

基于面-点协同克里格和多点地统计 模拟的遥感影像融合方法

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融合方法,旨在用多点地统计模拟提高融合后影像的空间分辨率。模拟从训练图像中提取包含空间相关性信息的模型,再通过基于模式的判别准则实现局部相似图案的重现。其中采用面-点协同克里格法为模拟提供制约条件,以解决不同数据支撑间的转换问题。实验用于 Landsat ETM+ 影像的融合,结果表明,基于面-点协同克里格的多点地统计模拟方法与未考虑数据支撑差异的模拟相比较能达到更高的融合精度。该方法亦可用于其他类型空间数据的套合。

关键词:影像融合;多点地统计学;条件模拟;面-点协同克里格;支撑转换;降尺度

中图法分类号:P237.3

文献标志码:A

尺度是空间数据的重要度量之一,常表现为不同的数据支撑。升尺度和降尺度是尺度转换的两种方式。前者是指增加像元的数据支撑或减少空间分辨率;后者则是由粗尺度推断精细的尺度,其过程更为复杂。早期的降尺度主要基于回归的方法,研究热点在于推断高空间分辨率的热红外波段影像^[1]。利用光谱解混的方法来分析时间序列影像^[2],扩展了降尺度的方法。然而,这些方法都是直接度量精细尺度或粗尺度上数据的变量关系,没有采用数据支撑转换模型,也没有分析精细尺度上的空间变异。

面-点预测法是一种降尺度内插法,考虑了不同数据支撑之间的转换问题。地统计领域中的面-点的克里格法得到普及^[3]。当涉及多变量的情形时,可用面-点协同克里格法(area-to-point cokriging, ATPCK)解决。ATPCK 的概念引入到遥感领域实现了遥感影像数据的融合^[4]。

多点地统计学理论^[5]的最大优势在于利用训练图像(training image)获取先验知识,取代了传统地统计学中变异函数的功能,在训练图像上搜寻的多个点对来表达空间的连续性和可变性,比基于点对关系建立变异函数模型的表达形式更为丰富^[6]。多点地统计理论一般用于石油和岩相勘探,近年来有些研究涉及到遥感数据的处理,如提

取城区街道等线状地物^[7]和超分辨率制图^[8],但两者都是预测类别型数据。对连续场数据的处理,一般用于具有自相似图案的图像,而缺乏对遥感影像数据的探索。

本文利用多点地统计模拟的方法融合遥感影像的两个波段,来提高输出影像波段的空间分辨率。采用了 FILTERSIM (filter-based simulation) 多点地统计模拟算法,并引入了 ATPCK 以解决 FILTERSIM 算法整合数据时未顾及数据支撑转换的问题。

1 研究方法

1.1 模式训练的 FILTERSIM 算法

多点地统计模拟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,是对欲获得场景的一种模拟。FILTERSIM 算法对类别型和连续型的训练图像均适用,是一种基于模式的模拟方法,本文只介绍针对连续型数据的模拟。

获取训练图像后,定义一个局部搜索窗口用来扫描训练图像,从训练图像中采样到数据模板的值构成数据事件(data event)。数据事件记录了多点地统计的信息,为后续的模拟提供先验知识。过滤器(filter)和得分(score)是其中两个重

收稿日期:2013-05-30

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41171346, 41071286)。

第一作者:唐韵玮,博士,现从事地统计分析和遥感应用研究。E-mail: tangyunwei2008@163.com

要概念。过滤器 $f(h_a)$ ($\alpha = 1, \dots, n$) 是在 n 个点构成的搜索模板中定义的一组权重值, 其中 h 是模板中位于 x_a 的点到模板中心点的距离。FILTERSIM 的缺省过滤器有 6 个^[9], 分别是沿东西方向和南北方向的平均值、梯度值和曲率值。过滤器应用到训练图像上所获取的在局部窗口中的属性叫做训练图案(training pattern, pat), 过滤器处理后的结果称为得分影像图(score map)。在中心为 x 的得分 S 可以由过滤器和训练图案表达为:

$$S(x) = \sum_{a=1}^n f(h_a) \cdot \text{pat}(x + h_a) \quad (1)$$

式中, $\text{pat}(x + h_a)$ 是模式在点位 $(x + h_a)$ 处的值。

获取的得分影像图在得分空间中进行模式分类。一般的分类采用交叉分类和 K 均值聚类两种方法。通过模式分类, 相似的训练图案聚集在相同的区间里, 再对非空区间里的图案取平均, 即得到一个原型类别(prototype, prot), 表达为:

$$\text{prot}(h_a) = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \text{pat}(x_i + h_a), \alpha = 1, \dots, n \quad (2)$$

