

复杂结构构造区遥感图像的地质信息提取方法

——基于小波变换的多层次图像分割

陆关祥, 周鼎武, 王居里, 郝建荣

(西北大学地质系, 陕西西安 710069)

摘要: 针对基岩裸露的造山带变形强烈、地层组合复杂、解译难度大的特点, 提出了一种有效结合纹理信息和颜色信息的小波帧包变换的多层次图像分割方法, 克服了以往图像处理方法将低层特征孤立起来的缺陷, 在南天山东段铜花山—硫磺山地区地表地质结构的遥感影像解译中获得了令人满意的效果, 为强烈变形的复杂结构构造区从遥感图像上提取地质信息提供了有效的途径。

关键词: 小波帧包; 地质信息; 图像分割。

中图分类号: P627 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2002)01-0050-05

作者简介: 陆关祥(1963—), 男, 在职博士生, 主要从事遥感地质与构造地质的教学与科研工作。E-mail: luguanxiang@263.net

大陆造山带由于其漫长的地质演化历史、复杂多样的地壳物质组成和结构构造面貌, 成为大陆地质和大陆动力学解剖研究的关键地区, 其结构构造的复杂性也成为客观进行地质研究的难点。目前, 尽管遥感图像的地质信息提取已成为重要的地质结构构造研究的辅助手段, 并取得了良好的效果, 但如何把纹理信息与颜色信息、宏观信息与局部信息有机地结合起来进行综合研究还有待深入探讨。本文提出了一种基于小波变换的多层次图像分割方法。该方法首先通过正交 K-L 变换将彩色 RGB 空间变换为 K-L 空间^[1,2], 然后在 K-L 空间将图像进行多分辨率小波帧包分解, 并从分解后的子带图像上提取相应的纹理/颜色特征。根据纹理/颜色综合特征参数用等混合距离法进行图像分割。由于小波帧包分解以自适应方式对纹理图像进行由粗分辨率到细分辨率的分解, 这样造山带内部不同单元、不同尺度组成的结构构造现象即可在不同分辨率下进行有效地分析对比和分割研究, 从而使宏观信息与局部信息有机地结合起来以提取客观的多种地质信息。

1 小波帧包分析及 K-L 变换

1.1 小波帧包分析

在多分辨分析中, $L^2(R) = \bigoplus U_i (i \in Z)$, 表明多分辨分析是按照不同的尺度因子 i 把 Hilbert 空间 $L^2(R)$ 分解为所有子空间 $U_i (i \in Z)$ 的正交和, 其中, U_i 为小波函数的闭包(小波子空间)^[3]。虽然多分辨率分析的思想为理解和处理信息提供了简单的多层框架。然而, 它的一个重要缺陷是 2:1 取样(跳跃式取样), 这种取样方式对于正交或双正交小波函数来说重构时虽然不会丢失信息, 但由于其尺度是按二进制变化的, 所以在高频频段其频率分辨率较差, 而在低频频段其时间分辨率较差, 即随着尺度 i 的增大, 相应正交小波基函数的空间分辨率愈高, 则其频率分辨率愈低。同时, 这种取样方式对于一般二进制小波变换重构时有信息损失, 并且不具有平移不变性。这种缺陷对于纹理来说是不希望有的, 因为纹理具有平移不变性, 它需要在变宽的频谱窗口下进一步分割。为有效分析纹理, 考虑将小波变换不进行 2:1 抽样(即连续采样), 进一步对小波子空间 U_i 按照二进制分式进行频率的细分, 以达到提高频率分辨率的目的。一种自然的做法是将尺度子空间 V_i 和小波子空间 U_i 用一个新的子空间 ω_i^n 统一起来表

征,若令

$$\omega_i^0 = V_i, \omega_i^1 = U_i, i \in Z, \quad (1)$$

则 Hilbert 空间的正交分解 $V_{i+1} = V_i + U_i$ 即可用 ω_i^n 的分解统一为

$$\omega_{i+1}^1 = \omega_i^0 \oplus \omega_i^1, i \in Z. \quad (2)$$

定义子空间 ω_i^n 是函数 $\omega_n(t)$ 的闭包空间,而 $\omega_i^{2^n}$ 是函数 $\omega_{2^n}(t)$ 的闭包空间,于是得到以下小波帧包分解基函数 $\{\omega_n^i\}$ (其中 $i=0 \sim \infty, n=0 \sim 2^{i+1} - 1$) 为

