

刘明辉,周银兴,李江,等. 2024. 一种基于窄带滤波的井下宽带地震计方位角检测方法. 中国地震, 40(3): 669~677.

一种基于窄带滤波的井下宽带地震计方位角检测方法

刘明辉¹⁾ 周银兴¹⁾ 李江¹⁾ 陈阳¹⁾ 康璐璐²⁾
崔仁胜¹⁾ 林湛¹⁾ 吴卫远²⁾

1) 中国地震局地震预测研究所(地震预测重点实验室), 北京 100036

2) 北京港震科技股份有限公司, 北京 102628

摘要 井下地震观测能够避开地表的各种干扰,有效提高地震观测信号的信噪比。井下宽带地震计的安装方位角可以是任意方位的,需要通过对比地表标准地震计的安装方位来进行校正。本文提出一种窄带滤波优选检测方法,同时计算两台地震计NS方向和EW方向的相对方位角和相关系数,通过优选相对方位角度差不大于 1.2° 且相关系数大于0.995的计算结果进行平均计算,可以快速得到两台宽带地震计之间的相对安装方位角。通过对河南睢县地震台和内蒙古伊春地震台安装现场记录的地震信号和地球脉动信号进行对比,验证了窄带滤波优选检测方法是可行的。该方法的优点是可以利用一晚的记录数据来计算得到两台地震计之间的相对方位角,该方法可用于井下宽带地震计安装时的方位校正,也可以用于地表地震计之间对齐误差的测试。

关键词: 井下观测 宽带地震计 方位角 校正

[文章编号] 1001-4683(2024)03-0669-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

为了真实地记录地面运动,在无基岩露出地面的地区往往采用井下地震计进行长期固定观测。随着中国工业化、城镇化进程的加快,地面地震观测台站受到工业制造和交通工具的干扰越来越严重,一些地面台站观测数据质量已经不能满足地震监测预报和地球科学研究的需要,采用井下地震观测替代地面台站观测是一种较好的解决方案。井下地震观测的井管内径通常在120~150mm,井深通常在100~500m,深井观测可以有效地降低人类活动造成的高频噪声干扰(李雷等,2019),还能够避免宽频带或甚宽频带地震计受地面温度变化而产生的长周期漂移。井下地震计记录的近、远震波形更清晰(赵瑞胜等,2021),井下地震观测的核心设备是井下宽频带或甚宽频带地震计,也有少量台站采用井下短周期地震计进行观测。地震计的安装方位角对横波分裂研究具有重要作用(王婷等,2020),安装方位角误差

[收稿日期] 2023-06-08 [修定日期] 2023-10-23

[项目类别] 中国地震局地震预测研究所所长基金(CEAIEF2022030104)、国家重点研发专项(2022YFC2204301)共同资助

[作者简介] 刘明辉,男,1976年生,高级工程师,主要从事地震观测技术研究、应用与推广工作。

E-mail: geodevice@sina.com

会影响地方震震级的测定(魏贵春等,2017)。

在安装井下地震计时,首先要进行通井和测井,了解井管内的畅通和倾斜情况;其次是通过工具安装井下地震计,其在井内的安装方位是任意的;最后在井口的地表安装一台指向南北的标准宽带地震计,将其与井下宽带地震计同时接入一台6路地震数据采集器,连续一个晚上记录输出信号,通过对比分析信号来计算井下宽带地震计的安装方位角(周云耀等,2020)。由于井下地震观测场地往往是土层或沙石等相对疏松的地基,再加上地表的风、温度、气压、磁场等干扰因素,地表标准宽带地震计难以快速达到稳定工作状态,刚安装时的地表标准宽带地震计长周期数据质量不高,和井下宽带地震计记录信号的相关重复性差,所以,如何选择预处理的滤波频带获得可靠的相关计算结果显得非常重要。本文提出一种窄带滤波优选检测方法,同时计算两台地震计的南北(NS)和东西(EW)方向的相关系数和相对方位角,通过相关系数和相对方位角度差进行优选,计算优选结果的平均值,可以快速得到两台宽带地震计之间的相对安装方位角。

