

张敏, 宫杰, 立凯, 等. 南京地震台甚宽频地震计观测性能研究[J]. 华南地震, 2024, 44(3): 51-58. [ZHANG Min, GONG Jie, LI Kai, et al. Observation Performance of Very Broadband Seismometers at Nanjing Seismic Station [J]. South China journal of seismology, 2024, 44(3): 51-58]

南京地震台甚宽频地震计观测性能研究

张敏¹, 宫杰¹, 立凯², 张扬¹, 居海华¹, 胡光武³

(1. 江苏省地震局, 南京 210014; 2. 宿迁地震监测中心站, 连云港 222061; 3. 南京地震监测中心站, 南京 210014)

摘要: 为深入研究甚宽频地震计观测性能, 利用南京地震台 GL-S120 型和 ITC-120A 型两套甚宽频地震计开展对比观测。从台站记录波形、相关性以及台基噪声等方面开展差异性分析, 结果表明: ITC-120A 型地震计不易受外界干扰, 尤其垂直向比较明显; 两套地震计相关性夜晚安静时段优于白天; 通过计算 PSD(功率谱密度)分析台基噪声, 结果表明 GL-S120 型地震计低频段噪声水平随着外界干扰增强而显著上升, 导致 GL-S120 型地震计记录中小级远震效果较差, 震相不易识别。自噪声计算分析表明两套地震计功率谱曲线差异与二者自噪声水平有关, 检测方法和台基噪声等因素影响设备自噪声测试的相关性, 从而影响地震计自噪声计算精度。

关键词: 甚宽频地震计; 自噪声; 台基噪声; 相关性

中图分类号: P315.62

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)03-0051-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.03.06

Observation Performance of Very Broadband Seismometers at Nanjing Seismic Station

ZHANG Min¹, GONG Jie¹, LI Kai², ZHANG Yang¹, JU Haihua¹, HU Guangwu³

(1. Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China; 2. Suqian Earthquake Monitoring Central Station, Suqian 222061, China; 3. Nanjing Earthquake Monitoring Central Station, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to further study the observation performance of very broadband seismometers, two types of very broadband seismometers (GL-S120 and ITC-120A) at Nanjing Seismic Station were used to carry out comparative experiments. The difference analysis is carried out from the aspects of the waveform records at the station, correlation and ambient noise. The results indicate that ITC-120A is not susceptible to ambient interference, especially in the vertical direction. The correlation between the two seismometers at night is better than that in daytime. The ambient noise analysis by calculating power spectral density (PSD) illustrates that the noise level of GL-S120 in the low frequency band increases significantly with the increase in ambient interference, resulting in the poor effect in recording remote earthquakes of small to medium magnitudes by GL-S120 and difficult identification of seismic phase. The calculation and analysis of self-noise show that the difference in power spectrum

收稿日期: 2024-01-11

项目类别: 江苏省地震局青年科学基金项目(202206); 中国地震局地震科技星火计划(XH21011)联合资助。

作者简介: 张敏(1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震仪器研发与运维。

E-mail: 541734199@qq.com

通信作者: 宫杰(1989-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地震仪器研发与运维。

E-mail: 498602259@qq.com

curves of the two seismometers is related to their self-noise level. Factors such as detection methods and ambient noise have an impact on the correlation of equipment self-noise tests, thereby affecting the accuracy of seismometer self-noise calculation.

Keywords: Very broadband seismometer; Self-noise; Ambient noise; Correlation

0 引言

地震观测质量一方面受地震台站台基条件影响,包括地质构造、自然和人为等噪声,另一方面受地震观测仪器性能影响。自噪声作为地震观测噪声下限,是衡量地震观测设备质量的重要指标,也是确定动态范围的重要参数^[1-2]。随着地震观测设备中的电子元器件等不断老化,设备自噪声水平也会相应发生改变,因此及时了解地震观测设备的自噪声水平是地震仪器运维技术人员适时判断其工作性能主要参数以及合理使用的先决条件。为获取高质量地震观测数据,检测真实地面运动,各机构及学者陆续开展地震计质量检测研究,特别是针对地震计自噪声水平检测研究。尹昕忠等利用“双台法”以及“多台法”两种地震计自噪声互相关分析法开展流动宽频带地震计噪声测试研究,结果表明多台法有效规避传递函数误差所引起的误差,在0.06 Hz至1 Hz具有较好的噪声性能指标^[3-5]。李彩华等在北京市延庆县西拨子地震台对两台地震计开展自噪声观测实验,发现合理防护有助于得到真实的地震计自噪声功率谱值^[6]。许卫卫等基于多通道相关性分析宽频带地震仪,结果显示高增益数据采集器有助于降低自噪声水平,Guralp CMG-3T地震计自噪声结果在

