



菅一凡,陈畅,秦林鹏,等. 2023. 光纤旋转地震记录中的谐波噪声压制. 地球物理学进展, 38(4):1787-1798, doi:10.6038/pg2023GG0325.

JIAN YiFan, CHEN Chang, QIN LinPeng, et al. 2023. Harmonic noises removal in rotational optical fiber seismic record. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 38(4):1787-1798, doi:10.6038/pg2023GG0325.

光纤旋转地震记录中的谐波噪声压制 Harmonic noises removal in rotational optical fiber seismic record

菅一凡¹, 陈畅¹, 秦林鹏¹, 孙丽霞¹, 廖春奇², 汪超^{3*}, 苑益军¹, 王赞¹

JIAN YiFan¹, CHEN Chang¹, QIN LinPeng¹, SUN LiXia¹, LIAO ChunQi², WANG Chao^{3*}, YUAN YiJun¹, WANG Yun¹

1. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院,“多波多分量”(MWMC)研究组,北京 100083

2. 福建省地震局,福州 350003

3. 中国科学院地球化学研究所,贵阳 550081

1. MWMC Research Group, School of Geophysics and Information Technology, China University of Geoscience, Beijing 100083, China

2. Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China

3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

摘要 随着旋转地震仪的日趋成熟,天然地震旋转分量信号的观测工作进入大规模的试验阶段.我们使用一款基于光纤陀螺的三分量旋转地震仪在福建泉州台进行了为期 28 天的天然地震观测.室内处理数据时发现旋转信号中存在大量能量很强且频率成一定规律的谐波噪声,本文针对此类具有明显特征的谐波噪声分别采用了低通滤波、时频滤波、奇异值分解以及单频滤波 4 种不同的方法对其进行压制试验,从而更好地识别有效地震事件.经结果对比表明奇异值分解法对此类谐波的去噪效果较为理想.分析去噪处理后的数据发现谐波掩盖下存在一些有效的旋转观测信号,经偏振分析应为近震源的人工干扰.

关键词 旋转分量;谐波;低通;时频滤波;奇异值分解;单频滤波

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2023GG0325

Abstract With the development of rotational seismometers, the observation of earthquake rotational motions entered into large-scale experimental stage. We used a three-component rotational seismometer based on fiber optic gyroscope to observe natural earthquakes for 28 days at Quanzhou Station. During data processing, it is found that there are a lot of harmonic noises with strong energy and regular frequency in the rotational signal. In order to remove these harmonic noises and better identify effective seismic events, this paper introduces four methods to suppress harmonic noises: low-pass filtering, time-frequency filtering, singular value decomposition and mono-frequency interference elimination, among which singular value decomposition method has a better effect. After further filtering, it is found that there are some effective rotational observation signals under the cover of harmonics. After analysis of polarization, they should be artificial interference near the source.

Keywords Rotational component; Harmonic wave; Low pass; Time-frequency filtering; Singular value decomposition; Mono-frequency interference elimination

收稿日期 2022-09-15; 修回日期 2023-01-06. 投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家自然科学基金项目(U1839208,41874166,62127815,42150201)资助.

第一作者简介 菅一凡,女,2000 年生,在读直博生,主要从事旋转地震学研究. E-mail: jian_yf@163.com

* 通讯作者 汪超,男,1982 年生,2012 年毕业于西安交通大学,现从事多分量地震数据处理技术研究. E-mail: wangchao@mail.gyig.ac.cn

0 引言

可记录地震旋转运动的各种旋转地震仪的不断发展推动着旋转地震学成为地震领域的研究热点(孙丽霞等, 2021)。其中基于光纤陀螺的旋转地震仪具有体积小、灵敏度高且测量频带范围较宽等优点, 已成为目前使用最广泛且最具发展前景的旋转地震仪(Schmelzbach *et al.*, 2018; Schreiber *et al.*, 2009)。法国 ixBlue 公司和波兰军事技术学院等机构都已研发出测量精度较高的、可用于实际观测的光纤陀螺旋转地震仪(Jaroszewicz *et al.*, 2016; Kurzych *et al.*, 2018); 国内的北京航空航天大学、北京大学和北京自动化控制设备研究所等单位也在同期进行光纤陀螺旋转地震仪的研发(杨远洪等, 2005; Wang *et al.*, 2014)。

光纤陀螺是一种灵敏度很高的测量仪器, 其对周围环境的变化极为敏感, 外部工作环境的扰动会影响光纤陀螺的分辨率和稳定性, 例如环境的温度变化、振动、磁场等因素都会使仪器的测量结果产生一定的误差(王惜康等, 2016)。同时, 仪器自身也会存在包括相干检测有关的偏振噪声、背向反射和瑞利散射噪声, 以及探测器的散粒噪声、光源的相对强度噪声等仪器本底噪声(吉云飞和黄继勋, 2011)。这些噪声的存在都会使仪器记录信号的信噪比降低, 故对光纤陀螺信号的去噪一直在不断的研究与发展中。

吉云飞和黄继勋(2011)对光纤陀螺仪输出中的高频变化噪声应用小波分析手段进行去噪处理; 俞成森等(2013)运用分段平均选点法补偿了由于温度变化在光纤陀螺信号中产生的线性趋势项, 以及使用平滑滤波算法对外界扰动造成的数据跳变进行补偿; 靳晋军等(2016)针对数字闭环光纤陀螺仪探测器输出信号中包含的幅值较大的尖脉冲信号提出了一种基于集成模拟开关的时域选通尖脉冲抑制方法; 宋锐和陈熙源(2016)运用核主成分分析方法将光纤陀螺在振动影响下的有效信号和噪声进行分离; 张峰等(2016)同样针对在振动环境下光纤陀螺输出噪声较大的问题, 提出了一种自回归最小均方自适应滤波方法; 王惜康等(2019)针对光纤陀螺仪的噪声及环境高频振动对测量数据的影响采用积分平均的方式进行去噪等, 这些方法对光纤陀螺输出信号的去噪都具有一定的有效性。

MWMC 研究团队使用一款精度较高的三分量光纤旋转地震仪在福建泉州台记录了 28 天的天然地震旋转分量信号。仪器的性能参数如表 1 所示, 其测量精度可以达到 $2 \times 10^{-8} \text{ rad/s}/\sqrt{\text{Hz}}$, 测试结果表明此光纤旋转地震仪可用来对旋转地震进行观测(孙丽霞等, 2021)。仪器输出的旋转分量数据经过预处理后发现, 信号中存在大量频率成倍数关系增长且振幅随频率增大而逐渐衰减的谐波噪声, 严重干扰了有效地震事件的识别。为此, 本文主要介绍我们试验的几种谐波噪声压制方法。

表 1 三分量光纤旋转地震仪技术参数

Table 1 Performance parameters of three-component fiber optic rotational seismometer