1 观测仪器和数据

内蒙古鄂伦春地震台和河南睢县地震台均采用井下宽带地震观测,用来对比安装方位角的地表宽带地震计和井下宽带地震计的工作频带范围均为60s~50Hz,灵敏度为2000V/(m/s),其传递函数完全相同,在安装现场分别接入同一台24位6通道地震数据采集器,使用北斗授时(李江等,2016)。井下宽带地震计安装方位是任意的,地表宽带地震计安装方位均使用寻北仪经过多次测量的平均结果,方向指向南北(NS),将其作为校准方位的标准宽带地震计。寻北仪型号为NV-NF301,指北精度优于0.1°。测量井斜的陀螺仪型号为KXP-2X,测量倾斜精度为1°。

内蒙古鄂伦春地震台井下宽带地震计安装完毕的当晚,在印度尼西亚发生5.5级地震。河南睢县地震台井下宽带地震计安装完毕的当晚,菲律宾发生5.7级地震,为验证窄带滤波优选检测方法提供了地震事件信号,详细地震信息见表1。由于井下宽带地震计和地表宽带地震计刚安装完毕,因此主要采用00:00—07:00相对稳定的数据。

表1 地震事件信息

日期	时间 (时:分)	纬度/(°)	经度/(°)	震级	震源深度/km	地点
2021-08-28	20:27	3.4S	140.2E	5.5	30	印度尼西亚
2021-09-27	01:12	14.0N	120.6E	5.7	100	菲律宾

2 数据处理方法

2.1 滤波预处理

常用宽带地震计的自噪声在0.1~1Hz频带范围内低于地球低噪声模型约30dB(王洪体等,2020;吴双等,2020),宽带地震计在该频带范围内记录信号的信噪比较高。海浪驻波可引发较强的二次微地震,其能量远大于原生微地震的能量,二次微地震产生的地震波频率约为海浪频率的2倍,主要以瑞利波的形式传播,可在远离海洋数千千米的内陆地震仪上引起

明显的扰动信号(胡小刚等,2010),其峰值周期在 6s 左右(鲍曼,2006),是地球脉动信号的主要成分之一。用来进行相关计算的信号应该是突出的地脉动信号或地震事件信号(吕永清等,2007)。不同研究人员在相关计算前采用不同的频带范围对信号进行滤波预处理,例如,0.2~0.6Hz(谢剑波,2014),0.2~0.3Hz(李少睿等,2016),0.1~1Hz(吕永清等,2007)等。井下宽带地震计和地表标准宽带地震计都是经过长途运输到安装现场,拆包安装完毕后便立即开始观测,再加上两台地震计安装的位置不同,其记录的背景噪声也不完全相同。地球脉动信号在 0.2Hz 附近达到峰值,本文采用 0.19~0.2Hz 的窄带滤波做预处理。

2.2 相关性分析

相关性分析是指对两个或多个具备相关性的变量元素进行分析,从而衡量两个变量因素的相关密切程度,相关系数越高,相关性越强。对待校正井下地震计的 NS 和 EW 分向在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内以 1° 为增量进行顺时针方向旋转,旋转后的角度为 θ ,旋转后 NS 和 EW 分向的信号分别为

$$NS_\theta = NS \times \cos(\theta) + EW \times \sin(\theta) \quad (1)$$

$$EW_\theta = -NS \times \sin(\theta) + EW \times \cos(\theta) \quad (2)$$

将 NS_θ 和 EW_θ 分别与地表标准地震计 NS 和 EW 分向进行互相关计算,相关系数最大的旋转角度 θ 即为该分向的与地表标准地震计相同分向的相对方位角,分别计算 NS 和 EW 方向的相关系数和相对方位角。确定大致的范围后,再以 0.1° 为步长进行精计算。

