

基于多尺度继承性 SAR 图像分割算法

刘忠¹, 刘爱平^{1,2}

(1. 海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033; 2. 中国科学院 电子学研究所 空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190)

摘要: 针对高分辨率 SAR 图像的分割问题, 提出一种基于多尺度继承性的分割算法。该算法综合利用图像的宏观和微观特征, 将传统的单尺度信息处理技术纳入尺度不断变化的动态分析框架中, 更容易获得图像的本质特征。同时, 使用异性扩散方程获得多尺度图像序列, 采用一种由粗尺度到细尺度的分割策略, 先进行粗尺度分割, 然后以此分割结果来引导较细尺度层的分割。分割过程中采用迭代自组织的数据分析算法自适应地确定每一层分割的区域个数, 较好地建立尺度之间的分割继承关系。该分割算法可以满足不同图像处理任务的需求, 也更加符合人的认知过程和视觉处理系统。

关键词: 多尺度; SAR 图像; 继承分割; 各向异性扩散方程; 迭代自组织数据分析

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)07-2735-03

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.07.094

SAR image segmentation based on multiscale inherited information

LIU Zhong¹, LIU Ai-ping^{1,2}

(1. College of Electronic Engineering, Navy Engineering University, Wuhan 430033, China; 2. Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing & Application System, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper proposed a method based on inherited multiscale information for SAR image segmentation. It combined image's macroscopical and microcosmical features together, and introduced the traditional single scale processing technique into the dynamic changing multiscale analyzed framework, which made it easy to obtain image essential features. Adopted anisotropic diffusion equation to get multiscale images sequences. Used the segmentation strategy from coarser scale to finer scale. Coarser scale was easy to be segmented and the segmentation results could lead finer scale segmentation. Employed iterative self-organizing data analysis techniques algorithm in segmentation process under each scale, and established segmentation inherited relationships of different scales through this process. This method can fulfill the request of different image processing task, and consists with people's cognizing process and vision process system.

Key words: multiscale; SAR image; inherited segmentation; anisotropic diffusion equation; ISODATA

在计算机视觉研究中, 图像分割是连接低级视觉和高级视觉的桥梁和纽带。图像分割的结果既取决于低级视觉中的各种预处理效果, 又决定了高级视觉各种应用中的最终输出质量。因此, 图像分割是大多数视觉系统中最为关键和重要的一个环节^[1,2]。SAR 卓越的空间信息获取能力以及在国防、环境等方面的战略意义, 在军用和民用方面取得了广泛的应用^[3,4]。但由于 SAR 的成像机理, 图像产生较强的散射点以及 SAR 图像固有的相干斑噪声, 都对 SAR 图像的分割带来了很大的挑战。

随着多尺度理论的发展, 采用多尺度分析方法越来越广泛地应用于 SAR 图像处理, 并取得了不错的效果^[5,6]。但是由于相干斑噪声的影响以及目标散射特性的原因, SAR 图像分割中, 分割出的目标区域或者反映了目标范围的全局信息; 或者分割出散射区域较强的局部信息, 却很难综合反映 SAR 图像目标固有的宏观和微观特征。本文的多尺度继承分割算法, 在视觉信息图像处理模型中引入一个被视为尺度的参数, 通过连续变化尺度参数获得不同尺度下的视觉处理信息, 然后综合这些信息以深入挖掘图像的本质特征, 不仅能够提取出目标的整

体信息, 而且还可以进一步分割出目标的局部信息, 并通过树型结构建立目标的继承分割信息。其对单视图像信息处理进行有效补充, 从而达到更合理的目标分割, 符合人类的视觉系统及认知过程。

1 图像多尺度分解

图像的多尺度结构有很多形式, 主要有基于多分辨率多尺度结构和数据尺度空间的多尺度结构两种。其中, 不断改变图像分辨率的多尺度模型中分辨率的改变影响了图像中出现的目标尺度, 很难建立多尺度之间的统计关系。Witkin^[7]将尺度空间理论引入到图像分析中, 这是一个重大突破。数据尺度空间直接注重目标的尺度, 而保持图像分辨率不变。对图像进行连续变尺度滤波, 便构成了图像的数据多尺度空间。

