

高铁地震4D地频图及其可用性研究

蒋一然^{1,2} 梁萱^{2,3} 宁杰远^{1,2,†} 鲍铁钊^{1,2} 张献兵¹

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 高铁地震学联合研究组, 北京 100029; 3. 长江大学地球物理与石油资源学院, 武汉 430100; † 通信作者, E-mail: njy@pku.edu.cn

摘要 基于北京大学在河北保定地区高铁线路附近布设的台阵数据, 在考虑车型变化的情况下, 采用基频对齐的方法, 将同一台站上相同类型列车激发的高铁地震信号三分量的频谱分别叠加起来, 可在更远的台站上获得更高信噪比的频谱。使用聚类算法, 得到不同车型对应的三分量频谱随台站位置的变化规律。基于高铁地震频谱特征及其变化规律, 提出4D地频图的概念, 并讨论其监测高铁及周边介质的可用性。

关键词 高铁地震信号; 4D地频图; 聚类

4D Ground Frequency Map: Concept and Application

JIANG Yiran^{1,2}, LIANG Xuan^{2,3}, NING Jieyuan^{1,2,†}, BAO Tiezhao^{1,2}, ZHANG Xianbing¹

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. The Joint Research Group of High-Speed Rail Seismology, Beijing 100029; 3. College of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University, Wuhan 430100;
† Corresponding author, E-mail: njy@pku.edu.cn

Abstract Based on the data from the array deployed by Peking University around high-speed rail in Baoding City, Hebei Province, China, in order to obtain spectra with higher signal to noise ratio at farther stations, the paper considers the variation of train type and stacks the spectra of three components of high-speed rail seismic signal produced by the same type trains on the same station. Using the clustering algorithm, the regular pattern of how the three component spectra vary with the train type and station position is obtained. Based on the characteristics of high-speed rail seismic spectra and their variation, we propose the concept of 4D ground-frequency map, and discuss its practicability in monitoring the status of high-speed rail and its surrounding media.

Key words high-speed rail seismic signal; 4D ground-frequency map; clustering algorithm

我国高铁事业迅猛发展, 每天有大量的动车组运行在高铁轨道上。高速运行的动车组与铁轨挤压和碰撞, 产生显著的振动并激发地震波。已有研究讨论将高铁振动作为稳定主动源探测地球内部结构的可能性^[1]。翟培合等^[2]基于列车震源, 提取面波信号, 研究高铁震源对地下结构进行反演的可行性。Quiros等^[3]认为高铁微震产生的地震波传播距离大概为1 km, 可以利用高铁产生的振动进行大面积浅层勘探。通过分析高铁激发地震波的频谱特征, 徐善辉等^[4]提出高铁轨道的结构可能是引起铁轨上不同位置振动波形差异较大的原因, 可以用于长期监测高铁的运行情况。

动车组激发高铁地震波的波形复杂, 研究时域波形有困难, 将波形转换到频率域, 则可能避免这种困难。在传统的高铁安全监测中, 有研究利用车载数据, 寻找不同部件的频谱响应与列车运行状态的关系^[5-6]。最近, 刘磊等^[7]、王晓凯等^[8]和张固澜等^[9]注意到高铁地震频谱存在稳定的等间距分立峰模式, 并尝试在频率域研究这种分立模式对应的物理机制和其中蕴含的高铁和介质信息。刘磊等^[7]发现, 高铁地震频谱中的等间距分立峰的基频取决于车速和车长; 将不同高铁记录的频谱按基频对齐, 可以消除速度和车长对频谱的影响; 对齐后频谱基频和其倍频上的幅值体现频谱的主要特征, 对其进

国家自然科学基金(41874071)资助

收稿日期: 2019-07-29; 修回日期: 2019-08-13

行统计和聚类分析,结果表明高铁地震信号的频谱特征主要受传播路径和其介质属性影响。蒋一然等^[10]基于刘磊等^[7]的方法,发展出一种更精确的基频估计方法,验证基频与速度和车长的关系,利用高铁下方的台站采集到数据的频谱,使用聚类算法,进一步揭示频谱特征随车型、铁轨和路基变化的规律。

2018年,北京大学在河北省保定市的高铁线路附近布设大规模临时台阵,为研究高铁地震频谱特征的随空间的变化规律提供数据支持。利用刘磊等^[7]和蒋一然等^[10]提出的将不同车速的高铁对应记录的频谱对齐并叠加的方法,可以有效地减少背景噪声对频谱的影响,突出频谱特征在空间上的稳定特征,并将其基频和倍频上的幅值作为主要特征加以研究。

