

# 多尺度小波分析用于 DEM 网格数据综合

刘春<sup>1),2)</sup> 王家林<sup>2)</sup> 刘大杰<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(同济大学测量与国土信息工程系,上海 200092) <sup>2)</sup>(同济大学海洋与地球科学学院,上海 200092)

**摘要** 数字高程模型(DEM)虽已广泛应用于地学、景观以及区域规划等工作,然而在不同尺度下,不同的系统对其数据量的要求是不同的,且数据量将影响系统运行及分析的速度;其次等高线的制图综合也可直接通过数字高程模型数据的综合来实现,为了加快 DEM 数据综合的速度和保持综合前后 DEM 数据特征一致性,提出了一种采用小波多尺度分析的方法来进行 DEM 网格数据综合的方案,并给出了数字高程模型网格数据的综合基本模型,同时对综合以后的可靠性分别从数据量、断面图和曲面面积变化等方面进行了分析。具体实例说明,将多尺度小波分析用于 DEM 网格数据综合是有效的。

**关键词** 小波多尺度分析 数字高程模型 综合

中图法分类号: P208 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)03-0340-05

## Generalization of DEM Grid Data Based on Multi-band Wavelet Analysis

LIU Chun<sup>1),2)</sup>, WANG Jia-lin<sup>2)</sup>, LIU Da-jie<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Department of Surveying and Geoinformatics, Tongji University, Shanghai 200092)

<sup>2)</sup>(Scholl of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract** Digital Elevation Model(DEM) finds its widely using in the areas of Geography, landscape and regional planning. The abbreviation DEM is used to describe a digital data set which is used to model a topographic surface (a surface representing height data). Since this is impossible, a surface model approximates a continuous surface using a finite number of observations. In its simplest form a vector DEM mimics the raster version by using a regularly spaced set of spot heights to represent the terrain surface. A more advanced, more complex and more common form of vector DEM is the triangulated irregular network (TIN). In vector GIS a TIN is used to create a DEM from either regular or irregular height data. However, some systems have their different request of the data volume under different scale for the influence on the speed of operation and analysis. Besides, cartography generalization of the contour can be realized by the generalization of DEM. So the generalization model on DEM grid data is given in this paper by using the multi-band wavelet analysis, and a case study is put forward to give the detail explanation. Meantime, its reliability is described from the point of data volume, profile of the elevation and change of curve surface area.

**Keywords** multi-band wavelet analysis, digital elevation model(DEM), generalization

## 1 引言

数字高程模型(DEM)是连续起伏地形空间的数学表达,它由对地形表面取样所得到的一组点的(X、Y、Z)坐标数据和一套对表面进行连续描述的算法组成<sup>[1]</sup>。DEM的最常见形式是高程矩阵或称为矩形格网 Grid,它可通过对不规则或规则的空间数据点进行插值获得;不规则三角网 TIN 是 DEM 的另一表

现形式,TIN 是一个由一系列连续相邻的不规则三角形组成的地面模型,其 X 坐标和 Y 坐标间距不定。

数字高程模型的压缩和综合是长期以来针对数字高程模型的研究内容。数字高程模型可以通过等高线进行可视化表现,因此很多地图制图综合的研究都曾探讨过等高线的图形综合<sup>[2]</sup>,并把综合以后的等高线图用于反映数字高程模型。这一做法是地图制图综合研究的扩展,其在图形表达上有很大的实用性,然而由于数字高程模型不同区域高程的变

化是相互关联的,所以若把研究数字高程模型的综合归为等高线的综合,则在一定程度上,割裂了地形的相关性,而且,在地形起伏非常复杂的地区,对等高线的综合,可能会引起等高线逻辑上的矛盾,如交叉等问题,由此可见,探讨数字高程模型的数据综合应围绕它的数据列进行综合研究。文献[3]采用倾角 Morton 编码(SMC, slopping angle morton coding)探讨了数字高程模型网格数据进行综合简化的问题,文献[4]则从稠密格点形成的 Grid 格网集中,通过选“重要点集”生成描述地形起伏的三角形剖分网来进行综合简化。

