用小波技术分析遥感图像确定岸线位置的研究

A STUDY OF MAPPING COAST BY PROCESSING REMOTE SENSING IMAGE WITH WAVELETS

杜　涛[1]　　张　斌[2]

([1] 青岛海洋大学物理海洋研究所 266003)
([2] 中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

小波，对于从事应用科学研究的人们而言，是一种新的强有力的分析技术、工具或方法；而在数学家们看来，它是一个新的数学分支，是泛函分析、傅利叶分析、样条分析、数值分析等的完美结合。小波包含的数学内容丰富，在众多学科中的应用前景广阔。然而，因为它正处在迅速发展和不断完善之中，所以目前还没有给出一种统一而又明确的描述[1]。不过，由于小波所具有的独特功能(如，可以将各种不同频率交织在一起的混合信号分解成不同频率的块信号等)，这并不妨碍它在一个又一个领域中显示新的用途。

将遥感技术应用于海洋问题的研究中，不仅可以收集海面水位、温度、波浪等各种动力要素，同时还可以帮助确定岸线、岛礁等的几何位置，后者对于国界的划定尤其重要。利用遥感图像确定岸线时，首先要从图像中提取关于目标的形状、大小等几何信息，然后将其绘制成图。早期的手工操作，不仅费时、精度低，而且存在个体差异，借助于某些辅助设备，可以在计算机上完成这一工作。本文将小波技术用于海洋遥感图像的分析，给出确定岸线位置的一种方法，利用它能够在计算机上快速、精确地确定岸线而不再需要其他辅助设备。

1　奇异点测定的小波原理

若一个函数(或信号)在某个位置有奇异性(点)，说明它在该处间断或者它的某阶导数不连续。对于这样的奇异点，数学上常用 Lipschitz 指数 α 来刻划。

定义 1　对任意的 $0\leqslant\alpha\leqslant1$，若存在常数 $A>0$，使得在 x_0 的邻域内有

$$\sup_{x\in\delta(x_0)}\frac{|f(x)-f(x_0)|}{|x-x_0|^{\alpha}}=A$$

则称 $f(x)$ 在点 x_0 处有 Lipschitz 指数 α。当 $\alpha=0$ 时，$f(x)$ 在 x_0 处间断；当 $\alpha=1$ 时，$f(x)$ 在 x_0 处可微；当 α 从 0 变到 1 时，$f(x)$ 代表的信号在 x_0 处的光滑程度越来越好。

对函数奇异性的研究，傅利叶变换一直是一个基本工具。若 $f(t)$ 是一个连续的时间信号，则其傅利叶变换为

$$F(\omega)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}f(t)e^{-i\omega t}dt$$

根据 $F(\omega)$ 趋于零的快慢可以推断信号 $f(x)$ 是否有奇异性及奇异程度的大小。显然，由于 $F(\omega)$ 的积分区间是无限的，所以傅利叶变换只能描述信号在无限空间上有否奇异的整体性质，无法确定奇异点在时间域或空间域上的具体分布。为了解决傅利叶变换在时间域或空间域上无任何局部性的缺点，在傅利叶分析中的基本变换函数之前乘上一个时间上的有限函数 $g(t)$ 起时限作用，而基本变换函数 $e^{-i\omega t}$ 则起频限作用，从而达到对时频共同限制的目的，这就是加窗傅利叶变换，其定义为

$$G(\omega,\tau)=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)g(t-\tau)e^{-i\omega t}dt$$

随着 τ 的变换，g 确定的"时窗"在时间轴上移动，使信号 $f(t)$ 逐步被分析，g 因此被称为窗函数，而 $G(\omega,\tau)$ 则近似反映了 τ 时刻信号 $f(x)$ 变化的激烈程度($f(t)$ 中频率为 ω 的成分含量)。鉴于信号的周期与频率间存在的反比关系，分析高频信号时需要窄的时间窗，分析低频信号时需要宽的时间窗，而加窗傅利叶变换的窗口大小和形状都固定不变，不能满足这一要求，因而也不能较理想地确定信号奇异点

