

地震事件自动检测新方法

周彦文¹, 刘希强²

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要:地震事件的自动准确检测是地震速报的基础。本文基于地震信号所具有的非高斯性、非线性以及地震波的线偏振性特征并结合长短时平均比方法, 提出了一种新的地震事件自动检测方法(EGLP)。基于山东数字化地震台网波形资料的研究结果表明, 新方法(EGLP)能有效抑制高斯噪声、突出地震信号, 提高了地震事件触发判断的准确性。

关键词: 非高斯; 非线性; 线偏振性; *STA/LTA*; 地震事件自动检测

中图分类号: P315.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2008)02-0102-05

A New Method of Automatic Seismic Event Detection

ZHOU Yan-wen¹, LIU Xi-qiang²

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China; 2. Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China)

Abstract: Detecting seismic event automatically and accurately is the base of earthquake rapid report. In this paper, a new method of automatic seismic event detection (EGLP) is proposed, which is based on the characteristics of seismic signal such as non-Gaussian, non-linear, plane polarization and *STA/LTA* method. Applying on Shangdong seismic network's digital seismic wave. It is found that the new method can suppress the Gaussian noise and make seismic signal evidence, improve the accuracy of seismic event detection.

Key words: Non-Gaussian; Non-linear; Plane polarization; *STA/LTA*; Automatic seismic event detection

0 引言

随着“十五”国家重点建设项目“中国数字地震观测网络”的完成, 我国的数字测震台站将达到近1100个、数字强震台站将达到1800余个^[1]。并且我国多个研究机构已经相继建立了规模不同的流动地震台阵, 中国地震局即将建成由600台宽频带数字地震仪组成的巨型科学流动地震台阵^[2]。上述情况表明, 我国的地震观测系统将产生海量的地震数据。如何从大量的数字地震记录中快速、准确的提取地震事件是我们面临的一个重要课题。

地震事件的自动检测可以提高地震观测数据的处理效率、是震相自动识别的基础^[3-6], 并且对提高地震台网的快速响应能力有重要意义。长短时平均比方法是一种既可以判断有无地震事件, 又可以检

测震相到时的算法。1976年Stevenson用长短时平均比方法进行初至波到时拾取^[7], 后来Allen^[8-9]、McEvelly和Majer^[10]、Baer和Kradolfer^[11]、Earle和Shearer^[12]都对该方法做了不同的改进。长短时平均比方法简单易行, 在信噪比高的情况下能得到很好的效果, 所以被广泛的用来检测地震事件以及拾取初至波的到时。王继等用这种算法从大量的地震数据中识别地震事件并提取地震记录^[13]; Mass等用该方法用于自动检测地震事件^[14]; Ileana等人用该算法用来构造识别因子来检测短周期面波^[15]。本文在长短时平均比方法的基础上, 并结合地震信号的非高斯性、非线性以及偏振特性, 试图提出一种新的地震事件检测方法(EGLP), 经研究该方法能

收稿日期: 2007-08-01

基金项目: 地震科学联合基金(105075)

作者简介: 周彦文(1982-), 男(汉族), 山西五台人, 在读研究生, 主要从事地震监测和数字地震波应用研究。

有效抑制高斯噪声、突出地震信号,并且可以起到减少地震事件检测误触发的作用。

1 方法

1.1 长短时平均比方法

确定一个滑动的长时间窗,在此窗口内再取一个短的时间窗,则长短时平均比可计算如下^[16]:短时窗内的平均能量为 $STA_i = \frac{x_i^2 - x_{i-N_{sta}}^2}{N_{sta}} + STA_{i-1}$,其中 $x_i (i = 1, 2, \dots, N_{sta})$ 为短时间窗内的数据, N_{sta} 为短时窗口内的点数, $STA_{i-1} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{sta}} x_j^2}{N_{sta}}$ 。长时窗内的平均能量为

$$LTA_i = \frac{x_{i-N_{lta}-1}^2 - x_{i-N_{lta}-N_{lta}-1}^2}{N_{lta}} + LTA_{i-1} \quad (1)$$