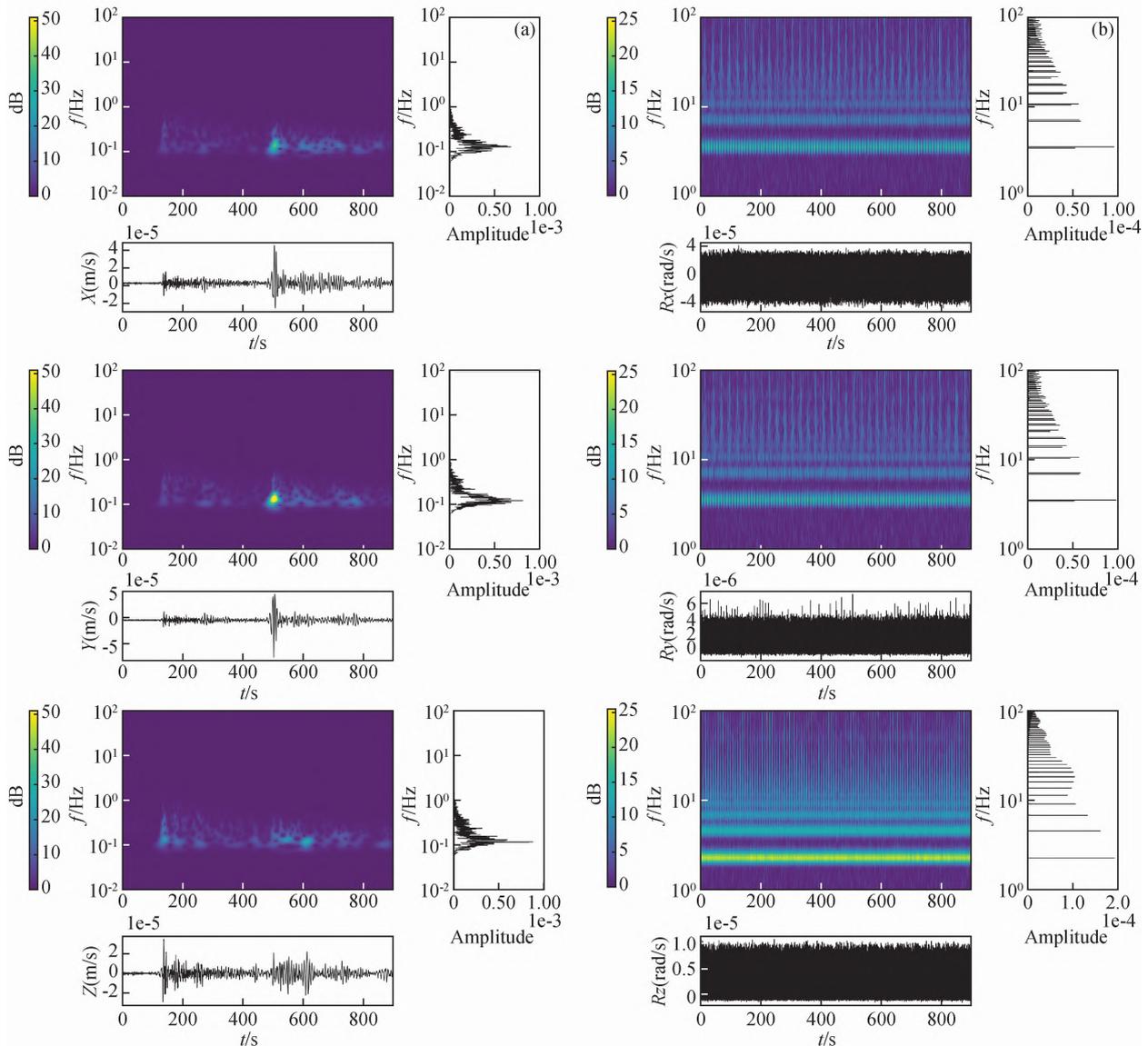
频率(频带范围)/Hz	DC 旋转精度	旋转率动态范围	工作温度/°C	数据输出频率	电源供给
0.01 ~ 100	< 3 $\mu\text{rad/s}$ ($\leq 0.6^\circ/\text{h}$)	100000 $\mu\text{rad/s}$ ($5^\circ/\text{s}$) 110 dB	- 10 ~ 50	200 Hz (5 ms)	9 ~ 28VDC

1 谐波特征分析

在泉州台站进行观测时, 在三分量旋转地震仪的周围还放置了平动地震仪。取平动地震仪记录到的一次地震事件对应的时间段为例说明平动与旋转信号的特征, 即 2019 年 5 月 6 日 21 时 19 分发生在 146.451°E , 6.973°S , 震源深度约 146 km, 震中距 4625 km 的一次 $M_w 7.1$ 地震。图 1a 为平动三分量信号, 显然平动地震记录信噪比高, 三分量波形清晰且时频谱能量集中, 分布于 0.1 ~ 1 Hz 频带范围; 其

中 Y 分量能量最强且有明显强能量团; X 分量也存在明显强能量团, 但比 Y 分量弱一些; Z 分量能量分散在整个地震事件时段, 无明显集中强能量团。图 1b 为同时间段旋转三分量信号原始波形及其时频谱和振幅谱, 显然, 旋转信号能量较弱, 且主要以 2 Hz 以上的周期性信号为主; 三个分量上周期信号存在差异, Z 分量与 XY 分量差异明显; 这些周期信号呈现谐波特征, 且全时段存在, 其中 Z 分量谐波能量明显强于 XY 分量。

从图 1b 旋转信号振幅谱中大致可以看出 R_x 分

图1 一次 M_w 7.1 地震事件平动和旋转记录

(a) 平动地震仪记录的平动三分量时域波形及时频谱; (b) 旋转地震仪记录的旋转三分量时域波形及时频谱。

Fig. 1 Translational and rotational records of a M_w 7.1 earthquake event

(a) Translational three-component seismic data and spectrum recorded by translational seismometer;

(b) Rotational three-component seismic data and spectrum recorded by rotational seismometer.

量有两组谐波,基频分别约为 3.46 Hz 和 3.56 Hz; R_y 分量有两组谐波,基频也为 3.46 Hz 和 3.56 Hz,但基频为 3.56 Hz 的谐波信号在 R_x 和 R_y 上的极性相反; R_z 分量谐波只有基频 2.3 Hz 的一组. 各组谐波后续 n 阶频率都与基频成近似整数倍关系,且振幅随频率增大整体成线性衰减趋势. 由放大后的时频谱(图 2)发现, R_z 分量基频以及较低频段各阶谐波的能量遍布观测期间,而较高频谐波能量存在一定的时间间隔出现,主要对应于时域上明显的强振

幅脉冲信号; R_x 和 R_y 分量各阶谐波能量时间上均不连续,具有明显的能量聚集区间. 各阶谐波与基频信号形成的综合信号在时域上呈现出周期性的脉冲波形,如旋转三分量时域图放大显示的图 3 所示,可以看出这些强振幅脉冲信号在时域上不是连续存在的,而是存在一定的时间间隔;不同日期,不同分量间隔不完全相同. 同理,谐波综合信号在时频谱中时间方向上也不连续.

对原始三分量旋转数据求 Allan 方差如图 4 所

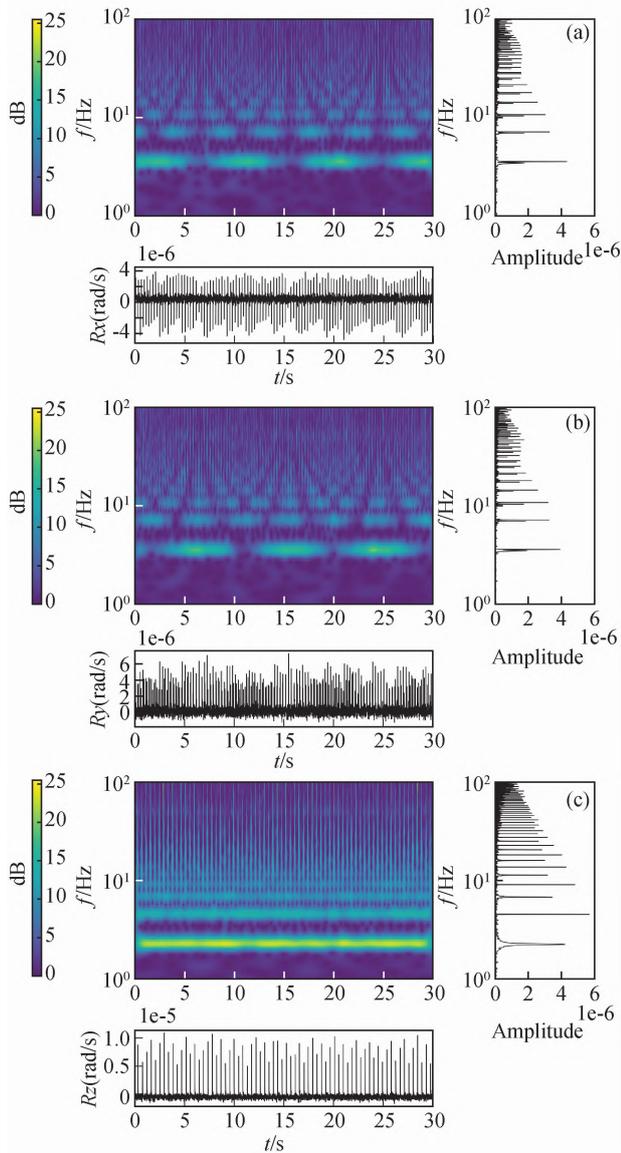


图2 旋转三分量30 s放大显示的时域波形及时频谱

Fig. 2 Rotational three-component seismic waveform records and spectrum of 30 s

示,可以看到得到的三个分量 Allan 方差结果并没有体现出仪器本底噪声 Allan 方差平滑的斜率近似为 -0.5 的白噪声 (Bernauer *et al.*, 2018),而是表现出频繁的波动起伏,推测是由于数据中的大量噪声干扰导致的。

