

方燕勋, 卞根发. *S* 变换在定点形变观测中的应用[J]. 华南地震, 2019, 39(1): 25–30. [FANG Yanxun, BIAN Genfa. Application of *S* Transform in Fixed Point Deformation Observation [J]. South China journal of seismology, 2019, 39(1): 25–30]

S 变换在定点形变观测中的应用

方燕勋, 卞根发

(浙江省湖州地震台, 浙江 湖州 313000)

摘要: 应用 *S* 变换, 对比分析湖州地震台秒采样定点形变观测到新疆皮山县 6.5 级地震的频谱动态演化特征, VP 倾斜仪和 JCZ 地震计记录的地震波较为相似, 不同的震相有不同的周期, 有显著的震相特征, 但 SSQ 倾斜仪不同震相的周期没有显著的差异性。

关键词: 湖州地震台; *S* 变换; 时频分析

中图分类号: P315.7 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662(2019)01-0025-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.01.005

Application of *S* Transform in Fixed Point Deformation Observation

FANG Yanxun, BIAN Genfa

(Huzhou Seismic Station of Zhejiang Earthquake Administration, Zhejiang, 313000, Zhejiang, China)

Abstract: Based on the second sampling deformation observational data of the Pishan *M* 6.5 in Xinjiang recorded by Huzhou seismological station, the *S*-transformation is used to compare and analyze the spectral dynamic characteristics of data. The VP inclinometer and the JCZ seismometer recorded the similar waveform, which have significant phase characteristics, different phases have different periods. But there is no significant difference in the period of different phases recorded by the SSQ inclinometer

Keywords: Huzhou seismological station; *S* transform; Time-frequency analysis

收稿日期: 2018-01-15

基金项目: 中国地震局“三结合”课题和浙江省地震局科技项目资助

作者简介: 方燕勋(1983-), 男, 工程师, 主要从事地震监测工作。

E-mail: fangyanxun@126.com.

0 引言

目前定点形变观测的高采样率化已经成为一种趋势。VP宽频带倾斜仪器已实现了秒采样^[1],方燕勋等采用测震仪数据采集器采集水平摆秒采样数据实验^[2]。为了提取高采样定点形变观测数据在地震事件中的时频特征和动力特征,常用的处理方法是傅里叶变换和小波分析。傅里叶变换可以比较有效的检测整个信号序列中所包含的不同频率组成,但是缺乏时间分辨率,无法对信号频谱的整个频率随时间变化过程进行细致的对比分析,而小波变换存在基函数选取不定等问题。时域类分析方法则可以方便地进行信号频谱的动态研究。 S 变换能使时域分辨率随频率而改变,低频端频率分辨率高,高频端分辨率高。刘琦等研究结果显示,此方法对恒频变幅及恒幅变频信号的识别都适用^[3]。本文采用 S 变换^[4]对浙江省湖州地震台(简称湖州台)定点形变观测数据中的地震事件进行时频分析。

1 S 变换算法与实验数据分析

Stockwell等人提出的 S 变换是一种新的加窗傅里叶变换,是加窗傅里叶变换和连续小波变换思想的延伸或推广。在 S 变换中,窗函数是一个可随频率的变化而伸缩的高斯(Gaussian)函数。 S 变换具有连续小波变换所没有的一些优点^[5],其分辨率是依赖于频率的,并与傅里叶谱保持直接的联系。如果将窗函数推广为任意可变形状的一般函数(并不仅限于高斯函数)^[6-7],甚至是复数窗,这时得到的 S 变换统称为广义 S 变换。

S 变换的一维连续正变换的公式为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

式中, $h(t)$ 为原始信号, $S(\tau, f)$ 为其相应的 S 正变换, f 为频率, t 为观测时间, τ 为时间轴上高斯窗的位置。

S 变换中的核函数(又称分析函数)由复正弦波与Gaussian窗函数的乘积构成,随着频率的变化,正弦波在时间域近做伸缩变换(相对于时间轴固定不平移),而Gaussian窗函数则进行伸缩和平移。

