

中图法分类号: TP751 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)04-0495-08

论文索引信息: 林皓波, 柏延臣, 王锦地, 宋旦霞. 遥感影像超分辨率制图研究进展 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(4): 495-502

遥感影像超分辨率制图研究进展

林皓波^{1),2)}, 柏延臣¹⁾, 王锦地¹⁾, 宋旦霞¹⁾

¹⁾(北京师范大学地理学与遥感科学学院遥感与地理信息系统研究中心; 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875)

²⁾(河北大学计算中心, 保定 071000)

摘要: 尺度问题是土地覆盖分类中的一个核心问题, 向下尺度转换又是其中的难点。混合像元分解可以得到亚像元尺度的类别组分百分比, 但无法求得亚像元的具体位置。遥感影像超分辨率制图是由粗空间分辨率的影像得到高空间分辨率分类结果图的技术, 可用于地表分类向下尺度转换, 近年来该技术已成为遥感影像分类和尺度转换领域的研究热点。对超分辨率制图研究进展做了详细论述, 从超分辨率制图的发展和研究现状、主要方法、精度评价等几方面进行了详细阐述, 并分析了当前超分辨率制图算法存在的主要问题, 以及可能的研究重点和发展空间。

关键词: 超分辨率; 亚像元; 制图; 分类; 尺度转换

Research progress in super-resolution mapping from remotely sensed imagery

Lin Haobo^{1),2)}, Bo Yanchen¹⁾, Wang Jindi¹⁾, Song Danxia¹⁾

¹⁾(Research Center for Remote Sensing and GIS, School of Geography, Beijing Normal University;

State key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing 100875 China)

²⁾(Computing Center, Hebei University, Baoding 071000 China)

Abstract: Scale problem is one of the central issues in land cover mapping from remote sensing imagery, and downscaling land cover data is a difficulty in this domain. Soft classification can provide more information than hard classification at pixel level. However, the spatial location of land cover compositions within each pixel is unknown. To solve this problem, many super-resolution mapping methods have been developed in recent years. In this paper, a review on recent development of super-resolution mapping methods is presented. The review focuses on the research status, major algorithms and accuracy assessment methods of super-resolution mapping. The main drawbacks, research challenges and future directions of super-resolution mapping are discussed.

Keywords: super-resolution; sub-pixel; mapping; classification; scaling

0 引言

土地覆盖/土地利用(LULC)是影响陆地生态

系统机能的一个重要生物物理参量, 作用于生物地球化学循环、水文过程以及地气交换, 对于任何尺度的地球动力学研究都至关重要, 是支撑多种科学研究的基础变量, 可以为气候变化、地表能量交换、灾

收稿日期: 2009-08-03; 修回日期: 2009-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(40871163, 40871161); 国家重点基础研究发展(973)计划项目(2007CB714407, 2007CB714402); 遥感科学国家重点实验室开放基金; 国土资源部百名优秀青年科技人才计划; 保定市科学技术研究与发展指导计划(10ZF005)。

第一作者简介: 林皓波(1976—), 女, 讲师。2009年于北京师范大学获地图学与地理信息系统专业博士学位, 主要从事遥感影像分类的尺度效应及尺度转换方面的研究。E-mail: haobo_lin@163.com。

通讯作者: 王锦地, E-mail: wangjd@bnu.edu.cn。

害监测、农业估产及自然资源利用等方面的研究和应用提供直接的信息和相关参数。遥感技术因其覆盖范围广、多时相、多光谱等优势成为获取土地覆盖数据不可或缺的技术手段。但是,通过遥感技术获取土地覆盖数据也有其局限性,其中最大的障碍是空间尺度问题。

遥感影像分类具有尺度效应,不同的应用目的对空间数据需求的详细程度不一,用户解决不同的问题需要不同空间分辨率的遥感影像分类产品。当前各种传感器为我们提供了从米级到公里级的多种空间分辨率的遥感影像,为多尺度遥感影像分类产品开发提供了方便,但是现有影像并不能满足所有应用对分类产品空间尺度的需求。此外,受卫星重访周期、影像质量等因素限制,有时无法获得理想的高分辨率数据。于是利用粗空间分辨率数据进行向下尺度转换成为得到高空间分辨率分类产品的一种途径。例如,区域尺度的气候、生态、灾害监测等应用需要大范围内的高分辨率地表覆盖分类产品,然而,由于数据获取和处理能力的限制,利用高分辨率遥感数据进行大范围的土地覆盖快速制图和更新是不现实的,而粗分辨率影像的获取与处理相对容易,因此可通过对粗分辨率遥感分类数据做向下尺度转换得到高分辨率的分类数据,从而解决这一难题。

