

张阿瑶, 范广超, 王敏超, 沈旭峰, 张诚鎏, 卢娜, 崔甲甲. 2018. 不同深度布设台站的噪声及信号幅值特征分析. 地震学报, 40(4): 440–447. doi: 10.11939/jass.20170150.  
Zhang A Y, Fan G C, Wang M C, Shen X F, Zhang C L, Lu N, Cui J J. 2018. Amplitude characteristic analysis of noise and signal from the stations deployed at different depths. *Acta Seismologica Sinica*, 40(4): 440–447. doi: 10.11939/jass.20170150.

# 不同深度布设台站的噪声及 信号幅值特征分析<sup>\*</sup>

张阿瑶<sup>†</sup> 范广超 王敏超 沈旭峰  
张诚鎏 卢 娜 崔甲甲

(中国西安 710024 西北核技术研究所)

**摘要** 为探究地震观测中地震计检测到的噪声和信号强度均受其布设深度的影响, 本文首先对CPUP 和LPAZ 两台站布设的不同深度地震计所得到的数据进行噪声水平和地震信号对比; 其次采用对比功率谱密度的方法对两台站不同通道采集到的不同时段的噪声数据进行分析; 最后比较两台站不同通道采集到的整月数据的噪声幅值、信号幅值、信噪比特征。结果显示: 深度较大的通道, 其噪声功率均值较小; 当事件信号到来时, 较深通道的地震计检测到的信号和噪声幅值比较浅通道均有所减小, 在信号和噪声幅值均减小的共同影响下, 信噪比有一定程度的变化, 其中LPAZ 台站的信噪比提高较为明显。

**关键词** 地震观测 深井台站 噪声 信号特征

doi: 10.11939/jass.20170150 中图分类号: P315.63 文献标识码: A

## Amplitude characteristic analysis of noise and signal from the stations deployed at different depths

Zhang Ayao<sup>†</sup> Fan Guangchao Wang Minchao Shen Xufeng  
Zhang Chengliu Lu Na Cui Jiajia

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** In seismological observations, the detected noise and signal strength are affected by the depth of seismometer. The data obtained from CPUP and LPAZ, two different stations with two channels at different depths, show different levels of noise and seismic signals. In this paper, we mainly investigate the noise of the two stations by contrasting the noise power spectral density of different channels over different time periods, and the seismic signals by comparing the noise and signal amplitude and signal noise ratio of the two stations. The results show that the channels with larger depths have smaller average noise power. Furthermore, when the seismic waves arrive, the noise and signal amplitudes detected by the seismometers in the deeper channels have been reduced compared with the seismometer in the shallow channels, and on

\* 基金项目 国家自然科学基金项目(41474035)资助。  
收稿日期 2017-07-19 收到初稿, 2017-11-06 决定采用修改稿。  
† 通信作者 e-mail: zhangayao@nint.ac.cn



this situation the signal noise ratio changed to a certain degree, and is improved more obviously for the station LPAZ.

**Key words:** seismological observation activity; borehole station; noise; signal characteristic

## 引言

地震学中,通常认为深井布站是减小观测噪声的一种有效途径(李伟等,2013)。相关研究证实:随着布站深度的增加,地面干扰尤其是高频干扰的影响会相应减小(Carter *et al*, 1991),然而对于不同台站,其变化程度是不一样的。此外,当事件信号到达台站时,较深处的地震计接收到的反射波能量会衰减较多,导致入射波与反射波的叠加波振幅幅值减小,再加上噪声数据的变化,不确定还能否获得更高信噪比的检测结果。

为探究地震计检测到的噪声和信号强度受其布设深度的影响,本文将主要利用筛选出的CPUP和LPAZ两台站不同深度通道所采集的数据进行分析,得到台站的噪声变化情况和检测事件的信号特征,以期为减小观测噪声、提高观测数据信噪比提供有益的台站布设思路。

## 1 数据获取及处理方法

从美国地震学研究联合会(Incorporated Research Institutions for Seismology,简写为IRIS)进行信息查询和数据下载,检索IRIS所有台站中具有深度信息的台站,最终筛选出位于南美洲的CPUP台站和LPAZ台站两个对照组进行对比研究,其基本信息见表1。

