

曹欢, 万永革. 2016年12月25日智利 M 7.6 地震球型自由振荡检测[J]. 华南地震, 2019, 39(1): 50–58. [CAO Huan, WAN Yongge. Detection of Spherical Free Oscillation of Chile M 7.6 earthquake on December 25th, 2016[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(1): 50–58]

2016年12月25日智利 M 7.6 地震球型自由振荡检测

曹欢¹, 万永革²

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710064; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 智利 M 7.6 的地震激发了地球自由振荡, 利用中国数字台网(CDSN)的 10 个台站记录到 7 d 的 VHZ 波形数据, 采用功率谱密度估计方法, 在没有滤波的情况下, 提取了 2016 年 12 月 25 日智利地震激发的地球球型自由振荡基频振型 ${}_0S_4 \sim {}_0S_{53}$ 和一系列的谐频振型, 并与 PREM 模型的理论自由振荡频率峰值进行对比, 发现 $2.5 \sim 4.5 \times 10^{13}$ Hz 的频率值与 PREM 模型预测的球型自由振荡周期符合得很好, 说明本次地震确实激发了全球范围内的自由振荡, 而 $4.5 \sim 6 \times 10^{13}$ Hz 的频率值稍微有偏离, 这是由于地壳的横向不均匀所致, 可以用来研究地球内部的构造。

关键词: 中国数字台网; 智利地震; 地球球型自由振荡; 功率谱密度; PREM 模型

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)01-0050-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.01.009

Detection of Spherical Free Oscillation of Chile M 7.6 earthquake on December 25th, 2016

CAO Huan¹, WAN Yongge²

(1. School of Geology and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Institute of Geophysics China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: The Chile M 7.6 earthquake excited the free oscillation of the earth. By using 7 d VHZ waveform data recorded by 10 stations of Chinese digital network (CDSN) and the power spectral density estimation method, in no case of filtering, the paper extracted the fundamental frequency ${}_0S_4 \sim {}_0S_{53}$ and a series of harmonious vibration frequency of the free oscillation of the earth vibration excited by the Chile earthquake on December 25th, 2016, and compared with the theoretical free oscillation frequency peak value of the PREM model. The results show that the $2.5 \sim 4.5 \times 10^{13}$ Hz frequency value of the spherical free oscillation cycle prediction and PREM model are in good agreement. The earthquake does stimulate the global range of free oscillation, and $4.5 \sim 6 \times 10^{13}$ Hz frequency value is slightly deviated duing to the horizontal unevenness of the earth's crust, which can be

收稿日期: 2018-01-10

作者简介: 曹欢(1995-), 女, 在读硕士, 主要从事地球自由振荡及地球薄层 AVO 的响应特征。

E-mail: 970051428@qq.com.

used to study the internal structure of the earth.

Keywords: China Digital Network; Chile earthquake; Earth spherical free oscillation; Power spectral density; PREM model

0 引言

根据国家地震台网测定,北京时间 2016 年 12 月 25 日 22 时 22 分,智利发生了 $M7.6$ 地震,震

源深度为 40 km。此次地震发生在奇洛埃岛南部的国家公园园区内(震中位置可见图 1),持续了大概 2 min。这是智利再一次发生大地震。

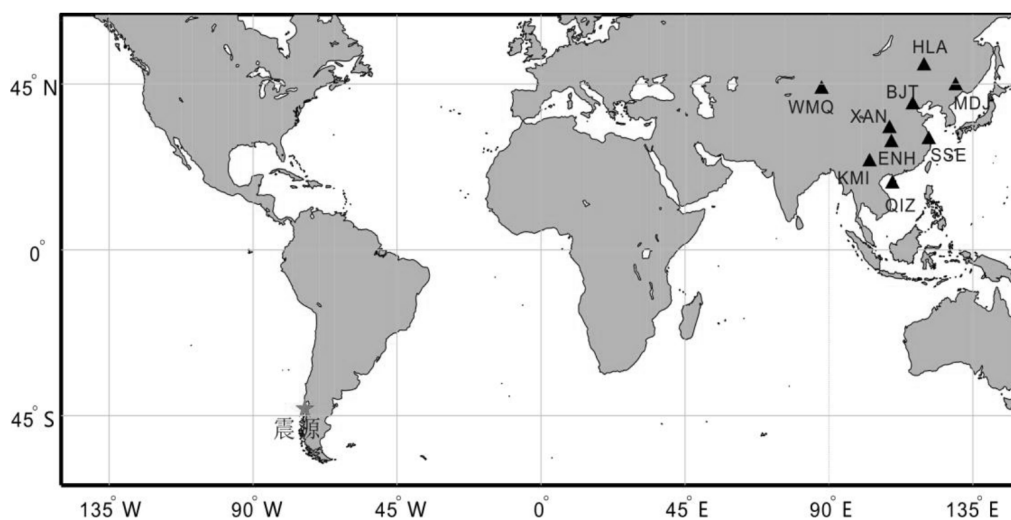


图 1 智利地震震中位置及台站位置

Fig.1 The epicentral position and station position of the Chilean earthquake

起初,人类是从完全弹性固体球震动的理论上发现了地球的自由振荡,英国的达尔文(G H Darwin)、开尔文(Kelvin)以及法国的泊松(S D Poisson)^[1]已经开始研究完全弹性固体球的一系列振动问题,这都为自由振荡理论的形成提供了很多依据,直到 20 世纪初为止,地震学的迅速发展使地质学者可以清楚地了解到地球内部的结构,才把自由振荡的理论认识应用到真实的模型之中。美国贝的尼奥夫(H Benioff)^[2]是史上最早就观测的科学家,1952 年在加大发生巨大地震时,发现了约五十七分钟的长周期震动。而在 1962 年的时候,他和其他研究者在研究智利地震时,观测到了很多振型的频谱,因此验证了全球自由振荡的存在。之后这一理论通过更多的地震不断地得到了证实。

