

高斯线调频小波变换及其在地震震相识别中的应用*

刘希强¹⁾ 周蕙兰²⁾ 曹文海³⁾
李红¹⁾ 李永红¹⁾ 季爱东¹⁾

1) 中国济南 250014 山东省地震局

2) 中国北京 100039 中国科学院研究生院

3) 中国山东威海 264200 威海市地震局

摘要 基于地震渐变信号在起始点附近信号高频分量比较丰富,但信号幅度较小的特点,本文选取高斯线调频小波作为基函数,研究了不同小波参数和信号参数对其变换结果的影响规律,找出了直接利用变换峰值进行震相识别的误差来源,提出了一种从背景噪声中实现渐变地震震相识别的有效方法——定尺度小波变换比方法,给出了模拟数字信号和实际地震震相识别的实例。

关键词 高斯线调频小波 小波变换 渐变地震信号初至识别

中图分类号: P315.61 **文献标识码:** A

引言

渐变地震震相的准确识别问题始终是一个老的新课题。小波变换在时频两域均具有良好的局部化性质,是分析地震信号(非稳态)的有力工具,已被广泛应用于信号检测和图象处理等领域。一个连续信号由于新信号的出现和叠加,在后续信号的起始点处存在丰富的高频成分。根据小波理论,通过选择适当的小波函数及参数,可以用信号的高频成分以及包含在小波变换系数中的信号偏振信息,比较准确地估计信号的起始时刻(刘希强等,1998;刘希强,2000)。但由于平稳过渡信号起始点处振幅较小,且信号中不可避免地混杂有噪声,因而制约了小波参数的选择范围。

小波变换适用于分析固定比例带宽的非平稳信号,而线调频小波变换可以分析具有固定不变带宽和非固定比例带宽的非平稳信号(Baraniuk, Jones, 1993; Mann, Haykin, 1995),是小波变换的一种推广,具有潜在的应用前景。汪永明等(1997)、强淋和刘贵中(1997)曾对高斯线调频小波变换用于识别阵列声波全波列测井信号波至问题进行过初步研究。但在理论和实际信号识别方面缺乏对下述问题的系统研究:① 渐变信号数学模型的变化特征;② 尺度和平移因子对线调频小波的影响;③ 不同尺度下线调频小波变换系数极值点的变化规律;④ 所选小波与实际波形相似程度的条件和范围。对此,本文进行了系统研究和探讨,

* 国家自然科学基金(40074007)、山东省自然科学基金(Y2000E08)和地震科学联合基金(198061)共同资助。
2001-10-28 收到初稿,2002-07-25 收到最后修改稿并决定采用。

以期使所选小波类型及其参数更适于表示和刻画地震渐变信号, 保证震相识别的精度.

1 小波变换

对小波母函数 $\psi(t)$ 作平移和伸缩所得到的一簇函数称为小波基, 表示为

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

式中, a 为尺度因子, 代表频率特性; b 为平移因子, 代表时间特性. 信号的小波变换就是信号在这一簇函数上的分解. 信号 $x(t)$ 的连续小波变换表示为 (Daubechies, 1988)

$$CWT_x(a, b) = \int x(t) * \psi_{a,b}^*(t) \quad (2)$$

式中, $\psi_{a,b}^*(t)$ 是 $\psi_{a,b}(t)$ 的复共轭.

2 高斯线调频小波变化特性

2.1 对信号变换的方式和效果

在信号分析中, 为了减少变换过程中对信号能量的泄漏, 对信号的混淆和污染, 常使用加窗的方法解决这一问题. 常用窗函数的形式为高斯窗函数, 即

$$g_1(t) = \pi^{-1/4} e^{-t^2/2} \quad (3)$$

实际上, 高斯窗函数只是下列函数的一个特例 (Mann, Haykin, 1995), 即

$$g(t) = \pi^{-1/4} \left(e^{-i\omega_p t} - e^{w_p^2/2} \right) e^{-t^2/2} \quad (4)$$

式(4)实部的包络线就是式(3). 因此, $g(t)$ 作为一个窗函数, 对信号分析具有比高斯窗函数更高的定位特性和更高的分辨率, 称式(4)为高斯线调频小波, ω_p 为调制圆频率. 高斯线调频小波是一种非正交、冗余小波.