高铁记录有3个分量,对应于3个频谱。不同事件经过的相同类型的列车的频谱对齐后叠加在一起,可以有效地压制噪音,得到信噪比更高的三分量频谱。考虑叠加频谱随列车经过时间的变化,可以得到4个维度的频谱。由于台站在地表分布,4维频谱也随其在地表的分布而变化,我们将这种随地理位置变化的包括波形数据的三分量和时间维度在内的4维频谱称为4D地频图。由于本期台站的观测时间不长,难以研究4D地频图在时间维度上的变化,因此本文主要研究地频图在另外3个维度上的特征,并初步讨论4D地频图的可用性。

1 数据的选取与处理

选取北京大学在保定地区高铁沿线附近布设的180个台站,其分布如图1(a)所示。按照台站距高铁

的绝对距离(按由近及远)进行编号,编号和对应距离如图1(b)所示。使用蒋一然等^[10]的方法,根据高铁正下方11个台站的数据,我们共挑选出11天记录中401个高铁地震事件,并利用其到时截取选取的180个台站上共72180个高铁地震记录。根据蒋一然等^[10]的研究,南北向的车由于运行轨道的差异,激发的波场也存在差异,为了简化问题,本文使用的所有车事件都是由北向南的高铁产生的,事件截取也参考蒋一然等^[10]的方法。我们将高铁记录的两个水平分量旋转至垂直(R)和平行(T)于高铁的两个方向,此时的三分量分别用 R 、 T 、 Z 表示,以使得三分量与高铁线路的关系更加清晰。

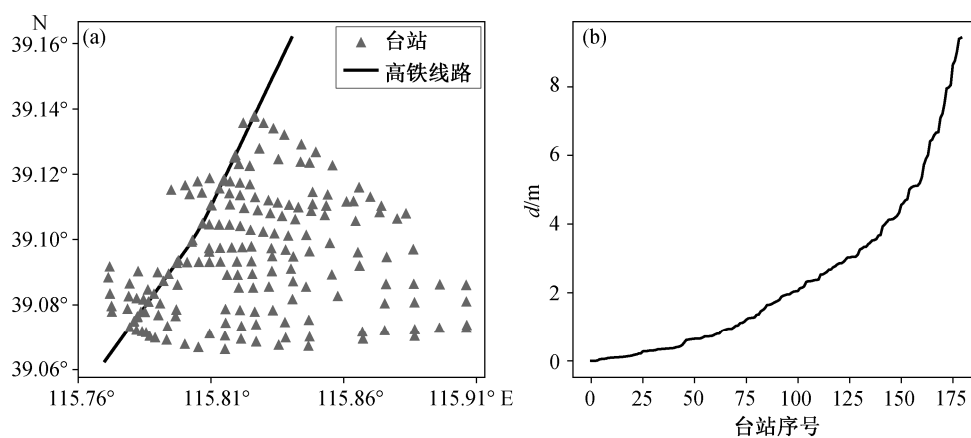
2 频谱的对齐与叠加

图2是一个高铁地震事件的三分量波形(图2(a))和其对应的振幅谱(图2(b))。高铁地震波形具有明显的周期性,其频谱主要由等间距分立的峰构成,频谱的基频 f_0 为

$$f_0 = v/L, \quad (1)$$

其中, v 为列车行驶速度, L 为单节车厢的长度。

在台阵所观测的京广高铁线路上,绝大部分动车组的车型单节车厢的长度为25 m,列车行驶速度的差异会造成基频的差异。我们根据蒋一然等^[10]的方法计算不同高铁信号的基频。首先,等间距出现的分立峰可以用傅里叶变化加以分析,即将高铁信号的振幅谱视为“时域”的信号,对其进行傅里叶变换,确定结果中除零频外的最大峰,计算峰对应位置倒数为对基频的估计值 f_0' ;然后,在 $[f_0'-0.2, f_0'+0.2]$ 范围内求解使下式值最大的频率 f ,作为基



(a) 台站分布; (b) 台站与高铁距离, 台站按由近及远顺序编号, d 为台站距高铁的距离

图1 台站与高铁的位置关系

Fig. 1 Position relations between stations and high-speed rail

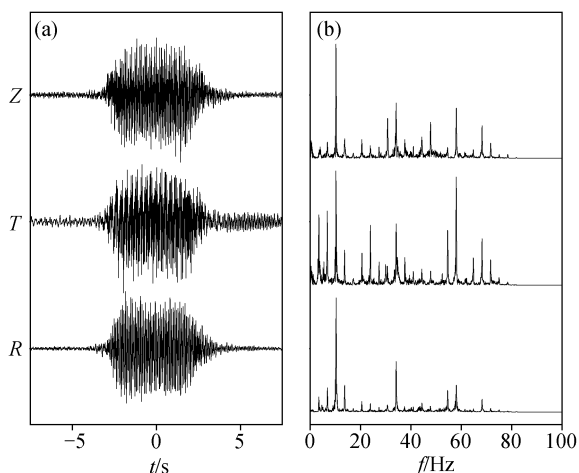


图 2 高铁地震三分量波形(a)及其振幅谱(b)