式中, c 是在同一原型里重复的类别个数。

多格网的概念^[10]可应用于 FILTERSIM 算法, 其思想是把搜索模板扩大以便捕捉训练图像中大结构分布的图像信息, 但赋值的数据事件的个数不变, 因此, 并未增加计算负担。算法的流程简述如下。

- 1) 把搜索模板扩展到最粗尺度的模拟格网上;
- 2) 搜索模板和过滤器扫描训练图像, 得到一系列得分影像图;
- 3) 对得分图进行模式分类, 聚集相似的训练图案得到原型类别;
- 4) 定义一条随机路径, 保证路径访问到所有未知点且只访问一次;
- 5) 对于路径中的未知点 x , 获取中心点位为 x 的数据事件, 找到与数据事件距离最近的原型类别 prot, 并从属于同一原型类别的一系列相似的训练图案 pat 中任意采样一个, 粘贴到当前的格网上;
- 6) 继续访问路径中的下个结点, 并且重复步骤 5), 直至遍历到所有结点;
- 7) 搜索模板缩小到下一嵌套格网, 重复以上过程, 直至所有嵌套格网都已模拟。

FILTERSIM 允许两种数据的条件制约:

- ① 已知的样本点, 称为主变量, 通常是稀少的点数据。
- ② 辅助变量, 一般是间接测量所获得的连续场数据。FILTERSIM 算法中, 辅助变量通过局部变化均值的趋势面约束模拟, 解决了训练图像非平稳性(non-stationarity)的问题。搜索模板不仅要获取数据事件, 还要获取条件数据事件, 步骤 5) 中的数据事件会被条件数据事件代替。

1.2 基于 ATPCK 的多点地统计模拟

FILTERSIM 模拟给定待模拟影像的格网大小后, 由训练图像出发, 能够模拟任意空间分辨率的影像。模拟过程中并没有考虑因数据支撑不同而产生的尺度效应, 故本文通过用 ATPCK 方法获取的内插影像作为模拟的条件制约。

假设两幅影像已经过配准, $Z_v^k(x)$ 和 $Z_v^l(x)$ 是在点位 x 的随机变量, 下标代表数据支撑 ($V > v$, 且通常 V 是 v 的整数倍), 上标 l 和 k 代表波段。欲预测主变量波段 k 在小数据支撑 v 上的随机变量, 可通过主波段在大支撑 V 上的影像和辅助变量波段 l 在小支撑 v 上的影像加权得到, 其公式为:

$$\hat{Z}_v^k(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i^0 Z_V^k(x_i) + \sum_{j=1}^M \beta_j^l Z_v^l(x_j)$$

且满足

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i^0 = 1, \sum_{j=1}^M \beta_j^l = 0 \quad (3)$$

式中, M, N 分别为两个影像波段的像素个数。ATPCK 考虑了数据支撑不同的影响。普通协同克里格尽管也满足式(3)中权系数的制约条件, 但是存在 $V = v$ 的前提假设, 即整合的影像数据具有相同的数据支撑。

为了解析式(3), 需要引入变异函数模型建立克里格方程组。主变量 k 波段只在支撑 V 上是已知的, 而 $Z_v^k(x)$ 是未知的。因此, 波段 k 在不同支撑上的变量 $Z_v^k(x)$ 和 $Z_V^k(x)$ 间的变异函数 $\gamma_{vV}^{kk}(s)$ (s 是距离矢量的度量) 以及不同波段在支撑 v 上的变量 $Z_v^k(x)$ 和 $Z_v^l(x)$ 间的变异函数 $\gamma_{vv}^{kl}(s)$ 也是未知的。ATPCK 通过线性系统理论来解决这个问题, 需要计算基于点支撑(即无穷小的单元)的变异函数 $\gamma_{gg}^{kk}(s)$ 和 $\gamma_{gg}^{kl}(s)$ 。在实际应用中, 观测数据一般是从一个有限区域的支撑上得到的, 观测值可以认为是一个支撑内点支撑变量的平均值:

$$\begin{aligned} Z_v^k(x) &= \frac{1}{|v(x)|} \int_{v(x)} Z_g^k(y) dy \\ Z_V^k(x) &= \frac{1}{|V(x)|} \int_{V(x)} Z_g^k(y) dy \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $Z_g^k(y)$ 是波段 k 在点支撑上的随机函数 ($g \leq v < V$), 而平均值 $Z_v^k(x)$ 和 $Z_V^k(x)$ 是点支撑

