

宋澄, 张勇, 邵玉平. 三地震计法精确测定地震计自身噪声研究[J]. 华南地震, 2017, 37(3): 98-102. [SONG Cheng, ZHANG Yong, SHAO Pingyu. The Research on Self-noise Accurate Estimation of a Seismometer Using Three-seismometer[J]. South China journal of seismology, 2017, 37(3): 98-102.]

三地震计法精确测定地震计自身噪声研究

宋 澄, 张 勇, 邵玉平
(四川省地震局, 成都 610041)

摘要: 地震计自身噪声是地震计的一个重要技术指标, 目前地震行业标准采用两地震计法, 利用观测数据和地震计的传递函数, 得到地震计自身噪声谱。两地震计法必须事先知道地震计的精确传递函数, 而传递函数的测定误差给自身噪声的测定精度带来较大的影响。三地震计法在频域内用相关分析法得到地震计自身噪声谱, 不需要知道被测地震计的传递函数, 只利用三分向记录波形的互功率谱和自功率谱计算得出自身噪声谱。

关键词: 地震计; 自身噪声; 功率谱; 三地震计; 低噪声放大器

中图分类号: P315.7 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2017) 03-0098-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.03.014

The Research on Self-noise Accurate Estimation of a Seismometer Using Three-seismometer

SONG Cheng, ZHANG Yong, SHAO Pingyu
(Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China)

Abstract: Self-noise level is one of the most important parameters of seismometers. At present, according to seismic industry standards, self-noise power spectrum of seismometer is obtained from recording the same ground motion and transfer function of two-seismometer. However, the method is limited because it requires the accurate information about the transfer function of each seismometers. Small errors in the transfer functions, which will cause relatively large errors in the calculated seismometer self-noise levels. Self-noise power spectrum of seismometer obtained from three-seismometer is proposed in the paper, based on correlation analysis of recordings from a common, coherent input signal in the frequency domain. The approach does not require accurate information about the transfer function of each seismometer, only in terms of cross-power spectra and autopower spectra of the recordings of the three seismometer connected to the same input signal.

Keywords: Seismometer; Self-noise; Power spectrum; Three-seismometer; Low noise amplifier

收稿日期: 2016-09-10

基金项目: 四川省地震局地震科技专项(LY1408); 中国地震局测震台网青年骨干培养专项(20140322)

作者简介: 宋 澄 (1980-), 男, 工程师, 从事诱发地震监测和地震观测研究工作。

E-mail: 26649565@qq.com.

0 引言

目前，国内广泛使用“两地震计法”测试地震计自身噪声，即将两台相同类型的地震计安装在安静的台基上，方向相同，并互相紧靠。用一台高灵敏度数据采集器连续记录 24 h 的观测数据，选取干扰小的相同时间段、相同分向、同样长度一小时的连续数据，在频率域内计算两通道数据的自噪声和互噪声功率谱密度，再用相干法处理计算得到地震计自身噪声的功率谱密度。该方法的优点是简单易行，缺点是必须知道地震计的精确传递函数，传递函数及灵敏度的细小误差都会引起计算的噪声水平较大的误差。

本文提出用三台地震计组成线性测试系统，频域内精确测定反馈地震计自身噪声，简称“三

地震计法”。“三地震计法”不必准确知道每一台被测地震计的传递函数，只要求其真实传递函数与标称传递函数之间的误差在允许范围内即可。

1 测定方法

1.1 理论与实际测定方案

三台被测地震计需要安装在安静的台基上，互相紧靠，并且方向相同，三台地震计的电压信号输入千倍低噪声放大器，经过高分辨率、大动态范围的 24 位地震数据采集记录设备输出波形经串口服务器存储到便携式笔记本电脑，其测试的框图如图 1 所示。将存储好的观测文件在频域内用相关分析法进行处理，得到每台地震计自身噪声功率谱。

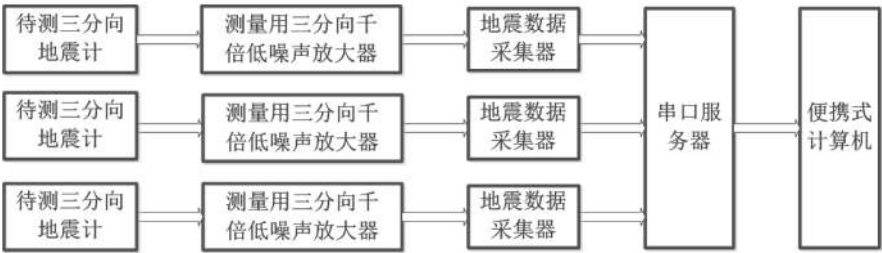


图 1 精确测定地震计自身噪声的框图

Fig.1 Schematic diagram of Self-noise Accurate Estimation of Seismometer

在地震计和数据采集器设备充足的情况下，采用图 1 的方案，可以一次将待测地震计的三个分向同时测定，优点是测试过程简单，缺点是需要的仪器设备数量较多，每种仪器设备都需要有