$$\omega_{2^n}^{i+1}(l) = \sqrt{2} \sum_k h(k) \omega_n^i(l - 2^i k),$$

$$\omega_{2^{n+1}}^{i+1}(l) = \sqrt{2} \sum_k g(k) \omega_n^i(l - 2^i k).$$

其中: $h(k)$ 为低通滤波器系数; $g(k)$ 为满足完全重构条件的高通滤波器系数; $\omega_0^0(l)$ 为尺度函数; $\omega_0^1(l)$ 为母小波; i 为尺度因子; n 为振荡系数. 因此 $\{\omega_i^n\}$ 实际反映的是分析信号在时间位置 $2^i k$ 附近, 小波尺度 2^{-i} 下的振荡情况. 对于地学图像纹理结构来说, 是纹理信息在某一方位, 时间位置 $2^i k$ 附近, 小波尺度 2^{-i} 下的变化幅度. 小波帧包的空间分解过程实际上是对 (2) 式作迭代分解. 令 $\{\omega_n(t)\}_{n \in Z}$ 是关于 h_k 的小波帧包族, 令 $n=1, 2, \dots, i=1, 2, \dots$, 则有

$$U_i = \omega_i^1 = \omega_{i-1}^2 \oplus \omega_{i-1}^3,$$

$$\omega_{i-1}^2 = \omega_{i-2}^4 \oplus \omega_{i-2}^5,$$

$$\omega_{i-1}^3 = \omega_{i-2}^6 \oplus \omega_{i-2}^7.$$

同理, 小波子空间 U_i 的各种分解如下:

$$U_i = \omega_{i-1}^2 \oplus \omega_{i-1}^3,$$

$$U_i = \omega_{i-2}^4 \oplus \omega_{i-2}^5 \oplus \omega_{i-2}^6 \oplus \omega_{i-2}^7,$$

⋮

$$U_i = \omega_{i-k}^{2^k} \oplus \omega_{i-k}^{2^{k+1}} \oplus \dots \oplus \omega_{i-k}^{2^{k+1}} \oplus \omega_{i-k}^{2^{k-1}},$$

$$U_i = \omega_0^{2^i} \oplus \omega_0^{2^{i+1}} \oplus \dots \oplus \omega_0^{2^{i+1}-1}.$$

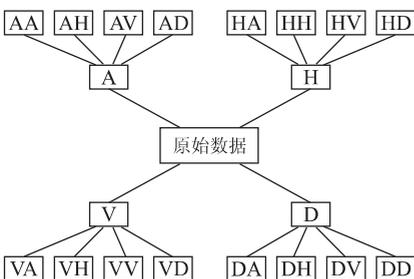


图 1 小波帧包分解示意

Fig. 1 Tree structure of wavelet packet analysis

A. 小波分解的低频部分(粗糙像); H、V、D. 分别表示水平方向、垂直方向、对角线方向的高频部分(细节)

图 1 为小波帧包二维图像示意图. 从图上可看出, 小波帧包分析能够为信号提供一种更加精细的分析方法, 对多分辨分析没有细分的高频部分进一步分解, 从而提高了时-频分辨率.

1.2 K-L 变换

对多数彩色图像而言, 所有颜色信息都表达为三维 RGB 空间上的向量. 为提取有用的颜色特征, 往往需要将 RGB 空间变换成其他颜色空间. 虽然 HIS 变换非常适于目视特性观察, 但这类变换易产生一些难以去除的奇异值, 因而不适于进一步的变换及特征提取. 为克服 HIS 变换的上述缺点, 在本方法中, 采用了 TM3、4、5、7 四个波段的 K-L 变换

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Tm_3 \\ Tm_4 \\ Tm_5 \\ Tm_7 \end{bmatrix},$$

其中 $\begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \end{bmatrix}$ 为 Tm_3, Tm_4, Tm_5, Tm_7 的协方差矩阵所产生的特征向量矩阵.

以上 K-L 变换将图像空间变换为正交空间, 因此产生的 3 个分量在统计特性上是不相关的, 分量 k_1 代表信号的亮度或强度, 而 k_2 和 k_3 分别与色度有关.

