

# 基于小波分析的等高线数据压缩模型

朱长青<sup>1),3)</sup> 王玉海<sup>2)</sup> 李清泉<sup>4)</sup> 柳林涛<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077) <sup>2)</sup>(解放军信息工程大学理学院, 郑州 450052)

<sup>3)</sup>(解放军信息工程大学测绘学院, 郑州 450052) <sup>4)</sup>(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430070)

**摘要** 鉴于矢量地图数据压缩在地形环境仿真、制图综合、GIS等研究中具有重要作用,为此,利用小波变换理论和矢量地图数据的特点,提出了一种用于等高线数据压缩的模型和方法,即首先,基于小波变换的特征,提出了基于小波变换的等高线数据压缩的基本思想;然后,根据等高线数据的小波变换特点,研究了小波变换的边界处理;同时,给出了用于等高线数据压缩的特征点选取方法;并提出了基于小波变换的等高线数据压缩模型;最后,根据提出的压缩模型,对实际等高线数据进行了实验。理论分析和实验结果表明,该方法不仅能保持较高的压缩比,而且能使压缩后的数据保留原来数据的变化趋势,从而较好地反映了原数据的内在特性和规律性。

**关键词** 小波分析 等高线数据压缩 边界处理 特征点追踪

中图分类号: P208 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)07-0841-05

## A Model to Compress Contour Data Based on Wavelet Analysis

ZHU Chang-qing<sup>1),3)</sup>, WANG Yu-hai<sup>2)</sup>, LI Qing-quan<sup>4)</sup>, LIU Ling-tao<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430077)

<sup>2)</sup>(Institute of science, Information Engineering University, Zhengzhou 450052)

<sup>3)</sup>(Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052)

<sup>4)</sup>(State Key Laboratory of IESMRS, Wuhan University, Wuhan 430079)

**Abstract** It is very important to compress vector relief data for the study and application of the terrain environment simulation, cartographic generalization, GIS and so on. Using the theory of wavelet analysis and the characteristics of the vector relief data, in this paper, a model to compress contour data is developed. Firstly, a basic ideal is proposed to compress contour data based on wavelet transformation. Then, the boundary of wavelet transformation is processed by a developed method. And the feature points of contour data are selected according on given rules so that the compressed data can retain the characteristic of original data well. Thus, a model to compress contour data is obtained based on wavelet transformation. Finally, actual contour data are experimented using the developed compression model. The theory analysis and experiments show that the developed model not only obtains the high compression ratio for contour data but also retain the trend and the characteristics of original contour data. The developed method can be used with the widely areas such as digital terrain models, GIS, remote sensing *et al.*

**Keywords** wavelet analysis, vector relief data compression, boundary processing, tracing characteristic points

## 1 引言

在地理环境仿真应用中,要求电子地图的显示能实现无级缩放,但在实际应用中的数据根本无法满足这一需求,如在电子地图的放大过程中,通常都

希望细节能随之增加,但电子地图的细节不够,而且在缩小时又显得数据冗余,甚至无法阅读,因此,电子地图就需要有一个中间层次的,基于大比例尺地图的压缩了的数据支持。

我国的地图数据库建设中,尚存在不少深层次的问题,如数据冗余问题。由于量化过程中不同的

作业人员采集的密度不同,有的较密,即除特征点外,还大量地采集了非特征点数据,因此对这样的数据需要把冗余的数据点去掉,以便在数据量上达到压缩的目的,但这种压缩不仅要求特征点得以保留,还要不产生移位,而且线划总体轮廓特征也要得以保留<sup>[1]</sup>。

在地理信息系统(GIS)研究中,由于应用的日益扩大,导致了多比例尺特征GIS的需求,而目前建立多比例尺特征(GIS)的常用方法是重复数字化,但由于这种方法耗资巨大,数据采集与建库工作繁重,数据不稳定,因此,研究有效的GIS数据简化压缩方法十分重要<sup>[2]</sup>。

