

贾正大,李军,金星,等,2022. 海底地震仪自噪声分析. 中国地震,38(3):486~493.

# 海底地震仪自噪声分析

贾正大<sup>1,2)</sup> 李军<sup>3,4)</sup> 金星<sup>1,4)</sup> 林彬华<sup>1,4)</sup>

1) 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080

2) 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 哈尔滨 150080

3) 福建省地震局, 福州 350003

4) 中国地震局厦门海洋地震研究所, 福建厦门 361000

**摘要** 海底地震仪是海上观测天然地震的主要手段, 仪器所记录到的噪声分为环境噪声和仪器噪声。本文利用 2018 年 9 月 3 日—2019 年 7 月 1 日期间涠洲岛海底地震观测台所采集到的数据, 对海洋环境下的强震型海底地震采集站和宽频带海底地震采集站进行仪器自噪声分析, 利用两道互相关模型, 采用加窗平均周期图法计算功率谱, 通过 1/3 倍频程积分作平滑处理, 得到仪器自噪声功率谱密度图。对比分析相同型号仪器的自噪声功率谱, 发现相同仪器的自噪声变化趋势一致, 但自噪声大小有差异, 且这种差异对于不同仪器、相同仪器的不同分量也存在不同。

**关键词:** 海底地震仪 两道互相关模型 自噪声 功率谱

[文章编号] 1001-4683(2022)03-0486-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

获取地震动数据的主要手段是通过地震计和数据采集器记录, 但记录到地震信号的同时也会记录到大量的噪声信号。按照来源分类, 噪声信号主要可分为仪器自噪声和环境噪声; 按照周期分类, 可分为长周期噪声 ( $< 0.1\text{Hz}$ )、微震峰 ( $0.1 \sim 0.5\text{Hz}$ ) 和短周期噪声 ( $> 0.5\text{Hz}$ ) (Webb, 2006)。为使地震计能准确地记录到地震动信号, 需要将仪器的自噪声降低至低于地面背景噪声 (崔庆谷, 2003; 刘洋君等, 2010)。

海底地震仪 (Ocean Bottom Seismometer, OBS) 是建设海底观测网的核心部分, 是地震观测的有效仪器。自“十一五”以来, 我国在南海和东海均建立了海底观测网实验系统 (李风华等, 2015, 2019)。2018 年, 涠洲岛海底地震观测台建设成功并投入使用。

随着对海底地震观测需求的提升, 对 OBS 信号监测质量提出更高的要求。国外已经开

[收稿日期] 2021-01-07 [修定日期] 2021-03-19

[项目类别] 地震科技星火计划项目 (XH21015)、国家自然科学基金重大项目 (41790461)、国家自然科学基金面上项目 (41774068) 共同资助

[作者简介] 贾正大, 男, 1995 年生, 硕士研究生, 主要从事海洋地震信号处理、海洋地震衰减等研究。

E-mail: jzd2021@sina.com

李军, 通讯作者, 男, 1981 年生, 高级工程师, 主要从事数字地震学、地震预警与烈度速报等研究。

E-mail: lixjix@qq.com

展了相关研究,例如 Stähler 等(2018)对 LOBSTER OBS 所用的 Guralp CMG-40T-OBS 传感器进行仪器自噪声分析,并与 Trillium 240 传感器的仪器自噪声进行对比。国内一些相关研究认为,OBS 的自噪声与陆地地震仪的自噪声一致(王笋等,2019;郝天珧等,2019),但此结论是仪器下水前在陆地上通过进行人工敲击等实验分析数据得到的(郝天珧等,2019),我国对水下长期工作仪器的自噪声分析还存在空白。

本文利用浯屿岛海底地震观测台长期固定在水下的 OBS 所记录到的数据,采用两道仪器互相关模型(Holcomb,1989;尹昕忠,2013;许卫卫,2017),利用加窗平均周期图法计算功率谱(李彩华等,2015),通过1/3倍频程积分作平滑处理(林彬华等,2015),得到仪器自噪声功率谱。全球噪声模型(Peterson,1993)普遍应用于对台址噪声的评价,将 OBS 仪器自噪声功率谱与该模型进行对比分析,由于所得到的仪器自噪声曲线普遍偏大,故本文仅使用高噪声模型(NHNM)进行对比。