变量在一定体积 $|v(x)|$ 和 $|V(x)|$ 内的正则化变量。因此,正则化(regularization)就是用一个区域支撑内的平均值代替原始的点支撑的数据,预测点支撑变异函数 $\gamma_{gg}^{hk}(s)$ 和 $\gamma_{gg}^{kl}(s)$ 的过程称为去正则化(deregularization)(在频率域中称为去卷积),一旦得到了点支撑的变异函数,任何数据支撑的变异函数都可以通过正则化的过程来求解。

图1描述了基于 ATPCK 的多点地统计模拟

的流程。ATPCK 利用了粗尺度的主变量和精细尺度上的辅助变量两幅影像,其实质是一种克里格内插方法。基于 ATPCK 的多点地统计模拟中,粗尺度的主变量影像是训练图像,ATPCK 内插的结果作为模拟的制约条件。虽然仅通过 ATPCK 也能达到融合影像、提高影像空间分辨率的目的,但是多点地统计模拟比 ATPCK 内插的精度更高,后续将通过实验证明。

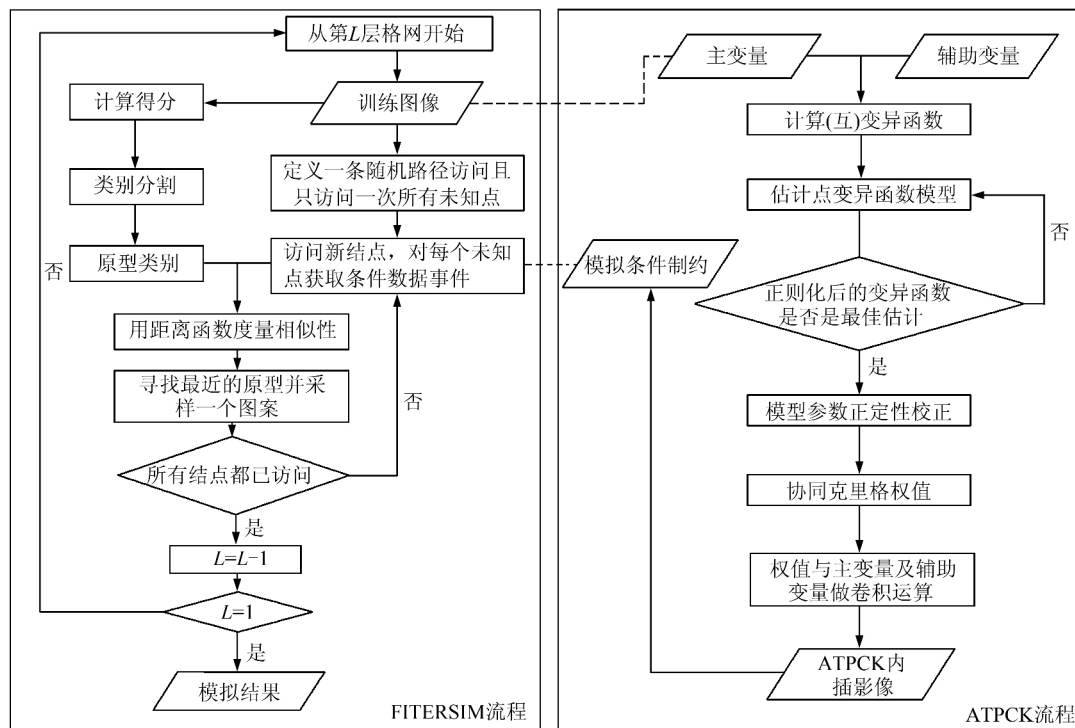


图1 基于 ATPCK 的多点地统计模拟算法流程图

Fig.1 Flowchart of ATPCK-based Multiple-Point Geostatistical Simulation Algorithm

2 实例分析和讨论

2.1 研究区域、数据与实验

本文研究区域的数据影像来源于陆地卫星 Landsat 7 号的增强型主题成像仪 ETM+。实验区域位于英格兰史塔福郡,轨道号为 P203R023,获取时间为 2001-04-04。影像为 $9\text{ km} \times 9\text{ km}$,具有很清晰的图案模式分布,主要是农田和城区,如图 2(a)。