从式(2)可以看出, 小波变换是信号与小波函数的内积, 是对信号满足一定附加条件的滤波, 这种附加条件反映在因子的正确选取上. 根据是否正交, 小波可分为正交小波、半正交小波, 双正交小波和非正交小波. 小波变换的冗余度增加了分析和解释小波变换结果的困难, 因此, 希望小波变换的冗余度尽可能小. 这意味着应该减少小波之间的相关性. 从信号重构的精度考虑, 正交基是信号重构最理想的基函数, 所以更希望小波是正交小波. 但冗余度也有其优点, 这是因为用线性相关的非正交小波基展开函数时, 由于有多余的基函数存在, 所以信号重构的数值稳定性高, 并可减少计算误差的影响 (张贤达, 保铮, 1998). 一般来说正交小波的构造是比较复杂的, 而如果对非正交、冗余小波采用框架理论进行分析, 对信号的分析 and 重构也能做得较好. 高斯线调频小波基函数生成的小波族构成框架的基本条件是保证下式成立 (Daubechies, 1990):

$$A\|x\|^2 \leq \left\| \left\langle x, \psi_{a,b} \right\rangle \right\|^2 \leq B\|x\|^2 \quad (5)$$

式中, x 为实函数, $\{\psi_{a,b}\}$ 为紧凑小波框架; a, b 为尺度和平移因子; A, B 分别称为框架

的下边界和上边界. 对公式(4)进行小波变换, 并保证式(5)成立的条件是

$$\frac{A}{B} \approx 1 \quad \omega_p \geq 5 \tag{6}$$

只有式(6)成立, 才能构成框架. 因此, 只要选择的小波参数满足式(6), 高斯线调频小波就能对信号进行良好的时频局部化分析.

2.2 离散特性

公式(4)中的调频频率取 $\omega_p \geq 5$ 时, $e^{-\omega_p^2/2}$ 近似等于 0, 从而式(4)变为

$$g(t) = \pi^{-1/4} e^{-i\omega_p t} e^{-t^2/2} \tag{7}$$

式(7)是一个复数小波. 仅使用式(7)的实部作为小波变换的数学公式, 即

$$g(t) = \pi^{-1/4} \cdot \cos \omega_p t \cdot e^{-t^2/2} \tag{8}$$

设 $x(t)$ 是一实函数的输入信号, $x(t)$ 的离散型序列表示为 $x(i \cdot \Delta T)$, 其中, $i=1, 2, \dots, N$. ΔT 表示采样间隔, $1/\Delta T$ 为信号采样率.

将式(8)母小波写成小波的形式

$$g_{a,b}(t) = \pi^{-1/4} \cdot \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \cos(\omega_p \frac{t-b}{a}) \cdot e^{-0.5(\frac{t-b}{a})^2} \tag{9}$$

取 $a=2^m$, $b=n \cdot \Delta T$ [n 表示尺度平移参量(正整数), m 表示频率参量(整数)], 并代入式(9), 得

$$g(m,n) = \pi^{-1/4} \cdot 2^{-m/2} \cdot \cos[\omega_p (\frac{i-n}{2^m}) \cdot \Delta T] \cdot e^{-0.5[(i-n) \cdot \Delta T / 2^m]^2} \tag{10}$$

图 1 为取不同的 m 和 n 值所得到的的小波波形 (ΔT 等于 1), 由图可以看出: ① 当 $m=0, -1, -2, \dots$ 变小时, 波形收缩, 时间区间明显减小(图 1a, b, c), 而幅值明显增加, 适应于对