## 1 数据处理

浯屿岛海底地震观测台为线缆式,可分为光电缆传输系统、海床基、岸基管理系统和支撑系统四部分。其中,海床基主要包含恒流供电型实时传输与授时接驳装置和海底地震采集站。浯屿岛台站共有五台海底地震采集站,分为一台短周期海底地震采集站(编号:OBS 01)、两台强震型海底地震采集站(编号:OBS 02、OBS 03)、两台宽频带海底地震采集站(编号:OBS 04、OBS 05),具体仪器参数见表1。所有 OBS 均由中地装(重庆)地质仪器有限公司生产,传感器均采用该公司自行研制的 CDJ 系列检波器,按笛卡尔坐标组合安装,分为垂直向、正北向、正东向三个方向。CDJ 系列检波器具有灵敏度高、谐波失真小、一致性好、工作状态稳定等特点(据 OBS 用户指南)。仪器选址浯屿岛船厂码头,所投放位置海底地形平坦,坡度约 6°,底质为沙泥,结构较为稳定(郝天珧等,2019)。

表 1 OBS 仪器参数(中国地震局厦门海洋地震研究所李军提供)

仪器名称	编号	频带宽度	地震计类型	系统灵敏度	传递函数
短周期海底地震采集站	OBS 01	1~100Hz	速度型	410cnt/( $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$\frac{3.9995\text{e}8\text{s}^2(s+196.1)(s+49.76)}{(s+196.2)(s+45.28)(s+4.876)(s+2.883)}$
强震型海底地震采集站	OBS 02	DC-2000Hz	加速度型	$1\times 10^5\text{cnt}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$\frac{1.58\text{e}13}{s^2+1.777\text{e}4s+1.579\text{e}8}$
地震采集站	OBS 03				
宽频带海底地震采集站	OBS 04	60s-100Hz	速度型	2048cnt/( $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$\frac{2.0454\text{e}9\text{s}^2(s+114.1)(s+2.273)}{(s+130)(s+1.215)(s+0.5206)(s+0.1109)}$
地震采集站	OBS 05				

### 1.1 数据集

2018年9月3日开启上述仪器,同年10月浯屿岛海底地震观测台开始试运行,截至2019年7月1日,共运行302天。根据中央气象台记录,在仪器运行期间,浯屿岛最大风力为5级,未受台风影响。通过记录到的数据发现,仪器日均存在断记情况,个别仪器还存在一天内仅记录几分钟的长时间断记情况,给数据读取带来不便。用零补全数据断记的时间段以解决断记给编程带来的麻烦,从而建立一个包含五台 OBS、涵盖302天数据的数据集。

### 1.2 数据预处理

对数据进行功率谱计算之前,需要对数据进行预处理。OBS 记录到数据为 mini-seed 格式,用程序读取该格式数据,发现读取速度较慢且读取后数据量过大。将 mini-seed 格式的文件解压成 SAC 文件后进行读取,既能保留需要的波形数据,又可以将不需要的数据排除,大大提高了数据的读取以及处理效率。

SAC 文件中记录到的数据单位为 counts,需要计算出地动速度(加速度),计算公式如下(李军,2007;林彬华等,2015)

$$V = A/K \tag{1}$$

式中, $V$ 为地动速度,单位为  $\mu\text{m/s}$  或者为  $\text{m/s}^2$ ;  $A$  为输入数据,单位为 counts;  $K$  为系统灵敏度,单位为  $\text{cnt}/(\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$  或  $\text{cnt}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ 。

为了消除基线漂移对数据记录的影响,需进行基线校正,本文采用去均值基线校正,即

$$x'_i = x_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \tag{2}$$

式中, $x_j$  为非零的数据;  $N$  为非零数据的数量。

由于传感器在获取数据时会产生偏移,这种偏移将对后期的计算产生影响,所以需要进行去趋势处理。本文采用最小二乘法进行去趋势,对数据减去一条最优(最小二乘)的拟合直线,使去趋势后的数据均值为零。

