

刘旭宙, 沈旭章, 张元生, 秦满忠, 李秋生. 2018. 基于噪声概率密度函数的地震计观测性能对比. 地震学报, 40(4): 461-470. doi: 10.11939/jass.20170137.

Liu X Z, Sheng X Z, Zhang Y S, Qin M Z, Li Q S. 2018. Comparison on different seismometers performance based on probability density functions. *Acta Seismologica Sinica*, 40(4): 461-470. doi: 10.11939/jass.20170137.

基于噪声概率密度函数的地震计 观测性能对比*

刘旭宙¹⁾ 沈旭章¹⁾ 张元生¹⁾ 秦满忠^{1),†} 李秋生²⁾

1) 中国兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所

2) 中国北京 100037 中国地质科学院地质研究所

摘要 在记录波形一致性分析的基础上, 对比不同仪器的噪声概率密度函数的分布形态和中值曲线, 以及不同频率处的概率密度分布, 得出仪器的实际观测性能差别, 其与仪器特性及传递函数的差别相一致. 利用对比噪声概率密度函数的方法可以定量地、直观地给出不同仪器观测性能差别, 更为细致地了解不同地震计的差别, 对观测资料作出合理的评估.

关键词 概率密度函数 地震计对比 背景噪声

doi: 10.11939/jass.20170137 中图分类号: P315.62 文献标识码: A

Comparison on different seismometers performance based on probability density functions

Liu Xuzhou¹⁾ Shen Xuzhang¹⁾ Zhang Yuansheng¹⁾ Qin Manzhong^{1),†} Li Qiusheng²⁾

1) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

2) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: The difference in observational performance between different seismological instruments is not easy to find. In this paper, we discuss differences in the performance of observational seismological instruments on the same observation conditions, using a comparison of the probability density functions (PDFs) of the noise power spectrum, based on an analysis of conformance of seismic recorded waveforms. After comparing the probability density distribution of the power spectrum at different frequencies, as well as the distribution and median curves of PDFs of the noise power spectrum, we obtained the quantitative observation difference of different instruments. This difference agrees with the difference of instrument characteristics and transfer functions. By comparing the PDFs of the noise power spectrum, the quantitative and visual differences in the observation performance of different instruments can be given. This is a more detailed view of the difference between instruments and provides a reasonable evaluation of the observation data.

* 基金项目 地震科技星火计划(XH18050SX)和中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2012IESLZ03)联合资助.

收稿日期 2017-06-23 收到初稿, 2017-12-15 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: manzhongqin@eyou.com



Key words: probability density functions; seismometer comparison; ambient noise

引言

地震计是地震动波形数据采集系统中最重要的部分,不同地震计之间的对比研究是很多研究人员感兴趣的课题.目前国内用于地震观测的地震计有多种(刘瑞丰等,2008),这些地震计所记录数据之间的一致性值得深入研究.

一般来说,地震计的记录特性可以用传递函数来表述,因此,仪器参数的对比基本上可以反映出不同地震计之间的性能差别.但不同地震计的实际观测差别却不容易通过仪器参数的对比直观地看出或者定量地得到.地震计记录的信号包括地震、爆破信号、地脉动信号、环境噪声(气流、海浪、人文等噪声)、环境参数(气压、温度等)变化引起的噪声以及地震计内部噪声,有时环境参数改变引起的噪声也被划归为仪器噪声.地震计之间的实际观测差异一方面来自于仪器噪声的差异,另一方面,因为对相同外部信号记录的不一致性,在实际观测中这些差异耦合在一起,使不同地震计在观测频带范围内呈现出各自的记录特性,从而可能影响到波形分析结果.例如,对于长周期地震计来说,低频范围内的数据常被用于基于接收函数、噪声成像等方法的地球自由振荡研究,而这一频率范围内的记录由于常受到气流、温度和气压的变化及地倾斜等因素的影响,导致不同地震计的记录存在一定的差别.在数据处理时,如果对不同地震计的观测差别有直观的、量化的认识,则可以更合理地选择适宜的数据处理方法.

本文拟对比两种宽频带地震仪器所记录波形的噪声概率密度函数(probability density functions, 简称为 PDFs),以期定量地观察不同仪器观测性能之间的差异,以便深入理解仪器参数与观测性能之间的关系.

1 PDF 方法

1.1 PDF 简介

PDF 统计法是由 Mcnamara 和 Buland (2004) 于 2004 年首次提出,是基于传统的噪声功率谱密度(power spectral density, 简称为 PSD)分析方法,利用长时间内完整连续的波形记录分析地震观测台站噪声水平的方法.该方法区别于传统 PSD 方法之处在于,其在计算中不需要排除包括地震在内的突发事件,也不必刻意地选取外界噪声较小的时段来计算 PSD,而是对所有记录数据进行相同处理,因此可以在保持数据连续性的同时,将各种对背景噪声的影响体现在 PDF 的概率值中,使得该方法包含了地震计对所有地表振动的记录,全面地反映出台站的噪声水平.这一方法近年来已被越来越多的国际同行应用,在美国该方法已被应用于美国地震学合作研究会(Incorporated Research Institutions for Seismology, 简称为 IRIS)和美国国家地震监测台网系统(Advanced National Seismic System, 简称为 ANSS)的数据管理和流动台阵观测数据质量控制(Mcnamara, Boaz, 2005; Diaz *et al.*, 2010).国内,PDF 方法越来越多地被用来评估测震台站数据的观测质量,例如:吴建平等(2012)利用 PDF 方法分析了华北地区的背景噪声,得到了华北不同地区的背景噪声特征,并提出基于 PDF 分析的环境噪声特征可以对流动台阵的数据观测质量进行定量评估;葛洪魁等(2013)通过对不同台基的台站背景噪声进行 PDF 分析,提出了流动台阵观测的有效降噪方法.