收稿日期：1998-07-07；修回日期：1998-11-27

的位置。小波变换由于其窗口的形状可调，所以能满足上述要求，确定信号奇异点的位置。其定义为

$$Wf(a,b)=<f,\psi_{a,b}>=|a|^{-\frac{1}{2}}\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\,\overline{\psi(\frac{t-b}{a})}dt,\rightarrow$$

$$\leftarrow a\in R-\{0\},b\in R$$

小波变换的矩形时频窗为

$$[b+at^{*}-a\triangle\psi,b+at^{*}+a\triangle\psi]\times\rightarrow$$

$$\leftarrow[\frac{\omega^{*}}{a}-\frac{1}{a}\triangle\hat{\psi},\frac{\omega^{*}}{a}+\frac{1}{a}\triangle\hat{\psi}]$$

时频窗宽表示时窗，中心在 $b+at^{*}$，宽度为 $2a\triangle\psi$；时频窗的高表示频窗，中心在$\frac{\omega^{*}}{a}$高度为 $2\frac{\triangle\hat{\psi}}{a}$，（$t^{*}$，$\omega^{*}$，$\triangle\psi$，$\triangle\hat{\psi}$，分别是 ψ 及其傅利叶变换 $\hat{\psi}$的中心和半径）。显然，随着尺度参数 a 的变化，中心频率也要发生相应的变化。这时，小波变换能够在保证窗口面积不变的情况下，通过窗口形状（宽度、高度）的改变调整其在时频域上的分辨率，最终使其即能够在整体上提供信号的全部信息，又能提供任一局部时间内信号变化激烈程度的信息，这就是信号奇异点测定的小波基础。

2 遥感图像的小波分析

遥感图像的信息通过代表地物电磁波辐射水平的灰度值反映出来，这些灰度值通过仪器转换成数字供人们分析研究和应用。由于在遥感图像的成像过程中，受各种因素（例如，卫星速度变化，随机噪声等）的影响，其实际的图像灰度值并不完全反映地物辐射电磁波能量的大小，还包含了其他因素的作用。因此，在对遥感图像进行分析前，有必要进行校正处理，以消除上述因素的影响。为了突出图像中的有用信息，使感兴趣的特征得以加强，可以通过图像增强处理来达到目的。按照增强信息的内容，图像增强处理可以分为波谱特征增强，空间特征增强，以及时间特征增强。波谱特征增强，主要是突出灰度信息；空间特征增强主要是对图像中的线、边缘等结构特征进行增强处理；而时间信息增强主要是针对多时相图像而言的，目的是提取多时相图像中波谱与空间特征随时间变化的信息。在利用遥感图像划定介质的边界（如，海陆交界）时，需要对遥感图像中的线与边缘特征进行增强处理。

对于已校正好的遥感图像进行小波分析，实际上是对由图像的灰度值形成的数字信号进行分析。对含有海岸线的遥感图像进行初步分析可以发现，海区部分图像的灰度值与陆上部分图像的灰度值是不同的。当把海区和陆地部分的灰度值转化为数字信号进行分析处理时，在海陆交界处（即岸界处）数字信号具有明显的不连续性或者说具有奇异性，利用小波技术对这种数字信号进行分析处理，找到奇异点的位置，并把它们顺序连接起来，就可以把岸线确定下来。由于数字信号是离散的，所以进行小波处理时需要用到离散形式的小波变换。通常是对连续小波变换进行二进离散，得到二进小波变换

$$\{W_{2^j}f\}_{j\in z}=\{\frac{1}{2^j}\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\psi(\frac{x-t}{2^j})dt\}\quad j\in z$$

又由于数字信号是有限的，且实际应用中的二进离散也是在有限指标集 $j\in J$ 上进行，所以，实际计算的二进小波变换为$\{W_{2^j}f(x)\}_{j\in J,x\in X_n}$。根据小波理论，若 x_0 是信号的一个孤立奇异点，a_0 是对应的奇异度 Lipchdtz 指数（$0\leqslant a_0<1$），则有

$$|W_{2^j}f(x_0)|=0(2^{-ja})$$

$$|W_{2^j}f(x)|=0(2^{-j})\qquad x\neq x_0;x\in\delta x_0$$

当 $j\rightarrow\infty$时，$|W_{2^j}f(x_0)|$趋于零的速度小于$|W_{2^j}f(x)|$趋于零的速度。所以，当 $j\rightarrow\infty$时，$|W_{2^j}f(x)|$作为 x 的函数在 x_0 取极大值。据此，在对数字信号进行二进小波变换时，只要确定二进小波变换$|W_{2^j}f(x)|$的极大值点位置，也就确定了信号奇异点的位置。

