

文章编号: 1001-9014(2008)06-0452-05

基于分水岭-谱聚类的 SAR 图像分割

马秀丽¹, 焦李成²

(1. 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200072;

2. 西安电子科技大学 智能信息处理研究所, 陕西 西安 710071)

摘要: 由于谱聚类是基于图论的、以相似性为基础的聚类方法, 需要计算图像中每对像素点之间的相似性. 当图像很大时, 计算相似性矩阵和求解相应的特征值、特征向量是很困难和耗时的. 为此, 针对合成孔径雷达(SAR)图像的特点, 提出了一个两阶段的图像分割方法, 首先采用分水岭算法对图像进行过分割, 然后再用改进的谱聚类算法进行聚类. 新方法不仅可以减少噪声对分割结果的影响, 很好地保持图像边缘, 而且对时间要求较高的应用也具有一定的参考价值. 为了验证新方法的有效性, 将其用于 SAR 图像分割, 取得了较优的分割结果.

关键词: 谱聚类算法; 分水岭; SAR 图像分割

中图分类号: TP75 **文献标识码:** A

SAR IMAGE SEGMENTATION BASED ON WATERSHED AND SPECTRAL CLUSTERING

MA Xiu-Li¹, JIAO Li-Cheng²

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Institute of Intelligent Information Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Spectral clustering is a similarity-based clustering algorithm on graph theory. When the processed image is very huge, it is very difficult and time-consuming to compute affinity matrix and its eigenvalues and eigenvectors. Aiming at the characteristics of synthetic aperture radar(SAR) images, a two-stage image segmentation algorithm was proposed, in which watershed was used to produce over-segmentation and an improved spectral clustering algorithm was applied to perform final clustering. The new algorithm can not only reduce the noise in SAR images and keep their boundary very well but also is valuable to the application of higher demand for time. To verify the performance of the proposed algorithm, it was applied to segment SAR images, and better segmentation results were obtained.

Key words: spectral clustering algorithm; watershed; SAR image segmentation

引言

近几年, 谱聚类方法得到了飞速发展, 并且较现存方法表现出明显的优势. 谱聚类基于谱图划分理论, 是一种流行的高性能计算方法. 它将数据聚类问题看成是一个无向图的 multiway 划分问题. 由于图划分问题的组合本质, 求图的最优划分是一个 NP-难问题. 一个有效的解决办法是将问题放松到实数值域, 从而将原问题转换为求矩阵的广义特征值和特征向量的问题^[1].

标准谱聚类算法处理的是两类问题, 多类划分问题通过递归调用二分方法来实现, 然而该方法计

算效率低, 不稳定, 没有充分利用包含有用划分信息的其它特征向量[1]. 针对此问题, 一种求解多类划分的方法是构造 multiway 划分准则, 另外一种方法是利用一种嵌入方法^[2], 其思想类似于 PCA 子空间方法. 该方法同时使用矩阵的多个特征向量来构造一个简化的数据空间, 在该空间中数据的分布结构更加明显, 使用简单的分组方法就可以取得满意的结果.

谱聚类算法不局限于正态分布的聚类, 具有坚实的理论背景, 并基于已知的划分准则, 是计算近似最优的二分和 k 分的有效方法. 目前, 许多新算法^[1-4] 相继被提出并被成功用于很多领域, 包括

收稿日期: 2007-10-12, 修回日期: 2008-05-22

Received date: 2007-10-12, revised date: 2008-05-22

基金项目: 国家“863”计划(2002A135080、2007AA01Z319)、上海大学创新计划(A. 10-0107-07-005)及上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金(B. 37-0107-07-702)项目资助

作者简介: 马秀丽(1978-), 女, 河北南宫人, 博士、讲师, 主要研究方向为模式识别, 图形图像处理, 智能信息处理.