由此可见,矢量地图数据压缩在许多方面具有重要应用。关于矢量地图数据压缩的研究,虽然目前已有一些方法,但由于在模型的建立上还存在一些问题,主要在于许多模型都是基于直观而不是机理的,基于局部而不是全局的,因此,建立有效的矢量地图数据压缩模型十分必要。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,其在测绘众多领域方面已取得了许多重要的应用<sup>[3]</sup>:如在数据压缩简化方面,文献<sup>[4]</sup>利用多进制小波方法研究了DEM数据的压缩简化;文献<sup>[5]</sup>建立了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。这些研究都取得了较好的效果,但在研究的深度和广度上还不够,还有许多问题有待进一步研究。

本文提出了基于小波分析的等高线数据压缩的模型和方法,并根据等高线数据的特点,对小波变换边界预处理、特征点跟踪等问题进行了研究。本文首先简要介绍了小波分析基本理论;然后建立了矢量地图数据压缩模型,其中包括基本模型建立、小波变换边界预处理、特征点追踪等;最后对实际矢量地图数据进行了实验分析。实验结果表明,本文方法在保持等高线数据压缩比和形状特征等方面均具有好的效果。

## 2 小波分析基本理论

### 2.1 多尺度分析

定义 空间  $L^2(\mathbf{R})$  中的一列闭子空间  $\{V_j\}_{j \in \mathbf{Z}}$ , 若满足下列条件,则称为  $L^2(\mathbf{R})$  的多尺度分析<sup>[3]</sup>。

- ① 单调性  $V_j \subset V_{j-1}$ , 对任意  $j \in \mathbf{Z}$ ;
- ② 逼近性  $\bigcap V_j = \{0\}$ ,  $\bigcup V_j = L^2(\mathbf{R})$ ,  $j \in \mathbf{Z}$ ;

③ 伸缩性  $u(x) \in V_j \Rightarrow u(2x) \in V_{j-1}$ ;

④ 平移不变性  $u(x) \in V_0 \Leftrightarrow u(x-k) \in V_0$ , 对任意  $k \in \mathbf{Z}$ ;

⑤ Liesz 基 即存在  $g \in V_0$ , 使  $\{g(x-k) | k \in \mathbf{Z}\}$  构成  $V_0$  的 Liesz 基。

多尺度分析是在  $L^2(\mathbf{R})$  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  $f$  可以表示成在空间  $V_j$  里的近似表示  $f_j$  的极限,即  $f = \lim_{j \rightarrow \infty} f_j$ , 其不仅每一个近似都是原函数  $f$  的平滑版本,即具有越来越精细的近似函数,而且这些近似都是在不同尺度上得到的。

### 2.2 小波正交分解法<sup>[3]</sup>

设  $\{V_j\}$  是一给定的多分辨率分析,  $\varphi$  和  $\psi$  分别为相应的尺度函数和小波函数,  $W_{j+1}$  是  $V_{j+1}$  在  $V_j$  中的正交补子空间, 即有  $V_j = V_{j+1} + W_{j+1}$ ,  $\psi(x) \in W_0$  称为小波函数。  $f(x)$  可以用  $V_{j+1}$  中的一组规范正交基  $\{\varphi_{j+1,k}, k \in \mathbf{Z}\}$  和  $W_{j+1}$  中的一组规范正交基  $\{\psi_{j+1,k}, k \in \mathbf{Z}\}$  表示:

$$f(x) = \sum_n c_n^{(j+1)} \varphi_{j+1,n} + \sum_n d_n^{(j+1)} \psi_{j+1,n}$$

且有

$$c_k^{(j+1)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_n h_{n-2k} c_n^{(j)}$$

$$d_k^{(j+1)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_n g_{n-2k} c_n^{(j)}$$

