

基于连续小波变换的 NOAA 影像尺度分析

陈建裕 郭德方

(浙江大学地球科学系, 杭州 310027)

摘要 小波变换具有数学显微镜特点和频域带通特性,可用于对遥感图像进行分析,为了探索更好的遥感图像尺度分析方法,提出利用二维连续小波变换(墨西哥帽小波)结合地物类型分布图来对 NOAA/AVHRR 影像的 4 波段数据进行尺度分析。结果表明,在小尺度下连续小波变换系数可显示不同地物类型、相对差异、位置及形状等信息,可用作细致分析;而在大尺度下该系数则主要表现了由水陆、地貌导致的地域差异,可用于概貌观察。另外,不同时相数据的大尺度分析对比,还体现了空间格局和变化趋势。通常小波变换系数确定的不同地物类型的尺度曲线反映了不同地物的影像信号强度和相互影响,而过零点位置的变化则反映了信号的突变。

关键词 连续小波变换 尺度分析 细微分析 宏观观察

中图法分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)07-0837-04

A Study on Multi-scale Analysis in NOAA/AVHRR Image Using 2D CWT

CHEN Jian-yu, GUO De-fang

(Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Wavelet analysis is chiefly due to the 'adaptive feature' and 'mathematical microtelescope feature'. The 2-D continuous wavelet transform (CWT) is a powerful new tool and has been applied to a number of problems such as astrophysics, aero-magnetic processing, seismic and gravity. It is also used in remote sensing image analysis. This paper focuses on multi-scale analysis at NOAA/AVHRR thermal data (Channels 4 when present). The approach is using an isotropic 2D Mexican hat wavelet (DOG $m=2$), and studied each component with multi-scale matched on multi-date data against the distribution map of land-cover classification, which is made up to each pixel on NOAA/AVHRR image with TM image supported, to reveal 2D signals in the temporal variation and spatial patterns. In a word, the result shows the information about type of land cover classification and relation, location, and shape in its small scale as micro-scale analysis and emphasize terraqueous variance by physiognomy, the strengths and features of its trend and structure in large scale as macro-scale observer. The variance of coefficient of different land cover types and the zero-crossing variance of coefficient with scale in 2D CWT discovers the power of signal and the correlation.

Keyword 2D continuous wavelet transform (CWT), multi-scale analysis, micro-scale analysis, macro-scale observe

1 引言

自法国科学家 Morlet 和 Meyer 首先引入小波分析,继而 Marr 提出了视觉理论和 Mallat 进一步发展了多分辨率分析以来,小波分析方兴未艾,如今已广泛应用于信号处理、时频分析、图像压缩和模式

识别等领域。

连续小波变换作为小波分析的一个应用方向,在于对信号细微变化的探测更灵敏。Christopher 和 Gilbert 完整地将一维连续小波变换用于 El Nino 的时间序列数据的时频分析^[1]; Thomas 利用二维连续小波变换处理航空磁力数据^[2]; Kirby 将小波变换用于研究地球重力和地形数据^[3]; Bergeron 也

利用连续小波变换研究地震数据分布特征^[4]。

小波变换在遥感领域的应用正处于深入发展阶段,目前主要是离散小波变换的应用。本文则利用二维连续小波变换对 NOAA/AVHRR4 波段影像数据作尺度分析。

2 小波变换

设 $T(x)$ 是平方可积函数(记作 $T(x) \in L^2(\mathbf{R})$), $\psi(x)$ 是基本小波或母小波函数,且满足容许条件 $C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} (|\psi(\omega)|^2/|\omega|)d\omega < \infty$, 则

$$C(x, s) = T(x) * \psi^* \left(\frac{x}{s} \right) \quad (1)$$

称为 $T(x)$ 的小波变换。式中: $C(x, s)$ 是 $T(x)$ 的小波变换式, $s > 0$ 是尺度因子;上标 * 代表共轭,由于式(1)不但是连续变量,而且 s 也是连续变化的,因此可称为连续小波变换。式(1)的等效频域表示为

$$\hat{C}(\omega, s) = \hat{T}(\omega) \hat{\psi}^*(s\omega) \quad (2)$$

其中, $\hat{T}(\omega)$, $\hat{\psi}^*(s\omega)$ 分别是 $T(x)$ 和 $\psi^*(x/s)$ 的傅里叶变换。

对于二维平面图像的灰度函数 $T(x, y)$, 其能量是有限的。若选择尺度为 s , 位移为 x_m, y_n , 则信号 $T(x, y)$ 可用二维母小波表示为

$$T(x, y) = \sum_i \sum_m \sum_n \left(\frac{a_i^{2D}}{s_i^2} \right) C(x_m, y_n, s_i) \psi \left(\frac{x - x_m}{s_i}, \frac{y - y_n}{s_i} \right) \quad (3)$$