传统的遥感分类向下尺度转换主要是混合像元分解技术,混合像元分解又称软分类^[1]、模糊分类、亚像元分解。常用的混合像元分解方法有线性混合模型^[2-3]、人工神经网络^[4]、模糊 C-均值分类^[5-7]等。虽然软分类与对每个像元赋予一种类别的硬分类相比能够提供更多的信息,相对更准确,但也有其不足之处。首先,软分类的结果是针对各个类别的一系列百分比图,不同于传统硬分类只有一幅包括所有类别的分类图的结果,不方便使用;其次,软分类没有给出各类亚像元的具体位置,分类结果的空间分辨率并没有真正提高。

近十几年来,遥感影像超分辨率制图研究受到越来越多的关注。遥感影像超分辨率制图(super-resolution mapping)又称亚像元制图(sub-pixel mapping),是利用粗空间分辨率的遥感数据得到高空间分辨率硬分类结果图的技术^[8-9]。该技术比混合像元分解结果更进一步,不但能够得到亚像元尺度上的类别百分比,还可得到亚像元的具体空间位置,真正实现了分类向下尺度转换。

1 超分辨率制图的发展概况

超分辨率问题起源于图像和信号处理领域,包括两个不同的分支^[10]:一是试图超越衍射极限提高光学成像系统的解析能力,二是由同一目标的多幅不同(如:运动中的目标不同时间的图像)粗分辨率图像重建一幅高空间分辨率(以下提及的分辨率均指空间分辨率)的图像。遥感领域的超分辨率问题属于后一分支,包括遥感影像的超分辨率重建、遥感影像超分辨率制图等问题。遥感影像的超分辨率重建通常是利用多幅不同时相的遥感影像重建未观测到的亚像元尺度影像;而本文所述的遥感影像超分辨率制图问题,则是利用一幅像元尺度的遥感影像推测高于观测分辨率的亚像元尺度的类别属性^[9]。遥感领域很多学者将超分辨率制图称作亚像元制图^[11],为避免与亚像元分解混淆,本文以下统一使用“超分辨率制图”。

遥感影像超分辨率制图研究主要针对两种情况:高分辨率(HR)制图和低分辨率(LR)制图^[12-13]。高分辨率制图是指像元大小小于目标物的情况,由于目标物由多个像元构成,这种情况下的亚像元制图相对容易;而低分辨率制图则是指目标物远小于像元大小的情况,目标斑块只占据了像元内的一部分区域,由于这种情况下类别斑块破碎程度高,类别空间结构更为复杂,因而超分辨率制图更困难。此处目标物大小是指研究区各类别中平均斑块面积较小的类别的平均斑块大小。例如研究区为华北平原,主要类别为耕地、居民地,则目标物大小指居民地斑块的平均大小。当前多数超分辨率制图算法是针对 HR 情况^[14-17],各个算法初期通常定位于使用模拟图像做目标识别和检测,之后逐步完善,发展为对遥感影像进行多类别超分辨率制图。

当前遥感影像超分辨率制图通常是以像元尺度的一幅粗分辨率影像作为制图输入数据,辅以少量辅助数据,通过某种超分辨率制图算法得到亚像元尺度的类别图。由于是利用相对粗糙的数据推测细节信息,因而基于当前的超分辨率制图方法,输入影像与输出结果的尺度差别不宜过大,现有文献中超分辨率制图的尺度因子通常不超过 7(如文献[18-19]的尺度因子均为 7)。若想大幅度提高尺度因子,除非在超分辨率制图方法上有大的突破。

2 超分辨率制图方法

当前主流的超分辨率制图方法可以分为基于矢量分割的方法、基于空间关系模型的方法、基于空间插值的方法3类。

2.1 矢量分割法

这类方法一般是直接对粗分辨率(为与特指 LR 的低分辨率相区别,以下对像元尺度的影像统称粗分辨率影像。此处的“粗分辨率”是指其分辨率与亚像元尺度相比相对较粗)遥感影像进行超分辨率制图^[20-25],用矢量边界分割技术进行亚像元尺度的目标边界识别。如 Steinwendner 提出的基于矢量分割的亚像元尺度上地块边界识别技术^[25];Aplin 等人提出的基于矢量数据的图像分割超分辨率制图^[22-23]。但这类方法只针对 HR 情况,一般只适于具有平直边界的大斑块制图,某些算法还需要研究区先验的地表类别空间分布矢量数据。

