

·经验交流·

小波变换在瞬时相位分析中的应用

白地动*

范祯祥

(石油地球物理勘探局职工大学) (石油地球物理勘探局研究院方法研究中心)

摘要

白地动,范祯祥. 小波变换在瞬时相位分析中的应用. 石油地球物理勘探,2000,35(1):97~101

采用复地震道技术可以提取瞬时相位,瞬时相位参数对地震资料解释、油藏描述和获取岩性信息有重要意义。由于小波具有良好的时频局部特征,因此可以利用小波变换求取不同尺度下的瞬时相位参数。本文对地震波在小波变换下的相位特性进行了初步探索。试验表明,本方法可有效地确定断层和追踪地震层位信息。

主题词 小波变换 瞬时相位 复地震道 地震数据处理

ABSTRACT

Bai Didong, Fan Zhenxiang. Application of wavelet transform to instantaneous phase analysis. OGP, 2000, 35(1):97~101

Complex seismic trace technique may be used to obtain instantaneous phase; and the instantaneous phase parameter is of great importance to seismic data interpretation, reservoir description and lithologic information obtainment. The wavelet transform may be taken to have instantaneous phase parameters of different scales because wavelet has good partial time and frequency characters. Authors have made initial research on phase characteristic of seismic wave under wavelet transform. It is shown that the method can be used to locate faults and to trace seismic horizons.

Subject terms: wavelet transform, instantaneous phase, complex seismic trace, seismic data processing

引言

在地震数据处理中,目前常用的提取地震波特征参数的方法是复地震道技术。通过复地震道技术得到的瞬时相位可以帮助我们确定地下岩层的岩性、岩相变化和岩石孔隙中所含流体的性质,以便作储层和油藏研究。随着勘探程度的不断加深,要求物探工作者能为地质解释人员提供更多更好的地震资料,而近年来出现的小波变换技术为地震数据处理提供了一个新的实用工具。

* Bai Didong, College of Staff and Workers, Bureau of Oil Geophysical Prospecting, Zhuozhou City, Hebei Province, China, 072751

本文于1999年3月22日收到,修改稿于同年8月8日收到。

在实际地震记录中, 地震波是带限信号。波在传播过程中, 由于反射和地层的吸收, 其振幅、相位和频率是变化的, 而小波良好的时频局部化特征符合波传播的特点, 因此本文试图对小波在提取地震波瞬时相位信息方面作一些探索。结果表明: 无论是理论记录, 还是实际资料处理, 都达到了预期的目的。

小波变换的数学基础^{[1]~[3]}

把满足条件

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\hat{\psi}(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega < \infty \quad (1)$$

的平方可积函数 $\psi(t)$ (即 $\psi(t) \in L^2(R)$) 称为一个基本小波或小波母函数。令

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R; a \neq 0 \quad (2)$$

为由母函数生成的依赖于参数 a, b 的连续小波。设 $\psi(t) \in L^2(R)$, 即信号的能量有限, 则 $f(t)$ 的小波变换定义为

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (3)$$

其中: a 是尺度参数; b 为定位参数。改变 a 值, 对函数 $f(t)$ 具有伸展 ($a>1$) 或收缩 ($a<1$) 的作用。

小波变换不同于窗口 Fourier 变换, 其重要区别是: 窗口 Fourier 变换的窗口大小不变, 而小波变换既改变窗口大小与形状, 也改变小波 $\hat{\psi}_{a,b}(\omega)$ 的频率, 其实质是引入小波函数 $\psi_{a,b}(t)$ 时, 充分地利用了 Fourier 变换中的相似性质。即, 如果

$$f(t) \rightarrow \hat{f}(\omega)$$

则

$$f(at) \rightarrow \frac{1}{|a|} \hat{f}\left(\frac{\omega}{a}\right) \quad (4)$$

显然随着参数 a 的减小, $\psi_{a,b}(t)$ 的支集也随之变窄, 而 $\hat{\psi}_{a,b}(\omega)$ 的频谱则随之向高频端展宽, 反之亦然。这就实现了窗口大小自适应变化。当信号频率增高时, 时窗宽度变窄, 而频窗高度增大, 有利于检测快变信号, 提高时域分辨率, 反之亦然。

小波变换的重建公式为

$$f(t) = \frac{1}{c_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} a^{-2} W_f(a, b) \psi_{a,b}(t) da db \quad (5)$$