图像分割、计算机视觉和 VLSI 设计、语音分离和视频分割、网页划分和文本挖掘等,但是在 SAR 图像中的应用很少. 已经证明^[3], 尤其当数据的结构容易发现时, multiway 谱聚类具有更优的性能. 因此,在 multiway 谱聚类算法的框架下,我们提出了一种新的谱聚类算法并将其成功用于 SAR 图像分割.

尽管谱图理论方法对图像分割问题的解决给予了很大的希望,但是,由于谱聚类是基于图论的以相似性为基础的聚类方法,需要计算图像中每对像素点之间的相似性. 当图像很大时,计算相似性矩阵和求解相应的特征值和特征向量是很困难和耗时的. 所以,在大规模问题中的应用很少. 为了将谱聚类算法用于大规模数据集的处理,两种不同类型的算法被研究. 一种算法是采用逼近技术来解决大规模数据集的处理问题^[5],另一种算法则是先对图像进行预处理,然后再采用谱聚类算法进行聚类^[6].

针对 SAR 图像的特点,我们提出了一种两阶段的图像分割算法. 分水岭算法对图像进行过分割的同时很好地保持了图像边界,其过分割的缺点变成了优点,提供了小的原型块;改进的 multiway 谱聚类不是聚类单一的特征点,而是聚类原型块或区域. 新算法对时间要求较高的应用也具有一定的参考价值和应用价值. 为了验证新方法的性能,将其用于 SAR 图像分割,分割结果令人满意.

1 基于分水岭-谱聚类的图像分割

1.1 分水岭分割策略

分水岭算法是一种区域提取算法,由于算法实现过程简单有效,现已成为广泛使用的图像分割工具. 分水岭算法具有区域增长算法的优势,区域边界形成了一个封闭、连接的集合,并且具有空间一致性,同时充分利用了梯度操作捕获的边缘信息. 然而,分水岭算法中的梯度操作对噪声敏感,容易对图像产生过分割. 在新算法中,分水岭过分割的缺点变成了优点,为第二个阶段的谱聚类算法提供了小的原型块. 具体算法描述如下:

步骤 1 图像简化

与一般光学图像相比,SAR 图像的相干成像原理使得 SAR 图像本身含有大量的斑点噪声. 为此首先进行图像简化,从而去掉小的噪声干扰以及对感知不重要的细节,对图像起到平滑作用. 这里选取形态学中最常用的工具之一开形态重建滤波器. 形态

重建滤波器的优势在于简化图像而不造成图像模糊或改变图像轮廓.

步骤 2 计算形态梯度图像

形态梯度图像反映了图像中灰度的变化情况,在灰度值变化较大的边缘具有较大的梯度值,而在灰度值均匀的区域内部具有较小的梯度值. 一幅图像 f 的形态梯度图像定义为膨胀变换减去腐蚀变换^[7]:

$$\text{grad}(f) = (f \oplus b) - (f \ominus b), \quad (1)$$

其中, \oplus 表示膨胀运算, \ominus 表示腐蚀运算, b 为结构元素,结构元素不能取太大,否则会将灰度变化剧烈的小区域滤掉.

步骤 3 计算浮点活动图像

所谓“浮点”是指图像的数据类型是浮点型,浮点活动图像在图像边缘具有较高的亮度值,因此,浮点活动图像本身就比较粗糙地反映了图像的边缘. 浮点活动图像定义为

$$\text{fimg}(f) = \text{grad}(f) * \text{grad}(f) / 255.0 \quad (2)$$

步骤 4 将浮点活动图像输入分水岭算法产生过分割结果.

经过第一个阶段后,将产生的过分割结果保留下来作为第二个阶段的输入.

在第二个阶段,使用谱聚类算法对过分割产生的小块区域进行聚类,从而获得最终的分割结果.

采用谱聚类而不是普通聚类的原因是,在 R^2 空间中,普通的聚类不满足凸区域,直接应用 k -均值聚类算法通常不能得到满意的结果. 但是,一旦将这些点映射到 R^k 空间,它们将形成紧支撑的聚类,尽而可以取得更好的聚类结果.

