

文章编号: 0253-3782(2002)02-0169-07

小震的综合识别研究^{*}

沈 萍¹⁾ 郑治真²⁾ 刘希强³⁾ 滕云田¹⁾ 杨选辉²⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100045 中国地震局地震数据信息中心

3) 中国济南 250014 山东省地震局

摘要 采用现代数字信号处理方法, 对中国地震局地球物理研究所研制的数字地震仪在山西省大同地区 1999 年 11 月记录的三分向数字地震资料进行分析, 研究了数字地震记录信号的自动识别。结果表明, 通过采用长短时信号平均值比、谱分析和小波分析法提取特征参量进行综合识别的方法, 可对地震信号进行人机交互式自动识别, 且对多数 $M_L > 2.0$ 地震识别较好。

关键词 数字地震记录 谱分析 小波 综合识别

中图分类号: P315.61 **文献标识码:** A

引言

目前, 数字地震观测技术给我们提供了大量高精度、宽频带、大动态范围的精确记录, 为我们以更高的分辨率和更快的速度认识地震提供了观测条件。而我们面临的问题是如何运用现代数字信号处理的理论和方法, 从大量的数字地震记录中尽可能快和准确地提取有用的地震信息。其中, 一个基础的也是重要的问题就是对地震信号的定位和自动识别。地震信号的定位和自动识别对地震学研究具有重要作用, 是国际地震学观测与研究的一项重要内容, 而地震定位速度和精度的提高, 则可为地震学其它研究提供可靠信息。

20 世纪 80 年代以来, 宽频带数字地震观测成为国际地球物理学发展的主要趋势之一。近十多年来, 台网建设和利用宽频带数字地震资料进行的研究取得了很大进展。在国内, 中国数字化地震台网等一批数字地震台网的建立, 为我国地震学研究真正步入现代地震学阶段, 为地震事件的识别和定位奠定了观测基础。90 年代以后, 各国研究者利用各种有效的地震模式识别和神经网络技术对地震事件进行识别, 提高了识别精度。但是由于地震记录的多样性和复杂性, 对于地震信号的识别往往不尽如人意。人们需要研究自动识别宽频带高精度地震信号的方法(刘希强等, 2001)。基于上述考虑, 我们采用长短时信号平均值比法、谱分析方法、小波分析等综合方法, 对大同地区数字地震记录进行了分析, 较好地实现了地震事件人机交互式的自动识别。

* 国家自然基金资助项目。中国地震局地球物理研究所论著 02AC1010。
2000-12-28 收到初稿, 2002-01-22 收到修改稿并决定采用。

1 识别方法

识别方法包括时间域和频率域中的长短时平均值比和各种谱分析法等多种. 我们选取的方法是基于短时间内对数字地震记录的快速识别.

1.1 长短时信号平均值比方法

台网自动判别的最常用方法是时间域中长短时平均值比法(Allen, 1978). 该方法为利用短时间窗内观测数据的平均值与长时间窗内的平均值之比来确定是否有事件发生. 可表示为

$$p = \frac{\sum_{i=1}^N x(i)/N}{\sum_{j=1}^M y(j)/M} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, M \quad M \gg N \quad (1)$$

式中, $x(i)$ 表示短时间窗内的观测数据, $y(j)$ 表示长时间窗内的观测数据; M, N 分别表示长、短时间窗内观测数据的个数.

1.2 频谱分析法

这是在频率域内识别信号的重要方法. 此种方法包括富里叶变换、短时富里叶变换、沃尔什变换、最大熵谱和维格纳分布等. 其中, 富里叶变换法是人们普遍采用的方法, 是多年来识别地下核爆炸和天然地震的重要手段之一. 本文采用快速富里叶变换(FFT)进行研究(郑治真, 1993). 富里叶正变换公式为

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

设离散序列为 $\{x_k\}$, $k=0, 1, 2, \dots, N-1$. 离散富里叶正变换可用下式表为:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x(r) e^{-i(2\pi k r / N)} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad r = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

式中, N 表示资料总长度.