其中 $x_j (j = 1, 2, \dots, N_{lta})$ 为长时间窗内的数据, N_{lta} 为长时间窗口内的点数, $LTA_{i-1} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{lta}} x_j^2}{N_{lta}}$ 。时间窗逐点滑动,当能量比 $R = STA_i/LTA_i$ 超过预先设定的阈值时,则判定有地震事件发生。

1.2 信号的非高斯、非线性检验方法

令随机变量 x 具有概率密度 $f(x)$, 其矩生成函数(第一特征函数)定义为

$$\Phi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{j\omega x} dx \quad (2)$$

随机变量的累积量生成函数(第二特征函数)定义为 $\Psi(\omega) = \ln\Phi(\omega)$, k 阶累积量定义为

$$c_k = (-j)^k \left. \frac{d^k \Psi(\omega)}{d\omega^k} \right|_{\omega=0} \quad (3)$$

对于一个零均值的时间序列(实际上,一个非零均值的时间序列可通过减去均值估计变成零均值),二阶至四阶累积量的表达式分别是

$$c_{2x}(\tau) = E\{x(n)x(n+\tau)\} = R_x(\tau) \quad (4)$$

$$c_{3x}(\tau_1, \tau_2) = E\{x(n)x(n+\tau_1)x(n+\tau_2)\} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} c_{4x}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = & E\{x(n)x(n+\tau_1)x(n+\tau_2)x(n+\tau_3)\} \\ & - R_x(\tau_1)R_x(\tau_2 - \tau_3) - R_x(\tau_2)R_x(\tau_3 - \tau_1) \\ & - R_x(\tau_3)R_x(\tau_1 - \tau_2) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $R_x(\tau) = E\{x(n)x(n+\tau)\}$ 是 $x(n)$ 的自相关函数。

以高斯随机变量 $x(m, \sigma^2)$ 为例, x 的概率密度 $f(x)$ 为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x-m)^2}{\sigma^2}\right) \quad (7)$$

其特征函数为 $\phi(\omega) = \exp(jm\omega - \frac{1}{2}\sigma^2\omega^2)$ 。对上式取对数,得到累积量生成函数为 $\psi(\omega) = \ln\phi(\omega) = jm\omega - \frac{1}{2}\sigma^2\omega^2$ 。上式已经是 ω 的幂级数,直接得到 x 的 k 阶累积量

$$C_1 = m, \quad C_2 = \sigma^2, \quad C_k = 0 (k \geq 3) \quad (8)$$

用双相干系数检测信号的非高斯和非线性特征,双相干系数定义如下:

$$K_{2x}(\omega_1, \omega_2) = \frac{B_x(\omega_1, \omega_2)}{\sqrt{P(\omega_1)P(\omega_2)P(\omega_1 + \omega_2)}} \quad (9)$$

其中 $P(\omega) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} c_{2x}(\tau) e^{-j\omega\tau}$ 为信号的功率谱, $B_x(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} c_{3x}(\tau_1, \tau_2) e^{-j\omega_1\tau_1} e^{-j\omega_2\tau_2}$ 为信号的双谱。

由于高斯过程的高阶累积量恒等于零,所以当双相干系数和三相干系数对所有的 ω_i 都恒等于零时,我们就判断该过程是高斯过程,否则,它必定是非高斯过程^[17]。

另一方面,若双相干系数和三相干系数的幅值对所有频率都恒等于某常数时,我们就说所考察的信号是线性过程,否则就说是非线性过程。

这只是理论上的分析结果,由于实际噪声信号的复杂性,实际噪声序列的高阶累积量并不恰好等于零,所以需要从统计意义上来判断相干系数的估计值是否显著性的不等于零。为此在实验中引入了假设检验的方法^[18-19]:以虚警概率 PFA 表示非高斯性的可能性(归一化),即当 PFA 为 0 时,信号为高斯的,当 PFA 为 1 时,信号为非高斯的。在此基础上进行非线性检验,以信号的内四分位数的理论值 Rt 和估计值 Re 的偏差来判断信号是否是非线性的,当偏差较大时,判断为非线性;当偏差较小时,判断为线性。我们在此基础上构造归一化的非线性检测因子:

$$L = \frac{|Rt - Re|}{\max(Rt, Re)} \quad (10)$$

在实际操作中计算地震信号的虚警概率 PFA 和归一化的非线性检测因子 L 时是运用了 MATLAB 中的高阶谱工具箱中的 GLSTAT 函数,把源程序做了适当的修改后计算其 PFA 和 L 值。