数据多尺度空间中图像的平滑和细节保持是一对矛盾关系, 如高斯多尺度空间, 图像的低通滤波在降噪的同时产生图像边界的模糊。基于偏微分方程的图像平滑方法在这个领域获得了广泛的重视, 因为在平滑噪声的同时可以使边界得到保

收稿日期: 2009-12-15; 修回日期: 2010-03-04

作者简介: 刘忠(1964-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为目标定位、模式识别; 刘爱平(1982-), 女, 山西侯马人, 博士研究生, 主要研究方向为 SAR 图像多尺度分析、目标识别 (liuaipingxp@163.com)。

持。基于各向异性热扩散方程是一种基于偏微分方程理论的非线性滤波方法,因为在滤波过程中能对图像中不同的区域保持不同的平滑速率,使得均匀区域有较好的滤波效果,而在复杂区域又能较好地保持图像的边缘等结构信息,所以在图像的去噪、增强、复原、分割和边缘检测等方面有广泛的应用^[8,9]。

Perona 等人^[10]首次提出了各向异性热扩散模型,简称 P-M 模型。该模型对图像中像素梯度的变化较为敏感,能够在梯度较大的区域保留边缘像素,而在梯度较小的区域实现快速平滑。P-M 模型的热扩散方程可以表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(c(|\nabla u|)\nabla u) \\ u(x, y, 0) = u_0, (\partial u(x, y)/\partial n)|_{\partial\Omega} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: u_0 为原始图像数据; ∇u 为图像的梯度; $|\nabla u|$ 为梯度的模值; $c(|\nabla u|)$ 是扩散系数; Ω 为图像的支撑域; n 为边界的法向量方向,是一个非负减函数。如果扩散系数为常数则扩散过程就是线性的。在非线性过程中,扩散系数满足:a)当 $|\nabla u| \rightarrow \infty$ 时, $c(|\nabla u|) \rightarrow 0$;b)当 $|\nabla u| \rightarrow 0$ 时, $c(|\nabla u|) \rightarrow \infty$ 。常用的热扩散系数包括式(2)和(3)。其中, K 是一个常数,可以根据实际应用进行调整。

$$c(|\nabla u|) = \exp[-(|\nabla u|/K)^2] \quad (2)$$

$$c(|\nabla u|) = \frac{1}{1 + (|\nabla u|/K)^2} \quad (3)$$

采用上述异性扩散模型进行平滑时,图像的边缘在尺度空间可以保持稳定^[11],但是,该模型存在以下两个问题:a)假定图像存在噪声,则在噪声点处,图像的梯度 ∇u 很可能非常大,使得系数 $c(|\nabla u|)$ 非常小,从而将这些噪声点保留下来,降低了去噪性能;b)当扩散系数为式(2)(3)时,式(1)是病态的。一个更加鲁棒性的方法是采用 $\nabla(G_\sigma * u)$ 来代替 ∇u 。其中: G_σ 表示标准差为 σ 的 Gaussian 滤波器;“*”表示卷积。仅仅这些变动就避免了方程上述两个方面的不足,这样扩散系数可以写成

$$c(|\nabla u|) = \frac{1}{1 + (|\nabla(G_\sigma * u)|/K)^2} \quad (4)$$

本文采用式(4)对原始图像进行多尺度平滑。图 1 为获得 SAR 图像的多尺度序列,第一个图像为原始图像,后面几个为不同尺度的 SAR 图像序列。



图1 SAR图像多尺度序列

2 迭代自组织的分割策略

迭代自组织数据分析算法(iterative self-organizing data analysis techniques algorithm, ISODATA)^[12,13],与 K-均值聚类算法有相似之处,即聚类中心也是通过样本均值的迭代运算来决定的。但是,ISODATA 加入了一些试探性的步骤,能吸取中间结果所得到的经验,在迭代过程中可以对类内方差大的类进行分裂,也可以对聚类中心距离小的类实现合并,即自组织。该算法具有启发性,会在计算过程中不断调整类内中心个数,直到使分类的总的样本方差最小。ISODATA 的实现步骤如下^[14]:

- a) 输入样本特征并设置各种参数:阈值、方差、初始聚类中心个数、最大迭代次数;
- b) 任意选取初始几个聚类中心;

- c) 求各个样本到所有聚类中心的距离,并将所有的样本归入到最近的类中心;

- d) 根据每一个类的样本值修正类中心的值;

- e) 计算各聚类中心中的样品到聚类中心的距离及所有聚类域样品平均距离的总平均距离;

- f) 分裂操作,计算所有聚类中心的标准差向量,找到所有中心标准差最大值进行分裂;

- g) 合并操作,计算全部聚类中心的距离,如果某两个聚类中心的欧式距离小于设定阈值,则合并两类。

- h) 如果达到迭代次数则结束循环,否则进入 c) 继续循环。

在步骤 a) 中,本文采用图像的强度作为特征,经过多尺度分解后,同一区域的目标平滑强度特征表现比较一致。在步骤 b) 中,ISODATA 通过任意选取的初始聚类中心,并在此基础上通过不断分裂、合并等来优化聚类效果。因此,初始聚类中心选择是否合理,常常直接影响聚类的效果。本文采用几个均匀分布的初始聚类中心来代替随机选取的聚类中心:第一个聚类中心为输入样本的最小值 $\min(D)$,最后一个聚类中心为样本的最大值 $\max(D)$;第 i 个聚类中心为 $\min(D) + (i - 1) \times (\max(D) - \min(D)) / (k - 1)$, k 为初始聚类中心的个数。由于无法提前确定聚类的个数,采用这种自适应的方法对图像进行聚类分割。

3 多尺度继承分割

目标在不同尺度上表现是不同的,在不同尺度上进行不同的图像处理是比较合理的。通过综合多尺度的信息才能反映目标的本质特征^[6,15]。首先在大尺度上检测出图像的主要部分,或者是目标出现的大概区域,然后逐渐缩小尺度,在小尺度上对目标进行精细分割。这样可以获得较为精确的目标信息,而且采用的数据尺度空间多尺度很容易建立尺度之间的继承关系。本文的多尺度继承分割策略具体步骤如下:

- a) 采用式(4)对原始 SAR 图像进行多尺度平滑,获得多尺度图像序列 X_1, X_2, \dots, X_n 。其中, X_i 和 X_{i+1} 不是相邻尺度,而是间隔一定尺度的两个尺度图像。

- b) 针对大尺度图像 X_n ,采用 ISODATA 进行分割,分割为不同的区域 $B_{n,1}, \dots, B_{n,m}$,并把它们标记为 $1, 2, \dots, m$,且保存每一个区域的位置信息及区域个数 $c_{n,m}$ 。

- c) 输入 X_i 的分割结果及 X_{i-1} 尺度图像,按照从小到大的标号顺序提取 X_i 分割结果的每个区域的位置信息,同时提取 X_{i-1} 中的目标强度值。

- d) 对 X_i 中每个分割区域,在 X_{i-1} 尺度图像中采用 ISODATA 进行分割并标记。如果 X_i 图像中的区域 B_j 在 X_{i-1} 尺度图像中又重新分割出了 $c_{i-1,j}$ 个区域,且前 $B_{i,1}$ 到 $B_{i,j-1}$ 个区域一共分割出 s 个区域, X_i 图像中的区域 B_j 在 X_{i-1} 尺度图像中重新标记为 $s + 1, s + 2, \dots, s + c_{i-1,j}$;第 B_{j+1} 个区域又重新分割为 $c_{i-1,j+1}$ 个区域,则这个区域重新标记为 $s + c_{i-1,j} + 1, s + c_{i-1,j} + 2, \dots, s + c_{i-1,j} + c_{i-1,j+1}$;同时每一个区域的值修改为其聚类中心的值。重复步骤 c)d)直到分割及标记到 X_1 尺度。

- e) 分割的继承性树型结构建立。根据每一尺度各个区域重新分割的区域个数和分割后的区域标记,很容易建立每个尺度各个分割区域之间的继承关系。

在步骤 a) 中并不是对每一个相邻尺度进行继承分割操作,因为相邻尺度之间变化较小,进行继承分割的结果变化也

不大且浪费运算时间。一般地,总尺度数目控制在五个以内就可以满足要求了,根据图像的大小和重点感兴趣目标区域大小进行尺度调节。在图像继承分割过程中并不进行最细尺度 X_0 即原始图像的分割,因为原始 SAR 图像的噪声比较严重,会影响图像分割的结果,造成误分割或者过度分割;使用各向异向扩散方程已经使内部平滑、边缘锐化,足以达到进一步图像处理的精确性要求。