2.2 空间关系模型法

这种方法用某种空间关系模型(或对亚像元之间空间关系的假定,如空间自相关最大、马尔可夫特性等)描述亚像元之间的关系,以此为基础做超分辨率制图,是各类方法中应用最为广泛的一种。该类方法一般先对粗分辨率遥感影像做软分类,得到亚像元尺度上各组分类别的面积百分比作为超分辨率制图的输入数据,然后以亚像元空间关系模型作为目标函数,以类别百分比为约束条件,采用某种优化算法迭代求解亚像元的具体位置^[26]。

2.2.1 空间自相关法

这类算法的基本思想是:假定类别在像元内部和像元之间存在着空间依赖,相邻像元比距离远的像元更相似^[27]。以空间自相关最大的假定为目标函数,即认为亚像元之间空间自相关最大时即为所求亚像元制图结果。这类算法中较有代表性的有模拟退火^[28-30]、遗传算法^[15]、人工神经网络^[18,31-33]、元胞自动机^[34-35]等。

由于该类算法基于空间自相关最大的假定,导致结果总是倾向收敛于紧凑的形状、圆滑的边角,对线形地物的表现能力不好,只适于 HR 情况的较大斑块制图。该类方法对类别的面积重建准确,但是得到的亚像元位置有偏差,这是因为模型中使用了面积比例作为约束条件,但是缺乏关于斑块形状、位置信息的先验知识,仅靠目标函数本身不足以准确

预测复杂形状的亚像元空间排列。

这类算法通常迭代求解目标函数,因此计算代价很大,效率较低。为提高效率,Mertens 提出了一种非迭代算法^[36],按照空间自相关及像元中各类别的比例设置一个吸引力函数,对每个亚像元 X_i 根据其相邻亚像元的值计算该函数值 O_i ,再按算出的吸引力大小直接把各类亚像元置于合适的位置上。该吸引力函数为^[14]

$$O_i = \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} Z(X_j) \quad (1)$$

式中, n 为亚像元 X_i 的邻居数; $Z(X_j)$ 是第 j 个邻居亚像元 X_j 的类别值; λ_{ij} 是权重系数。

该算法与复杂的机器学习算法相比简单透明,无迭代,计算速度快。但由于该算法仍以空间相关性为基础,因而仍然只适于 HR 情况的大斑块制图,且对目标边缘、末端的细节重建能力差,有毛刺现象。

2.2.2 Markov 随机场法

马尔可夫随机场(MRF)理论是一种分析空间或时间相关特性的概率理论,借助条件概率的方法来描述相邻像元或特征之间的相互依赖关系。若将2维影像看做马尔可夫随机场,则表示相邻像元比距离远的像元具有更相似的特征。超分辨率制图的任务是根据观测到的粗分辨率影像 Y 估计出高分辨率的类别图 X ,即求 $P(X|Y)$ 。Markov 随机场方法就是假定高分辨率类别图具有 Markov 特性,通过条件概率公式把求 $P(X|Y)$ 转化为求 $P(Y|X)$ 和 $P(X)$ 的问题^[16,37]。

Markov 特性的假定使得具有相似特征的亚像元趋于聚集,因而制图结果中去除了冗余的破碎小斑块,但正是由于这个特点,使得该算法只适合于对均质大斑块的 HR 情况进行超分辨率制图,对于小斑块及线形地物(如道路)的恢复能力较差,且该方法得到的是局部最优解。

2.2.3 两点直方图法

Atkinson^[19]提出基于两点直方图(two-point histogram)的超分辨率制图方法。该方法以训练图像和随机初始化亚像元位置图的两点直方图之差作目标函数,以类别百分比为约束条件,对 HR、LR 两种情况都有较好的表现。但是算法用已知目标图像进行训练,而实际制图过程中目标图像并不可知。最近他又对该算法做了改进,在目标函数中加入了中等分辨率全色图像亮度值控制项,即以粗分辨率类别百分比图和中等分辨率的全色图像来预测亚像

