

吴双, 朱成林, 崔华伟, 等. GL-CS120 和 JS-120 型地震计性能及记录数据相干性分析[J]. 华南地震, 2024, 44(4): 55-65. [WU Shuang, ZHU Chenglin, CUI Huawei, et al. Performance and Record Data Coherence Analysis of GL-CS120 and JS-120 Seismometers [J]. South China journal of seismology, 2024, 44(4): 55-65]

GL-CS120 和 JS-120 型地震计性能及记录数据 相干性分析

吴 双, 朱成林, 崔华伟, 胡旭辉, 王杰民

(山东省地震局, 济南 250014)

摘要: GL-CS120 和 JS-120 型甚宽频带地震计在国内使用较为广泛, 也是“国家烈度速报与预警工程项目——山东子项目”新建基准站目前所使用的两种地震计型号, 但两种型号地震计在性能和各类指标上均存在差异。通过在同一台基上安装 GL-CS120 和 JS-120 两种型号地震计, 对相同频点记录的数据进行对比分析, 计算其动态观测范围、地震计自噪声和不同时段记录数据的相干性。结果显示, 两种型号地震计均具有良好的自噪声特性。在相同环境下, 两种型号地震计在低频(1-10 s)范围内记录数据的相干性较高, 在长周期(10-100 s)和高频(>1 Hz)范围内的相干性均存在差异, 受外界环境影响较大。

关键词: GL-CS120; JS-120; 相干性; 自噪声

中图分类号: P315.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)04-0055-11

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.04.07

Performance and Record Data Coherence Analysis of GL-CS120 and JS-120 Seismometers

WU Shuang, ZHU Chenglin, CUI Huawei, HU Xuhui, WANG Jiemin

(Shandong Earthquake Agency, Jinan 250014, China)

Abstract: GL-CS120 and JS-120 very broadband seismometers are widely used in China. They are also used in the new base station of the “National Seismic Intensity and Rapid Reporting and Early Warning Project—Shandong Sub-Project”. However, there are differences in performance and various indicators between the two types of seismometers. In this study, GL-CS120 and JS-120 seismometers were installed on the same base, and the data recorded at identical frequencies are compared and analyzed. The dynamic observation range, self-noise of the seismometers, and coherence of data recorded at different periods were subsequently calculated. The results indicate that both types of seismometers exhibit favorable self-noise characteristics. In the same

收稿日期: 2024-03-23

基金项目: 山东郯城巨震区低速率挤压逆冲构造野外科学观测研究站和喜马拉雅东构造结震源机制及应力场研究项目 (NORSLS23-02)

作者简介: 吴双(1991-), 女, 工程师, 主要从事地震监测工作方面的研究。

E-mail: 1552835896@qq.com

environmental condition, the coherence of data recorded by the two types of seismometers is high in the low frequency range (1 - 10 s), while differences in coherence are observed in the long period (10-100 s) and high frequency range (>1 Hz), which are significantly influenced by external factors.

Keywords: GL-CS120; JS-120; Correlation; Self-noise

0 引言

各种类型的地震计在地震行业内层出不穷，性能也在不断更新升级。市面上的地震计从型号上主要分为短周期地震计、宽频带地震计、甚宽频带地震计、超宽频带地震计，使用较为广泛的是稳定性、线性较好的宽频带和甚宽频带地震计。目前，“国家烈度速报与预警工程项目——山东子项目”新建基准站安装的地震计型号为JS-120、GL-CS120型地震计。本文主要通过探讨GL-CS120和JS-120两种甚宽频带地震计的动态范围，并根据地震计在相同时段采集到的地动信号，计算出每种型号地震计的自噪声功率谱密度及两种型号地震计相干函数值随频率的变化情况，从而对后期震相分析、地震预警及地动数据的分析处理提供一定参考。考虑到地震波在传播过程中受到非弹性衰变、震源辐射能量及方位、几何分散、场地响应等方面影响^[1]，选定临沂市郯城马陵山地震台作为比测设备GL-CS120和JS-120型地震计的测点，台站外界环境良好，与山源、田地相邻，周围没有工厂、铁路等因素干扰。

1 地震计安装与参数配置

为了保证GL-CS120和JS-120两种型号地震计采集到的地动波形数据的真实性，将两种型号地震计均安装在山洞内同一台基上，且每种型号地震计均放置三台设备同时进行观测。不同型号地震计在进行对比观测时，地震计数据采集时段的不同和放置方位角的误差，在低频时段会导致地震计记录数据的不一致，因此在安装GL-CS120型和JS-120型地震计的过程中，采用激光尺和寻北仪对地震计进行方位角校正、对齐，并使两种型号的六台地震仪相互紧靠且安装方向一致，从而避免水平方向方位角偏差^[2]。

马陵山地震台山洞内GPS转发覆盖，GL-CS120和JS-120型地震计统一使用北京港震公司生产的EDAS-24GN六通道数据采集器连接，采样频率设置为100 Hz，量程设置为10 V，同时为去除地震计零点偏移，高通滤波器低端截止频率设为1000 s^[3]。两种型号地震计观测仪器参数如表1所示，比测地震系统搭建如图1所示。

表1 两种型号地震计参数表
Table 1 Parameters of two types of seismometers

序号	地震计类型	地震计序列号	周期/(s)	阻尼系数	地震计灵敏度/(V·s·m ⁻¹)	
1		18502CS120	121.64	0.702	UD	1986.30
			121.57	0.709	EW	1990.20
			120.56	0.710	NS	2000.20
2	GL-CS120	18503CS120	121.41	0.709	UD	2019.80
			120.87	0.704	EW	1996.80
			119.22	0.696	NS	2018.90
3		18504CS120	119.97	0.698	UD	2070.4
			120.52	0.701	EW	2005.2
			119.96	0.708	NS	2042

(转下表)

(接表1)