其中,

$$\psi \left(\frac{x - x_m}{s}, \frac{y - y_n}{s} \right) = c_n^{2D} \left(\frac{1}{s} \right) \psi_0 \left(\frac{x - x_m}{s}, \frac{y - y_n}{s} \right) \quad (4)$$

c_n^{2D} 为归一化系数。式(4)的频域表示为

$$\hat{\psi}(s\omega_x, s\omega_y) = c_n^{2D} s \hat{\psi}_0(s\omega_x, s\omega_y) \quad (5)$$

从上述各式可知,小波变换不仅是信号与小波函数的内积(式(1)),也是对信号满足一定附加条件的滤波,这种附加条件反映在小波函数及小波因子选择上。由于小波变换提供了很好的局部化特性,因此它既可在时(空)域,也可在频域局部化定位观测。分析频率有高有低,但在各分析频段内分析的品质因数却保持一致。对于二维图像而言,由于这种反映不同尺度下图像特征变化的变焦作用,在图像分析中特别有用,因此利用小波变换所具有的这种数学显微镜特点和频域带通特性,就可以把所需的信息分离出来,以利于进行分析研究。

3 算法设计

小波分析中最重要的是如何选择最佳的母小波。根据本次研究的特点,并综合相关文献,在比较不同的母函数之后,本文选择的母函数是 Gaussian 函数的 m 阶导数,选择 m 为 2,也就是 Gaussian 函数的 Laplacian 运算,其特点是对 n 维的一般化是各向同性的,即广泛使用的 Marr 小波(墨西哥帽):

$$\psi_0(x, y) = \psi_0(r) = \frac{d^m}{dr^m} (e^{-r^2/2}), r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (6)$$

式(6)等效频域表示为

$$\hat{\psi}_0(\omega_x, \omega_y) = \hat{\psi}(\omega_r) = (i\omega_r)^m e^{-\omega_r^2/2}, \omega_r = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2} \quad (7)$$

归一化系数的表达式为

$$c_n^{2D} = \left(\frac{4\pi}{\Gamma(m+1)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

在实际应用中,尺度 s 值选择为

$$s_i = s_0 2^{i/p} \quad (9)$$

其中, $p = \frac{k-1}{\log_2[s_k-1] - \log_2[s_0]}$, $i = 0, \dots, k-1$

本文采用的是基于频率域的连续小波变换快速算法,步骤如下:

- (1) 原始数据及初始化;
- (2) 二维快速傅里叶变换(FFT)变换到频率域;
- (3) 频率域中的小波计算;
- (4) 二维 FFT 逆变换;
- (5) 数据的归一化处理。

在图像显示之前,再进行二维数据可视化和等值线化处理。

4 数据处理

本次研究区 NOAA/AVHRR 图像如图 1 所示,该区域位于东经 $118^\circ \sim 123^\circ$, 北纬 $27^\circ \sim 32^\circ$ 之间。主要包括整个浙江省及其邻近的上海、江苏、安徽、江西和福建省部分地区。水面部分包括长江口和杭州湾水域和沿海近海部分,陆地地貌单元以岛屿、平原、城市、山区和河流湖泊为主。

本次研究所用的 NOAA (national oceanic and atmospheric administration)-AVHRR (advanced very high resolution radiometer) 1996 年至 1999 年数据由美国地质调查局(USGS)提供,几何分辨率为 1km。热红外数据由 NOAA/AVHRR 波段 4 计

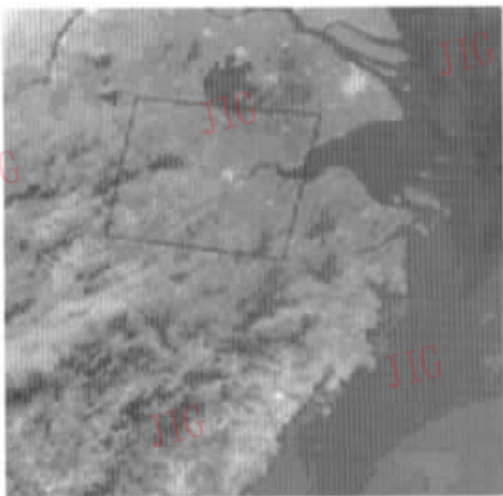


图1 浙江省全境 512×512 像元 NOAA/AVHRR4 波段数据 (1998 年 10 月 1 日, 黑框为 TM 杭州景的位置)