## 2 方法及原理

### 2.1 两道互相关模型

两道互相关模型的使用要求为:①进行互相关的两台仪器紧靠但不接触地架设在同一观测台基上,且安装方位完全一致;②仪器接受相同的背景噪声信号,但仪器自噪声为白噪声;③两台仪器的传递函数完全一致。涪屿岛观测台站符合以上要求,可以使用该模型。

仪器 1 记录到的信号分为背景噪声功率谱  $X_1$  和仪器自噪声功率谱  $N_1$ ,传递函数为  $H_1$ ; 仪器 2 记录到信号分为背景噪声功率谱  $X_2$  和仪器自噪声功率谱  $N_2$ ,传递函数为  $H_2$ 。由于背景噪声完全相同,使得  $X_1 = X_2 = X$ 。则仪器 1 的自相关功率谱  $P_{11}$  和仪器 2 的自相关功率谱  $P_{22}$  分别为

$$P_{11} = |H_1|^2 [X + N_1] \tag{3}$$

$$P_{22} = |H_2|^2 [X + N_2] \tag{4}$$

$P_{12}$  为互相关功率谱,引入仪器相干系数  $\gamma$ , 即

$$\gamma = \frac{|P_{12}|^2}{P_{11}P_{22}} \tag{5}$$

将式(5)带入式(3)、式(4),且  $H_1 = H_2 = H$ , 得到计算仪器自噪声功率谱的公式

$$N_1 = \frac{P_{11}}{|H|^2} (1 - \gamma) \tag{6}$$

$$N_2 = \frac{P_{22}}{|H|^2} (1 - \gamma) \tag{7}$$

### 2.2 加窗平均周期图法(Welch)功率谱

输入长度为 5min 的信号用于计算功率谱。周期图法是将输入信号进行离散傅里叶变

换,再以系数等价功率谱。加窗平均周期图法是一种周期图法的改进方法,在进行周期图法计算功率谱之前,先令数据  $x(n)$  乘以窗函数  $w(n)$  ( $n=0,1,\dots,N-1$ ),使每段数据有一定的重叠率。本文的窗长为 100 个数据点,重叠率为 50%。加窗平均周期图法最后得到的功率谱为各窗口功率谱的均值。

周期图法计算公式为

$$X(k) = \sum_{n=1}^{M-1} x^{(i)}(n)w(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (k=1,2,\dots,N; i=1,2,\dots,K; K \text{ 为窗口数}) \quad (8)$$

$$P_M(i) = \frac{1}{\sum_{n=0}^{M-1} w^2(n)} \left| \sum_{n=0}^{M-1} x^i(n)w(n)e^{-j\frac{2\pi}{M}n} \right|^2 \quad (i=1,2,\dots,K; 0 \leq n \leq M-1) \quad (9)$$

仪器自功率谱和仪器互功率谱计算公式为

$$P_{xx}(i) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K P_M(i) \quad (10)$$

$$P_{xy}(i) = \frac{1}{T} X^*(k)Y(k) \quad (11)$$

其中,  $Y(k)$  的计算方法与  $X(k)$  相同。

### 2.3 功率谱光滑处理

通过 1/3 倍频程积分对得到的功率谱作平滑处理,公式如下

$$P(f_c) = \frac{1}{n} \sum_{f=f_l}^{f_h} P(f) \quad (12)$$

其中,  $f_l$  为低频拐角频率,取值  $2^{-1/6} f_c$ ;  $f_h$  为高频拐角频率,取值  $2^{1/6} f_c$ ;  $n$  为介于  $f_l$  与  $f_h$  之间的频率的个数。

### 2.4 计算功率谱密度 PDF

仪器的采样率为 100,选取 5min 为输入信号长度,每天数据 288 段,302 天共 86976 段数据,光滑后的功率谱共有 86976 条曲线。以功率谱为纵轴、频率点为横轴划分成多个网格,计算功率谱曲线落在网格内的概率,以概率最大的网格为真实功率谱,最终得到功率谱密度曲线即为仪器自噪声的功率谱曲线。