1.3 信号的偏振性分析方法

由于 P 波和 S 波是线性偏振的纵波和横波,而

噪声不具有偏振特性,因此可以用偏振度来描述地震波偏振特性的变化。定义某时间窗口内观测信号的协方差矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} \text{Var}(x) & \text{Cov}(x,y) & \text{Cov}(x,z) \\ \text{Cov}(x,y) & \text{Var}(y) & \text{Cov}(y,z) \\ \text{Cov}(x,z) & \text{Cov}(y,z) & \text{Var}(z) \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, x, y, z 代表三分向记录, $\text{Var}(x) = \text{Cov}(x, x)$, 分量 x 和 y 的协方差矩阵定义为 (x 和 z, y 和 z 的协方差表示形式相同)

$$\text{Cov}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(i) - \mu_x] [y(i) - \mu_y] \quad (12)$$

μ_x 和 μ_y 分别是分量 x 和 y 的平均值, 满足方程 $MX = \lambda X$ 的三维(非零)向量 X 是代表椭球体的三个主轴方向, 这三维向量就是矩阵 M 的特征向量。特征向量对应的特征值为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$), 偏振度定义为^[20]

$$F = 1 - \frac{\lambda_2 + \lambda_3}{2\lambda_1} \quad (13)$$

当地震波是完全线偏振时, 偏振度 F 等于 1; 而地震波没有线偏振特性时, 偏振度 F 等于 0。

考虑到当地震发生时, 地震信号能量相对噪声较强, 且背景噪声大多是高斯或似高斯型的^[21], 而地震信号是非高斯、非线性、线性偏振的, 所以综合地震事件发生后能量、非高斯性、非线性和地震波偏振特性, 我们提出了一种新的地震事件检测方法, 即

$$\text{EGLP} = R \times \text{PFA} \times L \times F \quad (14)$$

2 地震资料分析

选取山东省地震台网记录的 2000—2007 年震中距在 100 km 以内的 41 次 3 级以上的地震, 对其分别用 STA/LTA 检测器和检测器检测, 得出的事件触发阈值统计结果见表 1。可以发现: (1) 100 km 以内 3 级以上地震的 STA/LTA 检测阈值为 3.1, EGLP 检测阈值为 2.5。这两种检测器对这 41 次事件的检测成功率都为 100%, 并且在研究窗口内均无误触发。(2) 对比含有地震事件记录的噪声段内的 STA/LTA 与 EGLP 的检测结果, 发现 EGLP 对背景噪声信号不敏感, 多数情况下计算值为 0 且起伏波动很小, 表现出 EGLP 对噪声的鲁棒性(图 1)。(3) 比较正常记录条件下(不含有地震事件记录)的噪声段内的 STA/LTA 与 EGLP 结果, 发现 EGLP 除出现偶尔的脉冲外, 其余计算值都接近为 0, 未有出现误触发现象; 对背景噪声信号不敏感, 检测曲线在地震信号到达前和地震信号结束后都有不同程度的波

动, 而 STA/LTA 分析结果表现出较大的波动性。两种算法在处理 2005 年 12 月 22 日 19 时的背静噪声时发现: 2005 年 12 月 22 日 19 时 21 分 52 秒的位置 STA/LTA 检测曲线超过阈值(箭头所指 1 302 秒处)而出现误触发现象(图 2), 但检测曲线没有误触发, 表现出 EGLP 检测器对噪声的鲁棒性。

