

# 数字化地震波形资料的时频分析方法及应用\*

刘希强<sup>1</sup>, 沈萍<sup>2</sup>, 山长仑<sup>1</sup>, 季爱东<sup>1</sup>, 李红<sup>1</sup>, 蔡明军<sup>3</sup>

(1. 山东省地震局, 山东 济南 250014 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081 3. 云南省地震局, 云南 昆明 650041)

**摘要** 信号的时频分布具有比时间尺度分布更高的描述和刻画非稳态地震波信号的能力, 进一步提高信号的时频聚集性和尽可能减小交叉项干扰是时频分析发展的方向。基于高阶矩时频分布理论, 本文首次提出了将其应用于数字化地震波形资料分析和处理的技术途径和方法。通过对仿真信号的 Choi-Willams 各阶矩时频分布与 Wigner 各阶矩时频分布的对比和交叉项干扰的理论分析, 认为 Choi-Willams 高阶矩时频分布具有时频聚集性高和交叉项干扰小的特点, 在提高处理数字化地震波特性参数精度和地震应急技术系统的智能化程度等方面具有潜在应用前景。

**关键词** : 非平稳信号 ; Wigner 时频分布 ; Choi-Willams 时频分布 ; 地震波处理

中图分类号 : P315.3<sup>+1</sup> 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-0844(2004)02-0118-08

## 0 引言

各阶统计量与时间无关的信号称为平稳信号, 而某阶统计量随时间改变的信号称作非平稳信号或时变信号。最常见的非平稳信号是自相关函数或功率谱密度随时间变化的信号。传统的傅立叶变换无法反映非平稳信号统计量的时间变化特征, 用时间和频率的联合函数形式来表示非平稳信号, 称为信号的时频表示。由于平稳信号与非平稳信号的特性不同, 在分析方法上有以下区别: 一是平稳信号可用一维表示(时间轴或频率轴), 非平稳信号则需用二维平面表示(如时间—频率平面, 时间—尺度平面等); 二是对平稳信号采用全局的傅立叶变换, 对非平稳信号则使用局部变换。为了分析和处理非平稳信号, 人们对傅立叶分析进行了推广乃至根本性的革命, 提出并发展了一系列新的信号分析理论, 如短时傅立叶变换<sup>[1]</sup>、时频分析<sup>[2]</sup>、小波变换<sup>[3]</sup>、Radon-Wigner 变换<sup>[4]</sup>、分数阶傅立叶变换<sup>[5]</sup>、线调频小波变换<sup>[6,7]</sup>、循环统计量理论和调幅-调频信号分析<sup>[8]</sup>等。

随着数字化地震观测技术的提高和台网密度的增加、地震波理论的发展、现代信号处理方法和技术的提高, 依靠直接来自震源和介质的数字化地震波信息, 解决深层次的基于地震波参数进行地震预测的问题, 又有了新的契机。现代数字地震学研究已经揭示出了传统地震研究未曾发现、或者未曾确认的地震现象, 使得以较高的时空分辨率进行孕震构造和震源过程的研究成为可能。对地震波记录中是否含有区域孕震信息, 含有多少异常信息的识别程度取决于两个方面的进展: 其一是地震观测分辨率的不断提高; 其二是现代信号处理技术和方法的深入开发和应用。

20 世纪 80 年代以来, Wigner 时频分布成为研究非平稳随机信号的重要理论工具。地震波信号是一种时变信号, 它的高阶矩时频分布中可能包含更丰富的非平稳变化信息, 有可能成为进一步提高有用信号识别精度的重要技术途径。作者曾将小波(包)的时间—尺度分析技术应用于地震波的预处理工作中, 取

\* 收稿日期 2003-01-10

基金项目: “十五”国家科技攻关项目(2001BA601B02-02-03-06); 山东省自然科学基金(Y2000E08); 地震科学联合基金(102035)和济南市科技计划专项课题资助。

作者简介: 刘希强(1964-), 男(汉族), 山东武城人, 研究员, 现主要从事地震波和信号处理工作。

得了一定的研究进展<sup>[9-11]</sup>。本文试图通过不同时频分析方法的对比,探讨更适于描述和刻画数字化地震波非平稳特性的有效方法,开拓将现代信号处理技术应用于海量数字化数据智能化预处理、地震速报和地震预测研究的新领域。

