

直方图尺度效应研究*

张颢^{①**} 焦子锦^① 杨华^① 李小文^{①②} 王锦地^①
苏理宏^① 闫广建^① 赵红蕊^①

①北京师范大学遥感与地理信息系统研究中心、资源与环境科学系, 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875;

② Center for Remote Sensing and Department of Geography, Boston University, MA 02215, USA)

摘要 为能简洁地描述数字图像所反映的地物空间关系, 在分析变差图等空间分析手段的特点及其不足的基础上, 提出了直方变差图的概念, 并通过定义驻点和边界点, 提出了分析地物空间分布规律的直方变差图分解方法. 并通过利用直方变差图进行空间分析和图像融合两个实验对本方法的特点进行了分析.

关键词 直方变差图 尺度转换 直方图分解 驻点 HIS 变换

在描述图像特征(尤其是低分辨率)时, 常需要简洁、概括地表达其基本特征. 比如在描述中国地形时, 用“地势西高东低, 呈三级台阶分布”要比给出由数百万高程点的 DEM 能更好地把握我国地貌的基本特征. 对定量遥感也是如此, 若反演在 1 km 像元尺度上进行, 一个简洁的像元地形(或其他特征)作为先验知识的表述会比 100 万个 1 m 像元尺度上的知识更有益于反演^[1]. 同时, 由于地球表面是一个复杂的巨系统, 在地球科学研究中尺度效应及尺度纠正问题也就不可避免^[2,3], 这也是我们提出本研究的目的.

在解释数字图像的空间关系时, 变差图(variogram)是一种广为使用的方法. 但一定形状变差图与地表的主要特征却很难建立直接的联系. 在对变差图建立的模型中, 有较成熟的如 Jupp 等的二值模型可较好地 将变差图三参数与地物大小、出现频度等联系起来^[4]. 但因为实际地表特征较难用二值表示, 故其应用受到一定限制. 另外, 在景观生态学的研究中, 讨论景观组分的空间分布特征及其差异性时, 常用的信息熵和空隙度指数法也难以直接用于地物空间分布研究及某些重要参数提取. 我们研究了直方图的尺度效应, 发现通过它定义的直方变差图可作为描述数字图像空间特征的较好工具.

1 几种空间分析方法简介

1.1 变差图法

在分析遥感所研究的区域变量的空间自相关性时, 一种有效的方法为变差图分析. 其中称具有一定空间位置的随机变量为区域变量^[4]. 区域变量被它们的位置所标识, 以该区域某剖面各像素间的平均半方差 $\gamma(h)$ (average semivariance)可度量空间独立像素的差异性. 以观测步

2001-08-04 收稿, 2001-11-27 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(编号: G2000077900)、国家自然科学基金资助项目(批准号: 49971059)和美国 NASA 项目(编号: NAS5-31369, NAG5-7217)

** E-mail: haoz@mail.bnu.edu.cn

长 h 为横坐标, 对应 $\gamma(h)$ 为纵坐标所得的图谱称变差图。

对于具有不同纹理特征的遥感图像, 其变差图形状亦不相同. 按其形状可分为球形、指数形、线形及其复合形状. 可分别建立描述它们形状的模式^[5]. 这些描述变差图形状的模式被用于遥感图像的纹理分析等方面^[6]. 但是在解释遥感图像的空间差异与地物之间的联系时, 它们的作用就很小, 因为它们没有将变差图的形状与地物的大小、出现频度等参数联系起来. 为此, Jupp 等在稀疏植被的地表景观基础上建立了两组分盘状模型^[7]. 并在此基础上推导了描述变差图的几个参数(sill, range, nugget variance)与地物的大小、出现频度等的关系. 作为对这一模型的扩展, Woodcock 等用模拟图像讨论了圆盘半径不一和太阳光入射角不为零的情况^[4]. 在此情况下, 尽管地表组分变为由光照植被、阴影植被、光照地面、阴影地面 4 种组分^[8], 为了适用盘状模型 Woodcock 等将光照植被及阴影部分视为一种组分, 而将光照地表仍视为均一背景. 即使在最近的研究中为使用两组分盘状模型, 所做的改进也是将光照植被视为一种组分, 而将其余 3 组分视为背景¹⁾. 虽然他们还采用了多种真实图像进行了模型验证^[9], 但真实地表特征很难用两种组分就可以表示清楚, 这难免限制了模型的应用。

1.2 空隙度指数及信息熵

在景观生态学的研究中, 常采用空隙度指数法和信息熵法讨论景观组分的空间分布特征及其差异性^[10,11].