不同频段一致性差异较大,垂直向分量0.3 Hz以下可作为一致性参考频段,并推测出Guralp CMG-3T地震计三分量正交性误差在 0.5° 以内^[7]。李小军等利用连续1000小时数据计算甚宽频地震计自噪声,采用单小时结果众值、单频点概率统计以及分频段概率统计3种方法进行分析,结果表明分频段概率统计方法得到对应于中心频段具有量级差异的高概率值,为地震计自噪声的数学数值模型提供支持^[8]。

为深入研究甚宽频地震计观测性能,利用南京地震台ITC-120A和GL-S120甚宽频地震计开展同址对比观测。利用白天、夜晚同一时段连续波形开展日常波形、相关性以及台基噪声功率谱分析,同时针对两套设备不同地震类型记录情况进行差异性分析,最后开展两种类型地震计自噪声计算分析,并研究不同检测方法和台基噪声等因素对地震计自噪声检测精度的影响。

1 台站概况

江苏省南京地震基准台位于南京市中山陵风景区内,测震摆房内安装ITC-120A和GL-S120两套甚宽频地震计,相距6 m。为保证后续观测性能对比分析可靠性,对两套设备均进行方位角校正,并加装防护罩。仪器配置如下:

表1 观测仪器参数表

Table 1 Parameters of observation instrument

序号	设备型号	频带宽度	阻尼	灵敏度 $V/(m \cdot s^{-1})$	数据采集器	量程/ V	采样率/Hz
1	ITC-120A	120 s-50 Hz	0.707	2000	EDAS-24GN	10	100
2	GL-S120	120 s-50 Hz	0.707	2000	EDAS-24GN	10	100

2 对比观测

2.1 日常波形

选择2022年3月16日夜晚02时以及白天14时连续数据,如图1所示。夜晚02时段ITC-120A和

GL-S120地震计记录波形形态基本一致,而白天14日受外界干扰影响,同时出现长周期飘动,其中ITC-120A地震计影响较小,而GL-S120地震计影响较大,尤其垂直向,呈长周期飘动且波形振幅增大,表明ITC120A地震计相比GL-S120不易受外界干扰,特别是垂直向分量上比较明显。

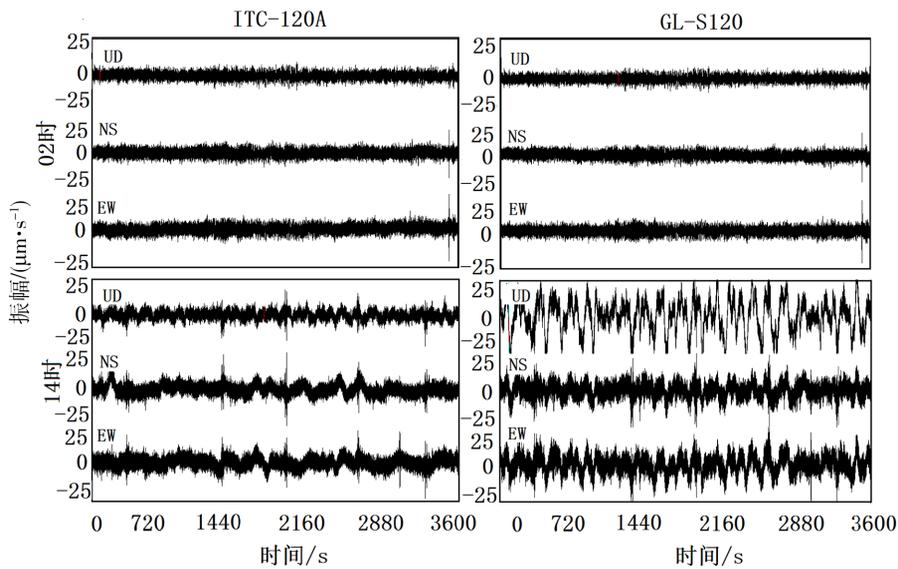


图1 原始时域波形图

Fig.1 Original time domain waveform

2.2 相关性

相关性分析是衡量两个地震观测设备记录数据相似程度的重要依据^[9]。为判别两套甚宽频地震计日常运行情况,尤其是白天、夜晚不同强度外界干扰条件下各分量差异,选取2022年3月16日24小时连续数据进行无滤波相关性分析。