在地理信息系统(GIS)研究中,由于应用领域的日益扩大,从而导致了多比例尺 GIS 的需求,而目前建立多比例尺 GIS 的常用方法是重复数字化,但这种方法耗资巨大,不但数据采集与建库工作繁重,且数据不稳定。同样,由于 DEM 数据一般数据量都非常大,若对一些系统应用小比例尺的数据,则太大的 DEM 数据量势必对系统的要求非常高,而且影响系统分析速度,因此,研究有效的 DEM 数据综合简化方法是十分重要的。由于 DEM Grid 格网也可以看作是一幅数字图像<sup>[5]</sup>,所以本文提出采用多尺度小波分析的方法来探讨 DEM 网格数据的综合简化,因为在这一过程中,网格上的高程值可以被当作类似数字图像中的灰度值来处理。

## 2 多尺度小波分析

空间数据综合在许多方面具有重要应用,针对空间数据综合的研究,目前已有一些方法,但在模型的建立上还存在一些问题,主要由于许多模型都是基于直观,而不是基于机理的,是基于局部而不是基于全局的,因此,建立有效的空间数据综合模型十分必要。目前,一些新的方法,特别是基于小波分析的方法已引起了人们的注意。小波分析是 20 世纪 80 年代发展起来的应用数学理论,如今在测绘等众多领域已取得了许多重要的应用。在数据综合简化方面,文献[6]也建立了一种基于小波分析的自动制图综合模型,并对河网数据进行了试验。

### 2.1 小波多尺度分析

空间  $L^{(2)}(R)$  中的一列闭子空间  $\{V_j\}_{j \in Z}$  为  $L^{(2)}(R)$  的多尺度分析,令  $V_j^{(2)} = V_j * V_j$ , 则  $\{V_j^{(2)}\}_{j \in Z}$  构成  $L^{(2)}(R^2)$  的一个多尺度分析。多尺度分析是在  $L^{(2)}(R^2)$  函数空间内,将函数  $f$  描述为一系列近似函

数的极限,也就是说,函数  $f$  可以近似表示成在空间  $V_j^{(2)}$  里  $f_j$  的极限,即  $f = \lim_{j \rightarrow \infty} f_j$ , 由于其中每一个近似都是原函数  $f$  的平滑版本,而且具有越来越精细的近似函数,因此这些近似都是在不同尺度上得到的。

### 2.2 小波正交分解法

设  $\{V_j^{(2)}\}_{j \in Z}$  是一给定的二维多尺度分析,  $W_j^{(2)}$  是  $V_{j+1}^{(2)}$  在  $V_j^{(2)}$  中的正交补子空间, 即有  $V_{j+1}^{(2)} = V_j^{(2)} * W_j^{(2)}$ ,  $\varphi(n, m)$  即为  $\{V_j^{(2)}\}_{j \in Z}$  的尺度函数。 $f(n, m)$  可以用  $V_j^{(2)}$  中的一组规范正交基函数系  $\{\varphi_j(n, m); j, n, m \in Z\}$  和  $W_j^{(2)}$  中的一组规范正交基函数系  $\{\psi_j^{(i)}(n, m) | i = 1, 2, 3; j, n, m \in Z\}$  表示,  $\varphi$  和  $\psi$  分别为相应的尺度函数和小波函数, 则有

$$f(n, m) = \sum_j C_{n,m}^{(LL)_j} \varphi_j(n, m) + \sum_j d_{n,m}^{(LH)_j} \psi_j^{(1)}(n, m) + \sum_j d_{n,m}^{(HL)_j} \psi_j^{(2)}(n, m) + \sum_j d_{n,m}^{(HH)_j} \psi_j^{(3)}(n, m)$$

且有

$$C_{n,m}^{(LL)_j} = \frac{1}{2} \sum_{k,l \in Z} h_{k-2n} h_{l-2m} C_{k,l}^{(j-1)} \quad (1)$$

$$d_{n,m}^{(LH)_j} = \frac{1}{2} \sum_{k,l \in Z} h_{k-2n} g_{l-2m} C_{k,l}^{(j-1)}$$

$$d_{n,m}^{(HL)_j} = \frac{1}{2} \sum_{k,l \in Z} g_{k-2n} h_{l-2m} C_{k,l}^{(j-1)} \quad (2)$$

$$d_{n,m}^{(HH)_j} = \frac{1}{2} \sum_{k,l \in Z} g_{k-2n} g_{l-2m} C_{k,l}^{(j-1)}$$