在发生巨大地震之后,长周期的面波和体波肯定会被激发出来,同时也产生持续数天或者数个星期的全球自由振荡^[3],它蕴含许多地球内部结构的信息,通过把观测到的自由振荡频率与 PREM 模型下的理论值进行对比分析,就可以对地球模

型进行检测和约束,得到我们想要的结果,从而可以进一步去研究地球内部的结构^[4],同时,越来越多的研究者更倾心于对地球自由振荡的观测,与此同时也需要对重力仪和地震应变仪记录到地球自由振荡进行严格的滤波处理和固体潮处理,正如我国万永革等人^[5-9]对 2001 年昆仑山口西 $M8.1$ 地震和 2004 年苏门答腊安达曼这些大地震所涉及的全局自由振荡进行了全面的研究;雷湘鄂等^[9-11]对地球自由振荡的观测;以及 VanCamp^[12]对 1998 年 Baleny 岛 $M8.1$ 地震所触发的球型自由振荡的研究,我们能够发现所触发的振荡频率很低,且幅度也很小。只有在极其灵敏的、可探测长周期的仪器设备上才能观测记录到,所以中国数字台网(CDSN)记录的甚宽频带资料为此次研究地球自由振荡提供了资料来源。

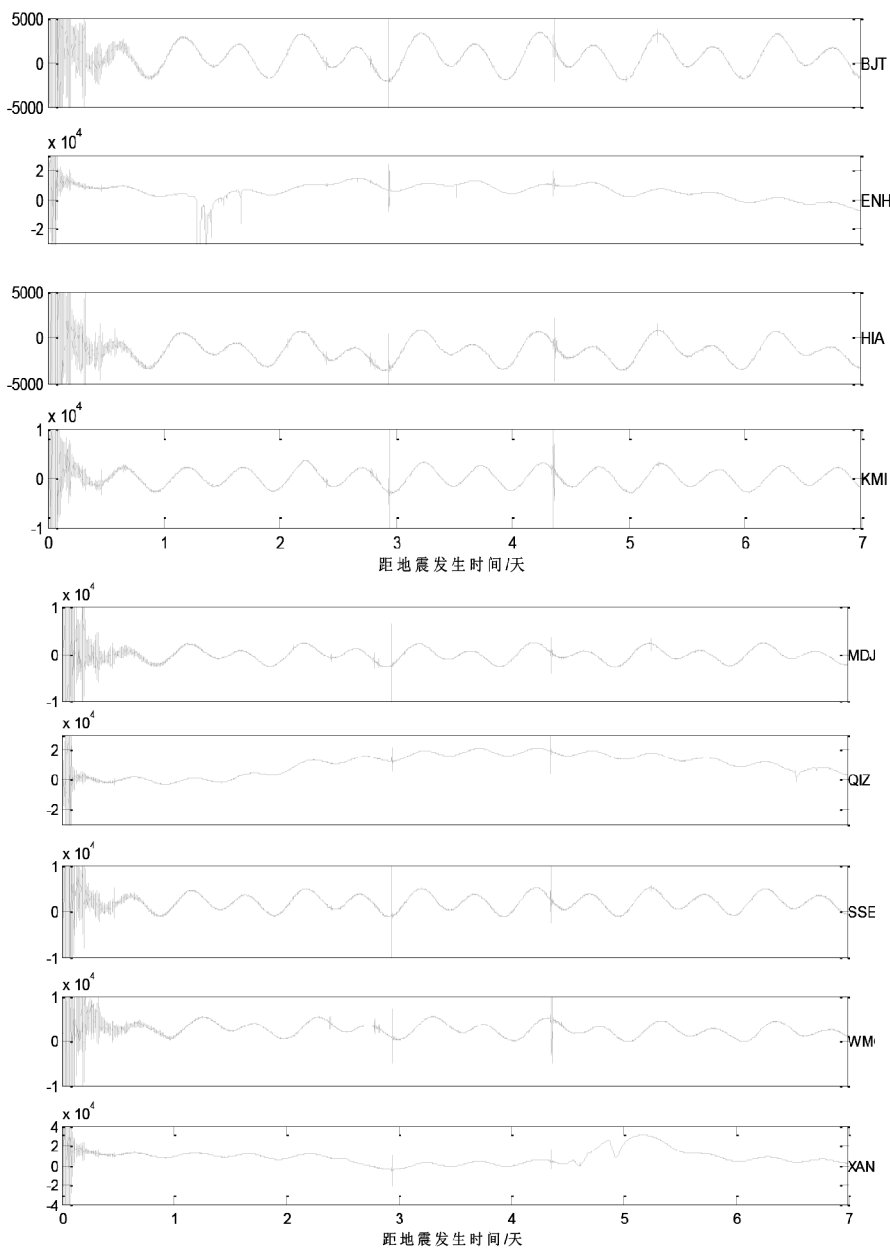
利用功率谱密度估计的方法,能够精确的检测和检验到地球球型自由振荡的频谱,从而来提取地震信息^[13],因为地球自由振荡的频谱是离散且突出的,会对高频产生压制作用,因此本文对所

得到的波形不进行滤波处理。研究结果为地质研究者提供有利的地球内部结构，还可以了解我国各台站接收地震波的性能和特点。

1 资料

中国数字地震台网(CDSN)是中国和美国合作建设的一个宽频带、大动态的数字地震台网，也是世界上最大的最先进的地震台网之一，当前中国数字地震台网设备的数据精确度很高，大概在 $8.5\sim0.003\text{ Hz}$ ^[17]，此台站很好的记录到了2016年12月25日22时22分智利地震的低频信息(图