空隙度概念始见于曼德布罗特的经典著作^[12]. 空隙度指数的计算方法为: 以不同边长的滑动窗口从研究区左上角向右或向下滑动, 记录每次采样时滑窗内景观组分出现的频度. 滑窗滑过整个区域后, 对采样数据进行统计, 计算不同尺度下的空隙度指数, 从而对观测区进行多尺度空间分析。

信息熵法基于剖面调查进行地表组分的异质性分析, 在待观测区做一条剖面, 将其分为若干等长样段, 若某一组分在连续样段中同时出现或缺失, 则认为它们之间不具有异质性; 反之, 则认为它们之间存在异质性. 对整条剖线上所有连续两个样段都进行类似比较, 得到该景观组分在当前观测尺度上的异质性信息熵. 对样段两两合并, 重复以上计算, 可得到在新观测尺度上的异质性熵. 可看出, 当信息熵指数 I 随尺度的增加趋于 1 时, 观测景观表现为宏观异质性分布; 趋于 0 时表现为微观异质性分布。

由以上描述可见, 虽然上述两方法可用于多组分地表空间分布规律研究, 但还有一些不足: 信息熵法基于剖面调查, 受剖面数量及位置影响较大, 在总体综合程度及连续尺度分析上显得不足; 空隙度指数法可进行连续尺度上景观的空间分布分析, 但此时人们很关注的参数, 如不同组分在不同观测尺度下的面积、组分间边界随观测尺度的变化情况等均无法得知。

2 直方变差图

直方图是分析数字图像最常用的工具, 它直观地图示了不同灰度像素在图像中出现的频度, 本身不带有这些灰度像素的空间分布信息. 设有一 $M \times N$ 大小的图像 $z = f(x, y)$ (为描述方便起见, 下文涉及图像总被认为是 DEM, 但方法适用于任何灰度图像的分析), 高度分辨率 DN , 空间分辨率 d , 则其直方图为:

1) Song C. Monitoring succession in temperate conifer forests with yomote sensing: implications for terrestrial carbon budgets. Doctors thesis. Dept. of Geography, Boston University, 2001

$$\text{Hist}(z_i) = \frac{1}{MN} \sum_{x,y} \delta(z_i - f(x,y)) \quad z_i \in [0, DN], \quad (1)$$

当对该图像采用 $m \times n$ 的聚合窗进行向上的尺度转换后, 空间分辨率变为 $md \times nd$, 图像大小变为 $(M/n) \times (N/n)$. 图像变为:

$$f_{mn}(x,y) = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} f(x+j, y+i), \quad (2)$$

其对应直方图数学表达为:

$$\text{Hist}(z_i) = \frac{mn}{MN} \sum_{x,y} \delta(z_i - f_{mn}(x,y)). \quad (3)$$

我们将经过一系列尺度转换后得到的一组直方图称为直方变差图(histo-variogram), 即以直方图形式表达的随尺度变化的方差图.

经过向上的尺度转换后, 生成新图像会出现两种情况:

(1) 当原始图像中 $m \times n$ 聚合窗中各像元具有相同的高度值时, 在 $md \times nd$ 分辨率下的新像元保持高度不变, 我们称该新像元为驻点(standing pixel). 显然驻点代表着平坦地表像元, 本文中称之为“台地”, 表示为 $f_{mn-standing}(x,y)$. 在确定驻点时注意: 如果严格按照驻点定义计算, 真实地表可能很少有绝对平坦的表面, 故可设一阈值将表面有一定起伏, 与邻近地区高差明显的地域确定为“台地”. 如果像元 (i, j) 在尺度扩展(Scaling-up)后的图像上对应的是驻点像元, 则像元 (i, j) 在更细尺度上亦为驻点像元. 因此驻点像元的总数随着尺度扩展将单调减小. 即尺度扩展实际上是通过制造了更多的混合像元而撕裂了驻点直方图, 使其围绕驻点直方图周围扩散. 实际上可以在对图像做尺度扩展处理过程中记录下与每一个驻点直方图相关的扩展直方图.

(2) 当原始图像中 $m \times n$ 聚合窗中各像元高度值不同时, 在 $md \times nd$ 分辨率下的新像元高度发生变化, 称该新像元为边界点(contour pixel). 显然边界点代表着台地边缘或者坡面, 表示为 $f_{mn-contour}(x,y)$.

据此可将新图像的直方图分解为两部分: $\text{Hist}-s_{mn}(z_i)$ 为驻点直方图, 代表着给定尺度下、某一高度的台地总面积

$$\text{Hist}-s_{mn}(z_i) = \frac{mn}{MN} \sum_{x,y} \delta(z_i - f_{mn-standing}(x,y)), \quad (4)$$

$\text{Hist}-c_{mn}(z_i)$ 为边界点直方图, 代表着给定尺度下、某一高度的等高线总长度.

$$\text{Hist}-c_{mn}(z_i) = \frac{mn}{MN} \sum_{x,y} \delta(z_i - f_{mn-contour}(x,y)). \quad (5)$$

从驻点直方图的尺度变化着手分析, 可得到以下几个方面的信息:

(1) 原图像中是否存在明显的“台地”. 如果经过很少几次向上的尺度变化后, 在低分辨率图像上没有了驻点, 则说明原图像代表的地形非常“崎岖”, 缺少明显的“台地”.