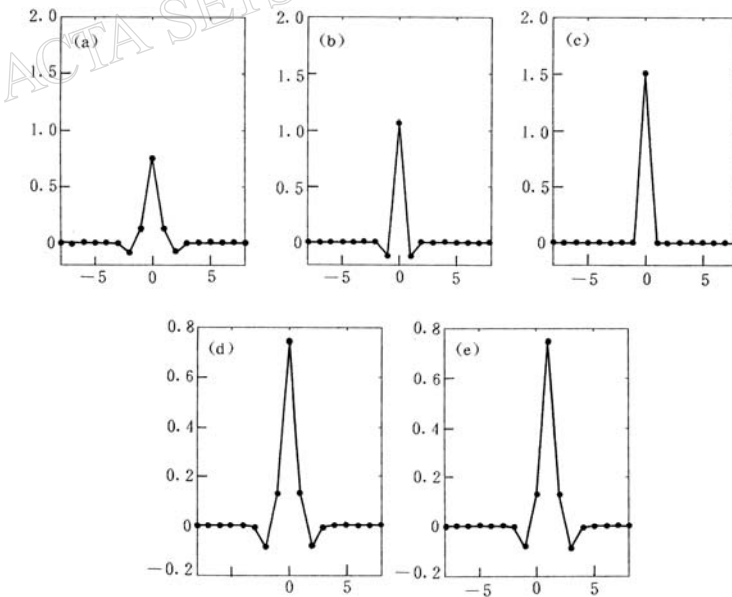


图 1 不同小波参数的小波波形变化曲线

(a) $m=0, n=0$; (b) $m=-1, n=0$; (c) $m=-2, n=0$; (d) $m=0, n=1$; (e) $m=0, n=2$

突变信号的分析; ② 当 $n=0, 1, 2, \dots$ 变大时, 波形开始从 $0, 1, 2, \dots$ 开始平移(图 1a, d, e). 移动的作用相当于把不同宽度的窗函数在时间频率域上进行取值分析.

综上, 把小波函数作为一种窗函数的明显优点就是窗函数的区间可随频率的变化而变化, 有利于对非稳态地震震相的分析和识别.

3 渐变信号的高斯线调频小波变换的理论分析和识别方法

3.1 渐变信号的数学模型

地震波震相信号具有这样的特征, 即新增信号的幅度从起始点开始由零逐步增加到某一最大值, 随后又逐渐衰减. 后续信号的出现和叠加不是一个跃变过程, 而是一个渐变过程. 信号的起始点通常是一个平滑过渡过程. 地震波最常见的震相类型有纵波、横波和面波. 前两种波频率较高且比较接近, 后一种波频率较低. 单一平滑过渡信号的典型形式是:

$$S_{\omega_0}(t) = t \cdot \exp(-\alpha t + i\omega_0 t) \cdot u(t) \tag{11}$$

式中, ω_0 为信号的中心圆频率, $\omega_0 \gg \alpha > 0$; $1/\alpha$ 是与信号渐变过程有关的时间常数; $u(t)$ 为阶跃信号.

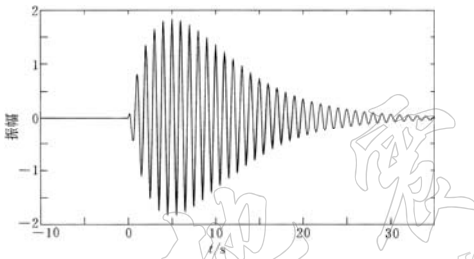


图 2 渐变模拟信号

图 2 是 $\alpha=0.2$ 、时间范围和采样率分别取 $[-10, 35]$ 和 1 、 $\omega_0=2\pi$ 时, 信号 $S_{\omega_0}(t)$ 的实部波形. 可以看出, 尽管信号 $S_{\omega_0}(t)$ 从 $t=0$ 时开始, 但其振幅的最大值却出现在 $t=1/\alpha$ 处, 而且 $S_{\omega_0}(t)$ 变化最为剧烈的区间也不位于 $t=0$ 处, 而在 $t=0$ 与 $t=1/\alpha$ 之间. 平稳过渡信号的上述特点给直接利用小波变换精确估计震相带来了困难.

3.2 高斯线调频连续小波变换

对式(11)进行连续小波变换得到:

$$CWT_s(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a\sqrt{\pi}}} \int_0^\infty t \cdot \exp\left[\alpha t - \frac{(b-t)^2}{2a^2} + i\omega_0 t + i\frac{\omega_p(b-t)}{a}\right] \cdot u(t) dt \tag{12}$$

当时间因子 $b \geq 0$ 时, 有

$$\begin{aligned} CWT_s(a, b) &= \frac{1}{\sqrt{a\sqrt{\pi}}} [b \cdot \exp(-\alpha b + i\omega_0 b) \cdot u(b)] * \exp\left(-\frac{b^2}{2a^2} + i\frac{\omega_p b}{a}\right) \\ &= \sqrt{2a\sqrt{\pi}} \cdot \exp\left[-0.5(a\omega_0 + i\alpha a - \omega_p)^2 + i\omega_0 b - \alpha b\right] \cdot \\ &\quad [b - a^2\alpha + ia(a\omega_0 - \omega_p)] \end{aligned} \tag{13}$$

3.3 高斯线调频连续小波变换的特点

对信号进行高斯线调频连续小波变换的目的是根据变换结果的峰值或特殊特征提取出用于震相识别的判据. 因此, 需要对高斯线调频连续小波变换的特点进行具体分析.