表1 CPUP和LPAZ台站的基本信息

Table 1 Basic information of stations CPUP and LPAZ

台站	经度/°W	纬度/°S	通道	深度/m	采样率/sps	仪器类型
CPUP	26.33	57.33	BHZ	93.9	40.0	KS54000+AIM24
			SHZ	32.0		GS21+AIM24
LPAZ	16.29	68.13	BHZ	100.0	40.0	KS54000+AIM24
			SHZ	30.0		GS21+AIM24

这两对照组均将地表位置一致的不同通道的地震计设置在不同深度处,从而保证数据采集于同一地点,使所得结论能够更客观地反映深度变化对地震观测数据的影响。

本文分别从IRIS(2017)数据共享网站下载了两台站2015年6月23—28日,2015年9月23—28日,2015年12月23—28日,2016年3月23—28日以及2015年9月的数据,并对其进行分析对比,以研究噪声数据和事件的信号特征。

噪声数据的处理主要通过对比噪声功率谱密度(power spectral density,简写为PSD)来实现,对无明显事件信号的噪声数据段进行去趋势项处理后,计算CPUP台站和LPAZ台站不同通道扣除仪器响应后的噪声功率谱密度分布,结果以PSD曲线呈现。事件的信号特征主要涉及事件中的信号幅值、噪声幅值和信噪比等的差异,参考全面禁止核试验组织国际数据中心的地震事件公报中的事件列表,截取CPUP台站和LPAZ台站在2015年9月检测到的事件的波形,对每一段波形数据进行滤波、去趋势项、去仪器响应后,分别计算事件在0.75—1.5 Hz,1—2 Hz,2—4 Hz和3—6 Hz等4个频带内的信号幅值、噪声幅值和信噪比,以信号幅值最大的频带为最优滤波带,并记录下最优滤波频带内的信号幅值、噪声幅值和信噪比作为该事件的信号特征,以此来对比不同深度的两通道的信号特征差异性。

## 2 深井台站的噪声变化分析

地震信号是噪声数据与信号叠加的结果,当信噪比较低时,信号可能会完全被干扰噪声所淹没(Bormann, 2002),因此,噪声是台站观测数据中需要重点研究的部分。本文通过求取噪声功率谱密度的方法,对CPUP和LPAZ台站数据不同深度的噪声特性分别进行对比分析。需要说明的是,虽然两台站的对比通道内所布设的地震计类型不同,但两地震计的自身噪声差异相对于检测到的噪声水平,对研究结果并不产生影响,故可忽略不计。

### 2.1 CPUP 台站噪声分析处理

为确保数据的稳定性与客观性,分别于2015年6月,9月,12月和2016年3月各选取5天的数据,经过对比事件列表,剔除明显的地震信号时段后,得到CPUP台站的BHZ通道和SHZ通道的噪声功率谱曲线。考虑到两种地震计幅频响应平坦的共有频带,本文主要探讨1—5 Hz频段内的数据,其对比结果如图1所示,其中,上下两条线分别为全球地震噪声模型的新高噪声模型(new high noise model, 简写为NHNM)和新低噪声模型(new low noise model, 简写为NLNM)(Peterson, 1993)。