PDF 的计算方法可概述为:首先将一个较长时段的数据记录分成连续的若干段,以方便

对每一段数据进行 PSD 计算;然后将所有的 PSD 计算结果进行概率统计,即统计出在某一频率,各功率谱密度值在所有可能出现的功率谱密度值中所占的比例,其计算方法为

$$P(f,d) = \frac{N_{df}}{N_f}, \quad (1)$$

式中: $P(f, d)$ 表示频率为 f 、功率谱密度为 d 时的概率密度; N_{df} 表示频率为 f 时,功率谱密度在 $[d, d+\delta d]$ dB 范围内出现的次数; N_f 表示频率为 f 时,各功率谱密度值出现的总次数。

1.2 数据处理过程

具体计算步骤为:①用 SAC 软件(黄金莉,顾小虹,2001)去除地震波形记录的均值和线性趋势,再去除仪器响应,得到速度记录(单位: m/s);②将每小时的波形数据分为 14 段,每段数据的长度为 1 000 s(即数据段重合率为 80%),用以减小 PSD 的方差;③对每一段数据进行汉宁(Hanning)窗加窗处理,以压制 PSD 计算时的旁瓣影响,并利用功率谱修正周期图法进行 PSD 计算;④对每小时 14 段 PSD 结果进行平均,得到该时段的 PSD 均值;⑤对 PSD 均值结果进行 1/10 倍频程滤波,得到对数坐标下均匀平滑分布的速度 PSD;⑥将各频率对应的 PSD 值转换为以 dB 为单位,统计各频率 PSD 的概率分布,得到两套仪器所记录波形的 PDF 结果;⑦绘制 PDF 结果图,并与全球地震背景噪声模型(Peterson, 1993)的新低噪声模型(new low noise model, 简称为 NLNM)和新高噪声模型(new high noise model, 简称为 NHNM)进行对比,以便直观地了解两套仪器在各频段所记录噪声的分布情况.这两个模型是 Peterson 在定量地分析了全球 75 个固定地震台站的背景噪声功率谱密度后得到的。

在实际资料处理过程中,本文选取了两套仪器自 2011 年 11 月 1 日至 2012 年 10 月 31 日一整年的记录波形,按照上述数据处理过程对数据进行处理,并绘制 PDF 结果。

2 利用 PDF 对比地震计特性

地震计在工作中会受到各种因素的干扰和影响,两台地震计在同一观测环境下记录到的波形也会存在一定的差别,这种差别可以体现出地震计不同的观测性能,还可以用来评估某一地震计是否能够维持正常工作.一般来说,不同类型、不同厂家的地震计,或者同一类型、不同工作年限的地震计,其记录波形均可能出现一定的差别.仪器参数的对比往往不能够细致地体现出这些差别,而 PDF 对比则可以给出定量的对比结果,这种对比结果可以帮助我们了解观测环境对不同地震计的影响程度,进而对观测数据进行评估,并可根据不同的观测条件和需求选择相应的地震计。

2.1 资料

因为宽频地震观测实验和壳幔速度研究项目“深部探测技术与实验研究”(SinoProbe)的开展,中国地质科学院地质研究所和中国地震局兰州地震研究所在甘肃省合作市测震台网的固定台站上架设了宽频带流动观测仪器,架设周期为 2011 年 10 月至 2012 年 12 月.在此期间,固定台和流动台的仪器并行观测,二者均位于基岩山洞内,且放置在同一水泥摆墩上,均采取了防风保温等措施,观测环境非常一致,良好的观测条件保证了其观测数据的质量.表 1 列出了观测仪器的主要参数,可以看出,这两套仪器均适合于长周期观测,且其记录特性优良;两套设备从仪器参数到观测参数虽然存在一定的差别,但这些差别恰好可以帮助我们衡量 PDF 方法能否体现出两套仪器观测性能的细微差别,从而体现出仪器参数不能提供的信息,进而对仪器观测性能有更为具体的认识。

表1 观测仪器的主要参数

Table 1 Main parameters of the observation instruments

台站类型	数采型号	数采字长/bit	数采动态范围/dB	地震计型号	地震计频率范围	地震计动态范围/dB	采样率/sps
固定台	EDAS-24	24	>135	BBVS-60	40 Hz—60 s	>130	100
流动台	REFTEK-130	24	>135	CMG-3T	50 Hz—120 s	>140	50

2.2 仪器波形记录

为确保两套仪器正常工作,我们选取一次远震和一次近震的波形记录分别进行对比,对所有波形记录均去中值和去仪器响应.考虑到仪器可能存在方位角不完全一致的问题(陈继峰等,2016),为避免这种不一致带来的水平分量的波形差异,我们先将两台地震计各自的東西分量和南北分量合并为不考虑矢量方向的水平向记录.从两次地震的原始记录波形对比中可以看出,两套仪器所记录的波形走时曲线和幅值的一致性均非常高,差别细微,各震相的相位无明显差别(图1).