式(13)是一个复数表达式, 求取其模的平方并化简, 得

$$|CWT_s(a,b)|_{b\geq 0}^2=C(a,\alpha,\omega_0,\omega_p)\cdot[(b-a^2\alpha)^2+a^2(a\omega_0-\omega_p)^2]\cdot\exp(-2\alpha b)$$

(14)

其中， $C(a,\alpha,\omega_0,\omega_p)=2a\sqrt{\pi}\cdot\exp[-(a\omega_0-\omega_p)^2+(a\alpha)^2]$ 。 $|CWT_s(a,b)|_{b\geq 0}^2$ 中 b 值存在极值的条件是 $\frac{\partial}{\partial b}|CWT_s(a,b)|^2=0$ ，展开得

$$\alpha b^2-(2a^2\alpha^2+1)b+a^4\alpha^3+a^2\alpha+a^2\alpha(a\omega_0-\omega_p)^2=0$$

(15)

方程式(15)的两个根为

$$b_{1,2}=a^2\alpha+\frac{1\pm\sqrt{1-4a^2\alpha^2(a\omega_0-\omega_p)^2}}{2\alpha}$$

(16)

以式(14)变换结果作为函数，平移因子 b 作为自变量，持续时间假定为 0~100 s，并设 ω_p 等于 6.0， ω_0 等于 3.0，令 $A=\omega_p/\omega_0$ (下同)，对式(16)分两种情况进行讨论。

1) $2a\alpha\omega_0|a-A|\leq 1$ 时， $|CWT_s(a,b)|$ 存在极大值和极小值。表 1 列出了当 $a\leq A$ 时不同参数和相应渐变信号的高斯线调频小波变换结果，其具体变化曲线见图 3。从图 3 和表 1 可以看到，渐变信号的高斯线调频小波变换特点，是在 $b=b_1$ 和 $b=b_2$ 处分别存在一个极大点和极小点；时间常数 α 变化影响着极大值和极小值出现的位置， α 越大，极大值越向靠近信号起始点的方向移动，极小值越向远离起始点的方向移动(图 3a, b, c)；尺度 a 也具有与 α 同样的变化规律(图 3d, e, f)。当尺度 a 等于 α 时，极大值与极小值的距离最大(表 1)；识别判据 $2a\alpha\omega_0|a-A|$ 的值越小，极大值越远离起始点，极小值越靠近起始点(表 1)。

表 1 不同参数及其对渐变信号的高斯线调频小波变换结果的影响

对应图件	尺度因子 a	时间常数 α	ω_0	ω_p	极大值位置/s	极小值位置/s	识别判据 $2a\alpha\omega_0 a-A $
图 3a	0.20	0.2	3	6	47	2	0.432
图 3b	0.20	0.3	3	6	29	4	0.648
图 3c	0.20	0.4	3	6	18	6	0.864
图 3d	0.25	0.2	3	6	46	3	0.525
图 3e	0.30	0.2	3	6	44	5	0.612
图 3f	0.35	0.2	3	6	43	7	0.693
图 3g	0.70	0.2	8	5	25	25	1.092
图 3h	0.62	0.2	8	5	50	0	0.0
图 3i	0.312 5	0.2	8	5	48	1	0.312 5

2) 当 $2a\alpha\omega_0|a-A|\geq 1$ 时，在 $b>0$ 条件下， $|CWT_s(a,b)|$ 不存在极值(图 3g)。其原因是 要满足 $2a\alpha\omega_0|a-A|\geq 1$ 的条件，尺度 a 必须小于一定的阈值($\alpha, \omega_0, \omega_p$ 为定值)。当尺度大于一定阈值时，高斯线调频小波为低频小波。而信号初至处存在丰富的高频成分，用低频小波来检测信号初至显然不合适，因而这种情况不适合识别震相初至。

从以上分析可以得出如下结论：对渐变信号，直接利用 $|CWT_s(a,b)|$ 的峰值变化来确定震相初至会引起 $a^2\alpha+(1+\sqrt{1-4a^2\alpha^2\omega_0^2(a-A)^2})/2\alpha$ 的误差。

3.4 定尺度小波变换比方法

为了减小利用 $|CWT_s(a,b)|$ 峰值变化确定震相初至的误差，首先讨论尺度 a 在满足约束

条件 $2a\alpha\omega_0|a-A|\leq 1$ 下的变化范围. 由 $2a\alpha\omega_0|a-A|\leq 1$, 可得

$$A-\sqrt{A^2+(2\alpha\omega_0)^{-1}}<a<A+\sqrt{A^2+(2\alpha\omega_0)^{-1}} \quad (17)$$

因尺度 a 大于 0, 则由式(17)得尺度的变化范围为 $(0, r)$. 其中, $r=A+\sqrt{A^2+(2\alpha\omega_0)^{-1}}$.