2.3 优选原则

以小时为单位进行相关计算,每次计算得到的相关系数和相对方位角可能不同。在同一个基岩地面台站用两台甚宽带地震计记录地震事件信号相关分析的结果表明,NS 和 EW 方向的相关系数均大于 0.9989 时,NS 和 EW 方向之间的方位角之差不大于 0.35° (吕永清等,2007)。在同一个基岩台站用井下宽带地震计和井下短周期地震计记录地震事件信号的研究结果表明,NS 和 EW 方向的相关系数均大于 0.9958 时,NS 和 EW 方向之间的方位角之差不大于 0.5° (李少睿等,2020)。在同一个基岩台站用井下宽带地震计和地表宽带地震计记录地震事件信号的研究结果表明,NS 和 EW 方向的相关系数均大于 0.9951 时,NS 和 EW 方向之间的方位角之差不大于 0.7° (谢剑波,2014)。

地震观测仪器进网技术要求中规定地震计的三轴正交性偏差小于 0.6° (中国地震局,2020)。现代地震计通过三维计算机软件画图来设计,保证 UD、EW、NS 三个分向均完全正交,通过数控加工中心来完成零部件加工,关键零部件的加工精度可达 0.01mm,采用高精度的夹具来保证装配精度,机械特性完全满足三轴正交性偏差小于 0.6° 。地表和井下两台地震计的水平正交性的最大误差和为 1.2° 。根据地震计的机械特性和前人的研究结果,本文选用 NS 和 EW 方向的平均相关系数大于 0.995,且对 NS 和 EW 方向之间方位差不大于 1.2° 的全部计算结果进行平均计算,将平均结果作为井下地震计最终的校正方位角度。

3 数据处理结果

对地球脉动信号计算加速度自功率谱(Power Spectral Density,简称 PSD),可以从自功率谱中看到噪声中是否含有某种频率成分(刘明辉等,2019)。对比两台地震计水平分向的地球脉动信号之间的差异,并与地球噪声模型(New High Noise Model(简称 NHNM)和 New

Low Noise Model(简称 NLNM)(Peterson,1993)对比。

3.1 河南睢县台结果

睢县台新打的干井深 302m,井斜 2° ,采用落底安装方式。在井下宽带地震计安装完毕的当晚,井下宽带地震计和地表标准地震计均记录到发生在菲律宾的 5.7 级地震,分别计算 4 个水平分向的地震信号和地球脉动信号的加速度功率谱(PSD)(图 1)。

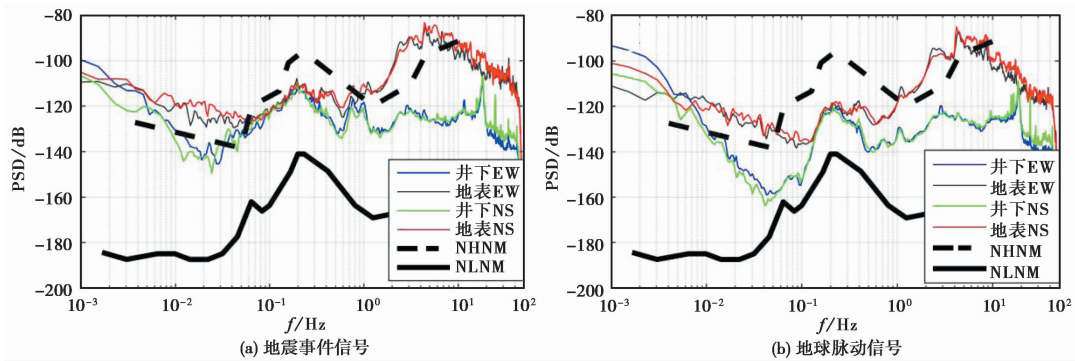


图 1 菲律宾 5.7 级地震事件信号和脉动信号的自功率谱

从图 1 可以看出,井下地震计记录的菲律宾 5.7 级地震事件信号和脉动信号均要比地表地震计低,说明井下地震计的观测环境噪声低于地表。从图 1(a) 可以看出,两台地震计记录的菲律宾 5.7 级地震事件信号在 $0.1 \sim 0.2\text{Hz}$ 的频带范围内基本相同。从图 1(b) 可以看出,脉动信号在 0.2Hz 附近出现的尖峰基本相同。用菲律宾 5.7 级地震事件信号来检测井下宽带地震计的安装方位角分为两步:第 1 步是用 $0.1 \sim 0.2\text{Hz}$ 带宽的滤波器对菲律宾 5.7 级地震事件信号进行滤波预处理,在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内以 1° 为增量进行顺时针方向旋转,并根据式(1)计算旋转后的井下地震计 NS 和 EW 分向,然后分别与地表标准地震计 NS 和 EW 分向进行互相关计算,相关系数最大的旋转角度即为该分向的与地表标准地震计相同分向的大致相对方位角 θ_1 ;第 2 步是在 $[\theta_1 - 5, \theta_1 + 5]$ 范围内以 0.1° 为增量进行顺时针方向旋转,重复第 1 步的步骤,最后得到相对方位角 θ_2 。