其中,  $j, n, m \in Z, h_p, g_p (p \in Z)$  为小波系数。

上式即为二维离散信号的有限正交小波分解公式。这种正交小波的多尺度分解特性,为 DEM 网格数据综合提供了重要理论基础。

## 3 基于小波分析的 DEM 网格数据综合

### 3.1 DEM 网格数据小波综合模型

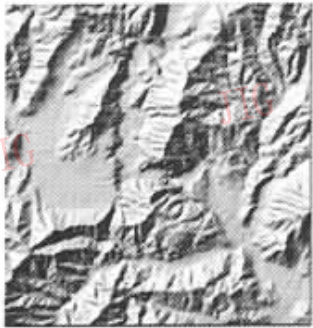
从小波多尺度分析和正交小波分解的原理可以看出,可以将空间  $L^{(2)}(R^2)$  看成是某地理空间在特定比例尺下的 DEM 网格数据模型,  $\{V_{j,n,m}^{(2)}\}_{j,n,m \in Z}$  ( $j = 1, 2, \dots, k$ ) 是 DEM 网格数据模型在尺度函数作用下的分解,所以该模型可理解为是基于一定比例尺下原始 DEM 网格数据的多级综合模型。

在对 DEM 网格数据进行综合的过程中,可认为  $L^{(2)}(R^2) = V_0^{(2)}$ , 这样,从  $V_0^{(2)}$  出发,应用尺度函数就可以表示出  $V_1^{(2)}, V_2^{(2)}, \dots, V_K^{(2)}$ , 此过程可以看作是基于一小波多尺度分析的由原始 DEM 网格数据  $V_0^{(2)}$  到综合 DEM 网格数据  $V_1^{(2)}, V_2^{(2)}, \dots, V_K^{(2)}$  的综合过程。

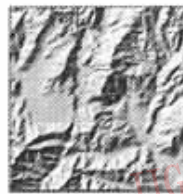
针对 DEM 网格数据综合,原始 DEM 数据可看成是由函数  $f(n, m)$  所表示的网格点,且假设有  $f(n, m) = C_{n,m}^{(0)}, n, m \in \mathbf{Z}$ , 于是根据小波分解的原理有

$$f(n, m) = C_{n,m}^{(L, L)} \rightarrow C_{n,m}^{(L, H)} \rightarrow \dots \rightarrow C_{n,m}^{(H, H)}$$

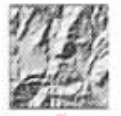
这里  $D_V^{(j)} = \{d_{n,m}^{(L, H)}\}^{(j)}$  是各层次的垂直边缘图,  $D_H^{(j)} = \{d_{n,m}^{(H, L)}\}^{(j)}$  是各层次的水平边缘图,  $D_T^{(j)} = \{d_{n,m}^{(H, H)}\}^{(j)}$  ( $j=1, 2, \dots, K$ ) 是各层次的斜边缘图。由式(1)知,可以从  $C^{(j-1)} = \{C_{n,m}^{(j-1)}\}$  得到  $\{C^{(j)}\}$ , 且  $C^{(j)} = \{C_{n,m}^{(j)}\}$  的数据量是  $C^{(j-1)} = \{C_{n,m}^{(j-1)}\}$  的一半,



(a) 原数据



(b) 一次综合变换



(c) 二次综合变换

图 1 DEM 综合灰度表示

实验数据经小波变换后,原数据得到了综合简化,每次数据综合后,数据量只有原来的一半,并且综合简化后的 DEM 正射图基本保留了原数据的地形起伏特征。

### 3.2 综合前后的 DEM 表达

上述实验虽对 DEM 网格数据做了综合,但

DEM 具有多种表达形式,仍取原实验数据,采用小波分析分别作两次综合变换(简称综合)。原始数据为已知的 DEM 网格数据,压缩变换运算都针对网格数据进行,经过压缩变换后的数据也都采用同一个等高线搜索算法生成等高线。图 2 是第 1 次综合