2 小波帧包分析的等混合距离分类

2.1 特征提取

首先将 TM3、4、5、7 四个波段进行 K-L 变换, 然后在 K-L 空间上进行每个分量的小波帧包分解^[4-6], 分别分解为 4 个子带信道或 16 个子带信道(根据需要而定). 对图像进行树型小波帧包分解后, 进行特征提取. 为充分利用纹理与颜色信息, 在每个子带信道上分别提取纹理信息、颜色信息、纹理与颜色的相关信息. 具体地说, 每一次小波帧包分解后, 令某一分辨率下某个子带的系数为

$$\{d_{m,n}^{k_i}\} (i=1 \sim 3, m \in [1, m], n \in [1, n]),$$

则对每一个子带信道, 提取以下特征:

$$C_{k_i, k_j} = | [d_{m,n}^{k_i} - \text{mean}(d_{m,n}^{k_i})] \cdot$$

$$[d_{m,n}^{k_j} - \text{mean}(d_{m,n}^{k_j})] |,$$

当 $i=j$ 时, C_{k_i, k_j} 对应于 k_i (纹理), k_2, k_3 (颜色) 的方差, 而当 $i \neq j$ 时, C_{k_i, k_j} 对应于纹理与颜色的相关性.

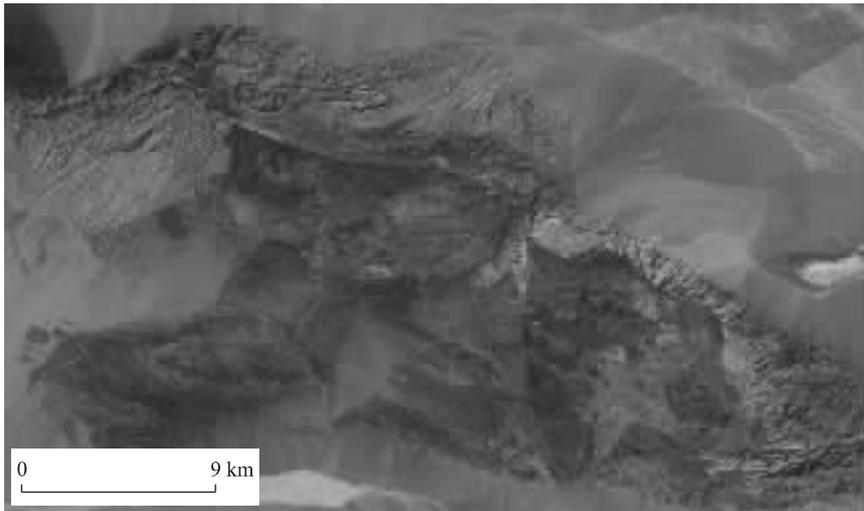


图 2 原始遥感图像(TM4)

Fig. 2 Original image of remote sensing (TM4)

于是在每个子带信道上提取出 6 个特征值 $C_{k_1 k_1}$, $C_{k_1 k_2}$, $C_{k_1 k_3}$, $C_{k_2 k_2}$, $C_{k_2 k_3}$, $C_{k_3 k_3}$.

2.2 等混合距离分类

经小波帧包分解后所提取的 6 个特征值代表某一子带信道的纹理,颜色综合参数.根据这 6 个特征参数的混合距离大小自动分类意味着在颜色分类的基础上考虑了纹理特征.等混合距离分类的原理如下:

$$d(x, y) = \sum |x_i - y_i|,$$

其中: x_i 为第 i 特征参数的某像元值; y_i 为分组中心第 i 特征参数的特征值; d 为该像元到分组中心 y 的混合距离.根据该像元到各分组中心的混合距离远近,将该像元分到距离最近的一类中去^[1,2].经等混合距离分类后,在每一个子带信道上都分别得到一张地质体分类图,因而在各个分辨率的每个节点上都有一张相应宏观性分类和 3 张细节分类.虽然每个节点的分类图都是以 $C_{k_i} C_{k_j}$ 6 个特征参数的等混合距离作为判别准则,但由于每个节点所代表的纹理特征不一,分类结果会有较大差别.图 1 所示, AA, HH, VV, DD4 个子带信道的纹理信息较强,颜色的信息相对较弱.在地质构造复杂的地区,两种不同物质的构造单元会因相同的纹理特征而归并一类.这些子带信道虽然不利于物质成分的精细划分,但对于构造线的确认,构造层次的划分却极为有利. AH, AV, AD 等子带信道具有纹理的双向滤波特征,因此,纹理与颜色的相关性信息相对突出,有利于物质成分的精细划分.由于这些子带信道突出信

息的方向不一,分类时有一定差别,解译时需要综合对比与分析,尤其要结合实际地质资料及研究任务确定节点及子带信道,如 AA 信道可用于区域构造单元、断块、大中型岩体的划分. DA, DH, DV 等相应于相互叠置的地层、岩脉、小型岩体、小型构造带的划分,效果较好.