(2) “台地”的破碎程度. 随着分辨率的降低, 驻点像元的比例将逐渐减少. 但台地边缘越破碎, $m \times n$ 聚合窗内落入不同高度像元的概率就越大, 驻点像元的比例减少的速度就越快.

(3) “台地”的方向性. 当用 m 行 n 列及 n 行 m 列的聚合窗(这里 $m \neq n$) 分别对原图像进行向

上的尺度变化时,将会得到不同数量的驻点数.我们可将产生驻点较多的窗体方向定义为“台地”的主方向.

边界点的高程和某高程边界点数量取决于两相邻台地的高差、聚合窗的大小、边缘的形状等因素.那么,需要多少参数才能描述直方变差图?这可根据情况灵活确定.首先,台阶的数量,即地表组分数可根据明显的台地确定.也可根据需要,降低高度分辨率以减少参数量;其次,台地面积及等高线的长度随尺度的变化可通过确定台地面及等高线的分维,用很少的参数即可表达.

由此可见,直方变差图是研究遥感图像空间特征的一种适用的描述方法.

在下文中,我们通过两个实例对直方变差图及其应用加以说明.实例 1 说明如何构造直方变差图及应用其进行空间分析;实例 2 以一个融合的实例说明如何应用直方变差图.

3 直方变差图应用验证

3.1 数据来源

本文中基于直方变差图的空间分析及图像融合两实例,均选用取自互联网的 IKONOS 天安门地区图像. IKONOS 卫星是世界上第 1 个 1 m 分辨率的商业卫星,它同时获取 1 m 分辨率的全色波段数据和 4 m 分辨率多光谱数据.前者对应的全色波段为 $0.45\sim 0.90\ \mu\text{m}$,后者成像波段为蓝($0.45\sim 0.52\ \mu\text{m}$)、绿($0.51\sim 0.60\ \mu\text{m}$)、红($0.63\sim 0.70\ \mu\text{m}$)和近红外波段($0.76\sim 0.85\ \mu\text{m}$).本文选用了该图像天安门广场附近全色波段和多光谱图像数据,图像为 TIF 格式,成像时间未知,校正状况未知.从目视角度看(如纪念碑的影子的方向与长度)可以视为同一时相.用于空间直方变差图分析的为全色波段,大小为 100×100 像元的图像,用于融合实验的为同一图像及与之对应的多光谱图像.

3.2 基于直方变差图的空间分析

3.2.1 数据预处理 本实例选取图像中主要地物有 3 类:低灰度的水泥地面、中等灰度的植被、高灰度汽车等(图 1).依据此分类将图像三值化,结果如图 2,在三值化图像基础上进行直方变差图研究.

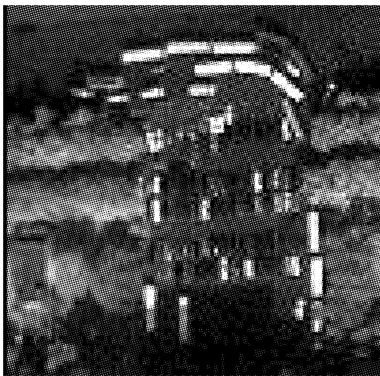


图 1 原始图



图 2 对应三值图

3.2.2 分析方法 (1) 进行尺度扩展处理. 选取用于聚合的不同形状不同尺度的聚合窗分别为:

A (聚合窗)行: 列 = 1 : 1 2×2, 3×3, 4×4, 5×5, 6×6, 7×7, 8×8, 9×9, 10×10 (注: $m \times n$ 表示聚合窗体为 m 行 n 列)

B (聚合窗)行: 列 = 1 : 2 1×2, 2×4, 3×6, 4×8, 5×10, 6×12

C (聚合窗)行: 列 = 1 : 3 1×3, 2×6, 3×9, 4×12, 5×15

为测算图像的主方向, 对应每一聚合窗有大小相同、方向为纵向的聚合窗进行尺度转换。

(2) 直方图分解. 分解的方法如前所述. 由于本例中已经过三值化处理, 所以驻点的选取严格按其定义进行, 而未设置任何阈值。

3.2.3 结果. 将原图经三值化处理后, 得到三类地物的像元数分别为: 黑(5938)、灰(3655)、白(407). 经上述不同形状, 不同大小的聚合窗进行尺度扩展后, 三类驻点的尺度效应如图 3, 4, 5 所示(各趋势线旁边所注为拟合函数). 用大小相同、方向不同的聚合窗得到的驻点对比, 见表 1(篇幅所限, 以聚合窗行列比为 1 : 2 为例), 其中‘横向黑色’指聚合窗列>行时不同尺度下黑色驻点数, 其余含义类似。