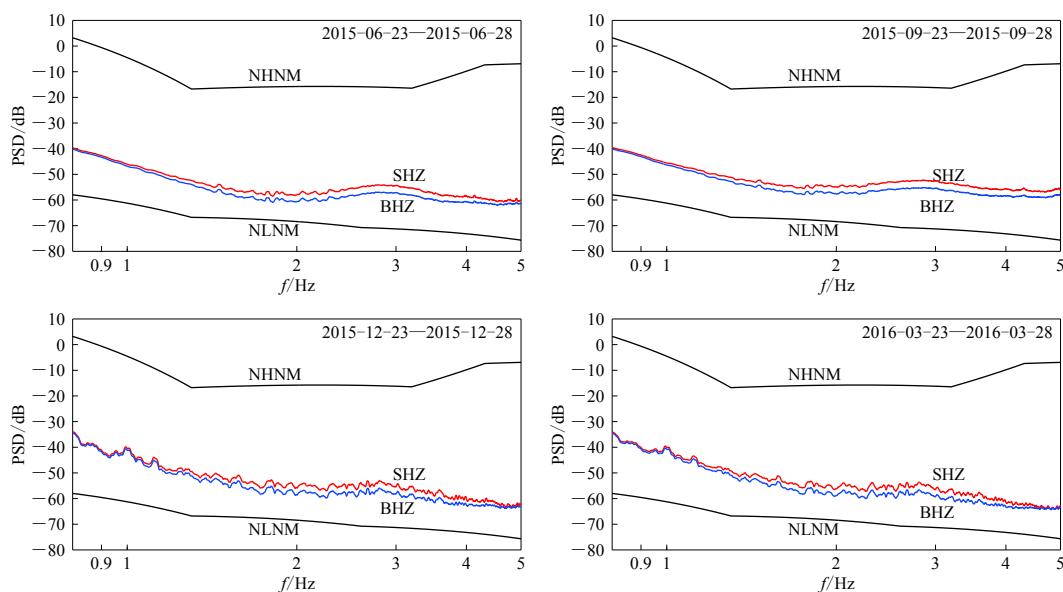


图1 CPUP台站不同时段SHZ通道与BHZ通道的噪声功率谱密度对比

Fig. 1 Comparison of the noise PSD in BHZ channel with that in SHZ channel for the station CPUP in different time intervals

从图1可以看出,两通道在4个时段内的噪声功率谱密度曲线在优势频段1—5 Hz内相差较小,但BHZ通道的噪声功率谱密度曲线明显低于SHZ通道。

进而,对1—5 Hz频段内的噪声功率谱密度取当月5日的平均值,得到的对比结果如表2所示,可以看出1—5 Hz频段内两个不同深度通道间的噪声功率谱密度均值十分接近,其中,较浅的SHZ通道的噪声功率谱密度均值在所选用数据的4个时段内均略高于BHZ通道,但差值最大不超过4%,这说明在这4个时段内,较深通道的噪声功率谱密度均值相比于较浅通道还是有所减小的。

表 2 1—5 Hz 频段内 SHZ 与 BHZ 通道噪声功率谱密度均值的对比

Table 2 Comparison of mean PSD in the SHZ and BHZ channels in the frequency band 1—5 Hz

年—月	SHZ 通道的 PSD 均值/dB	BHZ 通道的 PSD 均值/dB	BHZ 均值比 SHZ 均值低百分数
2015-06	-55.4	-57.3	3.4%
2015-09	-53.5	-55.6	4.0%
2015-12	-53.6	-55.4	3.3%
2016-03	-53.4	-55.1	3.1%

上述结果是在一年中每隔 3 个月选取 5 天数据经过分析处理计算得出。由于 4 个时段的数据结果具有一致性，所以可以代表该台站 BHZ 通道和 SHZ 通道噪声功率谱密度的一般性规律。为进一步验证该数据的可靠性且增加数据的全面性和变化规律的普遍性，我们选取了 2015 年 9 月 1 日—10 月 1 日的整月数据进行噪声功率谱密度分析。通过对比事件列表，人工剔除明显的地震信号波形后，得到的 PSD 曲线如图 2 所示，可以看出，SHZ 通道的 PSD 均值为 -53 dB，BHZ 通道的 PSD 均值为 -55.3 dB，BHZ 通道的 PSD 均值比 SHZ 通道低 4.3%。

从图 2 中可以看出，剔除掉 2015 年 9 月的明显事件后，CPUP 台站两个通道的噪声数据在噪声功率谱密度曲线趋势和均值差异等方面显示出与前文一致的结果，进一步验证了上文所得结论的可靠性，即 CPUP 台站的两个深井通道的噪声水平相差不大，对于较深的 BHZ 通道，其噪声功率谱密度曲线在 1—5 Hz 频带内，略低于较浅通道 SHZ 的噪声功率谱密度曲线；从数值上也可以看出，BHZ 通道的噪声功率谱密度均值明显低于 SHZ 通道。

## 2.2 LPAZ 台站噪声分析处理

采用与 CPUP 台站类似的方法分析处理 LPAZ 台站数据，分别在 2015 年 6 月，9 月，12 月以及 2016 年 3 月各选取 5 天的数据，在对比事件列表、剔除掉明显的事件波形后，得到 LPAZ 台站的 BHZ 通道和 SHZ 通道在 1—5 Hz 频带的噪声功率谱密度曲线，对比结果如图 3 所示。可以看出，LPAZ 台站各时段的噪声 PSD 曲线对比结果与 CPUP 台站基本一致，即在选取的 4 个时段内，LPAZ 台站两个不同深度通道间的 PSD 曲线在优势频段内比较接近，但较深的 BHZ 通道相较于较浅的 SHZ 通道，其噪声功率谱密度曲线明显偏低。

