

孟方杰、张燕,2018,利用不同倾斜仪和应变仪检测地球自由振荡的对比与分析,中国地震,34(1),133~140.

利用不同倾斜仪和应变仪 检测地球自由振荡的对比与分析

孟方杰 张燕

中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室),武汉市武昌区洪山侧路 40 号 430071

摘要 中国地震局地壳形变观测台网布设有垂直摆倾斜仪、钻孔倾斜仪、洞体应变仪、分量式钻孔应变仪与体应变仪等地形变观测仪器。这些观测仪器均记录到了 2011 年日本 M_w 9.0 大地震激发的自由振荡信号。本文分别利用单台数据和多台数据叠积,检测到 ${}_0S_3 \sim {}_0S_{30}$ 全部的球型自由振荡基频振型和 ${}_0T_3 \sim {}_0T_{20}$ 全部的环型自由振荡基频振型及部分谐频振型。此外,通过对这些检测结果的对比,分析了它们对不同自由振荡类型、不同频段的振型检测能力。分析发现垂直摆倾斜仪对球型自由振荡的检测结果最佳,且由于在低频段有较高的噪声干扰,钻孔倾斜仪无法检测到低阶的球型自由振荡。对于环型自由振荡的检测,分量式钻孔应变仪检测结果最佳。

关键词: 倾斜仪 应变仪 傅里叶变换 叠积

[文章编号] 1001-4683(2018)01-0133-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地球在受到大地震、火山爆发或地下核爆炸的激发后,引起地球发生整体振荡而形成驻波,即为地球自由振荡。地球自由振荡的频率与地球的形状、密度分布、剪切模量等存在相关性,因此研究地球自由振荡有助于了解地球内部的性质与结构,从而改进现有模型。此外,地球自由振荡是地震面波在传播过程中形成的驻波。自由振荡的大小与震源的破裂方式和破裂长度密切相关,因此地震后的自由振荡信号可以约束地震震级。自由振荡包括两种类型(Ness et al,1961;Alterman et al,1974):球型自由振荡和环型自由振荡。球型自由振荡包含径向运动和剪切运动,而环型自由振荡只作剪切运动。由于两种自由振荡的性质不同,超导重力仪主要检测到的是球型自由振荡,而利用倾斜仪、应变仪数据对自由振荡的研究(尤其对环型自由振荡)比较少(邱泽华等,2007),更没有进行过系统地研究和比较。中国地震局地壳形变台网中心拥有大量的应变仪、倾斜仪(如分量式钻孔应变仪、垂直摆倾斜仪、洞体应变伸缩仪、钻孔倾斜仪等),分布于全国各个台站,汇集了 2001 年以来的全国形变观测台站中的水管倾斜仪、垂直摆倾斜仪、洞体应变伸缩仪、体积式钻孔应变仪的数字观测

[收稿日期] 2017-11-20; [修定日期] 2017-12-22

[项目类别] 中国地震局科研专项(17A18ZX085)资助

[作者简介] 孟方杰,男,1992年生,硕士研究生在读,主要从事地球自由振荡的分析研究。E-mail:869713064@qq.com

张燕,通讯作者,女,1976年生,副研究员,主要从事地壳形变观测、地震预测的研究。

E-mail:zhangyyy2007@126.com

资料,为利用应变仪、倾斜仪观测资料研究自由振荡带来了契机。2011年3月11日5时46分(格林尼治时间),日本东北部(38.322°N,142.369°E)发生了 M_w 9.0 特大地震,造成了大量人员伤亡和财产损失。已有学者对此次地震激发的地球自由振荡做了研究(栾威等,2015;姚家骏等,2012)。