基于平动数据使用差分法 (Sun *et al.*, 2018) 换算出的旋转分量信号以及实际记录旋转分量功率谱密度对比如图 5 所示.从图中可见,理论换算的旋转运动以低频能量为主,而实际观测的旋转分量在整个频带上均存在强的近似倍频的谐波信号.理论换算出的旋转信号低频端能量大致在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ rad/s

量级,领域已有研究结论认为实际旋转记录的能量强于理论换算值 (孙丽霞等, 2021; Belfi *et al.*, 2012),因此,该地震事件应该在仪器的观测范围内 (de Toldi *et al.*, 2017).因此,推测该地震事件有可能被谐波噪声淹没,应该进行谐波压制处理。

2 谐波压制方法

2.1 低通滤波

有效天然地震信号的频率集中在低频,而谐波噪声的基频及 n 阶频率大于有效信号的主频带,即谐波频带范围不与地震事件的有效频带重叠,因此可以采用简单的低通滤波方法将频率大于天然地震信号有效频带的谐波噪声滤掉。

由同址观测的平动地震信号可知,平动三分量的地震信号主频在 1 Hz 以下.有研究表明,地震信号旋转分量与平动分量的频率范围和主频具有相似性,旋转分量主频会稍高些 (Lyubushin *et al.*, 2015).使用差分法 (Sun *et al.*, 2018) 换算出的旋转分量信号频率比平动信号也高一些,主频大约在 0.5 ~ 2.5 Hz,而实际观测的旋转信号中谐波噪声的基频约为 2.5 ~ 3.5 Hz,因此,可将旋转信号进行 2.5 Hz 的简单低通滤波试验,将谐波噪声滤除.滤波后的效果如图 6 所示 (取平动地震仪记录到地震事件的一段时间窗),可以看出原始的强能量谐波信号都被有效滤掉,时域上表现为较平稳的背景噪声.将低频端的理论换算旋转分量与实际观测去谐波后的功率谱进行对比,如图 7 所示,滤波后的旋转记录功率谱远低于理论换算值,近 3 ~ 4 个量级差异,且在可能的频带内平稳变化,未显示出地震事件的局部频段能量优势,推测滤波后观测记录只剩下背景噪声,有效地震事件可能被滤除了.其他观测数据中对应平动信号上找到的所有地震事件,采用相同的低通滤波处理压制谐波噪声,同时间段旋转记录上未找到有效对应的旋转地震信号,因此有必要尝试其他的压制谐波噪声方法,而不是简单的低通滤波处理。

2.2 时频滤波

基于前述的时频特征,我们试验采用时频滤波方法同时在频域和时间域对信号进行限制,以有效凸显目标区间的地震事件能量团及时域波形.本文用到的时频滤波是基于 S 变换时频分析进行的.图 8a 是对原始 900 s 的旋转三分量数据 (平动地震记录对应时间段) 进行的 0.1 ~ 0.8 Hz, 300 ~ 800 s 时频滤波后的时域波形及时频谱,此频率截断区间

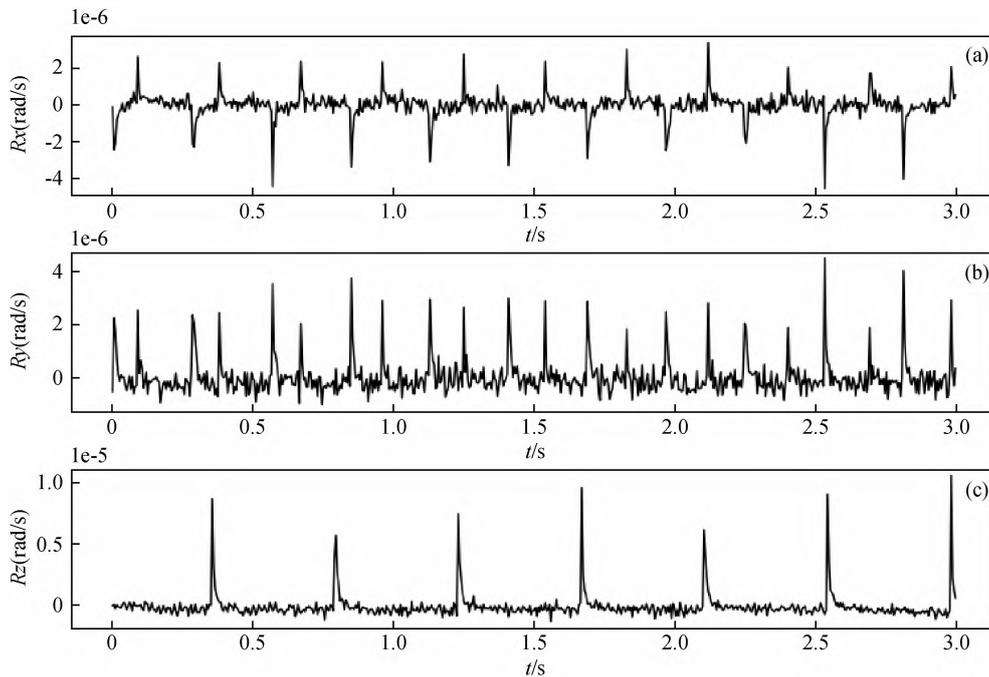


图3 三分量旋转3 s长时窗内时域信号波形

Fig. 3 Rotational three-component seismic waveform records of 3 s

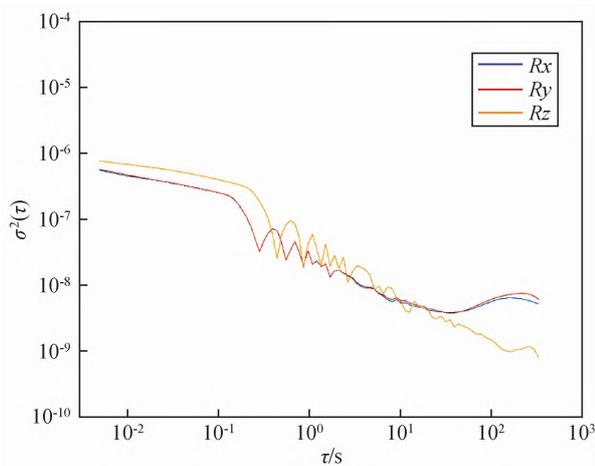


图4 实际记录旋转三分量数据的 Allan 方差

Fig. 4 Allan variance of rotational three-component records

为非谐波噪声频带范围,故在凸显目标信号的同时也有效去除了谐波噪声.图8b是与之对比的0.1~0.8 Hz带通滤波后的时域波形及时频谱.

对比图8a和图8b,时频滤波后只保留了指定的频率及时间区间内的信号值,滤波后信号能量明显低于带通滤波,时频谱中没有表现出类似有效地震事件信号的集中能量团.从图8c中可以看出时频滤波后的三分量信号时域幅值整体低于带通滤波,

故推测时频滤波后的信号并不是有效地震信号,而是背景噪声.

2.3 奇异值分解法(SVD)

从理论上分析,实际观测的旋转信号应该强于平动换算的旋转分量,且可能主频要高(孙丽霞等,2021; Lyubushin *et al.*, 2015),滤波后应该在对应时间段观察到有效的旋转信号;因此有必要怀疑低通及时频滤波滤除谐波的同时将有效信号也滤除掉了,故对旋转数据进行SVD法去谐波处理.

2.3.1 SVD去噪原理

分析本次数据中谐波噪声的特征发现它具有明显的周期性,且能量很强.假设旋转信号中谐波噪声的周期 T ,以谐波噪声周期的整数倍长度(NT)作为时窗长度将原始一维时间序列数据记录分割为拟时-空二维数据(即截取相同时窗长度的信号排列为拟空间不同物理点的观测记录),在新的二维数据中谐波噪声将具有很强的空间相关性.而由于随机噪声和地震事件在时间上不具有重复性,因而拟二维数据中随机噪声和地震事件在空间上是完全不相关的.对于此类型的二维数据,可以利用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)方法有效地将谐波噪声分离开来.