算得到。文中 $1:400$ 万浙江省地理数据是由国家基础地理信息中心 1994 年完成的 $1:400$ 万地形数据库简化得到, 由于地形数据成图较早, 个别地方和影像有区别, 如杭州湾南部。考虑到本文以 1998 年度的 NOAA 数据为主, 故 TM 选用 1998 年 12 月 17 日杭州景的数据, 以用于辅助 NOAA 影像地物类型的识别。

本文研究所用的数据取的是 NOAA/AVHRR 影像 4 通道热红外数据, 其 1B 格式数据经过定标、地理定位以及太阳高度角、临边变暗订正后, 再利用地面控制点进行图像几何精校正和区域性墨卡托投影, 并将多时相的 NOAA 影像在小范围区域内的配准精度控制在一个像元以内。在进行小波变换数据处理之前, 先对云和噪声进行去除; 然后在 TM 影像数据支持下进行地物解译分类, NOAA/AVHRR 影像 (TM 杭州景范围内) 的地物类型分布解译图如图版 I 图 1 所示, 该图中各地物类型的像元点数及所占比例见表 1。

表 1 地物类型表

地物类型	水体	平原	山地	丘陵	河床平原	水网平原	城市
像元点数	951	3902	4452	7621	4136	6386	586
百分比 (%)	3.39	13.92	15.88	27.18	14.75	22.78	2.09

5 结果与讨论

5.1 多尺度下 NOAA/AVHRR 4 波段影像数据的信息提取

由图版 I 图 2 可见, 在小尺度下 (如 s 小于 8 的

情况), 局部的高温点和局部的低温点显示明显; 随着尺度的变化, 在大尺度下 (如 s 为 16 和 32 的情况), 由于局部的细微差别变得不重要, 因而使得整个地域数据分布的空间格局体现出来, 而这一空间格局则提供了该地域的水陆区域、地貌和温度等要素的宏观信息。在浙江省区域范围内, 1998 年 10 月 1 日的热红外数据场分布反映出两条西南-东北走向的局部高温带和浙中南的局部低温带。

5.2 不同时间热红外数据的格局变化和趋势分析

由图版 I 图 3 可见, 在尺度 s 为 16 的情况下, 热红外数据的连续小波变换系数除了在近海部分反映海水水文差别外, 在陆地部分的分布均和人类活动建立的城市范围、地貌特征有关, 其由变换得到的正系数所构成的等值线的中心往往又是城市等人口聚集中心, 且正系数等值线的分布形状和经济区的走向一致, 而由负系数构成的等值线除了与太湖和千岛湖吻合外, 大多数等值线的分布形状和山脉的分布形状一致。

在相同尺度 (如 s 为 16 的情况), 1998 年度不同月份热红外数据的格局和变化趋势既相同, 也有差异。连续小波变换系数所反映的信息, 从大的范围看, 可以分为海陆温差较小的冬春 (如 1998 年 2、12 月) 及温差较大夏秋 (如 1998 年 8、10 月) 等两类, 而且夏秋两季陆内区域各地温差大。

5.3 不同地物类型尺度曲线的差异

不同地物类型在不同尺度下, 其连续小波变换系数不同。在特定区域内, 该系数随着尺度 s 变化, 每一类地物在正 (负) 系数下的比例值 (各地物类型在正系数下的像元点数占该地物所有像元点数的比例) 构成一条曲线, 可称为正 (负) 系数尺度曲线 (图 2); 每一类地物对应的归一化后系数的绝对值的平均值构成一条曲线, 可称为强度归一化尺度曲线 (图 3)。特定地物的尺度曲线是该区域内该类地物特征、分布状况及受周围影响程度的表征。不同地物类型的尺度曲线之所以存在差异, 是由于在连续小波变换中品质因数一致的情况下, 图像的局部化特性在小尺度下更为显著, 因而地物类型、分布状况占主导。不同的地物类型, 其在 NOAA/AVHRR 波段 4 上对应的数据不同, 如城市高, 水体低。和城市地物相比, 平原为低; 而和水体地物相比, 平原为高。这种相对高低, 在二维信号上表现为波峰和波谷。如图版 I 图 4(a) 所示, 受邻近城市地物类型的影响, 部分地物类型为平原的像元点, 其在连续小波变换下表