其次, 讨论平移因子 b 极小值点随尺度 a 的变化规律. 对极小值 $b_2=a^2\alpha+(1-\sqrt{1-4a^2\alpha^2\omega_0^2(a-A)^2})/2\alpha$ 求尺度 a 的偏导数, 得

$$b'_2(a)=2a\alpha\{1+\omega_0^2(a-A)(2a-A)[1-4a^2\alpha^2\omega_0^2(a-A)^2]^{-0.5}\} \quad (18)$$

将尺度 a 分别等于 $A/2$ 和 A , 并代入式(18)得 $b'_2(A)=2A\alpha$ 和 $b'_2(A/2)=A\alpha\sqrt{1-A^4\alpha^2\omega_0^2/4}$. 由于 α 很小, 在满足 $0.5A^2\alpha\omega_0<1$ 的条件下, 有 $b'_2(A/2)>0$ 、 $b'_2(A)>0$. 因此, $b'_2(a)=0$ 的两个根 r_1 和 r_2 位于 $0.5A<r_1<r_2<A$ 变化范围内. $b_2(a)$ 在 $a\in(0, r_1)$ 范围内是单调递增的, 在 (r_1, r_2) 范围内是单调递减的, 在 (r_2, A) 范围内是单调递增的. 在 $a\in(0, r_1)$ 范围内取 a 等于 $0.5A$, 在 (r_2, A) 取尺度 a 等于 A , 则有下列关系成立:

$$b_2(0.5A)=0.25A^2\alpha+0.5\alpha^{-1}\left[1-\sqrt{1-(0.5A\alpha\omega_p)^2}\right]>0.25A^2\alpha(1+0.25\omega_p^2)>b_2(A) \quad (19)$$

经过上述分析, 我们可以得出以下结论: ① 不同尺度的变化会影响 $|CWT_s(a, b)|$ 的大小和相应平移因子的位置. 尺度 $a\in(r_2, A)$ 范围内的 $|CWT_s(a, b)|$ 的极小值, 相对于它在平移因子较大时的值来说很小. 当 $a\approx A$ 时, 识别判据 $2a\alpha\omega_0|a-A|\approx 0$, 意味着小波变换的极小值越靠近起始点, 且振幅近似等于零(图 3h, 表 1); 而当尺度在 $a\in(0, r_1)$ 范围内变化(即

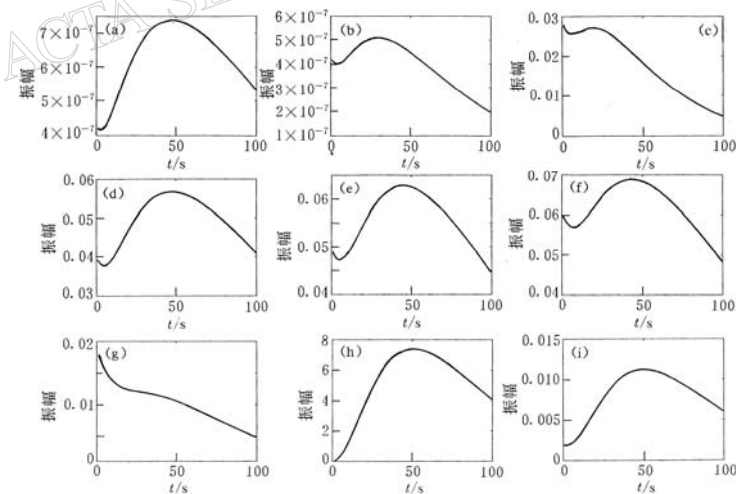


图 3 不同参数对渐变信号的高斯线调频小波变换结果的影响及高斯线调频小波变换特性

(a)~(i)由公式由文中公式(14)得到, 具体参数为: (a) $a=0.2$, $\alpha=0.2$, $\omega_0=3$, $\omega_p=6$; (b) $a=0.2$, $\alpha=0.3$, $\omega_0=3$, $\omega_p=6$; (c) $a=0.2$, $\alpha=0.4$, $\omega_0=3$, $\omega_p=6$; (d) $a=0.25$, $\alpha=0.2$, $\omega_0=3$, $\omega_p=6$; (e) $a=0.3$, $\alpha=0.2$, $\omega_0=3$, $\omega_p=6$; (f) $a=0.35$, $\alpha=0.2$, $\omega_0=3$, $\omega_p=6$; (g) $a=0.7$, $\alpha=0.2$, $\omega_0=8$, $\omega_p=5$; (h) $a=0.62$, $\alpha=0.2$, $\omega_0=8$, $\omega_p=5$; (i) $a=0.3125$, $\alpha=0.2$, $\omega_0=8$, $\omega_p=5$