进而对 1—5 Hz 频段内的噪声功率谱密度取平均值，得到 LPAZ 台站的对比结果列于表 3，该计算结果从数值上反映出 LPAZ 台站不同深度通道的噪声功率谱密度均值在 1—5 Hz 频段内的差异，其中，深度较浅的 SHZ 通道的 PSD 均值在 4 个时段内均高于 BHZ 通道，差值最大接近 9%。这进一步说明在这 4 个时段内，较深的 BHZ 通道的噪声水平较低。

同样地，本文选取了 2015 年 9 月的数据对 LPAZ 台站的 BHZ 通道和 SHZ 通道进行噪声功率谱密度分析。通过对比事件列表，人工剔除所有明显的地震事件波形后，得到的噪声

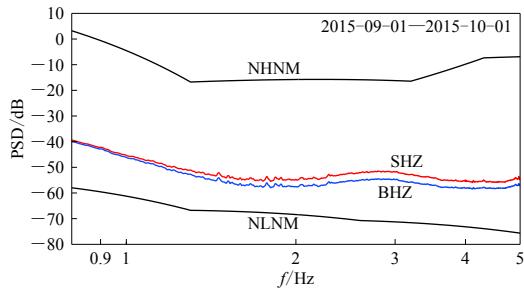


图 2 CPUP 台站 2015 年 9 月 BHZ 通道与 SHZ 通道的噪声功率谱密度对比

Fig. 2 Comparison of the noise PSD in BHZ channel with that in SHZ channel for the station CPUP in September of 2015

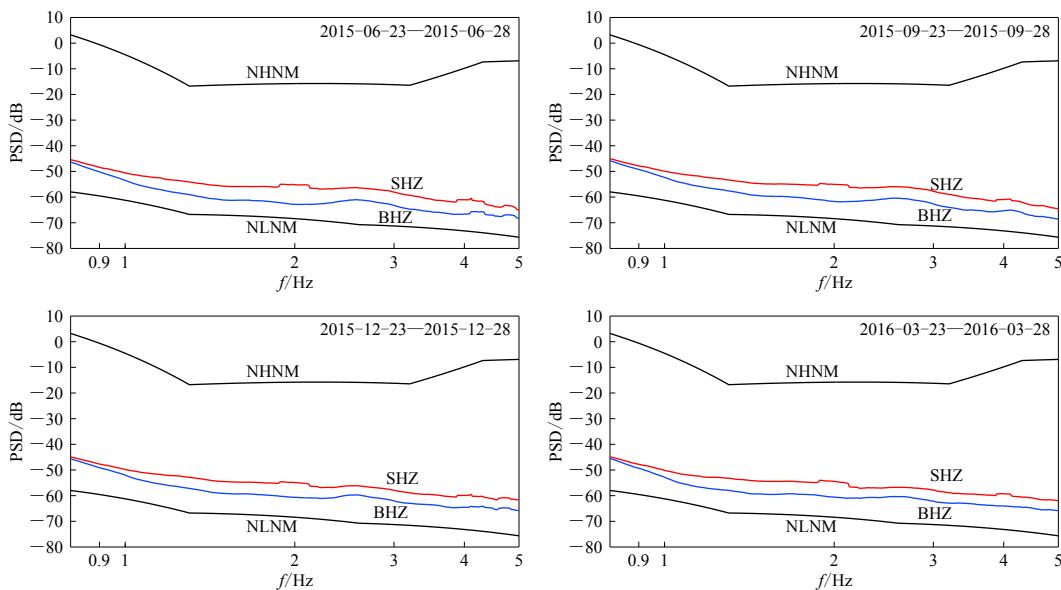


图 3 LPAZ 台站不同时段 BHZ 通道与 SHZ 通道的 PSD 对比

Fig. 3 Comparison of the noise PSD in BHZ channel with that in SHZ channel for the station LPAZ in different time intervals