序号	地震计类型	地震计序列号	周期/(s)	阻尼系数	地震计灵敏度/(V·s·m ⁻¹)	
4	JS-120	140003	121.3838	0.710341	UD	1993.12
			121.3259	0.707064	EW	2008.26
			121.3859	0.711384	NS	1998.92
5		140017	119.7261	0.702562	UD	1996.59
			119.5175	0.702125	EW	1981.1
			119.6633	0.70232	NS	1998.55
6		140024	120.0149	0.705022	UD	2001.01
			120.2779	0.705945	EW	2002.16
			119.917	0.705319	NS	2001.02

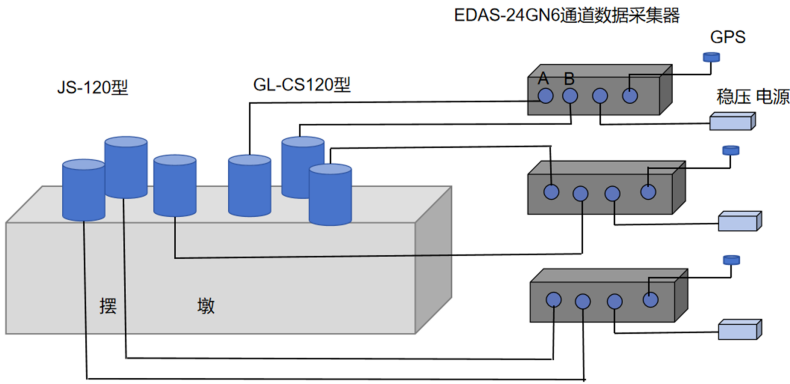


图1 比测设备搭建示意图

Fig.1 Equipment construction for comparison and observation

2 实际观测动态范围对比

对GL-CS120型和JS-120型地震计的观测动态范围进行计算。观测动态范围*D*计算公式为

$$D = 20\log \frac{R}{\text{RMS} \times S \times P \times \sqrt{2}}$$

(1)

式(1)中,RMS为台基地动噪声有效值,单位m/s,*P*为数采的量程修正值,*R*为数采量程,*S*为系统灵敏度^[4]。

选取两种型号地震计记录到的2019年2月4日0:00~0:59时地动波形数据作为计算样本,此时段数据较为平稳,无地震及大的外界干扰,其观测动态范围计算结果见下图2和表2。

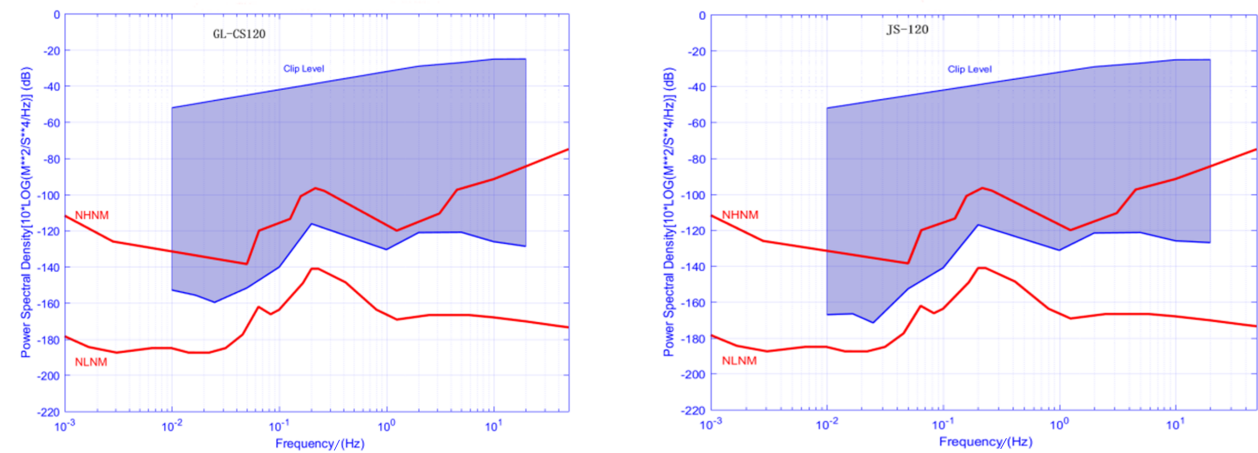


图2 地震计观测动态范围

Fig.2 Dynamic observation range of seismometers

表2 动态范围分析对比
Table 2 Comparison of dynamic range

地震计	动态范围/dB										
	0.01	0.0167	0.025	0.05	0.1	0.2	1.0	2.0	5.0	10	20
GL-CS120	100.8	105.9	111.6	106.6	98.1	77.1	98.4	92.0	93.8	100.9	103.6
JS-120	115.0	116.7	123.6	107.6	98.9	77.9	99.2	92.5	94.3	100.8	101.9

由上可知：1.GL-CS120型地震计最大动态观测范围 111.6 dB，JS-120型地震计最大动态观测范围 123.6 dB；2.在 0.01 Hz、0.0167 Hz、0.025 Hz 频点处，两种型号地震计观测动态范围差异较大，均超过 10 dB；0.05~10 Hz 频带内，2种型号地震计对应的动态范围差小于 1dB，基本相同。

3 地震计自噪声计算分析

3.1 自噪声计算原理及数据的处理

当前，国内外用于测试地震计自噪声的方法最为常见的为 Peterson 双台法、Holcomb 双台法及 Sleeman 多台法^[5-7]。本文采用 Sleeman^[6]多台法对地震计进行自噪声测试。需要以下两个条件同时满足才可以使用多台法：①设备输出的两个通道互不相关；②地震计本身的噪声与场地振动无关^[8-9]。