由图2可知,从各分量差异性角度而言,同时刻垂直向相关性优于水平向,夜间水平向相关性差距不大,而白天由于人类活动干扰加剧,尤其受到南北向台站周围绿道干扰影响,南北向相关

系数明显低于东西向。就日变化趋势而言,夜间安静时段各分量相关性较高,垂直向相关系数可以达到0.95以上,水平向也在0.8以上。而白天受人类活动干扰各分量相关性均有所降低,垂直向最低将至0.75,东西向相关系数基本在0.6至0.75区间以内,而南北向则维持在0.45至0.65区间以内。结合日常波形记录可知,相比于ITC-120A地震计,GL-S120地震计受外界干扰影响更为显著,造成二者外界干扰条件下明显的波形记录差异,导致两套地震计相关性夜晚安静时段高于白天。

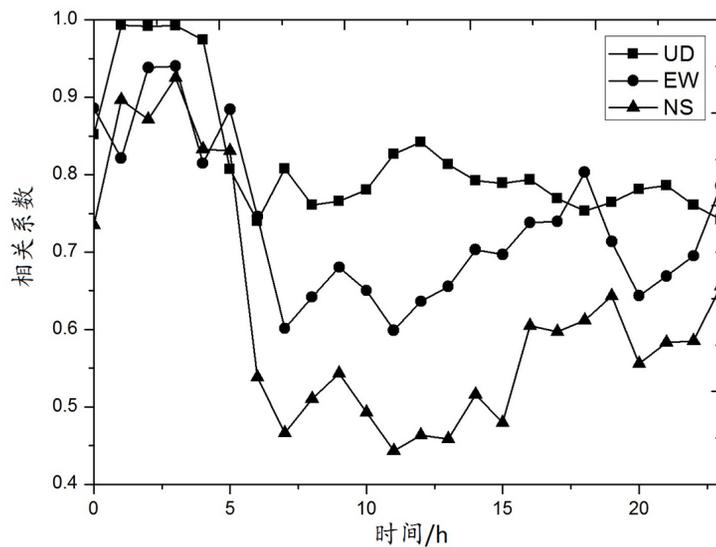


图2 两套设备相关系数

Fig.2 Correlation coefficient of two instruments

2.3 台基噪声

背景噪声水平是地震观测环境质量的重要指标^[10],为进一步分析ITC-120A与GL-S120地震计在外界干扰引起的日常波形及相关性等差异性,同样选择2022年3月16日夜晚02时以及白天14时连续数据进行背景噪声功率谱分析。

如图3所示,两套地震计背景噪声功率谱曲线基本在高噪声模型(NHNM)与低噪声模型(NLNM)之间。夜晚02时ITC-120A与GL-S120地震计三分

量在0.04 Hz以上频段较为一致,0.04 Hz以下频段呈一定离散性,除ITC-120A垂直向外,基本在15 dB区间内。白天14时ITC-120A与GL-S120地震计三分量在0.2 Hz以上频段较为一致,而0.2 Hz以下频段呈一定离散性,基本在20 dB区间内。整体而言,白天14时地震计功率谱曲线在0.04 Hz以下频段明显高于02时,尤其GL-S120地震计垂直向分量,上升区间在20~40 dB之间,与原始时域波形所展现的形态相吻合。而高频段不明显,仅在2~20 Hz略微有所上升。

