

遥感影像土地覆盖分类的多点地统计学方法

唐韵玮^{1,2} 张景雄²

1 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室,北京,100094

2 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

摘要:提出了一种基于多点地统计学理论的遥感影像分类后处理方法。此方法从训练图像中提取先验的空间结构信息,推断类别的空间分布模式和相关关系,训练图像中能够建立包含空间关系的模型,比传统变异函数模型所表达的点对之间的关系更为丰富。将此方法应用于从 Landsat TM 影像中提取湿地类别,与空间平滑法和基于马尔科夫随机场的分类方法相比,其总体分类精度有所提高,且对曲线分布的地物类别的处理具有明显优势。

关键词:影像分类;多点地统计学;条件模拟;贝叶斯;马尔科夫随机场

中图法分类号:P237.4;TP753 **文献标志码:**A

由于地物的复杂性和分类器的局限性,遥感影像分类结果通常需要经过后处理才可达到精度要求。空间中邻近的物体有着更高的相关性^[1],在分类问题上表现为相近的邻元更有可能是相同的类别,基于地统计理论的分类方法符合了这种思想。地统计学理论因其考虑了区域变量的依赖性而广泛应用于地学研究。多点地统计学在 90 年代初被提出^[2],近年来才有少数研究将该理论用于遥感领域。例如,利用多点地统计学实现遥感影像的超分辨率制图^[3],对遥感影像的线状地物进行提取^[4]等。多点地统计能同时用图像中多个点的关系表达空间结构的连续性和可变性,比基于点对关系建立变异函数模型的表达形式更为丰富^[5]。

本文利用多点地统计的条件模拟,根据空间分布的结构模型对遥感影像进行分类后处理,可看作是一种带有模型、结合空间上下文信息的平滑算法。

1 多点地统计的分类后处理

多点地统计中,训练图像描述了对真实场景分布的一种潜在的表现形式,是对所期望获得场景的一种模拟。训练图像代替了传统地统计学中变异函数,为模拟结果提供先验知识。

多点地统计利用分类后的图像所提供的空间信息来推断各类别间的分布关系和空间依赖,然后通过模拟的方法重现类别分布。根据这个思想,训练图像采用初步的光谱分类法所得到的土地覆盖图。当搜索模板扫描训练图像时,获得了由类别分布图案构成的各个数据事件。然后,统计每个数据事件发生的次数,其统计量存储在一个搜索树中,记录了训练图像的空间结构特征。模拟采用了正态等分模拟(single normal equation simulation,SNESIM)算法,遵循经典序贯算法的流程,根据搜索树记录数据事件的发生情况,模拟时逐点推断每个数据事件中间点的取值情况。

假设一个随机变量 $c(u)$ 可能取的类别值为 k ,对于变量 $c(u)=k$ 的条件概率由贝叶斯公式决定,条件概率密度函数则直接从训练图像中获取。算法的步骤如下。

1) 定义一个数据模板,从最粗尺度的格网开始,用扩展的模板扫描训练图像从而建立搜索树,扫描过程中将非空的数据事件存储在搜索树中。

2) 定义一条路径,保证访问到所有未知点且只访问一次。

3) 对于每个未知点 u ,保留模板中用来构建搜索树的条件数据,假设 $n' < n$ 是条件数据的个数, $d(u_{n'})$ 是对应的数据事件,计算搜索树中存储

数据事件 $d(u_{n'})$ 的概率分布。若 $d(u_{n'})$ 在搜索树中没有重复,则放弃最远的一个条件数据,条件数据减少到 $(n'-1)$,再从搜索树中获取数据事件 $d(u_{n'-1})$ 的分布。如果条件数据减少到 $n'=1$ 仍没有重复的数据事件 $d(u_n)$ 被找到,则条件概率由边缘概率取代。

4) 从结点 u 的条件概率分布函数中模拟每个点的类别,将这些模拟值加入模拟格网中,作为下次模拟的制约条件。

5) 继续访问路径中的下个结点,重复步骤3)、4),直至所有点都遍历到,得到了一次模拟图像;然后,用一条不同的路径,从步骤2)重复整个过程,产生另一次实现,直至所有结点都访问到。