Fig. 2 Three components waveforms (a) and their spectra (b) of a high-speed rail seismic event

频 f_0 ,

$$\sum_{k=0}^{k \cdot f \leq f_{\max}} |F(f \cdot k)|, \quad (2)$$

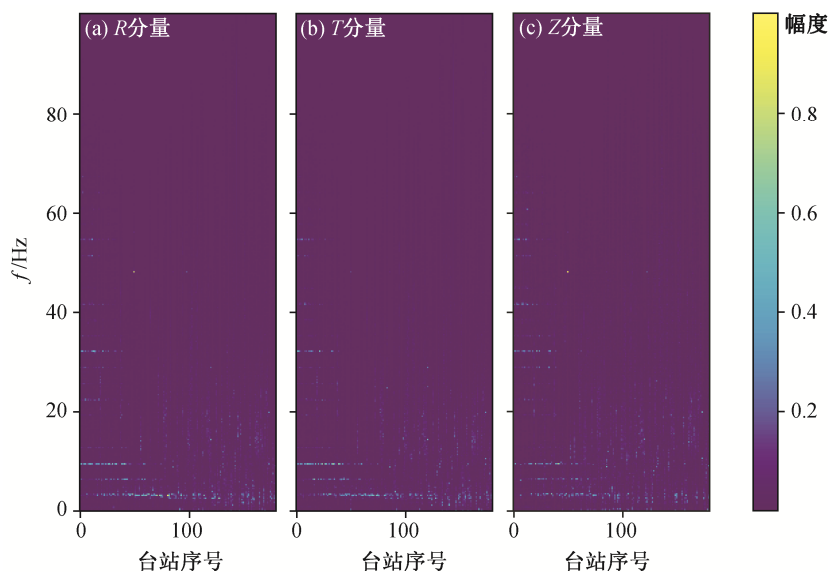
其中, f_{\max} 为数据的 Nyquist 频率, F 为高铁记录的频谱, $| \cdot |$ 表示对复数取模。根据计算得到的基频 f_0 , 我们将不同基频的频谱对齐, 使其基频为 3.2 Hz, 对应于车长为 25 m 且车速为 80 m/s 的列车。三分量频谱的每个分量的基频可能有差异, 这里对 3 个频谱分别求基频。

图 3(a)~(c)分别是一列高铁在由近及远的台站

上的 R , T , Z 三分量的频谱。可以观察到, 随着台站距离高铁距离的增加, 高频部分衰减较快, 低频部分衰减较慢; 当距离大于 1 km 之后, 剩余的主要是基频部分的能量。三分量的频谱中, T 分量能量衰减的最慢, 在距离高铁约 4 km 的台站上, 仍然能够在 T 分量上观察到基频的能量, 但已经不清晰。我们考虑将同一台站上的多个高铁记录的频谱叠加起来, 使得基频及其倍频上的能量更加清晰, 同时压制噪音对频谱的影响。

蒋一然等^[10]对频谱的聚类研究发现, 该路段由北向南的动车组可以分为两类, 且与车型有关(表 1): 1R 类有 CRH380A、CRH380A 统型重联、CR 400AF 重联和 CRH380A 统型; 2R 类有 CRH380AL 和新 CRH380AL。这两类动车产生的高铁地震信号的频谱具有不同的特征, 应该分别叠加。我们将同一台站上属于 1R 类和 2R 类的高铁频谱三分量分别叠加起来, 结果如图 4 所示。

1R 类和 2R 类的高铁频谱叠加后, 信噪比有所提高, 在 4 km 的地方也足够清晰; 倍频部分更加清晰, 在较远的台站上也能被观测到, 更远的台站上存在微弱信号; 基频和倍频外由环境噪音带来的能量明显地被压制。如果有更多的观测数据, 有望在更远的距离观测到能量。两者相比较, 2R 类高铁的能量在基频及其倍频上更集中, 1R 类高铁在频谱其他部分的能量则多一些, 体现了两大类车型的差异。



为使彩图在同一色标下尽量展示振幅谱的细节, 将幅度(除以幅度最大值)做归一化, 下同

图 3 单个高铁地震事件在由近及远台站上的三分量振幅谱

Fig. 3 Three-component amplitude spectra of the waves on the stations from near to far for a high-speed rail event

表 1 由北向南的动车组聚类结果、车次和车型^[10]
Table 1 Clustering results, train number and train type of trains from north to south^[10]