元的位置^[38],并使用与目标图像结构接近的其他图像作训练。该方法只用简单的模拟图像进行了实验,对真实影像的超分辨率制图效果如何尚有待检验。

2.2.4 半方差法

Tatem 等人以半方差表达目标图像的空间结构,用 Hopfield 神经网络^[39]进行超分辨率制图。他用训练图像计算半方差,以变异函数作为目标函数构造能量方程

$$E = G + C \quad (2)$$

式中, G 是以变异函数构造的目标函数, C 是由像元中各类别的面积比例构成的限制条件。该算法用于 LR 情况下小于像元尺度的像元内部小斑块制图得到了较好的结果^[40]。但该方法只针对制图目标小于像元尺度的 LR 情况,并未见与适于 HR 情况算法相结合的后续研究出现。文献[40]使用已知的目标图像作为训练图像提供半方差先验信息,而实际超分辨率制图时目标图像是未知的,若使用亚像元尺度的其他图像进行训练是否还可以得到理想结果值得探讨。

2.3 地统计插值法

Boucher 于 2006 年提出一种基于地统计插值的超分辨率制图算法^[41]。该方法假定已知目标图像的变异函数模型、粗分辨率的类别百分比,以及高分辨率上的一些类别样点。根据该变异函数模型可得到高分辨率与粗分辨率类别图之间的变异函数、粗分辨率上的变异函数、已知参考点与粗分辨率的变异函数等模型。然后根据类别百分比图,利用协同克里格法 (CoKriging) 预测出高分辨率上亚像元各类别出现的概率,根据此概率图可以得到高分辨率上的超分辨率制图结果。

该方法属于空间插值方法,无迭代,计算代价小,效率高。但是道路等线形地物不能被正确重建,而且变异函数只适于描述椭圆、圆形等斑块状重复的空间模式。Boucher 后来在该算法中引入了道路、河流等线形地物的先验知识,改善了超分辨率制图效果^[42]。Atkinson 最近也将 CoKriging 方法用于超分辨率制图^[43]。

以上所述各方法各有优劣,各算法主要特点比较见表 1。

表 1 超分辨率制图算法比较

Tab.1 Comparison of super-resolution mapping algorithms

方法	理论基础	适用分辨率	迭代情况	制图能力
边界分割法	图像分割	HR	非迭代	适于具有平直边界的大斑块制图
	空间自相关	HR	迭代居多	倾向收敛于圆滑边角、紧凑形状,对线形地物制图能力差
	MRF 理论	HR	迭代	适于均质大斑块的制图,对小斑块及线形地物的恢复能力差
空间关系模型法	两点直方图	HR 和 LR	迭代	可同时用于大斑块和小斑块制图
	半方差	LR	迭代	理论上讲可同时用于大斑块和小斑块制图,但尚未见同时适于两种情况的算法
地统计插值法	地统计插值	HR 和 LR	非迭代	适于斑块状地物制图,对线形地物制图能力差

3 超分辨率制图精度评价

对各种方法的制图性能进行评价、比较需要对各方法的制图结果做定量精度评价。由于超分辨率制图是用粗分辨率影像得到高分辨率硬分类结果,具有跨尺度的特殊性,制图结果不确定性的影响因素不同于传统分类,至今尚无公认的精度评价方法^[15]。

超分辨率制图结果中的误差来源于以下几方面^[9]:遥感影像本身的不确定性(点扩散函数、几何校正误差的影响等)、软分类的误差、超分辨率制图

的误差。由于目前主要的超分辨率制图算法研究通常采用模拟的软分类结果^[44-45],目标图像已知,所以多与目标图像相比较进行精度分析,忽略数据不确定性和软分类误差的影响。这样做可以排除其他影响因素,便于对超分辨率制图算法本身进行性能分析。

超分辨率制图的精度评价方法可归为以下几类^[9]:

1) 基于像元的比较 是最简单的一类精度评价方法,将超分辨率制图结果与参考图像做逐像元比较,通过误差矩阵(以及引出的总体分类精度等一系列指标)、Kappa 系数、均方根误差 (RMSE)、相

关系数等一系列指标评价制图精度。这种方法非常适于 HR 的情况,虽然也可用于 LR 情况,但目前 LR 情况下的制图算法多为匹配某种先验的空间关系模式,因此更适于使用可以衡量空间纹理、结构等特性的统计指标。