SNESIM 允许将数据条件作为模拟的制约,共同作用于后验概率。其中,硬数据相当于监督分类的训练样本,在模拟中严格继承其位置和属性,软数据则给出每个像素所有可能类别的归属概率。

2 实例分析

本文在利用传统的最大似然法对遥感影像进行分类的基础上,用多点地统计模拟对分类结果作后处理,对比算法为空间平滑方法和基于贝叶斯的马尔科夫随机场分类法。

2.1 实验区域和数据

实验区域位于乌干达的索罗蒂区,采用美国陆地探测卫星系统 Landsat TM 获取的影像,轨道号为 P171R59,获取时间是 2001-04-17,正是雨季之始,影像中有很多湿地区域。影像被裁剪成 $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$ 的大小,如图 1(a)所示。土地分类的参考数据是基于已有的研究成果,通过面向对象分类法和实地调绘所得^[6],有水体、沼泽、水生植物和其他植被 4 个类别,如图 1(b)所示。300 个随机采样的类别作为训练样本用来实施监督分类,参考影像的所有点都作为测试数据以评价分类结果。

2.2 马尔科夫随机场分类算法

在光谱分类的基础上加入马尔科夫随机场模型可以结合上下文信息,提高分类精度。对于遥感影像数据,假设一幅 n 个像素的影像用 \mathbf{x} 表示,分类后得到的类别不加区分地用 c 表示。给定一个样本,其中每一个点位按照某种分布随机赋值,样本全体叫做随机场,影像 \mathbf{x} 可以当作一个随机场。根据贝叶斯公式,所求的类别为:

$$\hat{c} = \operatorname{argmax}_c [p(\mathbf{x} | c) p(c)] \quad (1)$$

贝叶斯判别准则中的条件概率 $p(\mathbf{x} | c)$ 一般假设服从高斯分布^[7],先验概率 $p(c)$ 由马尔科夫随机场建模得到。

马尔科夫假设认为,一个点在已知所有其他点的情况下和只知道它的邻元的情况下,其条件分布是等同的。基于马尔科夫随机场分类法的判别公式为:

$$\begin{aligned} \hat{c} = \operatorname{argmin} & \left[\frac{1}{2} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}) + \right. \\ & \left. \frac{m}{2} \ln(2\pi) + \frac{1}{2} \ln |\boldsymbol{\Sigma}| + V_c \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$\boldsymbol{\mu}$ 和 $\boldsymbol{\Sigma}$ 分别是 m 个特征波段的均值和协方差矩阵。式(2)中,等式右边的前三项是光谱特征,最后一项簇 V_c 由邻元决定,是纹理特征。根据判断邻元类别是否相同对 V_c 进行赋值,邻元影响越大则 V_c 的累积效果越大。可以假设等式右边是一个能量项 e ,这样,解求最大后验概率转变成解求最小能量。常用的解求能量函数的优化方法是模拟退火法,基本思想是引入温度变量 T ,设置一个初始温度 T_0 ,然后按照一定规律逐渐降低温度,直至达到收敛准则。

2.3 实验过程

Landsat TM 影像的 1~5 和 7 波段参与分类,分类器是最大似然法,然后,用一个 3×3 的模板对最大似然的结果进行空间平滑。根据式(2),在同样条件下实施基于贝叶斯的马尔科夫随机场分类法,能量求解采用的是基于 Gibbs 采样的模拟退火法。最后,应基于多点地统计模拟的后处理方法。训练图像是最大似然法的分类结果,300 个训练样本作为硬数据的模拟条件,软数据是由最大似然法估计的后验概率而得。多点模拟的类别是基于 100 次模拟的占优类别平均图。实验流程图如图 2 所示。

2.4 实验结果分析

图 1(c)~2(f)列出了几种方法的分类图。图 1(d)的空间平滑去掉了图 1(c)中的很多椒盐噪声。在空间平滑的窗口中,窗口的中心值用一个占优类别替代。这种无模型的平滑算法只利用了单一的滤波器,无法满足多类别、分布复杂的空间信息的需求。图 1(e)中的马尔科夫分类法的结果中,水生植物类的平滑效果比空间滤波更甚,这是由于邻元簇影响参数的选取会导致同质性;水生植物类边缘呈现锯齿状,这是因为受 4-连通的邻元簇的影响。