到达时刻		高铁记录个数		车次	车型	到达时刻		高铁记录个数		车次	车型
时	分	1R 类	2R 类			时	分	1R 类	2R 类		
7	53	0	10	G485	CRH380AL	14	32	0	4	G661	新 CRH380AL
8	47	0	10	G627	CRH380AL	15	16	0	4	G673	新 CRH380AL
9	5	8	0	G309	CRH380A 统型重联	16	58	0	6	G573	新 CRH380AL
11	0	10	0	G6741	CRH380A	17	11	7	0	G523	新 CRH380AL
11	10	9	0	G605	CRH380A 统型重联	17	33	0	5	G561	新 CRH380AL
11	15	8	0	G65	CR400AF 重联	18	9	0	7	G563	新 CRH380AL
12	15	7	0	G609	CRH380A 统型重联	18	31	10	0	G1571	CRH380A 统型
12	42	0	10	G659	CRH380AL	19	14	0	9	G6705	新 CRH380AL
12	54	0	6	G67	CRH380AL	21	53	0	10	G6745	新 CRH380AL
13	20	9	0	G611	CRH380A 统型						

说明：到达时刻是由到站时间和速度估算的到达保定东站的时刻。

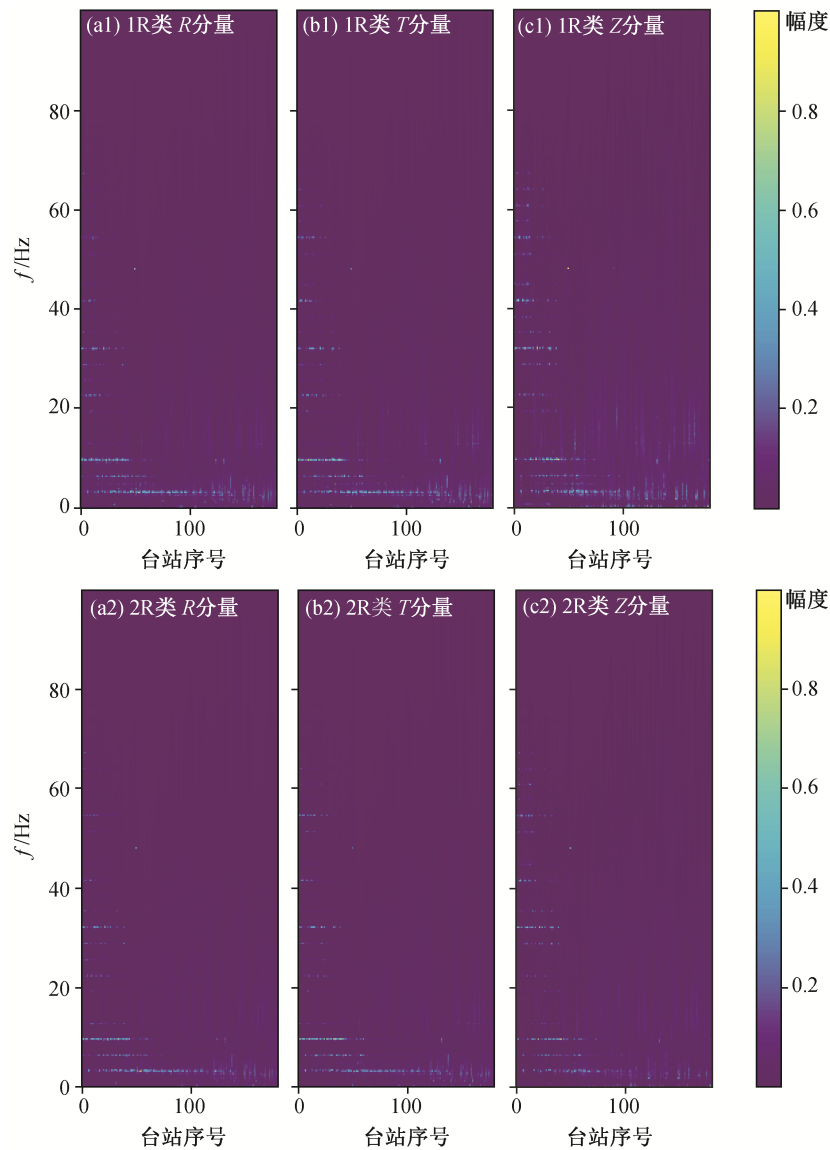


图 4 1R 类和 2R 类高铁叠加后在由近及远台站上的三分量振幅谱
Fig. 4 Stacked three-component amplitude spectra of 1R and 2R high-speed rail seismic events on stations from the near to far

3 对台站的聚类

将台站的频谱对齐后,根据不同的频谱类型进行叠加,对每个台站都得到两组比单个事件更加清晰的频谱。由于每个台站都有三分量,结合两种车型,每个台站可以得到6组频谱。借助K-Means聚类算法,分别对这6组频谱进行聚类,对比聚类结果的异同,研究其中包含的信息。为了使不同分量的频谱间聚类结果可比,我们对三分量都选取相同的频率作为特征。首先把距高铁0.35 km以内台站上所有高铁记录所有分量的频谱对齐后叠加起来(图5),选取其中能量较高的19个频率(3.200, 6.400, 9.533, 12.733, 19.200, 22.400, 25.600, 28.800, 32.000, 35.200, 38.333, 41.533, 44.733, 51.133, 54.400, 57.600, 60.733, 64.000, 67.200 Hz)作为频谱的特征,依次编号为1~19。