2)，图2为中国数字台网的10个台站记录到的没有经过任何处理的甚宽频带的垂直分向的原始波形，会发现它们的原始波形都很有特点和规律，。这也为研究地球内部结构和该地震震源机制提供了充分的数据资料。本文我们利用的是中国数字地震台网(CDSN)的10个台站记录7天的波形数据资料，并且对该次大地震出发的全球自由振荡进行解释分析。如图1为震中位置和中国数字台网的10个台站分布位置和表1为台站的经纬度、震中距和相对主震的方位角。为此次能够顺利研究地球的球型自由振荡提供了很大的研究依据。



(每个台站波形图的纵坐标纪录的 Counts 数)

图2 中国数字地震台网记录的2016年12月25日智利地震的波形

Fig.2 Waveform of Chile earthquake recorded by China Digital Seismograph Network on December 25th, 2016

表 1 台站的经纬度、震中距和相对震中的方位角
Table 1 Latitude, longitude, epicentral distance and relative epicentral azimuth of stations

台站名	代码	经度/(°)	纬度/(°)	海拔高度/m	方位角/(°)	震中距/(°)
白家瞳	BJT	116.17	40.02	198	249.13	171.78
恩施	ENH	109.49	30.28	487	192.52	109.50
海拉尔	HIA	119.7	49.3	610	307.08	307.08
昆明	KMI	102.74	25.0	1952	169.96	169.96
牡丹江	MDJ	129.6	44.6	250	282.23	282.23
余山	SSE	121.19	31.10	15	229.12	229.12
乌鲁木齐	WMQ	87.71	43.8	901	81.84	81.80
西安	XAN	108.92	34.03	30	193.62	193.66
琼中	QIZ	109.8	19.0	230	188.26	188.26

2 研究方法

随机信号的基本特征是通过自相关函数和功率谱密度估计来表现的。主要是在频率域实现这种变化,然而自相关函数则是在时间域进行描述的。他们两个互为傅里叶变换关系。本文是利用这种方法对自由振荡的频率进行区分,用中国数字台网(CDSN)记录到的 VHZ 分向波形数据的自相关函数的傅里叶变换,如下

$$S_k = \sum_{n=0}^{N-1} R_n e^{-i \frac{2\pi n k}{N}}, k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (1)$$

其中,自相关函数为:

$$R_n = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_j x_{j+n}, n=-(N-2), -(N-1), \dots, -1, 0, 1, \dots, N-2, N-1 \quad (2)$$

式(1)、(2)中, N 为总的的数据个数, x 为中国数字台网记录到的 VHZ 分向的数据,而 k 是序列号, S_k 是功率谱密度估计值,所对应的频率值利用数据的采样率(0.1/s)乘以序列号 k 确定。该文利用的是 Hanning 窗来最大程度的消除由于数据不能够无限长而必须要通过加窗才能减少对结果的影响。这就是我们此次研究的原理依据。

3 研究结果

依据前面的方法,我们可以清楚的看到中国数字台网(CDSN)的 10 个台站记录到的 VHZ 分向的波形数据,再利用功率谱密度估计的方法,把全球自由振荡振型与 PREM 理论模型的频率值进行对比分析,我们就会发现功率谱密度估计是不

包括相位的相关信息的,所以其实是不必考虑地震仪的相位响应对我们结果的影响,虽然重力地震仪的振幅响应会对低频的功率谱有所压制,但是从得到的功率谱分析结果可以看到,尽管在低频段,但是仍然能够分辨出来全球自由振荡的振型。

图 3 给的是在 $2.5 \sim 3 \times 10^{-3}$ Hz 频段内的 10 个台站 VHZ 分向的功率谱密度估计值的谱峰值和 PREM 模型频率的对应情况,我们能够清楚的看到,这 10 个台站可以检测到基频 ${}_0S_{17}$ 、 ${}_0S_{18}$ 、 ${}_0S_{19}$ 、 ${}_0S_{20}$ 、 ${}_0S_{21}$ 以及谐频 ${}_1S_1$ 。从图上我们可以清楚的看到这些频谱波峰与 PREM 理论模型吻合得很好,但是琼中台(QIZ)和西安台(XAN)的球型振荡频谱能够看出很多低频的成分,而且他们还伴随着很多的背景噪声。谐频 ${}_1S_1$ 在海拉尔台站(HIA)和白家瞳(BJT)台站尤为突出明显。

图 4 给的是在 $3 \sim 3.5 \times 10^{-3}$ Hz 频段内的 10 个台站 VHZ 分向的功率谱密度估计值的谱峰值和 PREM 模型频率的对应情况,很明显可以得到,每个台站都可以检测到基频 ${}_0S_{22}$ 、 ${}_0S_{23}$ 、 ${}_0S_{24}$ 、 ${}_0S_{26}$, 还有谐频 ${}_1S_{12}$ 。而这些基频在海拉尔台(HIA)、白家瞳台(BJT)、琼中台(QIZ)以及牡丹江(MDJ)台更是十分的清晰突出。然而余山台(SSE)却在地震的 3 天半的时候,有很大的干扰,干扰已经达到了和地震一样的程度。而西安台(XAN)也一直都伴随着很大的噪声干扰。因此也可以说明西安台(XAN)的仪器环境不是很好,总是会受到很大的干扰。