## 1 时频分布的基本理论

解析信号  $x(t)$  的 Wigner 时频分布:

$$W_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (1)$$

对非平稳信号,需要用高阶矩和高阶矩谱来描述其统计平均特性。设  $x(n)$  为非平稳信号,它的  $k$  阶累计量为零均值平稳信号,则  $k$  阶矩谱表示为<sup>[12]</sup>

$$W_x(t, \omega_1, \dots, \omega_k) = \int_{\tau_1} \dots \int_{\tau_k} x(t + \frac{k}{k+1}\tau_i - \frac{1}{k+1} \sum_{l=1, l \neq i}^k \tau_l) \prod_{i=1}^k x^*(t - \frac{1}{k+1} \sum_{i=1}^k \tau_i) e^{-j\omega\tau} d\tau_i \quad (2)$$

当  $k=1$  时,表示 Wigner 时频分布;  $k=2$  时,称为 Wigner 双谱;  $k=3$  时,称为 Wigner 三谱。

在高精度信号分析中,为了减小交叉项的干扰,科学家提出了一系列时频分布。Claasen 等<sup>[13]</sup>发现众多的时频分布只是 Wigner-Ville 分布的变形,可以用统一的形式表示。不同的时频分布只是体现在积分变换核的函数形式的选择上,而对于时频分布各种性质的要求则反映在对核函数的约束条件上。

含有窗函数的信号  $x(t)$  的时频分布可以用一般形式统一写作

$$W_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x(u + \tau/2) x^*(u - \tau/2) \phi(\theta, \pi) e^{-j(\omega\tau + \theta\omega - u\theta)} du d\theta d\tau \quad (3)$$

式中  $\phi(\theta, \pi)$  称为核函数。

Choi 和 Williams<sup>[14]</sup>提出了时频分析核,其表现形式为

$$\phi(\theta, \pi) = e^{-\theta^2\tau^2/\sigma^2} \quad (4)$$

Choi 和 Williams 核函数与时间和频率无关,是时延  $\theta$  和频延  $\tau$  的函数,具有时、频移不变性。 $\sigma$  为衰减系数,它与交叉项的幅值成比例关系。

Choi-Williams 时频分布的具体表达式为

$$W_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x(u + \tau/2) x^*(u - \tau/2) e^{-\theta^2\tau^2/\sigma^2} e^{-j(\omega\tau + \theta\omega - u\theta)} du d\theta d\tau \quad (5)$$

Choi-Williams 的高阶矩谱分析的表达式为

$$W_x(t, \omega_1, \dots, \omega_k) = \left( \int_{\tau_1} \dots \int_{\tau_k} x(t + \frac{k}{k+1}\tau_i - \frac{1}{k+1} \sum_{l=1, l \neq i}^k \tau_l) \prod_{i=1}^k x^*(t - \frac{1}{k+1} \sum_{i=1}^k \tau_i) e^{j2\pi\theta t} \exp^{-\theta^2\tau^2/\sigma^2} e^{-j(\omega\tau + \theta\tau)} d\tau d\theta \right) \quad (6)$$

## 2 仿真信号和实际地震波资料的 Wigner 和 Choi-Williams 时频分布分析

### 2.1 计算方法

本文根据时频分析理论,编制了相应计算程序。主要技术思路如下:

(1) 对信号进行 Hilber 变换,形成解析信号的时间序列。设数字化地震波资料的离散表达式是  $x(n)$ ,  $x(n)$  的 Hilbert 变换是  $\hat{x}(n)$ , 则求研究信号  $x(n)$  的解析信号的具体过程为:求  $x(n)$  的离散傅立叶变化 DFTX( $k$ )  $k=0, \dots, N-1$ , 其中  $k=N/2, \dots, N-1$  对应负数频率,令

$$Z(k) = \begin{cases} X(k) & k=0 \\ 2X(k) & k=1, 2, \dots, N/2-1, \\ 0 & k=N/2, \dots, N-1 \end{cases}$$

对  $Z(k)$  做傅立叶逆变换,得到  $x(n)$  的解析信号  $z(n)$ ; 由  $Z(k) = X(k) + j\hat{X}(k)$ , 得

$$\hat{x}(n) = -j[z(n) - x(n)] \quad (7)$$

通过 Hilbert 变换后,序列  $x(n)$  与其 Hilbert 变换  $\hat{x}(n)$  是正交的,信号频谱的幅度不发生变化,但频谱的相位会发生变化。