每个台站按车型、分量可以得到6组频谱。从每组频谱中,根据这19个频率提取出6组特征,并分别对6组特征进行聚类。为了保证聚类结果相对稳定和可比性,我们对每一组聚类都进行相同的初始化。经过实验,台站可以分为7类,分类及位置如图6所示。根据每组特征的聚类结果所对应的台站特征分别展示在图7~12中。

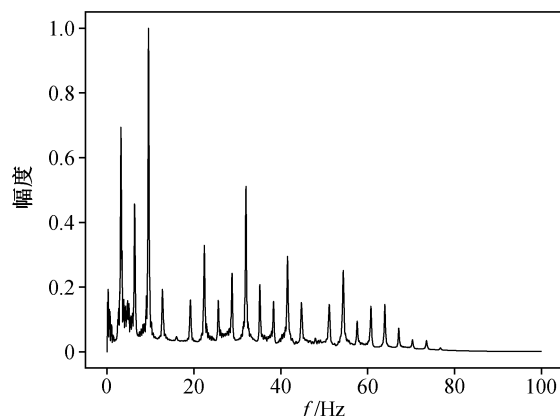


图5 0.35 km 内的台站经过基频校准后叠加的振幅谱
Fig. 5 Stacked amplitude spectrum on stations within 0.35 km after aligning the fundamental frequency

类别1, 2, 3, 5和7主要是近场台站,高铁信号衰减不严重,基频及其倍频上具有较多的能量。类别1和5的能量集中在基频;类别7能量集中在低频;类别2和3能量在全频段都有分布,类别2的能量集中在两个频率,类别3的能量集中在较低的一个频率。

类别4和类别6主要是远场台站。类别4中,基频及其倍频上的能量已经衰减得非常严重;类别6中高铁信号也已发生衰减,但在基频上仍有较明

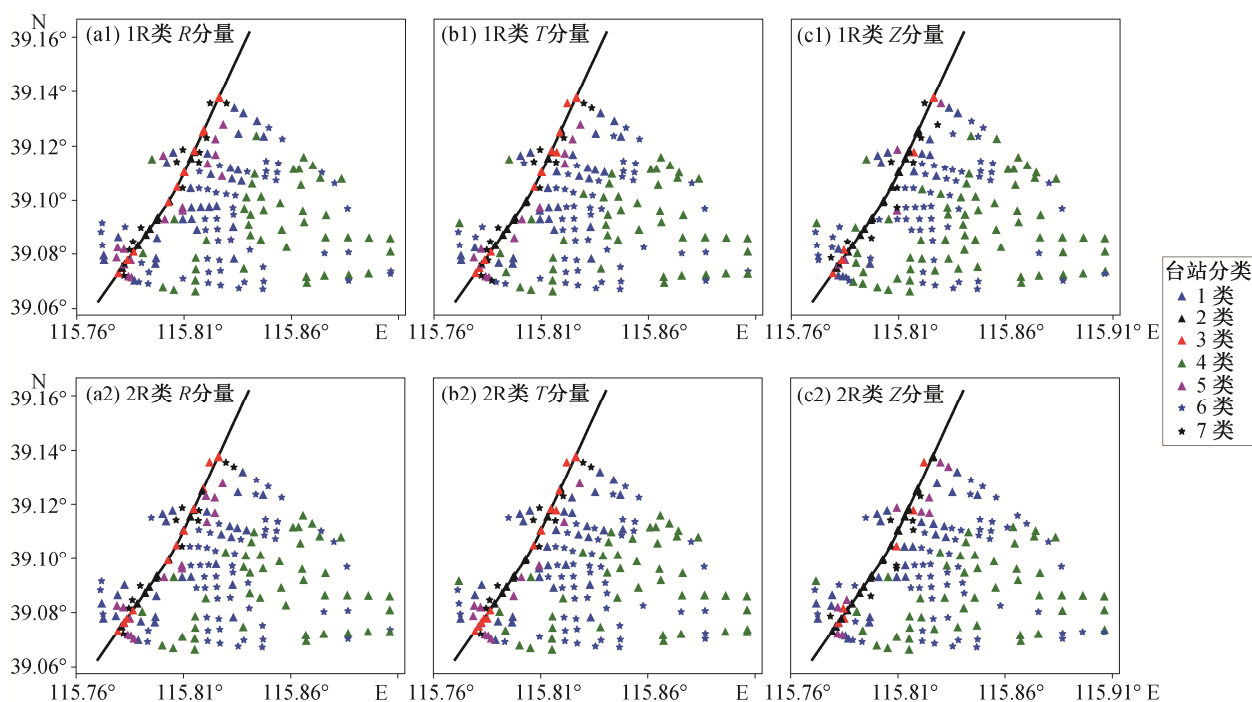
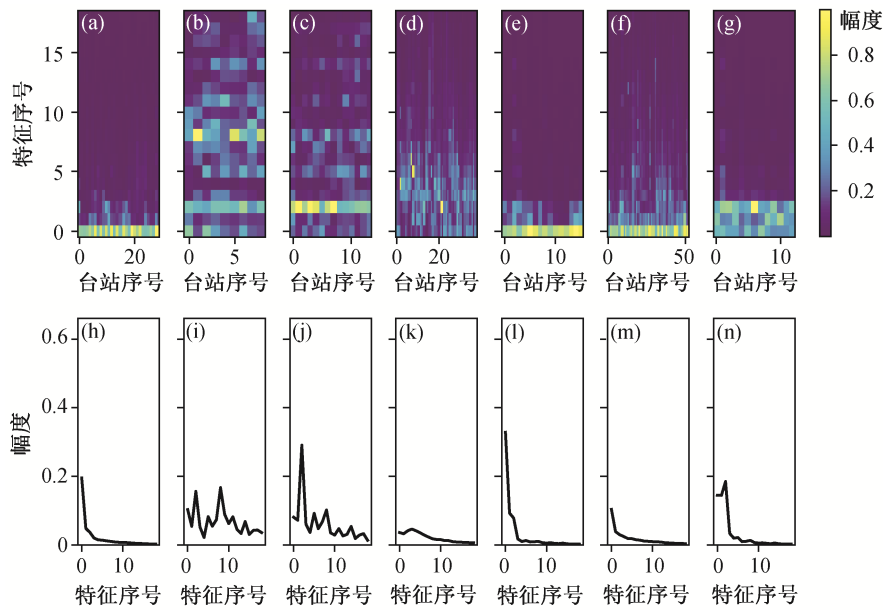