表 3 1—5 Hz 频段内 SHZ 与 BHZ 通道 PSD 均值的对比

Table 3 Comparison of mean PSD in SHZ and BHZ channels in the frequency band 1—5 Hz

年-月	SHZ 通道 PSD 均值/dB	BHZ 通道 PSD 均值/dB	BHZ 均值比 SHZ 均值低百分数
2015-06	-57.4	-62.4	8.8%
2015-09	-56.8	-61.4	8.0%
2015-12	-56.6	-60.7	7.3%
2016-03	-56.7	-61.0	7.7%

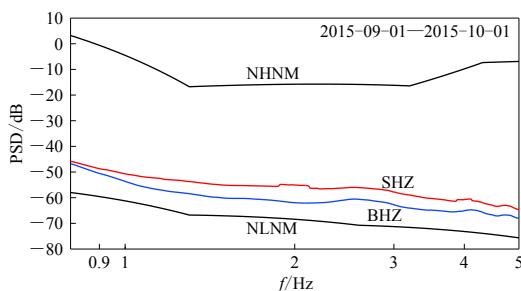


图 4 LPAZ 台站 2015 年 9 月 SHZ 与 BHZ 通道噪声功率谱密度对比

Fig. 4 Comparison of the noise PSD in BHZ channel with that in SHZ channel for the station LPAZ in September of 2015

来看, BHZ 通道的 PSD 均值也是低于 SHZ 通道的, 进一步证明了 LPAZ 台站与 CPUP 台站反映出的结果具有一致性、可靠性。

功率谱密度曲线对比结果如图 4 所示, 其中, SHZ 通道的 PSD 均值为 -57 dB, BHZ 通道的 PSD 均值为 -61.8 dB, BHZ 通道的 PSD 均值比 SHZ 通道低 8.4%.

从图 4 所示的噪声功率谱密度均值对比结果可以看出, 剔除 2015 年 9 月的明显事件波形时段后, LPAZ 台站两个通道的噪声功率谱密度曲线和均值在趋势、差值等方面所反映出的结果与 CPUP 台站基本一致, 且比 CPUP 台站更加清晰, 即 LPAZ 台站两深井通道的噪声水平较低, 其中, 较深的 BHZ 通道, 其 PSD 曲线明显低于较浅的 SHZ 通道的 PSD 曲线, 且从具体数值

综合 CPUP 对照组和 LPAZ 对照组的处理结果可知, 当地震计布设在较深的 BHZ 通道时, 其检测到的噪声水平比较浅的 SHZ 通道有所降低.

### 3 深井台站的信号特征分析

由于本文研究的两组深井台站, 其对照组均是位于同一地理位置但不同深度的两个通道, 因此无法对事件进行准确定位, 仅能依靠国际数据中心的公报对已定位事件进行震相标记. 下面将针对 CPUP 台站和 LPAZ 台站检测到的事件进行信号特征分析, 以对比不同通道数据处理结果.

#### 3.1 CPUP 台站信号特征分析

对 CPUP 台站 9 月份整个月的数据进行处理, 以事件列表和数据波形为主要依据, 对全月检测到的比较明显的 629 个事件逐一进行滤波、去趋势、去仪器响应后, 分别计算事件在 0.75—1.5 Hz, 1—2 Hz, 2—4 Hz, 3—6 Hz 等 4 个频带内的信号幅值、噪声幅值和信噪比, 以信号幅值最大的频带为最优滤波带, 并记录下最优滤波带内的信号幅值、噪声幅值和信噪比, 作为该事件的信号特征, 所得结果如图 5 所示.