地震仪 i 、 j 之间互功率谱 P_{ij} 为^[10-11]

$$P_{ij} = Y_i Y_j^* = P_{xx} H_i H_j^* + N_{ij} \quad (2)$$

其中

$$P_{xx} = X X^* \quad (3)$$

上式中， P_{xx} 是共模输入信号自功率谱； Y_i 、 X 、 H_i 、 N_i 是 y_i 、 x 、 h_i 、 n_i 的傅里叶变换， Y_j^* 代表 Y_j 矩阵的复共轭矩阵， N_{ij} 为 n_i 和 n_j 的互功率谱，如果 $i \neq j$ ，则 $N_{ij} = 0$ ，则有

$$\frac{P_{ji}}{P_{ki}} = \frac{H_j}{H_k} \quad i, j, k=1, 2, 3; i \neq j \neq k \quad (4)$$

进一步推算，得

$$\frac{P_{ii}}{P_{ij}} = \frac{H_i}{H_j} + \frac{N_{ii}}{P_{ji}} \quad \frac{H_i}{H_j} = \frac{P_{ik}}{P_{jk}} \quad (5)$$

因此：

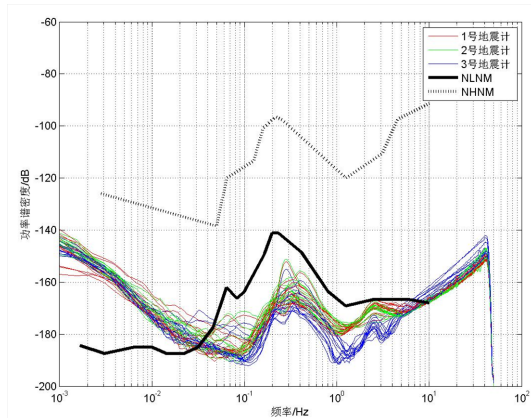
$$N_{ii} = P_{ii} - \frac{P_{ik}}{P_{jk}} P_{ji} \quad i, j, k=1, 2, 3; i \neq j \neq k \quad (6)$$

上式中， P_{ji} 、 P_{jk} 和 P_{ik} 为数据采集器记录的地震计输出信号互功率谱密度， N_{ii} 为地震计自身噪声功率谱密度， P_{ii} 为地震数据采集器测定的输出信号自功率谱密度^[12-13]。

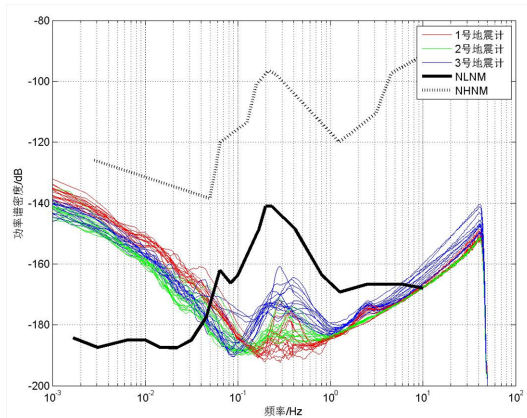
地震计自噪声计算前需要对比测地震系统采集波形数据的存储记录方式、运行状态等进行规范处理，并对获得的原始波形数据进行预处理。①为保证采集数据的完整性，数据以定期取值的方式进行存储，而且连续波形记录速度值以 EVT 格式记录，每小时记录形成一个 .dat 文件。②测试地震计需要平稳运行一个月以上，选择运行一段时间后无地震、中断和其他干扰安静环境下记录到的地动波形数据作为计算地震计自噪声的样本。③对选择的数据样本进行预处理，去除趋势值、平均值，将 count 值乘以数采转化因子与地震计输出电压灵敏度的比值从而折算成地动速度值^[14]。④使用 Welch 周期图法计算噪声功率谱密度曲线，将连续 3600 s 作为固定时间段分段处理数据，相邻数据段之间的重复率为 50%，采用汉明(hamming)窗进行加窗处理，分别计算每个时间段的周期图，计算平均功率密度曲线^[15]。

3.2 比测设备功率谱密度曲线对比分析

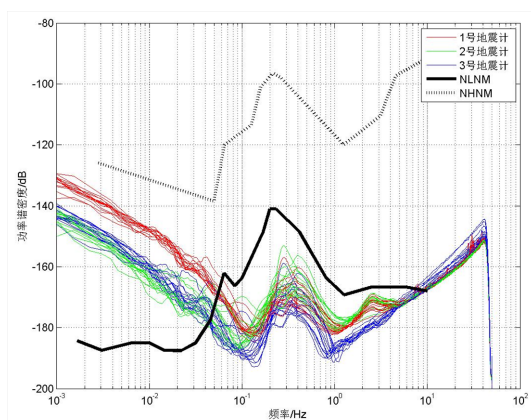
在 GL-CS120 和 JS-120 两种型号地震计稳定运行一个月以后，选择无外界干扰时段的地动波形数据作为分析地震计自身噪声功率谱的数据样本。两种型号地震仪的运行时间为 2018 年 11 月 22 日至 2019 年 3 月 27 日，根据设备实际运行情况，本文从符合要求的数据中随机选取了 15 天 00:00~00:59 时段的 1 h 地动波形数据，对其预处理后分别进行地震计自噪声功率谱密度的计算，其计算结果如下图 3。



