

# 基于 MATLAB 的准实时背景噪声计算 分析软件研制\*

王 俊<sup>1</sup>, 缪发军<sup>1</sup>, 詹小艳<sup>1</sup>, 高景春<sup>2</sup>

(1. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014; 2. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 针对目前我国省级区域数字测震台网所运行的 JOPENS 系统, 利用 Matlab 语言开发了采用功率谱概率密度函数的背景噪声计算分析软件。实现了对数字地震台网的数据记录质量、观测系统的健康状态以及背景噪声源变化的准实时监控, 计算结果的有效频带范围为 90 s ~ 35 Hz, 对信号的最小分辨率约为 0.012 Hz。软件根据功能需求进行模块化设计, 并通过 TaskControl 定时任务控制终端来进行控制和管理, 以减少各模块之间的相互联系, 从而保证软件运行的持久和稳定。2011 年 1 月在江苏省数字地震台网进行实际部署, 运行情况和实际效能均良好。

**关键词:** 测震台网; 数据记录质量; 背景噪声源; 功率谱概率密度函数; JOPENS 系统

**中图分类号:** P315-391

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2013)02-0231-07

## 0 引言

目前, 我国的数字化地震观测系统基本已经是由宽频带、大动态、高分辨的地震仪器与 GPS、RS、网络通讯技术等构成的新系统。经过“中国数字地震观测网络项目”后, 全国共有 32 个省级区域数字测震台网, 固定数字测震台站已达 1 000 余个(刘瑞丰等, 2008), 是服务于我国数字地震学、防灾减灾研究的主要数据来源。区域数字测震台网在功能上除了具备传统的震源参数测定外, 也正逐步拓展为多用途的监测系统, 如地震预警、深低频脉动监测、背景噪声层析成像以及台风振动监测等(金星等, 2006)。然而, 稳定的观测系统和高质量的记录数据是上述效能发挥的首要条件。在宽频带记录系统中, 系统的瞬态变化、仪器毛刺、数据记录的阶跃、尖峰、以及由于系统故障引起的信号失真(如记录信号中叠加了高频电流信号等)和重大环境干扰源的出现等, 都是影响数据记录质量的重要因素(Bormann, 2012)。面对宽(或甚宽)频带、高密度

台站的精确地震监测、预警及地震学研究的需求, 沿用传统以“事件”为中心的系统监控技术, 显然已经不能满足现在和未来的实际需要。因此, 如何及时了解观测系统运行的健康状态、保证地震台网实时记录的数据质量, 就成为当前数字化地震台网系统监控技术中的重要研究课题之一。

随着认识水平的提高, 人们逐渐关注实时记录的背景噪声, 希望它能提供科学有用的信息。在数字地震观测系统实时记录中, 除了真实的地震信号外, 同时还包含了由于系统故障引起的各种失真信号、以及台站周围的环境噪声干扰等信息(McNamara, Boaz, 2005; 王俊等, 2009); 这就意味着实时、连续记录的信号即可反映地震观测系统的运行状态。“十五”项目后, 各省级区域地震台网中心均采用 JOPENS 系统对地震数据进行接收、交换、存储及处理, 统一的技术平台为后续的数据深加工技术开发提供了基础保障。笔者结合 JOPENS 系统, 利用 Matlab 平台研发了运用功率谱概率密度函数, 来对背景噪声进行自动计算, 从而实现了对数字地震台网数据记录质量、观测系统的健康状态以及背景噪声源变化的准实时监控。

\* 收稿日期: 2012-09-24.