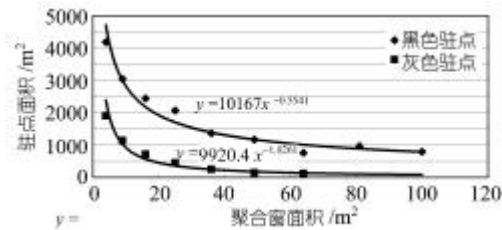


图 3 聚合窗行: 列 = 1 : 1 时, 黑色、灰色驻点的直方变差图

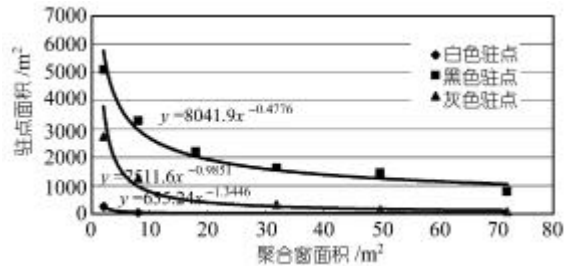


图 4 聚合窗行: 列 = 1 : 2 三类驻点的直方变差图

由以上各图、表对比可见:

(1) 当聚合窗行 < 列时, 各个尺度下驻点数量均多于聚合窗行 > 列时的驻点数, 由此, 可认为此图像的主方向为横向。

(2) 随着图像分辨率的降低(聚合窗增大), 黑色面积减少速度 < 灰色面积减少速度 < 白色面积减少速度, 可见三者的破碎程度逐渐增大。

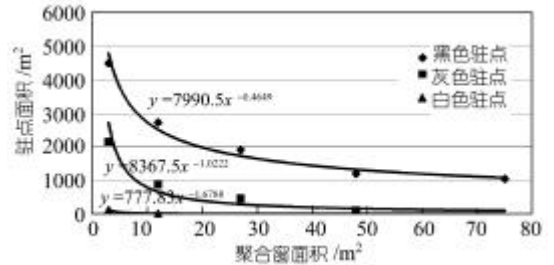


图 5 聚合窗行: 列 = 1 : 3 时, 三类驻点的直方变差图

度量破碎程度的指标为分维, 其定义为: $D = \log N / \log(1/r)$, 其中: $1/r$ 为相似比, N 为

表 1 经两方向聚合窗尺度转换后三类驻点对比

聚合窗尺度	横向黑色	纵向黑色	横向灰色	纵向灰色	横向白色	纵向白色
2	2553	2519	1367	1331	129	118
8	412	399	156	144	5	4
18	122	106	33	35		
32	51	39	10	6		
50	29	24	3	2		
72	11	7	1			

前一“母集”按 r 比例缩小后所得“子集”的个数. 分形、分维在地学中计算机模拟、环境建模等方面有广泛的应用^{[13]1)}. 地理统计学家估计分维常用如下公式^[14]: $\ln(S) = A - b \ln(g)$, $D = 2 + b$, 其中: g 为度量尺度(在此为聚合窗大小); S 为此尺度下测得某区域面积; D 为该区域的分维; A, b 为常数. 依此算得经不同形状聚合窗铺覆后各色块的分维如表 2.

表 2 各组分分维计算表

	1 : 1	1 : 2	1 : 3	1 : 4	平均值	平均偏差
黑色块分维	2.5541	2.4776	2.4649	2.5115	2.5025	0.03078
灰色块分维	3.0261	2.9851	3.0222	2.9342	2.9919	0.03225
白色块分维		3.3446	3.6788	3.6788	3.5674	0.14853

由此可见, 对不同尺度下驻点变化特征的描述可由几个有明确物理意义的变量来表示: 度量尺度(δ)、驻点初始面积(S_0)、驻点的整体分维(d). 即驻点面积随度量尺度的变化可表示为:

$$S_\delta = f(S_0)\delta^{d-2}. \tag{6}$$

当得知某尺度下度量的驻点面积, 可根据该类驻点的空间格局推知更细尺度下驻点的面积等特征. 根据直方变差图可得到表明某类驻点空间格局的参量——整体分维. 由于地理现象的自相似性在相当尺度范围内存在, 故可认为整体分维在同一尺度范围内亦是“尺度不变量”, 即在一定尺度范围内可认为驻点的一些统计特征仅与度量尺度有关.

3.3 直方变差图的数据融合

3.3.1 实验方法 同样地, 我们采用不同大小的滑窗系列对 1 m 分辨率图像进行尺度扩展转换, 得到驻点的直方变差图. 这些驻点在相应已配准的多光谱图像亚像元尺度上也是驻点, 并有相同的空间位置关系. 通过记录不同尺度下不同灰度驻点的空间位置, 我们可以得到带空间关系的直方变差图, 即不同尺度下驻点在 1 m 分辨率图像上扩展的空间关系图, 并由此调整相应的单个多光谱波段的光谱值, 最后利用 HIS 变换将调整后的光谱信息及高分辨率图像的空间信息进行融合从而得到融合图像.