图 5 给的是在 $3 \sim 3.5 \times 10^{-3}$ Hz 频段内的 10 个台站 VHZ 分向的功率谱密度估计的谱峰值和 PREM 模型频率的对应情况,从图中我们可以清晰地看出 ${}_0S_{27} \sim {}_0S_{31}$, 然而白家瞳台(BJT)和乌鲁木齐台

(WMQ)就会表现得非常突出明显,而余山台的谱峰并不是很明显,西安台(XAN)仍然还是有很大噪声干扰。但是总的来说吻合得很好。这 10 个

台站并没有观测到谐频。也能够发现白家瞳(BJT)台站的精确率比较高,可以知道白家瞳(BJT)台站的性能比较高。

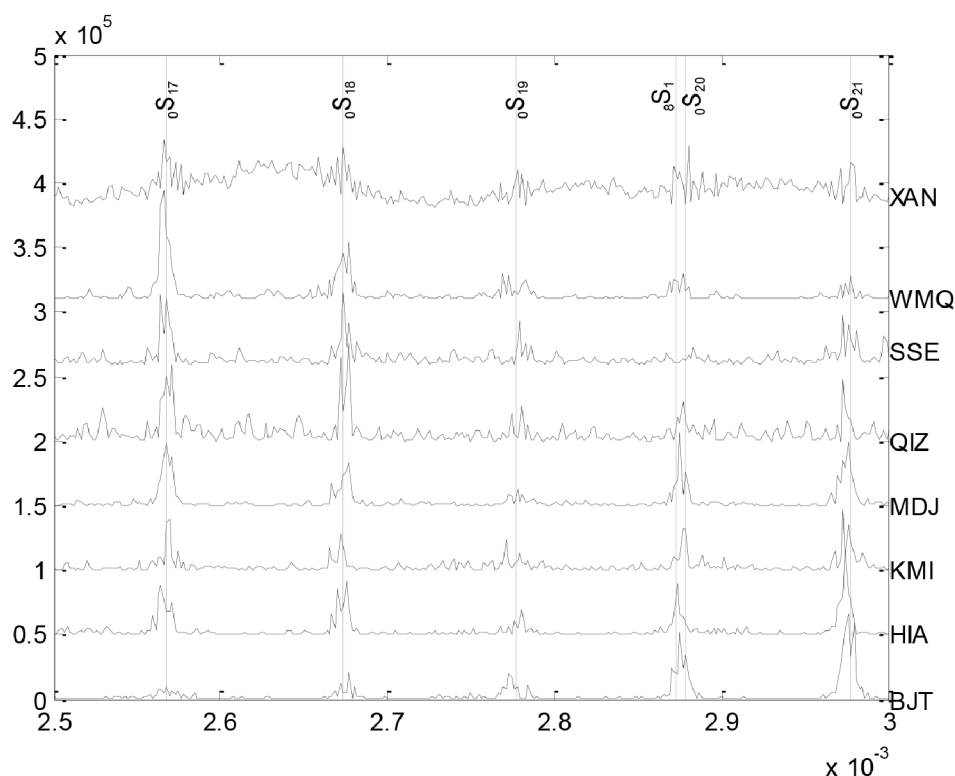
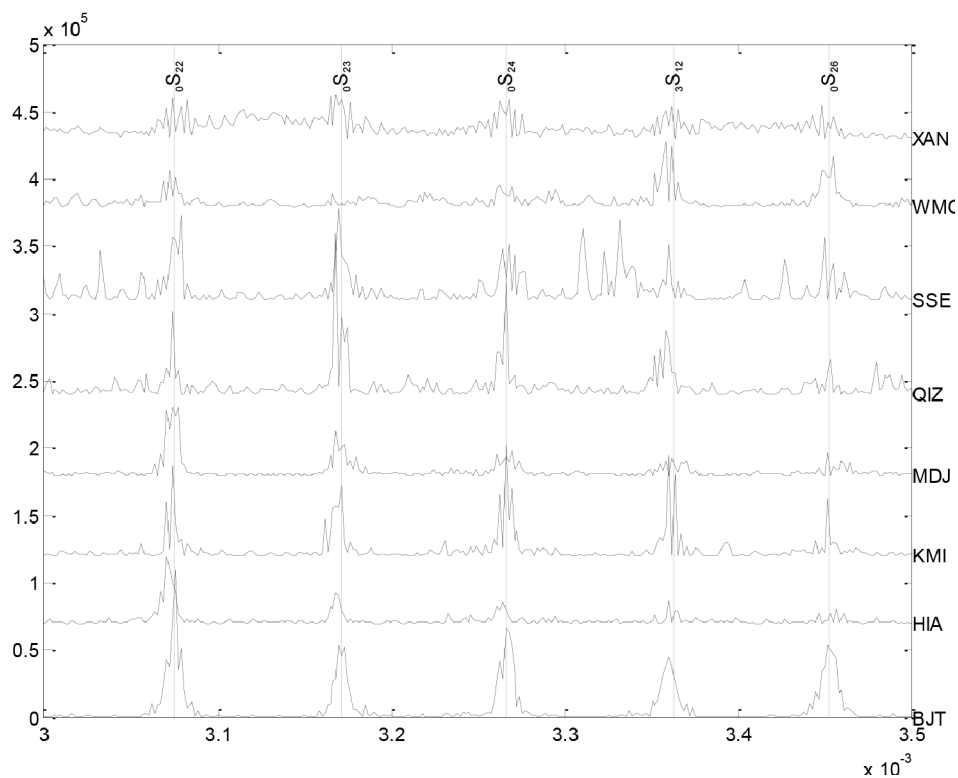


图 3 $2.5 \sim 3 \times 10^{-3}$ Hz 频段内的功率谱密度估计曲线

Fig.3 Power spectral density estimation curve in the $2.5 \sim 3 \times 10^{-3}$ Hz band