**基金项目:** 地震行业科研专项(201008002)、中国地震测震台网青年专项(20120107)、中国地震局三结合(20120901)和江苏地震局青年基金(201204)共同资助。

## 1 计算原理

### 1.1 数据预处理

一般情况下,在背景噪声的计算研究过程中,记录波形中的地震信号、观测系统的瞬态变化,仪器的毛刺(如数据记录间跃、限幅、尖峰、脉冲标定等)都会被去除或被进行归一化处理(Campillo, Paul, 2003; McNamara, Buland, 2004)。但 McNamara 和 Buland (2004) 在研究美国大陆地区背景噪声水平时,认为记录过程中的这些信号相对于低水平的背景噪声是低概率的事件,在对台站的背景噪声水平进行评价时,可以将它们包含在内,并且认为这些信号是非常有用的,其概率值的大小可以用来评价地震观测系统的运行状态和记录数据的质量。为了实现量化分析,本文以各个台站单通道每小时的实时记录波形作为计算样本,通过软件中的 CTN 模块自动从台网中心 JOPENS 系统的流服务器上读取原始波形数据(图 1),并进行必要的预处理:(1) 去除记录数据中的线性趋势;(2) 将每条计算样本分段,并按 50% 进行重叠,每段的长度  $L$  参照 Peterson (1993) 的做法,并取为 81.92 s (即  $L = 2. \wedge 13$ )。

### 1.2 功率谱密度的计算

功率谱密度的计算采用 Matlab 中提供的 WELCH 方法,该方法是改进后的分段平均周期法,属于功率谱密度的非参数估计方法(万永革, 2007; 张志勇, 2011)。为了最大程度地减小重叠后“频谱泄露”效应、增加频峰的宽度,采用了汉宁窗(Hanning)函数来提高频谱的分辨率,汉宁窗长度取  $N = L/2$ ,各段的数据表示为

$$x_i(L) = [x(\frac{L}{2}i), \dots, x(\frac{L}{2}(i+2))] \quad (i=0, 1, \dots, k-1). \quad (1)$$

加窗平滑处理并计算各段频谱

$$X_i(m) = \sum_{n=0}^{L-1} [W(k) \cdot x_i(k)] e^{-j\frac{2\pi}{N}mn}. \quad (2)$$

各段周期图估计为

$$S_i(m) = \frac{1}{UL} |X_i(m)|^2. \quad (3)$$

$$\text{其中, } U = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} [W(n)]^2.$$

求  $k$  段谱的平均

$$\hat{S}(m) = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} S_i(m). \quad (4)$$

其中,每段信号的功率谱密度是运用 FFT 算法来实现,取每段信号功率谱的平均值作为整个计算样本的功率谱值。再根据仪器的传递函数在频域里扣除仪器响应,即得到每一条计算样本的速度功率谱密度结果。

### 1.3 概率密度函数的计算

可近似地认为数字地震观测系统具有因果性、时不变的特征(中国地震局监测预报司, 2007),因此每一条记录信号反映的是记录系统在某一特定时刻的状态,其记录过程具有唯一性,因此信号出现的概率值代表观测系统运行中所呈现出的状态。于是,可以利用信号随频率的概率密度函数分布来对观测系统的运行状态进行评估(McNamara, Boaz, 2005),具体步骤如下:

(1) 将每一条功率谱密度在全频段内,以 1/8 倍频为单位间隔滑动地计算平均功率谱,在短拐角周期  $T_s$  和长拐角周期  $T_L = 2 \times T_s$  内的平均功率谱值,赋给几何中心周期  $T_c$ ,

$$T_c = \text{sqrt}(T_s \times T_L). \quad (5)$$

$T_s$  按 1/8 倍频增加,即  $T_s = T_s \times 2. \wedge 0.125$ ,对于采样率为 100 Hz 的观测系统来说,有效频率范围可以达到 90 s ~ 35 Hz。

(2) 在某一时间段内,对于某一给定的中心频点,各种记录信号的功率谱概率密度函数(PDF)表示为

$$P(T_c) = N_{pT_c} / N_{T_c}. \quad (6)$$

$N_{pT_c}$  是功率谱值在 -200 ~ -80 dB 范围内 1 dB 单位间隔内的功率谱条数,  $N_{T_c}$  是在中心频点  $T_c$  上,单位时间内的功率谱总数。