2) 基于纹理的比较 侧重比较结果图像与参考图像的空间纹理、结构是否一致。常用的指标有变异函数图(比较目标图像和制图结果的变异函数图)^[8,40,46]、Q-Q 图^[41]等。

3) 基于对象的比较 虽然超分辨率制图的目标并不是通过空间分割算法生成分割对象,但也可以使用基于对象的算法进行超分辨率制图。如果采用这种算法,则适于采用基于对象的精度评价指标,如用于描述对象形状、大小等的参数。例如,通过比较超分辨率制图结果与目标图像的斑块数、斑块面积等指标评价制图结果。

4) 局部精度比较 用于突出描述局部制图效果的评价指标,包括局部混淆矩阵以及由此得到的一系列指标、局部均方根误差、局部相关系数等。局部误差可以突出制图错误区域,以便有针对性地改进算法。例如,Thornton 等人^[29]使用差值图直观地显示未被正确重建的亚像元所在的位置。

目前被研究者广泛采用的是基于像元的评价指标:误差矩阵、Kappa 系数、均方根误差、相关系数等。另外,调整的 Kappa 系数 k' ^[15] 也被用来做精度评价。 k' 与普通 Kappa 系数的区别在于,它只考虑混合像元,即在计算中忽略父像元为纯像元的亚像元,因为这些亚像元只会提高 Kappa 系数值,无法提供关于算法预测能力的信息。

4 结 论

Atkinson 指出^[19],超分辨率制图的结果在很大程度上受到软分类结果的影响,除了软分类算法本身,点扩散函数的作用也会导致软分类精度下降。他主张在超分辨率制图算法中引入相邻像元之间的亚像元交换来降低点扩散函数带来的误差。这种做法看似合理,实则会导致不确定性增加,不是解决问题的根本做法。误差是由超分辨率制图之前引入的,就该在前期加以解决。点扩散函数的影响该在软分类之前使用去卷积等方法去除^[47],软分类过程本身的误差要靠修正软分类算法本身的问题来解决,这些不是以软分类结果为输入数据的超分辨率

制图算法中应该考虑的主要问题。

超分辨率制图领域今后需要重点考虑的问题涵盖以下方面:

1) H-resolution 与 L-resolution 问题 目前多数算法只能针对 HR 或 LR 情况之一,且仅有少数算法针对 LR 制图,用于识别小于像元尺度的内部斑块^[40]。以空间相关性最大作为目标函数的算法使亚像元总是趋向于聚集的形状,相邻像元中的同类亚像元会集中在一起构成大斑块,而像元中央的独立小斑块会被抹杀,不适于 LR 情况。如何使算法同时适用于 HR 和 LR 两类问题,是今后研究的重要方向,毕竟真实景观通常是两类目标的混合。

2) 欠约束问题 由高分辨率的类别图作向上聚合可以得到各个类别的百分比图,而超分辨率制图可以看做该过程的反问题。由不同布局的高分辨率分类图可以聚合得到完全相同的类别百分比,反之,由相同的类别百分比图可以推出多种不同的超分辨率制图结果。因此,仅以类别百分比图进行超分辨率制图从本质上是欠约束的^[18,41]、病态的,可以得到多个似是而非的解。各算法基本都是基于对目标图像特征的某种描述(如空间相关性最大的假定、变异函数模型)构造目标函数,但是由于缺乏目标形状边界的先验信息,算法对目标形状边缘的重建能力差。满足假设条件的亚像元布局不唯一,以这种方法得到的结果是各个满足约束条件的亚像元布局中可能性最大的,并不一定是真实的布局。

超分辨率制图中的欠约束问题需要通过引入先验知识加以解决。信息总量是平衡的,要得到亚像元尺度更多、更真实的空间布局情况,就要提供更多的输入数据给模型。超分辨率制图与软分类结果相比增加了亚像元位置信息,但不确定性也相应增加^[48]。要解决超分辨率制图的欠约束问题只有引入亚像元尺度的先验知识,如空间纹理、结构等信息,以限制亚像元类别的空间布局,从而得到确定的解。最典型的空间结构先验知识的运用是空间自相关最大化的假定^[15,18,28,34],空间结构信息隐含于该假定中。这种假定对于像元大小小于目标物的 HR 情况是成立的,但是对复杂的实际景观而言却过于严格。Tatem 等明确地引入空间结构先验知识,直接将变异函数用作目标函数^[40]。但他使用已知的目标图像提供半方差先验信息,而在实际应用中亚像元尺度的分类图是未知的,若使用与目标图像相同尺度的其他图像进行训练,该算法是否还可以得