采用脉动信号来检测井下宽带地震计的安装方位角是用 $0.19 \sim 0.2\text{Hz}$ 的窄带滤波器对脉动信号进行预处理,其余的计算步骤与用地震事件信号来检测井下宽带地震计的安装方位角相同。计算 NS 和 EW 方向的相关系数和相对方位角 θ_2 ,结果见表 2。

从表 2 可以看出,用 8 个小时地球脉动信号计算方位角的结果中,有 4 个小时的平均相关系数高于 0.995,且 NS 和 EW 方向之间方位差不大于 1.2° 。计算这 4 个小时内 NS 和 EW 水平分向一共 8 个方位角的平均值为 278.53° ,与菲律宾 5.7 级地震事件的信号计算结果 278.30° 相差 0.23° 。为使其更为可视化,用 $0.1 \sim 0.2\text{Hz}$ 带宽的滤波器对井下记录地震波形进行滤波,再用式(1)对 100s 地震波形旋转 278.53° 进行校正,同时用 $0.1 \sim 0.2\text{Hz}$ 带宽的滤波器对地表记录地震波形进行滤波,两台地震计的地震波形如图 2 所示。

从图 2(a) 可以看出,两台地震计垂直分向的原始地震波形的相位重合,无需校正。从图 2(b) 和 2(c) 可以看出,两台地震计 NS 和 EW 分向的原始地震波形的相位均不重合。从 2(d) 和 2(e) 中可以看出井下记录地震波形经过 278.53° 的方位角旋转校正后,NS 和 EW 分

表 2 睢县地震台的计算结果

时间 (时:分)	相关系数		相对方位/(°)		方位差 /(°)	平均相关系数	备注
	NS 方向	EW 方向	NS 方向	EW 方向			
00:00	0.9527	0.9763	279.1	278.3	0.8	0.9645	
01:00	0.9955	0.9961	278.1	278.4	-0.3	0.9958	※
02:00	0.9994	0.9993	278.3	278.7	-0.4	0.9994	※
03:00	0.9799	0.9757	276.7	280.5	-3.8	0.9778	
04:00	0.9814	0.9846	278.1	279.0	-0.9	0.983	
05:00	0.9962	0.9969	278.6	278.5	0.1	0.9966	※
06:00	0.7973	0.9965	278.1	278.7	-0.6	0.8969	
07:00	0.9954	0.9988	278.8	278.8	0	0.9971	※
01:00	0.9988	0.9984	278.2	278.4	-0.2	0.9986	☆