(3) 台站环境背景噪声水平的均方根值(RMS),根据 Bormann (2012) 提出的下式进行计算,

$$a_{\text{RMS}} = \{P \times (f_u - f_l)\}^{1/2} = (P \times f_0 \times \text{RBW})^{1/2}. \quad (7)$$

式中,  $P$  为 Matlab 计算出来的双边功率谱密度,  $RBW = (f_u - f_l)/f_0$  为相对带宽,  $f_u$  为分度倍频程上限频率,  $f_l$  为分度倍频程下限频率。

## 2 系统结构

### 2.1 系统模块

为了使软件运行稳定且计算高效, 本研究将系统中的各个功能进行分解, 按模块进行设计, 各个模块之间使用 JMS 进行消息传递, 使用 EJB、ODBC 技术进行远程数据传递和访问数据库。通过将各个模块添加到 Taskcontrol 定时任务控制器中, 实现对各模块的联系、定时控制及管理, 从而减少系统中各个功能模块之间的直接联系, 使得整个系统中各个功能模块之间的逻辑部署变得简单而清晰, 结构框架见图 1。

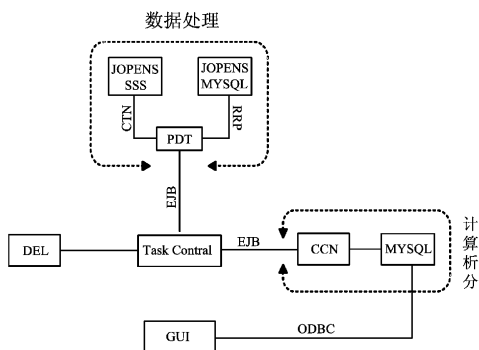


图 1 自动准实时背景噪声分析计算软件系统模块结构

Fig. 1 The system module structure of automatic quasi-real-time background noise analysis and calculation software

RRP 模块: 运用 ODBC 数据库连接技术, 从台网中心 JOPENS 系统的数据库服务器读取台站的基本参数和仪器响应等信息。

CTN 模块: 通过 Server2Server 服务, 从台网中心 JOPENS 系统的流服务器上获取连续波形数据。

PDT 模块: 负责将在原始数据进行计算前的各种预处理。

CCN 模块: 是核心计算部分, 并通过 ODBC 数据库连接技术将计算结果写入指定的数据库进行存储。

DEL 模块: 定时清理已计算过的数据和内存

变量, 以保证系统的稳定和持久运行。

GUI 模块: 负责根据用户的指定条件获取数据里的计算结果、进行显示、编辑等。

### 2.2 计算流程

各模块的启动和实际运行是通过 Taskcontrol 来控制的, 如图 2 所示, 用户将只需将各模块的路径和执行时间添加到任务列表中, 控制终端就会自动检测各模块的执行时间, 一旦设定的时间与计算机当前时间一致时, 就立即启动相应模块, 其余时间处于等待状态, 设计允许添加的任务最多可达 120 个。

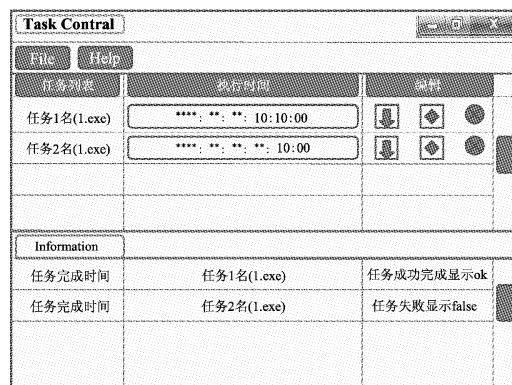


图 2 TaskControl 定时任务控制终端

Fig. 2 The timing task control terminal by TaskControl

以江苏省 40 个台站为例, 120 个通道 1 小时的连续波形从 JOPENS 数据流服务器中提取的耗时, 在普通 PC 机上 (CPU、内存均为 2 GB) 进行测试, 一般只需约 5 ~ 10 s; 完成背景噪声的各种计算分析, 并将结果写入数据库的耗时约 60 s, 计算过程如图 3b 所示。