1 观测数据预处理

本文选用了常熟台体应变仪、查山台钻孔倾斜仪、泰安地震台洞体伸缩仪、宁陕台垂直摆倾斜仪及江宁台分量钻孔应变仪的观测数据。根据 Rosat 等(2003)的研究表明,自由振荡检测的最优起始时间为震后 5h,因此本文选择了 2011年3月11日9时46分至2011年3月16日9时46分共计5天(仪器均为分钟采样即7200个点)的观测资料。考虑到大气压变化对应变仪和倾斜仪的观测影响很小,本文未做气压改正。为去除固体潮的影响,本文使用切比雪夫高通滤波器(阶数为10,通带波纹幅度为0.05dB,通带截止频率为0.01mHz)进行滤波处理(Ness et al,1961;Van Camp,1999)。经过固体潮滤波之后,剩余的残差信号如图1所示。由图1可知,在3月11日附近各个仪器的残差信号变化幅度突然增加,约1天后恢

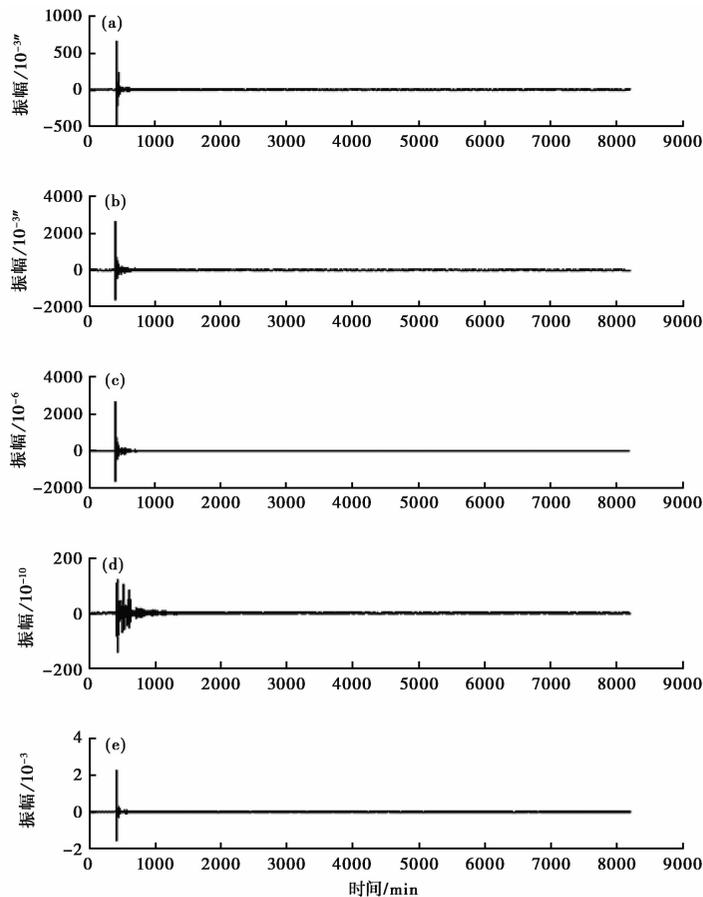


图1 5组数据经过固体潮去除后的残差信号

- (a) 查山台钻孔倾斜仪;(b) 宁陕台垂直摆倾斜仪;(c) 常熟台体应变仪;
- (d) 泰安台洞体伸缩仪;(e) 江宁台分量钻孔应变仪

复,这便是此次大地震所引起的。

数据长度越长的观测序列携带的背景噪声也越多;而某些模态之间的频率间隔太小,要清晰将这些模态分辨出来,要求数据长度(丁浩等,2013)为

$$T = N \cdot \Delta t = 1 / (\Delta \omega) \quad (1)$$

其中, N 为采样点数; Δt 为采样间隔; $\Delta \omega$ 为最小频率间隔。综合考虑频率分辨率和信噪比的因素,最终选择了4000个残差点进行傅里叶变换(加上与观测数据长度相同的汉宁窗)谱分析。

2 检测结果对比分析

2.1 单组仪器检测结果

综合各种因素,本文在上述5个台站的观测资料中选择了背景噪声较低、检测结果较好的观测分量。分别选择了查山台钻孔倾斜NS分量观测数据、泰安台洞体伸缩仪NS分量观测数据、常熟台体应变仪观测数据、宁陕台垂直摆倾斜仪EW分量观测数据,而对于分量式钻孔应变仪,观测方位差为 90° 的两个分量相减的值与剪应变成一定比例(邱泽华等,2007),因此本文选用了EW和NS观测分量相减的值。观测资料经过预处理和谱分析后,结果如图2所示。