一维连续反变换的公式为:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, f) d\tau \right\} e^{-i2\pi ft} df \quad (2)$$

(2)相应地,离散 S 正变换公式为:

$$S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n}} e^{\frac{i2\pi mj}{N}}, n \neq 0 \quad (3)$$

对于 $n=0$ 的情况,则为如下常数:

$$S[jT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h\left(\frac{m}{NT}\right) \quad (4)$$

式中, $j, m, n=0, 1, \dots, N-1, j, m$ 为时间样点序号, k, n 为频率样点序号, T 为时间采样间隔, N 为离散样点总数。

离散 S 反变换公式为:

$$h[kT] = \sum_{N=0}^{N-1} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] \right\} e^{\frac{i2\pi nk}{N}} \quad (5)$$

在 S 变换中,频率的倒数决定了 S 变换中高斯窗的尺度大小,使其具有了类似小波变换的多分辨率特性。此外, S 变换保留了每个频率的绝对相位特征,且像傅里叶变换一样,具有无损可逆性。

为了测试 S 变换时频分辨的有效性,设计了一组由0.012 5 Hz、0.05 Hz和0.1 Hz的3段正弦波依次连结组成的信号,持续时间为500 s,抽样间隔1 s,共500个样点(图1(上))。图1(中)对信号进行快速傅里叶变换得到原始数据中的频率成分。图1(下)为原始信号的 S 变换结果。 S 变换能很好的识别不同的频率成分,并且在时间-频率域内更清晰更直观。

2 S 变换在秒采样形变观测数据记录地震事件中的应用

图2给出了湖州台秒采样倾斜仪SSQ、VP与JCZ地震仪记录到的2015年7月3日09:07:46新疆维吾尔自治区和田地区皮山县6.5级地震(北纬37.6°,东经78.2°,震源深度10 km)。倾斜仪记录图中,南北分量正值表示向北倾,负值表示向南倾。东西分量正值表示向东倾,负值表示西倾。利用USGS提供的功能计算出相应台站的P波、S波、L面波等震相的理论到时,理论到时与实际到时比较接近。

图3采用 S 变换得到了3套仪器各观测分量在整个同震时段内的频率随时间变化过程整体性特征。由图3可见,在新疆皮山县6.5级地震的地震波到达初期,VP倾斜仪和JCZ各观测分量记录到的高频信号瞬间增多,且频带较宽,之后低频面波组到达,最后是高频的面波组到达,面波能

量在整个观测时段内最强，且表现出明显的频散特性。VP 倾斜仪与地震仪反映出的频率随时间变化过程较类似，二者具有比较好的一致性。而 SSQ 倾斜仪各观测分量记录虽有明显的 P 波、S 波和面波，但频带较窄，波组成分较单一。

由于面波能量太强，使得在上述整体性分析中较难讨论其它细节。因此将整个过程分成 P 波、S 波、面波 3 个时段，从局部范围对信号频谱的演化进行分析探讨。

从图 4 显示的 P 波时段结果来看，SSQ 倾斜仪记录到的 P 波频带集中在 0.045~0.107 Hz 内，有一定的连续性。VP 倾斜仪和 J CZ 记录到的 P 波优势频带在 0.019~0.175 Hz 内，2 种仪器频谱发展过程类似，频谱组成成分丰富，只是 JCZ 地震仪记录的 P 波在这个时段内高频信号丰富且复杂，可能是由未识别的其他震相信号、地震波诱发的局部介质变化噪声等共同组成。