表 1 山东地震台网 2000—2007 年震中距在 100 km 以内的 3 级以上地震事件触发阈值表

日期	时刻	震级/ M_L	震中位置		震中距 /km	信噪比 /dB	R	T
			E	N				
2000-08-07	23:18	3	37°53'	122°14'	80.7	26.8	4.9	4.2
2000-09-11	2:20	3	37°32'	121°17'	9.54	58.3	4.9	4.9
2001-04-14	19:6	3.8	35°47'	119°02'	12.07	41.5	4.9	4.5
2001-10-01	11:30	3.5	38°00'	121°44'	61.3	32.5	4.9	4.7
2002-02-17	22:11	3.4	37°4'	122°40'	49.2	27.5	4.9	4.4
2002-07-25	2:30	3	37°41'	122°13'	59.8	37.7	4.9	4.4
2002-07-30	9:1	3.5	37°53'	120°36'	80.02	28.2	4.9	4.6
2002-09-22	19:51	3.7	37°07'	121°00'	28.5	30.7	4.9	4.7
2003-01-23	3:28	3.7	35°30'	120°46'	70.5	8.1	3.1	2.9
2003-02-23	3:11	3.5	37°58'	120°42'	78	16.8	4.2	3.4
2003-03-18	10:6	3.6	38°4'	121°44'	62.9	21.7	4.9	3.4
2003-04-13	1745	3.4	34°36'	116°12'	90	9.6	3.7	2.7
2003-05-07	19:34	3.7	37°41'	121°18'	19.66	47	4.9	4.9
2003-06-05	18:35	4.2	36°14'	120°40'	31.2	41.2	4.9	4.9
2003-06-10	23:34	3.1	36°13'	120°39'	31.2	20.8	4.7	4.2
2003-06-12	12:37	3.2	36°14'	120°39'	31.2	27.6	4.9	4.7
2003-06-12	17:33	4	36°14'	120°39'	31.2	37.3	4.9	4.8
2004-10-21	2:43	3.3	37°13'	121°12'	37.7	27.8	4.9	4.7
2004-11-01	14:40	3.8	36°10'	120°40'	27.2	30	4.9	4.8
2005-01-18	12:9	4.3	36°49'	121°26'	66	17	4.6	4.1
2005-02-15	10:9	3.8	37°38'	121°43'	80.6	27.1	4.9	4.5
2005-04-12	18:27	3.7	35°02'	117°45'	33.7	31.7	4.9	4.8
2005-04-12	18:38	3.6	35°02'	117°47'	31.3	20.9	4.8	4
2005-04-27	2:31	3.2	35°7'	115°23'	41.5	19	4.6	4.2
2005-04-27	10:26	4	35°33'	115°22'	41.5	34.9	4.9	4.9
2005-05-09	19:2	4.5	37°37'	121°50'	40.67	53.5	4.9	4.9
2005-05-10	3:11	3.3	37°34'	121°53'	64.67	37	4.9	4.7
2005-05-10	6:30	4	37°34'	121°54'	63.6	40.2	4.9	4.8
2005-06-10	7:3	4.3	34°48'	118°28'	38.7	43.4	4.9	4.9
2005-07-22	21:5	4.3	37°30'	122°36'	20.8	56.6	4.9	4.9
2005-10-26	12:16	3.1	35°28'	117°13'	65.5	26	4.9	4.2
2006-02-08	14:21	3.2	35°13'	118°32'	59.8	22	4.8	4.6
2006-04-09	17:23	4.6	35°40'	115°25'	89.4	20.9	4.7	4.5
2006-04-25	15:17	3.5	35°47'	116°13'	95.1	33.1	4.9	4.8
2006-04-27	6:27	3.4	35°22'	118°44'	60.2	46.4	4.9	4.8
2006-05-21	12:15	3.2	35°26'	116°53'	74.1	14	4.2	2.5
2006-06-27	7:6	3.4	35°57'	118°18'	84.1	28	4.9	4.5
2006-09-12	10:58	3.3	35°07'	115°22'	15.7	14.6	4.1	4.7
2006-11-07	11:55	3.2	37°17'	121°45'	41.5	37.4	4.9	4.8
2006-12-26	15:41	3.5	35°37'	116°28'	26.3	24.1	4.8	3.3
2007-04-08	20:46	3.9	35°59'	115°38'	91.5	13.1	3.7	3