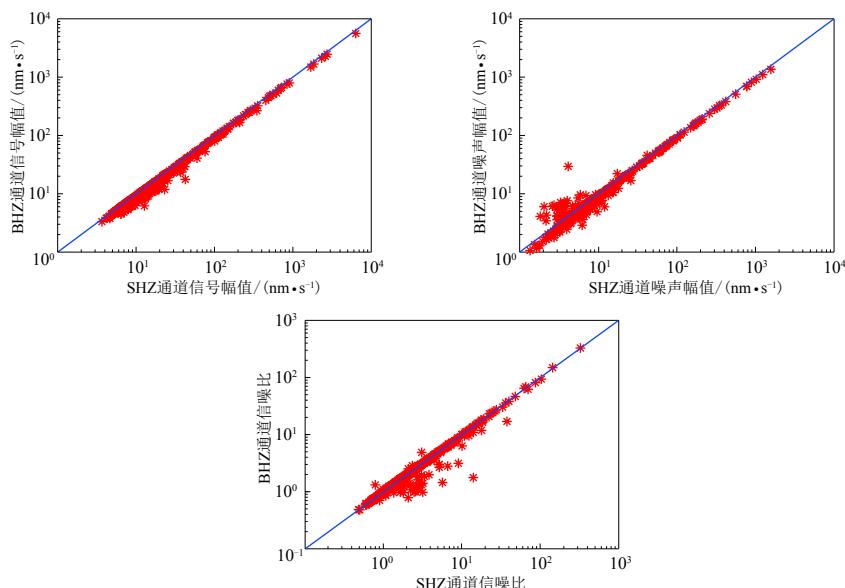


图 5 CPUP 台站不同深度通道的信号幅值、噪声幅值、信噪比的相关性

Fig. 5 Correlation between signal amplitude, noise amplitude and signal noise ratio between different channels for the station CPUP

从图 5 可以看出, 相比于较浅的 SHZ 通道, 较深的 BHZ 通道的噪声幅值有所减小, 这与前文的研究结果相一致, 但其信号幅值也有所减小, 因此在两者的共同影响之下, 信噪比在不同深度通道的差异不大. 经过具体的计算统计, 在所分析的 629 个事件中: 较深的 BHZ 通道与较浅的 SHZ 通道的信噪比比值, 大于 1.1 的事件有 5 个, 占 0.8%; 介于 0.9—1.1 之间的事件有 572 个, 占 90.9%; 小于 0.9 的有 52 个, 占 8.3%, 换言之, 对于绝大部分事件, 两通道的信噪比值相差不大, 只有不到 10% 的事件在某一通道处有较大的信噪比, 其中, SHZ 通道具有较高信噪比的事件较多, 即信噪比随深度降低或提高的现象均不太明显, 原因可能与站

点的地质结构及布设深度不够有一定关系，这一情况在 Bormann (2002) 关于德克萨斯钻孔和俄克拉荷马钻孔实验中也有详细论述。

### 3.2 LPAZ 台站信号特征分析

本文采用与 CPUP 台站相同的方法，对 LPAZ 台站 9 月份的数据进行处理，将国际数据中心的公报中检测到的 949 个明显事件进行滤波、去趋势、去仪器响应后，分别计算事件在 0.75—1.5 Hz, 1—2 Hz, 2—4 Hz 和 3—6 Hz 等 4 个频带内的信号幅值、噪声幅值和信噪比，以信号幅值最大的频带为最优滤波带，并记录下最优滤波带内的信号幅值、噪声幅值和信噪比，作为该事件的信号特征，计算结果如图 6 所示。

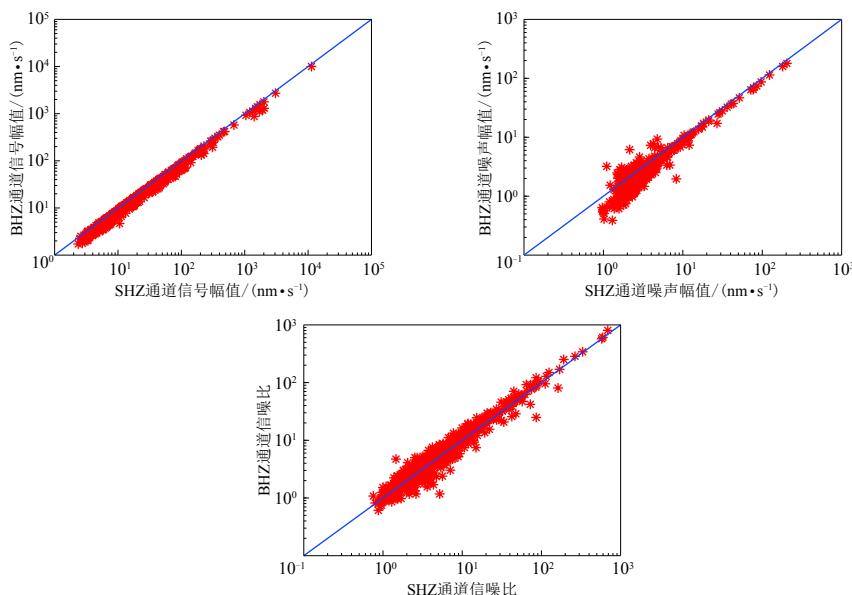


图 6 LPAZ 台站不同深度通道的信号幅值、噪声幅值、信噪比的相关性

Fig. 6 Correlation between signal amplitude, noise amplitude and signal noise ratio between different channels for the station LPAZ