注：※表示优选出来进行平均计算的方位角，☆表示菲律宾 5.7 级地震事件信号计算得到的方位角。

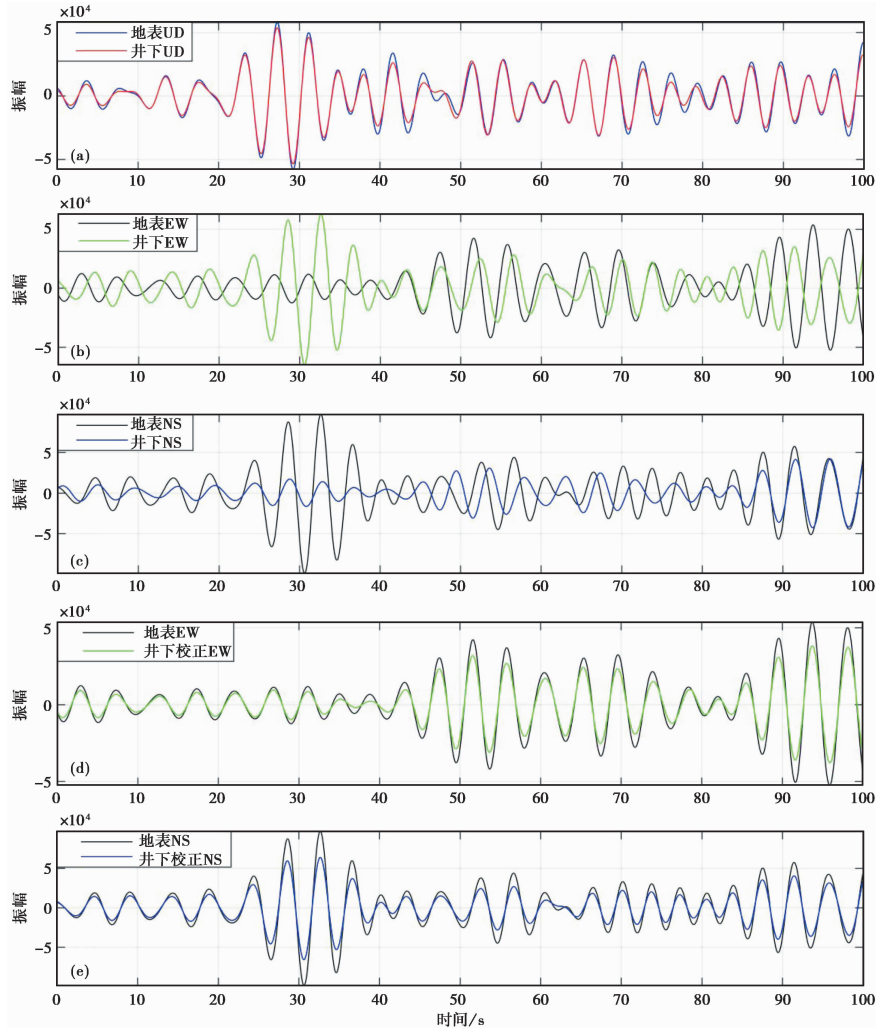


图 2 睢县台校正前后的地震波形

向与地表记录地震波形的相位均重合,说明用窄带滤波优选方法校正井下宽带地震计的安装方位角是有效的。

3.2 内蒙古伊春台结果

伊春台同样为新打的干井,井深 100m,井斜 2.5°,也采用落底安装方式。在安装完毕后的当晚,井下宽带地震计和地表宽带地震计均记录到了发生在印度尼西亚的 5.5 级地震。分别计算 4 个水平分向的地震事件信号和地球脉动信号的加速度功率谱(PSD),如图 3 所示。