三台。以节约成本为出发点，同时又能精确测试出地震计自身噪声，本试验采用每次测量三台地震计中一个同名分量的噪声，如图 2 所示，三次即可将三个同名分量的噪声全部测出。

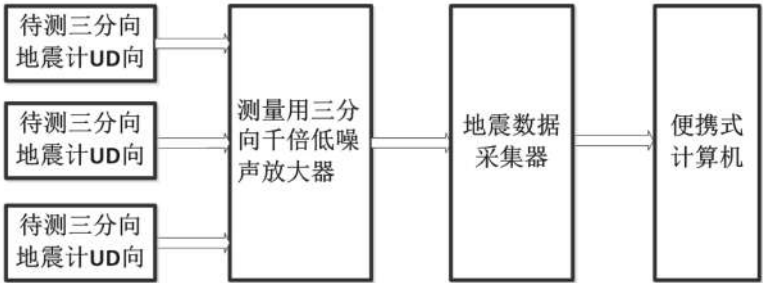


图 2 地震计自身噪声测试实施方案

Fig.2 Implementation programs of Self-noise Test of Seismometer

1.2 地震计自身噪声测试过程中的主要噪声源及降噪措施

1.2.1 地面振动噪声

当地震计处于正常工作状态时，其输出中必

然含有大量地面振动噪声分量。对于灵敏度高达 2 000 V_s/m 的速度计，即使是在非常优良的台址上，其地面振动噪声分量大于符合入网技术要求的地震计自身噪声分量。因此，如何消除比被测

量噪声大得多的地面振动噪声是测量结果可信度高低的关键。

1.2.2 测量专用放大器的噪声

设计合理的数字地震观测仪器,其地震计和地震数据采集器的灵敏度应搭配恰好用以得到较大的动态范围。现代 24 位高灵敏度速度平坦型数字地震仪能在较好的台基上获得约 100 dB 的动态范围。即使说在这样的数字记录系统中有大约 40 dB 为台基振动噪声干扰占据,相当于台基振动噪声峰值被量化为 8bit 字长的数据。在波形幅度较小的时段,其量化位数可能只有 2~3 bit。然而利用低有效字长的数字波形来扣除占有比例较大的相干成份,以获取占有比例非常小的非相干成份,精度必然较差。因此,本研究在地震计的输出端与数据采集器输入端之间插入了低噪声的千倍测量专用放大器,将地面振动和地震计的自身噪声同时放大,然后再扣除地面振动。加入千倍级测量专用放大器后,地面振动噪声与地震计的噪声均被放大千倍后再数字化。这样做相当于将原来只能用 8 bit 字长量化的噪声峰值提高至 18 bit 字长量化,有效地提高了在后续处理中的精度。对于 24 位数据采集器,即使是峰值时的 18 bit 量化仍有 5 bit 的富余而不会出现非线性失真。

测量专用放大器即使采用噪声特性非常优良的运算放大器来设计制作,且无论设计者采取什么样的措施来降低噪声,其噪声总是存在的。在本研究中选用了 0.1~10 Hz 频带内电压噪声仅为 0.25 P-P 的低噪声运放,采用并联降噪技术后在上述频带内等效至放大器输入端的电压噪声只有 0.125 P-P,已远低于多数反馈式地震计的输出电压噪声 1~10 P-P。虽然已经选用了低噪声的运放,但是本文在后期数据处理中依然测量并扣除了测量专用放大器与地震数据采集器的噪声。

1.2.3 数据采集器噪声

数据采集器在采样率为 200 SPS 时,关闭高通滤波器,输入端短路,记录足够长度的噪声信号,分别计算出三分向噪声信号的 RMS 值为 2.027、1.897 和 1.860 Counts。虽然地震数据采集器的噪声有效值已有 1~2 Counts,但是在插入测量专用放大器后,等效于将其与前置各级噪声之比减小了 1001 倍。因此,在研究设计的测量系统中,数据采集器的噪声影响已经小到了完全可以忽略的程度。

2 数据处理方法

地震、大地脉动都是典型的随机振动信号。

对于随机信号来说,虽然它没有确定的解析表达式,但其相关函数却是确定的,如果信号是平稳的,那么对相关函数的傅立叶变换就是它的功率谱密度函数,即功率谱。精确测定地震计自身噪声的数学模型如图 3 所示。