本融合算法的实施步骤如下:

(1) 将 IKONOS 低分辨率多光谱图像几何配准到全色波段图像上并内插成 1 m 分辨率.

(2) 采用不同大小滑动窗口对 1 m 分辨率图像进行尺度扩展转换, 并记录驻点和边界点随尺度上升时的空间位置关系, 从而得到不同尺度上驻点和边界点的空间关系图. 在所选的高分辨率全色波段图像中, 我们给定 5% 的方差并在滑动窗口尺度达到 4×4 时, 找到对应于全色波段高分辨率图像上的一块最大的台地. 因为全色波段分辨率 4 倍于多光谱波段, 故滑窗最大取 4×4 . 这样用 15 个不同尺度的滑动窗口对原始的高分辨率多光谱图像进行尺度转换, 从而可以得到一系列不同尺度下的驻点和边界点的空间位置关系图.

(3) 利用这一系列的空间位置关系图求得驻点所对应的原始高分辨率图像上的台地的空间扩展关系图(图 6).

假设有一图像的大小为 7×7 , 其空间分辨率为 d , 经过一系列均值滑动窗口(在此取 $4 \times 4, 2 \times 2, 1 \times 2$)对原图像做卷积运算, 从而可以得到图像尺度为 $3 \times 3, 6 \times 6$ 和 7×6 的卷积图像, 其中: 黑色像元代表用 4×4 的滑动窗口找到的对应于全色波段高分辨率图像上的一块最大的台

1) Zhang X, Drake N A, Wainwright J. Scalingland-surface parameters for global scale soil-erosion estimation Water Resources Research (in press), 2001

地; 浅黑像元代表用 2×2 的滑动窗口找到的尺度上升到 6×6 时, 台地的空间扩展像元; 浅灰像元表示用 1×2 的滑动窗口找到的尺度上升到 7×6 时, 台地的空间扩展像元; 白色像元表示边界像元。

此时相应尺度下的图像的空间分辨率分别为 d_1, d_2 和 d_3 , 这时应有 $d_1 > d_2 > d_3$, 从而可以得到相应尺度下的驻点空间分布关系图。这些不同尺度下的驻点的空间分布便对应于原图像尺度上的一系列破碎的台地。可以通过记录这种台地撕裂和扩展的空间位置关系, 并将这种空间位置关系应用于已配准的多光谱图像的亚像元尺度上, 而达到对多光谱图像的单个波段进行纯化的目的。

(4) 以不同尺度下的驻点的空间扩展图为空间约束, 对高分辨率全色波段图像上进行空间直方图统计。这一步将全色波段的直方图分解为不同尺度下的驻点直方图和边界点直方图, 并对不同尺度下的驻点和最后的边界点进行空间直方图统计。由于两种分辨率的图像在精确配准后, 随着尺度收缩, 它们的驻点有相同的空间扩展关系, 这样对高分辨率全色波段的直方图分解在多光谱波段的图像亚像元尺度上应该存在一致性, 并且我们认为空间直方图统计在相同条件下也具有 consistency, 这样就可对多光谱图像在亚像元尺度上进行直方图分解和空间直方图统计。

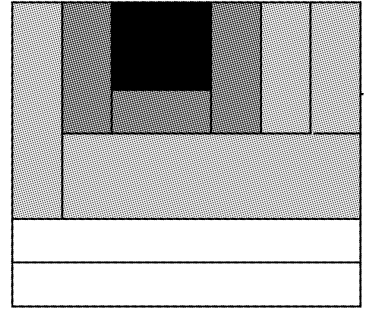


图 6 台地随尺度收缩时的空间扩展关系示意图

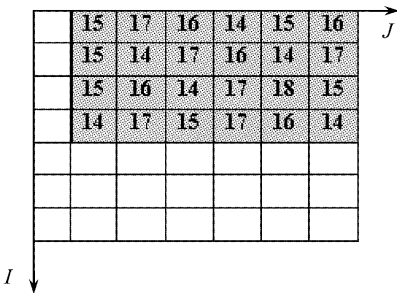


图 7 灰色所覆盖的面积为全色波段同一尺度上的台地所包含的像元的示意图

(5) 采用均值调整器, 根据多光谱图像亚像元尺度上的直方图分解和空间直方图统计, 对多光谱图像逐个波段进行亚像元纯化。选用均值调整器是因为均值可以反映这一类信息的总体状况。我们根据多光谱图像亚像元尺度上的直方图分解和空间直方图统计, 求相应于全色波段同一灰度值的单个多光谱波段的光谱值的均值, 并根据所记录的空间位置关系用均值替代相应空间位置关系的光谱值, 从而达到对单个多光谱波段进行纯化的目的。第(4)和第(5)步的具体算法实现过程如图 7, 8, 9 和表 3 所示。