图2清晰地显示了被检测到的地球自由振荡振型,而且大部分的振型峰值凸显明显。5种仪器均检测到了低频段的球型自由振荡振型,此外,分量钻孔应变仪还检测到了较多环型振型,洞体伸缩仪和垂直摆也检测到了少量环型振型,而其他两种仪器未检测到环形振型。对于振型振幅的比较,由于不同仪器观测的物理量不一样,振幅大小绝对值的对比没有意义。而对于同一组观测数据中不同振型振幅的大小差异,上述5组观测结果中也呈现出不同。主要原因为:某一个地球自由振荡振型在不同站点产生不同的本征位移,而上述5组观测并不在同一观测站,因此,振型振幅差异不同。此外,从体应变仪的检测结果可以看出(图2(c)),在大于2mHz频段,振型振幅整体下降很多,可以推测为体应变仪在该频段观测能力较弱。最后,从整体来看,5组观测结果均存在随频率增加,振幅下降的趋势,这是由于频率增加导致自由振荡信号在传播时衰减增大引起的。

根据功率谱密度的结果,表1统计了各种仪器检测到的球型自由振荡基频振型的频率值,并将结果与PREM模型理论值进行对比。本文以检测结果 $SNR > 3$ 视为有效值。由表1可知:①钻孔倾斜仪检测到了 ${}_0S_7 \sim {}_0S_{28}$ 的全部基频振型(除 ${}_0S_{10}$),与理论值的整体平均偏差为0.09%;②垂直摆倾斜仪检测到了 ${}_0S_4 \sim {}_0S_{31}$ 的全部基频振型(除 ${}_0S_8$ 、 ${}_0S_{27}$),绝大部分振型的观测频率值与PREM模型理论值的偏差在0.05%以内,整体平均偏差为0.09%;③体应变仪检测到了 ${}_0S_4 \sim {}_0S_{25}$ 的全部基频振型(除 ${}_0S_{19}$),绝大部分振型的观测频率值与PREM模型理论值的偏差在0.1%以内,整体平均偏差为0.1%;④洞体伸缩仪检测到了 ${}_0S_4 \sim {}_0S_{29}$ 的全部基频振型(除 ${}_0S_7$ 、 ${}_0S_9$ 、 ${}_0S_{11}$ 、 ${}_0S_{23}$ 、 ${}_0S_{24}$ 、 ${}_0S_{25}$),与理论值的整体平均偏差为0.18%;⑤分量钻孔应变仪检测到了 ${}_0S_3 \sim {}_0S_{26}$ 的全部基频振型(除 ${}_0S_9$),与理论值的整体平均偏差为0.15%。我们发现对于球型自由振荡的检测,体应变仪和垂直摆均有较强的能力,钻孔倾斜仪在超低频段背景噪声过大,因此无法检测出超低频段的振型。相比而言,垂直摆倾斜仪得到最佳的检测结果,与雷湘鄂等(2004)利用5个国际超导重力仪台站资料检测得到的秘鲁 $M_w 8.2$ 大地震所激发