(2) 计算 Wigner 时频分布和 Choi - Williams 时频分布、双谱分布和三谱分布的解析时间序列长度分别为信号长度的二倍、三倍和四倍。

(3) 计算 Wigner 分布、Wigner 双谱和三谱分布时,首先计算解析信号的瞬时自相关函数,然后根据公式(2)对其进行傅立叶变换。

(4) 计算 Choi - Williams 时频分布时,衰减系数  $\sigma$  取值要远小于 1(一般取 0.05),然后对瞬时自相关函数进行傅立叶反变换求得对称模糊函数,其次对窗函数进行离散化,得到与对称模糊函数对应的离散序列,最后根据公式(6)对对称模糊函数和窗函数乘积后的序列进行傅立叶变换。

### 2.2 结果分析

为了对比和分析不同时频分布和同一种时频分布不同阶矩的时频分布效果,图 1(a)给出了频率分别为 2.5 Hz 和 5 Hz 的仿真信号,图 1(b)~(g)分别给出了 Wigner 时频分布、Wigner 双谱、Wigner 三谱、Choi - Williams 时频分布、Choi - Williams 双谱、Choi - Williams 三谱图。从图中可以看出:

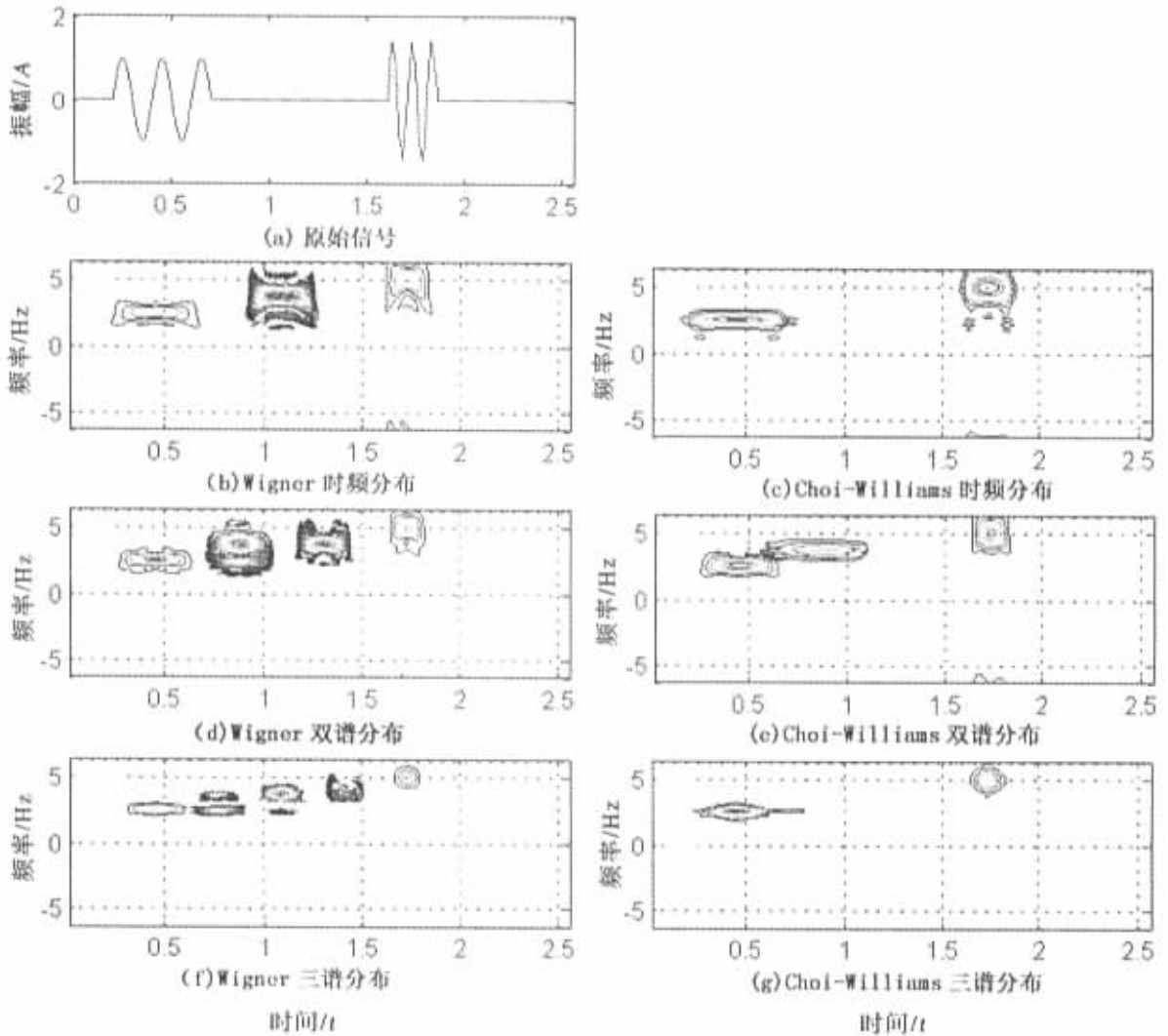


图 1 Wigner 和 Choi - Williams 时频分布的比较

Fig. 1 The comparing of time - frequency distribution between Wigner and Choi - Williams.