以上两式即为离散信号的有限正交小波分解公式,其中  $j$  表示小波分解的层次。这种正交小波的多尺度分解特性,为矢量地图数据压缩提供了重要理论基础。

## 3 基于小波变换的矢量地图数据压缩模型

### 3.1 基本模型建立

从上述小波多尺度分析和正交小波分解公式中可以看出,可以将空间  $L^2(\mathbf{R})$  看成是某地理空间在特定比例尺下的矢量地图数据模型,  $f(x)$  是其上各图形要素(如线状要素),那么,  $\{V_m\}_{m \in \mathbf{Z}}$  则可看成是基于此比例尺下原始数据的多级压缩模型<sup>[5]</sup>。

在实际应用中,因为地图分辨率是有限的,所以可以认为  $L^2(\mathbf{R}) = V_0$ , 这样,从  $V_0$  出发,  $V_1, V_2, V_3, \dots, V_m$  可以应用尺度函数表示,此过程可以看作是基于一小波多尺度分析的由原始矢量地图数据  $V_0$  到

压缩矢量地图数据  $V_1, V_2, V_3, \dots, V_m$  的压缩过程。

实际地图数据压缩中,地形曲线(等高线)  $y=f(x)$  可看作为如下离散形式<sup>[5]</sup>:  $f(x_n) = c_n^{(0)}$ ,  $n=1, 2, 3, \dots$ , 于是,根据小波分解公式

$$c_k^{(j)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_n h_{n-2^j k} c_n^{(j-1)} \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

可以从  $\{c_n^{(j-1)}\}$  得到  $\{c_n^{(j)}\}$ , 而且根据上式,  $\{c_n^{(j)}\}$  的数据量是  $\{c_n^{(j-1)}\}$  的一半, 由此即可得压缩了的矢量地图数据  $\{c_n^{(j)}\}$  ( $j=1, 2, 3, \dots$ )。式(1)即为基于小波分析的矢量地图数据计算公式, 其中系数应用的是以下 Daubechies 四系数正交小波系数:

$$h_0 = 0.482962, h_1 = 0.836516, h_2 = 0.224143,$$

$$h_3 = -0.129409, h_i = 0 \text{ (当 } i < 0 \text{ 或 } i > 3 \text{ 时)}。$$

一般地, 经  $j$  次小波变换后, 即得  $j$  次压缩后的矢量地图数据, 其数据量为  $N \cdot 2^{-j}$ , 其中  $N$  为原矢量地图数据量。根据上述模型和式(1), 即可对一幅矢量地图等高线数据进行试验, 处理是逐条进行的。图 1 为一幅矢量地图, 有 594 个数据点, 利用上述模型, 对图 1 进行小波变换得图 2, 剩余 297 个数据点, 压缩比为 50%。

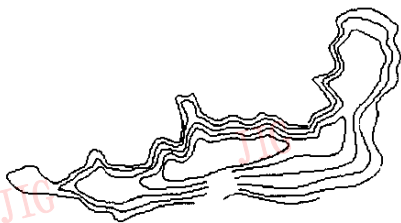


图 1 原等高线图

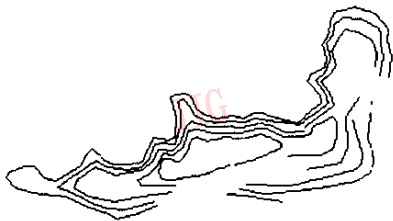


图 2 经小波变换压缩后的等高线图

由该实验可以看出, 经小波变换后, 原数据得到了压缩简化, 由于数据量只有原来的一半, 并且压缩简化图形(图 2)基本保留了原数据的轮廓特征, 因此, 效果还是比较好的, 但是, 还存在如下一些问题:

- (1) 压缩图形在边界处却出现了变形;
- (2) 由于压缩是有损压缩, 致使原数据的部分特征点在变换后产生了位移。

下面对这些问题进行具体分析和处理。

### 3.2 边界处理

在上述实验中, 压缩图形在边界处出现了变形, 这是由于数据自身在边界附近的相关性造成的。由于实际应用中数据是有限的(但是在压缩简化模型中, 都是假定数据是双向无限的), 且在边界附近的相关性较弱(数据边界的相关性越弱, 边界附近的失真越大), 其变换后的点还不能完全反映原数据点的特性和规律性, 因此, 有必要对其进行边界处理。小波变换的边界处理方法有许多<sup>[3]</sup>, 但这些处理通常针对的都是变换后数据的精确重建。为使压缩后边界数据能逼真地反映原数据的特性, 根据小波变换的特征, 本文提出如下处理方法:

首先在端点处对变换前的数据进行加密处理, 以加强边界处的相关性, 但数据加密的密度要根据小波基支集长度来决定。下面以本文应用的 Daubechies 四系数正交小波为例来说明对原数据进行边界处理的具体方法。

由分解公式(1)得

$$c_k^{(j)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_n h_{n-2^j k} c_n^{(j-1)}$$

其中  $h_i = 0$ , 当  $i < 0$  或  $i > 3$  时, 则

$$c_0^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{2}} (h_0 c_0^{(0)} + h_1 c_1^{(0)} + h_2 c_2^{(0)} + h_3 c_3^{(0)})$$

由上式知, 尽管  $c_0^{(1)}$  反映出了原数据集前 4 个点的特性, 但原端点  $c_0^{(0)}$  的信息却丢失了, 其结果就是造成变换后的曲线变短, 而如果是封闭曲线就会断开。为此, 本文提出如下处理方法: 在端点处采用四重节点的方法, 即将原数据处理为  $c_0^{(0)}, c_0^{(0)}, c_0^{(0)}, c_0^{(0)}, c_1^{(0)}, c_2^{(0)}, \dots$ , 于是, 变换后的数据为

$$\begin{aligned} c_0^{(1)} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (h_0 c_0^{(0)} + h_1 c_0^{(0)} + h_2 c_0^{(0)} + h_3 c_0^{(0)}) \\ &= c_0^{(0)} (\sum h_i = \sqrt{2}) \end{aligned}$$

$$c_1^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{2}} (h_0 c_0^{(0)} + h_1 c_0^{(0)} + h_2 c_1^{(0)} + h_3 c_2^{(0)}),$$

$$c_2^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{2}} (h_0 c_1^{(0)} + h_1 c_2^{(0)} + h_2 c_3^{(0)} + h_3 c_4^{(0)})$$

由此可见, 预处理后的数据经过变换后, 不但保留了原端点的信息, 并且加强了变换后端点附近的相关性。另一端点处理方法与此类似。

图 3 为经过了边界处理的小波变换压缩后的等高线图, 其有 333 个数据点, 由该图可见, 它们能够保留原数据的总体轮廓特征。

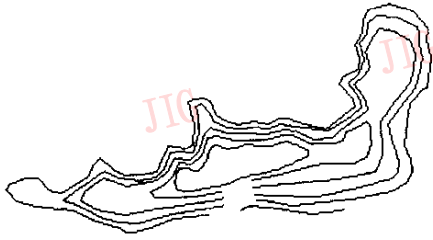


图3 经边界预处理的小波变换压缩后的等高线图  
(有333个数据点)

### 3.3 特征点追踪

#### 3.3.1 特征点提取

小波理论和实验结果表明,小波变换压缩后的简化数据  $c_n^{(j)}$  是  $c_n^{(0)}$  的低频部分,变换后虽去掉了原数据的高频信息,但在实际应用中要有选择地要保留一些信息,通常是要保留高频信息中  $|d_n^{(j)}|$  较大的部分,因为  $|d_n^{(j)}|$  较大的部分对应着原矢量地图数据中奇异性较大的点,这些点往往是矢量地图数据的特征所在,并且在压缩过程中,要求这些点不产生移位,所以,为了满足以上需求,在压缩之前,需要预先提取原数据中的特征点。提取特征点的方法有许多种,其中文献[5]是利用小波变换中的反演方法,将高频部分较大的值“补回来”,从而有效地保留了原数据集的特征点,但尚达不到压缩的目的。本文提出下列两种算法来提取特征点(这两种方法也可交替使用,效果更好):