3 讨论与结论

(1) 基于地震信号的能量突变、非高斯性、非线

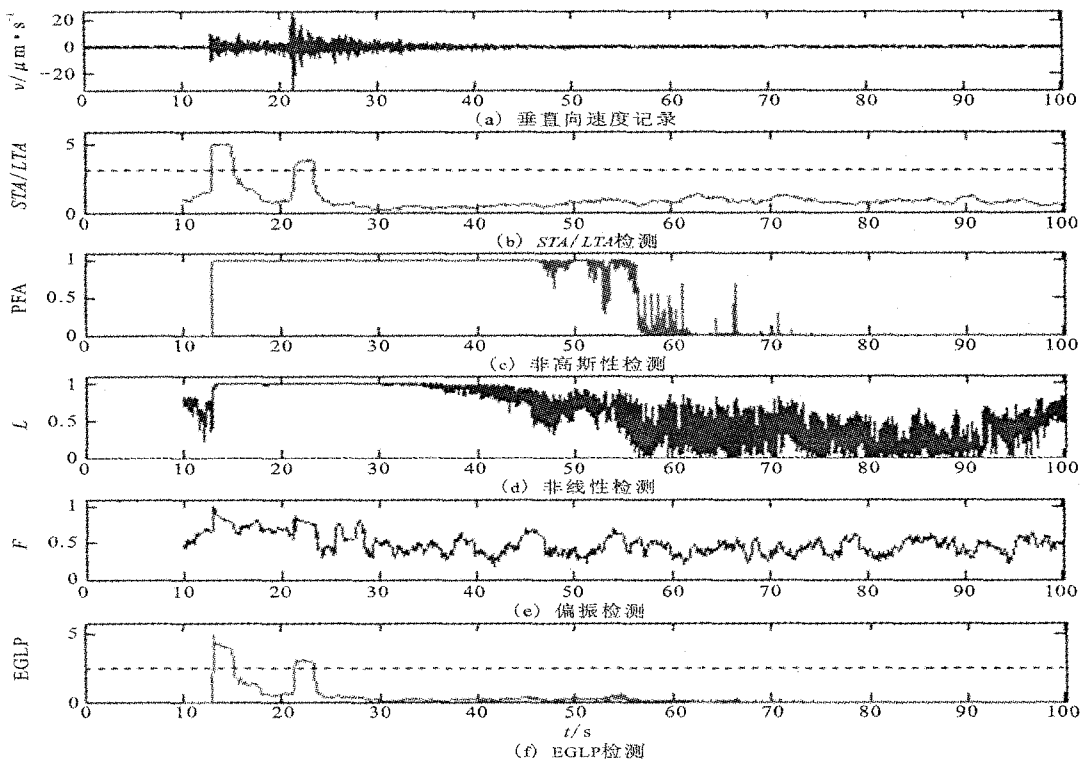


图1 荣成台记录的2005年5月10日烟台3.3级地震及事件触发参数变化

Fig.1 The Yantai M_L 3.3 earthquake on May 10, 2005, record and event detection value recorded by RCH station.