Landsat ETM+影像的第4波段对应近红外波段的波谱范围,空间分辨率为 30 m ;第8波段是全色波段,空间分辨率为 15 m 。实验将这两个波段的影像融合,目的是提高近红外波段的空间分辨率。为了检查融合结果,原始的近红外波段作为参考影像,实验的输入影像由原始的波段经

过平均聚合得到:近红外波段升尺度到 120 m 作为主变量,全色波段升尺度到 30 m 作为辅助变量,融合的尺度因子为 4。实验采用图 1 的流程得到基于 ATPCK 的多点地统计模拟结果,并实施两组对比方案,分别是基于线性回归的模拟和基于标准化普通协同克里格(standardized ordinary cokriging, SCK)的模拟。所有模拟结果都是 100 次实现的平均值。

对于线性回归的模拟,其基本思想是通过线性回归融合两个波段的影像数据,作为多点地统计模拟的条件制约,即图 1 中右边方框的结果由线性回归的方法所得,显然,这种方法并没有包含支撑转换模型。线性回归的实质是将全色波段的数值拉伸到近红外波段,在保证融入全色影像空间结构信息的同时也将模拟影像的均值改正到近红外波段的分布水平。基于 SCK 的模拟也没有考虑面-点的支撑转换模型,而是通过直接计算近

红外波段和全色波段在其各自支撑上的(互)变异函数模型,再利用式(3)获取精细尺度的图像,其中两组权系数只满足相加之和等于 1 的条件,即有:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i^0 + \sum_{j=1}^M \beta_j^0 = 1$$

(5)

2.2 融合结果分析

图 2 显示了 3 种方法的模拟结果。输入的近红外影像的空间分辨率低,影像相当模糊。从图 2(b)中可看出,回归模拟的方法能够将全色波段的线性结构全部提取并重现,因此,这种方法模拟的影像具有图像增强的效果。但是回归模拟的

结果总体偏暗,色调接近于全色波段而非近红外波段影像,模拟结果和参考影像间的差别较大。图 2(c)中 SCK 模拟的影像在色差上和参考影像较接近,线性细节比起输入影像也有所改善,但是没有提取足够的空间结构信息,图案比较模糊。SCK 的无偏估计是通过辅助变量(全色波段)进行尺度拉伸使得其与主变量(近红外波段)具有相同的均值,其中辅助变量的权值按照两个变量的标准差之比转换而得。图 2(d)中 ATPCK 的模拟影像对空间结构信息的提取能力优于 SCK 的模拟,且比线性回归模拟的色调要更接近于参考影像,可见在融合过程中考虑支撑转换模型具有优势。

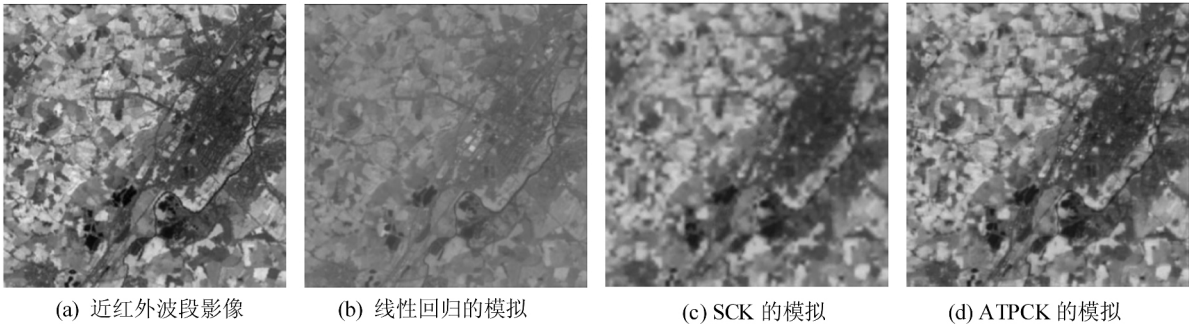


图 2 近红外波段和影像融合结果
Fig. 2 Near-infrared Spectral Band and Fusion Results

表 1 是 3 种方法和参考影像的比较结果。其误差均值都只在 0 附近波动,而相关系数、误差标准差和平均绝对误差都表明 ATPCK 内插/模拟的结果比对应的另外两种结果更接近参考影像。可见基于 ATPCK 的模拟比不考虑支撑变换的方法具有更高的精度。在多点地统计模拟方法融合不同尺度的数据过程中,模拟的条件制约不能通过简单的线性回归或 SCK 的方法实现。