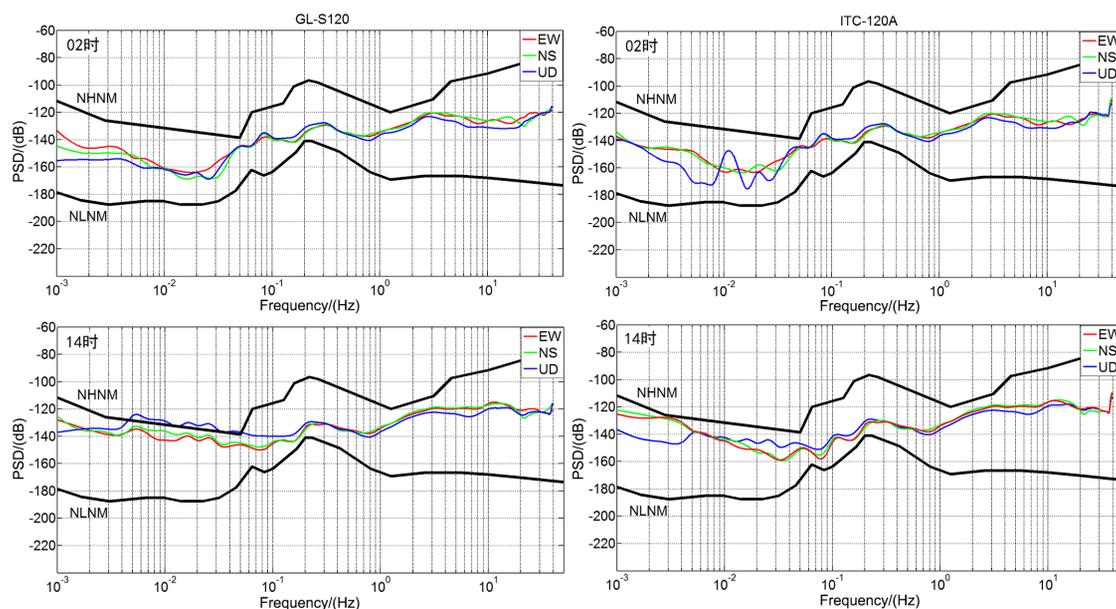


图3 不同型号地震计功率谱曲线

Fig.3 Power spectrum curves of different seismometers

为进一步了解不同外界干扰强度对地震计的影响情况,以GL-S120地震计为例,选择2022年3月16日夜晚00~04时和白天12~16时的连续数据,以及2023年同时段数据进行台基噪声功率谱分析。如图4所示,结果表明连续两年相同时段,GL-S120地震计白天12~16时功率谱曲线相比夜晚00~04时在强外界干扰下高频段略有上升,低频段垂直向上升尤为明显。2022年高频段(1~20 Hz)上升基本在10 dB以内,低频段(0.01~0.033 Hz)超过15 dB,尤其垂直向超过20 dB;2023年高频段(1~20 Hz)同样上升幅度保持在10 dB以内,与低频段水平向处于同一水平,但低频段(0.01~0.033 Hz)垂直向上升幅度在20 dB左右。

此外,对上述连续数据样本分频段计算地震计高频段(1~20 Hz)速度均方根值和低频段(0.01~0.033 Hz)加速度均方根值。如表2所示,计算结果表明GL-S120在白天12~16时段外界干扰增强条件

下,1~20 Hz高频段速度均方根值稍大于夜晚00~04时段,而0.01~0.033 Hz低频段加速度均方根远大于夜晚00~04时段,尤其垂直向表现明显。

综上所述,通过计算台基噪声功率谱,包括对不同型号地震计白天和晚上记录数据,以及同一地震计不同年度分频段对比,根据分析结果推测外部干扰强弱不仅使得地震计高频段功率谱曲线略有提升,对低频段功率谱影响更为明显,尤其垂直向。

3 地震事件

3.1 地震记录波形

为深入了解ITC-120A与GL-S120地震计在外界干扰影响下的差异性表现所带来的地震记录方面的差异特点,利用2022年9月13日江苏金湖2.8级近震、9月5日四川泸定6.8级远震以及9月30日台