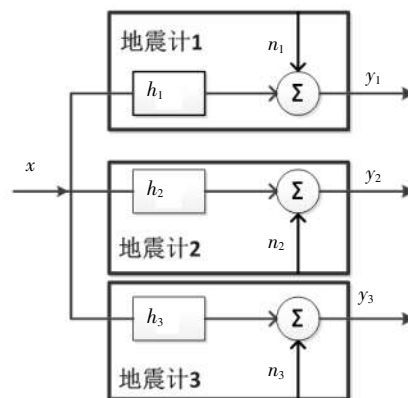


图 3 精确测定地震计自身噪声的数学模型

Fig.3 Mathematical model of Self-noise Accurate Estimation of Seismometer

其数学表达式如下所示

$$y_i = x \otimes h_i + n_i$$

式中: x 为输入信号, y_i 为地震计的输出, h_i 为地震计 i 的脉冲响应, n_i 为地震计 i 的自身噪声。其频域的傅氏变换为 $Y_i = X \cdot H_i + N_i$ 。

假定:(1) 两通道之间的自身噪声不相关;(2) 自身噪声和输入信号不相关。那么地震计 i 和 j 之间的互功率谱 P_{ij} 写为: $P_{ij} = Y_i \cdot Y_j^* = P_{xx} \cdot H_i \cdot H_j^* + N_{ij}$, $P_{xx} = X \cdot X^*$, N_{ij} 为 n_i 和 n_j 的互功率谱,若 $i \neq j$,则 $N_{ij} = 0$,从而得到 $\frac{P_{ji}}{P_{ki}} = \frac{H_i}{H_k}$, $i, j, k=1, 2, 3, i \neq j \neq k$ 。

进一步推导得到: $\frac{P_{ii}}{P_{ji}} = \frac{H_i}{H_j} + \frac{N_{ii}}{P_{ji}}$, $\frac{H_i}{H_j} = \frac{P_{ik}}{P_{jk}}$ 。由此得到: $N_{ii} = P_{ii} - \frac{P_{ik}}{P_{jk}} \cdot P_{ji}$, $i \neq j \neq k$ 。

上式方程表示地震计的自身噪声功率谱只需要通过同一输入信号的 3 个记录波形的互功率谱和自功率谱即可得到。

3 结果及讨论

根据上述理论算法,编写数据处理软件,将试验采集的地震计+放大器+数据采集器(无高通滤波)的波形(图 4),利用数据处理软件,频域内计算得到三个地震计(UD 向)+放大器+数据采集器的噪声功率谱密度;将试验采集的短路+放大器+数据采集器(无高通滤波)的波形(图 5),利用数据处

理软件，频域内计算得到放大器和数据采集器的噪声功率谱密度，前者减掉后者，即得到三个地震计(UD 向)频域内的自身噪声。三地震计(UD

向)的自身噪声功率谱密度及 NHNM、NLNM 噪声曲线如图 6 所示，仪器出厂资料与本文研究测试结果的对比如图 7 所示。

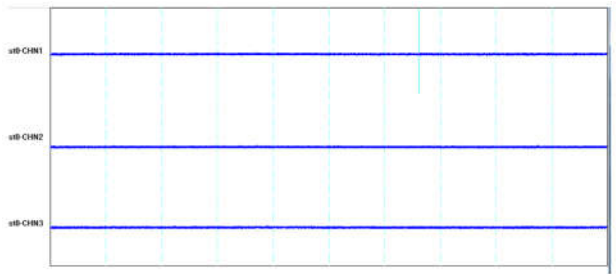


图 4 地震计+放大器+数据采集器(无高通滤波)的波形
Fig.4 Waveform of seismometer, amplifier and data acquisition system (without high-pass filter)

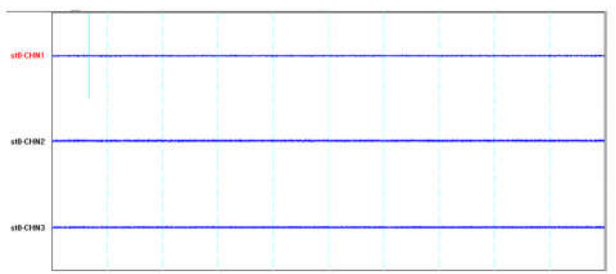


图 5 短路+放大器+数据采集器(无高通滤波)的波形
Fig.5 Waveform of short-circuited, amplifier and data acquisition system (without high-pass filter)