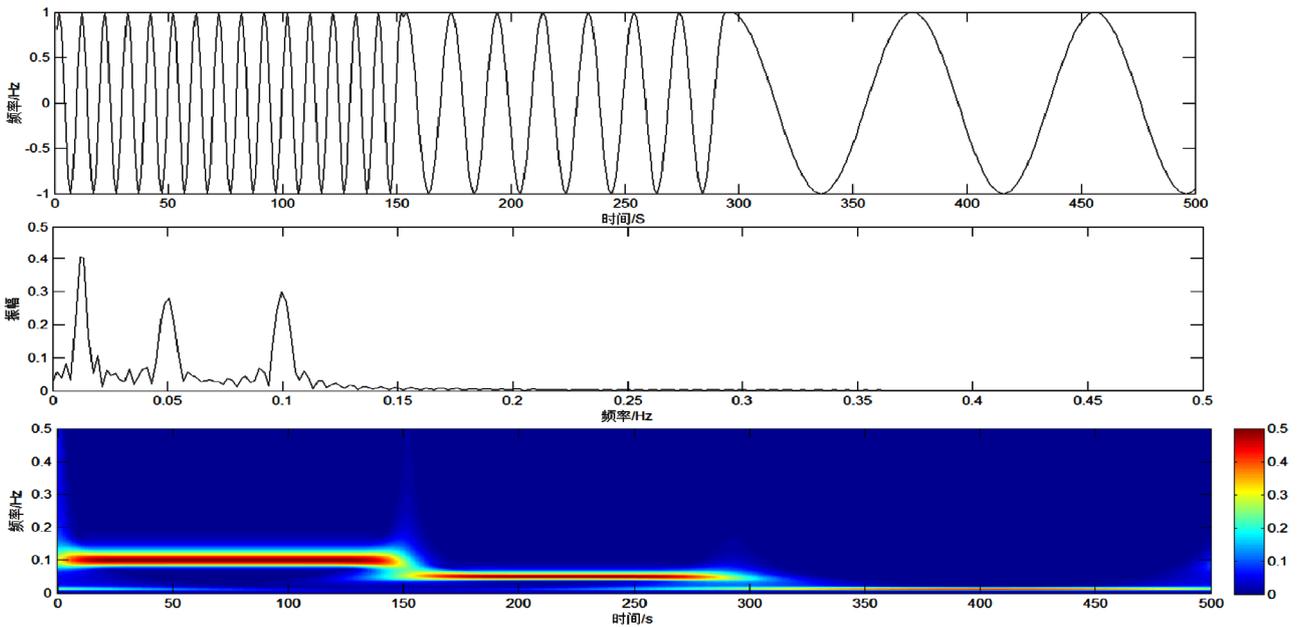


图 1 S 变换对多频率成分信号的识别

Fig.1 Identification of multi-frequency signals by S transform

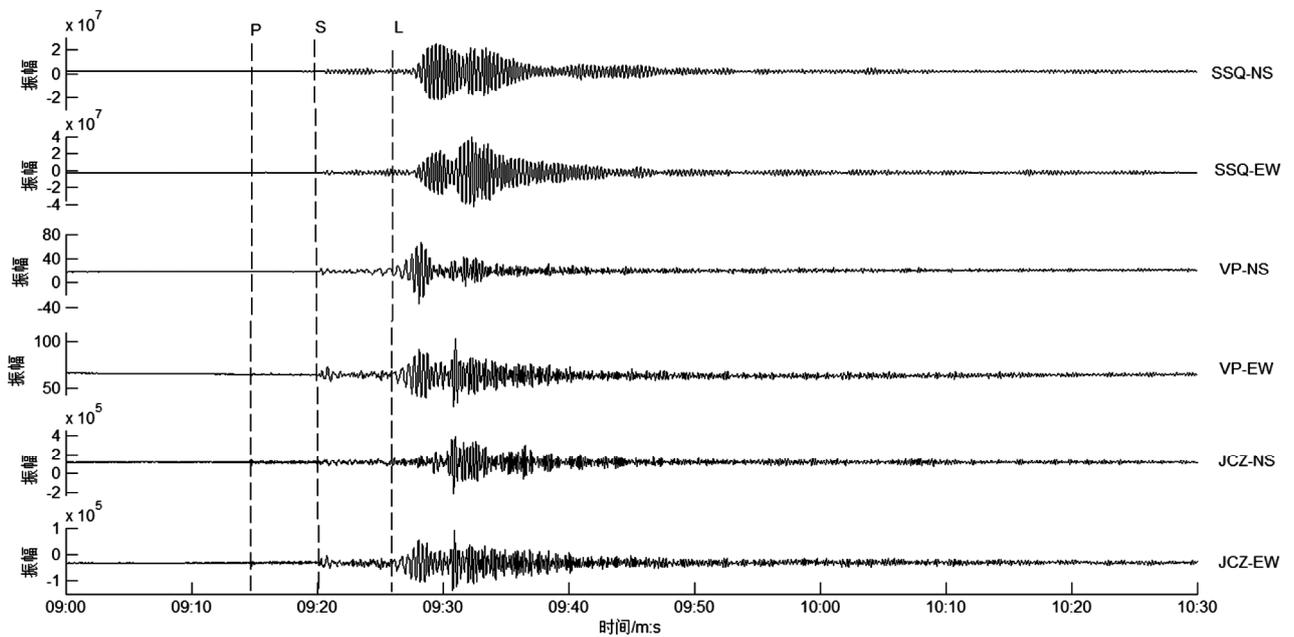


图 2 新疆维吾尔自治区皮山县 6.5 级地震曲线

Fig.2 The waveform of the Pishan M6.5 earthquake in Xingjiang

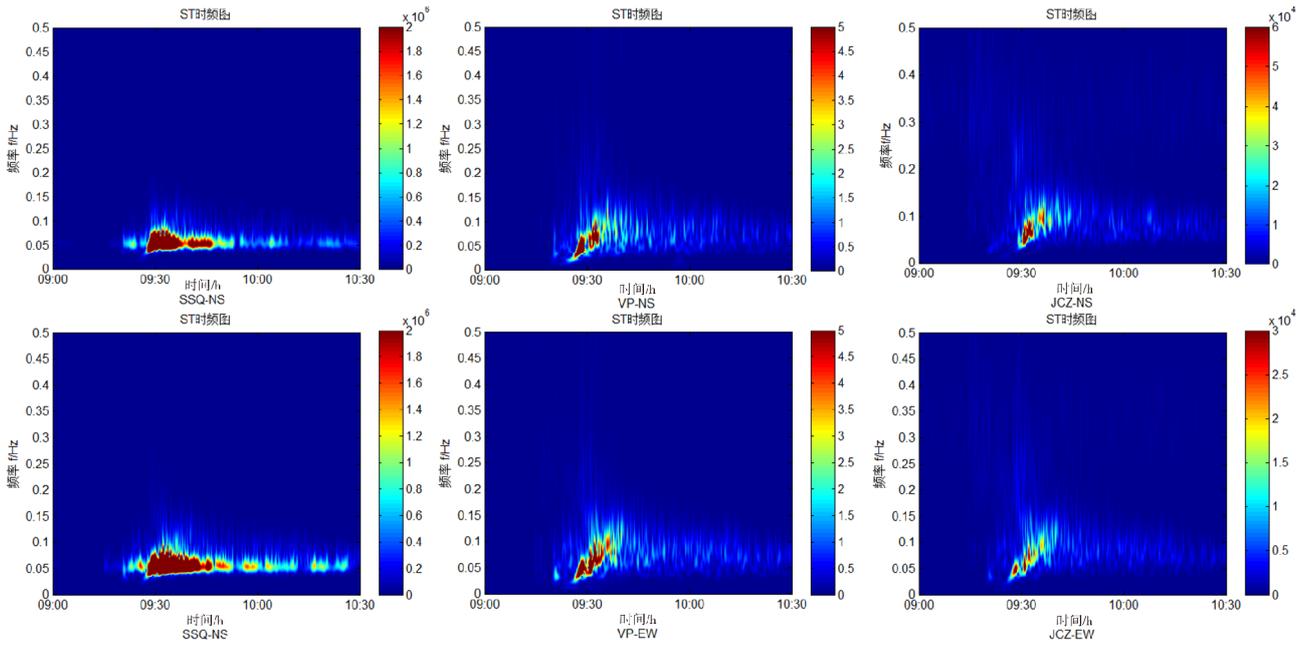