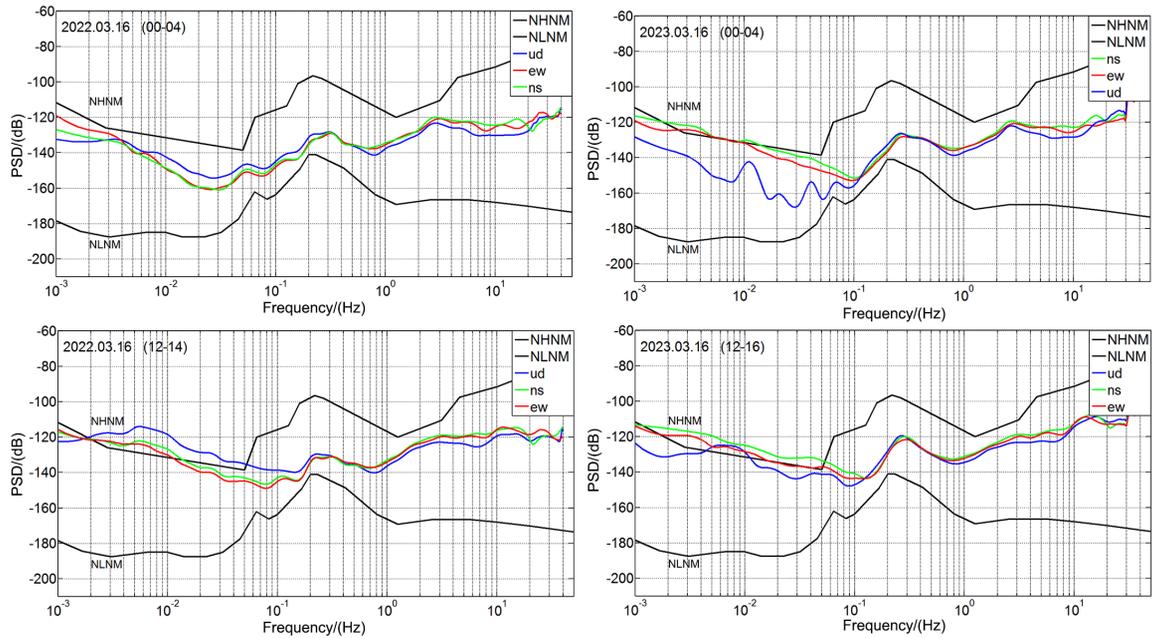


图4 GL-S120地震计不同时间段功率谱曲线

Fig.4 Power spectrum curves of GL-S120 seismometer in different time periods

表2 GL-S120地震计分频段台基噪声计算

Table 2 Calculation of ambient noise of GL-S120 seismometer in different frequency bands

频段分量/年- 月-日:h	1 ~ 20 Hz 速度 RMS/(m·s ⁻¹)			0.01 ~ 0.033 Hz 加速度 aRMS/(m·s ⁻²)		
	UD	EW	NS	UD	EW	NS
2022-03-16 00 ~ 04 h	4.74e-08	6.63e-08	7.4e-08	1.04e-08	3.63e-09	4.37e-09
2022-03-16 12 ~ 16 h	6.82e-08	9.71e-08	1.06e-07	1.09e-07	3.00e-08	4.16e-08
2023-03-16 00 ~ 04 h	5.72e-08	7.24e-08	8.38e-08	6.53e-09	2.58e-08	3.56e-08
2023-03-16 12 ~ 16 h	1.09e-07	1.28e-07	1.42e-07	3.06e-08	4.21e-08	6.41e-08

湾台东海域4.2级远震三个地震事件开展地震波形对比分析。从图5可以看出,两套地震计记录近震、较大震级远震时具有相近信噪比,震相清晰度相近,而GL-S120地震计记录中小级远震由于自身长周期背景噪声干扰震相较为模糊,不易识别,尤其垂直向。推测在白天外界干扰强度较大条件下,GL-S120地震计记录中小级远震震相清晰度低于ITC-120A地震计。

3.2 频谱分析

为进一步分析ITC-120A与GL-S120地震计记录中小级远震差异性原因,针对2022年9月30日

台湾台东海域4.2级远震进行震源频谱分析,如图6所示。两套地震计在无震时刻三分量频谱曲线基本一致,台基噪声能量基本在0.01~0.05 Hz范围内,在1 Hz附近出现2次尖峰,3 Hz以上趋近于零。当发生中小级远震,两套地震计同样呈现相似的频谱曲线,三分量在1 Hz附近的2次尖峰有所削弱,同时低频段尖峰得以加强,推测远震使得地震计记录波形主要能量向低频方向转移。结合日常波形以及台基噪声分析,中小级远震使得地震计记录波形主要能量集中于低频段,造成GL-S120台基噪声增强,从而导致震相模糊。