奇异值分解(SVD)是将二维数据矩阵分解为一

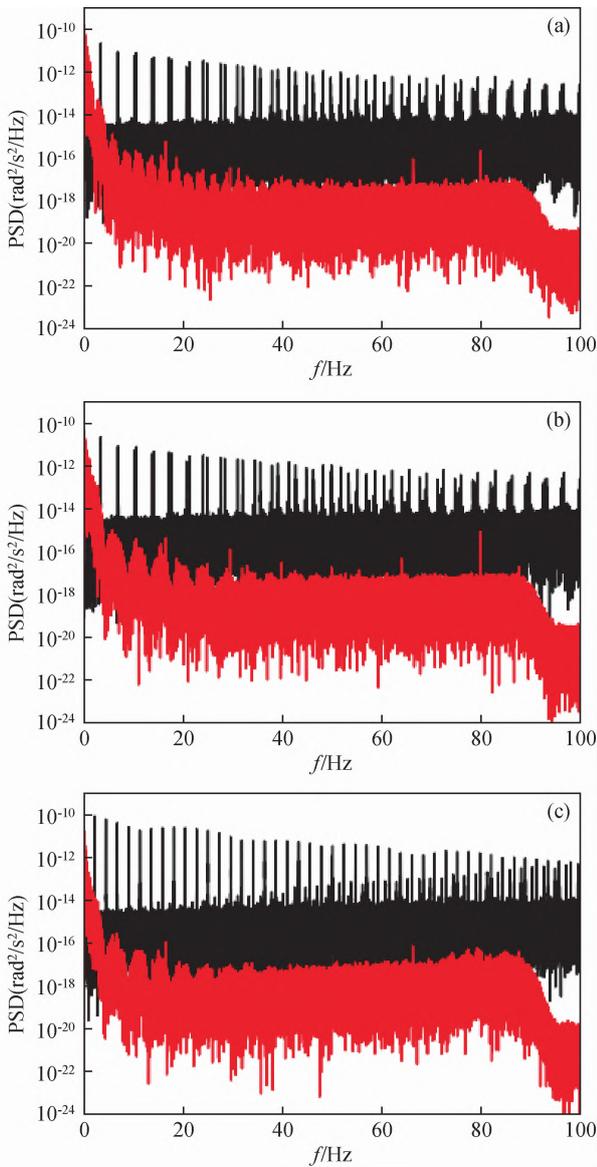


图5 由平动数据换算出的理论旋转三分量功率谱(红色)及旋转地震仪实际记录到的旋转三分量功率谱(黑色)
(a) Rx; (b) Ry; (c) Rz

Fig. 5 Theoretical rotational three-component power spectrum converted from translational data (red) and rotational three-component power spectrum actually recorded by rotational seismometer (black)
(a) Rx; (b) Ry; (c) Rz.

系列的本征图像,其中较大奇异值对应各道间相关性较强信号,较小奇异值对应随机干扰(詹毅和周熙襄,2004;胡永泉等,2019).在本次数据处理中,SVD分解后大奇异值对应的本征图像主要代表谐波噪声.设新排列的二维数据为 S ,对该二维数据做奇异值分解:

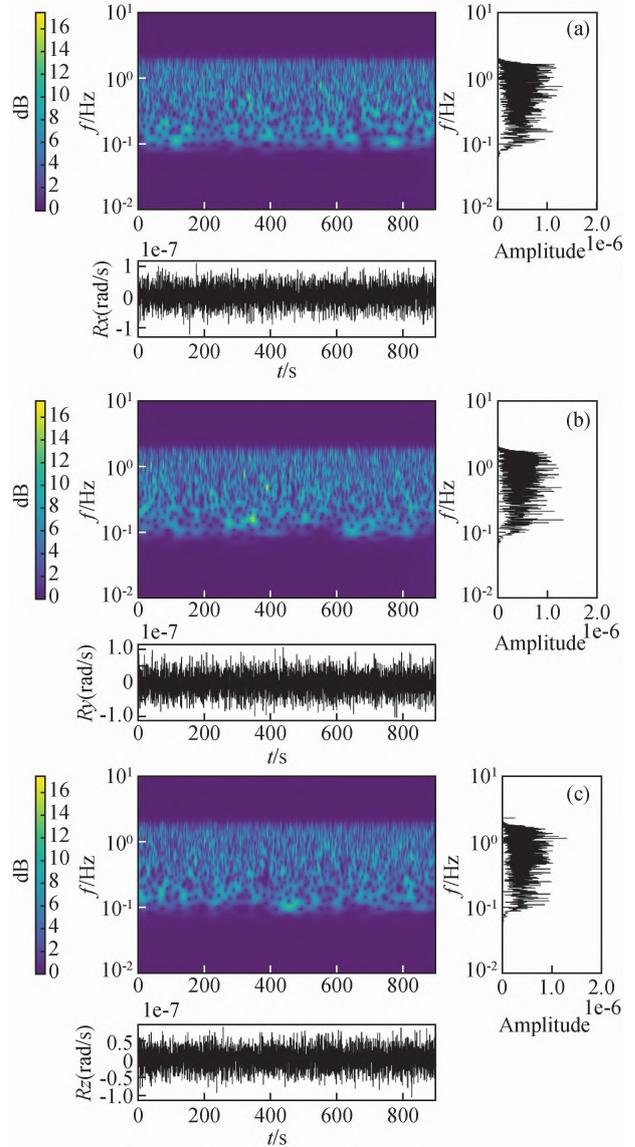


图6 滤波后旋转三分量时频谱
Fig. 6 Rotational three-component spectrum after low-pass filtering

$$S = \sum_{k=1}^R \mathbf{u}_k \lambda_k \mathbf{v}_k^T, \tag{1}$$

其中 \mathbf{u} 为左奇异向量, \mathbf{v} 为右奇异向量, λ 为奇异值, T 为向量转置算子, R 为数据矩阵的秩. 由于前面最大的 K 个奇异值对应谐波噪声,后面较小的奇异值对应的即是随机噪声和有效地震信号,即去除谐波噪声后的数据应为:

$$S' = S - \sum_{k=1}^K \mathbf{u}_k \lambda_k \mathbf{v}_k^T. \tag{2}$$

2.3.2 SVD方法去谐波效果

以 R_z 分量为例, R_z 分量谐波信号总体上只有

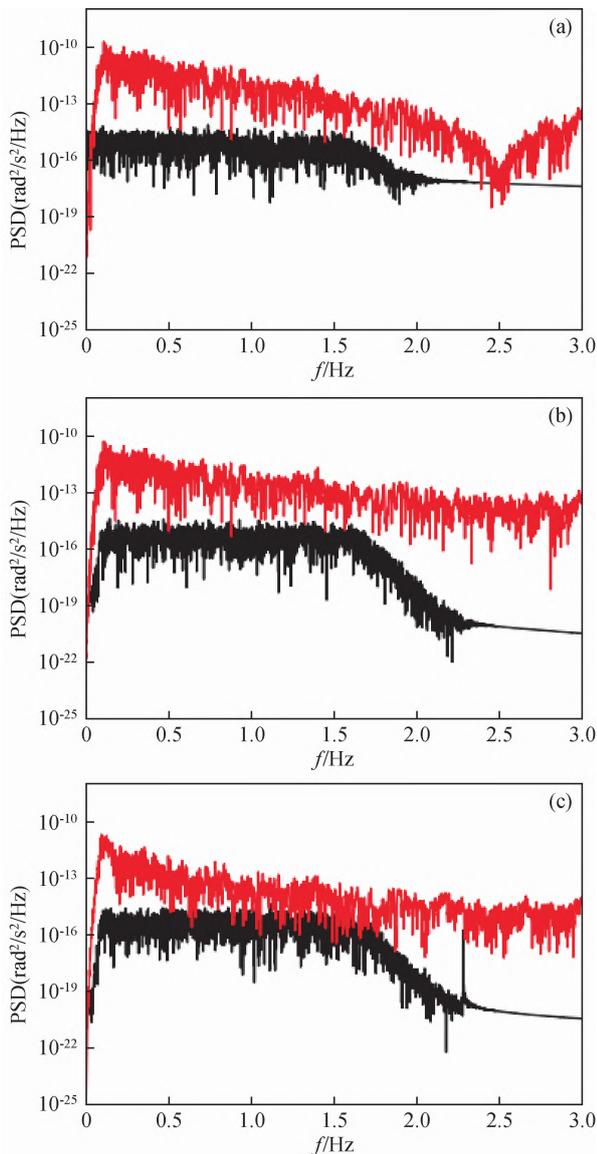


图7 理论换算旋转三分量功率谱低频放大(红色)及滤波后三分量功率谱(黑色)

(a) Rx; (b) Ry; (c) Rz.