3 分类结果与野外验证

上述方法在环境恶劣、基岩裸露的南天山东段铜花山—硫磺山地区进行了尝试应用和实践验证,取得了良好结果.图 2 为原始遥感图像,图 3 为 AA 节点处宏观分类图,图 4 为 DA 节点处细节分类图,图 5 为经野外调查后的综合解译图.从分类结果看,图 2 反映了区域构造总体格架和主要地层单元分

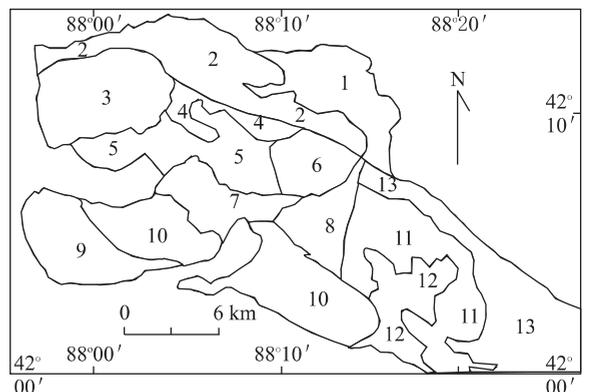


图 3 AA 点宏观分类

Fig. 3 Rude classification of AA point

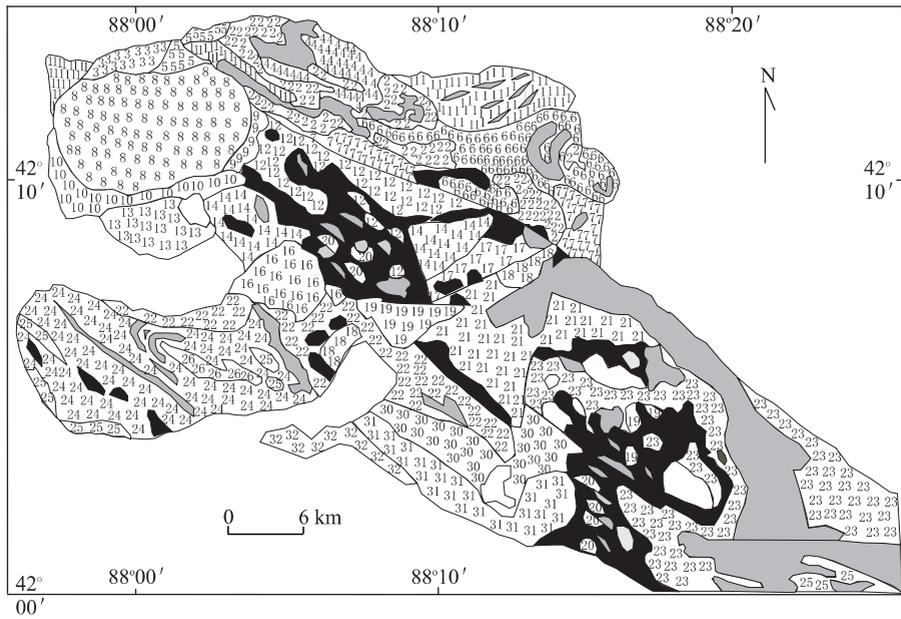


图 4 DA 点细节分类

Fig. 4 Classification of DA point in details

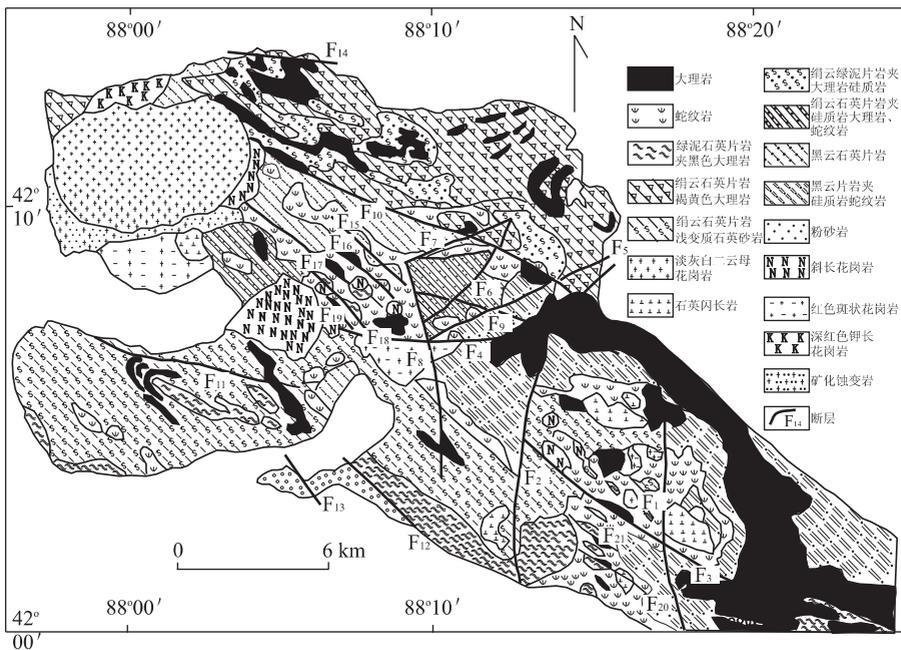


图 5 铜花山—硫磺山地区遥感影像综合解译

Fig. 5 Interpreter image of Tonghuashan-Liuhuangshan area

布及其岩石组合构造岩片关系;图 3 反映了组成主要岩石组合构造岩片的物质组成的细划分,因而各地层之间的叠置关系和叠加变形也显得更为清晰。经野外实地调查,研究区地层、岩体分布与图 3 分类结果高度一致,地层之间(特别是超基性岩与其他地层之间)都以褶皱、断层复杂作用相互叠置,呈叠瓦状岩片出露。

研究区虽经 1:5 万填图,但由于自然环境恶劣,地层组合复杂,地层、岩性的分类简单,对地表地质结构构造客观表示明显不足。上述方法的精确分类,对原地质资料进行了客观弥补和完善,为分析该地区地表地质结构构造特征提供了野外工作难以达到的客观资料,同时也为我国西部自然条件恶劣、交通不便、地层裸露的地区从遥感图像上提取地质信

息提供了有效的途径。

4 结论

应用遥感信息对大陆造山带复杂地表结构构造区的客观地质资料提取有待深入探索。本文提出了一种新的基于小波帧包分析的遥感图像自动分割方法。通过将彩色图像变换到 K-L 空间、对纹理和颜色信道分别进行树型小波帧包分解,并在分解的子带信道上分别提取相应的纹理特征、颜色特征及纹理与颜色的相关特征,提取出的特征比单纯的纹理特征或颜色特征更具代表性。同时,在这些特征的基础上,进行等混合距离分类。这一方法在南天山东段铜花山—硫磺山地区的地质体分类中得到了充分肯定,使研究区的地表组成、结构构造在宏观上和局部细节上均能得到客观的确定。由于这一方法综合考虑纹理、颜色信息,对于气候干旱,地层裸露、构造变形产生的纹理信息在图像上反映充分的地区效果较好,对于植被覆盖较好,雨量充沛的地区效果不甚理想。因而这一方法对我国西部地区造山带结构构造的研究,从遥感图像上提取多层次信息具有野外工作难以达到的效果。

参考文献:

- [1] 杨凯,卢健,林开愚. 遥感图像处理原理和方法[M]. 北京:测绘出版社,1988.
Yang K, Lu J, Lin K Y. The principle and methods of remote sensing image processing [M]. Beijing: Survey and Mapping Press, 1988.
- [2] 朱亮璞. 遥感地质学[M]. 北京:地质出版社,1994.