使用 GUI 客户端模块可以查看数据库中任意时段内某一台站、通道的计算结果, 操作界面如图 4 所示。

### 2.3 结果输出

查询结果如图 5a 所示, 即某一时段内所有信号在 90 s ~ 35 Hz 范围内的功率谱概率密度函数分布, 用色标来表示台站记录信号随频率变化的概率值, 颜色越红表示台站记录的信号在此频点处的概率越大。一般情况下, 尽管低水平的背景噪声是观测系统中的高概率事件, 但为了能更加客观、真实地评估台站的环境背景水平, 本文中取全频带内的中值 (图 5a 中灰白线所示), 来代表

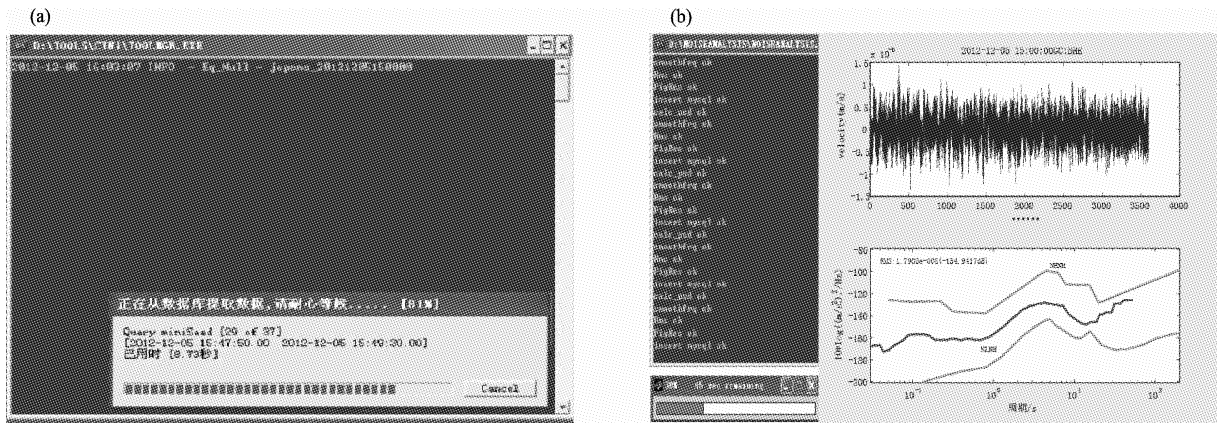


图3 CTN 模块自动从流服务器提取数据的过程 (a) 和进行背景噪声计算分析的过程 (b)

Fig. 3 Automatic process of extracting data from the streaming server (a), the process of calculating and analyzing ground noise (b) by CTN