水生植物类别分布广泛,而且很多都生长在沼泽的边缘地区。对于多点地统计模拟的结果,

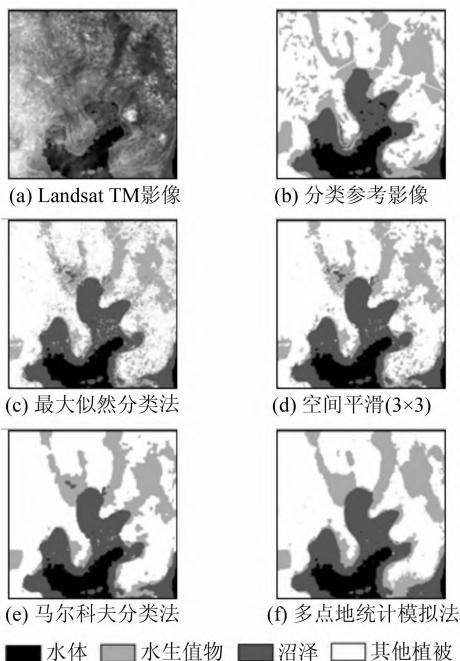


图 1 Landsat TM 影像和各种方法得到的分类图像

Fig. 1 Landsat TM Image and Classified Maps from Various Classification Methods

多次模拟实现具有平均效应,类别边缘比马尔科夫分类结果的连续性好。最大似然法的结果不仅噪声多,还存在明显的沼泽错分到水生植物类的情况。这种错分情况在空间平滑和马尔科夫分类法中依然可见,而在点地统计模拟的结果中有所改善。沿着沼泽类边缘分布的水生植物类别,空间平滑和最大似然法的结果噪声较多,而马尔科夫的分类结果又过于平滑,多点地统计模拟则比较完整地重现了这类边缘曲线分布,体现了多点地统计模拟在对曲线分布地物类别的细节处理上具有优势。

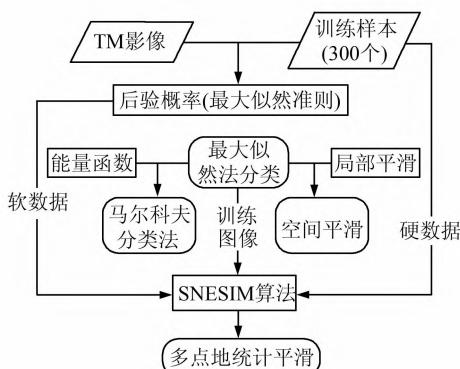


图 2 实验流程图

Fig. 2 Flowchart of Experiment

2.4.1 分类精度

表 1 展示了 § 2.3 节所述方法中两个重点类别的精度。可以看出,对沼泽和水生植物这两个

类别,多点地统计模拟方法的生产者精度有较大提高,而多点地统计模拟和马尔科夫分类法都对用户精度有较大改善。多点地统计模拟的总体精度和 Kappa 系数均高于最大似然分类法、空间平滑法和马尔科夫分类法。

沼泽类的用户精度在多点地统计模拟法中较最大似然法分类有所提高,但是其提高不如马尔科夫分类法显著。原因之一是训练图像和软数据的条件制约是用最大似然法得到的,本身存在误差。特别是对于软数据,即使最大后验概率对应的类别是正确的,但如果后验概率不够大,模拟时每次实现也容易出现错分的情况。另一个原因是沼泽类别的空间分布形态,其分布较集中,且呈连续块状区域。因此,这一部分的类别被多点地统计捕捉到时,受先验的空间关联性的影响,模拟时更倾向于重现平滑、呈块状分布的区域。而水生植物类有着广阔且连续的分布图案,沿着沼泽分布的边缘曲线部分具有连通性和强相关性,所以在模拟中被保留下。因此,多点地统计模拟后处理的精度要高于马尔科夫分类法的精度。