### 2.5 计算置信区间

许多学者在计算功率谱的置信水平方面有所研究(李荣成等,1989;朱学旺等,2015),但均为基于功率谱的分析。本文所得到的仪器自噪声为功率谱密度图中密度最高的点所连成的曲线,为统计后的结果。本文选择累计密度 10%~90% 的区间作为 80% 置信水平的置信区间。

## 3 自噪声分析

### 3.1 强震型 OBS 仪器自噪声

由图 1(纵坐标功率谱由  $10\lg(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz} = \text{dB}$  得出)可见,仪器自噪声功率谱均随频率的增大而减小,三个分量的仪器自噪声功率谱均大于全球低噪声模型(NLNM)。产生这一现象的原因是海洋底部的安装环境对仪器噪声有放大作用,较高的仪器自噪声可能会淹没地震信号。其中,OBS 02 比 NHNM 高 2~70dB,OBS 03 比 NHNM 高 6~74dB。由于在数据处

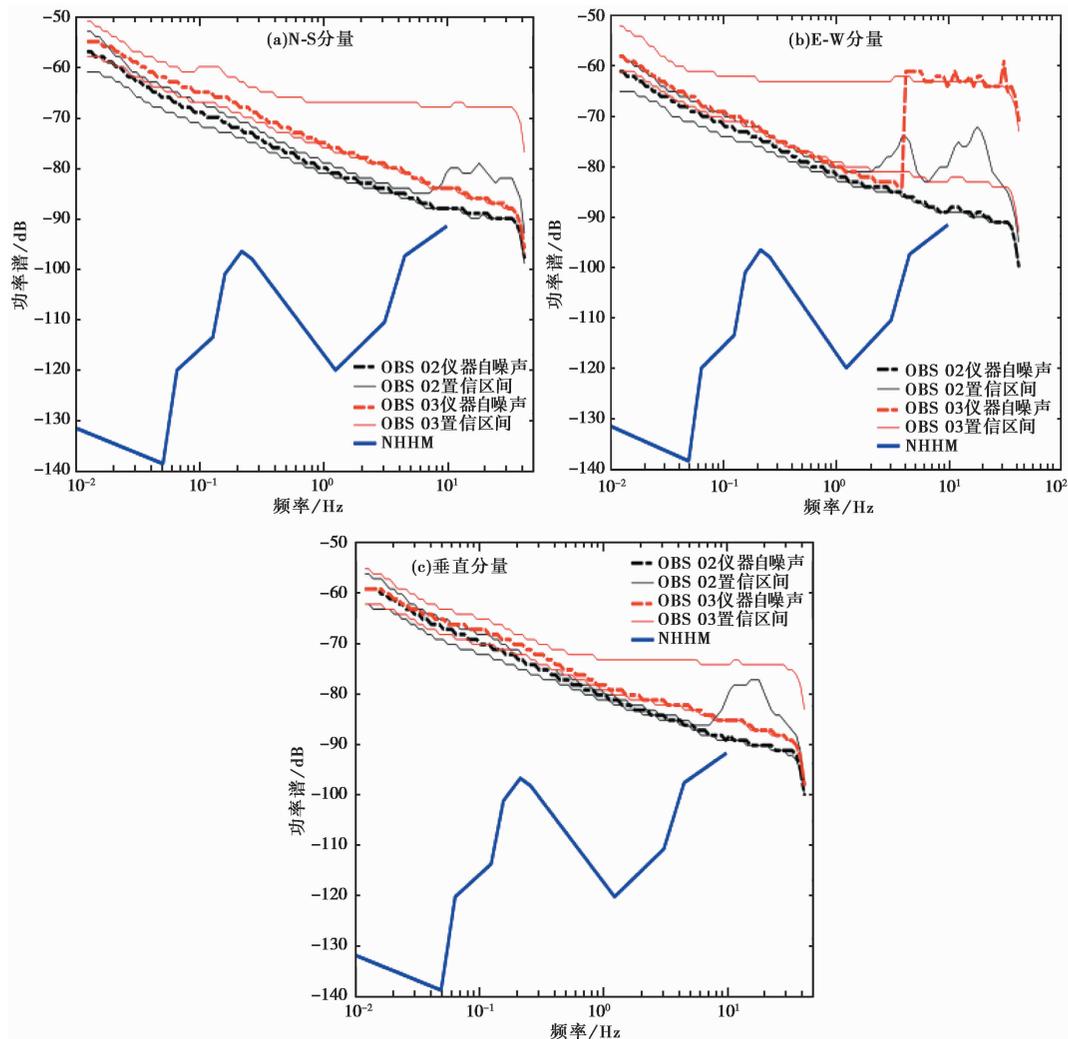


图 1 强震型海底地震仪自噪声功率谱

理阶段,通过波形图发现图 1(b)所展示 OBS 03E-W 分量记录存在异常,大于地震信号的异常突跳非常多,故以上分析不参考该分量。

从处理后数据中包含的地震波形图来看,OBS 05 的 N-S 分量数据异常,未记录到任何地震震动数据,处于故障状态。因此不对宽频带型海底地震仪的 N-S 分量进行自噪声研究。通过傅里叶谱计算可得 OBS 04 的 E-W 分量在高频位置同样存在异常现象,但低频位置未出现异常,可以用来作对比分析(图 1(b))。