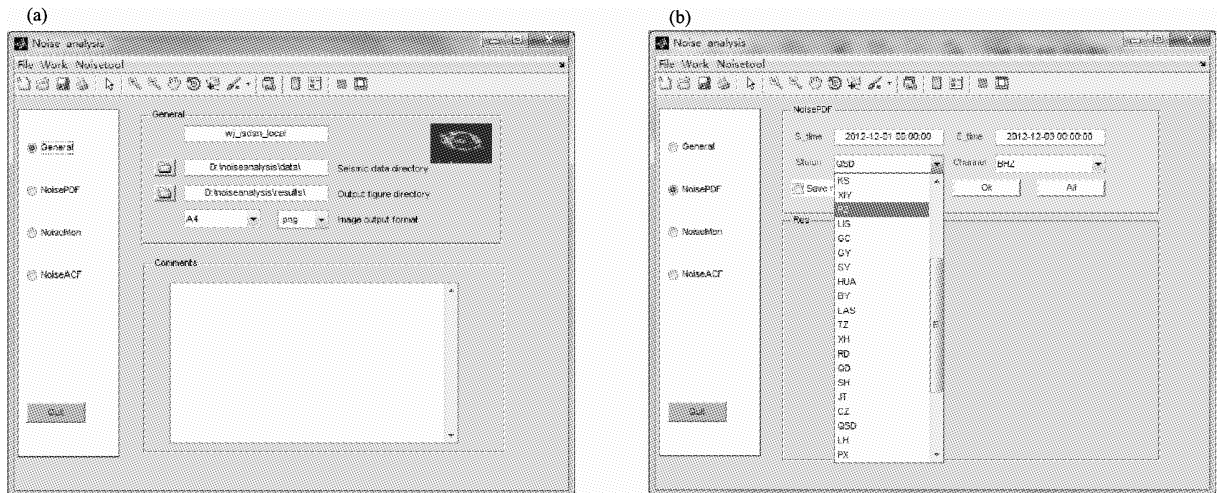


图4 GUI 模块的主界面 (a) 和查询条件设定界面 (b)

Fig. 4 Main interface (a) and query conditions setting interface (b) of the GUI module

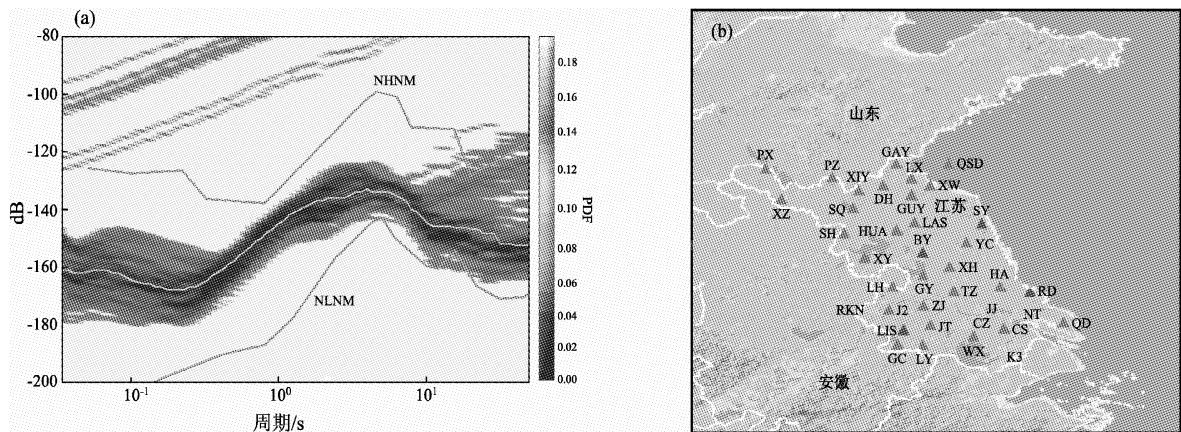


图5 计算结果的查询显示 (a), 及基于 Google Map 显示的台基噪声水平等级划分 (b)

Fig. 5 Query display of calculation results (a), and grade classification of station noise level displayed by the Google Map (b)

该台在此时间段内的背景噪声水平值。为了实现观测系统运行状况的量化监控, 本文以 NHNM 和 NLNM 值 (Peterson, 1993) 作为标准, 但考虑到区域数字地震台网主要负责区域内近震的监测, 根据近震地震波的频率特性, 软件中只以高频段的信号为目标对象, 具体的做法: 在 1 ~ 20 Hz 范围内的取 1.2、3.1、4.5、10.0、19.2 Hz 5 个频点的值作为基点, 计算其高于 NHNM 模型和低于 NLNM 模型的概率值, 来评估观测系统的健康状况, 如图 5a 所示, 表示前三岛台 (QSD) 在 2012 年 11 月 1 ~ 30 日期间约有 6% 的记录结果高于 NHNM 模型值, 即处于异常状态。

为了使计算结果更加具有实用性, 依据《地震台站观测环境技术要求》(GB/T1953.1 - 19531.4 - 2004), 自动将各台站的台基噪声水平进行等级划分, 并运用 GoogleMap API 技术进行地图的制作和显示, 实现与 GoogleMap 丰富的全球地图资源进行融合, 具有美观的显示效果 (Google Maps Javascript API V3, 2012), 如图 5b 所示, 绿色三角代表 I 类台基、黄色三角代表 II 类台基、红色三角代表 III 类及以上台基。