1.2 基于特征值尺度化特征向量的 multiway 谱聚类

谱算法利用数据相似性矩阵的特征向量中包含的信息来检测结构,最近该类方法越来越流行,越来越受到人们的欢迎,并且已被成功应用到很多领域. Multiway 谱聚类使用多个特征向量包含的更多信息,直接将数据聚成所需要的类. 与二分谱聚类算法相比, multiway 谱聚类算法具有更优的性能,尤其是当数据的结构容易发现时^[3]. 因此,我们采用 multiway 谱聚类算法, NJW 算法^[2]进行聚类,并在 NJW 算法的基础上,采用了特征值尺度化的特征向量.

在此,从极化理论^[8]的角度解释了采用特征值尺度化特征向量的好处,数据的特征向量与特征空间中点之间的角度相匹配,当特征向量的维数减少

时,具有较高相似性的点之间的角度减小,而具有较低相似性的点之间的角度增加,这突出了数据的聚类结构,使得各种启发式后处理算法都能获得很好的分割结果.

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是分水岭过分割产生的块特征的集合,将 X 聚成 K 个子集合. 采用 Gaussian 核, σ 是核参数,具体算法描述如下:

步骤 1 计算相似性矩阵 $S \in R^{n \times n}$. 当 $i \neq j$ 时, $S_{ij} = \exp(-\|x_i - x_j\|^2 / 2\sigma^2)$, 否则, $S_{ii} = 0$.

步骤 2 定义对角矩阵 D , 其对角元素 (i, i) 是矩阵 S 第 i 行元素之和, 即 $D(i, i) = \sum_j S_{ij}$. 构造矩阵 $L = D^{-1/2}SD^{-1/2}$.

步骤 3 计算 L 的特征值和特征向量, 设前 K 个最大的特征值为 $\lambda_i, i = 1, \dots, K$, 对应的特征向量为 $v_i, i = 1, \dots, K$.

步骤 4 使用前 K 个最大的特征值 $\lambda_i, i = 1, \dots, K$ 尺度化相应的特征向量 $v_i, i = 1, \dots, K$, 即 $\sqrt{\lambda_1}v_1, \sqrt{\lambda_2}v_2, \dots, \sqrt{\lambda_K}v_K$, 并构成矩阵 $Y \in R^{n \times K}$, 其中 Y 的每一列为一个被特征值尺度化的特征向量.

步骤 5 将矩阵 Y 按行进行归一化, 使其每行具有单位长度, 因为归一化的谱聚类具有更优的性能^[9].

步骤 6 把矩阵 Y 的每一行当作 R^k 空间中的一个点, 并通过 k -均值聚类(KM)方法将它们聚成 K 类. 在这里采用 k -均值聚类的原因是为了与直接采用 k -均值聚类算法的分割结果进行对比.

步骤 7 当且仅当矩阵 Y 的第 i 行被指派到第 j 类时, 原始数据点 x_i 也属于第 j 类.

已经证明^[3], 当数据点被聚成 K 类时, 相似性矩阵的前 K 个特征向量一定是成对常数. 因此, 在第三步选择前 K 个最大特征值对应的特征向量. 使用多个特征向量的好处是: (1) 可以逼近最优的 K -

way 规范切划分准则; (2) 把数据转换到由 K 个正交基向量张成的新的嵌入空间; (3) 可防止由于信息丢失造成的不稳定性.

为了克服 k -均值算法对初始聚类中心的依赖性, 实验中, 选择多次运行 k -均值聚类算法, 将误差最小的结果输出, 作为最终的分割结果.

2 实验与讨论

为了验证新方法的有效性, 将其用于 SAR 图像分割. 此外, 在图像简化和分水岭分割时结构元素都取 3×3 的球状结构, 结构元素不能取得太大, 否则会将灰度变化剧烈的小区域滤掉. 为了提取图像的多尺度信息, 充分利用小波良好的时频局部特征、多尺度变化特征和方向特征, 采用基于小波能量的特征提取方法^[10]. 特征提取时, 采用 Daubechies 小波分解 3 层, 区域窗口大小为 15×15 .