(1) 信号的 Wigner 时频分布尽管具有较好的时频聚集性, 但和已知仿真信号时间起始点和频率点相比存在有明显的交叉项干扰, 而且阶矩越高干扰项越明显。

(2) 信号的 Choi - Williams 时频分布同样具有较好的时频聚集性, 而且和已知仿真信号时间起始点和频率点相比, 交叉项干扰要小于 Wigner 时频分布结果, 阶矩越高干扰项越小。

通过上述分析, 认为 Choi - Williams 时频分布比 Wigner 时频分布要具有对信号更好的时频聚集性和更高的分辨能力。

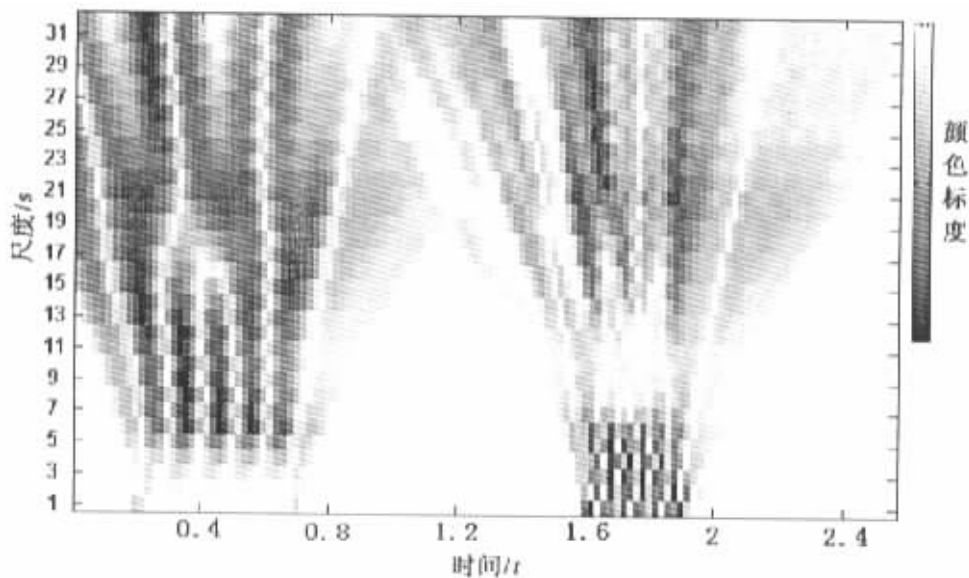


图 2 对图 1(a) 中信号进行高斯连续小波变换的时间—尺度分布

Fig. 2 The time - scale distribution of Gaosi continue wavelet transform to signal in Fig. 1(a).

无论是 Choi - Williams 时频分布还是 Wigner 时频分布, 它们和信号的时间—尺度分析相比都具有明显的时频聚集性和较高的信号分辨率。图 2 给出了图 1 中仿真信号的连续小波变换结果, 图 3 给出了图 1 中仿真信号的小波包变换结果。比较图 1 与图 2、图 3 中的时间—尺度分布结果后, 不难发现时频分布比较清晰反映出了仿真信号何时开始、何时结束、期间频率如何变化的非稳态变化过程, 而连续小波变换和小波包变换对过程的反映比较模糊, 信号的时频聚集性较差, 且背景干扰信号也较大。