图6 分别根据1R和2R车型叠加的三分量频谱特征对台站分别聚类的结果

Fig. 6 Clustering results on stations according to the characters of the 1R and 2R trains' three-component spectra



(a)~(g)展示聚类为 1~7 类台站的特征值分布, (h)~(n)为 1~7 类台站特征值叠加后的结果, 为方便比较, 折线图未做归一化处理, 下同

图 7 1R 类车型的 R 分量聚类结果及其特征

Fig. 7 Clustering results of 1R trains' R component and their characters

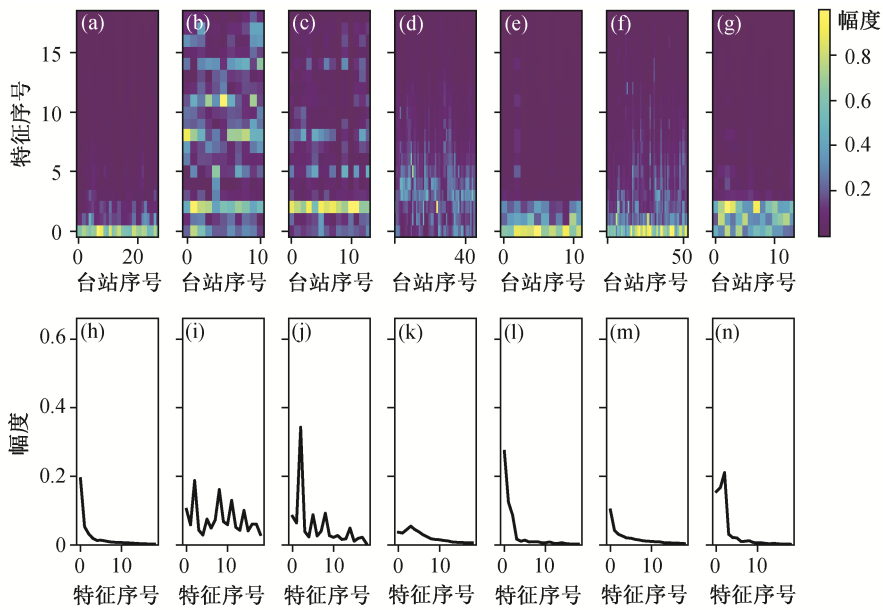


图 8 1R 类车型的 T 分量聚类结果及其特征

Fig. 8 Clustering results of 1R trains' T component and their characters

显的能量。基频能量的衰减较慢, 所以在某些观测条件较好的远距离台站, 仍能够观测到高铁记录, 因此其频谱被聚类到类别 6。

不同组特征聚类结果的空间分布(图 6)大体上一致, 说明对不同车型和不同的分量, 聚类结果相对稳定; 但是, 仍有部分台站在 6 组聚类中结果不

一样, 反映不同车型和分量包含的不同信息。聚类结果按距高铁线路远近大致分层, 反映高铁信号随距离增加而衰减的特点; 相互靠近的台站往往具有相同的类别, 反映高铁信号频谱受传播路径及其介质环境的影响, 在相近的传播路径和介质条件下, 频谱也相近。