Fig. 7 Theoretically converted rotational three-component power spectrum of low frequency (red) and three-component power spectrum after filtering (black)

(a) Rx; (b) Ry; (c) Rz.

一组,即只有一个基频;应用 SVD 法滤波时,截取谐波的周期作为时窗长度,将信号从一维转换为假二维,可以明显看出多道显示后的谐波信号具有一定的拟空间连续性(图9).

用 SVD 方法去除谐波后的效果(采样频率为 200 Hz)如图 10 所示. 压制谐波后时域整体表现为具有低能谱值的平稳背景信号. SVD 去谐波后的时频谱如图 11 所示;与图 1b 的 R_z 分量原始信号对比

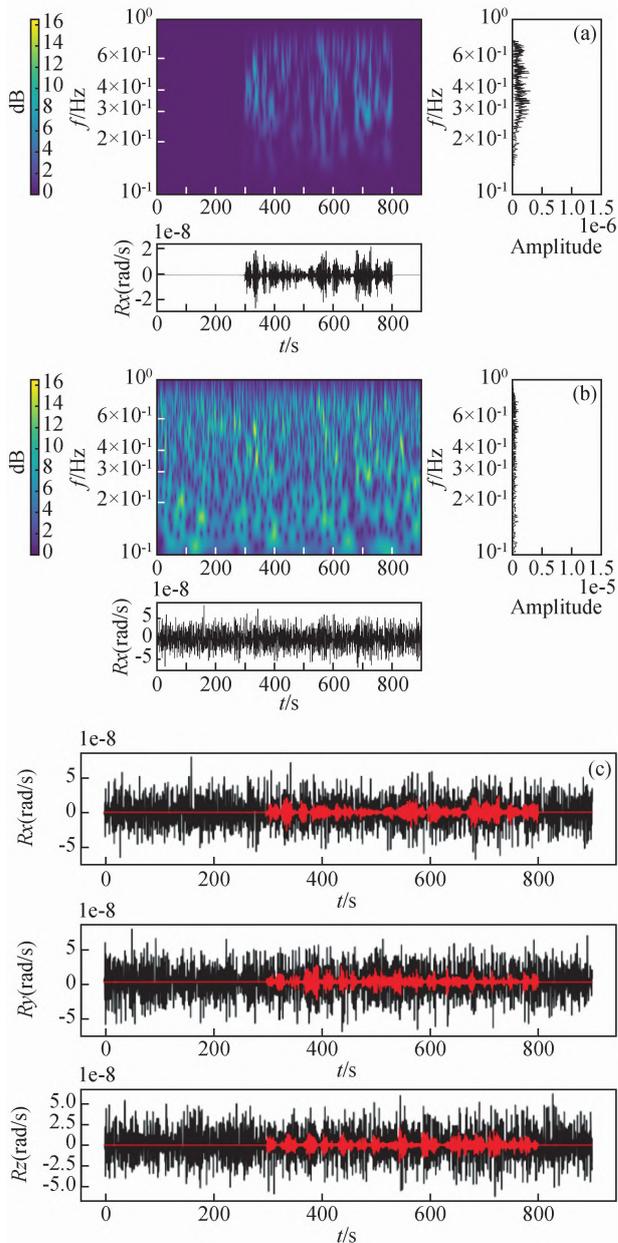


图8 时频滤波与带通滤波

(a) 0.1 ~ 0.8 Hz, 300 ~ 800 s 时频滤波; (b) 0.1 ~ 0.8 Hz 带通滤波; (c) 带通滤波(黑色)与时频滤波(红色)时域波形对比.

Fig. 8 Time-frequency filtering and band-pass filtering

(a) 0.1 ~ 0.8 Hz, 300 ~ 800 s time-frequency filtering; (b) 0.1 ~ 0.8 Hz band-pass filtering; (c) Comparison of band-pass filtering (black) and time-frequency filtering (red).

可见只剩余 50 Hz 的工频噪声,谐波噪声得到了很好的压制,且没有损失各频率上的其他信号.

去谐波前后的 R_z 分量 3 s 时域波形对比如图 12 所示,明显可见强振幅的脉冲信号被去除,保留了背景信号.

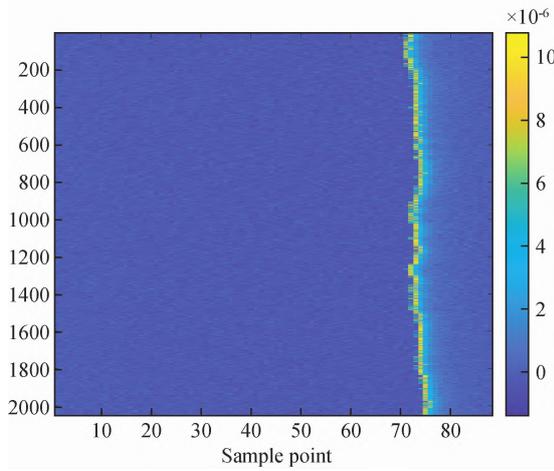


图9 一维信号转换为二维(纵轴为拟空间道编号)
Fig.9 One-dimensional signal converted into two-dimensional signal (the vertical axis is pseudo-spatial track number)

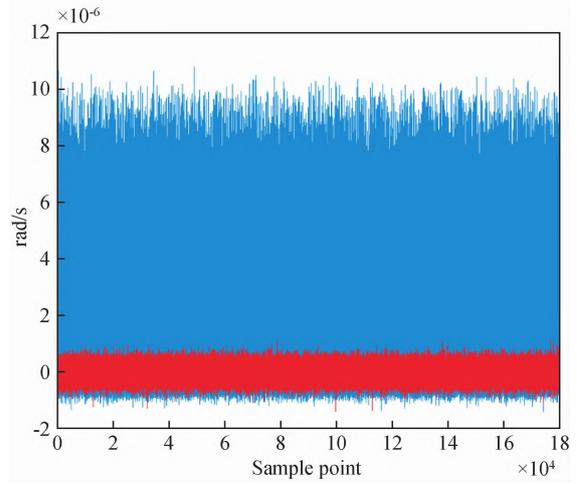


图10 R_z 分量 15 min 去谐波前(蓝色)后(红色)时域对比
Fig.10 Comparison of vertical component before (blue) and after (red) harmonic elimination for 15 min

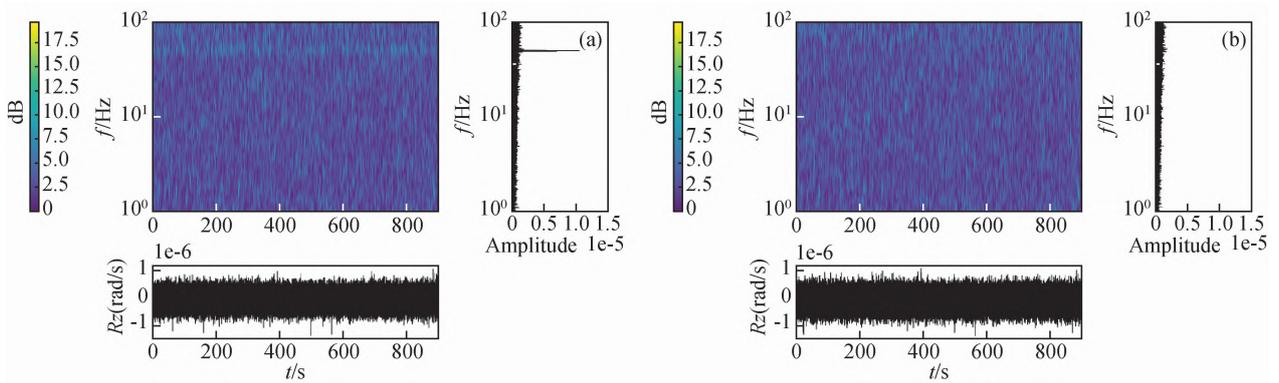


图11 去谐波后时域波形及时频谱(a)及去除 50 Hz 干扰后时域波形及时频谱(b)
Fig.11 Seismic waveform records and spectrum after harmonic elimination (a) and after filtering 50 Hz interference (b)