现为正系数(A),而远距离的同样地物则表现为负系数(B)。如图版 I 图 4(b)中不同尺度下过零点位置的变化,说明随着尺度的变大,小区域范围内的地

物类型之间的影响变小,也就是小波变换结果受更大的空间格局的影响。这种小波变化系数的过零点位置,反映了二维信号的突变。

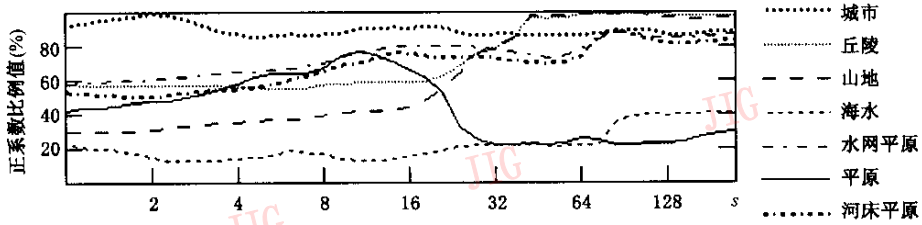


图 2 不同地物类型正系数尺度曲线(1998 年 10 月 1 日影像)

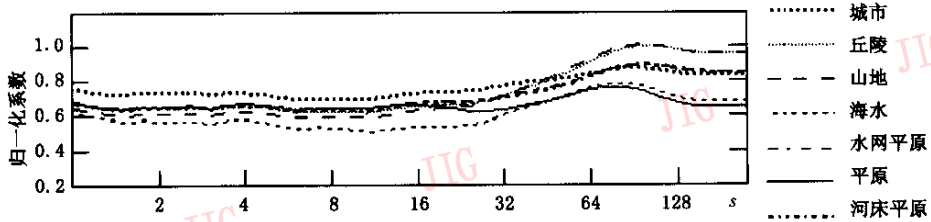


图 3 不同地物类型强度归一化尺度曲线(1998 年 10 月 1 日影像)

6 结 论

由于二维连续小波变换具有数学显微镜特点和频域带通特性,因此利用之可对遥感影像进行尺度分析,而且不同尺度的二维连续小波变换还可以把所需的信息从复杂的遥感影像中分离出来,其关键是要根据所要提取的信息,选好母函数和适当的尺度。对于 NOAA AVHRR 影像热红外数据而言,通过对比不同时相数据的不同尺度小波变换系数和过零点位置的变化以及不同地物类型尺度曲线的差异,即可在小尺度上体现不同地物类型的波谱信号差异,并可在大尺度上为地物波谱信号场的空间格局和变化趋势提供分析。

参 考 文 献

- 1 Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1):61~78.
- 2 Ridsdill-Smith T A, Dentith M C. The wavelet transform in aeromagnetic processing [J]. Geophysics, 1999, 64(4): 1003~1013.

- 3 Kirby J F. Gravity, topography and the continuous wavelet transform, oral presentation [A]. In: 2001 American Geophysical Union Spring Meeting [C], Boston, MA USA, 2001.
- 4 Bergeron S Y, Vincent A P, Yuen D A, et al. Viewing seismic velocity anomalies with 3-D continuous Gaussian wavelets [J]. Geophysics, 1999, 26(15): 2311~2314.



陈建裕 1973 年生,浙江慈溪人,1998 年获浙江大学环境化学硕士学位,现为浙江大学在读博士生。主要从事遥感、地理信息系统和环境科学的研究,发表论文数篇。
E-mail: chinechen@yahoo.com



郭德方 1941 年生,1965 年毕业于中国人民解放军哈尔滨军事工程学院电机系,现为浙江大学教授、博士生导师。主要从事遥感、地理信息系统、全球定位系统及其结合的研究。出版专著 2 部,发表论文数十篇。

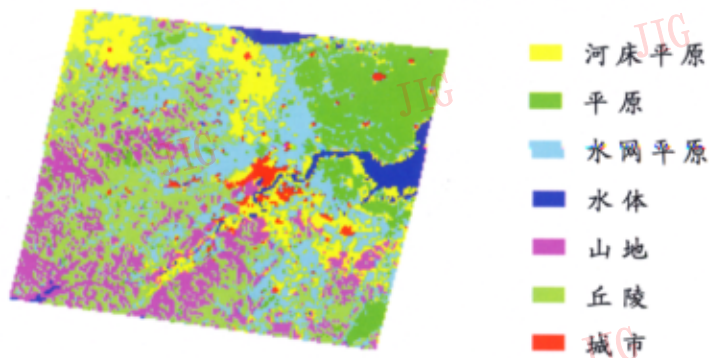


图1 NOAA/AVHRR影像的地物类型分布解译图(TM杭州景范围内)