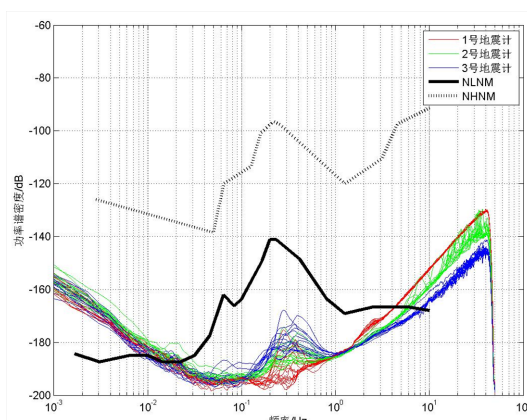
(a) GL-CS120型号地震计UD向自噪声功率谱曲线



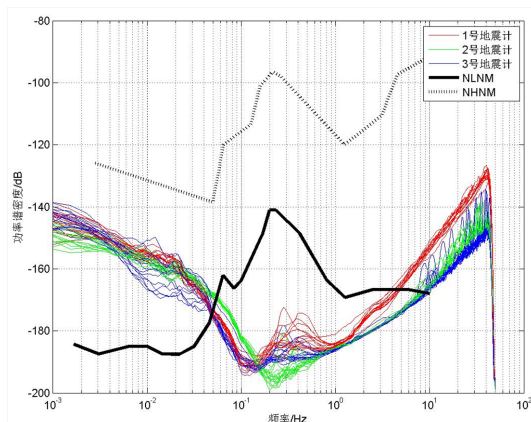
(b) GL-CS120型号地震计NS向自噪声功率谱曲线



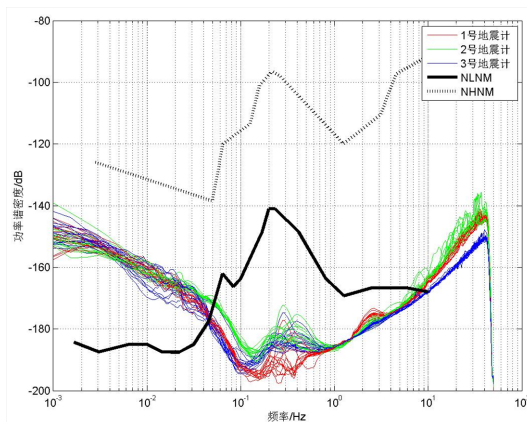
(c) GL-CS120型号地震计EW向自噪声功率谱曲线



(d) JS-120型号地震计UD向自噪声功率谱曲线



(e) JS-120型号地震计NS向自噪声功率谱曲线



(f) JS-120型号地震计EW向自噪声功率谱曲线

图3 GL-CS120型、JS-120型甚宽频带地震计多时段自噪声PSD曲线

Fig.3 Self-noise power spectral density curves of GL-CS120 and JS-120 very broadband seismometers for multiple periods

因地震计水平向相对于垂直向更容易受外界环境影响,所以垂直向相较下更能表现地震计自身噪声的真实性,下图为两种型号地震计垂直向多时段自噪声功率谱密度平均值计算、对比。

由图4可以看出:GL-CS120型地震计UD向在0.04~7 Hz频带范围内自噪声PSD值低于NLNM曲

线(地球的最低噪声模型),JS-120型地震计UD向在0.03~4 Hz频带内自噪声PSD值低于NLNM,两种型号地震计自噪声性能均表现良好;高频范围内(>1 Hz),JS-120型地震计自噪声PSD曲线低于GL-CS120型地震计自噪声PSD曲线。

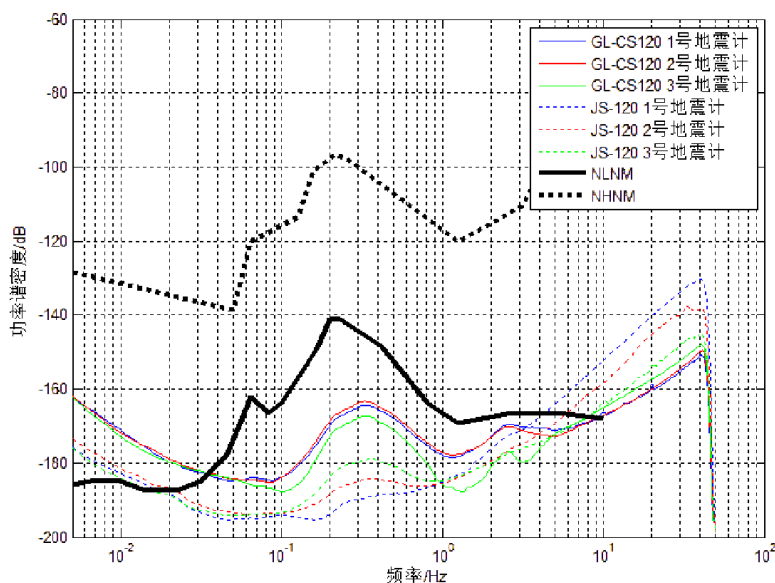


图4 GL-CS120型号与JS-120型甚宽频带地震计垂直向平均值自噪声PSD曲线

Fig.4 Vertical mean self-noise power spectrum density curves of GL-CS120 and JS-120 very broadband seismometers

4 比测数据相干性分析

4.1 相干函数原理

因地震计近似为线性系统,且地震计自噪声与台基噪声相互独立,根据各功率谱密度之间的关系,可以得到以下计算公式^[2]:

$$\gamma^2 = \frac{1}{1 + \frac{P_{nn1}}{P_{ss}|H_1|^2} + \frac{P_{nn2}}{P_{ss}|H_2|^2}} \quad (7)$$

式(7)中, H_1 和 H_2 为两种地震计的传递函数, P_{nn1} 和 P_{nn2} 为地震仪自身噪声自相关功率谱密度, P_{ss} 为地面运动信号的自相关功率谱密度^[16]。

由上式可见, γ^2 可用来表示两种信号得到的互功率谱和自功率谱之间的关系,此外, γ^2 值的大小与频率有关,是在频率域内描述两种信号相关程度的实值函数。一般情况下, γ^2 值在 0~1.0 之间, γ^2 值越大,两种信号的相关性越好。

4.2 比测设备记录数据相干性分析

本文选取 GL-CS120(设备序号: 18503CS120) 与 JS-120(设备序号: 140003) 两台地震计在无地震时段下记录的地动波形数据及在发生地震时段下记录的地动波形数据进行预处理后,分别进行相干函数值计算。

选择 2019 年 3 月 17 日 0:00-0:59 时段原始

波形数据,此时段避开了地震、中断和其他外界干扰;选择地震计记录到的 2019 年 3 月 17 日 11:21 山东枣庄市滕州市(经度 117.16°、纬度 35.00°)发生的 $M1.9$ 地震(近震)波形数据;选择地震计记录到的 2019 年 2 月 21 日 20:22:40 日本北海道地区(经度 142.02°、纬度 42.87°)发生的 $M5.5$ 地震(远震)波形数据。以上三个时段两种型号地震计记录到的原始数据波形见下图 5。