表 1 融合结果误差统计/(像元亮度值)
Tab. 1 Error Statistics of Fusion Results/(DN)

方法	方式	相关系数	误差均值	误差标准差	平均绝对误差
线性回归	内插	0.845	-0.17	18.79	15.58
	模拟	0.862	-0.08	18.64	15.77
SCK	内插	0.868	-0.06	13.64	9.89
	模拟	0.870	-0.18	13.51	9.82
ATPCK	内插	0.876	-0.04	13.60	9.65
	模拟	0.885	-0.20	12.85	9.11

比较这 3 种内插方法,从理论上,看,SCK 和 ATPCK 都是利用变异函数对空间结构建模从而达到空间预测的目的;而回归建模直接从全色波段中提取空间信息,并使内插影像和近红外影像具有相同的均值和标准差分布。ATPCK 可以看

作是 SCK 的一种改进方法,在 SCK 方法中,尺度变换被简单地用标准差之比作为尺度因子,变换过程中认为空间相关性和空间依赖性是不变的,造成精细尺度上的变异函数和互变异函数的估计有失偏颇。

2.3 尺度因子分析

针对基于 ATPCK 的多点地统计模拟方法,对比两组不同尺度的融合情形。尺度因子分别采用 2 和 5,即近红外影像的分辨率分别为 60 m 和 150 m,全色波段影像仍为 30 m,统计结果如表 2 所示。

表 2 不同尺度融合结果的统计/(像元亮度值)
Tab. 2 Statistics on Different Scales/(DN)

尺度	方法	相关系数	平均误差	误差的标准差	平均绝对误差
2	内插	0.929	0.06	10.61	7.60
	模拟	0.948	0	8.80	6.13
5	内插	0.772	-0.32	18.64	13.48
	模拟	0.778	-0.54	17.89	12.87

结合表 1 可看出,两个影像的空间分辨率相差越大,未知的信息量越多,融合影像的误差越大,质量下降。但是基于 ATPCK 的模拟总是比 ATPCK 内插更接近参考影像,说明模拟能比内

插达到更好的融合效果。这是因为 ATPCK 内插是把一系列权值直接应用到全局的图像上,而多点地统计模拟允许不同的图案有不同的处理方式。ATPCK 内插中使用的变异模型所包含的空间关系信息比训练图像要少;且复杂形状分布的空间相关性无法用基于两点的变异函数模型来描述。多点地统计模拟则通过在模板中捕捉相似的局部图案来达到模拟重现的目的。由于图案的类别划分是基于得分空间的,因此,属于同一原型类别的训练图案可能在地理空间中相隔甚远。多点地统计模拟的平均结果具有平滑作用,但是不同于恒定的平滑器,多点地统计模拟能起到还原影像空间结构的作用。

2.4 模拟次数和效率分析

一组关于 ATPCK 模拟(尺度因子为 4 的情形)次数的灵敏度分析如图 3 所示,反映了模拟影像误差的统计量和模拟次数之间的关系。

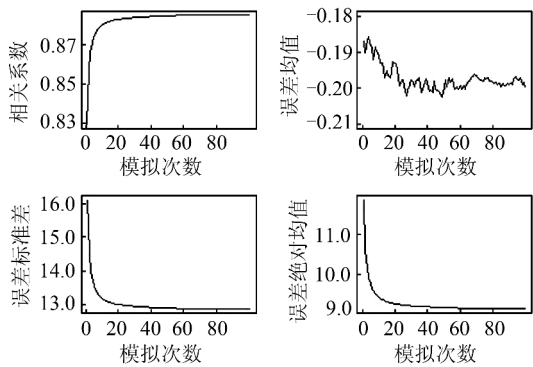


图 3 模拟影像误差统计量的灵敏度分析

Fig. 3 Sensitivity Analysis of Error Statistics of Simulated Image

从图 3 中的结果可见,除了误差均值总在零值附近的小范围波动以外,其他统计量从 50 次模拟以后基本处于稳定的状态。多次模拟可以通过聚集相似的图案以近似还原到原型类别,从而充分利用多点间的相关性。因此,多次模拟比单次模拟能够更好地恢复结果影像的空间结构。

表 3 显示了不同尺度因子的模拟效率,其中对于尺度因子为 4 的情形给出了 3 种方法的模拟

表 3 模拟效率/s

Tab. 3 Simulation Efficiency/s

尺度	方法	原型类别	模拟
2	ATPCK 的模拟	75	558
	线性回归的模拟	6	534
4	SCK 的模拟	6	505
	ATPCK 的模拟	6	555
5	ATPCK 的模拟	2	456