(1)任意一点  $P$ ,根据左右两点计算其左右导数  $f'(P-0), f'(P+0)$ ,如  $f'(P-0) \cdot f'(P+0) \leq 0$ ,则  $P$  可能就是需要的特征点,然后再通过计算出它与前一特征点的距离来确定其是否是保留;

(2)对任意相间的3点,计算它们连线的夹角  $\theta$ ,如  $\theta > \varepsilon$  ( $\varepsilon$  为预先给定的阈值),则保留中间点为特征点。

#### 3.3.2 特征点追踪

小波变换后,需要恢复以上提取的特征点。因为变换后,数据点就由原来的  $N$  个变为  $N/2$  个,所以根据此性质就可以追踪到每个特征点的正确位置,然后将特征点插入到变换后的数据之中,即可使这些特征点参加下一轮的小波变换。压缩后的数据为  $N/2+m$  ( $m$  为特征点个数)个。这样继续下去,就会得到具有如下优点的数据:特征点附近的点(相对于其他点)越来越密集,而远离特征点的地方,数据点(相对于其他点)越来越稀疏。这样就有效地保留了原矢量地图数据的特征,也使压缩简化后矢量地图

数据不仅在数量上得到简化(为  $N/2+m$  个数据,  $N$  为原数据个数,  $m$  为特征点个数),而且能够保持好的形状特征(特征点能够保持)。

#### 3.4 基于小波变换的矢量地图压缩模型

综合以上各过程,就可以得到基于小波变换的矢量地图数据压缩模型算法:

(1)通过对矢量地图数据  $D_{00}$  进行特征点提取来得到特征点数据  $D_{01}$ ;

(2)通过对矢量地图数据  $D_{00}$  进行边界预处理来得到数据  $D_{02}$ ;

(3)通过对矢量地图数据  $D_{02}$  进行小波变换来得到压缩数据  $D_{03}$ ;

(4)将特征点数据  $D_{01}$  插入到  $D_{03}$  中,即得到第1次压缩数据  $D_{11}$ ;

(5)对  $D_{11}$  重复上述步骤,即可得到第2次压缩数据  $D_{22}$ ,第3次压缩数据  $D_{33}, \dots$ 。

## 4 实例分析

为了解上述边界预处理和特征点追踪算法的效果,对一幅矢量地图进行了试验。图4为原矢量地图,有10405个数据点;图5为一次小波变换压缩后的等高线图,有5702个数据点,压缩比为54.8%;图6为二次小波变换压缩后的等高线图,有3790个数据点,压缩比为36.42%;

通过上面的讨论和实验可见,基于小波分析的矢量地图数据压缩有如下特点:

- (1)压缩效果明显;
- (2)能够较好地保留地貌的形状结构特征,且能保证特征点不产生位移;
- (3)变换后的数据既保留了原数据的变化趋势,且较好地反映了原数据的内在特性和规律性。