(竖线表示 PREM 模型的频率值对应的自由振荡频率值的谱峰)

图 4 在 $3 \sim 3.5 \times 10^{-3}$ Hz 频段内的功率谱密度估计曲线

Fig.4 Power spectral density estimation curve in the $3 \sim 3.5 \times 10^{-3}$ Hz band

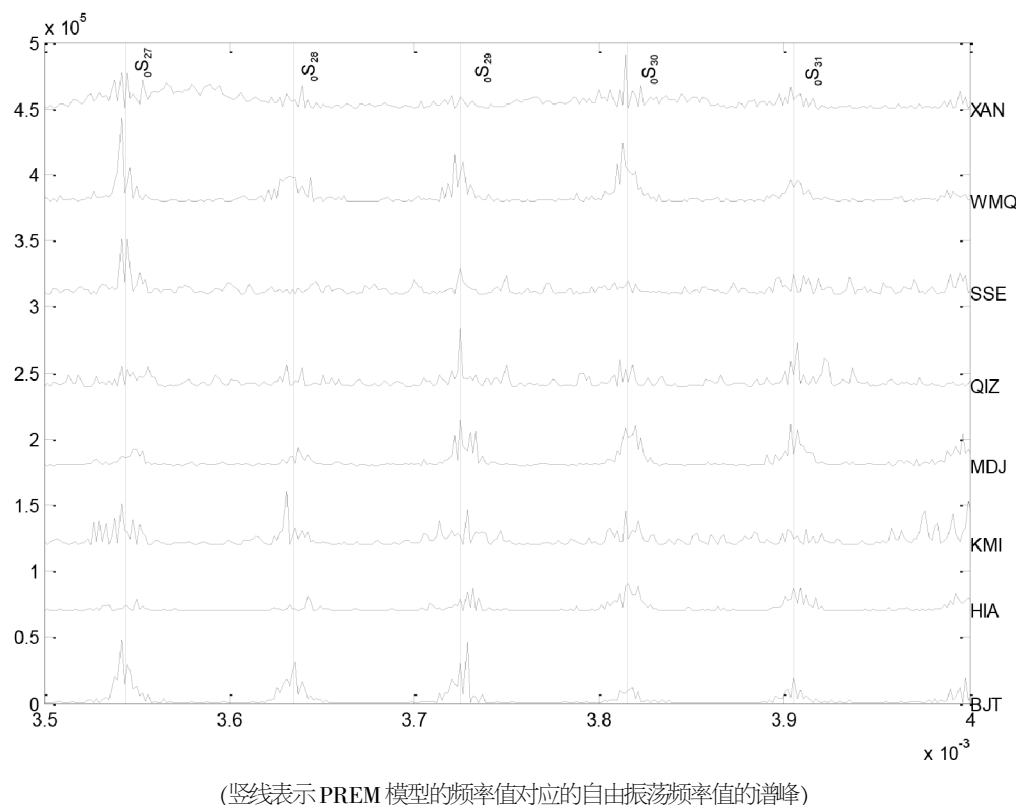


图 5 在 $3.5\sim 4\times 10^{-3}$ Hz 频段内的功率谱密度估计曲线

Fig. 5 Power spectral density estimation curve in the $3.5\sim 4\times 10^{-3}$ Hz band

图 6 给的是在 $3\sim 3.5\times 10^{-3}$ Hz 频段内的 10 个台站 VHZ 分向的功率谱密度估计值的谱峰和 PREM 模型频率值的对应情况, 结果明显表示: 可以观测到基频振型 S_{33} 、 S_{35} 、 S_{36} , 以及谐频振型 S_{14} , 在昆明台(KMI)还是能够看出一些低频成分的频谱, 观测到的频率值 PREM 模型的理论自由振荡总的来说大致上是符合的, 可是细看就会发现已经开始有一定的偏离度了。

图 7 给的是在 $4.5\sim 5\times 10^{-3}$ Hz 频段内的 10 个台站的 VHZ 分向功率谱密度估计值的谱峰和 PREM 模型频率值的对应情况, 我们可以看出, 此频段内既能够检测到基频振型, 也能检测到谐频振型。正因为自由振荡的能量衰减得很快, 而导致有一些球型自由振荡的频率不能明显看出。而海拉尔台站可以明显的观测出来, 可是其他台站如琼中(QIZ)、余山台站(SSE)则不能很好的分辨的出来, 我们观测到的振型与 PREM 理论模型所对应的频率值有稍微的偏离, 这可能是由于地球的不均匀性、各向异性以及地球的自转等因素而导致的。

图 8 给的是在 $5\sim 5.5\times 10^{-3}$ Hz 频段内的 10 个

台站 VHZ 分向的功率谱密度估计值的谱峰和 PREM 模型频率值的对应情况, 但是我们相比于图 7, 我们能够清楚的看到, 在这个频段内的噪声很高, 等同于和自由振荡衰减的振幅, 甚至有些台站的自由振荡振型已经消失在噪声之中, 根本无法观测到。如西安台(XIA)和昆明台(KIM)出现的峰值既有可能是噪声也有可能是由于地球的横向不均匀造成的, 所以才导致了观测到的谱峰出现了一定程度的偏离。