表 1 沼泽和水生植物各种方法的分类

精度与 Kappa 系数

Tab. 1 Classification Accuracy and Kappa Coefficient of Swamp and Flooding Grassland

方法	类别	生产者精度/%	用户精度/%	总体精度/%	Kappa系数
最大似然法	沼泽	92.66	85.79	77.78	0.664
	水生植物	54.18	65.55		
空间平滑法	沼泽	95.06	87.77	80.11	0.698
	水生植物	54.62	71.38		
马尔科夫分类法	沼泽	95.62	88.74	81.67	0.721
	水生植物	55.64	75.73		
多点地统计模拟法	沼泽	96.73	88.04	83.25	0.747
	水生植物	62.18	76.22		

2.4.2 高阶统计分析

为诠释多点地统计的相关性,本文通过一个针对水生植物类别的三阶矩统计图,比较马尔科夫分类法和多点地统计模拟方法在高阶统计量上的区别。以东方向为起始方向,沿 45° 角逆时针方向探测 3 个点之间的空间相关性,即起始点与离起始点距离为 h_1 和 h_2 的点之间的相关性,横纵坐标分别为 h_1 和 h_2 ,如图 3 所示。这些图都是沿对角线对称的,对角线的亮度和连续性表明水生植物类模式分布的空间相关性的强弱。左下角原

点处附近出现的最亮部分代表所有连续图案内部的空间相关性,而图像上其他的亮度部分是非连续图案间的相关性。

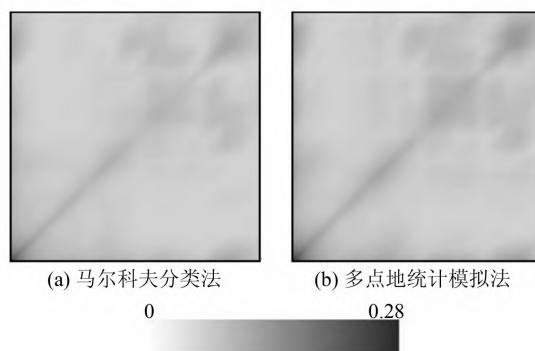


图3 水生植物类 45° 模板的三阶矩相关性图

Fig. 3 Third-Order Cumulant Maps of Flooding Grassland Along 45° Direction

由图3可见,对于水生植物类别,多点地统计模拟比马尔科夫分类法的结果具有更强的相关性和连续性。右上角的亮度范围在图3(b)中比图3(a)要稍大一些,说明多点地统计模拟的结果中的水生植物类分布细节比马尔科夫法更多。对于图案间的相关性,在图3(b)中约200个单元的位置出现亮斑,而对应在图3(a)中则不明显,是由于马尔科夫法比多点地统计模拟的结果平滑,且分为水生植物类别的像元要少。图3(b)的局部区域比图3(a)更亮,表明多点地统计模拟法对细节的捕捉程度比马尔科夫分类要好。因此,多点地统计模拟在对水生植物这种复杂空间分布的地物类别进行处理时要优于马尔科夫分类法。

3 结语

本文讨论的首要问题是多点地统计模拟的平滑原理,以及该方法与空间平滑法、马尔科夫分类法的不同之处。多点地统计在模拟过程中考虑了类别分布的相关性,它与别的分类方法最大的不同在于这种基于训练图像的先验知识对类别的平滑是有针对性的。SNESIM算法是数据事件搜索和匹配的过程,SNESIM用作分类后处理与传统的克里格法内插有着本质区别:前者通过模拟的多次实现取占优类别从而产生平均模式,减少了单次模拟的分类图中的不确定性,也导致了类别的平滑;后者是一种空间内插的方式,未考虑遥感影像的光谱特性,不属于基于像素的分类方法。

空间平滑对所有点位采用恒定的权重,平滑了那些孤立的像元,但是没有模型依据。多点地

统计模拟则采用了一个结合了先验知识、边缘分布、硬数据和软数据的复杂模型。马尔科夫分类法的初始分类是基于最大似然判别规则的,之后是光谱信息和空间信息综合作用的结果。马尔科夫分类法的条件概率只来自于光谱信息,而多点地统计的条件概率来源于训练图像和条件数据。