尺度减小)时, $|CWT_s(a,b)|$ 极小值会发生明显增大, 极小值对应的平移因子位置也会发生右移(图 3i、表 1); ② 通过在 $(0, r_1)$ 和 (r_2, A) 分别选择一个适当尺度 a 和 a_0 (如 $a=A/2$, 和 $a_0=A$), 且选择参数满足 $0.5A^2\alpha\omega_0 < 1$ 条件下, 可使得两个不同尺度的比值 $R(a,a_0,b) = |CWT_s(a,b)|/|CWT_s(a_0,b)|$ 的极大值位置(设为 b_3), 靠近或等于信号初至点位置. 当 $b(a) > b(a_0)$ 时, 峰值的位置位于 $0 \leq b_3 \leq b_2(a_0) = A^2\alpha$ 之间. 因此, R 比值是利用了渐变信号在起始点附近高频分量比较丰富的特征, 同时又排除了信号幅度的不利影响而得出来的. 本研究将 R 值称为定尺度小波变换比, 作为识别震相初至的方法. 它比直接利用 $|CWT_s(a_0,b)|$ 的极大值来识别震相初至方法的精度有了明显提高.

4 仿真渐变信号初至识别

高斯线调频的连续小波变换可离散化为

$$SGW(m,n) = \pi^{-0.25} \cdot 2^{-m/2} \cdot \Delta T \cdot \sum_{i=0}^{N+M-1} x(i \cdot \Delta T) \cdot g\left(\frac{n-i}{2^m} \cdot \Delta T\right) \tag{20}$$

式中, ΔT 为采样率, N 为信号的离散点数, M 为高斯小波的离散点数.

仿真渐变信号的数学模型如下:

$$S_{\omega_0}(t) = t \cdot \exp(-0.2 \cdot t) \cdot \cos(10 \cdot \pi \cdot t) \cdot u(t-1) + n(t) \tag{21}$$

式中, $u(t-1)$ 表示阶跃函数, $n(t)$ 表示随机噪声. 将式中时间 t 离散化, 离散点数为 120, 采样率为 50 sps, 对应时间段为 $[0, 2.4]$ s. 仿真信号初至位于 1 s (50 个采样点) 处, 信号频率为 5 Hz, 调频小波圆频率 ω_p 取为 5.

将正态分布的随机噪声与仿真信号进行叠加, 叠加后的平均信噪比依次为 12.6, 9.4 和 4.2 分贝(图 4b, c 和 d). 将不含噪声的信号(图 4a)与含不同程度噪声的信号分别进行离散小波变换, 根据定尺度小波变换比方法得到图 4e~h 所示的信号初至识别结果(最大值对应仿真信号初至). 从图中可以看出: 随着信噪比的降低, 信号初至结果的精度随之降低, 对信噪比为 4.2 分贝的含噪声信号的初至识别结果为 1.04 s (52 点处), 识别误差为 2 个采

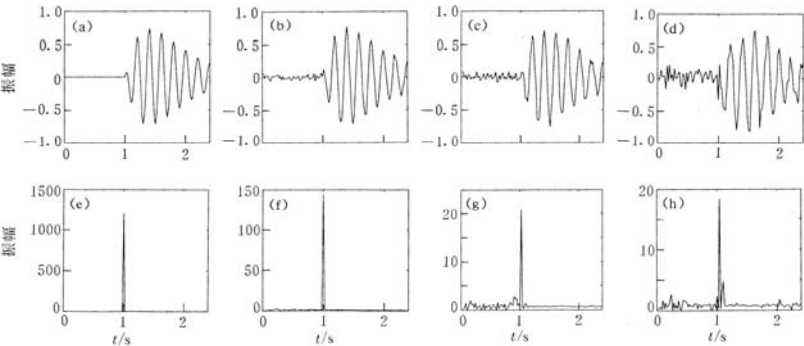


图 4 含噪声仿真信号及初至信号识别结果

(a) 仿真信号; 信噪比分别为 12.6(b)、9.4(c) 和 4.6(d) 时, 仿真信号与噪声水平的叠加;
(e)、(f)、(g) 和 (h) 是对 (a)、(b)、(c) 和 (d) 信号初至的识别结果

样点. 对不含噪声信号的方法识别结果与假定信号初至一致(最大值位于 50 点处).