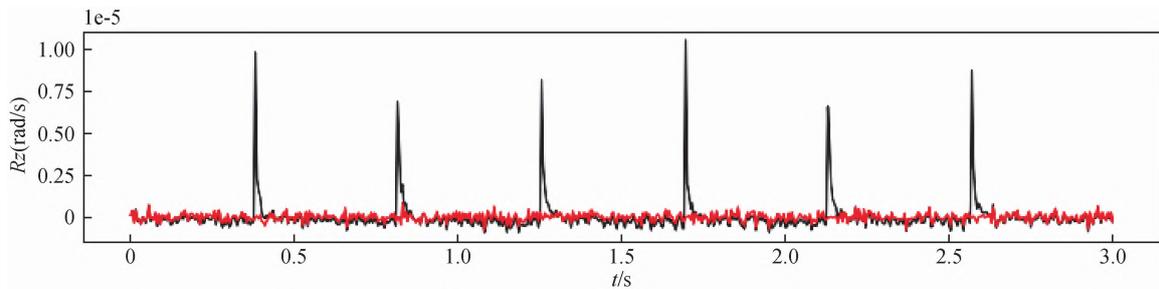


图12 去谐波前(黑色)后(红色) R_z 分量时域波形对比
Fig.12 Waveform of vertical component before(black) and after(red) harmonic elimination

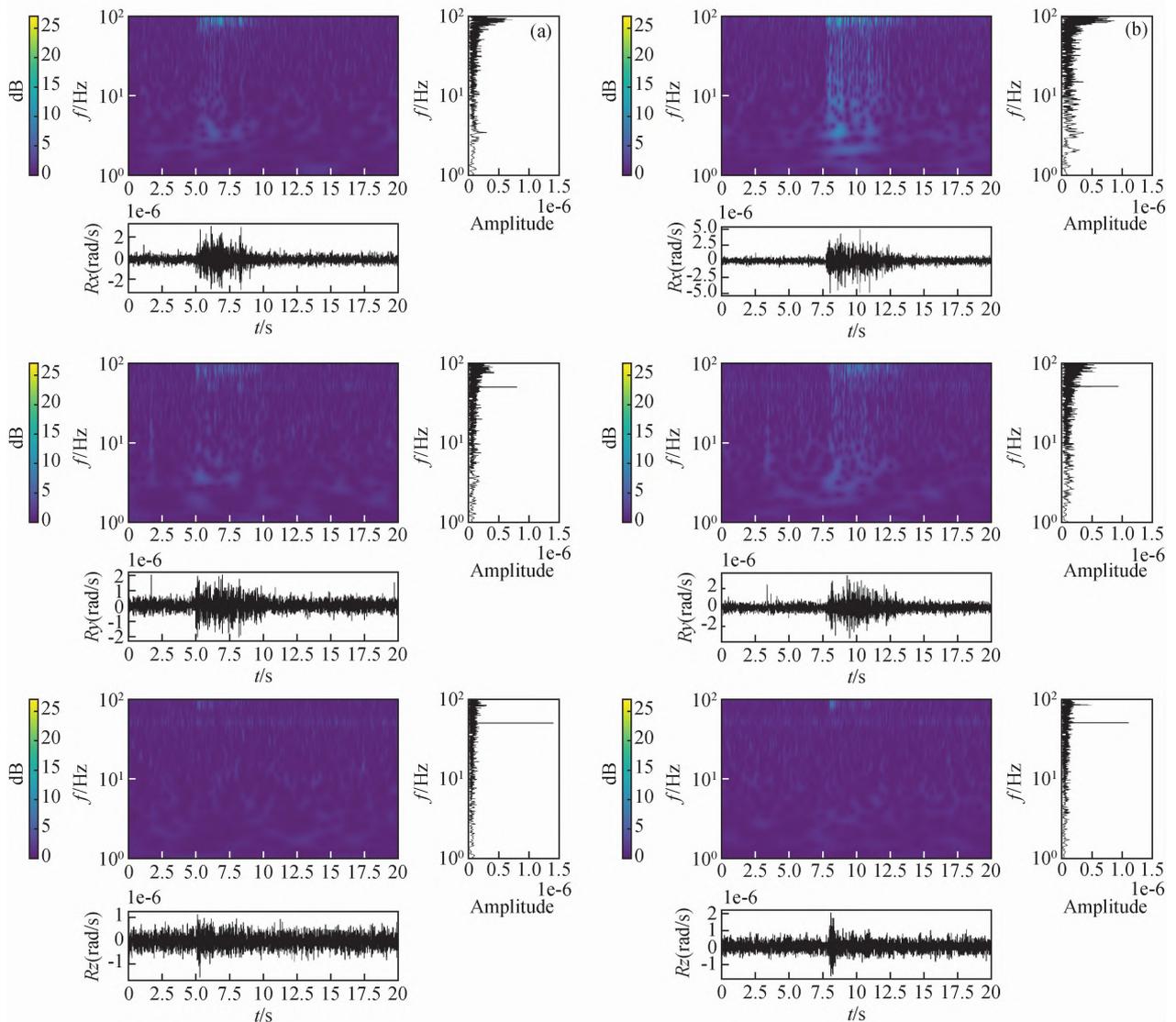


图 13 SVD 法去谐波后找到的两个高频信号三分量时域波形及时频谱

(a)5月2日2时45分时刻;(b)5月2日7时55分时刻。

Fig. 13 Three-component seismic waveform records and spectrum of two high-frequency signals found after SVD

(a)2:45 on May 2 nd;(b)7:55 on May 2 nd.

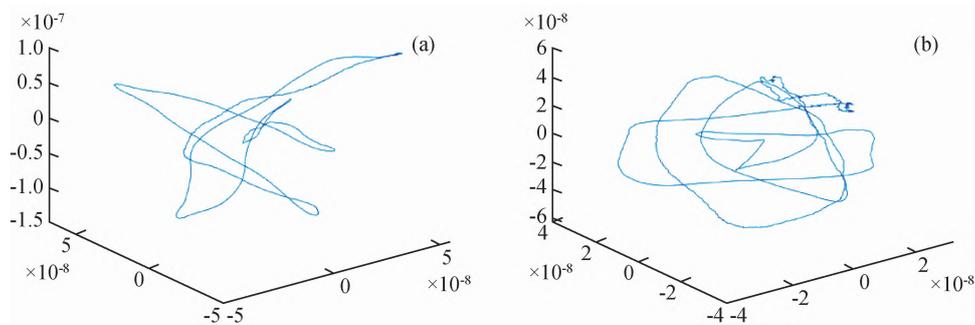


图 14 两个高频信号的平动三分量偏振图

(a)2时45分时刻;(b)7时55分时刻。

Fig. 14 Translational three-component polarization diagram of two high-frequency signals

(a)2:45;(b)7:55.