为了方便应用, 软件还提供数据及图像存储功能, 数据结果以文本格式、电子表格保存便于对数据结果的查看与后续处理。图像可存储为 png、jpg、ai、eps、emf 5 种格式, 便于成果报告撰写及发表文章时不同编辑的要求。

### 3 成果应用

#### 3.1 台基背景噪声的分析

运用此项新技术, 可以很方便地实现对台基背景噪声水平季节性变化的监控, 以 2011 年江苏省 40 个宽频带数字地震台的背景噪声水平进行计算分析为例, 图 6 为以各台站每天垂直向的连续记录为计算样本 (共计 11 972 条) 的计算结果, 根据所有功率密度谱随频率的概率分布情况, 取概率最大处的值来代表江苏地区的背景噪声水平值; 按季节来显示计算的结果: 2011 年全年内 0.1 ~ 0.5 Hz 和 0.03 ~ 0.1 Hz 范围内噪声能量基本相当, 其中 0.1 ~ 0.5 Hz 范围内的噪声源更加稳定, 0.03 ~ 0.1 Hz 范围内的噪声则会随季节变化出约 5 dB 左右的扰动。

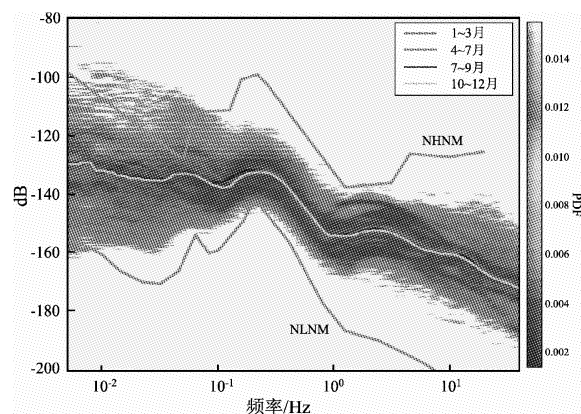


图 6 2011 年江苏省台站背景噪声的功率谱概率密度

Fig. 6 The power spectrum probability density of background noise of stations in Jiangsu Province in 2011

#### 3.2 地震观测系统健康状态的监控

在宽频带地震记录系统中, 系统的某些瞬态变化、数据记录中的阶跃、通信链路的短时中断、或系统故障引起的信号失真 (如记录中叠加了高频电流信号等), 以及特定频率的环境干扰源等, 系统维护人员通常情况下难以直观地发现。本研究中的计算方法对记录信号的最小分辨率约为 0.012 2 Hz, 经计算后可清晰、直观地辨别记录信号中不同频率信号间的细微差异。例如, 南京台的 BHE 分向在 2012 年 11 月 1 ~ 30 日 (共 538 条功率谱结果) 存在 1 个频率约为 2 Hz 的干扰源, 如图 7a 所示, 但在此期间的日常地脉动记录波形中, 即使在扫描时间为 6 s 的窗口内也几乎不可能被识别出来, 图 7b 是 2012 年 11 月 1 日 10 时的实际记录波形, 可以看到 BHE 分向的记录与 BHZ、BHN 分向的记录无明显区别。

图 7d 是高邮台 2012 年 8 月 27 日 1 时三分向记录的连续波形, 可以看到三分向的记录基本一样, 难以直观地发现 BHZ 分向的记录中有异常情况, 但经过噪声计算分析后, 结果显示: 2012 年 8 月 26 ~ 29 日期间 (74 条功率谱结果) 的噪声概率密度分布呈斜线形 (图 7c), 与正常的噪声概率密度分布完全不一样, 最后经仪器维修人员确定为地震计 BHZ 分向故障。这些结果表明, 通过对实时记录的噪声进行准实时的分析, 可及时地“跟踪”到地震观测系统的健康状态。