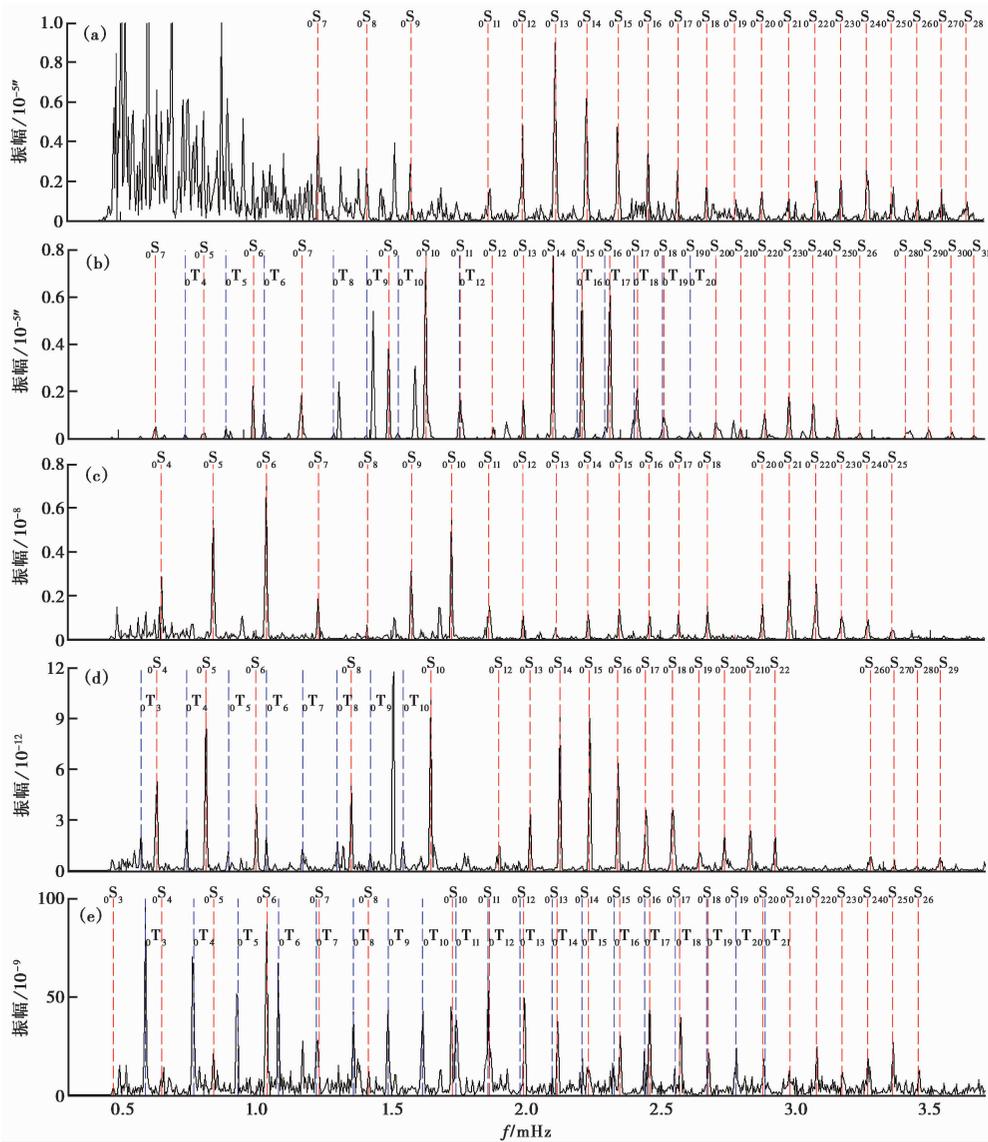


图 2 5种仪器单台数据检测到的地球自由振荡信号
 (a)查山台钻孔倾斜仪;(b)宁陕台垂直摆倾斜仪;(c)常熟台体应变仪;
 (d)泰安台洞体伸缩仪;(e)江宁台分量钻孔应变仪
 实线表示检测结果;垂直虚线表示 PREM 模型理论值的位置

的球型自由振荡结果相比较,虽然检测到的振型要少一些,但是检测到的频率值与其观测结果较一致,整体平均偏差为 0.12%。

表 2 统计了仪器检测到的环型自由振荡基频振型的频率值,并将结果与 PREM 模型理论值进行对比。由表 2 可知,分量钻孔应变仪检测到了 ${}_0T_3 \sim {}_0T_{20}$ 的全部基频振型,并且绝大部分振型的观测频率值与 PREM 模型理论值的偏差在 0.1% 以内;垂直摆倾斜仪检测到了相对较少的基频振型;而洞体伸缩仪只检测到了超低频段的环型振荡振型。对比检测结果,很