对两种型号地震计记录到的三个时段的波形数据进行有效信号分析,其计算结果见下图。

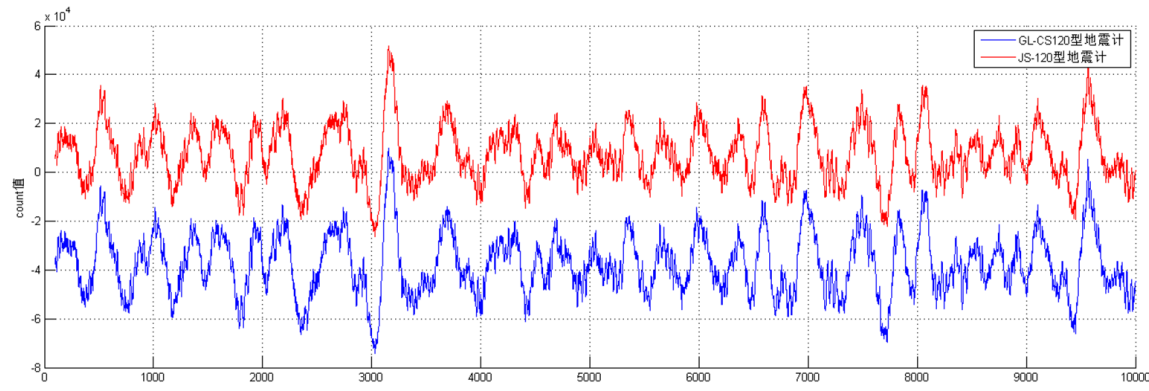
通过图 6 可见,在两种类型地震计频带范围内,三个时段地震计所记录到的地动信号均明显高于地震计自噪声,地动信号显著。

基于以上选择的波形数据分别计算两台地震计间三分向的相干值随频率变化曲线(如图 7 所示)。

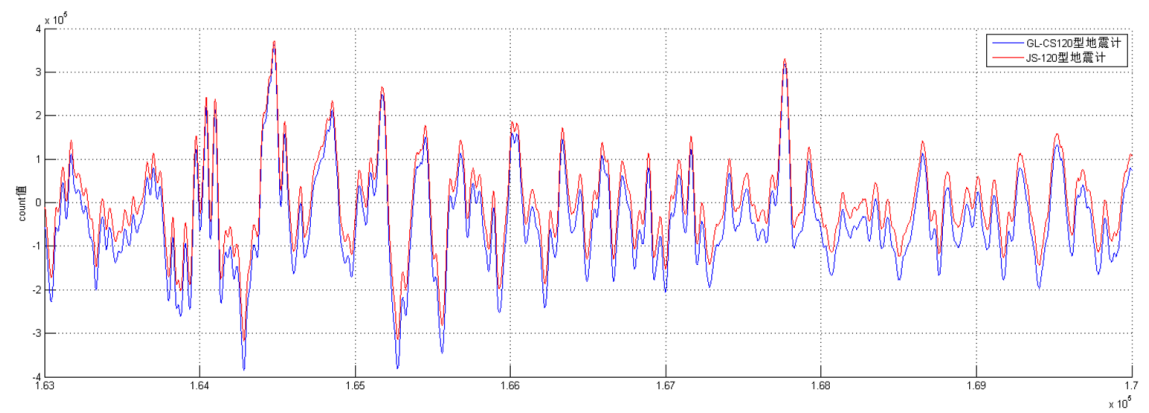
综上所述,两种型号地震计记录地动数据的相干值总体呈现以下特点:

(1)长周期范围内(10~100 s):两台地震计在同一时段垂直向记录数据的相干性要高于水平向;根据两台地震计同一分项同一频点的相干值,可看出两台地震计远震时段记录数据的相干性和近震时段相干性均要优于无地震时段相干性。

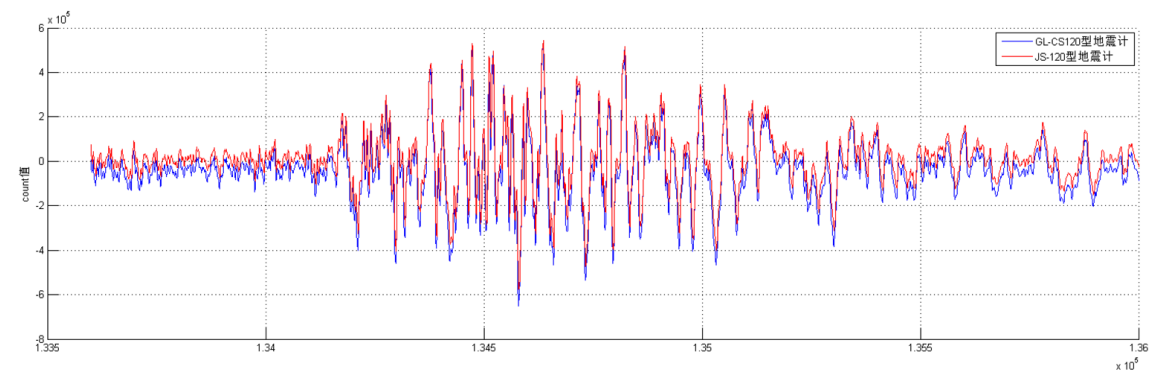
自然因素如湍急水流、风、压力变化、温度变化和地面偏斜等均有可能给长周期部分波形带来干扰,这些因素对垂直向地动波形影响较小,所以在长周期范围内会出现两个地震计的相干性垂直向高于水平向的现象。



(a)2019年3月17日0:00时段两种型号地震计同点记录波形



(b)2019年3月17日11:21山东枣庄市滕州市 M1.9级地震两种型号地震计同点记录波形



(c)2019年2月21日20:22:40日本北海道地区 M5.5地震两种型号地震计同点记录波形

图5 两种型号地震计各时段同点记录波形

Fig.5 Waveforms recorded at the same point in each period by two types of seismometers