通过仿真信号的时频和时间尺度分析, 认为 Choi - Williams 三阶矩谱时频分布可能更适合于描述和刻画地震波信号。下面给出对数字化记录的 Choi - Williams 三谱分析结果。图 4 为山东数字化地震台网中苍山台记录的 2002 年 4 月 30 日邹城 2.5 级地震的 P 波记录及其 Choi - Williams 三谱分布的结果, 非常清楚展现出不同频段的地震波随时间的动态变化过程。地震波信号 P 波段频率变化比较稳定, 主频为 4.5 Hz, 且 P 波段的起始与主要持续时间与时频分布相吻合, 显示出由时

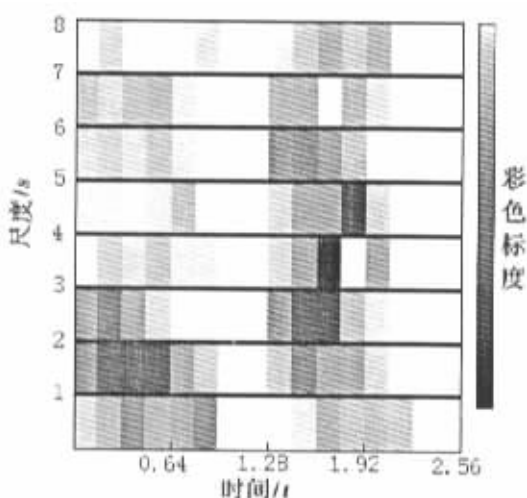


图 3 对图 1(a) 中信号进行小波包变换的时间—尺度分布 (小波基为 Db3)

Fig. 3 The time - scale distribution of wavepack transform to signal in Fig( a ).

波段频率变化比较稳定, 主频为 4.5 Hz, 且 P 波段的起始与主要持续时间与时频分布相吻合, 显示出由时

频分布可以透析信号的非稳态变化过程的特点。

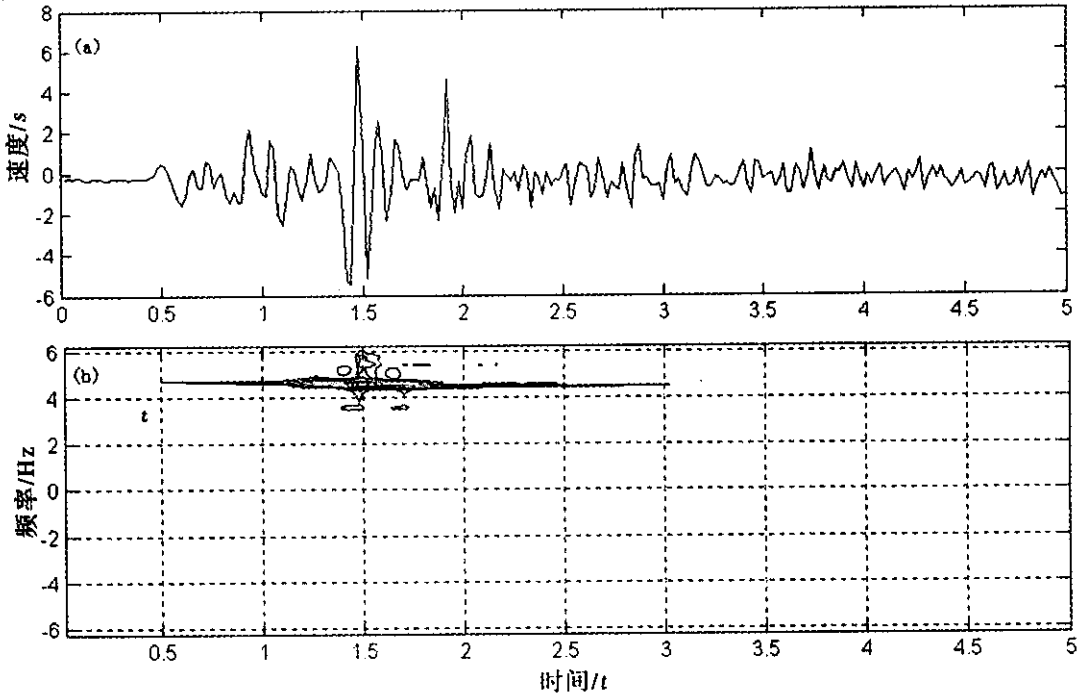


图4 苍山数字化宽频带台站记录的2002年4月30日邹城2.5级地震P波段波形(a)及其Choi-Williams三谱分布(b)

Fig. 4 Waveform of P wave and Choi-Williams three spectrum distribution of Zoucheng M2.5 earthquake on April 30 2002, recorded by Canshan digital station.