图 2 所示为继承分割的示意图。首先输入图像,进行多尺度分解后,尺度由大到小进行继承性分割的同时建立分割的树型结构。例如,在最大尺度 X_n 上分割出目标大概出现的区域,并在继续的小尺度 X_{n-1} 上把目标区域进一步分割为几个组成部分,继续在尺度 X_{n-2}, \dots, X_1 对每个组成部分进行精确分割,这样就可以建立一种多尺度的继承分割。图 2 中的右边部分是在 $X_{n-1}, X_{n-2}, X_{n-3}$ 尺度上建立的目标区域树型结构,建立起各个分割结果的包含、继承关系。

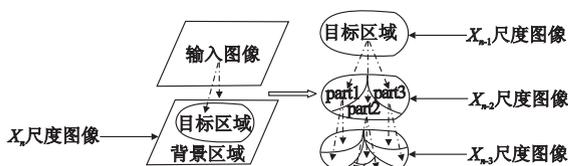


图2 多尺度继承侵害示意图

4 实验结果与分析

目前的 SAR 图像分割算法分割结果还基本停留在对单一尺度的显示效果上,分割出目标出现的大概区域的全局信息或者分割出散射区域较强的局部信息,却很难综合反映 SAR 图像目标固有的宏观和微观特征。本文的分割算法使得全局信息和局部信息较好地融合在一起,通过多个尺度来反映分割结果,并建立多尺度分割结果的继承包含关系。

图 3 为采用本文提出的多尺度继承性分割思路针对目标区域的分割结果。原始含噪声的 SAR 图像为图 1 中的第一个图像,图 3(a)是在最大尺度上分割的结果,使目标区域从背景中分离出来,且目标区域已经大致显示了目标的几何结构;(b)~(e)均为继续在下一细尺度上目标区域继续分割的结果。从大致几何结构到精细特征的逐层分割细化过程,表现了整体与部分的包含关系。



图3 目标区域的多尺度继承分割

图 4 是针对复杂背景的 SAR 图像采用本文多尺度继承分割的结果。其中:(a)为原始 SAR 图像;(b)为在最粗尺度上首先被分割成了两个部分;(c)~(f)是整个图像区域在前一粗尺度分割结果的基础上又分割的结果。可以通过分割过程建立尺度间的继承关系。当 SAR 图像的背景区域比较混乱时,可以逐层分割迅速检测出感兴趣区域,缩小范围并对感兴趣区域进行进一步的分割、特征提取等处理。

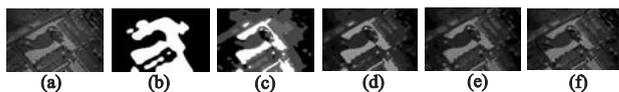


图4 复杂背景多尺度继承分割

图 5 为多个车辆目标的 SAR 图像的多尺度继承分割结果。其中:(a1)(a2)为原始 SAR 图像;(b1)(b2)为第一次分

割的结果;(c1)(c2)为整个图像在最小尺度的继承分割结果。随着尺度的减小,分割结果由小到大,分割出的区域由粗糙到精细,类似于人类的认知过程。可以根据不同的处理阶段选择不同的分割结果,同时这种分层次的继承分割结果的树型结构还可以进一步应用到目标的鉴别与识别当中,这也是进一步要研究的问题。