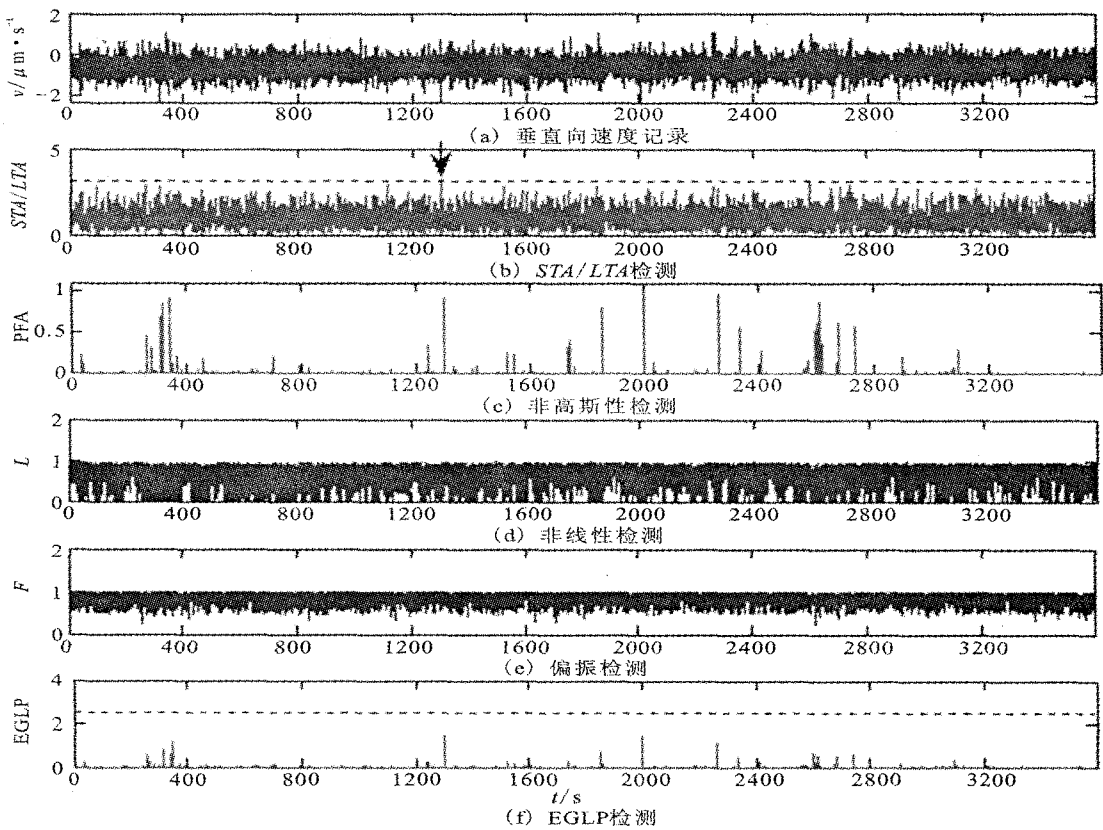


图2 2005年12月22日平度台记录的噪声及事件触发参数变化

Fig.2 Noise record and event detection value recorded by PDU station on Dec. 22, 2005.

性和偏振特性,本文提出了一种新的地震事件检测方法(EGLP),得到了100 km以内3级以上地震的STA/LTA和EGLP检测地震事件的触发阈值。

(2) EGLP检测器在对地震信号做非高斯、非线性检验中应用了高阶统计量方法。由于高阶统计量可以有效地检测出地震信号的非高斯和非线偏振性特征,而地震信号中出现的噪音大多是高斯或似高斯型的,而高斯信号的高阶统计量为0,所以EGLP检测方法有抑制高斯噪声的作用。经过实际的地震事件检测发现,地震检测器具有有效检测地震

事件和抑制高斯噪声的能力,和传统的STA/LTA检测方法相比,地震事件的错误报警率得到了进一步降低。

(3) 在对较大振幅的噪声干扰的处理中发现,该方法在剔除较大振幅的干扰时有一定的困难(图3),主要因为单从能量的角度来看,这种噪声很接近地震信号,所以不能有效的辨认。如果脉冲型噪声的频率分布与地震信号有明显差异的话,从频率域增加约束条件,这一问题渴望得到解决,这有待在后续的工作中进一步探索。