到理想结果值得探讨。Atkinson 使用与目标图像结构相似的图像进行训练提供空间结构的先验信息,取得了较好的效果^[38]。

3) 先验知识的双面性 先验信息的引入具有双面性。一方面,它的引入使得重构出来的图像结合了高分辨率的类别空间分布信息,使结果更加接近真实;但另一方面,必须有相应的训练数据才能得到目标函数,这就增加了对输入数据的要求。因此,如何选择需要加入的先验信息,怎样把亚像元尺度的类别空间分布信息合理结合到算法中,达到两方面的平衡,得到高精度的超分辨率制图结果,是值得深入研究的问题。

4) 空间结构描述方法 对目标图像亚像元尺度空间结构的描述是基于空间关系模型算法的基础,正是这种描述的不确定性造成了超分辨率制图结果的不确定性。如果该描述是完美的,能精确地表达目标图像的结构,则超分辨率制图可以完全正确重建目标图像;反之,则会引起图像结构的重建误差。因此,对于目标图像结构的描述是空间关系模型法超分辨率制图中的关键问题。基于同种目标图像空间结构描述方法的各种不同算法的性能通常较接近,不会有实质性差别,只有改进对目标图像空间结构的描述方法才能有效提高这类方法的超分辨率制图精度。

目前很多超分辨率制图算法对于目标图像空间结构的描述较为任意,如空间自相关最大的假定。半方差^[40]、两点直方图^[19]等方法虽然提供了对目标结构更为合理的定量描述,但又过于复杂,对实际制图应用来讲,需要用户给出目标景观的变异函数、两点直方图等参数的要求过于苛刻。对于目标图像空间结构的一种简便定量描述是基于景观结构的方法,使用景观指数来表达亚像元尺度的空间结构信息^[49-50],反映目标图像的类别组成和空间配置特征。这种方法对空间结构的描述更为简单直接,不确定性更小,因而制图结果的不确定性更小。

5) 精度评价及不确定性分析 目前没有公认的超分辨率制图精度评价方法,这给各算法的性能比较带来不便。当前已有很多超分辨率制图算法,但是还未见对各个算法做相同条件下的比较研究,尚无对各算法不确定性的定量分析。该问题是很有研究价值的^[9]。

6) 实用化问题 目前超分辨率制图方法以迭代算法居多,计算代价很大。算法多数只用小范围、

具有较少类别的简单景观做了测试,用于大范围实际影像超分辨率制图还不现实。如何提高算法效率,使其从理论研究走向实用化,真正应用于大范围内真实地表覆盖分类产品快速尺度转换,是今后研究的重点问题。

遥感影像超分辨率制图历经十几年的研究已进入发展高峰,各类算法不断涌现,今后如何使之走向成熟化、规范化和实用化是值得深入思考的问题。

参考文献 (References)

- [1] Bastin L. Comparison of fuzzy c-means classification, linear mixture modelling and MLC probabilities as tools for unmixing coarse pixels [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(17):3629-3648.
- [2] Adams J B, Smith M O, Johnson P E. Spectral mixture modelling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(B8):8098-8112.
- [3] Garca-Haro F J, Gilabert M A, Melia J. Linear spectral mixture modelling to estimate vegetation amount from optical spectral data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(17):3373-3400.
- [4] Kanellopoulos I, Varfis A, Wilkinson G G, et al. Land cover discrimination in SPOT HRV imagery using an artificial neural network: a 20 class experiment [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(5):917-924.
- [5] Bezdek J C, Ehrlich R, Full W. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm [J]. *Computers & Geosciences*, 1984, 10(2-3):191-203.
- [6] Bezdek J. *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*[M]. New York: Plenum Press, 1981.
- [7] Foody G M, Cox D P. Sub-pixel land cover composition estimation using a linear mixture model and fuzzy membership functions[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(3):619-631.
- [8] Boucher A. Super Resolution Mapping With Multiple Point Geostatistics[M]// Pereira M J, Soares A, Dimitrakopoulos R. *GeoENV VI-Geostatistics for Environmental Applications*. Netherlands:Springer,2008:297-305.
- [9] Atkinson P M. Issues of uncertainty in super-resolution mapping and the design of an inter-comparison study [C]//Zhang J, Goodchild M F. *Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*. Liverpool, England, UK: World Academic, 2008:145-154.
- [10] He Y, Yap K H, Chen L, et al. A soft MAP framework for blind super-resolution image reconstruction [J]. *Image and Vision Computing*, 2009, 27(4):364-373.