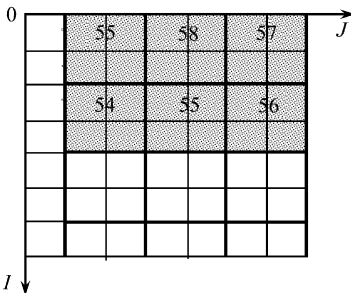


图 8 在空间关系一致性的条件下, 在多光谱图像的亚像元尺度上存在有相同的台地, 图中灰色部分为其所包含的多光谱影像的单波段的像元的示意图

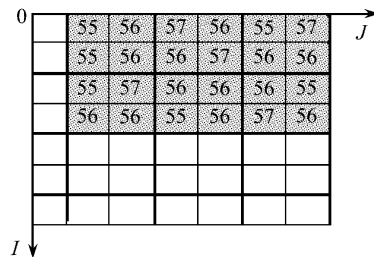


图 9 灰色部分为同一尺度上, 多光谱图像单个波段的台地所包含的纯化后的像元

如图 8、9 所示, 全色波段图像和亚像元尺度上的多光谱图在精确配准后, 由驻点所形成的台地及其空间扩展关系具有一致性, 此时我们对同一尺度上的像元进行空间直方图统计及对多光谱图像逐个波段进行纯化可以按下列步骤进行:

() 对全色波段的同一尺度下的像元进行空间直方图统计, 即统计直方图并记录相应点的空间位置.

表 3 同一尺度上全色波段空间直方图统计数组示意图

灰度	I 轴	J 轴	灰度	I 轴	J 轴	灰度	I 轴	J 轴	灰度	I 轴	J 轴	灰度	I 轴	J 轴	灰度	I 轴	J 轴
14	0	4	14	2	3	15	1	1	16	0	3	16	3	5	17	2	4
14	1	2	14	3	1	15	2	1	16	0	6	17	0	1	17	3	2
14	2	5	15	0	1	15	2	6	16	1	4	17	1	3	17	3	4
14	3	6	15	0	5	15	3	3	16	2	2	17	1	6	18	2	5

() 采用均值调整器按空间直方图统计, 对多光谱图像的逐个波段进行纯化, 具体方法如下:

() 按照全色波段同一灰度值所记录的空间位置, 在多光谱图像的单个波段上寻找相同位置处的单个波段的光谱值; () 按照这种位置关系将相应位置处的光谱值进行平均; () 按照这种位置关系, 用所求的均值取代原来的光谱值而对多光谱图像单个波段进行纯化(表 4).

表 4 单波段各位置纯化结果

灰度	I 轴	J 轴	灰度	I 轴	J 轴	灰度	I 轴	J 轴	灰度	I 轴	J 轴	灰度	I 轴	J 轴	灰度	I 轴	J 轴
56	0	4	56	2	3	55	1	1	57	0	3	57	3	5	56	2	4
56	1	2	56	3	1	55	2	1	57	0	6	56	0	1	56	3	2
56	1	5	55	0	1	55	2	6	57	1	4	56	1	3	56	3	4
56	3	6	55	0	5	55	3	3	57	2	2	56	1	6	56	2	5

(6) 采用柱状坐标系对调整后的多光谱波段和配准的高分辨率全色波段进行 HIS 变换^[15,16], 得到融合后的图像.

由于在用全色波段图像替代变换后的亮度信息时, 已经对多光谱图像的单个波段进行了光谱值的调整, 所以对全色波段的亮度分量不进行直方图匹配, 以保留全色波段和多光谱波段精确配准后的点对点的亮度信息.

3.3.2 结果分析 究竟采用尺度转换方法进行图像融合效果如何? 一方面我们选择 IKONOS 全色波段图像及与之配准过的多光谱波段作为结果判定的参考图像, 如图版 -1~3 (附本刊后, 下同)所示; 另一方面通过和传统几种融合算法如 HIS 变换融合算法、标准小波变换融合算法进行目视方面的分析和比较以评价本算法的优劣.

这 3 种算法的融合图像都融合了全色波段高分辨率图像的空间信息和多光谱波段的光谱信息从而在空间分辨力和清晰度上都较原多光谱图像有很大程度的提高.

从光谱特征可以看出: 基于尺度变换的融合算法在色彩上最为接近于原始多光谱图像(图版 -4), HIS 变换融合算法次之(图版 -5), 标准小波变换融合算法的色彩失真最大(图版 -6). 这说明基于尺度变换的融合算法有较好的光谱保真性.