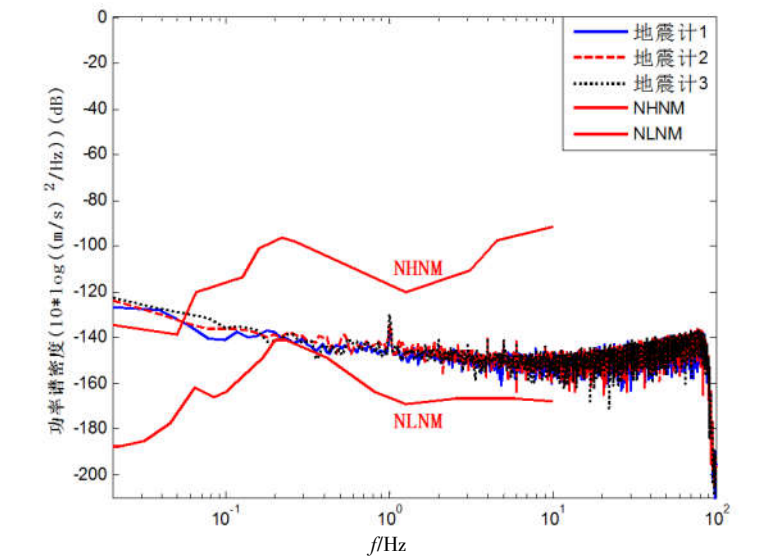


图 6 三地震计的自身噪声功率谱密度及 NHNM、NLNM 噪声曲线图
Fig.6 Self-noise power spectra of three seismometers and NHNM, NLNM noise curves

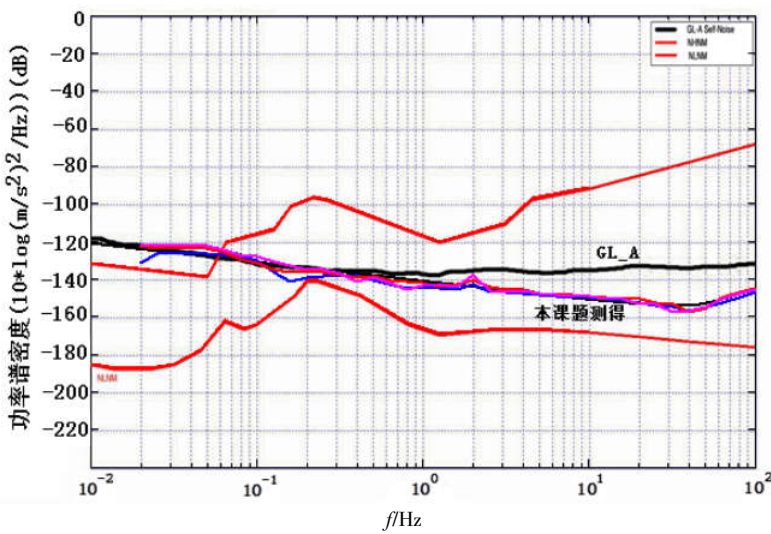


图 7 与仪器厂家测试资料对比图
Fig.7 Comparison chart with test data of instrument manufacturers

由对比图可见,本课题对 GL-A 系列加速度计的自噪声测试结果表明实测噪声谱密度曲线低于企业对外公布的噪声谱密度,特别是在 1~100Hz 频段,实测值明显低于企业公布值。分析其原因,可能是由于测试方法的不同引起的。本测试方法在数据采集器之前使用千倍放大器,将地震计输出的信号放大千倍,在后续数据处理中,将输出信号扣除了千倍,从而降低了数据采集器自身噪声带来的影响。

经过理论分析和野外台站的现场测试,三地震计法精确测定地震计自身噪声方法可行。

参考文献:

- [1] 中国地震局. 地震标准汇编 2009[M]. 北京:地震出版社, 2009.
- [2] 崔庆谷,童汪练. 地震计仪器噪声测量中的几个问题[J]. 地震地磁观测与研究,2003,24(6):39-46.
- [3] 刘洋君,薛兵,朱小毅,等. 地震计自噪声的研究[J]. 地震,2010,30(1):138-146.
- [3] 崔庆谷. 反馈式地震计的性能设计与噪声测量研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所,2003.
- [4] 中国地震局监测预报司. 数字地震观测技术[M]. 北京:地震出版社,2003.
- [5] 杜玮. 地震台站观测环境技术要求宣贯教材(GB/T 19531.1~19531.4-2004)[M]. 北京:地震出版社,2004.
- [6] Three-channel correlation analysis;a new technique to measure instrumental noise of digitizers and seismic sensors [J]. Bulletin of the Seismological Society of America,2006,96(1):258-271.
- [7] Jon Peterson. Observation and Modeling of seismic background noise[D]. USGS:Open-File Report,1993,93-322.
- [8] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社,1997.