- [11] Tatem A J, Lewis H G, Atkinson P M, et al. Multiple-class land-cover mapping at the sub-pixel scale using a Hopfield neural network[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2001, 3 (2) :184-190.
- [12] Strahler A H, Woodcock C E, Smith J A. On the nature of models in remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1986, 20(2) :121-139.
- [13] Jupp D L B, Strahler A H, Woodcock C E. Auto-correlation and regularization in digital images. I. Basic theory [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(4) : 463-473.
- [14] Atkinson P M. Sub-pixel target mapping from soft-classified, remotely sensed imagery[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2005, 71(7) :839-846.
- [15] Mertens K C, Verbeke L P C, Ducheyne E I, et al. Using genetic algorithms in sub-pixel mapping [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(21) :4241-4247.
- [16] Kasetkasema T, Arora M K, Varshney P K. Super-resolution land cover mapping using a Markov random field based approach [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96 (3-4) :302-314.
- [17] Verhoeve J, Wulf R D. Land cover mapping at sub-pixel scales using linear optimization techniques [J]. *Remote Sensing of Environment* 2002, 79(1) :96-104.
- [18] Tatem A J, Lewis H G, Atkinson P M, et al. Super-resolution target identification from remotely sensed images using a Hopfield neural network [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(4) :781-796.
- [19] Atkinson P M. Super-resolution Land Cover Classification Using the Two-Point Histogram [M]// Sanchez-Vila X, Carrera J, Gomez-Hernandez J. *GeoENV IV-Geostatistics for Environmental Applications*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004: 15-28.
- [20] Schneider W. Land use mapping with subpixel accuracy from landsat TM image data [C]// *Proceedings of the 25th International Symposium on Remote Sensing and Global Environmental Change*. Graz, Austria: ERIM, 1993:155-161.
- [21] Flack J, Gahegan M, West G. The use of sub-pixel measures to improve the classification of remotely sensed imagery of agricultural land [C]// *Proceedings of the 7th Australasian Remote Sensing Conference*, Melbourne, Australia: Remote Sensing and Photogrammetry Association Australia Ltd., 1994: 531-541.
- [22] Aplin P, Atkinson P M, Curran P J. Fine spatial resolution simulated satellite sensor imagery for land cover mapping in the United Kingdom [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68(3) :206-216.
- [23] Aplin P, Atkinson P M. Sub-pixel land cover mapping for per-field classification[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(14) :2853-2858.
- [24] Ge Y, Li S, Li D. New algorithm for sub-pixel boundary mapping [C]// *ISPRS Technical Commission II Symposium 2006. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences: Vol. XXXVI Part2*. Vienna, Austria: ISPRS Technical Commission II, 2006:157-160.
- [25] Steinwendner J, Schneider W, Suppan F. Vector segmentation using spatial subpixel analysis for object extraction [C]// *ISPRS Technical Commission III Symposium 1998. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing: Vol. XXXII-3*. Columbus, Ohio, USA: ISPRS Technical Commission III, 1998: 265-271.
- [26] Atkinson P M. Mapping Sub-Pixel Boundaries From Remotely Sensed Images[M]// Kemp Z. *Innovations in GIS IV*. London: Taylor and Francis, 1997: 166-180.
- [27] Goovaerts P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*[M]. New York: Oxford University Press, 1997.
- [28] Atkinson P M. Super-resolution target mapping from soft-classified remotely sensed imagery[C/CD]// *Proceedings of the 6th International Conference on GeoComputation*. Brisbane, Australia: GeoComputation CD-ROM, 2001.
- [29] Thornton M W, Atkinson P M, Holland D A. Sub-pixel mapping of rural land cover objects from fine spatial resolution satellite sensor imagery using super-resolution pixel-swapping [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27 (3) : 473-491.
- [30] Thornton M W, Atkinson P M, Holland D A. A linearised pixel-swapping method for mapping rural linear land cover features from fine spatial resolution remotely sensed imagery [J]. *Computers and Geosciences*, 2007, 33(10) :1261-1272.
- [31] Zhang L, Wu K, Zhong Y, et al. A new sub-pixel mapping algorithm based on a BP neural network with an observation model[J]. *Neurocomputing*, 2008, 71(10-12) :2046-2054.
- [32] Nguyen M Q, Atkinson P M, Lewis H G. Super resolution mapping using a Hopfield neural network with LIDAR data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(3) :366-370.
- [33] Tatem A J, Lewis H G, Atkinson P M, et al. Increasing the spatial resolution of agricultural land cover maps using a Hopfield neural network [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2003, 17(7) :647-672.
- [34] Yi Chang, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Research on super-resolution mapping for remote sensing images based on a multi-scale spatial ANN-CA model [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(3) :42-46. [易嫦, 潘耀忠, 张锦水. 基于多尺度空间 ANN-CA 模型的遥感影像超分辨率制图方法研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(3) :42-46.]
- [35] Ling Feng, Zhang Qiuwen, Wang Cheng, et al. Sub-pixel mapping of remote sensing images based on cellular automata model[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, 10(7) :916-921. [凌峰, 张秋文, 王乘, 等. 基于元胞自动机模型的遥感