Zhu L P. Remote sensing geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [3] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 程正兴,译. 西安:西安交通大学出版社,1995.
Cui J T. Introduction of wavelet analysis [M]. Translation by Cheng Z X. Xi'an, Xi'an Transportation University Press, 1995.
- [4] Smith J R, Chang S F. Transform features for texture classification and discrimination in large image database [J]. ICIP, 1994, 3: 307-411.
- [5] Unser M. Texture classification and segmentation using wavelet frame [J]. IEEE Trans Image Processing, 1995, 4(11): 1549-1560.
- [6] Liu J F, MIEE J C. An efficient and effective texture classification approach: using a new notion in wavelet theory [J]. ICPR, 1996, 2: 820-824.

Geological Information Extracting from Remote Sensing Image in Complex Area: Based on Wavelet Analysis for Automatic Image Segmentation

Lu Guanxiang, Zhou Dingwu, Wang Juli, Hao Jianrong

(Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: It is very difficult to interpret remote sensing images in an orogenic belt with complex strata combination and strongly deformed structure. This paper proposes a novel wavelet frame packet analysis approach for multivariable image segmentation. The approach effectively combines both the texture and color information. It has produced good performance in the extraction of geological information in the deformable area in Tonghuashan-Liuhuangshan in the eastern part of Tianshan mountains.

Key words: wavelet packet; geological information; image segmentation.