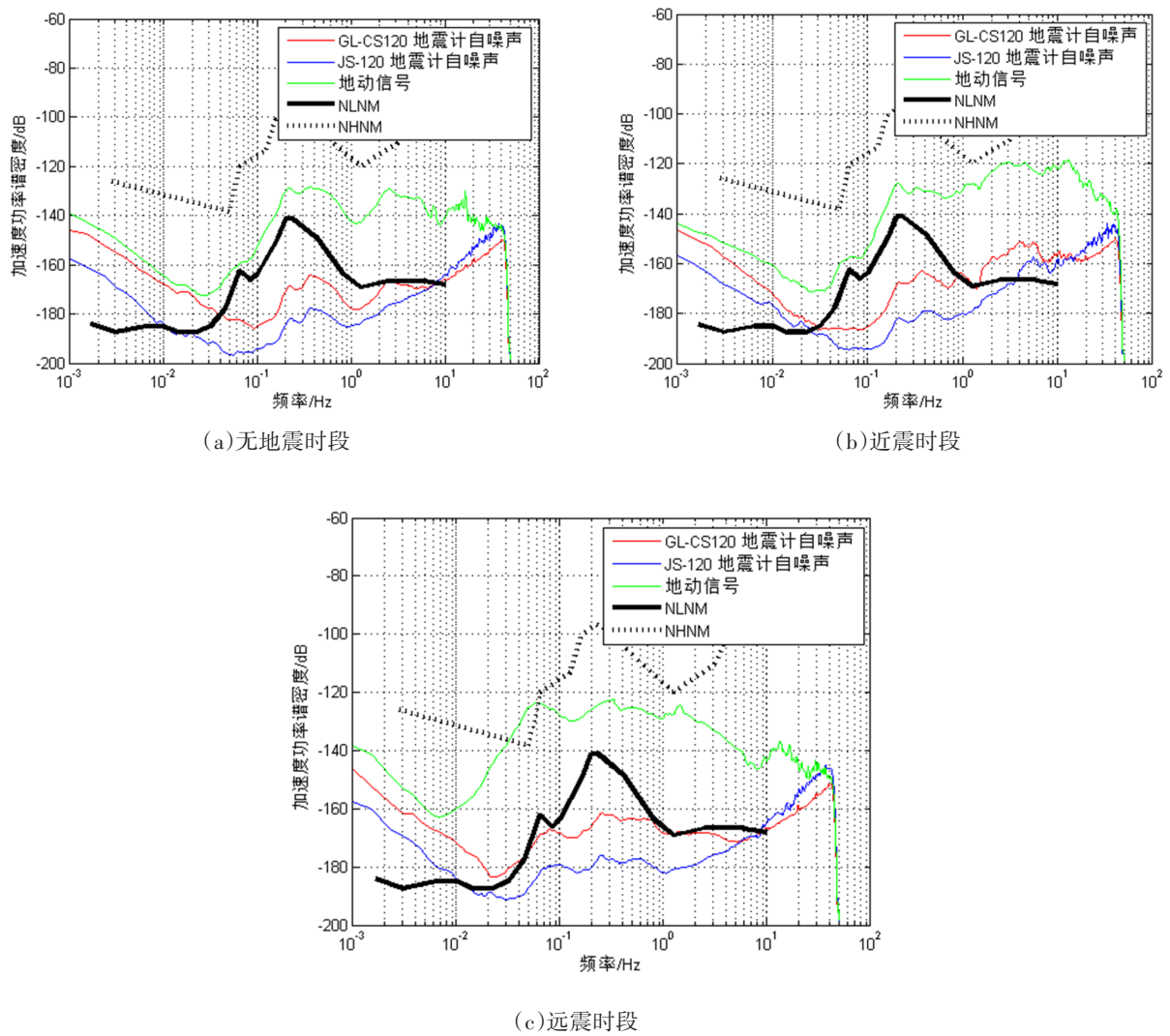
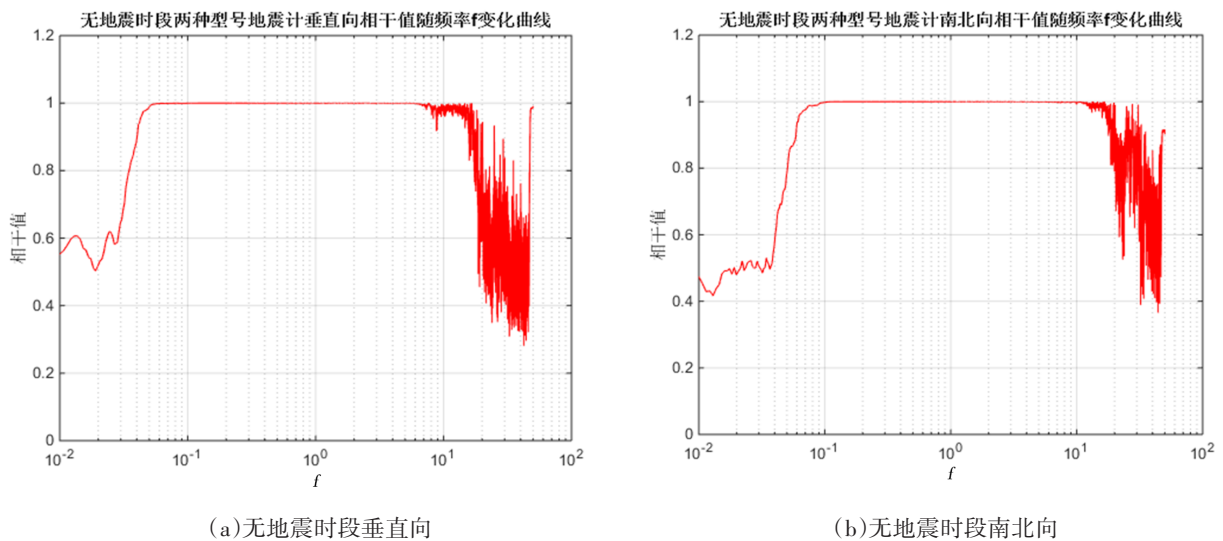
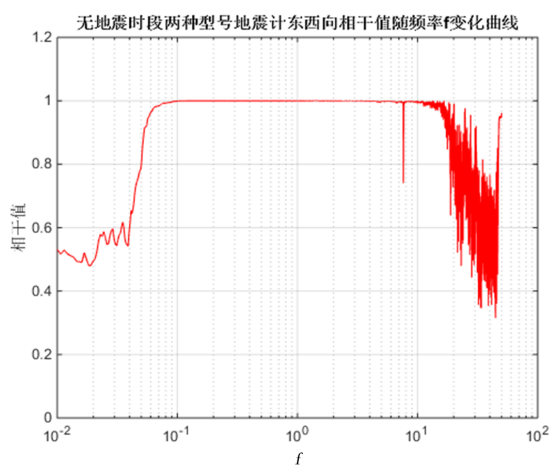