时间。不同尺度因子的原型类别形成时间区别较大,这是因为类别分割所处理的图像大小和尺度相关,尺度因子越小则涉及分类的像元越多;相同尺度影像的原型类别耗时相同。而 100 次模拟的结果总体上区别不大,尺度因子大的影像模拟耗时稍少。

3 结 语

本文提出了一种基于多点地统计模拟的数据整合方法,实现了遥感影像融合。研究证明,利用多点地统计模拟能有效地融合尺度差别较大的数据,保证影像的连续性,从而改善视觉效果。通过对比分析,研究强调了在融合过程中引入合适的支撑转换模型来解决空间关系随尺度变换问题的重要性。结合传统地统计学中的面-点数据支撑的变异模型的反演技术,本文方法弥补了多点地统计模拟算法中处理不同尺度数据时未涉及支撑转换模型的不足。本研究发展了多点地统计学处理影像数据的能力:该方法不仅适用于影像融合,而且适用于多源、多尺度影像的数据套合。

本文提出的方法存在进一步挖掘的空间,该研究实例中借用了低分辨率的近红外波段影像作为训练图像,空间结构信息表现不充分,因此,可以从训练图像提取空间结构的能力方面来探索多点地统计模拟的优势。今后的研究方向是算法的效率和模拟条件的精度。通常多点地统计模拟是以模拟缺失数据为目标,对模拟条件精度要求不高,但是针对本文这种降尺度的影像融合算法,高精度的先验知识能够还原影像的真实性细节,因此,有必要强调模拟条件的精度。多点地统计对多源、多尺度数据的套合能力有待挖掘,以期实现空间异构数据的整合,提高数据精度,拓展多点地统计学的应用范围。

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。

参 考 文 献

[1] Stathopoulou M, Cartalis C. Downscaling AVHRR Land Surface Temperatures for Improved Surface Urban Heat Island Intensity Estimation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(12): 2 592-2 605

[2] Zurita-Milla R, Kaiser G, Clevers J G P W, et al. Downscaling Time Series of MERIS Full Resolution Data to Monitor Vegetation Seasonal Dynamics[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(9):

- 1 874-1 885
- [3] Kyriakidis P C. A Geostatistical Framework for Area-to-point Spatial Interpolation[J]. *Geographical Analysis*, 2004, 36(3): 259-289
- [4] Pardo-Igúzquiza E, Chica-Olmo M, Atkinson P M. Downscaling Cokriging for Image Sharpening[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(1/2): 86-98
- [5] Guardiano F, Srivastava R M. Multivariate Geostatistics: Beyond Bivariate Moments[J]. *J Natl Cancer Inst*, 1993, 85(20): 1 657-1 669
- [6] Strebelle S. Sequential Simulation Drawing Structures from Training Images[D]. Stanford: Stanford University, 2001
- [7] 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): 2 311-2 335
- [8] Boucher A. Sub-pixel Mapping of Coarse Satellite Remote Sensing Images with Stochastic Simulations from Training Images[J]. *Mathematical Geosciences*, 2009, 41(3): 265-290
- [9] Zhang T, Switzer P, Journel A. Filter-based Classification of Training Image Patterns for Spatial Simulation[J]. *Mathematical Geology*, 2006, 38(1): 63-80
- [10] Tran T. Improving Variogram Reproduction on Dense Simulation Grids[J]. *Computers & Geosciences*, 1994, 20(7/8): 1 161-1 168

Area-to-point Cokriging and Multiple-point Geostatistical Simulation for Remotely Sensed Image Fusion

TANG Yunwei^{1, 2} ZHANG Jingxiong²

1 Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

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

Abstract: A method for remotely sensed image fusion was developed based on the theory of multiple-point geostatistics (MPG). The aim was to increase the spatial resolution of the fused image using MPG-based simulation. A spatial correlation model in the form of a training image is incorporated in simulation, and then a pattern-based decision rule is applied to facilitate reproduction of similar local patterns in simulated images. Area-to-point cokriging (ATPCK) was used as a simulation constraint to solve the change-of-support problem. The method was tested on Landsat ETM+ images. Results suggest that ATPCK-MPG can achieve a more accurate result than simulations that do not account for different data supports. This method can be applied for conflation of other types of spatial data as well.

Key words: image fusion; multiple-point geostatistics; conditional simulation; area-to-point cokriging; change-of-support; downscaling

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.