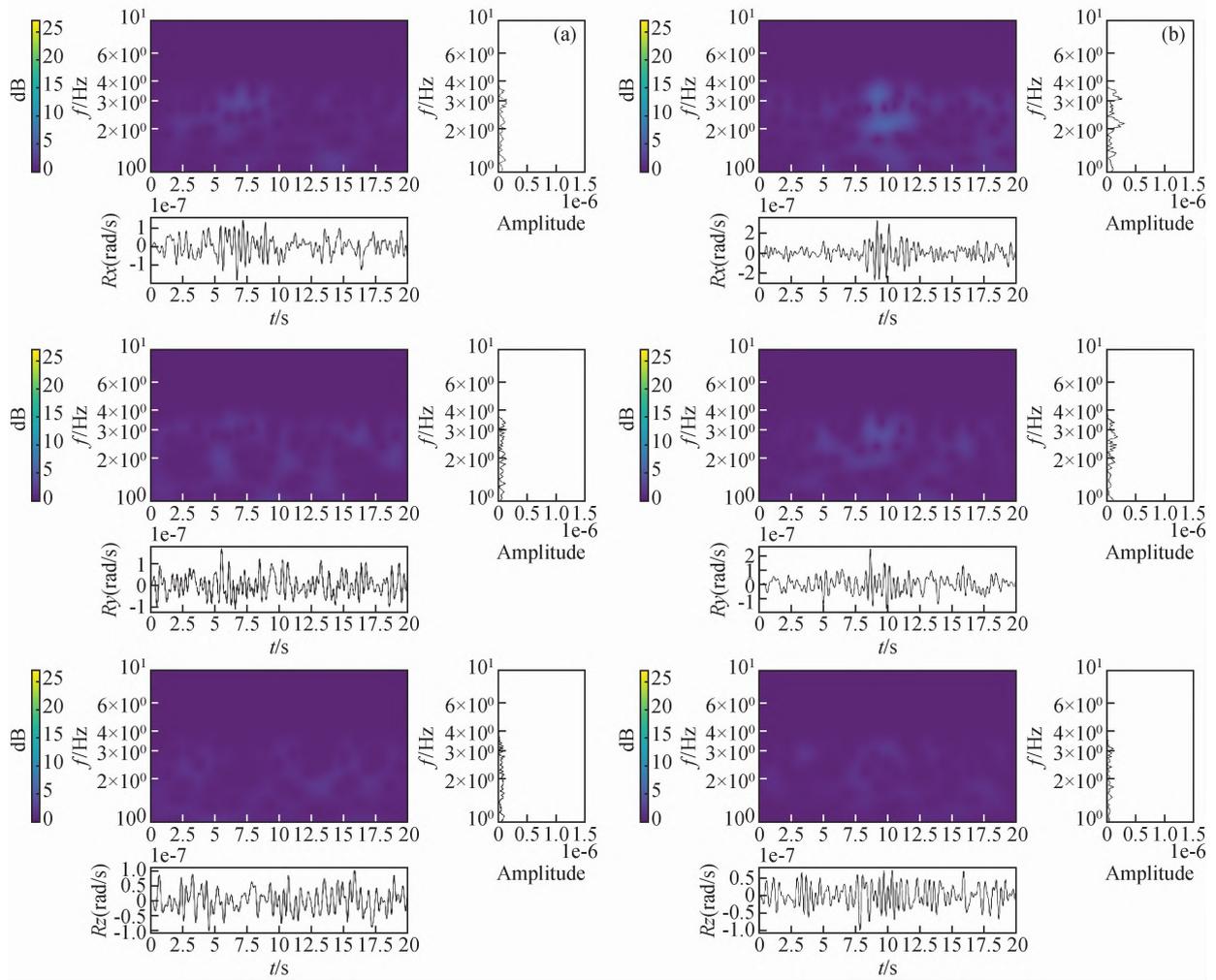


图 15 两个高频信号 5 Hz 低通滤波后的三分量时域波形及时频谱
(a)2 时 45 分时刻;(b)7 时 55 分时刻。

Fig. 15 Three-component seismic waveform records and spectrum of two high-frequency signals after 5 Hz low-pass filtering
(a)2:45;(b)7:55.

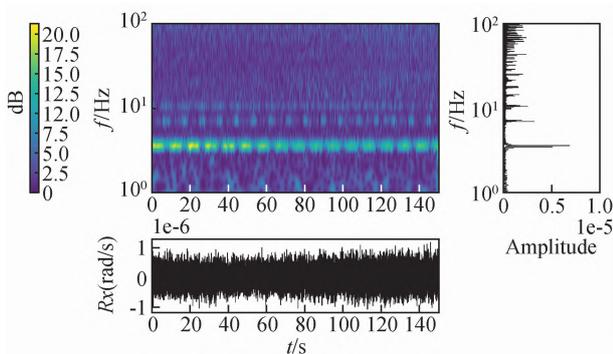


图 16 单频噪声压制方法的效果

Fig. 16 Result of mono-frequency interference elimination

用 SVD 方法去除谐波噪声后,观察平动信号上找到的所有地震事件对应的同时间段旋转信号记录,也未找到有效的旋转地震信号.但是在去除谐波

后,在旋转记录中找到了两个高频信号,如图 13 所示.这两个信号的能量主要集中在高频部分,且主要分布在 XY 分量上,大致分布在 2 ~ 100 Hz 之间,其中低频段能量可能与天然地震信号有关,而高频信号则可能是近源的某干扰导致.

两个时刻信号能量集中的时间段(10 s)对应的平动数据偏振如图 14 所示,其中,7 时 55 分时刻可以近似看出椭圆偏振的面波(XZ 平面的 Rayleigh 波以及 XY 平面的 Love 波),两个时刻的偏振图都无法识别出纯粹的一种面波或体波,时频图上也没有体现出明显的面波频散现象,且能量都集中在 80 Hz 以上的高频,故这两个信号应该是某一近源干扰产生的不同类型波混叠的结果.除高频外,从时频图中还可以发现低频处也有一定的能量集中,故在 SVD 去谐波的基础上进一步对这两个信号进行 5 Hz 的

低通滤波,单独观察低频信号,滤波后的三分量时域波形及时频谱如图 15 所示,时域上的强振幅信号都被滤除,时频谱上也没有明显的能量集中,故滤波后应为背景噪声,不是地震信号(地震目录上这两个时刻附近也无地震事件发生)。

2.4 单频滤波法

Yuan 等(2021)给出了一种单频噪声压制方法。该方法使用一种频谱生成方法来突出较高频率的正弦干扰,并通过基于振幅谱的频率搜索技术来寻找近似正弦干扰频率,继而使用快速迭代频率估计算法来精确估计正弦干扰的频率,最后使用该频率建立的正弦噪声模型自适应地从原始数据中减去估算的单频干扰,从而实现单频噪声压制。使用此方法去噪后的效果如图 16 所示,显然效果不如 SVD 方法,时域及时频谱上还能明显看出能量很强的谐波信号存在。其原因可能是此谐波噪声的各阶谐波并非一个单频的干扰,而是在各阶谐波频率附近很小的一个扰动范围内存在多个频率值,都具有一定的高幅值,在频率搜索过程中可能会漏掉某一高幅值的频率,导致去噪结果不理想。若在此去噪基础上继续运用此方法流程多循环几次可能会有更好的效果,但这样会增加一定的工作量。说明这种谐波噪声不严格符合单频滤波方法的使用条件,所以导致效果不显著。

3 讨论

泉州三分量旋转观测数据经过预处理后发现存在大量幅值很大、呈倍频关系、能量随频率逐渐降低的谐波信号。Izgi 等(2021)的一篇关于 blueSeis-3A 测试文章中曾观测到谐波噪声,但并非全时段存在,推测是由环境中除湿器系统的电气耦合引起的。而本文的谐波信号在观测期间全时段存在,故推测可能为仪器本底噪声导致或是某种长期存在的环境干扰。

对这些谐波信号进行低通滤波以及 SVD 去噪方法处理后,信号整体呈现为趋于平稳的背景噪声,两种方法处理后均未能识别出对应平动记录的有效地震事件。使用的旋转地震仪虽然具有较高的灵敏度,但可能是由于天然地震产生的旋转能量较弱,远震产生的面波旋转信号只能被 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ rad/s 精度的仪器检测到(Schreiber and Wells, 2013),对于震级较小的区域地震,灵敏度也需要 10 nrad/s 的地震仪才能检测到(Zembaty *et al.*, 2021)。

由于光纤旋转地震仪灵敏度较高,易受到干扰,

背景噪声压制十分重要。SVD 方法虽然可以较好的压制谐波噪声,但由于不同时间段与不同分量的谐波噪声特征(如基频与倍频)会有一定波动,故需要频繁调整参数才能使去噪效果达到最好。针对上述问题,需要进一步分析谐波干扰的时频特征;其次应进行长期观测,建立足够的谐波噪声样本库,尝试利用机器学习方法实现谐波压制。

4 结论

基于光纤陀螺的三分量旋转地震仪在泉州台记录的旋转三分量天然地震数据中存在大量能量很强且频率成一定规律的谐波噪声。为了去除这些谐波噪声分别使用了低通滤波、时频滤波、奇异值分解法和单频滤波四种方法进行压制谐波试验。其中,SVD 方法能有效的去除谐波噪声并保留背景信号,其效果最好;几种方法处理后均未能识别出对应平动记录的有效地震事件;在去除谐波后的旋转记录中可以识别一些高频信号,经分析不是地震信号。从而可以说明六分量地震的高精度观测以及去噪问题依然是旋转地震学研究的重点攻关方向。