本文研究的实例中,所有方法的总体分类精度都达到了85%以上。本文只考虑了4个类别,减少了分类的不确定性,而通常的基于像素的分类方法精度没有这么高。只采用4个类别的原因是本文的实验目的在于为锥虫病的研究提供基础数据,所以只关注了和病源传播有关的湿地类别,而对别的类别并没有细化区分;另一个重要原因是由于目前SNESIM算法效率的限制,过多的类别模拟过程很慢,算法的效率有待进一步提高。

值得指出的是,本文研究采用了软分类的概率作为模拟条件的辅助数据,这样做的目的除了制约每个像素的分类精度外,还有一个重要作用就是保证了对非平稳性训练图像的多点地统计模拟的适用性^[8]。另一种常用的对非平稳性训练图像模拟的解决方案是利用分区的概念,对每个区域采用不同的训练图像进行模拟^[9]。

本文提出了一种基于多点地统计的模拟方法改善土地覆盖分类精度。这种方法的核心在于从训练图像中提取具有空间结构的先验模型,比起单一的空间平滑法和基于马尔科夫随机场的分类方法,多点地统计模拟能提供更丰富、以多点关系为基础、描述复杂图案分布的训练图像信息。具体实例对比分析表明了该方法有效,提高了分类精度,达到了对复杂形态分布的湿地区域进行准确分类的目的。

致谢:感谢英国南安普顿大学地理系的Peter M. Atkinson教授为本文提供理论指导,感谢Nicola A. Wardrop博士为本文提供实验参考数据。

参 考 文 献

- [1] Tobler W R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region[J]. *Journal of Economic Geography*, 1970, 46(2): 234-240
- [2] Guardiano F, Srivastava R M. Multivariate Geostatistics: Beyond Bivariate Moments[M]// Soares A. *Geostatistics-Troia*. Dordrecht: Kluwer Academic Publications, 1993
- [3] Boucher A. Sub-pixel Mapping of Coarse Satellite Remote Sensing Images with Stochastic Simulations from Training Images [J]. *Mathematical Geosci-*

- ences*, 2009, 41(3): 265-290
- [4] Ge Y, Bai H. Multiple-point Simulation-based Method for Extraction of Objects with Spatial Structure from Remotely Sensed Imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(8): 2311-2335
- [5] Strebelle S. Sequential Simulation Drawing Structures from Training Images[D]. Stanford: Stanford University, 2001
- [6] Batchelor N. The Spatial Epidemiology of Rhodesian Sleeping Sickness in Recently Affected Areas of Central and Eastern Uganda[D]. Edinburgh: University of Edinburgh, 2010
- [7] Tso B, Olsen R C. A Contextual Classification Scheme Based on MRF Model with Improved Parameter Estimation and Multiscale Fuzzy Line Process [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(1): 127-136
- [8] Chugunova T, Hu L. Multiple-point Statistical Simulations Constrained by Continuous Auxiliary Data[J]. *Mathematical Geosciences*, 2008, 40(2): 133-146
- [9] de Vries L M, Carrera J, Falivene O, et al. Application of Multiple Point Geostatistics to Non-stationary Images [J]. *Mathematical Geosciences*, 2009, 41(1): 29-42

Land Cover Classification of Remotely Sensed Imagery Using Multiple-point Geostatistics

TANG Yunwei¹ ZHANG Jingxiong²

1 Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS, Beijing 100094, China

2 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: A post-processing method is proposed based on the theory of multiple-point geostatistics. The method extracts prior spatial structures from a training image, and infers the pattern distribution and correlation of classes. A spatial correlation model can be established from training image, which is preferable to the traditional two-point-based variogram model. An experiment was performed on a Landsat TM image, wetlands with a complicated distribution were extracted. The method was compared to the spatial filtering and the contextual Markov random field (MRF) classifier. This approach increases overall classification accuracy, and has advantages when dealing with classes that have curvilinear distributions.

Key words: image classification; multiple-point geostatistics; conditional simulation; Bayes; Markov random fields

First author: TANG Yunwei, PhD, specializes in geostatistical analysis and application of remote sensing. E-mail: tangyunwei2008@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41171346, 41071286.