3 应用

图 1 是从福建沿海的 SAR 图像上取出的一部分，这里假定图像已做了必要的校正处理。对图像的灰度值进行初步分析可以发现，海域的灰度值明显低于陆域的灰度值，从海域到陆域或从陆域到海域，灰度值在海陆交界处发生突变，即在海陆交界处灰度值信号有奇异性，通过对灰度值信号做二进小波变换，找出这些奇异点的位置，顺序连接就得到海陆交接线或岸线（如图 2 中的实线所示）。在海区内部，灰度值基本上是连续变化的，没有奇异性；在陆地上的灰度值，由于地形、地质等的不同，其电磁波辐射水平也各不相同，反映在图像灰度值的变化上，会出现许多不连续点或奇异点。在做二进小波变换时，这些点也同时被检测出来（见图 2）。在确定哪些点是海陆交界处岸线位置的奇异点时，只要沿着纵坐标从海域向陆地搜索，所遇到的第 1 个奇异点即为所寻求的海陆交界岸线点。

文中对 SAR 图像的灰度值做二进小波变换时，所用的小波是常用的 Marr 小波[2]，它是高斯函数的二阶导数。对连续小波做二进离散所用到的 j 指标集为 $J=[15,18]$。在确定奇异点的位置时，因灰度数

据的不连续性导致小波变换后给出的奇异点是两个相邻的点，这里选取这两个相邻点的中间位置作为边界点。变换后所确定的岸线(图 2 中的实线)与遥感图像中显示的海陆边界吻合的很好。

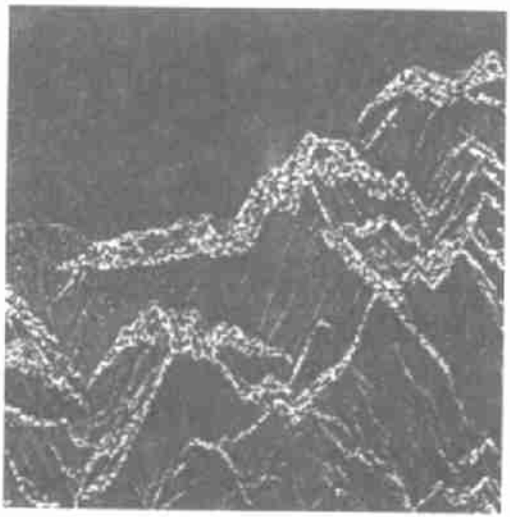

图 1　福建沿海某岸段的 SAR 遥感图像

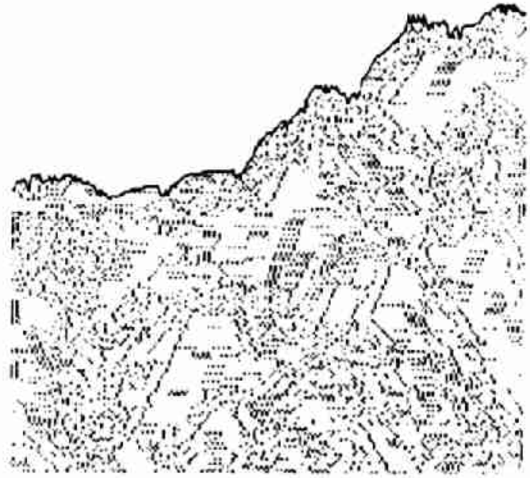

图 2　小波变换后的图像，实线为所确定的岸线

4　结论

由于小波分析在时频域上都具有很好的局部性(分辨率)，所以它对于信号的奇异点检测是一个很好的工具。将遥感图像转化为灰度信息进行分析时，图像中的海岸线、岛礁边界等反映在灰度信息中是灰度值的奇异点所在。利用小波分析技术处理由遥感图像得到的灰度信息，找出这些奇异点的位置即可确定岸线或岛礁等的边界。本文的工作给出了以这种方式确定岸界的一种数值方法，对一幅实际的 SAR 遥感图像的成功处理说明了该方法是可行的。鉴于遥感图像的获得越来越容易，遥感图像的精确度越来越高，再加上由奇异点的位置确定边界线时，取的是两相邻点的中间位置(这样确定的交界线之误差不大于半个像元)，所以，将小波技术用于分析遥感图中的灰度信息，通过灰度值的奇异点位置确定岸线或其他边界线的方法是一种精度较高，快捷方便的方法，它对于国界的精确划定具有一定的参考和实用价值。

主要参考文献

1　崔锦泰(美)著，程正兴译．小波分析导论．西安：西安交通大学出版社，1995．1～28