其中

$$c_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$$

为了使窗口 Fourier 变换和小波变换进行形象的对比, 图 1 画出了尺度(x)—波数(k)空间中两种变换的窗口特性及相应的分辨率。

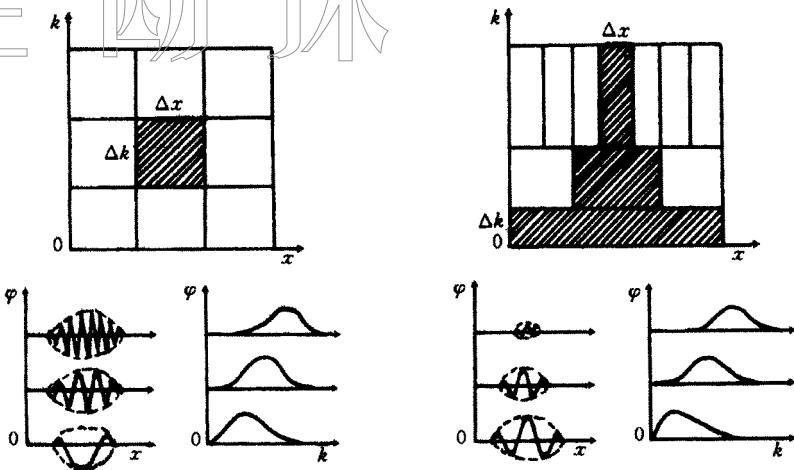


图 1 尺度(\$x\$)-波数(\$k\$)空间两种变换的窗口特征

实 际 应 用^[1]

在分析地球物理过程中, Morlet 小波是最常用的复值小波,由下式给出

$$\psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} \left[\exp(-i\omega_0 t) - \exp\left(-\frac{\omega_0^2}{2}\right) \right] \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \quad (6)$$

它的 Fourier 变换为

$$\hat{\psi}(\omega) = \pi^{-\frac{1}{4}} \left[\exp\left(-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2}\right) - \exp\left(-\frac{\omega_0^2}{2}\right) \exp\left(-\frac{\omega^2}{2}\right) \right] \quad (7)$$

当 \$\omega_0 \geqslant 5\$ 时, \$\exp\left(-\frac{\omega_0^2}{2}\right) = 0\$, \$\psi(t)\$ 的第二项可以忽略, 因此可近似表示为

$$\psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} \exp(-i\omega_0 t) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \quad \omega_0 \geqslant 5 \quad (8)$$

相应的 Fourier 变换为

$$\hat{\psi}(\omega) = \pi^{-\frac{1}{4}} \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2}\right) \quad (9)$$

图 2 表示 Morlet 小波 \$\psi_{1,0}(t)\$ 在单位尺度 (\$a=1, b=0\$) 下的实部与虚部; 图 3 为 \$\psi_{1,0}(t)\$ 的 Fourier 变换 \$\psi_{1,0}(\omega)\$. 由于 Morlet 小波是复值小波, 所以能取被分析信号的相位信息。设被分析信号为 \$f(t)\$, 定义它的小波变换

$$\begin{aligned} W_f(a, b) &= \langle f, \psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt \\ &= \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \\ &= \text{Re} \langle f, \psi_{a,b} \rangle + i \text{Im} \langle f, \psi_{a,b} \rangle \end{aligned} \quad (10)$$

令

$$\varphi(t) = \arctan \frac{\text{Im} \langle f, \psi_{a,b} \rangle}{\text{Re} \langle f, \psi_{a,b} \rangle} \quad (11)$$

式中 $\phi(t)$ 为 $f(t)$ 的瞬时相位。

为了验证小波变换的相位特性在地震数据处理中的实用性,本文设计了一个断层模型(图 4a),图 4b、4c 分别是该模型在 $a=2$, $a=3$ 时的瞬时相位图,从中可看出断点非常清晰。

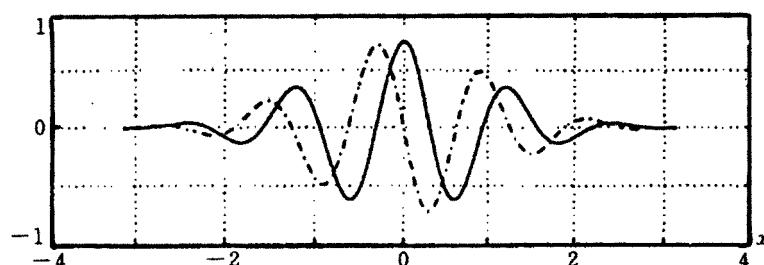


图 2 Morlet 小波($\omega_0=5$)的实部(实线)和虚部(虚线)