在计算 Choi-Williams 时频分布时,衰减系数的不同取值对结果是有影响的。图5为山东数字化地震台中荣成台记录的2002年7月23日黄海  $M_s 4.7$  地震的P波记录,其衰减系数分别取0.05和0.5时的 Choi-Williams 三谱分布的结果。考虑到计算量,图中的时频分布结果仅由原始地震波记录中75~80 s之间的数据计算得到。因此,计算结果反映的是75~80 s之间地震波信号的信息。由图5可以看出,研究波段中明显存在两个不同的频率成分,频率分别为2.15和3.26 Hz。两种情况下的值对于时频分布中的主频信号的时间起始、结束和中间变化形态没有多大影响,且都比较清楚地展现出不同频段的地震波随时间的动态变化过程,所不同的是越大,信号的时频聚集性变差。

### 2.3 时频分布交叉项的起因分析

设研究信号中含有两个频率为  $f_1$  和  $f_2$  的信号,则信号的 Wigner 分布引起的交叉项为<sup>[8]</sup>

$$W_{\text{cross}}(t, f) = 2\delta\left(f - \frac{f_1 + f_2}{2}\right) \cos[2\pi(f_2 - f_1)t] \tag{8}$$

Choi-Williams 时频分布引起的交叉项为

$$W_{\text{cross}}(t, f) = 2 \frac{\sqrt{\sigma}}{f_2 - f_1} \exp\left[-\sigma \left(\frac{f - 0.5 * (f_2 + f_1)}{f_2 - f_1}\right)^2\right] \cos[2\pi(f_2 - f_1)t] \tag{9}$$

由式(8)知,交叉项在时频平面上频率轴出现的位置为  $(f_1 - f_2)/2$ ,时间轴上能量最集中的位置出现在  $\cos[2\pi(f_2 - f_1)t]$  等于最大值的位置,该位置具有周期性变化规律。由图1知,在已知两个时频能量集中区围成的时频窗中间出现了一个虚假信号,这个虚假信号分布就是由时频分布本身引起的,与公式(8)中交叉项应该出现的时频位置是吻合的。Wigner 高阶矩谱分析会造成虚假信号的进一步分解,因而不利于有用信号的识别。