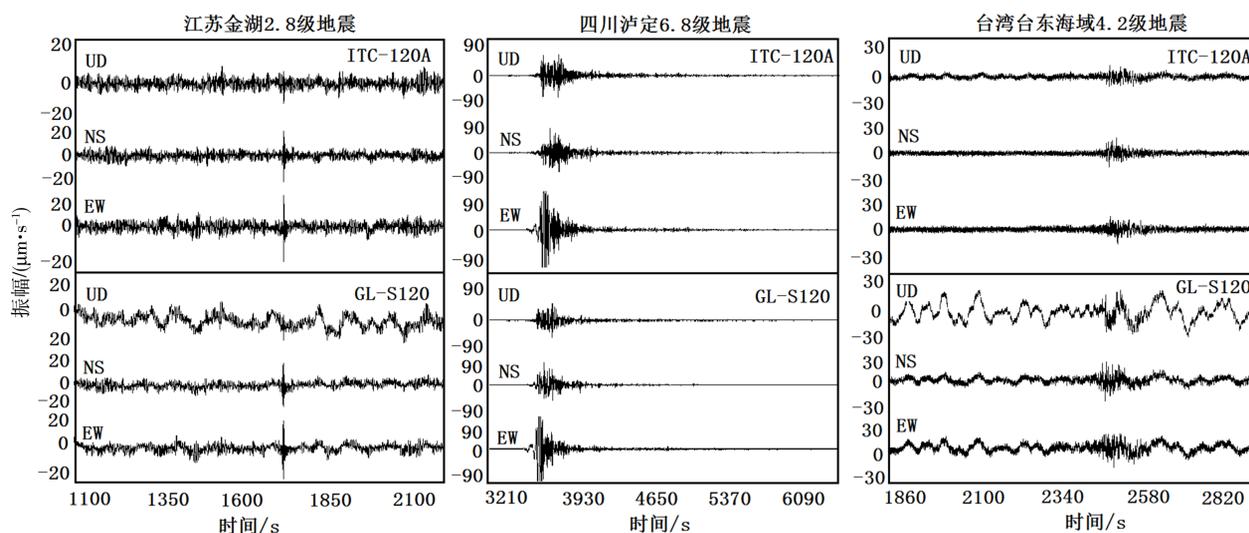


图5 地震计记录地震时域波形图

Fig.5 Time domain waveform of earthquake recorded by seismometer

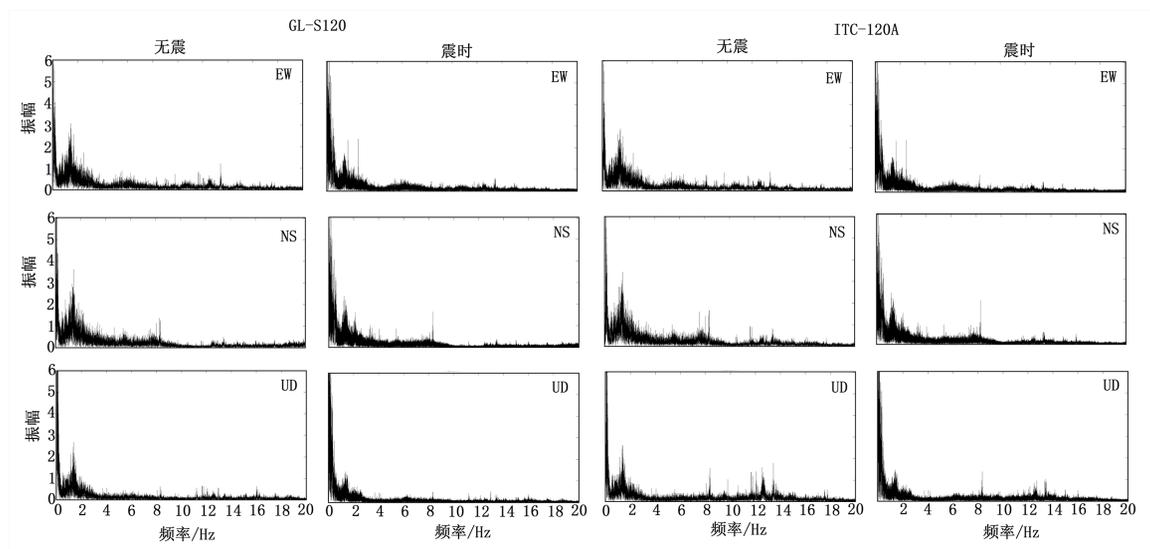


图6 台湾台东海域4.2级地震频谱

Fig.6 Frequency spectrum of $M_{4.2}$ earthquake in Taidong coast in Taiwan

4 自噪声分析

利用两台 GL-CS120 甚宽频地震计分别对南京地震台 GL-S120 和 TIC-120A 地震计进行自噪声对比计算, 同样选择夜晚 02 时及白天 14 时两个时段对比计算结果进行对比分析。对比两组测试中“双台法”及“三台法”结果差异, 此外, 考虑不同检测方法和台基噪声高低等因素对自噪声计算结果的影响。

如图 7 所示的 GL-S120 与 ITC-120A 两套地震计自噪声计算结果, 在 02 时夜晚安静环境下“双

台法”与“三台法”在 0.5 Hz 以上频段的自噪声功率谱较为一致, 而 0.5 Hz 以下频段“三台法”相比于“双台法”自噪声功率谱曲线略低, 推测“双台法”中传递函数误差对自噪声功率谱计算结果中的低频段影响明显。采用“双台法”条件下, GL-S120 地震计 02 时夜晚安静时段获得的自噪声功率谱在 5 Hz 以上频段及 0.3 以下频段略低于白天 14 时, ITC-120A 地震计 02 时夜晚安静时段获得的自噪声功率谱在 7 Hz 以上频段及 0.15 以下频段略低于白天 14 时, 外界干扰增强使得自噪声功率谱高频段略有上升, 低频段上升更明显, 这与台基噪声水平受外界干扰影响相似。甚宽频地震计在

外界干扰增强条件下记录环境噪声差异性增强,记录环境噪声差异部分会被叠加至地震计自噪声水平计算中,致使自噪声水平曲线明显上升。整体而言,不同条件下GL-S120与ITC-120A两套地