利用信号和噪声频谱成份的不同, 进行移动窗的长短时谱比计算, 以达到快速识别的目的.

1.3 小波分析法

小波分析法是目前地震学研究中的重要方法. 该方法在研究非稳态地震信号处理方面具有其它方法不可替代的优点. 它可在时间域和频率域内精确描述信号特性(Charles, 1992), 被誉为“数学上的显微镜”.

函数 $x(t)$ 的连续小波变换为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (4)$$

其中, a 为尺度参数, b 为平移参数. 实际计算中, 必须将连续小波离散化, 取 a 和 b 离散值的小波称为离散小波.

小波具有迅速衰减为 0, 且均值为 0 的特性. 小波的拉伸和压缩由尺度因子确定. 因此, 小尺度变换对应着信号所包含的高频成份, 大尺度变换对应信号所包含的低频成份.

小波分析有多种方法,其中包括正交小波和小波包等.由于小波包具有更好的时间-频率局部化性能,因此采用小波包进行计算.

小波包定义为

$$\begin{cases} \mu_0(x) = \sum_k p_k \mu_0(2x - k) \\ \mu_1(x) = \sum_k q_k \mu_0(2x - k) \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\mu_0(x) = \phi(x) \quad \mu_1(x) = \Psi(x)$$

这里, ϕ 为尺度函数, Ψ 为小波.

由上述公式可知,当尺度为 L 时,小波变换能将任意信号分解为 2^L 个子频段的局部时间-频率信息. 每个子频段的大小与数据采样率的大小和长度有关. 设地震波数据的采样率为 N 点/秒,数据长度为 T 秒,则观测信号的频段为 $[1/T, N/2]$ Hz. 当将观测信号进行尺度为 L 的小波包变换时, 2^L 个子频段的大小就等于 $(N/2 - 1/T)/2^L$ Hz. 将各频段信号分类存储在不同的小波包子空间中就完成了小波包分析的完全局部化过程(刘希强等,2000). 小波包变换的时频局部化过程决定了非稳态离散信号可以通过小波变换与重构(滤波)进行识别.

2 资料处理

2.1 资料选取

选取流动观测台记录的 1999 年 11 月大同附近天然地震记录进行分析. 作为一个例子,图 1 给出了原始三分向地震记录波形.

