 SAR 图像分割[J]. 光电与控制, 2011, 18(1): 32–36.
- Ni W P, Yan W D, Bian H, et al. SAR image segmentation based on MRF model and morphological operation [J]. Electronics Optics and Control, 2011, 18(1): 32–36.
- [16] 叶海军. 基于纹理特征和数学形态学的 SAR 图像目标检测方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(4): 436–440.
- Ye H J. SAR image target detection method based on texture feature and mathematical morphology [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2009, 4(4): 436–440.
- [17] 安健, 张扬. 基于 Otsu 和模糊核聚类算法的极化 SAR 图像分类[J]. 电子科技, 2014, 27(2): 42–45.
- An J, Zhang Y. Classification of polarimetric synthetic aperture Radar images based on Otsu's method and fuzzy kernel C-means clustering algorithm [J]. Electronic Science and Technology, 2014, 27(2): 42–45.
- [18] 毛万峰, 张红, 张波, 等. 基于模糊水平集的 SAR 图像分割方法[J]. 中国科学院大学学报, 2013, 30(2): 238–243.
- Mao W F, Zhang H, Zhang B, et al. A new fuzzy level set method for SAR image segmentation [J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2013, 30(2): 238–243.
- [19] 朱逸婷. 基于改进的模糊聚类的分水岭分割算法研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2013.
- Zhu Y T. On Watershed Segmentation Algorithm Based on Improved Fuzzy Clustering [D]. Hefei: Anhui University, 2013.
- [20] SENTINEL TEAM. Sentinel-1 SAR user guide introduction [EB/OL]. (2013-09-01) [2014-10-04]. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>.
- [21] Lee J S, Jurkevich I, Dewaele P, et al. Speckle filtering of synthetic aperture Radar images: A review [J]. Remote Sensing Reviews, 1994, 8(4): 313–340.
- [22] 鲍义东, 周改云, 赵伟艇. 自适应蚁群和模糊聚类的 SAR 图像分割[J]. 测绘科学, 2016, 41(8): 121–124, 120.
- Bao Y D, Zhou G Y, Zhao W T. Segmentation of SAR images based on adaptive ant colony algorithm and fuzzy C-means [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(8): 121–124, 120.
- [23] 苏磊磊. 基于小区域的图像显著度提取及应用研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2015.
- Su L L. Image Saliency Extraction and Application Based on Small Regions [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015.
- [24] 郝智慧, 郭满才, 宋扬扬. 结合全局与局部信息活动轮廓的非同质图像分割[J]. 中国图象图形学报, 2016, (7): 886–892.
- Hao Z H, Guo M C, Song Y Y. Inhomogeneous image segmentation based on active contours with global and local information [J]. Journal of Image and Graphics, 2016, (7): 886–892.

SAR image land and water segmentation algorithm based on hybrid fuzzy

GUO Zhengwei, WANG Le, SONG Guolei

(School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475000, China)

Abstract: In this paper, a land and water segmentation algorithm based on hybrid fuzzy is proposed for the segmentation of SAR images. The algorithm is based on the gray features of SAR images, and dynamic multi threshold maximum between-class variance (OTSU) method is used for SAR image rough segmentation. The gray mean value of each homogeneous region is used as the initial clustering center of the fuzzy C mean algorithm so as to get the classification result by clustering iteration. Finally, the connected region method is used to remove the small pixels in the neighborhood, thus achieving fine segmentation of land and water. The experiments on GRDH data of Sentinel-1A show that the method has a relatively good segmentation effect for the SAR images of land objects and inland water areas with more tributaries.

Keywords: land and water segmentation; multi threshold OTSU; fuzzy clustering; Danjiangkou Reservoir

万方数据

(责任编辑: 陈理)