震计自噪声计算在0.2~5 Hz均表现出良好的一致性和稳定性,此频段可作为甚宽频地震计自噪声一致性检测的参考频段。

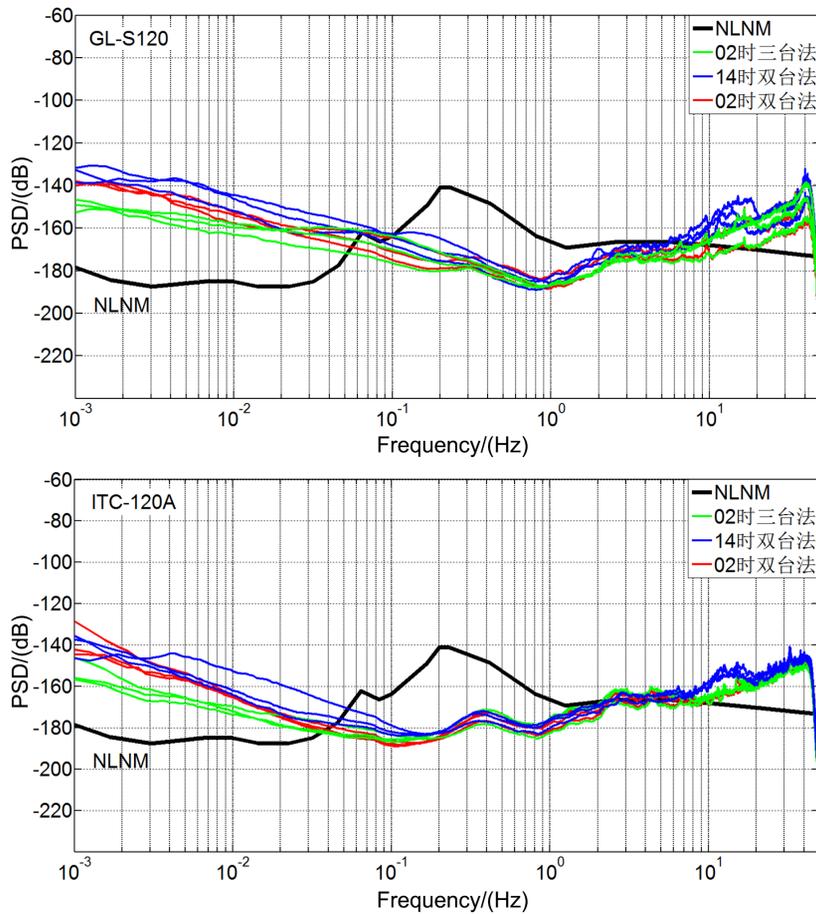


图7 地震计自噪声功率谱

Fig.7 Self-noise power spectrum of seismometers

表3 地震计三分量相关系数

Table 3 Correlation coefficient of three components of seismometers

时间	相关系数					
	双台法			三台法		
	UD	EW	NS	UD	EW	NS
02	0.917 00	0.913 80	0.908 65	0.942 67	0.937 46	0.930 08
14	0.779 08	0.738 46	0.702 16	/	/	/

不同检测方法和台基噪声均对地震计自噪声检测结果产生不同程度的影响,为深入了解影响机理,以ITC-120A地震计为例,在不同自噪声检测条件下(检测方法、时间段)开展对比测试地震计间的相关性分析。如表3所示,其中“三台法”计算相关系数,选择三套地震计对比测试计算两

两之间相关系数均值。02时夜晚安静时段条件下比测试地震计间各分量相关性较高,“双台法”与“三台法”地震计自噪声检测结果差距较小。采用“双台法”计算白天14时数据时,随着外界干扰加剧,台基噪声的增大引起对比测试地震计间各分量相关性下降,导致获得的地震计自噪声功率谱7

Hz以上频段及0.15以下频段有所上升。整体而言,地震计自噪声检测精度与比测地震计间相关性正相关,相关性越高,获得自噪声功率谱越真实,检测方法和台基噪声影响比测地震计间相关性,从而影响自噪声检测精度。

5 讨论与结论

利用南京地震台GL-S120与ITC-120A两套甚宽频地震计对比观测,从日常波形、二者相关性以及台基噪声等方面开展差异性分析,结合地震事件分析上述因素对两套甚宽频地震计带来的地震记录影响,最后通过不同条件下的自噪声计算分析,掌握两套地震计的观测性能。具体结论如下:

(1)ITC-120A相比GL-S120地震计不易受外界干扰,尤其垂直向,产生长周期干扰且振幅较小,由此造成二者三分量相关性夜间安静时段优于白天。

(2)台基噪声分析进一步显示外界干扰的增强对低频段噪声水平影响尤为显著,低频段台基噪声功率谱曲线上升甚至多于高频段。频谱分析表明中小级远震能量集中低频段,导致GL-S120地震计记录中小级远震震相不清。