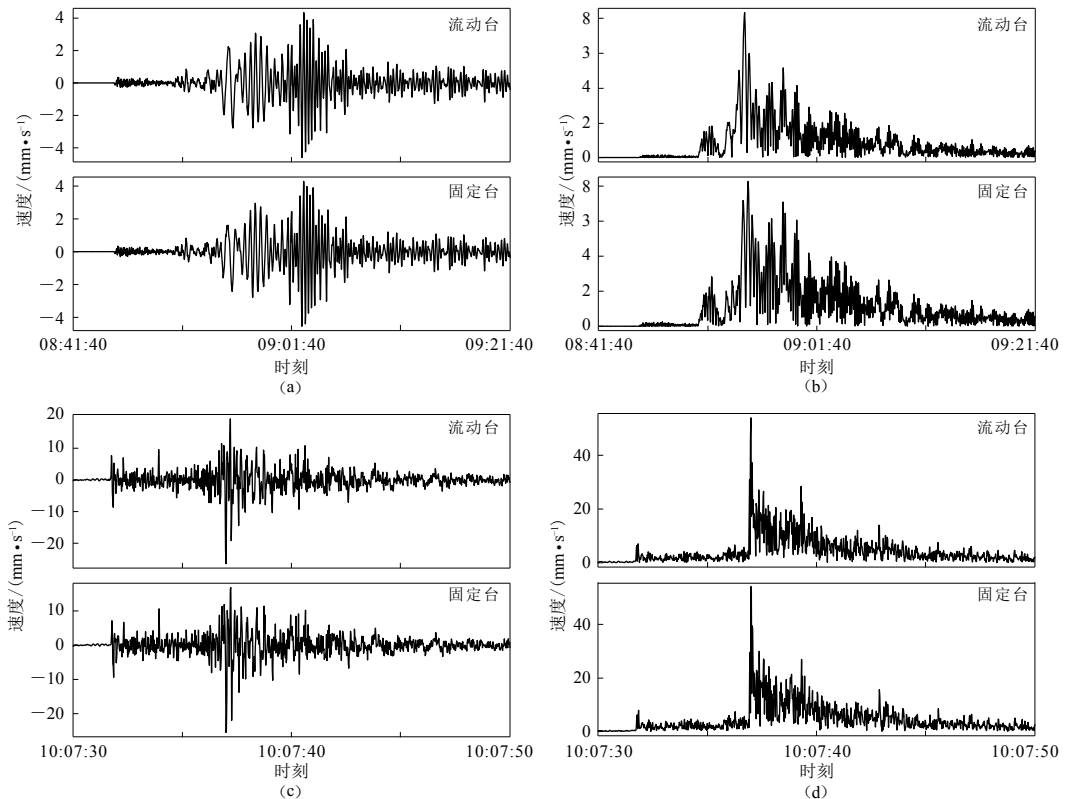


图1 流动台和固定台不同分量的地震波形记录对比

(a)和(b)分别为远震的垂直分量和水平合并分量;(c)和(d)分别为近震的垂直分量和水平合并分量

Fig. 1 Comparisons of seismic waveforms for different component between the mobile station and the fixed station

(a) and (b) are vertical component and synthesized horizontal component of distant earthquake, respectively; (c) and

(d) are vertical component and synthesized horizontal component of near earthquake, respectively

进一步对上述两套仪器的近震和远震波形记录进行互相关计算,在计算前将所有波形均进行0.02—20 Hz的带通滤波处理.近震波形的长度为20 s,选取相关窗长为1 s;远震波形

的长度为 2 400 s, 选取相关窗长为 10 s. 从互相关结果(图 2)中可以看出: 无论垂直分量还是水平分量, 近震波形在 S 波到达之前均有一定的差异, 而在 S 波到达之后差异较小, 这种差异可能是由于地震波传播过程中微小的路径差异所造成的; 对于远震记录, 其在面波部分存在一定差异, 水平向的差异较垂直向小. 通过近震和远震波形资料的对比可以看出, 两套仪器运行正常, 波形记录效果均很好.

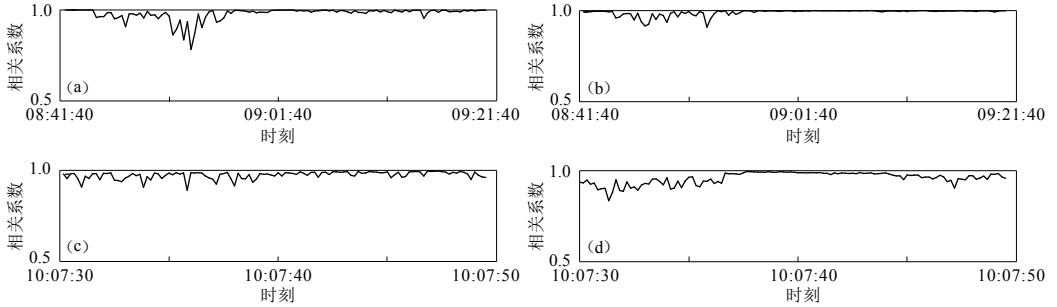


图 2 流动台和固定台不同分量地震波形记录的相关分析结果

(a)和(b)分别为远震垂直分量和水平合并分量; (c)和(d)分别为近震垂直分量和水平合并分量

Fig. 2 Cross-correlations of different component seismic waveforms of the mobile station and the fixed station