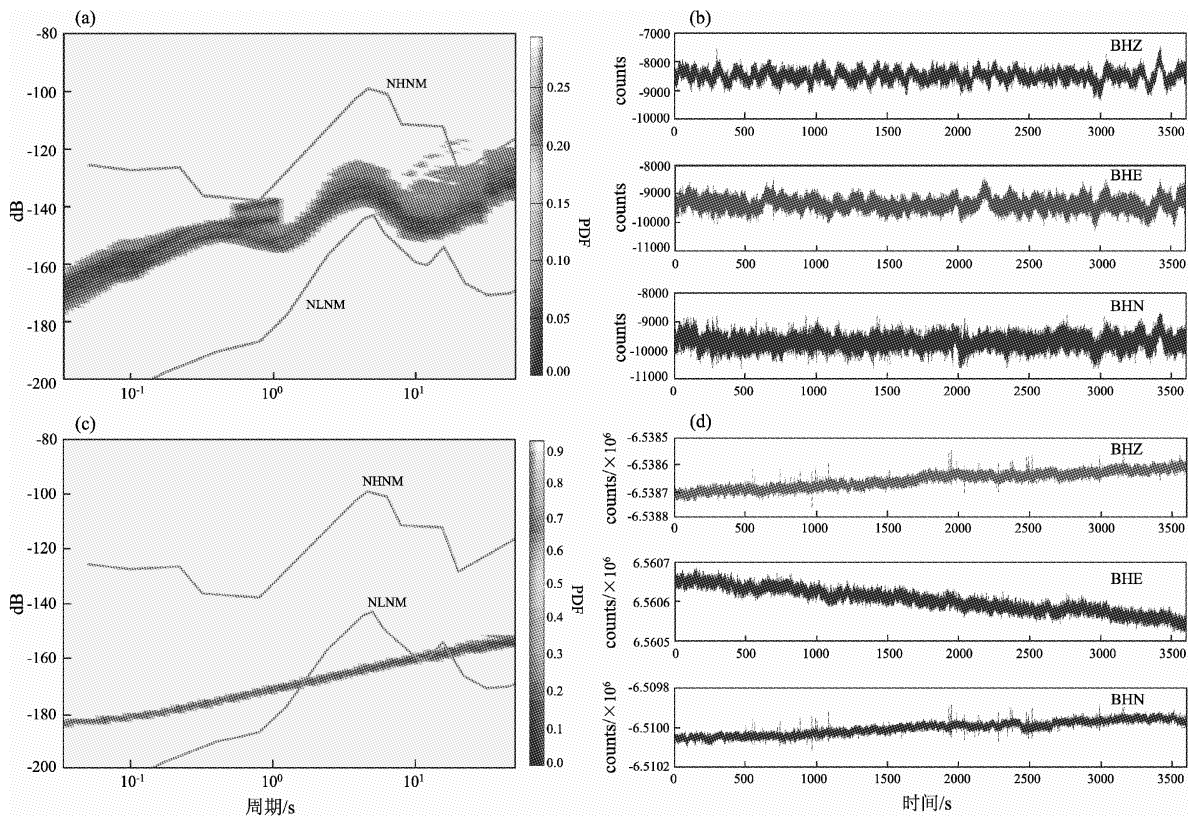


图7 南京、高邮地震台故障信号的概率密度函数及相应的连续记录波形

- (a) 南京台 BHE 分向的背景噪声概率密度分布；(b) 南京台三分向记录的连续波形（红色为 BHE 分向）；  
(c) 高邮台 BHZ 分量的背景噪声概率密度分布；(d) 高邮台三分向记录的连续波形（红色为 BHZ 分向）

Fig. 7 Probability density function of fault signal at Nanjing, Gaoyou Seismic Stations and their corresponding continuous recording waveform

- (a) PDF of background noise in BHE component recorded by Nanjing Seismic Station; (b) continuous waveform in three components recorded by Nanjing seismic station (the red line is the BHE component); (c) PDF of background noise in BHE component recorded by Gaoyou Seismic Station; (d) continuous waveform in three components recorded by Gaoyou Seismic Station (the red line is the BHZ component)