仿真信号实验表明, 在信噪比较低的情况下, 利用定尺度小波变换比方法对拟定初至信号的识别仍然得到了理想的效果, 说明定尺度小波变换方法具有很强的抗噪声能力. 因此, 将此方法应用于实际震相识别中, 可保证足够高的精度.

5 天然地震震相初至识别

现以山东数字化台网记录的地震波为例, 来说明方法的实用性. 图 5a 和 f 是荣成台短周期数字化仪记录的 2000 年 8 月 14 日 12 时 00 分 54 秒发生在山东文登的一次 2.2 级地震 P 波和 S 波段. 根据 Wigner 时频分析理论, 我们得到的 P 波段主频率为 4.8 Hz(图 5b), S 波段主频率为 2.8 Hz(图 5g).

Kanwaldip(1997)认为, 小波变换是否适合于表示地震信号, 则取决于所选小波类型及与其实际波形的相似程度. 据此, 要拾取具有不同偏振特性和不同频段内的震相, 必须把选取的线调频高斯小波基与具体波形信息结合起来. 本研究提出将研究波段的主频率与小波基结合来进行小波变换, 正是基于上述思想而提出来的.

图 5c 和 h 分别是输入 P 波(4.8 Hz)和 S 波主频(2.8 Hz)后得到的震相识别结果, 最大值分别对应于图 5a 和 f 中箭头指向的信号时刻. 可以看出, 利用定尺度小波变换比方法得到的识别结果与人机结合的识别结果非常吻合. 图 5d 和 e 分别给出了当输入比实际 P 波主频偏低(3.6 Hz)和偏高(6 Hz)频率时的 P 波震相识别结果. 可以看出, 与图 5c 识别结果相

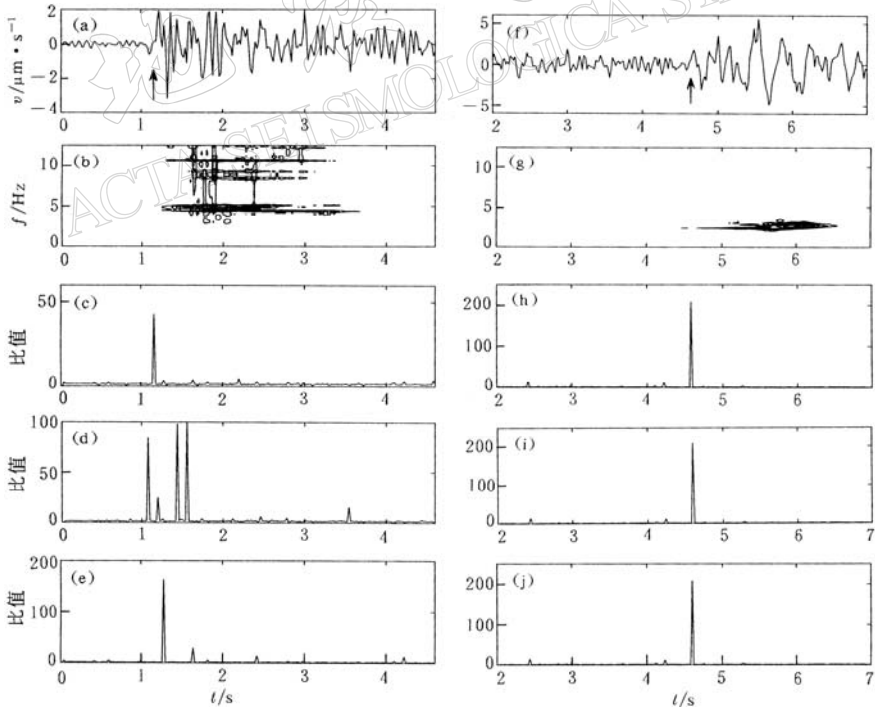


图 5 地震记录及定尺度小波变换比对 P 波和 S 波震相初至识别结果.

(a) 和 (f) 分别是地震 P 波和 S 波记录; (b) 和 (g) 分别是 P 波和 S 波时频分布图; (c)、(d)、(e)、(f)、(h)、(i) 和 (j) 分别是不同参数定尺度小波变换比值随时间变化图

比, 图 5d 和 e 识别结果分别提前和滞后 4 个点和 6 个点. 图 5h 和 i 分别给出了当输入比实际 S 波主频偏低 (2 Hz) 和偏高 (4 Hz) 频率时的 S 波震相识别结果. 可以看出, 图 5h 和 i 识别结果与图 5g 识别结果相同. 这可能反映了研究波段中 2 Hz 和 4 Hz 频率的信号比较弱.