图 9 给的是在 $5.5\sim 6\times 10^{-3}$ Hz 频段内的 10 个台站 VHZ 分向的功率谱密度估计值和 PREM 模型频率峰值的对应情况, 此图再与图 8 相比, 我们会更容易看到: 这个频段内的频谱已经没有那么尖锐了, 而且也已经没有什么特点可寻, 大部分都已经淹没消失在噪声中。无法分离, 而且观测到频率值与 PREM 理论模型的自由振荡模型已经有了更大程度的偏离, 也因为高频的振型对地球的穿透能力比较差, 所以这些振型的偏离也包含了很多地壳横向不均匀性的信息。因此能知道自由振荡在高频成分衰减的较快, 同时这也符合地震波衰减的规律的。

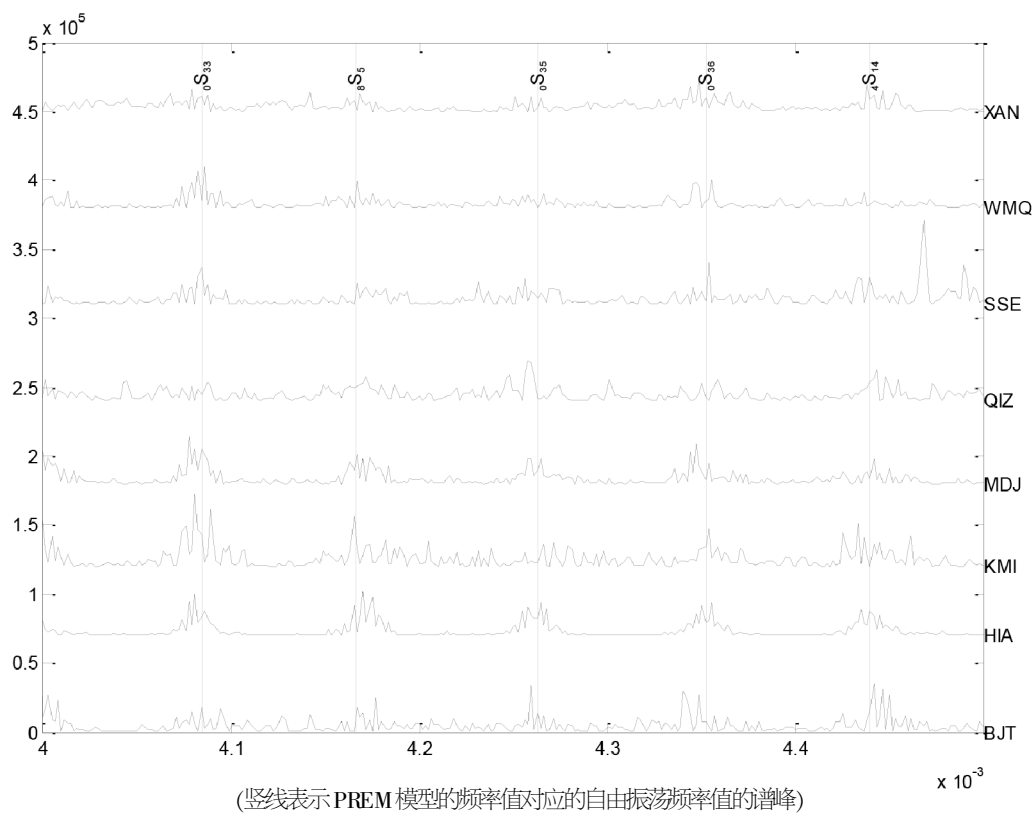


图6 在 $4\sim 4.5\times 10^{-3}$ Hz 频段内的功率谱密度估计曲线

Fig.6 Power spectral density estimation curve in the $4\sim 4.5\times 10^{-3}$ Hz band