值得说明的是, 由于分水岭过分割产生的区域块是不规则的, 直接采用小波对不规则块进行特征提取是不可能的. 因此, 我们首先计算图像中每个像素点的小波能量特征, 然后将不规则块中所有像素特征的均值作为该不规则块的特征.

2.1 无人机 SAR 图像分割

SAR 图像大小 256×256 , 该图像分割的目的是将城区与其他区域分割开来, 即将图像分割成 2 类. 采用基于小波能量的特征提取方法^[10]. 核参数根据经验选择, $\sigma = 0.5$. 将图像分割成 2 类的对比结果如图 1 所示, 同时表 1 给出了运行时间及分割结果剩余块数对比.

表 1 运行时间及分割结果剩余块数对比

Table 1 Comparison of runtime and remainder blocks

	分水岭 + KM	原始谱聚类算法	新方法
剩余块数	17	—	13
运行时间 (s)	2.2469	29.8220	2.5810

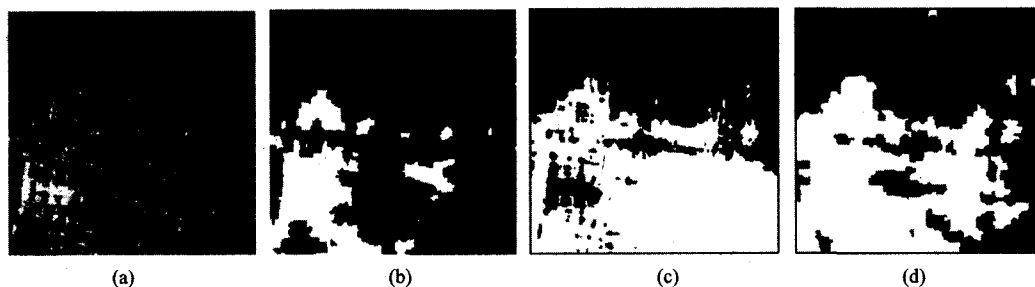


图 1 不同方法分割结果对比 (a) 原图 (b) 分水岭 + KM (c) 原始谱聚类算法 (d) 新方法
Fig. 1 Comparison of different methods on segmentation results (a) original image (b) watershed + KM (c) original spectral clustering algorithm (d) proposed algorithm

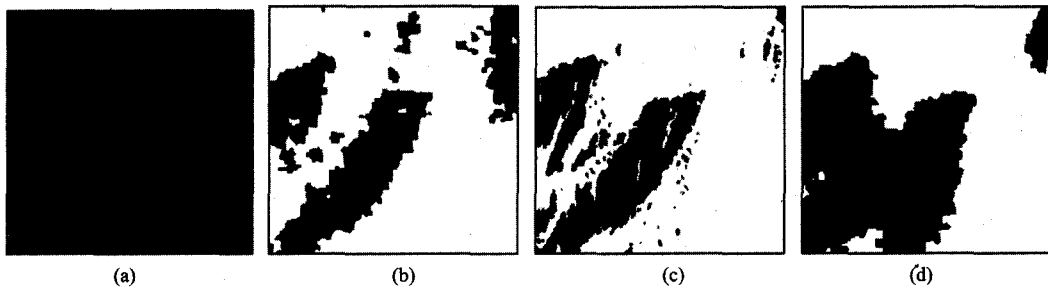


图2 不同方法分割结果对比 (a)原图 (b)分水岭+KM (c)原始谱聚类算法 (d)新方法
Fig.2 Comparison of different methods on segmentation results (a)original image (b) watershed + KM (c)original spectral clustering algorithm (d)proposed algorithm

从图1可以看出,新方法优于基于KM的方法,因为新方法更能准确地将建筑物和其他区域分割开来,并且分割后剩余块数较少。新方法的分割结果优于原始谱聚类算法,尤其是在分割结果图1(d)的右下角,新方法能将该区域分割开来,而原始谱聚类算法不能,如分割结果图1(c)右下角所示。