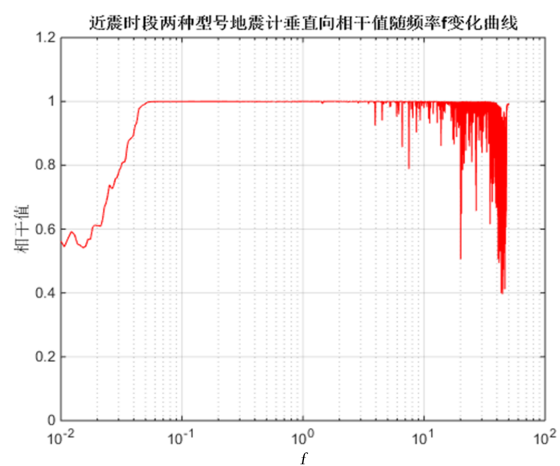
图6 两种型号地震计三个时段有效信号分析

Fig.6 Analysis of effective signals of two types of seismometers in three periods

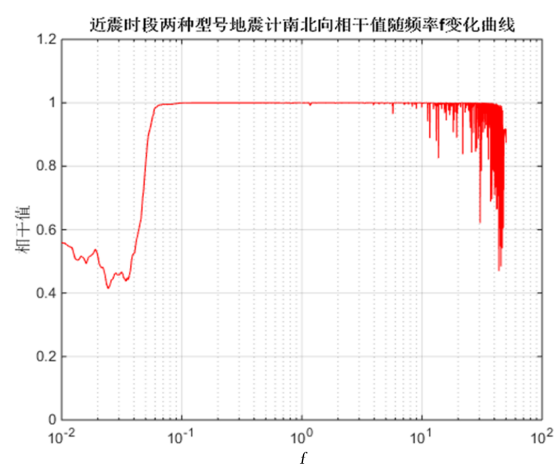




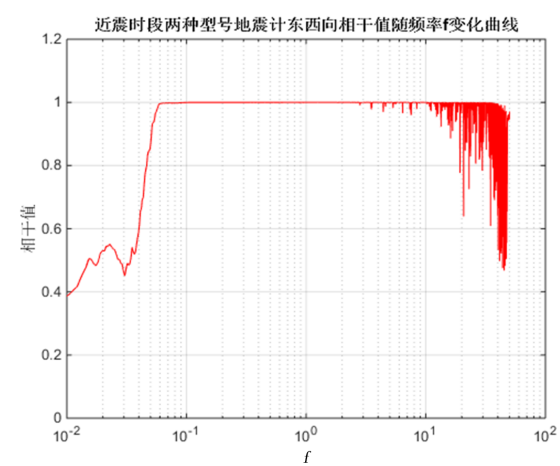
(c) 无地震时段东西向



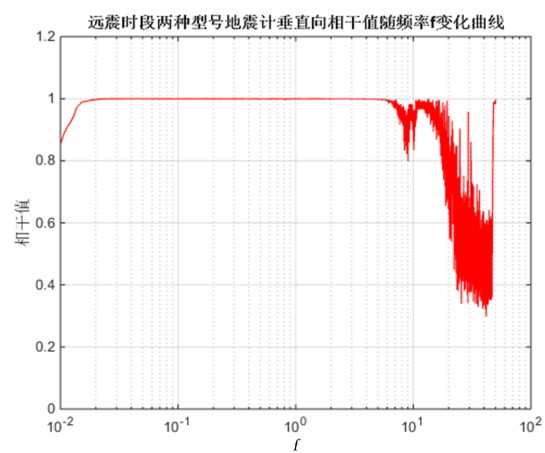
(d) 近震时段垂直向



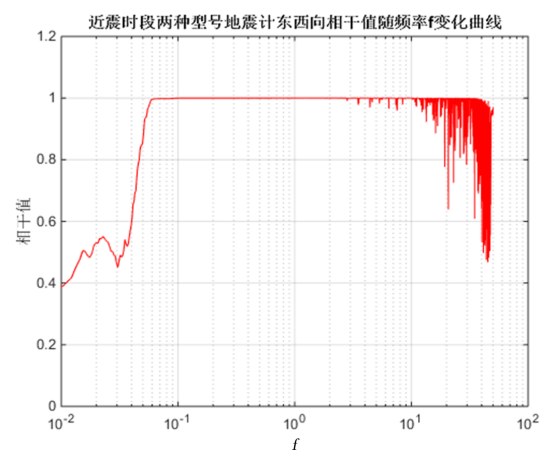
(e) 近震时段南北向



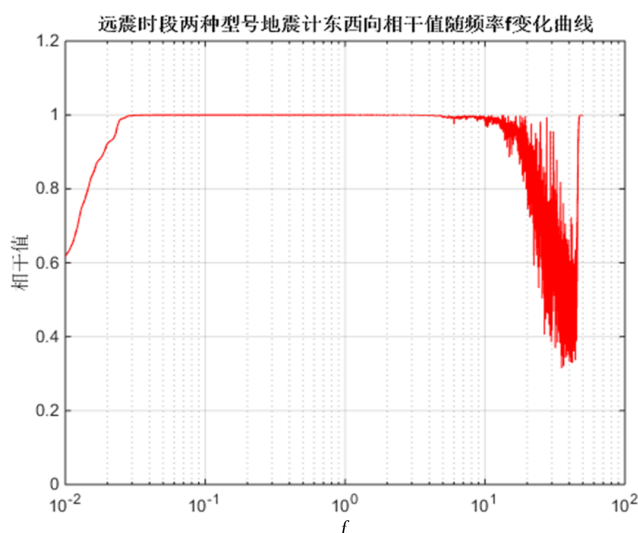
(f) 近震时段东西向



(g) 远震时段垂直向



(h) 远震时段南北向



(i)远震时段东西向

图7 两种型号地震计各时段相干值随频率变化曲线

Fig.7 The curve of coherence value of two types of seismometers with frequency at each period

无地震发生时段波形,地震计所记录到的波形数据受自噪声的影响较大;地震发生时,地震计所记录波形基本为地动信息,地震计自身噪声影响可忽略不计,因此,长周期范围内有地震发生时段两台地震计所表现出的相干性高于没有地震发生时段。

(2)低频范围内(1~10 s):两台地震计在三个不同计算时段垂直向、水平向的相干性均良好,相干值较高。低频范围内,地震仪自身噪声低于地脉动信号,而且可以被忽略,记录的波形则是相同的地脉动信号,所以相干性较高。

(3)高频范围内(>1 Hz):远震时段两台地震计同一分项的相干性要高于近震和无地震时段的相干性。

5 总结

本文对马陵山地震台安装的GL-CS120和JS-120型两种甚宽频带地震计,相同背景环境下进行地震计自噪声计算,并选取三个不同时段地动波形进行同测点相干值计算,分析两种型号地震计在正常工作频段范围内的相干性,通过对比发现:

(1)以上两种型号地震计均表现出良好的地震计性能,垂直向在0.04~4 Hz频带范围内自噪声功率谱密度曲线均低于NLNM曲线。

(2)在无地震、外界干扰时段,以上两种型号

地震计垂直向在0.05~10 Hz、水平向在0.08~10 Hz频段内均具有良好的相干性。

(3)无地震和发生地震事件时段,以上两种型号地震计记录数据的相干性主要在长周期(10~100 s)和低频(>1 Hz)范围内存在差异。在低频(1~10 s)范围内两种型号地震计在不同时段记录数据的相干性均较高,在此频带范围内两种型号地震计自噪声均良好,可被忽略。长周期范围内,两种型号地震计在地震时段记录数据的相干性要优于无地震时段,主要原因为安静环境下地震计记录数据容易受外界环境等因素干扰,地震发生时,则主要记录的数据为地动脉动信号。另外,台站背景噪声的干扰会造成地震计在高频范围内记录数据相干性的差异。

通过比测数据可见:两种地震计的自噪声存在差异,高频范围内,JS-120型地震计自噪声低于GL-CS120型地震计自噪声;工作频段内,当地震计记录的波形数据大于地震计自噪声时,两种型号地震计记录数据上有较好地相干性。此外,外界环境的干扰在长周期和低频范围内会不同程度的降低两种型号地震计记录数据的相干性。

以上结论只针对于参与马陵山地震台比测的GL-CS120和JS-120型地震计设备,是否具有代表性还待进一步扩大研究样本数据证实。