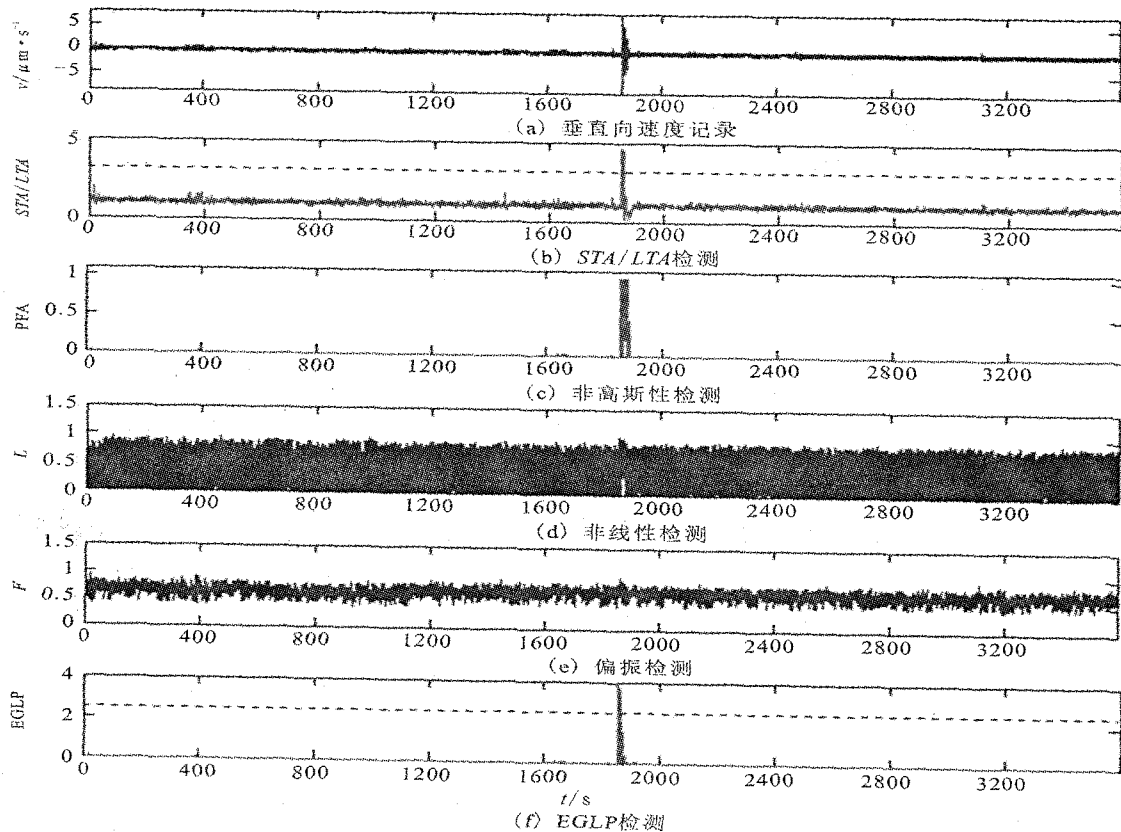


图3 2005年12月19日平度台记录的噪声及事件触发参数变化

Fig. 3 Noise record and event detection value recorded by PDU station on Dec. 19, 2005.

[参考文献]

- [1] 金星,李山有,李祖宁,等. 展望地震监测台网的发展与应用[J]. 中国地震,2006,22(3):242-248.
- [2] 刘启元,吴建春,等. 论地震数值预报关于我国地震预报研究发展战略的思考[J]. 地学前缘,2003,10(特刊):217-224.
- [3] 朱元清,佟玉霞. 数字化台网的近震震相自动识别[J]. 西北地震学报,2002,24(1):5-12.
- [4] 刘希强,周蕙兰. 基于小波包变换的弱震相识别方法[J]. 地震学报,1998,20(4):373-380.
- [5] 王海军,靳平,刘贵忠,等. 区域震相初至估计[J]. 西北地震学报,2003,25(4):298-303.
- [6] Sleeman R, TOrid V E. Robust automatic P-phase picking: An on-line implementation in the analysis of broad-band seismogram recording[J]. Phys. Earth Planet Inter., 1999,113:265-275.
- [7] Stevenson R. Microearthquakes at Flathead Lake, Montana: A study using automatic earthquake processing[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1976,66:61-79.
- [8] Allen R. Automatic earthquake recognition and timing from single trace[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1978, 68:1521-1532.