图3 S变换结果

Fig.3 The result of S transform

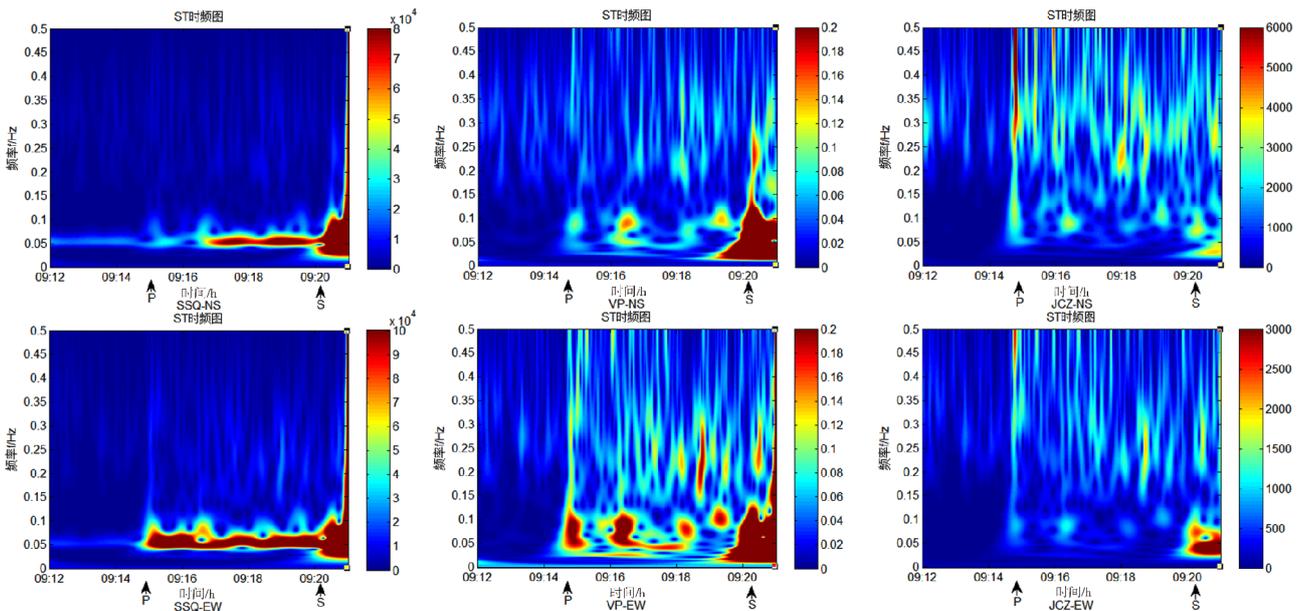


图4 波时段 S变换结果

Fig.4 The result of S transform of the deformation observational data after P wave arrival

图 5 给出的是 S 波能量为主的时段结果。从图中可以看到，SSQ 记录的 S 波优势频带在 0.039~0.098 Hz，VP 记录的 S 波优势频带在 0.012~0.125 Hz，JCZ 记录的 S 波优势频带在 0.023~0.121 Hz，与 P 波的频带相比，S 波的主要信号组频率较低。VP 记录的 S 波优势频带要比 JCZ 的宽。

最后来分析面波能量为主的时段结果。从图 6 可见，VP 倾斜仪和 JCZ 地震仪记录到面波明显的

频散现象：面波传播时，低频的信号组分由于传播深度相对较深，介质速度较高而率先到达；高频的信号组分则被限制在更浅的地表，介质速度较低，因而到达较迟。从图 11 可以清楚地看到，随着时间推移，面波频谱从 0.35 Hz 扩展延伸到 0.16 Hz 这一动态过程。JCZ 面波信号组优势频带要比 VP 的宽，且 JCZ 面波到达初期低频、频散现象较清晰。