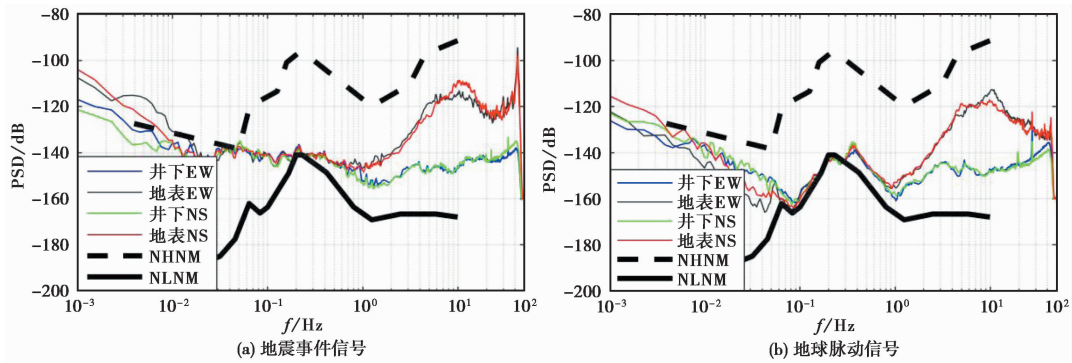


图 3 地震事件信号和脉动信号的自功率谱

从图 3 可以看出,井下地震计记录的印度尼西亚 5.5 级地震事件信号和脉动信号在高频端均比地表地震计低,说明井下地震观测有效地降低了高频干扰。从图 3(a)可以看出,两台地震计记录的印度尼西亚 5.5 级地震事件信号在 0.1~0.7Hz 的频带范围内基本相同。从图 3(b)可以看出,脉动信号在 0.1~0.7Hz 的频带范围内也基本相同,在 0.2Hz 和 0.4Hz 附近出现了两个尖峰。用 0.1~0.7Hz 带宽的滤波器对印度尼西亚 5.5 级地震事件数据进行滤波预处理,用 0.19~0.2Hz 的窄带滤波器对脉动信号进行预处理,计算步骤与前文相同。分别计算 NS 和 EW 方向的相关系数和相对方位角 θ_2 ,结果见表 3。

表 3 伊春台的计算结果

时间 (时:分)	相关系数		相对方位/(°)		方位差 /(°)	平均 相关系数	备注
	NS 方向	EW 方向	NS 方向	EW 方向			
00:00	0.9976	0.9987	229.6	228.9	0.7	0.9982	※
01:00	0.9952	0.9986	229.9	228.7	1.2	0.9969	※
02:00	0.9969	0.9989	230.8	228.6	2.2	0.9979	
03:00	0.9954	0.9986	229.0	228.7	0.3	0.9965	※
04:00	0.9956	0.999	229.3	228.6	0.7	0.9973	※
05:00	0.996	0.9994	229.4	228.5	0.9	0.9977	※
06:00	0.589	0.9976	220.0	228.7	-8.7	0.7933	
07:00	0.991	0.9899	230.9	227.4	3.5	0.9905	
20:00	0.9972	0.9982	228.9	229.1	-0.2	0.9977	☆

注: ※表示优选出来做平均计算的方位角, ☆表示印度尼西亚 5.5 级地震事件信号计算得到的方位角。

从表 3 可以看出,用 8 个小时脉动信号计算方位角的结果中,有 5 个小时的平均相关系数高于 0.995,且 NS 和 EW 方向之间方位差不大于 1.2° 。计算这 5 个小时里 NS 和 EW 两个水平分向一共 10 个方位角的平均值为 229.06° ,与用印度尼西亚 5.5 级地震事件信号计算的平均结果 290.0° 相差 0.06° 。为使其更可视化,用 $0.1\sim 0.5\text{Hz}$ 带宽的滤波器对井下记录的地震波形进行滤波,再用式(1)对 100s 地震信号旋转 229.06° 进行校正,用 $0.1\sim 0.5\text{Hz}$ 带宽的滤波器对地表记录的地震波形进行滤波,两台地震计的地震波形如图 4 所示。