(3)GL-S120与ITC-120A地震计在不同程度外界干扰影响下台基噪声功率谱曲线形态与自噪声功率谱曲线形态基本一致。安静环境下“双台法”及“三台法”地震计自噪声计算差距不大,低频段“三台法”略有优势。地震计自噪声检测结果与对比测试地震计之间的相关性正相关,相关性越高,得到的自噪声功率谱越真实,检测方法和台基噪声等因素影响对比测试地震计相关性,从而影响地震计自噪声检测结果。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Ringler A T, Hutt C R, Evans J R, et al. A Comparison of seismic instrument noise coherence analysis techniques[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(2):558-567.
- [3] 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):576-583.
- [4] Holcomb LG. A direct method for calculating instrument noise levels in side-by-side seismometer evaluations[R]. Restown, Virginia: USGS, 1989:89-214.
- [5] Sleeman R, Van Wettum A, Trampert J. 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.
- [6] 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(1):100-106.
- [7] 许卫卫,袁松湧,艾印双,等.多通道相关分析用于宽频带地震仪自噪声检测[J].地球物理学报,2017,60(9):3466-3474.
- [8] 李小军,谢剑波,杨大克,等.基于概率统计的甚宽频带地震计自噪声水平分析[J].中国地震,2019,35(1):38-52.
- [9] 宫杰,居海华,鲍海英,等.地震流动观测防护罩集成优化与效果分析[J].震灾防御技术,2020,15(4):855-867.
- [10] 宫杰,张朋,张扬,等.江苏省测震台网井下地震计方位角检测[J].震灾防御技术,2022,17(1):181-187.