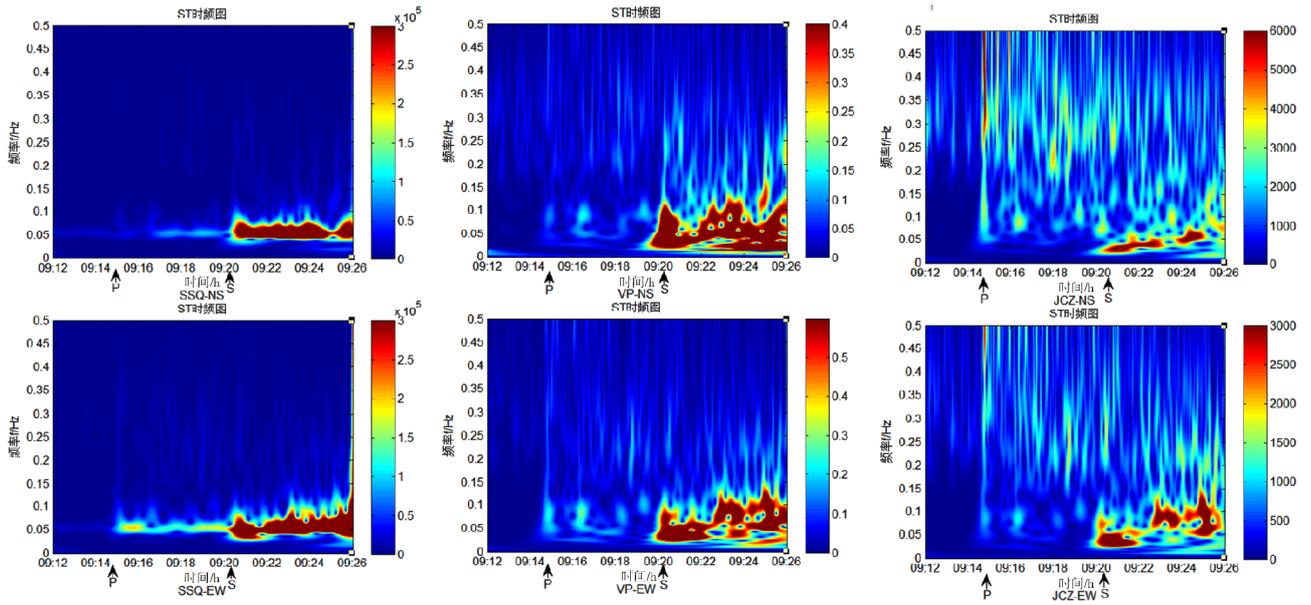


图 5 S 波时段 S 变换结果

Fig.5 The result of S transform of the deformation observational data after S wave arrival