表 1 5 组数据的球型自由振荡观测值与 PREM 模型理论值及其偏差

Mode	$f/\text{mHz}^{\text{①}}$	$f/\text{mHz}^{\text{②}}$	$f/\text{mHz}^{\text{③}}$	$f/\text{mHz}^{\text{④}}$	$f/\text{mHz}^{\text{⑤}}$	PREM/mHz
${}_0S_3$					0.467	0.469
${}_0S_4$		0.646	0.649	0.645	0.646	0.647
${}_0S_5$		0.841	0.841	0.842	0.842	0.840
${}_0S_6$		1.037	1.037	1.307	1.037	1.038
${}_0S_7$	1.233	1.229	1.229		1.229	1.232
${}_0S_8$	1.412	1.408		1.412	1.416	1.413
${}_0S_9$	1.575	1.579	1.575			1.578
${}_0S_{10}$		1.725	1.725	1.725	1.720	1.725
${}_0S_{11}$	1.870	1.862	1.866		1.858	1.862
${}_0S_{12}$	1.991	1.995	1.991	1.995	1.991	1.990
${}_0S_{13}$	2.112	2.112	2.112	2.116	2.116	2.113
${}_0S_{14}$	2.229	2.223	2.233	2.223	2.224	2.231
${}_0S_{15}$	2.341	2.345	2.345	2.349	2.349	2.346
${}_0S_{16}$	2.458	2.458	2.462	2.462	2.458	2.458
${}_0S_{17}$	2.566	2.566	2.566	2.570	2.574	2.567
${}_0S_{18}$	2.674	2.674	2.674	2.670	2.674	2.673
${}_0S_{19}$	2.783	2.778	2.778	2.778	2.778	2.777
${}_0S_{20}$	2.878	2.878	2.878	2.878	2.878	2.878
${}_0S_{21}$	2.978	2.978	2.978	2.978	2.974	2.978
${}_0S_{22}$	3.083	3.074	3.078	3.078	3.078	3.075
${}_0S_{23}$	3.170	3.170	3.170		3.170	3.171
${}_0S_{24}$	3.266	3.266	3.270		3.266	3.266
${}_0S_{25}$	3.357	3.362	3.360		3.362	3.359
${}_0S_{26}$	3.457	3.453		3.453	3.457	3.452
${}_0S_{27}$	3.545			3.545		3.544
${}_0S_{28}$	3.641	3.641		3.637		3.635
${}_0S_{29}$		3.725		3.724		3.725
${}_0S_{30}$		3.820				3.816
${}_0S_{31}$		3.907				3.905

注: ①钻孔倾斜仪; ②垂直摆倾斜仪; ③体应变仪; ④洞体伸缩仪; ⑤分量钻孔应变仪

明显可以看出分量钻孔应变仪的结果最佳。与邱泽华等(2007)利用钻孔应变仪观测的苏门答腊大地震积分的地球环型自由振荡的结果相比, 本文得到的振型峰值更加明显, 并且大部分振型的观测频率值与 PREM 模型理论值的偏差更加小。倾斜仪观测的是地壳相对与铅垂线的偏移, 主要观测结果得到的是垂直方向的相对位移。体应变仪检测到的是仪器四周岩壁的拉伸挤压状况(即地球产生的体积变化)。球型自由振荡产生的更多的是径向位移, 所以倾斜仪和体应变在检测球型自由振荡方面更具有优势。而分量式钻孔应变仪 EW 分量和 NS 分量的差值与剪切应变直接相关, 因此在检测环型振荡方面具有更好的能力。

2.2 多组仪器检测结果

中国地震局地壳形变观测台网在全国布设了多台仪器。除了上述的几个台站的数据外,本文收集了其他所有台站的观测数据。为了降低背景噪声,提高信号的强度,本文选择了多台观测较为平稳的数据进行了叠积操作。叠积公式(丁月蓉,1990)为

$$P(\omega) = \left[\prod_{i=1}^n S(\omega) \right]^{\frac{1}{N}} \quad (2)$$

式中, N 为台站数量, i 为台站编号, $S(\omega)$ 为每个台站的谱估计值。本文选择了16台垂直摆倾斜仪、12台钻孔分量应变仪的观测数据进行叠积。将其余的观测数据做相同的固体潮去除,得到残差为地球自由振荡信号,再对其进行傅里叶变换得到功率谱,最后进行叠积操作,得到的积谱图如图3所示。从中明显可以看出:多组数据叠积使得噪声水平显著降低,信号增强,从而能检测到一些微弱超低频的信号,如 ${}_0S_3$ 。另外,与单台站相比,多台站叠积观测到的谱峰更加完整,如图3(a)垂直摆