(a) 第 1 次综合变换后 DEM 等高线表达



(b) 第 2 次综合变换后 DEM 等高线表达

图 2 两次小波变换以后数据的等高线表达

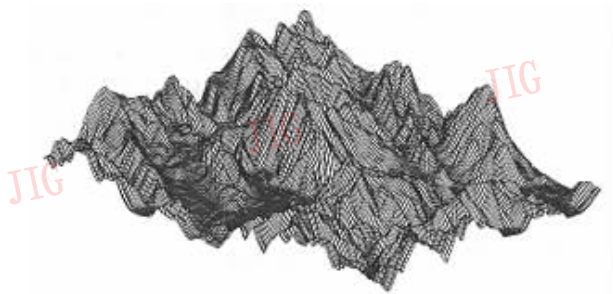
与第 2 次综合以后 DEM 的等高线表达。而图 3 是第 1 次综合与第 2 次综合以后 DEM 的曲面表达。

DEM 网格数据以后,再进行重新表达,这样既可保持等高线的逻辑一致性,又能有效地实现图形的简化和取舍的综合。

可见,等高线的制图综合,完全可以在综合



(a) 第 1 次综合变换后 DEM 曲面表达



(b) 第 2 次综合变换后 DEM 曲面表达

图 3 两次小波变换以后数据的曲面表达

### 4 可靠性分析

实验结果表明,采用小波多尺度分析来对 DEM 网格数据进行综合,能基本保持原数据的特性。虽然实验采用的数据,其所在区域地形比较复杂,但从图 1 可以发现,两次变换以后,尽管 DEM 的山脊与山谷的基本骨架没有发生变化,仅局部细小的地形被适当地做了平滑,但数据量却有了很大变化,表 1 给出了对实际数据采用小波变换综合前后数据情况的比较。

表 1 DEM 数据综合前后的数据变化

数据	阵列 (行×列)	网格宽度 (像素)	数据容量	高程范围 (m)
原数据	601×681	5	6.4M	70.016~475.748
一次综合数据	301×341	10	1.8M	70.010~475.700
二次综合数据	151×171	20	448K	70.010~475.000

从表 1 可以看出,尽管综合前后数据量的变化非常明显,但高程范围没有明显的变化,也即高程值在综合前后基本保持了原样。

为进一步了解综合的可靠性,同时,在数据范围选取了一条对角线,计算得到的综合前后 DEM 断面如图 4 所示。

由图 4 的断面可以看出,综合前后,高程起伏特征的变化被基本保持了,仅 3 个断面图在平面上有一定的偏移,这是由于小波变换边界处理引起的。实验中,还对边界数据进行了加密,以便将由边界问题引起的平面偏移保持在尺度缩放的容许精度以内。此外,对曲面面积的变化也做了分析,其分析结果如

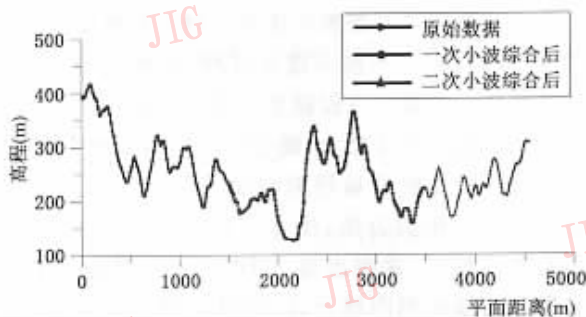


图 4 多次小波综合后断面高程图

图 5 所示。可见,采用小波多尺度分析可以降低 DEM 网格数据拟合曲面的粗糙程度。

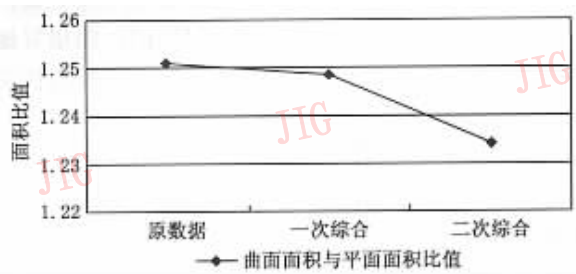


图 5 综合前后曲面面积的变化

此外,为了衡量上述小波综合后的高程精度,在 DEM 区域范围内,以规则网格的形式抽取覆盖了整个试验区范围的 50 个检查点。每个检查点分别取原 DEM 网格、一次综合和二次综合以后网格上的高程,再通过计算得到综合以后的 DEM 与原始数据的该位置高程的差值。表 2 给出了检查的结果。