由此可见, 定尺度小波变换比值的最大值与输入研究波段的主频有一一对应关系. 在进行震相识别时, 我们可根据研究的目标, 输入指定频段的参数, 即可得到相应频段的震相识别结果.

6 讨论和结论

1) 对渐变信号, 直接利用渐变信号的高斯线调频小波变换的峰值变化来确定震相初至, 会引起 $a^2\alpha + \left[1 + \sqrt{1 - 4a^2\alpha^2\omega_0^2(a-A)^2}\right] / 2\alpha$ 的识别误差. 在高精度数字化资料分析中, 该误差是不容忽视的.

2) 提出了识别渐变地震震相的新方法——定尺度小波变换比. 该方法的本质是利用了渐变信号在起始点附近高频信息比较丰富的特征, 同时又克服了信号幅度较小而带来的难以识别的困难. 具体应用时, 需要选择合适的小波参数和研究波段的主频, 且要保证 $2a\alpha\omega_0|a-A| \leq 1$ 和 $0.5A^2\alpha\omega_0 < 1$ 两个基本关系式成立.

3) 研究结果表明, 定尺度小波变换比方法对噪声具有较强的平滑能力, 识别震相所带来的误差在 $[0, a^2\alpha]$ 之间, 与基于小波变换峰值识别方法相比, 识别精度得到很大提高; 该方法可以对地震波进行智能化处理, 能够达到甚至超过人机交互识别震相的程度, 在含噪声信号处理和数字化台网的智能化信息处理中具有应用前景.

参 考 文 献

- 刘希强, 周蕙兰, 郑治真, 等. 1998. 基于小波包变换的弱震相识别方法[J]. 地震学报, 20(4): 373~380
- 刘希强, 周蕙兰, 沈萍, 等. 2000. 用于三分向记录震相识别的小波变换方法[J]. 地震学报, 22(2): 125~131
- 强淋, 刘贵忠. 1997. 阵列声波全波列测井信号波至提取的小波变换方法[J]. 石油物探, 36(2): 55~61
- 汪永明, 余厚全, 黄载禄, 等. 1997. 基于子波变换提取全波列声波测井信号波前的新方法[J]. 信号处理, 13(3): 280~285
- 张贤达, 保铮. 1998. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 307~322
- Baraniuk R G, Jones D L. 1993. Signal-dependent time-frequency analysis using a radially Gaussian kernel[J]. *Signal Processing*, 32(1): 263~284
- Daubechies I. 1988. Orthonormal bases of compactly supported wavelets[J]. *Comm Pure Appl Math*, 41(2): 909~996
- Daubechies I. 1990. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis[J]. *IEEE Trans Inform Theory*, 36(2): 961~1 005
- Kanwalalp S A. 1997. Wavelet transform methods for phase identification in three-component seismograms[J]. *Bull Seis Soc Amer*, 87(6): 1 598~1 612
- Mann S, Haykin S. 1995. The chirplet transform: physical considerations[J]. *IEEE Trans Signal Processing*, 43(3): 2 745~2 761

GAUSS LINEAR FREQUENCY MODULATION WAVELET TRANSFORM AND ITS APPLICATION TO SEISMIC PHASES IDENTIFICATION

Liu Xiqiang¹⁾ Zhou Huilan²⁾ Cao Wenhai³⁾
Li Hong¹⁾ Li Yonghong¹⁾ Ji Aidong¹⁾

1) *Seismological Bureau of Shandong Province, Ji'nan 250014, China*

2) *Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

3) *Seismological Bureau of Wei'hai City, Wei'hai 264200, China*

Abstract: Based on the characteristics of gradual change style seismic signal onset which has more high frequency signal components but less magnitude, this paper selects Gauss linear frequency modulation wavelet as base function to study the change characteristics of Gauss linear frequency modulation wavelet transform with difference wavelet and signal parameters, analyzes the error origin of seismic phases identification on the basis of Gauss linear frequency modulation wavelet transform, puts forward a kind of new method identifying gradual change style seismic phases with background noise which is called fixed scale wavelet transform ratio, and presents application examples about simulation digital signal and actual seismic phases recording onsets identification.

Key words: Gauss linear frequency modulation wavelet; wavelet transform; gradual change style seismic signal onset identification