(a) and (b) are vertical and combined horizontal component of distant earthquake respectively; (c) and (d) are vertical and combined horizontal component in near earthquake respectively

2.3 PDF 对比分析

由于两套观测仪器的观测环境非常一致, 因此用 PDF 方法可以去除单次波形记录对比中存在的偶然性, 从而可以看出两套仪器在对比频率范围内的记录差异. 图 3 为利用两套仪器在相同观测时段(2011 年 11 月 1 日至 2012 年 10 月 31 日)的波形数据绘制的 PDF 对比图, 周期范围介于 20 Hz—50 s 之间, 以确保两套仪器均处于速度平坦响应的范围内.

图 3 中对各台站的 PDF 结果均计算了均值和中值, 可以看出, 中值更接近实际的功率谱概率密度最大值. 对比两个台站的垂直分量和南北分量的 PDF 中值, 同时对两套仪器的仪器噪声(Ringler, Hutt, 2010)进行对比(图 4), 可以看出: 两套仪器的 PDF 中值相似度非常高, 仅在周期小于 0.1 s (10 Hz) 以及大于 10 s 范围内略微有差别; 两套设备的仪器噪声均非常低, BBVS-60 的仪器噪声相对更低, 两套仪器的环境噪声在全频段均远远高于仪器噪声.

2.4 PDF 差异及讨论

地震仪器记录的信息包括地面运动信息和仪器噪声, 在 PDF 对比分析时, 也可以采用“环境背景噪声(包括环境噪声、干扰和地震事件)+仪器噪声”的模型来进行解释. 在地震计速度平坦输出的频率范围内, 仪器所记录地震动的振幅远大于仪器噪声; 在速度平坦频率范围之外, 这种差别将明显减小(Mark *et al*, 1990). 在本文计算 PDF 所涉及的频率范围内, 仪器噪声也远低于背景噪声, 因此噪声功率谱得到的结果主要反映了仪器对环境背景噪声的记录情况.

大体上, 可以将仪器记录的背景噪声的频率范围分为高频(1 Hz 以上)、低频(1—10 s)和长周期(10—50 s) 3 个部分. 前人的研究表明: 高频部分的干扰主要以人类活动等为主, 这种干扰随距离的衰减最快, 另外气流以及地方震等自然因素也会形成高频干扰(Mcnamara, Buland, 2004); 低频部分的干扰主要来自微震噪声, 微震噪声与海底压力扰动和气流及气流

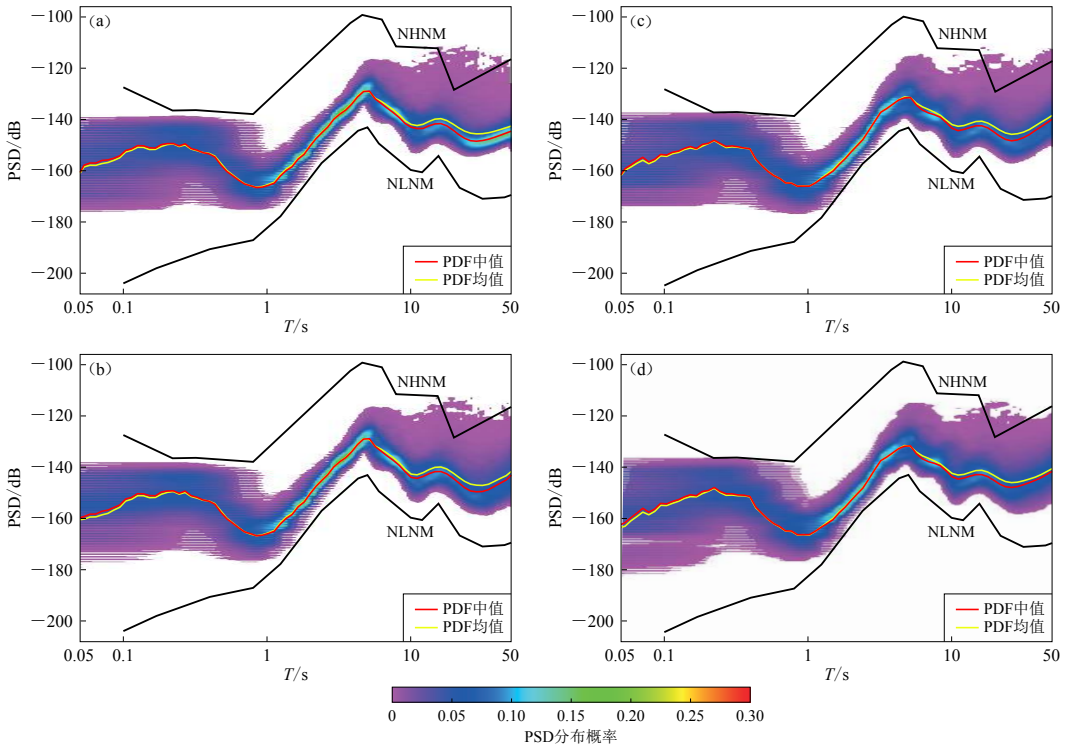


图3 两套仪器不同分量的PDF对比

(a)和(b)分别为流动台和固定台的垂直分量PDF; (c)和(d)分别为流动台和固定台的南北分量PDF

Fig. 3 The comparisons of PDF of different components

(a) and (b) show vertical component PDFs of mobile station and fixed station; (c) and (d)