表 2 DEM 压缩综合后的高程变换检查结果

检查数据	高程差最大值 (m)	高程差最小值 (m)	高程差均值 (m)	高程差的 均方差
一次综合	0.13	0.03	0.07	0.015
二次综合	0.21	0.07	0.10	0.018

表2给出的结果反映了综合后网格点高程差的变化情况,二次综合以后高程差变大是因综合是在一次综合的基础上进行,产生了误差的传递而引起的。由于表2中的高差最大值和高程差均值均在原始数据高程的精度数量级范围内,所以可以认为变换小波变换压缩对高程数据的畸变是有限的,从高程差的均方差值也可以看出,综合不会引起明显的高程变化异常。

## 5 结论

随着科学技术,特别是计算机技术的迅速发展,在DEM的数据获取方法、数据存储和数据处理速度等方面已经取得突破性进展。数字地形模拟是针对地形地貌的一种数字建模过程,这种建模的结果通常就是一个数字高程模型。由于大比例尺数字高程模型数据量非常之大,而在许多应用系统中,数据量的大小对系统的运行影响很大,因此本文采用小波多尺度分析的方法,建立了DEM网格数据综合小波变换模型,并提出通过DEM网格数据综合来实现等高线的制图综合,同时以实例加以说明。此外,为了说明采用小波多尺度分析方法对DEM网格数据综合的可靠性,本文又通过数据量、断面图以及曲面面积变化的比较对其进行了论证,由比较结果可见,采用小波多尺度分析的方法对DEM数据进行综合,不仅可以大大压缩数据量,同时能很好地保持原地形的起伏变化,而对于一些碎部的起伏又能较好地进行综合,这表明该方法是实用和可靠的。然而在实际应用过程中,采用这一方法,仍需要考虑和加强边界问题的处理,在本文的应用中,由于边界问题只采用扩展和加密边界数据的方法进行处理,所以仍需要进一步加以研究。

### 参考文献

1 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,2000.

- 2 王家耀,武芳. 数字地图自动综合的方法与原理[M]. 北京:解放军出版社,1998.
- 3 廖朵朵. 实时动态虚拟地景生成技术的研究与实践[D]. 郑州:解放军测绘学院,1996.
- 4 徐青. 地形三维可视化技术[M]. 北京:测绘出版社,2000.
- 5 朱长青. 小波分析理论与影像分析[M]. 北京:测绘出版社,1998.
- 6 吴纪桃,王桥. 小波分析在GIS线状数据图形简化中的应用研究[J]. 测绘学报,2000,4(1):71~75.



刘春 1973年生,讲师,2000年获同济大学大地测量与测量工程学博士学位,2001年11月起于同济大学海洋科学博士后流动站从事博士后研究工作。主要研究方向为GIS空间数据不确定性理论、GIS基础理论研究和应用系统开发,已于国内外刊物发表论文40余篇。



王家林 1942年生,1965年毕业于北京地质学院,教授、博士生导师,曾任同济大学海洋地质与地球物理系主任,教育部海洋地质开放实验室副主任。中国海洋湖泊学会理事、中国地球物理学会海洋地球物理专业委员会副主任、上海市地球物理学会副理事长。长期从事重磁勘探的教学与研究,近廿多年来致力于石油和海洋的综合地球物理解释的教学与科研。



刘大杰 1940年生,1962年毕业于武汉测绘科技大学,教授、博士生导师,曾任中国测绘学会理事、上海测绘学会副理事长。主要研究方向为大地测量与空间动力学、GIS空间数据不确定性理论。发表专著7本,于国内外刊物发表论文百余篇。