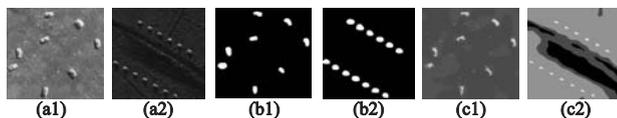


图5 多个目标的多尺度继承分割

5 结束语

本文提出了一种关于 SAR 图像的多尺度继承分割的方法。该分割算法将传统的单尺度视觉信息处理技术纳入尺度不断变化的动态分析框架中,因此更容易获得图像的本质特征。采用一种由粗尺度到细尺度的分割策略,先进行比较容易的粗尺度上的分割,然后以此分割结果来引导较细尺度层上的分割。这个工作过程与人类视觉系统的工作过程相似,先观察到大的目标,然后以此为基础逐步细化,慢慢观察场景细节。并且,通过选用适当多尺度结构的层数,能控制出现在最终分割图上的目标区域尺度,而且采用迭代自组织数据分析算法自适应地选择每一层分类的目标区域个数,较好地引导下一尺度图像的分割。该算法还能够通过树型结构建立目标的继承分割信息,可以满足不同处理阶段的需求。需要进一步研究的问题是:采用这种分层次的继承分割结果的树型结构作为目标的一个特征,或者提取不同尺度的目标区域某个特征是否可以较好地应用到目标的鉴别与识别阶段。

参考文献:

- [1] 夏勇. 基于特征的纹理图像分割技术研究[D]. 西安:西北工业大学, 2006.
- [2] JUNG C R. Combining wavelets and watersheds for robust multiscale image segmentation[J]. *Image and Vision Computing*, 2007, 25(1):24-33.
- [3] OLIVER C, QUEGAN S. Understanding synthetic aperture radar image[M]. Norwood, MA: Artech House, 1998.
- [4] 郭华东. 感知天地——信息获取与处理技术[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [5] HAY G J, BLASCHKE T, MARCEAN D J, et al. A comparison of three image-object methods for the multiscale analysis of landscape structure[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2003, 57(5-6):327-345.
- [6] FELZENSZWAL P, MCALLESTER D, RAMANAN D. A discriminatively trained, multiscale, deformable part model[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC: IEEE Computer SSOciety, 2008:1-8.
- [7] WITKIN A P. Scale-space filtering[C]//Proc of the 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1983: 1019-1023.
- [8] ZHANG Fan, YOO Y M, KIM Y M, et al. Multiscale nonlinear diffusion and shock filter for ultrasound image enhancement [C]//Proc of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC: IEEE Computer Society, 2006:1972-1977.

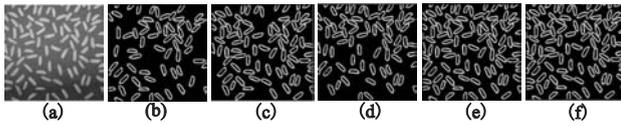


图2 蜂群规模S取不同值时的边缘提取

实验 3 Th_0 取不同值对边缘提取的影响,如图 4 所示, cap 固定 $Th_1 = 70$,从左到右分别取 $Th_0 = 500, 400, 300$ 。



图3 Th_0 取不同值对边缘提取的影响

图4 Th_0 不同时对边缘提取的影响

实验 4 本文蜂群算法与文献[7]蚁群算法提取图像边缘的比较。原图像如图 5 所示,图像大小为 256×256 ,按从左到右顺序依次为 Lena、Cameraman、Airplane。本文算法与文献[7]算法比较如图 6 所示。基本参数 $S = 600$,其余同实验 1; Lena 取 $Th_0 = 230, Th_1 = 110$; Cameraman 取 $Th_0 = 520, Th_1 = 280$; Airplane 取 $Th_0 = 320, Th_1 = 180$ 。

图 6(a) ~ (c)是蚁群算法的边缘检测结果,(d) ~ (f)是蜂群算法的边缘检测结果。通过实验发现,蚁群算法提取的边缘是间断的,而且计算时间长;用蜂群算法提取的边缘清晰、连续,计算时间很短。