show north-south component PDFs of mobile station and fixed station

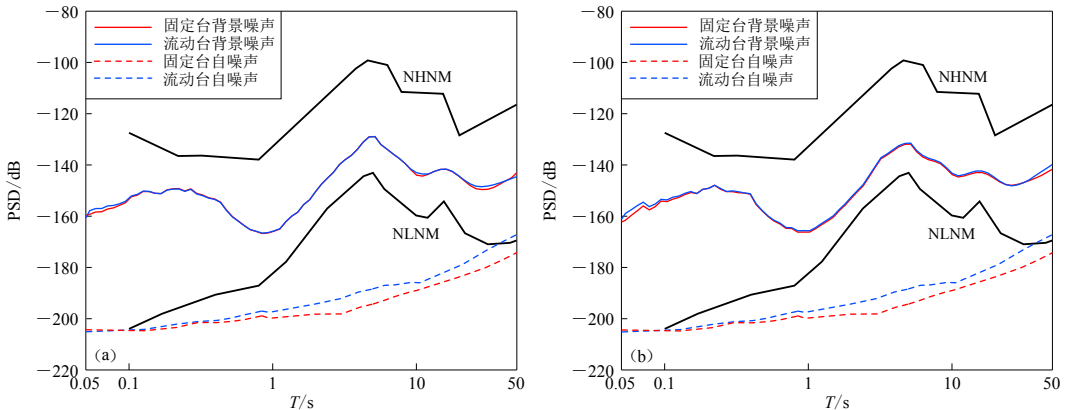


图4 流动台和固定台垂直分量(a)和南北分量(b)的PDF中值及仪器自噪声对比

Fig. 4 The comparison of the PDF median and instrument self noise between the mobile station and the fixed station in vertical component (a) and north-south component (b)

引起的植物根茎扰动等有关,其主要峰值的形成一般认为与海洋波与海底或海岸线的非线性相互作用引起的海底压力扰动有关(Longuet-Higgins, 1950; Frontera et al, 2010),此外中远

震也会影响到这一频率范围的背景噪声;长周期部分的噪声则主要与自然因素相关 (Bonney-Claudet *et al*, 2006), 如风、急流(瀑布和河流)、温度变化、气压变化和地倾斜等, 其中地倾斜使重力耦合至水平分量中, 因此水平分量的长周期噪声会高于垂直分量 (Wielandt, 2002); 此外各类远震波也在低频和长周期范围影响背景噪声。

从两种仪器的背景噪声 PDF 中值和仪器噪声对比来看: 当周期在 0.1 s 以上时, 两者的仪器噪声差异超过了背景噪声差异; 当周期处于 10 s 以上的低频范围时, 两种仪器的背景噪声 PDF 中值出现一定的差别, 即固定台站的中值相对略低, 这一频率范围内 PDF 概率密度分布则出现较为明显的差别, 流动台站的概率密度分布相对较为聚拢; 在周期小于 0.1 s 的频率范围内, 二者的仪器噪声水平非常相近, 但固定台站的 PDF 中值相对较低, 二者的 PDF 概率密度分布并未出现明显差别, 因此可以推断, 这种差别源于仪器记录背景噪声幅值的差异。

为了更好地观察不同频率处两套仪器记录背景噪声的差别, 我们以垂直分量为例, 观察 PDF 中 0.06 (16.7 Hz), 0.1 (10 Hz), 1, 10, 30 和 40 s 等频率处的概率分布细节 (图 5)。可以看出: ① 在 0.06 s 处, 两套仪器的 PSD 分布的整体形态一致, 但二者的 PSD 值存在一定偏差, 说明两套仪器在这一频段记录的环境噪声是一致的。由于两套设备的仪器噪声大小在这一频率处相当, 因此, PSD 分布的偏移则反映出两套观测仪器在该频率处的灵敏度的实际细微差异, 这一差异从仪器参数中并不能直接看出; ② 在 0.1, 1, 10 s 等 3 处, 两套仪器的 PSD 分布几乎完全一致, 说明两套仪器的记录特性在这一频率范围内的一致性非常高。反观二者的仪器噪声则存在一定差异, 考虑到仪器噪声的幅值远小于背景噪声的幅值, 说明仪器