对比三个分量,OBS 02 各分量的仪器自噪声相对于 OBS 03 低 2~4dB(不考虑 OBS 03 的 E-W 分量),相同仪器不同分量之间也相差 2~5dB(表 2)。

### 3.2 宽频带型 OBS 仪器自噪声析

进行数据处理时,OBS 05 的 N-S 分量波形图中未记录到地震信号,判断此分量异常,此分量的两台仪器噪声互相关计算得到的仪器自噪声功率谱实际是仪器自相关功率谱,故不对图 2(a)进行分析。由图 2(b)、图 2(c)可知,E-W 分量与垂直分量的仪器自噪声同样是在

表 2 强震型海底地震仪自噪声功率谱值结果

频率/Hz	OBS 02/dB			OBS 03/dB		
	N-S	E-W	Z	N-S	E-W	Z
0.01	-57	-61	-59	-55	-58	-59
0.02	-60	-64	-60	-57	-61	-60
0.05	-66	-68	-62	-62	-66	-63
0.1	-69	-72	-67	-65	-69	-65
0.5	-77	-78.5	-77	-72	-77	-75
1.0	-80	-82	-80	-75	-80	-78
10	-88	-88	-88	-84	-63	-85
20	-89	-89	-90	-86	-62	-87
30	-90	-91	-91	-87	-63	-88
40	-93	-95	-95	-91	-66	-95