参考文献

- [1] 徐果明,周蕙兰.地震学原理[M].北京:科学出版社,1982:77-133.
- [2] 李兴泉,邵玉平,吴朋.BBVS-60型和CMG-3ESPC型地震计性能及记录数据相干性分析[J].地震学报,2020,42(1):92-96.
- [3] 吴双,李小晗,王杰民,等.GL-S120与3T-120甚宽频带地震计性能对比分析[J].四川地震,2020(4):19-22.
- [4] 段邵鑫,乌尼尔,李晓东,等.CTS-1E、CMG-3ESPC-120型地震计工作参数对比分析[J].地震地磁观测与研究,2019,40(4):120-124.
- [5] Peterson J, Hutt C R, Holcomb L G. Test and calibration of the seismic research observatory[R]. Albuquerque, New Mexico: USGS, 1980.
- [6] Sleeman R. 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] Sleman R, Peter M. A PDF representation of the STS-2 self-noise obtained from one year of data recorded in the Conrad Observatory, Austria [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2012, 102(2): 587-597.
- [8] 李彩华.地震计自噪声测试技术研究[D].北京:中国地震局地球物理研究所,2014.
- [9] 吴双,胡旭辉.基于Matlab的地震计自噪声计算可视化软件设计[J].地震地磁观测与研究,2019,41(3):232-237.
- [10] Tasic I, Runovc F. Seismometer self-noise estimation using a single reference instrument[J]. Journal of Seismology, 2012, 16(2): 183-194.
- [11] Tasic I, Runovc F. Determination of a seismometer's generator constant, azimuth, and orthogonality in three-dimensional space using a reference seismometer[J]. Journal of Seismology, 2013, 17(2): 807-817.
- [12] 尹昕忠,陈九辉,李顺成,等.流动宽频带地震计自噪声测试研究[J].地震地质,2013,35(3):576-582.
- [13] 吴双,胡旭辉,李小晗,等.GL-S60、GL-CS60与3ESPC三种宽频带地震计工作性能对比[J].华北地震科学,2020,38(S1):109-113.
- [14] 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.
- [15] 李彩华,滕云田,杨大克,等.基于两道互相关模型的地震计自噪声测试分析[J].地震地磁观测与研究,2015,36(1):100-106.
- [16] 崔庆谷,安晓文,邓存华,等.用相关分析法检测两种地震计性能及记录数据差异[J].地震研究,2011,34(3):313-316.