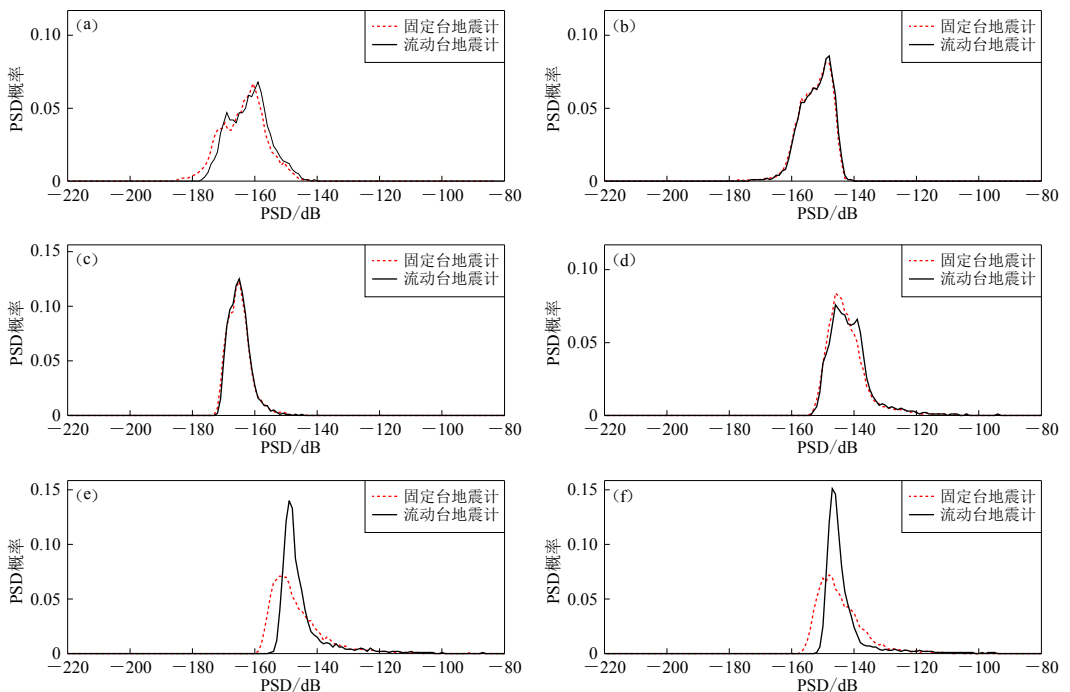


图 5 不同频率处流动台和固定台 PSD 概率分布对比

(a)–(f) 分别为 0.06, 0.1, 1, 10, 30 和 40 s 处固定台和流动台 PSD 概率分布的对比

Fig. 5 PSD probability distribution comparison between the mobile station and the fixed station at certain frequencies

(a)–(f) are the comparisons at frequencies of 0.06, 0.1, 1, 10, 30 and 40 s, respectively

噪声的差异并不影响到背景噪声的记录; ③ 在 30 s 和 40 s 处, 两套仪器的仪器噪声存在差异, 固定台的相对较低. 背景噪声也存在一定差异, 不过, 相较于背景噪声 PDF 中值(接近 PSD 峰值)的差别, 其 PSD 分布差别较大, 主要体现在 PSD 分布形态, 固定台的分布更宽, 流动台则较为聚拢. 结合仪器噪声幅值, 可以看出在这一频率, 虽然固定台的仪器有更低的仪器噪声, 但其对于外界因素的影响更为“敏感”, 从而表现出更大的 PSD 变化范围, 而流动台站的 PSD 值分布则较为集中.

在地震观测系统中, 数据采集器对于记录背景噪声的影响很小, 而本文中两台数据采集器的工作参数也非常接近: 均为 24 位高精度 AD 转换, 动态范围大; 工作温度均介于 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间; GPS 精度均小于 $\pm 100\text{ }\mu\text{s}$; 数据采集器增益为 1 时, 自身工作引起的噪声水平平均约为 1 个计数(1 个计数对应地动速度小于 $0.001\text{ }6\text{ }\mu\text{m/s}$), 因此, 数据采集器对于 PDF 结果的影响极小, 两套仪器记录的差异主要来自于地震计. 地震计是受外界干扰影响的主要部分, 诸如温度、气流、地倾斜等干扰因素对于地震观测系统的影响主要作用于地震计. 如前文所述, 地震计的仪器噪声大致可以分为地震计内部噪声和仪器受环境参数(气压、温度等)变化引起的噪声. 对于速度地震计来说, 地震计内部噪声主要包括换能器放大器的电子噪声和机械摆体的布朗热噪声(崔庆谷, 2003). 本文选取的两种地震计均采用电容位移换能器, 这是由于相较于速度换能器, 位移换能器在噪声抑制方面有优良的性能(崔庆谷, 2003), 因此, 两种地震计在换能器电子抑制噪声方面均有很好的效果. 机械摆体的布朗热噪声大小由 $8\pi K_b T_e / QT_0 m_s$ 决定, 其中 K_b 为玻尔兹曼常数, T_e 为开尔文温度, Q 为摆体的品质因子, T_0 为摆体的自振周期, m_s 为摆体的等效质量. Q , T_0 和 m_s 共同决定了机械摆体的布朗热噪声的大小. 相对于地震计的内部噪声, 环境参数变化引起的噪声往往要大得多, 摆体受气压变化引起的噪声振幅有时比地面震动的振幅还要高几个数量级(Wielandt, Streckeisen, 1982); 另外, 虽然诸如地震的计恒温观测系统在不断改进(孙宏志, 2016), 但温度和地倾斜引起的噪声同样也是不容忽视的(崔庆谷, 2003), 这些环境参数变化引起的噪声也与摆体的 Q , T_0 和 m_s 等地震计参数有关. 水平方向的摆体特别容易受到地面形变和地倾斜的影响(段天山, 袁顺, 2011), 垂直方向的摆体由于处在非真空环境中, 更容易受到气压的影响. 在 $30\sim 40\text{ s}$ 频率范围内, 气压、温度变化等正是影响观测的主要因素, 因此, 两种仪器的 PDF 在低频范围的差别与各自不同的 Q , T_0 和 m_s 等地震计参数有很大关系. 结合图 5e, f 可以看出, 固定台 BBVS-60 型地震计在 $30\sim 50\text{ s}$ 范围内受自然因素的干扰而引起的背景噪声变化范围较流动台 CMG-3T 型地震计更大, CMG-3T 型地震计在此频率范围内的记录变化范围较为集中.