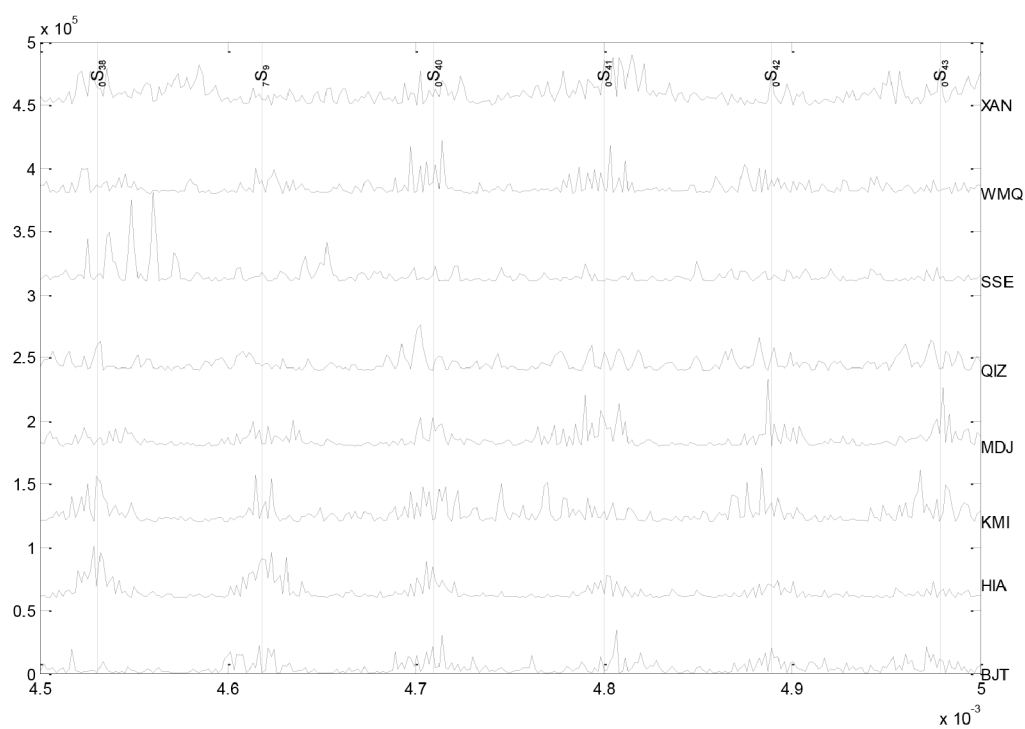
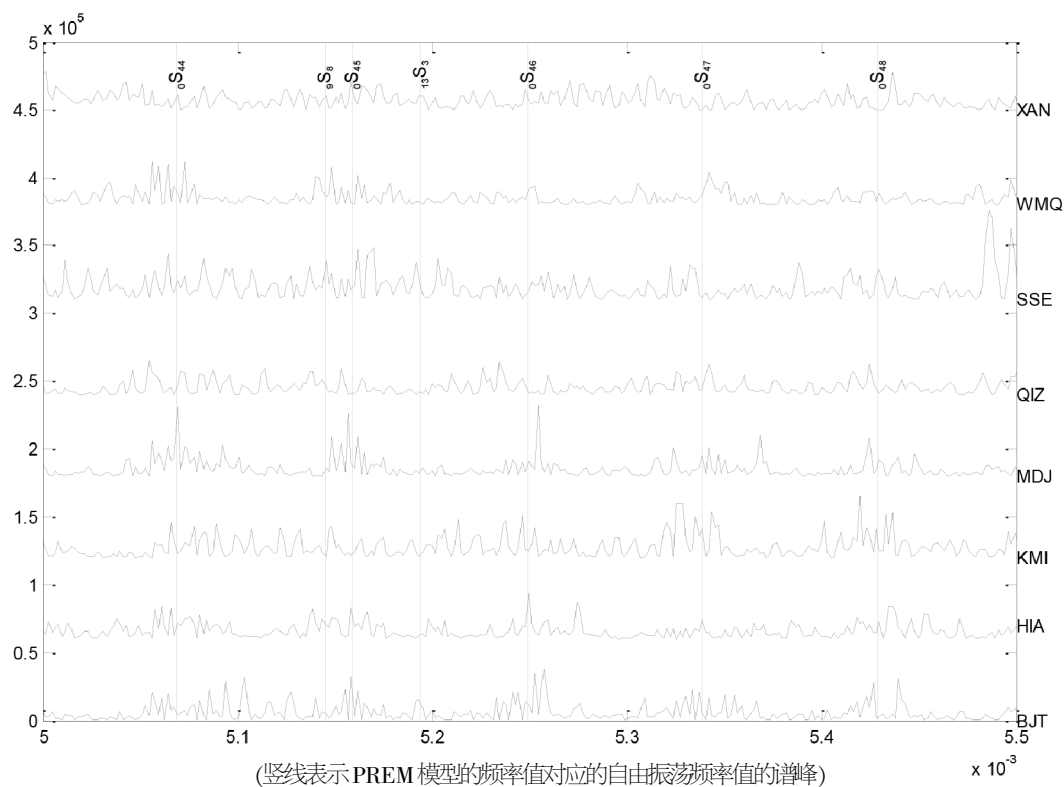
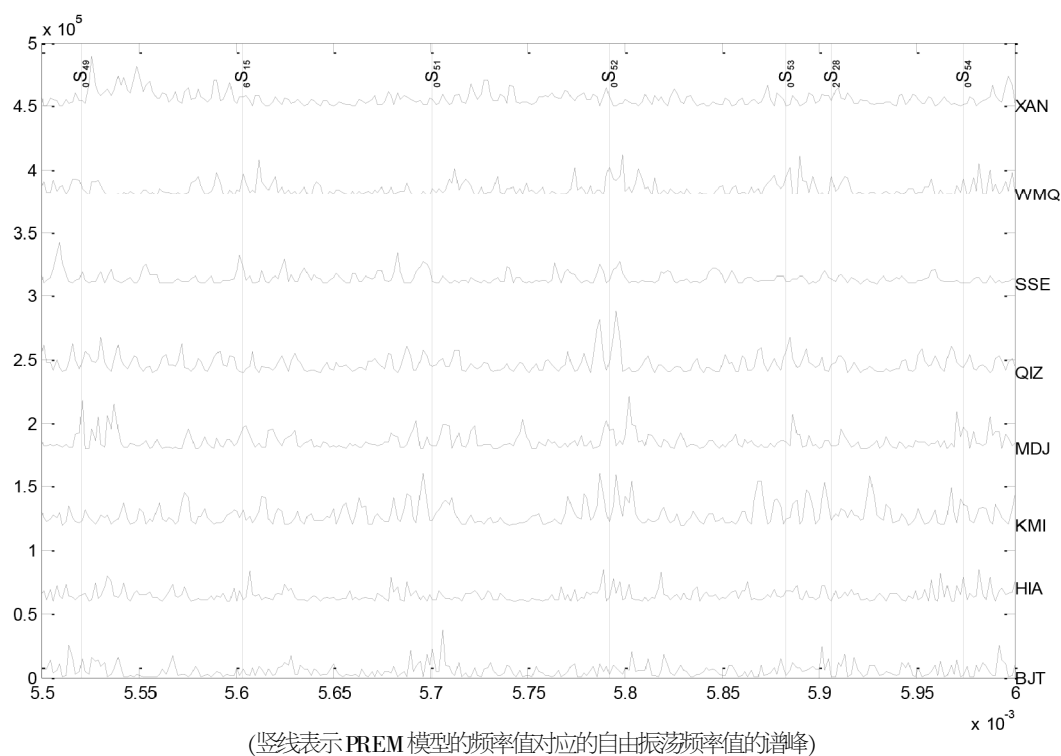