对这 3 种算法的融合图像感兴趣的目标区(如 3 辆红车顶)在放大数倍后可以发现, HIS 变换融合算法和标准小波变换融合算法存在目标边界和其颜色边界不能很好重合的现象, 即在目标边界存在着彩色失真的现象, 这是因为 HIS 变换融合算法只对变换后的原始多光谱图像

的强度分量进行了简单的替代,反变换后的融合图像保留了混合像元的光谱值;而标准小波变换融合算法采用了多分辨率分析的原理将全色波段的空间信息迭加到多光谱波段中,从而保留了原始多光谱图像的混合像元的光谱值.基于尺度变换融合算法通过对高分辨率图像,在空域中进行不同尺度的直方图分解和空间直方图的统计,并将这种空间关系用于多光谱图像的亚像元尺度上,从而对部分混合像元(尤其是目标物边界的混合像元)按尺度的变化进行了重新的调整,而消除了这种边界模糊的现象,使目视效果得到了改善(图版 -7~11).

4 结论与讨论

通过对同一地面状况在不同观测尺度下得到的直方图变化特征的描述可有效地用于空间分析.通过定义驻点和边界点,可在不同观测尺度上进行直方图分解.在一系列观测尺度上得到的驻点及边界点直方图可应用于空间分析等方面.本文对应用直方变差图进行空间分析及图像融合进行了初步探讨,通过驻点直方变差图可得到图像的一些空间分布规律.

- (1) 驻点减少为零所经历的尺度转换次数可反映出原图像是否存在明显“台地”.
- (2) 驻点减少的速度可反映图像中“台地”的破碎程度.
- (3) 通过用非正方形的聚合窗分别沿纵横两方向进行尺度转换可以找出台地的主方向.

基于直方变差图的融合算法运用了驻点的概念与直方图分解的方法,通过记录驻点直方变差图的空间位置得到不同尺度下驻点在1m分辨率图像上扩展的空间关系图,并由此调整相应的单个多光谱波段的光谱值而得到较好地融合效果.(1)可以将全色波段高分辨率图像按不同的尺度进行直方图分解并进行空间直方图统计,这种空间关系对多光谱图像存在一致性;(2)得到的融合图像相对原始的多光谱图像存在较小的光谱扭曲现象,可以较好地保留原始多光谱图像的光谱值,从而有较好的目视效果;(3)可以部分消除目标边界的假彩色现象,例如对我们实验区中的目标物车顶就能很好地消除其边界的假彩色现象.

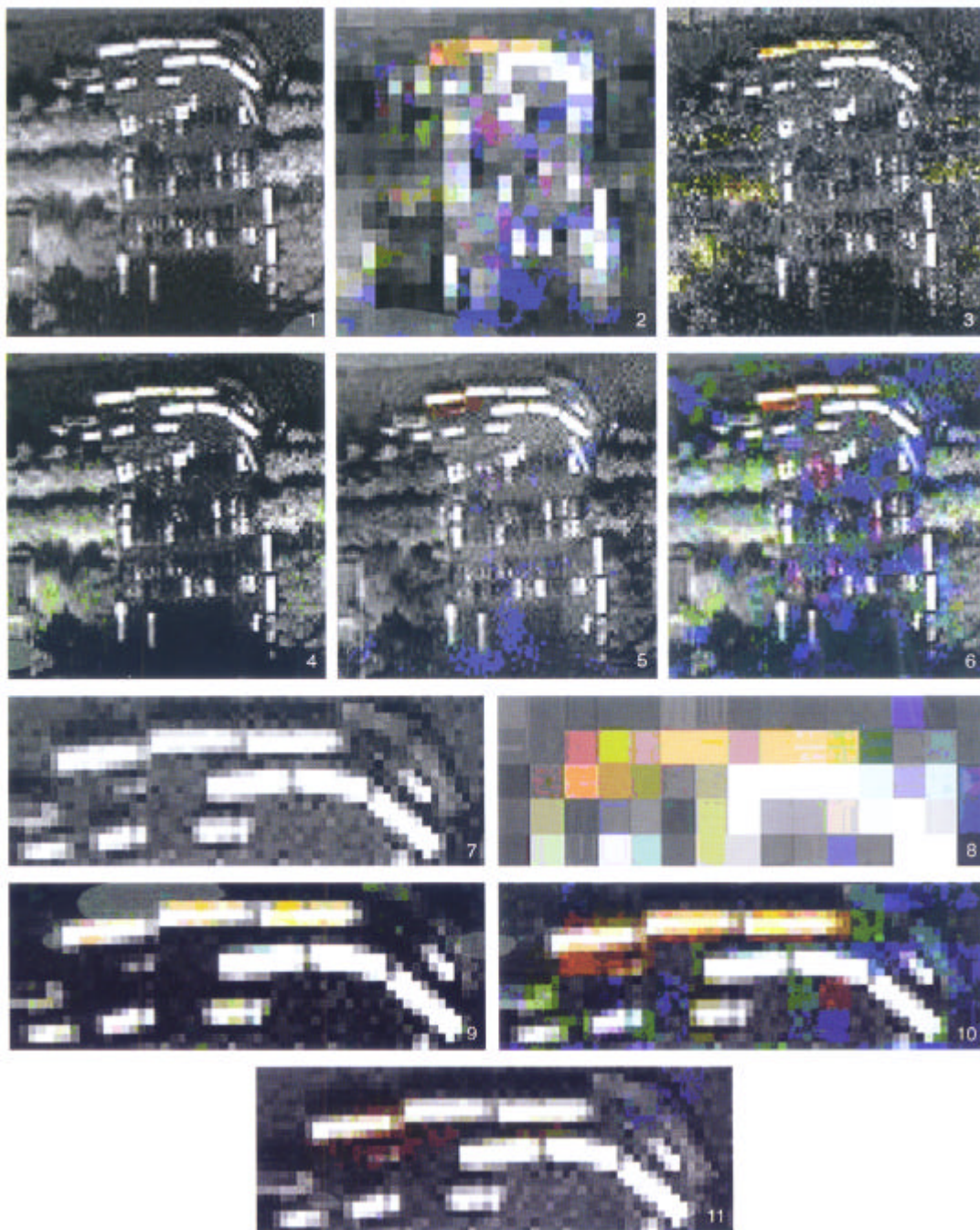
从以上实验中可以看出,采用直方变差图方法可以较好地进行空间分析及融合等方面的研究.同时也可看到,驻点的确定标准在尺度范围很广时可能不同,即当基于某一尺度做尺度扩展转换时,驻点将在某一粗尺度下消失;此时再做尺度扩展转换就要对驻点的确定标准进行调整.驻点的确定标准在哪一尺度范围内相对稳定是需深入研究的问题.另外,基于尺度变换的融合算法要求有较高的配准精度,否则这种空间关系的一致性结论会受到影响而影响融合效果.