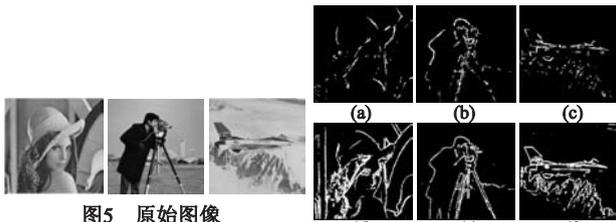


图5 原始图像

图6 文献[7]与本文算法边缘的比较

同时利用蜂群算法在提取图像边缘的同时还能抑制噪声,结果如图 7 所示。

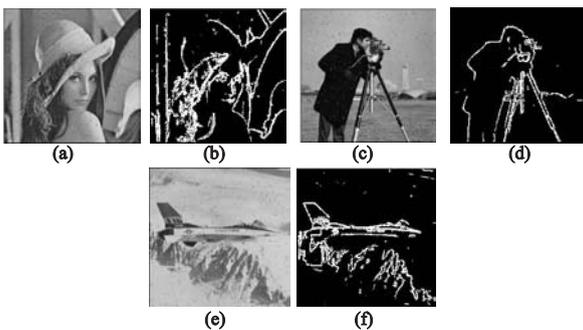


图7 噪声图像提取图像边缘图

文献[7]算法是本文算法平均用时的 60 多倍。本文算法提取各图像用时变化很大,是因为没有采用全搜索,搜索量受到阈值变化的影响。

表 1 本文算法与文献[7]算法时间比较

算法	Lena	Cameraman	Airplane
文献[7]	3 046.72	3 031.78	2 996.52
本文	43.03	7.34	10.06

4 结束语

本文提出了一种基于蜂群算法的图像边缘检测算法。算法首先利用蜂群并行搜索一组局部最优蜜源,然后在局部最优蜜源附近搜索类似的蜜源。由于该算法无须搜索最优解,与蚁群算法相比运算时间大大减少,而且具有很强的稳定性和鲁棒性。仿真实验表明,改进算法有较强的边缘提取能力,且提取的边缘清晰,具有连通性,并且算法还具有抑制孤立噪声点的能力。

参考文献:

- [1] TAO Wen-bing, JIN Hai, LIU Lin-man. Object segmentation using ant colony optimization algorithm and fuzzy entropy [J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(7) : 788-796.
- [2] HAN Yan-fang, SHI Peng-fei. An improved ant colony algorithm for fuzzy clustering in image segmentation [J]. Neurocomputing, 2007, 70(4-6) : 665-671.
- [3] WONG Ya-ping, SOH V C-M, BAN K W, et al. Improved Canny edges using ant colony optimization [C] // Proc of the 5th International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008:197-202.
- [4] SEELEY T D. The wisdom of the hive: the social physiology of honey bee colonies [M]. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1996.
- [5] KARABOGA D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, TR06 [R]. Kangseri, Turkey: Erciyes Universtiy, 2005.
- [6] TEODOROVIC D, LUCIC P. Bee colony optimization: principles and applications [C] // Proc of the 8th Seminar on Neural Network Applications in Electrical Engineering, 2006.
- [7] TIAN Jing, YU Wei-Yu, XIE Sheng-li. An ant colony optimization algorithm for image edge detection [C] // Proc of IEEE World Congress on Computational Intelligence. 2008.
- [8] KARABOGA D, KARABOGA B. On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm [J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1) :687-697.

(上接第 2737 页)

- [9] WANG Guo-dong, SANG Nong, YAN Lu-xin, et al. X-ray angiogram images enhancement by facet-based adaptive anisotropic diffusion [J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2009, 33(2) :140-147.
- [10] PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. IEEE Trans on Patten Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7) : 629-639.
- [11] GAO Gui, ZHAO Ling-jun, ZHANG Jun. A segmentation algorithm for SAR images based on the anisotropic heat diffusion equation [J].

- Pattern Recognition, 2008, 41(10) :3035-3043.
- [12] 沈照庆,舒宁,龚衍,等.基于改进模糊 ISODATA 算法的遥感影像非监督聚类研究 [J]. 遥感信息, 2008(5) :28-32.
- [13] 何霖,滕奇志,罗代升,等.一种改进的 ISODATA 算法及在彩色荧光图像中的应用 [J]. 四川大学学报:自然科学版, 2007, 44(3) : 563-568.
- [14] 杨淑莹. 模式识别与智能计算 [M]. 北京:电子工业出版社, 2008.
- [15] SILVA K S, LIMA G G, FATIMA N S. Medeiros, hierarchical multi-scale image segmentation [C] // Proc of the 8th International Conference on Intelligent Tutoring Systems. 2006:749-753.