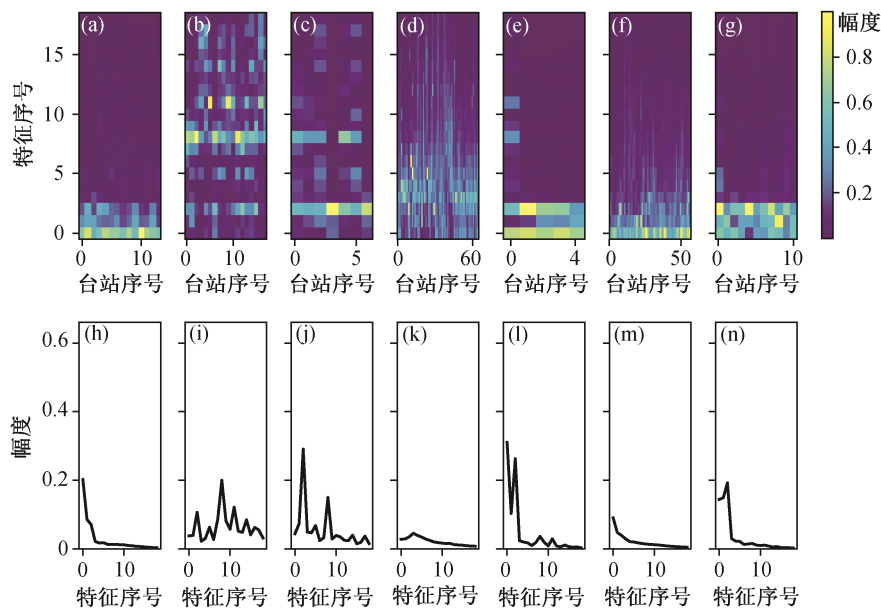


图9 1R类车型的Z分量聚类结果及其特征

Fig. 9 Clustering results of 1R trains' Z component and their characters

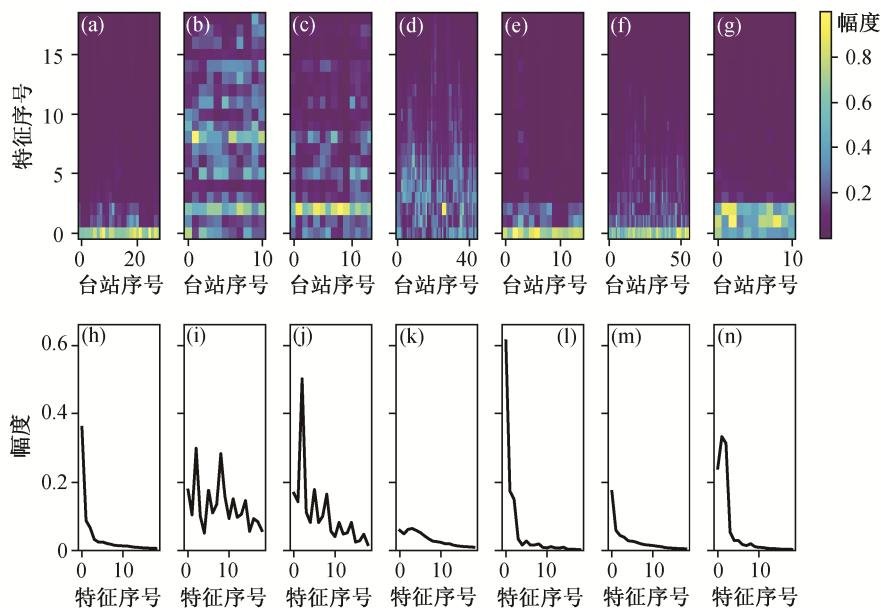


图10 2R类车型的R分量聚类结果及其特征

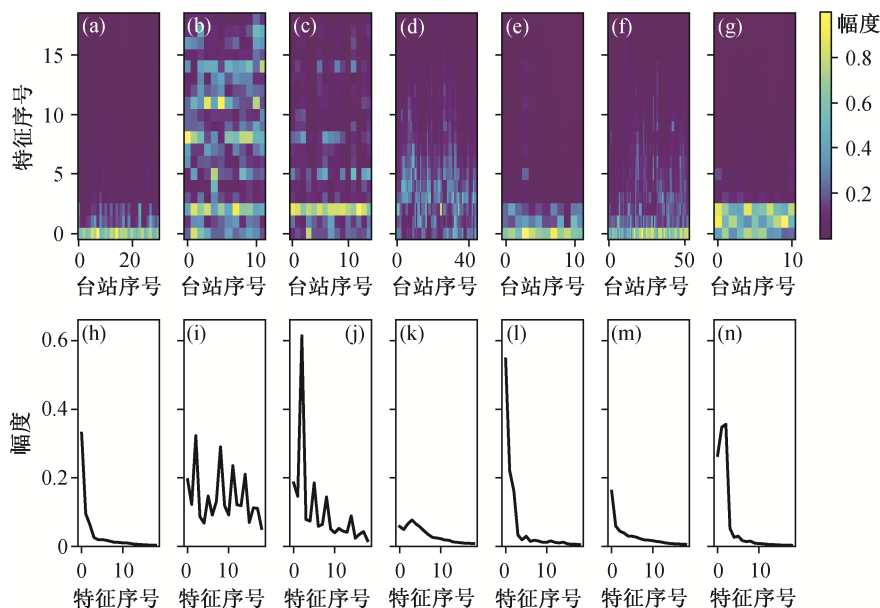
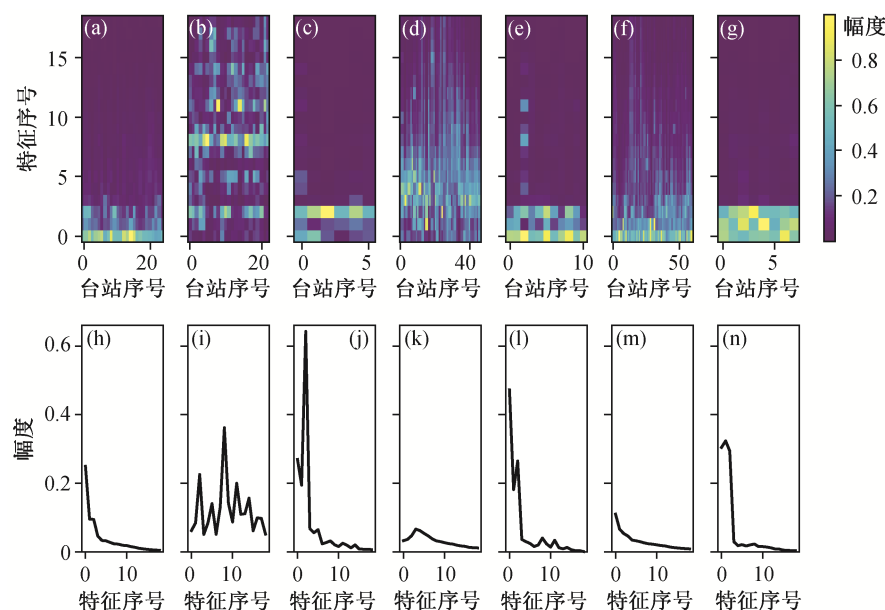
Fig. 10 Clustering results of 2R trains' R component and their characters

4 4D频谱及其可用性讨论

动车组是一个由多节车厢构成的、与铁轨和路基相互作用的复杂动力学系统。在激发高铁信号时,可能由于运行状态的细微改变,波场在时域表现出一定程度的随机性。加上高铁地震震源持续时间长且分布广,对研究其激发和传播带来困难。对高铁地震频谱的研究显示出时域所不具有的稳定

性,利用基频对齐的方法消除列车速度的影响后,不同的车型和台站上的高铁记录具有非常清晰稳定的频谱模式,这为我们利用频谱监测高铁安全运行状态和地下介质情况变化提供了可能。

不同车型和分量的聚类结果相似,表现出依靠频谱聚类的稳定性;不同车型和分量聚类部分不相同的结果,反映不同车型的三分量频谱包含信息的差异。在考虑车型变化的情况下,如果将高铁事件