## 4 结论

本软件是基于 JOPENS 系统而开发的，实现与 JOPENS 系统之间无缝对接，可普遍应用于各个区域数字地震台网。功能上实现了对数字地震台网数据记录质量、观测系统的健康状态以及噪声源变化的准实时监控和定量化分析；自动生成的观测系统“健康”检查报告，可以帮助系统维护人员快速、高效地发现观测系统中各类故障信号，从而缩短仪器故障的修复时间，保证观测系统的高效运行。自 2011 年 1 月以来，从该软件在江苏省数字地震台网实际部署的运行情况来看，其在

提高数字地震台网的运行效能方面具有显著的实际意义。

此外，整个计算过程均在后台自动完成，软件配置简单，只需配置 JOPENS 系统的数据源和存储数据库的地址、用户名和密码；各模块之间相互独立，通过将其编译成可执行程序，可脱离 Matlab 平台单独运行。

## 参考文献：

- 金星, 李山有, 李祖宁, 等. 2006. 展望地震监测台网的发展与应用 [J]. 中国地震, 22(3): 242–248.  
刘瑞丰, 高景春, 陈运泰, 等. 2008. 中国数字地震台网的建设与发展 [J]. 地震学报, 30(5): 533–539.  
万永革. 2007. 数字信号处理的 Matlab 实现 [M]. 北京: 科学出

- 版社.
- 王 俊,徐戈,孙业君. 2009. 江苏省区域地表背景噪声特性的分析[J]. 地震研究,32(2):155-161.
- 张志勇. 2011. 精通 MatlabR2011a[M]. 北京:北京航空航天大学出版社.
- 中国地震局监测预报司. 2007. 地震学与地震观测[M]. 北京:地震出版社.
- Bormann P. (2012)[2012-09-24]. New Manual of Seismological Observatory Practice[M/OL]. GFZ;IASPEI. <http://www.iaspei.org/>.
- Campillo M, Paul A. 2003. Long-range correlations in the diffuse seismic coda[J]. Science, 299, 547-549.
- GB/T 1953. 1-195314-2004, 地震台站观测环境技术要求[S].
- Google Maps Javascript API V3. (2012)[2012-09-24]. <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/reference?hl=zh-cn>.
- McNamara D E, Boaz R I. 2005. Seismic Noise Analysis System Using Power Spectral Density Probability Density Functions; A Stand-Alone Software Package [R/OL]. Open-File Report 2005 US; Geological Survey. <http://earthquake.usgs.gov/research/software/>.
- McNamara D E, Buland R P. 2004. Ambient Noise Levels in the Continental United States[J]. BSSA. 94(4):1517-1527.

## Calculation Analysis Software Development of Quasi-real-time Background Noise Based on MATLAB

WANG Jun<sup>1</sup>, MIAO Fa-jun<sup>1</sup>, ZHAN Xiao-yan<sup>1</sup>, GAO Jing-chun<sup>2</sup>

(1. *Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, Jiangsu, China*)

(2. *Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, Hebei, China*)

### Abstract

Combining with the running JOPENS system in provincial regional digital seismic network in China, using the power spectrum probability density function, we develop the background noise calculation analysis software based on Matlab platform. The software achieves the quasi-real-time monitoring of data recording quality, the health status of observation systems and the variation of background noise source in the digital seismic network. The effective frequency range of signal is from 0.012 Hz to 35 Hz and the minimum resolution of it is about 0.012 Hz in the calculating result. In order to ensuring the lasting and stable of the software running, the software adopts the modular design based on functional requirement, the "TaskControl" timing task control terminal is used to control and manage modular for reducing the inter-linkages between the each modules. The background noise calculation analysis software was deployed to Jiangsu Digital Seismic Network since Jan., 2011, and its running situation and actual effectiveness was well.

**Key words:** seismic network; data recording quality; background noise source; power spectrum probability density function; JOPENS system