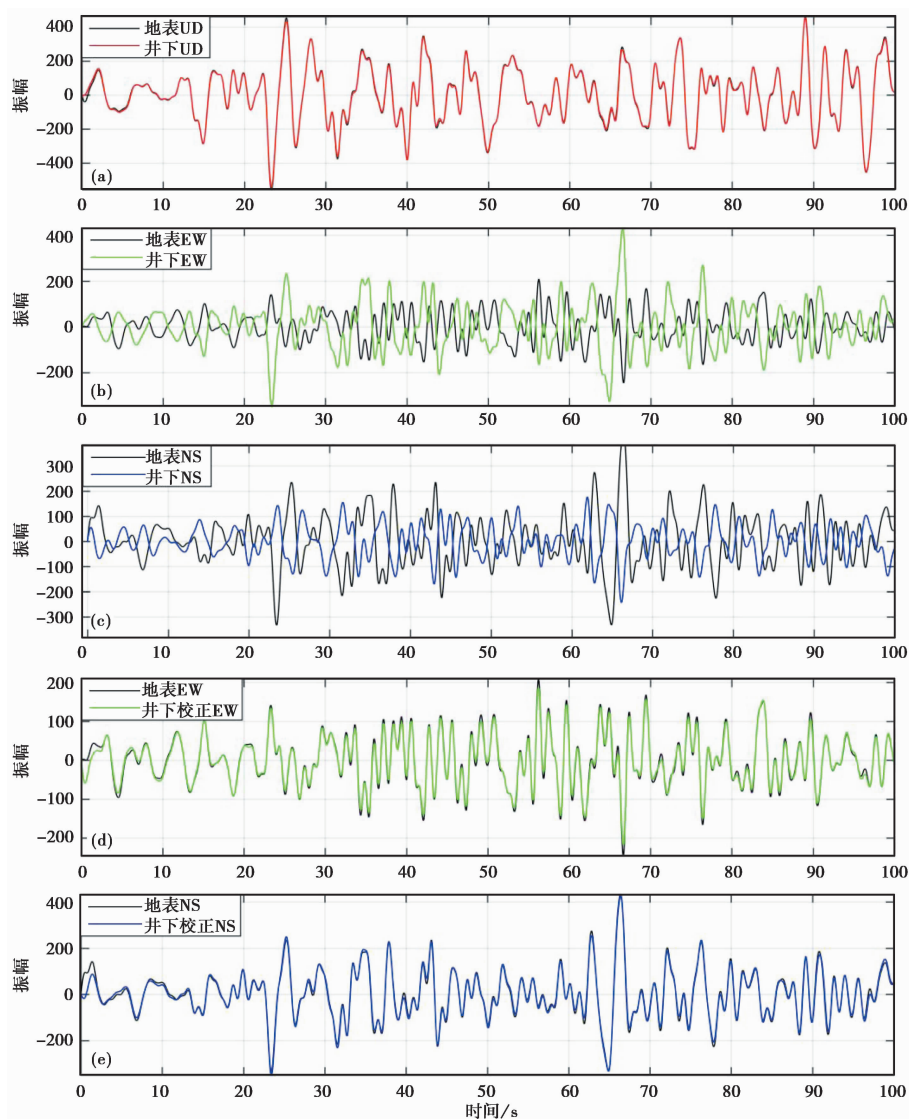


图 4 伊春台校正前后的地震波形

从图 4(a)可以看出,两台地震计垂直分向的原始地震波形完全重合,无需校正。从图 4(b)和 4(c)可以看出,两台地震计 NS 和 EW 分向原始地震波形的相位均不重合。从图 4(d)和 4(e)可以看出井下记录的地震波形经过 229.06° 的方位角旋转校正后,两台地震

计 NS 和 EW 分向的地震波形均重合,再次说明用窄带滤波优选方法校正井下宽带地震计的安装方位角是有效的。

4 讨论与结论

(1) 井下地震观测环境相对较稳定,受到的干扰相对较小;用来对比安装方位角的地表宽带地震计受风、温度、工业制造和交通工具等因素的干扰较大,因此井下和地表地震计记录信号的相关系数有起伏,需要对安装方位角的计算结果进行优选。

(2) 本文提出的窄带滤波优选检测方法用 0.19~0.2Hz 的窄带滤波对脉动信号做预处理,同时计算两台地震计南北(NS)和东西(EW)方向的相关系数和相对方位角,优选 NS 和 EW 分向平均相关系数大于 0.995,且 NS 和 EW 分向之间的夹角不大于 1.2°的计算结果,可以快速得到井下宽带地震计的安装方位角。通过河南睢县台和内蒙古伊春台安装现场记录的地震事件信号和地球脉动信号的计算结果,验证了窄带滤波优选检测方法是有效的。窄带滤波优选检测方法的优点是可以一晚上的地球脉动记录数据来计算得到两台地震计之间的相对方位角度,该方法可用于井下宽带地震计安装时的方位角检测,也可以用到地表地震计之间对齐误差的测试。

(3) 对于能量大,信噪比高的地震事件信号,可以用单次或多次地震事件信号来对比计算井下宽带地震计的安装方位角。由于受地震的震级大小、震中位置、震源深度以及到观测点距离等因素的影响,采用不同带宽的滤波器进行滤波后计算井下宽带地震计的安装方位角,可能得到不同的相关系数和安装方位角。计算两台宽带地震计同时记录地震信号的自功率谱,用自功率谱相同频带范围内的地震信号计算,得到结果更加可靠。