致谢 作者对成文过程中法国农科院顾行发博士、美国马里兰大学梁顺林博士给予的指导和表示感谢,对与美国波士顿大学宋丛和博士的讨论表示感谢.

参 考 文 献

- 1 李小文,王锦地,胡宝新,等.论先验知识在遥感反演中的应用.中国科学,D辑,1998,28(1):67~72
- 2 李小文,王锦地,Strahler A H.非同温黑体表面上普朗克定律的尺度效应.中国科学,E辑,1999,29(5):422~426
- 3 李小文,王锦地,Strahler A H.尺度效应及几何光学模型用于尺度纠正.中国科学,E辑,2000,30(增刊):12~17
- 4 Woodcock C E, Jupp D L B. The use of variograms in remote sensing: I scene models and simulated images. Remote Sensing of Environment, 1988, 25: 323~348
- 5 Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. Advances in Soil Science, 1985, 3: 1~70

- 6 Warren B C, Thomas A S, Bradshaw G A. Semivariograms of digital imagery for analysis of conifer canopy structure. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 34: 167~178
- 7 Jupp D L B, Strahler A H, Woodcock C E. Autocorrelation and regularization in digital images . Simple image models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(3): 247~258
- 8 Li X, Strahler A H. Geometric-optimal modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, GE-23: 705~721
- 9 Woodcock C E, Strahler A H, Jupp D L B. The use of variograms in remote sensing: real digital images. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25: 349~379
- 10 Plotnick R E, Gardner R H, O' Neill R V. Lacunarity indices as measures of landscape texture. *Landscape Ecology*, 1993, 8(3): 201~211
- 11 曹 辉, 邵 楠, 郭庆华. 珠江三角洲东部常平地区景观异质性研究. *地理学报*, 1999, 54(3): 255~261
- 12 Mandelbrot B B. 大自然的 fractal 几何学. 陈守吉, 凌复华, 译. 上海: 上海远东出版社, 1998
- 13 朱启疆, 戎太宗, 孙 睿, 等. 林火扩展的分形模拟案例研究. *中国科学, E 辑*, 2000, 30(增刊): 106~112
- 14 Lam N. Description and measurement of Landsat TM images using fractals. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1990, 56: 187~195
- 15 Schetselaar E M. Fusion by the HIS transform: should we use cylindrical or spherical coordinates? *INT J Remote Sensing*, 1998, 19(4): 759~765
- 16 Liu J G, Moore J. McM. Pixel block intensity modulation: adding spatial detail to TM band 6 thermal imagery. *INT J Remote Sensing*, 1998, 19(13): 2477~2491



1. 用于融合的全色波段图像; 2. 用于融合的多光谱图像; 3. 尺度变换后多光谱调整图; 4. 尺度转换融合结果; 5. HIS 变换融合结果; 6. 标准小波变换融合结果; 7. 目标物放大后全色波段图像; 8. 目标物放大后多光谱图像; 9. 目标物放大后尺度转换融合结果; 10. 目标物放大后 HIS 变换融合结果; 11. 目标物放大后标准小波变换融合结果