表2 3组数据的环型自由振荡观测值与PREM模型理论值及其偏差

Mode	$f/\text{mHz}^{①}$	$f/\text{mHz}^{②}$	$f/\text{mHz}^{③}$	PREM/mHz
${}_0T_3$		0.587	0.587	0.586
${}_0T_4$	0.767	0.767	0.762	0.766
${}_0T_5$	0.929	0.929	0.928	0.929
${}_0T_6$	1.079	1.079	1.079	1.080
${}_0T_7$		1.221	1.225	1.221
${}_0T_8$	1.358	1.358	1.358	1.357
${}_0T_9$	1.487	1.487	1.487	1.489
${}_0T_{10}$	1.612	1.612	1.616	1.616
${}_0T_{11}$			1.741	1.738
${}_0T_{12}$	1.862		1.858	1.859
${}_0T_{13}$			1.983	1.976
${}_0T_{14}$			2.095	2.094
${}_0T_{15}$			2.208	2.207
${}_0T_{16}$	2.324		2.329	2.326
${}_0T_{17}$			2.437	2.438
${}_0T_{18}$	2.549		2.549	2.552
${}_0T_{19}$	2.674		2.674	2.669
${}_0T_{20}$	2.778		2.778	2.778

注:①垂直摆倾斜仪;②洞体伸缩仪;③分量钻孔应变仪

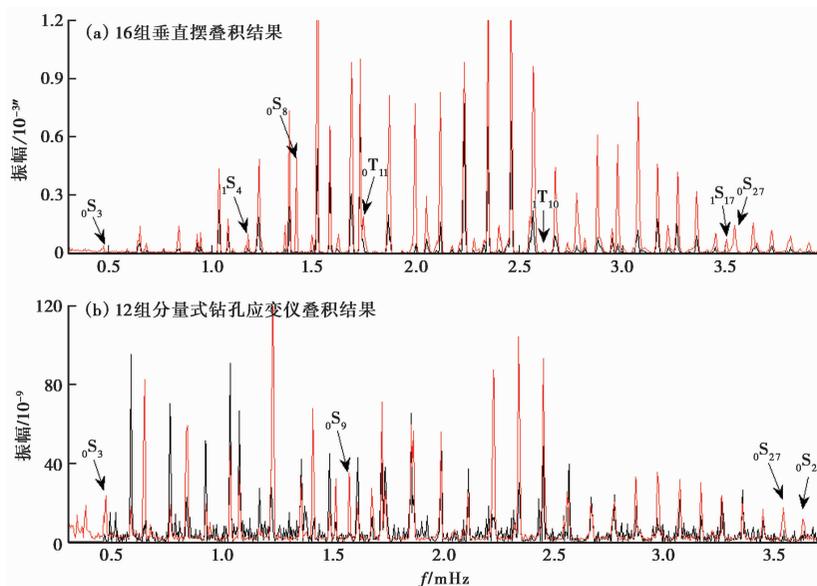


图3 多组数据积谱图

红线表示多台观测数据得到的积谱图(已经归一化);黑线表示上文单台观测数据的检测结果

观测数据叠积后检测到 ${}_1S_4$ 、 ${}_0S_8$ 、 ${}_0T_{11}$ 、 ${}_1T_{10}$ 、 ${}_1S_{17}$ 、 ${}_0S_{27}$;图 3(b)分量式钻孔应变仪观测数据叠积后检测到 ${}_0S_9$ 、 ${}_0S_{27}$ 、 ${}_0S_{28}$ 。

3 结论

本文利用了中国地震局地壳形变观测台网的 5 种不同仪器单组或多组的观测资料,研究了日本 M_w 9.0 大地震激发的地球自由振荡。对比分析了它们的检测结果,得到以下结论:

(1) 利用分量式钻孔应变仪、垂直摆倾斜仪、洞体应变伸缩仪、钻孔倾斜仪、体应变仪的观测数据检测到了 ${}_0S_3 \sim {}_0S_{30}$ 全部的球型自由振荡基频振型和 ${}_0T_3 \sim {}_0T_{20}$ 全部的环型自由振荡基频振型,检测结果良好,有较高的信噪比,并且绝大部分振型的观测频率值与 PREM 模型理论值的偏差很小,基本上在 0.1% 以内。

(2) 对于球型自由振荡,垂直摆倾斜仪和体应变仪的检测能力较好;而钻孔倾斜仪在低频段具有较高的背景噪声,导致对于低频自由振荡信号的观测能力很差。

(3) 对于环型自由振荡,分量式钻孔应变仪的检测结果最佳;而洞体应变伸缩仪只能检测到很低频的环型振荡振型。

(4) 使用多台站数据叠积的方法在提高信噪比、探测一些微弱振型、提高谱峰完整度上具有一定作用。

参考文献

- 丁浩、申文斌,2013,探测一阶模态三重分裂的 MSE 技术和 SHS 方法的比较研究,地球物理学报,56(10),3313~3323.
- 丁月蓉、郑大伟,1990,天文测量数据的处理方法,南京:南京大学出版社.
- 雷湘鄂、许厚泽、孙和平,2004,由 5 个国际超导重力仪台站资料检测到的秘鲁 8.2 级大地震所激发的球型自由振荡现象,中国科学:D 辑,34(5),483~491.
- 栾威、申文斌、贾剑钢,2015,利用 VP 型垂直摆倾斜仪观测数据检测 2011 日本 M_w 9.0 地震激发的低频地球自由振荡,地球物理学报,58(3),844~856.
- 邱泽华、马瑾、池顺良等,2007,钻孔差应变仪观测的苏门答腊大地震激发的地球环型自由振荡,地球物理学报,50(3),797~805.
- 姚家骏、万永革、王培玲等,2012,利用重力资料检测日本 9.0 级地震激发的地球自由振荡,地震研究,35(1),53~58.
- Alterman Z S, Eyal Y, Merzer A M, 1974, On free oscillations of the earth, Geophys Surv, 1(4), 409~428.
- Ness N F, Harrison J C, Slichter L B, 1961, Observations of the free oscillations of the Earth, J Geophys Res, 66(2), 621~629.
- Rosat S, Sato T, Imanishi Y, et al, 2005, High-resolution analysis of the gravest seismic normal modes after the 2004 $M_w = 9$ Sumatra earthquake using superconducting gravimeter data, Geophys Res Lett, 32(13), L13304.
- Van Camp M, 1999, Measuring seismic normal modes with the GWR C021 superconducting gravimeter, Phys Earth Planet Int, 116(1~4), 81~92.

Contrast and Analysis of Detection of the Earth's Free Oscillation Using Different Tiltmeter and Strainmeter

Meng Fangjie Zhang Yan

Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China

Abstract The Crustal Deformation Observatory Network of China Earthquake Administration equips with many kinds of crustal deformation observation instruments. These instruments have recorded the earth's free oscillation excited by the Japan M_w 9.0 earthquake. All of the spheroidal oscillation modes (${}_0S_3 \sim {}_0S_{30}$) and toroidal oscillation modes (${}_0T_3 \sim {}_0T_{20}$) excited by the Japan M_w 9.0 earthquake were detected through processing and analyzing those single or multiple group observation data. In addition, through comparing the different detective results obtained by those instruments, we analyze their capacity to observe different kinds of oscillation and different frequency band modes. We find that, the vertical pendulum tiltmeter has the best result for observing spheroidal oscillation. Because of the high noise in low frequency band, the borehole tiltmeter cannot observe the low-order spheroidal oscillation. The multi-component borehole strainmeter has a best result for observing toroidal oscillation, and the tunnel extension meters can only observe some low-order modes.

Key words: Tiltmeter; Strainmeter; Fourier transform; Product spectrum