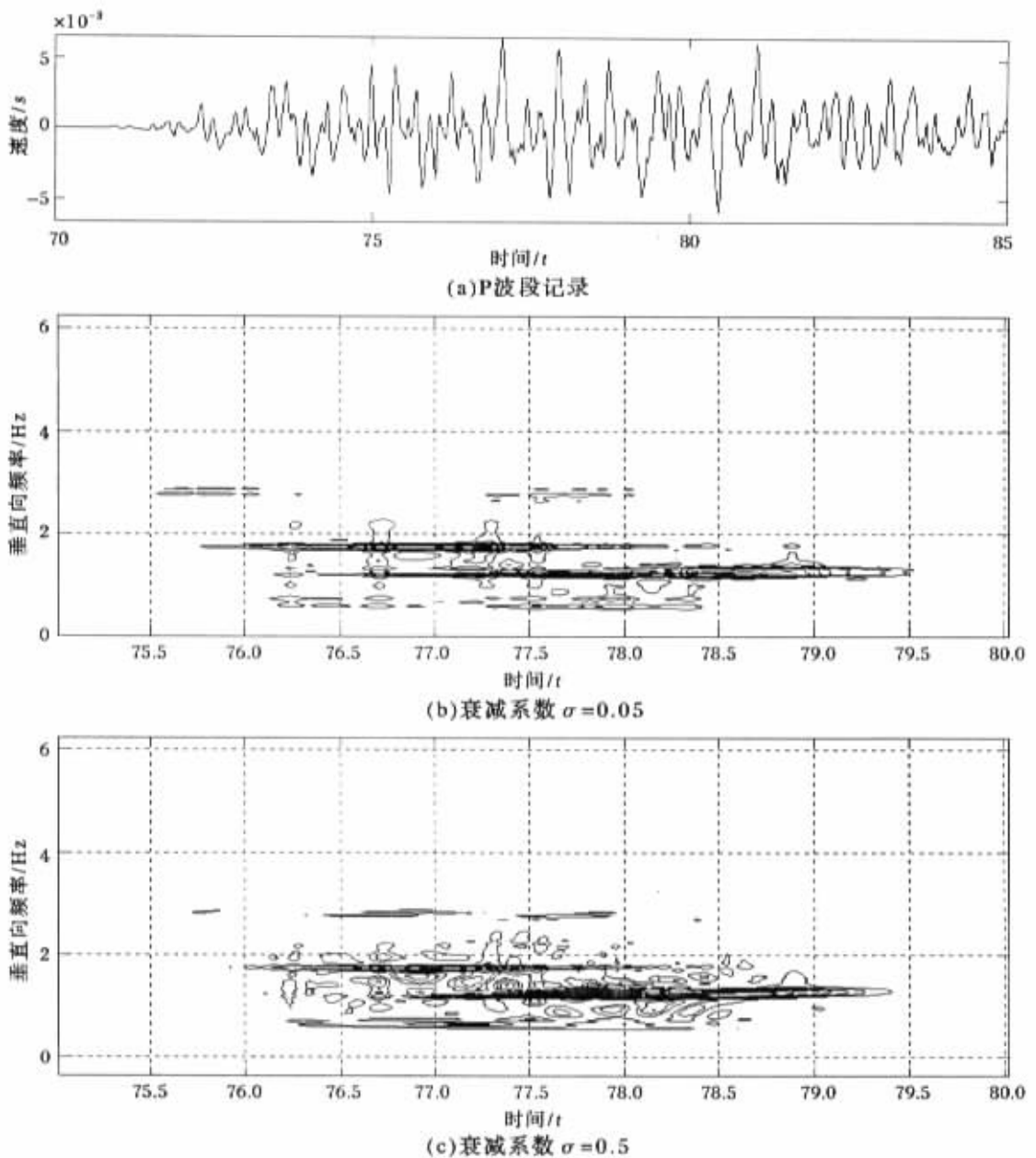


图5 荣成台数字化短周期台站记录的2002年7月23日黄海4.7级地震P波段波形及其Choi-Williams三谱分布

Fig.5 Waveform of P wave and Choi-Williams three spectram distribution of Huanghai M4.7 earthquake on July 23, 2003, recorded by Rongcheng digital station.

由式(9)知,交叉干扰项分布在整个时频平面上,在衰减系数 $\sigma$ 值较小情况下,与信号量级相比交叉干扰项的量级非常小,因而在信号时频分布图上不会出现明显的交叉项分布,这也就是图1中Choi-Williams时频分布中交叉项分布非常弱的原因。

### 3 讨论和结论

(1) 不同信号间交叉项的干扰是时频分布中固有的一个产物。基于现代信号理论,尽可能减小交叉

项干扰,不断提高识别信号时频分布特性的准确性是今后研究的方向。

(2) 信号的时频分布具有比时间尺度分布更高的描述和刻画非稳态地震波信号的能力。

(3) Wigner 时频分布具有较高的时频聚集性,但交叉项分布干扰明显;Wigner 高阶矩谱分析使得交叉项干扰愈加明显,不利于有用信号的识别和分析。

(4) 理论和实际资料处理表明,Choi - Willams 时频分布具有交叉项干扰小的特点,其高阶矩谱的时频聚集性高,对不同到时或频率的地震波具有较好的分辨能力和较高的识别精度。

(5) 提高震时和震后快速反应速度、提取地震孕育过程异常信息的一条重要途径是开展对数字地震波形的分析和研究,如进行滤波、反褶积、希尔伯特变换、地震仪仿真、偏振分析、波形相关分析、波形叠加处理、与理论走时的比较、自动识别震相和地震定位、频谱分析、波形反演、提取高精度震源和介质参数等。因此,通过对数字地震波形的分析和研究可以实现以尽可能短的时间和尽可能高的精度,给出一次地震的尽可能多的信息的目标。鉴于此,各国科学家正在利用各种有效的地震模式识别、震相识别判据,结合神经网络技术和波形相关分析技术,通过对数字化台网记录数据的处理和分析,研制具有智能化的自动事件判别、震相识别、地震定位系统及提出日常的地震预测分析方法。由于对数字化地震波的时频分析能够提供给我们关于地震波瞬时频率、瞬时振幅和瞬时相位等方面的信息,所以本文开展的时频分析研究对提高处理数字化地震波特性参数精度、地震预测水平和地震应急技术系统的智能化程度等方面具有应用前景。