从两台地震计零极点描述的传递函数来看, BBVS-60 型地震计给出的零点为 0, 0 和 -200.5 , 极点 p_1, p_2, \dots, p_6 分别为 $-0.074\text{ }5+0.074\text{ }5i$, $-0.074\text{ }5-0.074\text{ }5i$, $-100.65+264.63i$, $-100.65-264.63i$, -134.3 , -493.7 . CMG-3T 型地震计给出的零点为 0 和 0, 极点为 $p_1 = -0.037\text{ }01+0.037\text{ }008i$, $p_2 = -0.037\text{ }01-0.037\text{ }008i$. 根据各极点的具体值可知, p_1 和 p_2 为闭环主导极点, 系统特性主要由零点及 p_1 和 p_2 组成的二阶系统描述, 因此, 二者的传递函数均可表示为

$$H(s) = \frac{ks^2}{(s-p_1)(s-p_2)} = \frac{ks^2}{s^2 + K_{11}s + K_{12}}, \quad (2)$$

式中, s 为复变量, k 为灵敏度和归一化因子, K_{11} 和 K_{12} 为频率常数, K_{11} 与阻尼及闭环周期相关, K_{12} 与闭环周期相关. 闭环主导极点主要反映了地震计的低频特性(蔡亚先等, 2004),

一组共轭复数闭环主导极点的负实部反应了地震计低频振荡的衰减特性. 式(2)中两台地震计极点值的实部和虚部均相差近一倍, 这一差别可能导致两台地震计对于噪声响应的衰减不同, 也可能导致PDF低频区域的差别, 同时不同的极点也决定了二者有不同的闭环周期.

为了定量地得到两种地震计在本文分析频率范围内的记录差异, 本文提出一种新的PDF对比方法, 即将两个台站的PDF结果进行差值运算, 得到的结果可以显示出二者在各频率值的PSD分布及PDF中值差异(图6). 从图6中的PDF中值差曲线可以明显地看出

两套仪器背景噪声的最大概率差值, 根据色条可以更为细致地得到不同频率范围内两套仪器背景噪声的具体差值. 总体来看, 两套仪器在周期20 s以下的记录性能, 除了低于0.1 s的周期范围有一定的中值差之外, 总体非常一致. 周期20 s以上差异则较为明显, 从图6中可以直观地、量化地得到两种仪器背景噪声的具体差值.

3 讨论与结论

PDF是了解地震观测台站环境噪声水平的方法, 也是评估台站记录波形质量的重要方法, 它不仅能够提供环境噪声评估, 而且从本文的对比分析来看, PDF方法可以有效地判断出不同观测仪器在同样观测条件下的细微差别. 这种差别来自于仪器的结构和具体工作参数, 诸如仪器频率工作范围、灵敏度、零极点等参数可以直观地从仪器参数中得到, 但是仪器在一定观测环境下的具体观测性能却不容易从仪器参数中量化得出, 因此利用PDF分析方法, 我们可以对不同仪器观测性能的差别给出量化的、直观的结果, 并可结合仪器的具体参数, 更为细致地了解不同地震计的差异, 进而对观测资料作出更为合理的评估. 尽管如此, 但是由于条件所限, 本研究中采用了不同的数据采集器, 虽然对于观测及分析结果影响很小, 但在今后的研究中, 可以避免这一类的影响因素以得到更为合理的结果. 此外, 人为地改变温度、湿度、气流等环境观测参数, 能得到更为全面的不同地震计的性能差异.

几位审稿专家对本文提出了诸多宝贵意见, 作者在此表示感谢!

参 考 文 献

- 蔡亚先, 吕永清, 周云耀, 程骏玲. 2004. CTS-1 甚宽频带地震计[J]. 大地测量与地球动力学, 24(3): 109-114.
- Cai Y X, Lü Y Q, Zhou Y Y, Cheng J L. 2004. CTS-1 very broadband seismometer[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 24(3): 109-114 (in Chinese).
- 陈继锋, 李亮, 李少睿, 刘白云, 陈晓龙. 2016. 甘肃省测震台网地震台站地震计方位角检验与校正[J]. 地震工程学报, 38(3): 460-465.
- Chen J F, Li L, Li S R, Liu B Y, Chen X L. 2016. Check and correction of seismometer azimuth for Gansu seismic network stations[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 38(3): 460-465 (in Chinese).