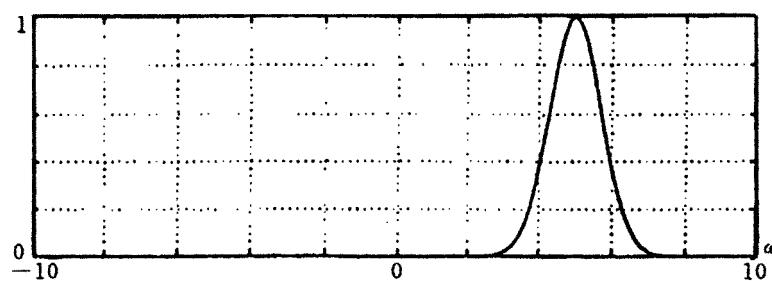


图 3 Morlet 小波的 Fourier 变换

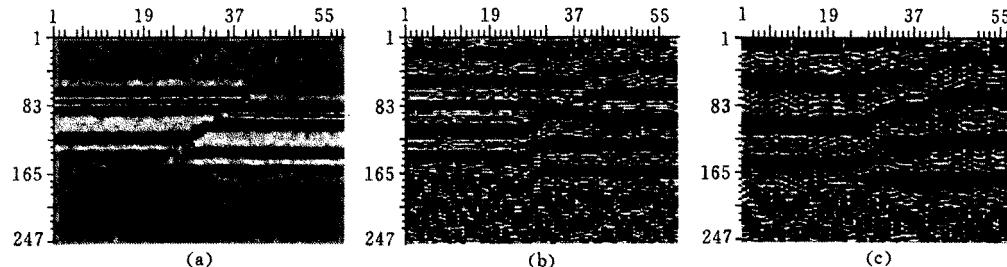


图 4 模型的瞬时相位图

(a)模型; (b) $a=2$; (c) $a=3$

图 5a 是华北油田某一实际地震剖面;图 5b、5c 是用本文方法处理的结果,其尺度因子分别是 $a=2$, $a=3$;图 5d 为 Hilbert 变换的瞬时相位图。通过对比可以看出,小波变换的瞬时相位图断点清晰干脆,完全可以用它准确地确定断点位置。

结 论

小波变换应用于地震数据处理是近几年的事情,还没有像 Fourier 变换那样被人们所熟悉,但由于小波变换克服了窗口 Fourier 变换的缺点,具有良好的时间域和频率域局部化特征,因此在信号处理中起到越来越重要的作用。

小波变换在地震数据处理中主要应用于去噪滤波、 Q 补偿、奇异性检测、数据压缩和插值

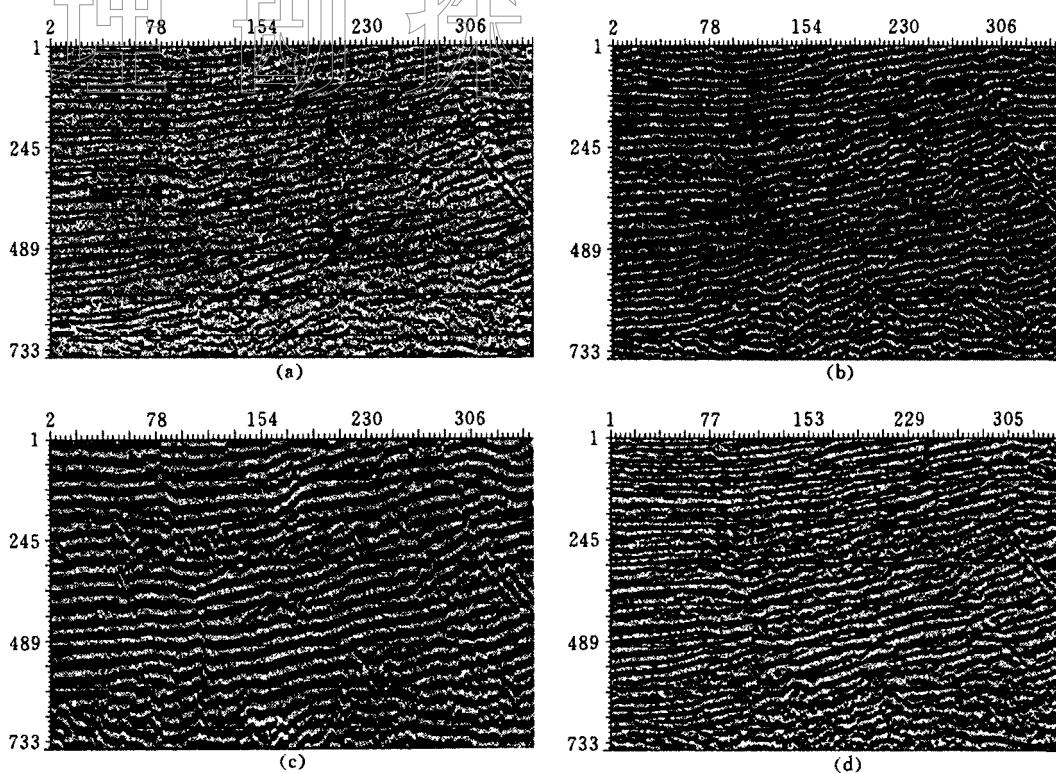


图5 华北油田某一实际地震剖面及其几种瞬时相位剖面

(a)某一实际地震剖面;(b) $\alpha=2$ 的瞬时相位剖面;
(c) $\alpha=3$ 的瞬时相位剖面;(d)Hilbert 变换瞬时相位剖面

以及提高分辨率等方面。在本文中,笔者仅对小波在提取地震波瞬时相位特征参数方面的应用进行了初步探索,获得了满意的效果。我们相信,随着对小波认识和研究的深入,其应用会日益广泛。

参 考 文 献

- 1 赵松年,熊小芸.子波变换与子波分析,电子工业出版社,1996
- 2 刘贵忠,邸双亮.小波分析及其应用,西安电子科技大学出版社,1992
- 3 李世雄,刘家琦.小波变换和反演数学基础,地质出版社,1994
- 4 秦前清,杨宗凯.实用小波分析,西安电子科技大学出版社,1994
- 5 牟永光,范祯祥.地震勘探数字技术,科学出版社,1987
- 6 刘财等.高分辨率复数道分析方法.石油地球物理勘探,30(增刊1):24~29

(本文编辑:朱汉东)