参考文献

- 彼得·鲍曼. 2006. 新地震观测实践手册. 中国地震局监测预报司,译. 北京:地震出版社,165~171.
- 胡小刚,郝晓光,薛秀秀. 2010. 汶川大地震前非台风扰动现象的研究. 地球物理学报,53(12):2875~2886.
- 李江,薛兵,崔仁胜,等. 2016. 北斗授时在地震观测技术中的应用. 地震地磁观测与研究,37(5):131~135.
- 李雷,邓存华,黄瑶,等. 2019. 昆明基准地震台地面与井下记录地震差异分析. 中国地震,35(1):96~108.
- 李少睿,惠少兴,董平江. 2020. 利用同台址地脉动记录检测井下地震计水平方位角. 地震研究,43(1):71~78.
- 李少睿,毛国良,王党席,等. 2016. 井下地震计方位角检测技术应用研究. 地球物理学报,59(1):299~310.
- 刘明辉,周银兴,李江,等. 2019. 甚宽频带地震计磁屏蔽测试. 地震地磁观测与研究,40(6):87~92.
- 吕永清,蔡亚先,程骏玲. 2007. 确定地震计安装方位的相干性分析法. 大地测量与地球动力学,27(4):124~127.
- 王洪体,崔仁胜,王宏远,等. 2020. 对齐误差对测试地震计自噪声的影响. 地震,40(3):153~166.
- 王婷,薛梅. 2020. 阿留申群岛地震台站方位角变化及其对横波分裂的影响. 地震学报,42(2):187~195.
- 魏贵春,姚运生,张丽芬,等. 2017. 方位角对地方震震级测定的影响. 地震学报,39(6):880~890.
- 吴双,胡旭辉,李小晗,等. 2020. GL-S60、GL-CS60 与 3ESPC 三种宽频带地震计工作性能对比. 华北地震科学,38(增刊1):109~113.
- 谢剑波. 2014. 地震记录的时间域反褶积、仿真及在地震计方位角相对测量中的应用. 地球物理学报,57(1):167~178.
- 赵瑞胜,危自根,闫新义,等. 2021. 喀什基准台宽频带井下和地表地震计记录数据对比研究. 中国地震,37(4):898~907.
- 周云耀,王鹏辉,王海斌,等. 2020. 井下地震计信号方位角硬件校正方案设计. 大地测量与地球动力学,40(11):1200~1205.
- 中国地震局,2020. DB/T 22—2020,《地震观测仪器进网技术要求 地震仪》. 中国标准出版社.
- Peterson J R. 1993. Observations and modeling of seismic background noise. Reston:USGS,93~322.

An Azimuth Detection Method for Borehole Broadband Seismometer Base on Narrow-band Filtering

Liu Minghui¹⁾, Zhou Yinxing¹⁾, Li Jiang¹⁾, Chen Yang¹⁾, Kang Lulu²⁾,
Cui Rensheng¹⁾, Lin Zhan¹⁾, Wu Weiyuan²⁾

1) Institute of Earthquake Forecasting(Key Laboratory of Earthquake Prediction), CEA, Beijing 100036, China

2) Beijing Gangzhen Technology Co., Ltd., Beijing 102628, China

Abstract Borehole seismic observation has the advantage of avoiding various types of surface interference, thereby significantly improving the signal-to-noise ratio of seismic observation signals. However, the installation azimuth of borehole broadband seismometers is arbitrary and must be corrected by comparing it to the installation azimuth of surface standard seismometers. This paper proposes a narrowband filtering optimal detection method for this purpose, which simultaneously calculates the relative azimuth and correlation coefficient in the north-south and east-west directions between the two seismometers. By selecting the results where the relative azimuth angle difference is within 1.2° and the correlation coefficient exceeds 0.995, an average is calculated, allowing for a quick determination of the relative installation azimuth between two broadband seismometers. The feasibility of the narrowband filtering optimal detection method is verified through a comparison of earthquake signals and Earth pulsation signals recorded at the Suixian Seismic Station in Henan Province and the Yichun Seismic Station in Inner Mongolia. The key advantage of this method is its ability to calculate the relative azimuth between two seismometers using just one night of recorded data. This makes it highly effective for azimuth correction during the installation of borehole broadband seismometers and can also be used to test alignment errors between surface seismometers.

Keywords: Borehole observation; Broadband seismometer; Azimuth; Correct