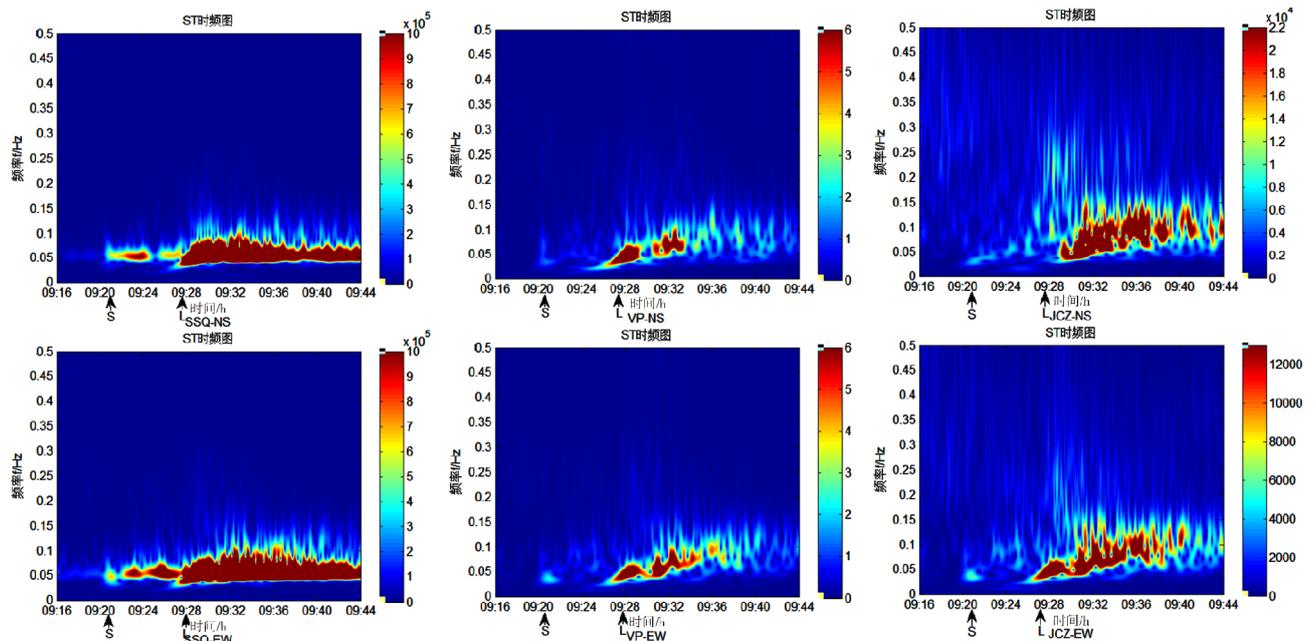


图 6 面波时段 S 变换结果

Fig.6 The result of S transform of the deformation observational data after surface wave arrival

3 结语

采用S变换,对湖州台VP型宽频带倾斜仪秒采样数据、SSQ型石英水平摆倾斜仪秒采样数据记录的倾斜地震波和JCZ超宽频带地震仪记录的地震波对比分析,得到以下结论:

(1)S变换能清晰直观地展示信号频率随时间的变换过程。

(2)在秒采样形变观测数据记录的地震事件中,S变换能刻画出地震事件的频率随时间变化过

程。SSQ倾斜仪记录的地震波P波、S波和面波周期没有显著的差异性,这可能是SSQ倾斜仪频响性能所致(摆锤自由振动周期在13S)。VP倾斜仪和JCZ较为相似,不同的震相有不同的周期,有显著的震相特征,在地震波到达初期,高频信号瞬间增多,且频带较宽,之后低频面波组到达,最后高频的面波组到达。

(3)JCZ地震仪记录的P波高频信号丰富且复杂,VP倾斜仪记录的S波优势频带比JCZ的宽,JCZ面波到达初期低频、频散现象较清晰。

参考文献:

- [1] 马武钢, 吴艳霞, 胡国庆. VP型宽频带潮汐观测仪的研制. 地震工程学报, 2015, 37(3): 873-877.
- [2] 方燕勋, 卞根发, 惠若愚. 湖州台高采样率倾斜仪同震响应初析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(3): 628-633.
- [3] 刘琦, 张晶. S变换在汶川地震前后应变变化分析中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2011(4): 6-9.
- [4] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum; the S transform [J]. IEEE Transactions On Signal Processing, 1996, 44(4): 998-1001.
- [5] McFadden P D, Cook J G, Forster L M. Decomposition of gear vibration signals by the generalized S transform [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999, 13(5): 691-707.
- [6] Pinnegar C R, Mansinha L. The S-transform with windows of arbitrary and varying shape [J]. Geophysics, 2003, 68(1): 381-385.
- [7] Pinnegar C R, Mansinha L. Time-local Fourier analysis with a scalable, phase-modulated analyzing function: the S-transform with a complex window [J]. Signal Processing, 2004, 84: 1167-1176