图7 在 $4.5\sim 5\times 10^{-3}$ Hz 频段内的功率谱密度估计曲线

Fig.7 Power spectral density estimation curve in the $4.5\sim 5\times 10^{-3}$ Hz band

图 8 在 $5 \sim 5.5 \times 10^{-3}$ Hz 频段内的功率谱密度估计曲线Fig.8 Power spectral density estimation curve in the $5 \sim 5.5 \times 10^{-3}$ Hz band图 9 在 $5.5 \sim 6 \times 10^{-3}$ Hz 频段内的功率谱密度估计曲线Fig.9 Power spectral density estimation curve in the $5.5 \sim 6 \times 10^{-3}$ Hz band

4 结语

利用中国数字台网(CDSN)记录到 10 个台站 7

天的 VHZ 数据资料, 并采用功率谱密度估计的方法, 能够准确的提取 ${}_0S_{17} \sim {}_0S_{34}$, 以及一系列的谐频成分如 ${}_8S_1$ 、 ${}_4S_{14}$ 等, 而且将观测到的结果与 PREM

模型的理论自由振荡频率进行对比分析,我们能够看出,观测到的频率值与 PREM 理论模型给出的频率值能够较大程度的吻合,证明我们这次的研究是比较成功的。而西安台在每个频段都有较大的噪声,一方面可能是台站的环境不好,让仪器有很大的干扰;另一方面也有可能是压抑低频段的信息导致的。主要有以下认识:

(1)我们理想之中认为地球的介质都是各向同性且均匀的,可是实际上地球的内部结构是十分复杂的,有很多的介质都是不均匀的、各向异性的。我们所观测到的频率值与 PREM 模型的理论自有震荡的频率有一定的偏差就是这个原因所导致的,但是总体上在最开始的频段之内符合的很好,因此,也就证实了 PREM 模型的正确性,同时也说明可以利用功率谱密度估计来对地球进行准确的观测。只是对于不同的频段又有着不同的结果。

(2)地球球型自由振荡不仅可以通过大地震来触发,有一些其他的因素同样也会激发,所以即使没有大地震发生时,也可以记录到地球的球型自由振荡,因此我们就可以大胆猜想地球的动力学过程也会使地球发生球型自由振荡^[1],所以本文记录到某些振荡可能是含有其它因素才产生的。并不仅仅都是由于智利发生地震的造成的,所以就需要我们地质工作者对当地的地质情况进行研究,来确保这种产生地球球型自由振荡的真正原因。为我们的研究准确度就会有更大的保障。

(3)我们观测到的自由振荡的谱峰都是一些离散且突出的,描述的是地球的整体特性,这些谱峰是用来确定地球的地幔结构的,也可以对地幔对流模式进行约束,因为地幔也是部结构的重要因素,可以为地质研究者提供有用的地球内部的结构信息。

参考文献:

- [1] Lap wood E R, Usami T. free Oscillations of the Earth [M]. Cambridge Univ. Press, London, 1981.
- [2] Benioff H, Press F, Smith S. Excitation of the free oscillations of the earth by earthquakes[J]. Geophys Res, 1961(66): 605-619.
- [3] 傅承义, 陈运泰, 祁贵仲. 地球物理学基础[M]. 北京: 地震出版社, 1985.
- [4] Nowroozi A A. Characteristic periods of fundamental and overtone oscillations of the Earth following a deep-focus earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1972, 62(1): 247-274.
- [5] 万永革. 地震学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [6] 雷湘鄂, 许厚泽, 孙和平. 利用超导重力观测资料检测地球自由振荡[J]. 科学报, 2002, 47(18): 1432-1436.
- [7] 严珍珍, 张怀, 杨长春, 等. 地震激发的地球自由振荡研究综述 [J]. 地球物理学进展 2008, 23(3): 686-693.
- [8] Ness N R, Harrison C T, Slichter L B. Observation of the free oscillation of the earth [J]. Geophys Res, 1961 (66): 621-629.
- [9] 万永革, 周公威, 郭燕平. 中国数字地震台网记录的昆仑山口西地震的球型自由振荡[J]. 地震, 2005, 25(1): 31-40.
- [10] 万永革, 周公威, 郭燕平, 等. 昆仑山口西地震激发的地球环型振荡[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(1): 1-7.
- [11] 万永革, 盛书中, 周公威, 等. 中国数字地震台网记录的苏门答腊-安达曼地震激发的地球球型自由振荡的检测[J]. 地震学报, 2007, 29(4): 369-381.
- [12] VanCamp M. Measuring seismic normal modes with the GWRC021 superconducting gravimeter [J]. Phys Earth Planet Inter, 1999, 116: 81-92.
- [13] 万永革. 数字信号处理的 MATLAB 实现. (第二版)北京: 科学出版社, 2010.
- [14] 雷湘鄂, 许厚泽, 孙和平. 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[J]. 中国科学, 2004, 34(5): 483-491.
- [15] 邱泽华, 马瑾, 池顺良. 钻孔差应变仪观测的苏门达腊大地震激发的地球环型自由振荡[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 797-805.
- [16] 宋秀青, 于海英. 印度洋 9.0 级大地震激发的基频地球球型振荡[J]. 地震地磁观测与研究, 2005, 26(4): 13-17.
- [17] 李振月, 万永革, 汪园园, 等. 中国数字地震台网记录的 2014 年 10 月 14 日 M7.3 萨尔瓦多地震地球球型自由振荡研究[J]. 华南地震, 2016, 36(1): 69-77.
- [18] 周公威, 张伯明, 吴忠良, 等. 中国数字地震台网的现状和近期发展[J]. 地震学报, 2005, 27(1): 109-116.