从表1可以看出,新方法的运行时间远远低于原始谱聚类算法的运行时间。尽管其略高于KM算法的运行时间0.3s,但是其分割结果远远优于KM算法。因此,新方法是有效的。

下面的实验旨在将沟壑和平地分割开来,即将图像分割成两类。图像大小 256×256 ,采用基于小波能量的特征提取方法^[10]。核参数根据经验选择, $\sigma = 0.5$,两类分割对比结果如图2所示。同时,表2给出了分割结果的剩余块数对比。

从图2和表2可以看出,新方法不仅在运行时间上远远低于原始谱聚类算法,而且其分割结果远远优于原始谱聚类算法。此外,通过实验观察到,新方法的分割结果特别稳定,在统计的20次分割结果中基本没有异常现象。尽管基于KM算法的运行时间比新方法低0.4s,但是其分割结果远远劣于新方法。

总之,与原始谱聚类算法相比,图1和图2在经过分水岭预分割以后,相似性矩阵由原来的 $(256 \times 256)^2$ 分别减少为 $(802)^2$ 和 $(827)^2$,所以新方法可以大大减少原始谱聚类算法的运行时间,提高算法的收敛速度。

2.2 机载 SAR 图像分割

表2 运行时间及分割结果剩余块数对比

	分水岭+KM	原始谱聚类算法	新方法
剩余块数	17	—	8
运行时间(s)	2.8000	30.8234	3.2032

本实验中采用的 SAR 图像一般含有不同程度的噪声。实验结果表明,对含噪 SAR 图像,新方法的分割结果不但稳定而具有较好的一致性,并且最后剩余区域块数较少。

SAR 图像图3(1a)和图3(2a)的大小均为 256×256 ,核参数根据经验分别设置为 $\sigma = 0.6$ 和 $\sigma = 0.5$ 。对图3(1a)分割的目的是将图像分割成2类,把植被等与其余区域分割开来。而图3(2a)是将图像分割成3类,把河流、植被与其余区域分割开来。分割后的实验结果对比见图3和表3。

从实验结果可以看出,新方法具有更优的分割结果和更完整的分割区域,并且区域一致性很好。无论从视觉效果还是从统计结果,新方法都优于基于KM的分割方法。从表3可以得出与上面实验相同的结论:新方法可以大大提高原始谱聚类算法的收敛速度。

3 结语

为了将谱聚类算法应用于 SAR 图像处理,提出了两个阶段的图像分割方法,采用分水岭算法对图像进行预分割,然后以预分割产生的过分割结果,即小块为单位,再使用改进的谱聚类算法进行聚类。为了验证新方法的性能,将其用于 SAR 图像分割。实验结果表明,新算法在减少运算时间的同时保证了分割的精度和效果,在绝大多数情况下是有效的。图像简化去除了噪声和对感知不重要的细节对分割结果的影响,谱聚类算法克服了传统聚类算法尤其是

表3 运行时间及分割结果剩余块数对比

		分水岭+KM	原始谱聚类算法	新方法
图3(1a)	剩余块数	30	—	17
	运行时间(s)	2.7279	23.8188	3.1953
图3(2a)	剩余块数	67	—	57
	运行时间(s)	2.2454	36.8623	2.7030