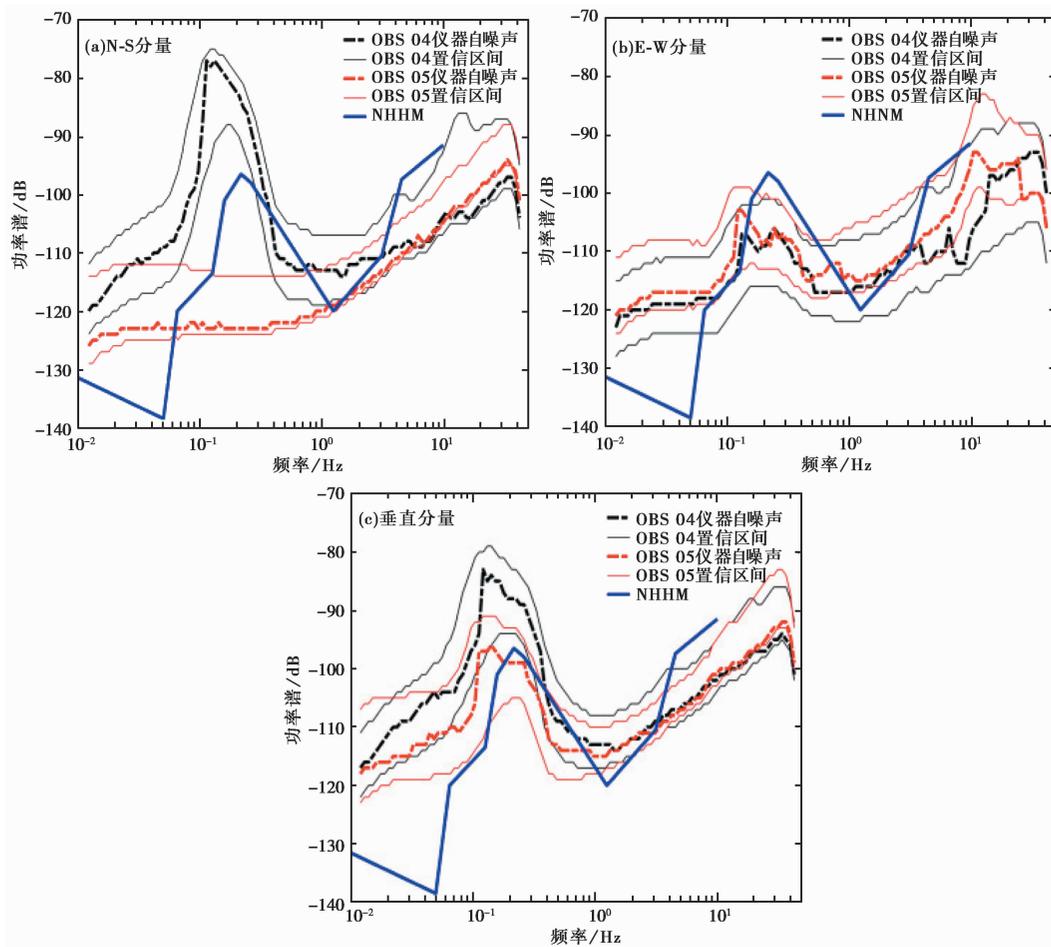


图 2 宽频带型海底地震仪自噪声功率谱

大小上有区别,但在变化趋势上一致。宽频带型 OBS 仪器自噪声功率谱与 NHHM 对比同样具有大于陆地宽频带型地震仪的仪器噪声的现象。但是,宽频带型海底地震仪 E-W 分量的仪器自噪声介于 0.15~0.9Hz、大于 3.1Hz 时低于 NHHM;垂直分量的仪器自噪声介于 0.19~0.7Hz、大于 3.6Hz 时低于 NHHM。此外,在 E-W 分量与垂直分量方面,两台仪器自噪声大小对比也不同(表 3)。

表 3 宽频带型海底地震仪自噪声功率谱值结果

频率/Hz	OBS 04/dB		OBS 05/dB	
	E-W	Z	E-W	Z
0.01	-123	-117	-121	-118
0.02	-120	-111	-118	-116
0.05	-119	-109	-117	-115
0.1	-115	-96	-112	-106
0.5	-117	-109	-114	-113
1.0	-117	-113	-114	-115
10	-107	-102	-95	-101
20	-97	-97	-95	-97
30	-93	-95	-100	-93
40	-95	-96	-101	-96

## 4 结论

本文对长期工作于海底的强震型海底地震采集站和宽频带海底地震采集站仪器进行自噪声研究,得到以下结论:

(1)强震型 OBS 与宽频带型 OBS 的仪器自噪声功率谱变化趋势完全不同,强震型 OBS 仪器自噪声功率谱随频率增长呈现单一递减的趋势,宽频带型 OBS 仪器自噪声功率谱的变化趋势与 NHHM 一致。整体来说,强震型 OBS 的仪器自噪声功率谱比宽频带型 OBS 的功率谱大,与陆地仪器结果一致。

(2)不同类型仪器的仪器自噪声完全不同;相同类型仪器、不同分量的仪器自噪声不完全相同。通过对比强震型 OBS 垂直、北南、东西三个分量,发现除功率谱异常以外,各分量的功率谱变化趋势一致,但不同分量的自噪声功率谱大小略有差异,大体为北南分量>垂直分量>东西分量。对比宽频带 OBS 垂直、东西两分量,发现其自噪声变化差别较大,垂直分量上 OBS 04>OBS 05,东西分量上 OBS 05>OBS 04。

(3)通过将各分量与 NHHM 对比,发现宽频带型 OBS 的垂直、东西分量,其仪器自噪声功率谱变化趋势与 NHHM 一致,但是在低频位置小于 NHHM,在高频位置大于 NHHM,而不同分量划分低频、高频的位置有所差别。在中间频带,仪器自噪声与 NHHM 有所交叉。强震型 OBS 的仪器自噪声功率谱在相同频点位置处均大于 NHHM。此外,相比于陆地仪器的自噪声功率谱与 NHHM 对比的结果,海底环境对仪器自噪声有放大作用。

## 参考文献

崔庆谷,2003. 反馈式地震计的性能设计与噪声测量研究. 博士学位论文. 北京:中国地震局地球物理研究所,36~46.