致谢 感谢泉州台观测期间福建地震局的大力协助,感谢恒达新创(北京)地球物理技术有限公司提供的观测试验仪器。

References

- Belfi J, Beverini N, Carelli G, *et al.* 2012. Horizontal rotation signals detected by "G-Pisa" ring laser for the $M_w = 9.0$, March 2011, Japan earthquake. *Journal of Seismology*, 16(4): 767-776, doi: 10.1007/s10950-012-9276-9.
- Bernauer F, Wassermann J, Guattari F, *et al.* 2018. BlueSeis3A: Full characterization of a 3C broadband rotational seismometer. *Seismological Research Letters*, 89(2A): 620-629, doi: 10.1785/0220170143.
- de Toldi E, Lefèvre H, Guattari F, *et al.* 2017. First steps for a giant FOG: Searching for the limits. //2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS). Karlsruhe, Germany: IEEE, 1-14, doi: 10.1109/InertialSensors.2017.8171491.
- Hu Y Q, Huang J B, Tian Z H, *et al.* 2019. Ground microseismic data denoising based on single-channel singular value decomposition and amplitude ratio. *Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese)*, 58(1): 43-52, 62, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2019.01.006.
- Izgi G, Eibl E P S, Donner S, *et al.* 2021. Performance test of the rotational sensor blueseis-3A in a huddle test in Fürstfeldbruck. *Sensors*, 21(9): 3170, doi: 10.3390/s21093170.
- Jaroszewicz L R, Kurzych A, Krajewski Z, *et al.* 2016. FOSREM: fibre-optic system for rotational events and phenomena monitoring: construction, investigation and area of application. //Zembaty Z, De Stefano M eds. *Seismic Behaviour and Design of Irregular and Complex Civil Structures II*. Switzerland: Springer, 49-64, doi:

- 10.1007/978-3-319-14246-3_5.
- Ji Y F, Huang J X. 2011. Research on the prior filter technology of the FOG and its application. *Navigation and Control (in Chinese)*, 10(2): 34-38, doi: 10.3969/j.issn.1674-5558.2011.02.00.
- Jin J J, Wang X F, Yu H C, *et al.* 2016. Error analysis and reduction of bias drift of digital closed-loop fiber optic gyro resulted from spike pluses. *Navigation and Control (in Chinese)*, (1): 47-53, doi: 10.3969/j.issn.1674-5558.2016.01.009.
- Kurzych A, Jaroszewicz L R, Krajewski Z, *et al.* 2018. Fibre-optic Sagnac interferometer in a FOG minimum configuration as instrumental challenge for rotational seismology. *Journal of Lightwave Technology*, 36(4): 879-884, doi: 10.1109/JLT.2017.2769136.
- Lyubushin A A, Kaláb Z, Lednická M, *et al.* 2015. Coherence spectra of rotational and translational components of mining induced seismic events. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 50(4): 391-402, doi: 10.1007/s40328-015-0099-3.
- Schmelzbach C, Donner S, Igel H, *et al.* 2018. Advances in 6C seismology: applications of combined translational and rotational motion measurements in global and exploration seismology. *Geophysics*, 83(3): WC53-WC69, doi: 10.1190/geo2017-0492.1.
- Schreiber K U, Velikoseltsev A, Carr A J, *et al.* 2009. The application of fiber optic gyroscopes for the measurement of rotations in structural engineering. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2B): 1207-1214, doi: 10.1785/0120080086.
- Schreiber K U, Wells J P R. 2013. Invited review article: Large ring lasers for rotation sensing. *Review of Scientific Instruments*, 84(4): 041101, doi: 10.1063/1.4798216.
- Song Y, Chen X Y. 2016. Vibration noise processing method for digital closed-loop fiber optic gyroscope. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition) (in Chinese)*, 46(3): 489-493, doi: 10.3969/j.issn.1001-505.2016.03.006.
- Sun L X, Wang Y, Yang J, *et al.* 2021. Progress in rotational seismology. *Earth Science (in Chinese)*, 46(4): 1518-1536, doi: 10.3799/dqkx.2020.113.
- Sun L X, Zhang Z, Wang Y. 2018. Six-component elastic-wave simulation and analysis. //EGU General Assembly Conference Abstracts. EGU.
- Wang X K, Gao Y P, Sun Z M. 2019. Noise analysis of the large-scale fiber optic gyroscope for measuring the UT1. *Acta Astronomica Sinica (in Chinese)*, 60(6): 48-1-48-9, doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2019.06.002.
- Wang X K, Gao Y P, Wang P L, *et al.* 2016. Measurement and assessment of working environment for fiber optic gyroscope. *Journal of Time and Frequency (in Chinese)*, 39(1): 54-60, doi: 10.13875/j.issn.1674-0637.2016-01-0054-07.
- Wang Z N, Yang Y, Lu P, *et al.* 2014. Optically compensated polarization reciprocity in interferometric fiber-optic gyroscopes. *Optics Express*, 22(5): 4908-4919, doi: 10.1364/OE.22.004908.
- Yang Y H, Wang Z, Yi X S, *et al.* 2005. High precision fiber optic gyroscope based on Er-doped superfluorescent fiber source. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (in Chinese)*, 31(11): 1159-1162.
- Yu C S, Zhu H J, Ye L. 2013. Signal compensation based on fiber optic gyroscope. *Computer Systems & Applications (in Chinese)*, 22(2): 165-168.
- Yuan Y J, Zhou S C, Wang Y, *et al.* 2021. Effective frequency estimation method for sinusoidal interference in seismic data. *Geophysics*, 86(4): V269-V284, doi: 10.1190/geo2020-0072.1.
- Zembaty Z, Bernauer F, Igel H, *et al.* 2021. Rotation rate sensors and their applications. *Sensors*, 21(16): 5344, doi: 10.3390/s21165344.
- Zhan Y, Zhou X X. 2004. Analysis of wavelet package and prestack noise-suppressed method in singular value decomposition (SVD). *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 39(4): 394-397, doi: 10.3321/j.issn:1000-7210.2004.04.006.
- Zhang F, Huang J X, Wang S B. 2016. Study on self-regress and least mean square filter of fiber optic gyroscope based on vibration stress. *Navigation and Control (in Chinese)*, 15(5): 72-78, doi: 10.3969/j.issn.1674-5558.2016.05.011.

附中文参考文献

- 胡永泉, 黄建波, 田志华, 等. 2019. 基于单道 SVD 和振幅比的地面微地震资料去噪方法. *石油物探*, 58(1): 43-52, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2019.01.006.
- 吉云飞, 黄继勋. 2011. 光纤陀螺仪预滤波技术研究及应用. *导航与控制*, 10(2): 34-38, doi: 10.3969/j.issn.1674-5558.2011.02.00.
- 靳晋军, 王学锋, 于海成, 等. 2016. 光纤陀螺仪中尖峰脉冲引起漂移的误差分析及其抑制. *导航与控制*, (1): 47-53, doi: 10.3969/j.issn.1674-5558.2016.01.009.
- 宋锐, 陈熙源. 2016. 数字闭环光纤陀螺振动噪声处理方法. *东南大学学报: 自然科学版*, 46(3): 489-493, doi: 10.3969/j.issn.1001-505.2016.03.006.
- 孙丽霞, 王赞, 杨军, 等. 2021. 旋转地震学的研究进展. *地球科学*, 46(4): 1518-1536, doi: 10.3799/dqkx.2020.113.
- 王惜康, 高玉平, 孙中苗. 2019. 用于测量世界时的大型光纤陀螺仪的噪声分析. *天文学报*, 60(6): 48-1-48-9, doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2019.06.002.
- 王惜康, 高玉平, 王平利, 等. 2016. 光纤陀螺仪工作环境的测量与评估. *时间频率学报*, 39(1): 54-60, doi: 10.13875/j.issn.1674-0637.2016-01-0054-07.
- 杨远洪, 王峥, 伊小素, 等. 2005. 基于掺钕超荧光光纤光源的高精度光纤陀螺. *北京航空航天大学学报*, 31(11): 1159-1162.
- 俞成森, 祝华军, 叶林. 2013. 基于光纤陀螺仪的信号补偿. *计算机系统应用*, 22(2): 165-168.
- 詹毅, 周熙襄. 2004. 小波包分析与奇异值分解(SVD)叠前去噪方法. *石油地球物理勘探*, 39(4): 394-397, doi: 10.3321/j.issn:1000-7210.2004.04.006.
- 张峰, 黄继勋, 王颂邦. 2016. 基于自回归与最小均方理论的振动环境下光纤陀螺仪滤波方法. *导航与控制*, 15(5): 72-78, doi: 10.3969/j.issn.1674-5558.2016.05.011.