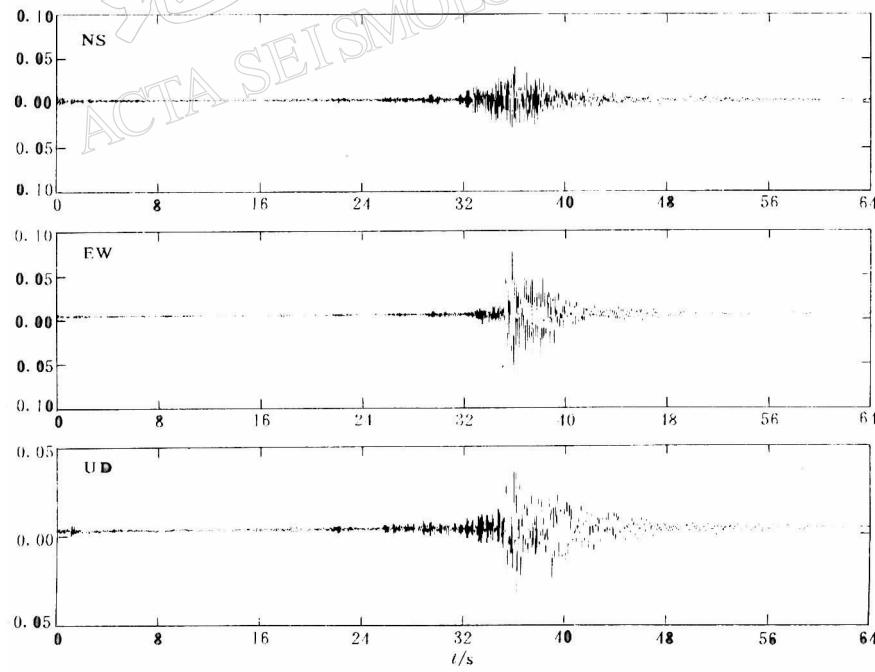


图 1 1999 年 11 月 11 日山西 $M_L=3.6$ 地震波形

2.2 长短时信号平均值比

将 24 小时的地震记录作为一整体, 取 4 s 记录作为短时间段、8 s 记录作为长时间段进行比值计算。不断移动时间窗, 当有地震信号时, 长短时比值达到一定阈值则认为地震发生。为避免将一些小脉冲作为地震信号而误识别, 本研究还对信号长短进行判断, 既判断地震发生, 又判断记录的地震信号长短。图 2 给出了地震信号长短时平均值比的例子。表 1, 2 给出了地震信号长短时平均值比结果。

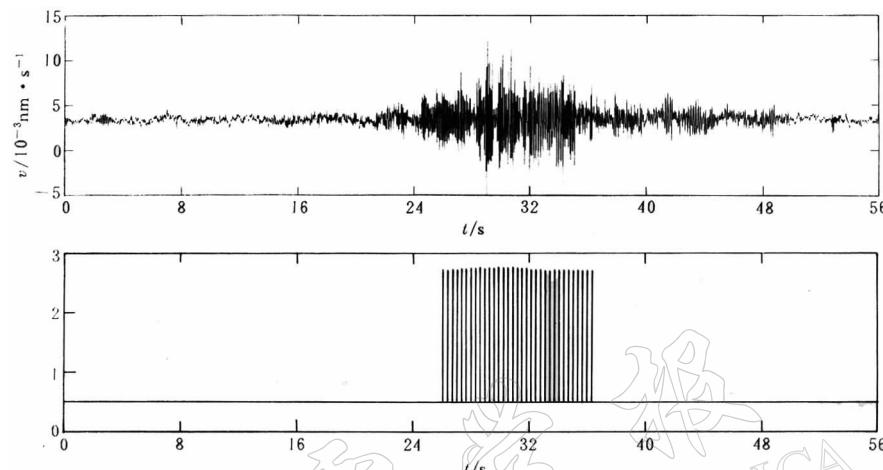


图 2 1999 年 11 月 6 日 $M_L < 1.0$ 地震长短时平均值比结果
上图为原始地震记录, 下图为该方法估计的信号起始点和信号长度

表 1 采用长短时平均比法对三分向地震事件的判别

年-月-日	时:分	M_L	信号长度	信号初始位置	判别位置
1999-11-06		<1.0	1 000	1 400	2 000
1999-11-06	14:39	1.1	1 500	3 000	3 000
1999-11-06	18:49	3.5	1 500	3 500	3 000
1999-11-07	05:57	3.1	1 500	3 100	3 500
1999-11-09	16:18	2.6	2 500	5 000	6 500
1999-11-10	09:24	2.6	1 000	3 200	3 500
1999-11-11			1 200	3 800	4 500
1999-11-11	03:56	2.5	1 000	1 500	2 500
1999-11-11	03:59	3.0	2 000	2 500	3 000
1999-11-11	04:38	3.6	1 000	4 200	6 000
			1 400	3 000	2 500
1999-11-11	12:36	2.4	2 000	3 600	1 500

2.3 谱比

分别对地震信号和噪声做频谱分析。图 3 给出了地震信号 P 波段和噪声频谱的分析结果, 通过快速富里叶变换看出, 地震信号和噪声谱分布明显不同。根据二者的差异, 首先分别计算长时窗内信号的频谱, 然后进行谱比计算, 即将短时窗内的频谱与长时窗内的频谱相除。据此我们发现, 当地震发生时谱比增大, 反之, 谱比变化微弱。表 3 给出