- 郝天珧,郭永刚,张艺峰,等,2019. 线缆式海底地震观测技术——以浯屿岛海底地震观测台为例. 地球物理学报, **62**(11): 4323~4338.
- 李彩华,滕云田,杨大克,等,2015. 基于两道互相关模型的地震计自噪声测试分析. 地震地磁观测与研究, **36**(1): 100~106.
- 李风华,郭永刚,吴立新,等,2015. 海底观测网技术进展与发展趋势. 海洋技术学报, **34**(3): 33~35.
- 李风华,路艳国,王海斌,等,2019. 海底观测网的研究进展与发展趋势. 中国科学院院刊, **34**(3): 321~330.
- 李军,2007. 福建地区脉动资料的处理与分析. 硕士学位论文. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 李荣成,金子元,1989. 功率谱平均及其估值的置信区间. 宇航计测技术, (1): 23~27.
- 林彬华,金星,廖诗荣,等,2015. 地震噪声异常实时监测. 中国地震, **31**(2): 281~289.
- 刘洋君,薛兵,朱小毅,等,2010. 地震计自噪声的研究. 地震, **30**(1): 138~146.
- 王笋,丘学林,赵明辉,等,2019. 海底地震仪的信号传递效果和噪声水平. 地球物理学报, **62**(8): 3199~3207.
- Webb S C,2006. 第 19 章:陆地和海底的地震噪声. 世界地震译丛, (1): 15~27.
- 许卫卫,2017. 地震数据采集器自噪声检测研究. 地震学报, **39**(5): 806~813.
- 尹昕忠,陈九辉,李顺成,等,2013. 流动宽频带地震计自噪声测试研究. 地震地质, **35**(3): 576~581.
- 朱学旺,刘青林,张思箭,2015. Welch 谱估计的随机误差与置信度. 装备环境工程, **12**(1): 34~38.
- Holcomb L G,1989. A direct method for calculating instrument noise levels in side-by-side seismometer evaluations. USGS Open-file Report 89~214.
- Peterson J R,1993. Observations and modeling of seismic background noise. USGS Open-file Report 93~322.
- Stähler S C, Schmidt-Aursch M C, Hein G, et al,2018. A self-noise model for the German DEPAS OBS pool. Seismol Res Lett, **89**(5): 1838~1845.

## Self-noise Analysis of Seismometer Ocean Bottom

Jia Zhengda<sup>1,2)</sup>, Li Jun<sup>3,4)</sup>, Jin Xing<sup>1,4)</sup>, Lin Binhua<sup>1,4)</sup>

1) Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, China

2) Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, CEA, Harbin 150080, China

3) Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China

4) Xiamen Institute of Marine Seismology, CEA, Xiamen 361000, Fujian, China

**Abstract** Ocean bottom seismometer(OBS) is a major means of natural earthquake observation in marine. The noise recorded by the instrument is divided into environmental noise and instrument noise. Using the data collected by the Wuyu Island Submarine Seismic Observatory from September 3,2018 to July 1,2019, we analyzed the instrument self-noise of the strong seismic OBS and the broadband OBS in the sea environment. Two channel cross-correlation model is used to calculate the power spectrum by windowed average periodogram method, and then 1/3 octave integral is used as smoothing processing. Finally, the self noise power spectrum density of the instrument is obtained. By comparing and analyzing the power spectrum of self-noise of the same type of instrument, we found that the variation trend of self-noise of the same instrument is the same, but the size of self-noise is different, and the difference also exists for different instruments and different components of the same instrument.

**Keywords:** Ocean bottom seismometer; Two cross correlation model; Self-noise; Power spectrum