#### [ 参考文献 ]

- [ 1 ] Gabor D. Theory of communication[ J ]. IEEE ,1946 **93** :429 - 457.
- [ 2 ] Cohen L. Generalized phase - space distribution functions[ J ]. Math. Phys. ,1966 **7** :781 - 786.
- [ 3 ] Morlet J G ,Arens G Fourgeau E. Wave propagation and sampling theory : complex signal and scattering in multi - layered media[ J ]. Geophysics ,1982 **47** :203 - 211.
- [ 4 ] Barbarossa S. Analysis of multicomponent LFM signals by a combined Wigner - Hough transform[ J ]. IEEE Trans. Signal Processing ,1995 **43** :1511 - 1515.
- [ 5 ] Namias V. The fractional Fourier transform and its application in quantum mechanics[ J ]. Inst. Math. Its Appl. ,1980 **25** :241 - 265.
- [ 6 ] Mann S ,Haykin S. The chirplet transform : physical consideration[ J ]. IEEE Trans. Signal Processing ,1992 **43** :2745 - 2761.
- [ 7 ] Baraniuk R G ,Jones D L. Signal - dependent time - frequency analysis using a radically Gaussian kernel[ J ]. Signal Processing ,1993 **32** :263 - 284.
- [ 8 ] 张贤达,保铮. 非平稳信号分析与处理[ M ]. 北京:国防工业出版社,1995. 324 - 422.
- [ 9 ] 刘希强,周惠兰,郑治真,等. 基于小波包变换的滤波方法[ J ]. 西北地震学报,1999 **21**(3) :248 - 253.
- [ 10 ] 刘希强,周惠兰,李红. 基于小波包变换的地震数据时频分析方法[ J ]. 西北地震学报,2000 **22**(2) :143 - 146.
- [ 11 ] 刘希强,沈萍,张玲,等. 用小波变换能量线性度方法识别天然地震与爆破或塌方[ J ]. 西北地震学报,2003 **25**(2) :204 - 209.
- [ 12 ] 伯晓晨,李涛,刘路. Matlab 工具箱应用指南—信息工程篇[ M ]. 北京:电子工业出版社,2000. 399 - 455.
- [ 13 ] Claasen T A C M ,Mecklenbrauker W F G. The Wigner distribution - a tool for time - frequency signal analysis - Part III :relations with other time - frequency signal transformation[ J ]. Philips Jour. Research ,1980 **35** :372 - 389.
- [ 14 ] Choi H I ,William W J. Improved time - frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels[ J ]. IEEE Trans. On Acoust. Speech , Signal Processing ,1989 **37** :862 - 871.

## TIME – FREQUENCY METHOD AND ITS APPLICATION IN DIGITAL SEISMIC WAVE DATA PROCESSING

LIU Xi-qiang<sup>1</sup>, SHEN Ping<sup>2</sup>, SHAN Chang-lun<sup>1</sup>, JI Ai-dong<sup>1</sup>, LI Hong<sup>1</sup>, CAI Ming-jun<sup>3</sup>  
( 1. *Seismological Bureau of Shandong Province Jinan 250014 China* 2. *Institute of Geophysics CSB, Beijing 100081 China* 3. *Seismological Bureau of Yunnan Province Kunming 650041 China* )

**Abstract** :The time – frequency distribution of signal is more suitable for depicting unsteady signal than time – scale distribution. The development tendency of time – frequency analyses is improving the time – frequency conglomeration characteristics of signal and decreasing across disturbance energy item further. Based on the theory of time – frequency analyses on high order moment ,this paper applies time – frequency technology to digital seismic wave data processing first. Compared Choi – Willams time – frequency distribution results of imitation signal with Wigner time – frequency distribution with different order moment , We think that high order moment Choi – Willams time – frequency distribution has higher time – frequency conglomeration characteristics and weaker across disturbance energy item , which has application foreground to improving earthquake source and medium parameters precision and intelligentized degree of earthquake emergency.

**Key words** :Unsteady signal ;Wigner time – frequency distribution ;Choi – Willams time – frequency distribution ;Seismic wave processing