了采用 FFT 移动窗对地震事件的判别结果。

表 2 采用改进的长短时平均比法对三分向地震事件的判别

年-月-日	时:分	M_L	信号长度	信号初始位置	判别位置
1999-11-06		<1.0	1 000	1 400	1 440~2 780
1999-11-06	14:39	1.1	1 500	3 000	2 880~4 100
1999-11-06	18:49	3.5	1 500	3 500	X
1999-11-07	05:57	3.1	1 500	3 100	3 800~4 680
1999-11-09	16:18	2.6	2 500	5 000	X
1999-11-10	09:24	2.6	1 000	3 200	3 300~4 080
1999-11-11			1 200	3 800	1 600~2 740
	03:56	2.5	1 000	1 500	1 600~2 740
1999-11-11	03:59	3.0	2 000	2 500	X
1999-11-11	04:38	3.6	1 000	4 200	4 420~5 060
			1 400	3 000	3 260~4 540
1999-11-11	12:36	2.4	2 000	3 600	3 720~4 200

注: X 表示信噪比太低, 不能判别。

表 3 采用 FFT 移动窗对三分向地震事件的判别

年-月-日	时:分	M_L	信号长度	信号初始位置	判别位置
1999-11-06		<1.0	1 000	1 400	1 800
1999-11-06	14:39	1.1	1 500	3 000	3 500
1999-11-06	18:49	3.5	1 500	3 500	4 300, 7 000
1999-11-07	05:57	3.1	1 500	3 100	4 000
1999-11-09	16:18	2.6	2 500	5 000	5 100
1999-11-10	09:24	2.6	1 000	3 200	3 300, 5 000, 7 400
1999-11-10			1 200	3 800	4 300
1999-11-11	03:56	2.5	1 000, 1 000, 2 000	1 500, 4 300, 5 200	1 500, 5 100, 6 900
1999-11-11	03:59	3.0	2 000	2 500	2 300
1999-11-11	04:38	3.6	1 000	4 200	4 300
			1 400	3 000	4 000
1999-11-11	12:36	2.4	2 000	3 600	3 800

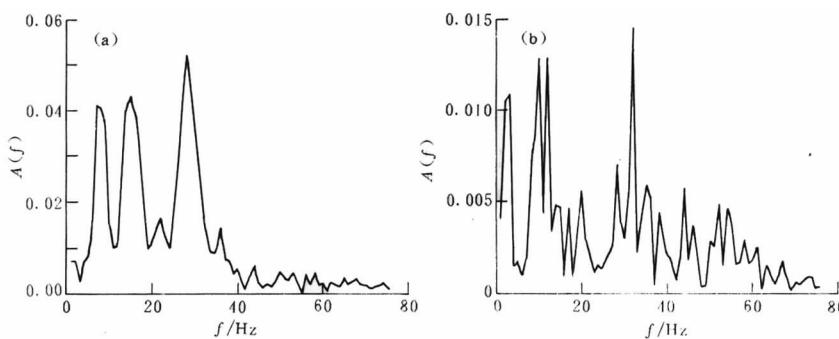


图 3 1999 年 11 月 6 日山西 $M_L < 1.0$ 地震谱和噪声谱
(a) 地震谱; (b) 噪声谱

2.4 小波分析

采用小波包方法对地震信号进行了分析。结果发现，在整个信号的频率分布中，明显看出时间分为几个阶段（这与地震的震源过程有关）。图 4 给出对地震信号进行小波分析的例子。由图 4 可精确地测量 S-P 的时差以及 P, S 波初至所对应的频率： $t_{S-P}=1.51$ s, $f_P=15.45$ Hz, $f_S=2.44$ Hz。P 波和 S 波的频率明显不同。