- 图像亚像元定位[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(7):916-921.]
- [36] Mertens K C, Baets B D, Verbeke L P C, et al. A sub-pixel mapping algorithm based on sub-pixel/pixel spatial attraction models [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(15):3293-3310.
- [37] Tolpekin V A, Hamm N A S. Fuzzy super-resolution mapping based on Markov Random Fields [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston, Massachusetts, USA; IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 2008: 875-878.
- [38] Atkinson P M. Super-resolution Mapping Using the Two-Point Histogram and Multi-source Imagery[M]// Pereira M J, Soares A, Dimitrakopoulos R. GeoENV VI-Geostatistics for Environmental Applications. New York; Springer-Verlag, 2008: 307-321.
- [39] Hopfield J J. Neural networks and physical systems with emergent collect computational abilities [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1982, 79(8):2554-2558.
- [40] Tatem A J, Lewis H G, Atkinson P M, et al. Super-resolution land cover pattern prediction using a Hopfield neural network [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(1):1-14.
- [41] Boucher A, Kyriakidis P C. Super-resolution land cover mapping with indicator geostatistics [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(3):264-282.
- [42] Boucher A, Kyriakidis P C. Integrating fine scale information in super-resolution land-cover mapping [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2007, 73(8):913-921.
- [43] Atkinson P M, Pardo-Igúzquiza E, Chica-Olmo M. Downscaling Cokriging for super-resolution mapping of continua in remotely sensed images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(2):573-580.
- [44] Zhan Q, Molenaar M, Lucieer A. Pixel Unmixing at the Sub-Pixel Scale Based on Land Cover Class Probabilities: Application to Urban Areas [M]// Moody G M, Atkinson P M. Uncertainty in Remote Sensing and GIS. Chichester. West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2002: 59-76.
- [45] Mertens K C, Verbeke L P C, Westra T, et al. Sub-pixel mapping and sub-pixel sharpening using neural network predicted wavelet coefficients [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(2): 225-236.
- [46] Boucher A, Kyriakidis P C, Cronkite-Ratcliff C. Geostatistical solutions for super-resolution land cover mapping [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 272-283.
- [47] Townshend J R G, Huang C, Kalluri S N V, et al. Beware of per-pixel characterization of land cover [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(4):839-843.
- [48] Verhoeve J, Wulf R D. Sub-pixel mapping of sahelian wetlands using multi-temporal SPOT VEGETATION images [C]// Proceedings of Vegetation 2000 Conference. Toulouse: CNES & Ispra; JRC, 2001: 219-224.
- [49] Lin Haobo. Research on the Scale Effects and Scaling Methods in Land Cover Mapping from Remotely Sensed Data [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2009. [林皓波. 遥感数据地表覆盖分类尺度效应与尺度转换方法研究 [D]. 北京: 北京师范大学, 2009.]
- [50] Lin Haobo, Bo Yanchen, Wang Jindi, et al. Landscape structure based super-resolution mapping from remotely sensed imagery [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(12):1355-1364. [林皓波, 柏延臣, 王锦地, 等. 基于景观结构的遥感影像超分辨率制图 [J]. 自然科学进展, 2009, 19(12):1355-1364.]