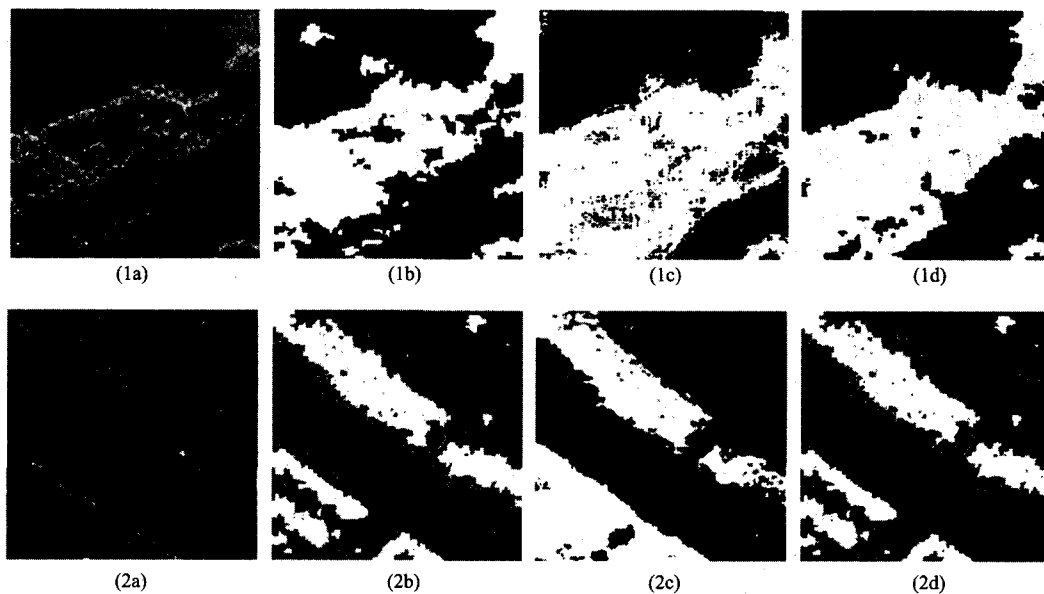


图3 不同方法分割结果对比 (1a)原图 (1b)分水岭+KM (1c)原始谱聚类算法 (1d)新方法 (2a)原图 (2b)分水岭+KM (2c)原始谱聚类算法 (2d)新方法

Fig. 3 Comparison of different methods on segmentation results (1a)original image (1b)water shed + KM (1c)original spectral clustering algorithm (1d)proposed algorithm (2a)original image (2b)watershed + KM (2c)original spectral clustering algorithm (2d)proposed algorithm

k-均值仅对凸区域聚类有效的缺点,而尺度化特征向量缩小了类内距,增加了类间距,突出了聚类结构,分割结果是令人满意的。

核参数的选择是一个尚未解决并且需要亟待解决的问题,如何根据图像特点选择最优的核参数值得我们进一步研究。

REFERENCES

- [1] Shi J B, Malik J. Normalized cuts and image segmentation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**: 888—905.
- [2] Ng A Y, Jordan M I, Weiss Y. On spectral clustering: analysis and an algorithm [J]. *Neural Information Processing Systems*, 2002, **14**: 849—856.
- [3] Meila M, Shi J B. A random walks view of spectral segmentation [J]. *Neural Information Processing Systems*, 2000, 873—879.
- [4] TAO Wen-Bing, JIN Hai. Ship infrared object segmentation based on mean shift filtering and graph spectral clustering [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陶文兵, 金海. 基于均值

漂移滤波及谱分类的海面舰船红外目标分割. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(1): 61—64.

- [5] Fowlkes C, Belongie S, Chung F, et al. Spectral grouping using the Nystrom method [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, **26**: 214—225.
- [6] Robert J O' Callaghan, David R Bull. Combined morphological-spectral unsupervised image segmentation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14**: 49—62.
- [7] SUN Wei, XIA Liang-Zheng. Infrared target segmentation algorithm based on morphological method [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙伟, 夏良正. 一种基于形态学的红外目标分割方法. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(3): 233—236.
- [8] Brand M, Huang K. A unifying theorem for spectral embedding and clustering [R]. Technical Report of Mitsubishi Electric Research Laboratory. TR-2002-42. 2002.
- [9] Luxburg U V, Bousquet O. Limits of spectral clustering [J]. *Neural Information Processing System*, 2005, **17**: 857—864.
- [10] Hu Z L, Guo D Z, Sheng Y H. Extracting textural information of satellite SAR image based on wavelet decomposition [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2001, **5**: 423—427.