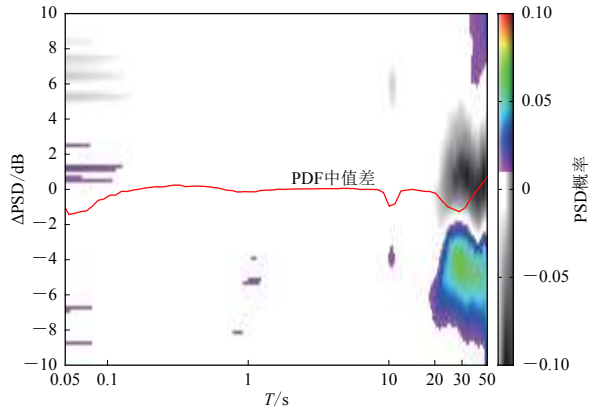


图6 流动台和固定台的PDF分布定量差值

Fig. 6 The quantitative difference of PDFs between the mobile station and the fixed station

- 崔庆谷. 2003. 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: 36-70.
- Cui Q G. 2003. *The Research for Performance and Self-Noise Measure of Force-Balanced Seismometers*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 36-70 (in Chinese).
- 段天山, 袁顺. 2011. BBVS-60、CMG-3ESPC型地震计工作参数对比分析[J]. 地震地磁观测与研究, **32**(5): 109-114.
- Duan T S, Yuan S. 2011. The comparative analysis of noise level and dynamic range of BBVS-60 and CMG-3ESPC seismometer in practice[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **32**(5): 109-114 (in Chinese).
- 葛洪魁, 陈海潮, 欧阳颺, 杨微, 张梅, 袁松涌, 王宝善. 2013. 流动地震观测背景噪声的台基响应[J]. 地球物理学报, **56**(3): 857-868.
- Ge H K, Chen H C, Ouyang B, Yang W, Zhang M, Yuan S Y, Wang B S. 2013. Transportable seismometer response to seismic noise in vault[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(3): 857-868 (in Chinese).
- 黄金莉, 顾小虹. 2001. 国家数字地震台网中心应用地震波形数据格式及转换[J]. 地震, **21**(4): 60-65.
- Huang J L, Gu X H. 2001. Data format and conversion of seismic waveform used in National Center of Digital Seismic Network[J]. *Earthquake*, **21**(4): 60-65 (in Chinese).
- 刘瑞丰, 高景春, 陈运泰, 吴忠良, 黄志斌, 徐志国, 孙丽. 2008. 中国数字地震台网的建设与发展[J]. 地震学报, **30**(5): 533-539.
- Liu R F, Gao J C, Chen Y T, Wu Z L, Huang Z B, Xu Z G, Sun L. 2008. Construction and development of digital seismograph networks in China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **30**(5): 533-539 (in Chinese).
- 孙宏志. 2016. 地震计智能恒温系统的设计与实现[J]. 地震工程学报, **38**(6): 1004-1009.
- Sun H Z. 2016. Design and implication of an intelligent constant temperature control system of seismometers[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **38**(6): 1004-1009 (in Chinese).
- 吴建平, 欧阳颺, 王未来, 姚志祥, 袁松涌. 2012. 华北地区地震环境噪声特征研究[J]. 地震学报, **34**(6): 818-829.
- Wu J P, Ouyang B, Wang W L, Yao Z X, Yuan S Y. 2012. Ambient noise level of North China from temporary seismic array[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **34**(6): 818-829 (in Chinese).
- 谢剑波, 何寿清, 吕金水, 吴永权, 张政平, 黎珠博, 王国望. 2007. 宽频带地震计的安装[J]. 地震地磁观测与研究, **28**(1): 57-63.
- Xie J B, He S Q, Lü J S, Wu Y Q, Zhang Z P, Li Z B, Wang G W. 2007. Installation of broadband seismometer[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **28**(1): 57-63 (in Chinese).
- Bonnefoy-Claudet S, Cotton F, Bard P Y. 2006. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review[J]. *Earth Sci Rev*, **79**(3/4): 205-227.
- Diaz J, Villasenor A, Morales J, Pazos A, Cordoba D, Pulgar J, Garcia-Lobon J L, Harnafi M, Carbonell R, Gallart J. 2010. Background noise characteristics at the Iber array broadband seismic network[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **100**(2): 618-628.
- Frontera T, Ugalde A, Olivera C, Jara J A, Goula X. 2010. Seismic ambient noise characterization of a new permanent broadband ocean bottom seismometer site offshore Catalonia (northeastern Iberian Peninsula) [J]. *Seismol Res Lett*, **81**(5): 740-749.
- Longuet-Higgins M S. 1950. A theory of the origin of microseisms[J]. *Philosoph Trans R Soc Lond, Mathemat Phys Sci*, **243**(857): 1-35.
- Mark A R, Robert D M, John A O. 1990. Limits of sensitivity of inertial seismometers with velocity transducers and electronic amplifiers[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **80**(6A): 1725-1752.
- Mcnamara D E, Buland R P. 2004. Ambient noise levels in the continental United States[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **94**(4): 1517-1527.
- Mcnamara D E, Boaz R I. 2005. *Seismic Noise Analysis System, Power Spectral Density Probability Density Function: Stand-Alone Software Package*[R]. Reston: Geological Survey Open File Report: 1438.
- Peterson J R. 1993. *Observations and Modeling of Seismic Background Noise*[R]. Albuquerque: Geological Survey Open File Report: 93-322.
- Ringler A T, Hutt C R. 2010. Self-noise models of seismic instruments[J]. *Seismol Res Lett*, **81**(6): 972-983.
- Wielandt E, Streckeisen G. 1982. The leaf-spring seismometer: Design and performance[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **72**(6A): 2349-2367.
- Wielandt E. 2002. *Seismic Sensors and Their Calibration*[M/OL]. [2013-01-11]. <http://www.docin.com/p-627048690.html>.