- [8] 童崇光. 中国东部中生代裂谷系[J]. 石油学报, 1980, 1(1):19-26.
- [9] Ye Hong, Zhang Botao, Mao Fengying. The Cenozoic tectonic evolution of the Great North China: two types of rifting and crustal necking in the Great North China and their tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 1987, 133: 217-777.
- [10] 邓起东, 闵伟, 晁洪太, 等. 渤海地区新生代构造与地震活动 [A]//卢滨涛, 高维明, 陈国星, 等主编. 新构造与环境 [C]. 北京:地震出版社, 2001:218-233.
- [11] 王国纯. 郯庐断裂与渤海海域反转构造及花状构造[J]. 中国海上油气(地质), 1998, 12(5):289-295.
- [12] 蔡东升, 罗毓晖, 姚长华. 渤海莱州湾走滑拉分凹陷的构造研究及其石油勘探意义[J]. 石油学报, 2001, 22(2):19-24.
- [13] 孙景耀, 刘松, 王世民, 等. 构造活动对莱州湾凹陷油气成藏的影响[J]. 中国海上油气, 2006, 18(5):300-303.
- [14] 王志才, 邓起东, 杜宪宋, 等. 莱州湾海域郯庐断裂带活断层探测[J]. 地震学报, 2006, 28(5):494-502.
- [15] 胡政. 郯庐断裂莱州湾段构造特征[J]. 西北地震学报, 1993, 15(1):75-81.
- [16] 高祥林. 渤海中部郯庐断裂带的近期活动与渤海新近纪新生断裂[J]. 地质科学, 2006, 41(2):355-364.
- [17] 周斌, 张英凯, 李继训. 渤海及邻区地震地质、地球物理场和地震活动特征[J]. 西北地震学报, 2000, 22(3):333-337.
- [18] 张岭, 刘劲松, 都天姚, 等. 渤海湾盆地及其邻域地区地壳与上地幔层析成像[J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2007, 37(11):1444-1455.
- [19] 宋国奇. 郯庐断裂带渤海段的深部构造与动力学意义[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2007, 30(6):663-667.
- [20] 刘光夏, 赵文俊, 张先. 郯庐断裂带渤海段的深部构造特征 - 地壳厚度和居里面的研究结果[J]. 长春地质学院学报, 1996, 26(4):388-391.
- [21] 万天丰, 朱鸿. 郯庐断裂带的最大左行走滑断距及其形成时期[J]. 高校地质学报, 1996, 2(1):14-27.
- [22] Yin A, Nie S Y. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan - Lu and Honam fault system, eastern ASIA[J]. *Tectonics*, 1993, 12(4):801-813.
- [23] 朱光, 王勇生, 牛漫兰, 等. 郯庐断裂带的同造山运动[J]. 地学前缘, 2004, 11(3):169-182.
- [24] Zhu G, Wang Y S, Liu G S, et al. 40Ar/39Ar dating of strike-slip motion on the TanLu fault zone. East China[J]. *Journal of Structural Geology*, 2005. 27(8):1379-1398.
- [25] 朱光, 刘国生, 牛漫兰, 等. 郯庐断裂带的平移运动与成因[J]. 地质通报, 2003, 22(3):200-206.
- [26] 朱光, 王道轩, 刘国生, 等. 郯庐断裂带的伸展活动及其动力学背景[J]. 地质科学, 2001, 36(3):269-278.

(上接 106 页)

- [9] Allen R. Automatic phase pickers their present use and future prospects[J]. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1982, 72:225-242.
- [10] McEvelly T, Majer E. ASP: A Automated Seismic Processor For Microearthquake Networks[J]. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1982, 72(1):303-325.
- [11] Baer M, Kradolfer U. An Automatic Phase Picker For Local And Teleseismic Events[J]. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1987, 77(4):1437-1445.
- [12] Earle P, Shearer P. Characterization of global seismogram using an automatic - picking algorithm[J]. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1994, 84(2):366-376.
- [13] 王继, 陈九辉, 刘启元, 等. 流动地震台阵观测初至震相的自动检测[J]. 地震学报, 2006, 28(1):42-51.
- [14] Massa M, Ferretti G, Spallarossa D, et al. Improving automatic location procedure by waveform similarity analysis: An application in the South Western Alps (Italy) [J]. *Phys. Earth Planet Interiors*. 2006, 154:18-29.
- [15] Tibuleac M, Britton J. An Automated Short - Period Surface - Wave Detection Algorithm[J]. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2006, 96(1):334-343.
- [16] Withers M, Aster R, Yong C, et al. A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic. phase and event detection[J]. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1998, 88(1):95-106.
- [17] 张贤达. 时间序列分析 - 高阶统计量方法[M]. 北京:清华大学出版社, 1996.
- [18] 唐震, 程玉胜. 舰船辐射噪声的非高斯特性和非线性检验[J]. 青岛大学学报, 2002, 15(3):63-65.
- [19] Hinich M J, Wilson G R. Detection of non-Gaussian signals in non-Gaussian noise us the bispectrum [J]. *IEEE TransAcoust., Speech, Signal processing*, ASSP38:1126-1131.
- [20] Jurkevics A. Polarization analysis of three-component array data [J]. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1988, 78:1725-1743.
- [21] 王书名, 朱培民, 李宏伟, 等. 地球物理学中的高阶统计量方法[M]. 北京:科学出版社, 2006.