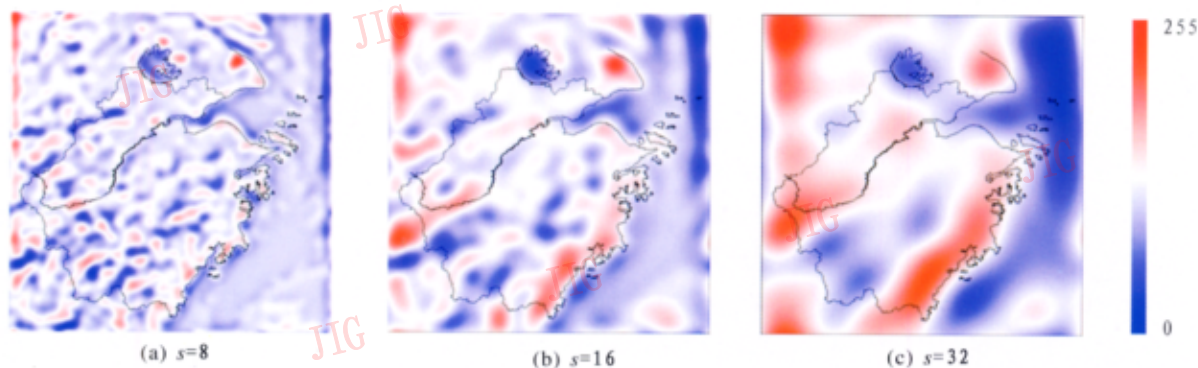


图2 不同尺度下的连续小波变换(已归一化处理,原图大小为 512×512 ,1998年10月1日)

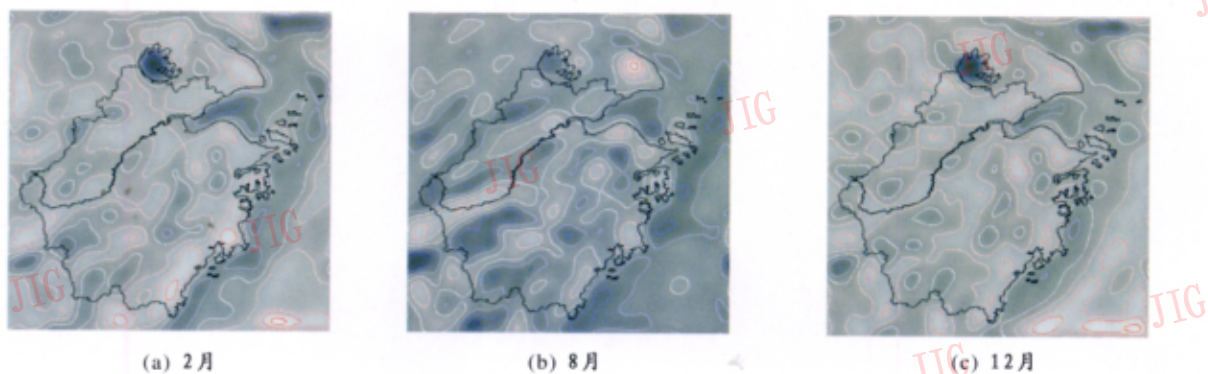
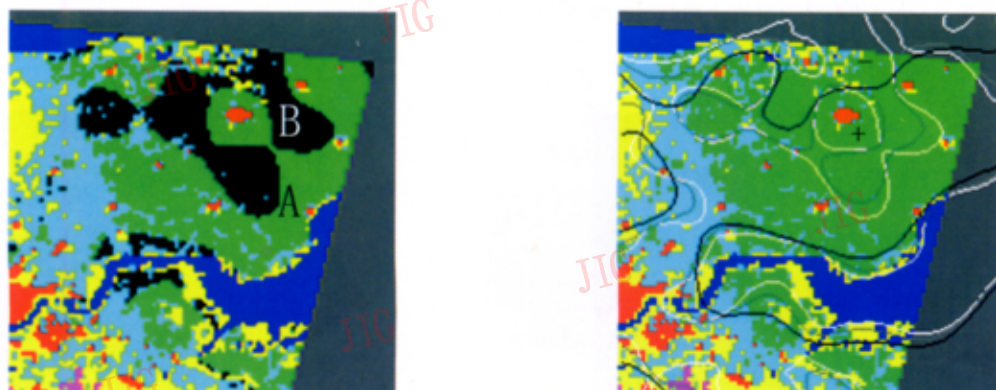


图3 1998年同一尺度下($s=16$)的不同月份连续小波变换(已归一化和等值线化处理,大小为 512×512)



(a) 连续小波变换($s=6$)后,与正负系数对应的平原地物类型(A为正系数、B黑色为负数) (b) 过零点位置的变化(白色线: $s=6$,灰色线: $s=8$,黑色线: $s=10$;正:+,负:-)

图4 尺度与地物类型的关系