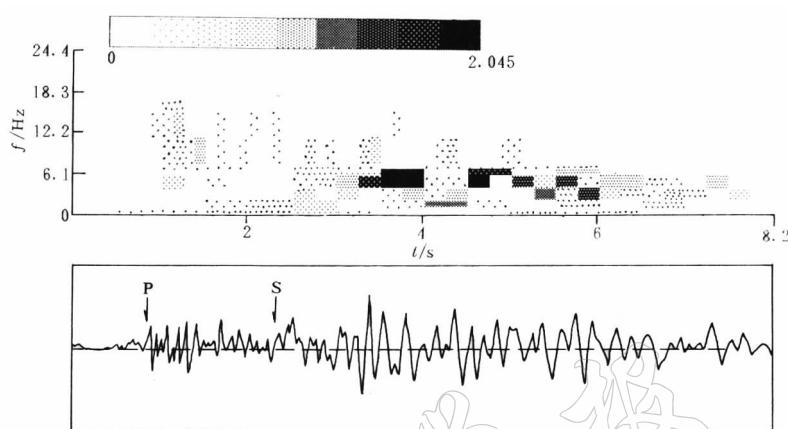


图 4 1999 年 11 月 6 日山西 $M_L < 1.0$ 地震小波分析结果

3 地震事件的综合判别

3.1 特征参数选取

长短时平均值比：确定记录事件的位置及信号的长度。

谱比：取震前一段噪声的频谱与地震 P 波频谱之比作为特征参数。

小波：确定地震波到时差 S-P。

多台定位：采用交切法对网内事件定位。

3.2 综合识别

综合识别是在上述各种识别方法基础上进行。若以上条件均满足，则确认为地震事件发生。结果表明，对所研究的地震，识别率达到 90%。

4 讨论和结论

1) 单独采用长短时平均值比、谱比、小波和定位方法对信号识别有一定效果。相比较，小波方法具有明显优势，它更能精细刻画地震信号特征。

2) 采用基于以上 4 种方法的综合方法，并结合交互式人机对话方法，可对地震信号进行有效识别。

3) 对地震事件判别质量的优劣与地震记录的信噪比有直接关系。这点可由 1999 年 11 月 11 日 $M_L = 3.0$ 和 $M_L = 3.6$ 地震进行比较得到证明。

4) 该项研究仅为试验结果。要得到普遍有效的识别判据，必须研究不同地区的不同记录资料，进行大量地震资料检验。

5) 地震信号的自动识别是目前国内地震学界研究中的难题. 目前尚未做到对地震信号实现全自动的高效识别. 识别效率的提高还需要做大量工作. 我们的方法尚属于试验阶段, 今后还要不断探索.

参 考 文 献

- 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
刘希强, 周蕙兰, 沈萍, 等. 2001. 智能化地震事件识别和定位系统研究现状及展望[J]. 国际地震动态, (1): 6~9
郑治真. 1993. 数字信号处理基础[M]. 北京: 地震出版社, 208~213
Allen R V. 1978. Automatic earthquake recognition and timing from single traces [J]. *Bull Seism Soc Amer*, 68(5): 1 521~1 532
Charles K C. 1992. *An Introduction to Wavelets*[M]. New York: Academy Press Inc, 328~332

STUDY ON THE METHOD FOR COMPREHENSIVE DISCRIMINATION OF SMALL EARTHQUAKES

Shen Ping¹⁾ Zheng Zhizhen²⁾ Liu Xiqiang³⁾
Teng Yuntian¹⁾ Yang Xuanhui²⁾

1) Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, Beijing 100081, China

2) Center for Seismic Data and Information, China Seismological Bureau, Beijing 100045, China

3) Seismological Bureau of Shandong Province, Jinan 250014, China

Abstract: In the paper, we apply the theory of modern digital signal processing to analysis 3-component digital seismic data recorded in Datong area of Shanxi Province by digital seismographs developed by the Institute of Geophysics, CSB in November 1999 and study the auto-discrimination of the recorded digital seismic signals. The results show that the method for comprehensive discrimination in connection with ratios between average values of long-time and shorttime signals, spectral analysis, and wavelet analysis can be used to auto-discrimination of seismic signals through alternate man-computer processing. Many $M_L > 2.0$ earthquakes were better discriminated.

Key words: digital seismic record; spectral analysis; wavelet; comprehensive discrimination