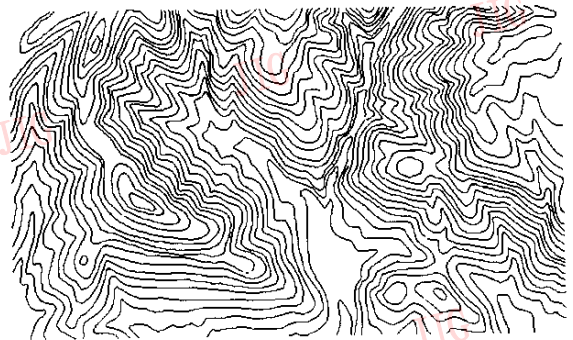


图4 实际等高线图

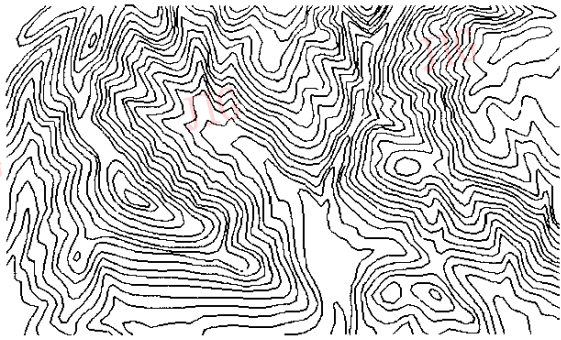


图 5 一次小波变换压缩后的等高线图

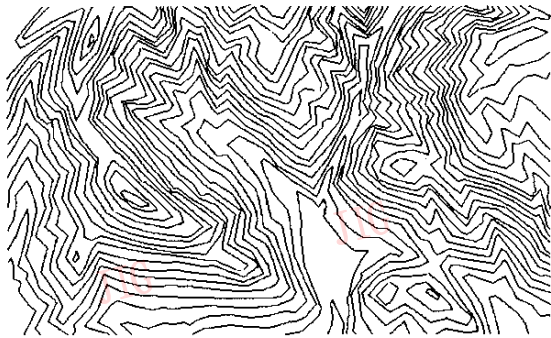


图 6 二次小波变换压缩后的等高线图

## 5 结 论

本文基于小波分析理论,研究了基于小波多尺度分析的等高线数据压缩模型和算法。同时根据矢量地图数据特点,研究了小波变换的边界预处理,特征点提取和追踪,并进行实验分析,结果表明,所述模型和方法具有好的压缩效果,不仅使变换后的等高线数据能够在数量上得到简化,而且能够保持原等高线好的形状特征,完全可以满足电子地图显示时无级缩放的要求和地图数据库建设中对数据优化和压缩的要求。

本文所述方法,可用于 DEM、DTM、地貌分析、曲线曲面数据压缩及制图综合等更广泛的研究领域。

## 参 考 文 献

- 1 王家耀,武芳. 数字地图自动综合原理与方法[M]. 北京:解放军出版社,1998.
- 2 Muller J C. GIS and Generalization: Methodology and Practice [M]. London: Taylor & France Press,1996.
- 3 朱长青. 小波分析理论与影像分析[M]. 北京:测绘出版社,1998.
- 4 万刚,朱长青. 多进制小波及在 DEM 无损压缩中的应用[J]. 测绘学报,1999,28(1): 36~40.
- 5 吴纪桃,王桥. GIS 中自动制图综合的小波方法研究[J]. 测绘学报,2000,29(1):71~75.



朱长青 1962 年生,1997 年获解放军测绘学院地图制图专业博士学位,现为解放军信息工程大学测绘学院地图学与地理信息工程系教授。主要从事 GIS、遥感、小波分析等研究。发表论文 80 余篇。

E-mail: zcq88@263.net



王玉海 1971 年生,2000 年获解放军测绘学院地图制图专业硕士学位,现为解放军信息工程大学理学院数理系讲师。主要从事空间数据处理、小波分析等研究。发表论文 10 余篇。



李清泉 1965 年生,1998 年获原武汉测绘科技大学摄影测量与遥感专业博士学位,现为武汉大学教授、博士生导师。主要从事 GIS、激光测量技术、三维空间数据表达等研究。发表论文 50 余篇。



柳林涛 1967 年生,1999 年获中科院测量与地球物理研究所博士学位,现为中科院测量与地球物理研究所研究员,博士生导师。主要从事大地测量、小波分析理论与应用等研究。发表论文 30 余篇。