从图 6 可以看出，LPAZ 台站的数据较 CPUP 台站的数据更加集中，而且在信号幅值和噪声幅值方面所反映的规律基本一致，即在较深的 BHZ 通道处，仪器检测到的信号幅值和噪声幅值均有所减小；此外与 CPUP 两通道在信噪比方面的规律不明显相比，LPAZ 台站在不同通道处检测到的信噪比，倾向性更明显。数据统计结果显示，在所分析的 949 个事件中：较深的 BHZ 通道的信噪比与较浅的 SHZ 通道的信噪比比值，大于 1.1 的事件有 420 个，占 44.3%；比值介于 0.9—1.1 之间的事件有 380 个，占 40.0%；比值小于 0.9 的事件有 149 个，占 15.7%，也就是说，对于 40% 的事件来说，两个深度的通道的信噪比差异不大，但对于其它 60% 的事件来说，超过 2/3 的事件在较深的 BHZ 通道处具有更高的信噪比。显然，在信号幅值和噪声幅值均有所减小的共同影响下，噪声幅值下降得更快，导致信噪比在较深的通道 BHZ 处有所提高，这一规律相较于 CPUP 台站变得更加明显，且与两台站在噪声功率谱密度方面的统计结果相一致，即在剔除明显事件波形时段后，相较于 CPUP 台站，LPAZ 台站的噪声功率谱密度在更深的 BHZ 通道处下降得更明显。

## 4 讨论与结论

本文主要分析同一台站不同深度的两个通道地震计检测到的各数据段的差异性。首先，从4个不同月份中，各选取了5天数据进行噪声功率谱统计；其次，用其中一个整月的连续噪声数据，对统计结果进行验证，以保证数据的可靠性；最后，对不同深度的地震计检测到的事件进行分析，将事件的信号幅值、噪声幅值、信噪比等3个信号特征进行对比，进一步探讨两台站两个不同深度的地震计对事件检测结果的影响，得出如下结论：

1) 根据两台站两个不同深度下噪声数据间存在差异的特征，分析得出地震计在较深的通道中，检测到的噪声较小。

2) 对比CPUP和LPAZ两台站布设在不同深度的两通道BHZ和SHZ对事件的检测差异，从幅值和信噪比的计算结果得出，处于较深通道的地震计检测到的信号和噪声，均会受到一定程度的抑制，相互影响下，信噪比有提高的趋势，这一趋势在LPAZ台站的计算结果中表现得比较明显。

下一步将在国内外探寻与CPUP台站和LPAZ台站类似的对照组，进一步分析不同深度的地震计在本底噪声、地震检测能力方面的差异。

## 参 考 文 献

- 李伟, 赵文舟, 尹继尧. 2013. 上海深井地震综合观测地磁资料分析[J]. 地震地磁观测与研究, 8(3/4): 89–95.  
Li W, Zhao W Z, Yin J Y. 2013. Analysis of multi-component geomagnetic data observed in deep borehole in Shanghai[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 8(3/4): 89–95 (in Chinese).  
Bormann P. 2002. *New Manual of Seismological Observatory Practice*[M]. Potsdam: GeoForschungs Zentrum: 29–30.  
Carter J A, Barstow N, Pomeroy P W, Chael E P, Leahy P J. 1991. High-frequency seismic noise as a function of depth[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 81(4): 1101–1114.  
Peterson J R. 1993. *Observations and Modeling of Seismic Background Noise*[R]. Albuquerque: USGS: 1–42.  
IRIS. 2017. Earthquake event waveform data[EB/OL]. [2017-02-01]. [http://ds.iris.edu/wilber3/find\\_event](http://ds.iris.edu/wilber3/find_event).