图 11 2R 类车型的 T 分量聚类结果及其特征Fig. 11 Clustering results of 2R trains' T component and their characters图 12 2R 类车型的 Z 分量聚类结果及其特征Fig. 12 Clustering results of 2R trains' Z component and their characters

频谱的三分量共同研究,将会提取出比单一分量更多的信息。

在现有理论基础下,很难直接计算动车组、铁轨、路基和介质等因素的变化对高铁频谱的影响,但可以通过比较频谱模式的前后变化来观测这些因素的变化,即考虑频谱在列车经过这个时间维度上的变化,将原本的三维频谱扩充到四维。单一台站上频谱模式的变化,可以区分动车组、铁轨、路基

和介质的影响。如果将不同台站联合起来,考虑这种频谱模式变化的空间分布特点,则有可能对这些因素进行甄别。具体的验证和实用有待今后更长时间和更密集台站的观测数据。

本文根据蒋一然等^[10]对动车组的聚类,将频谱按照车型划分为两类进行研究,观测到两类车型的频谱的差异。如果依赖更长时间、更高采样率的观测,则有可能发现频谱对更具体车型的不同响应。

因此,对频谱模式的变化检测也必须考虑这个因素,在相同的车型下检测频谱模式的变化。

单一高铁地震频谱和叠加后频谱的比较表明,单一高铁事件受随机的运行状态和环境噪音等影响,频谱模式不够稳定,在远场台站上较为模糊,但叠加后的频谱具有更高的信噪比,能在更远的台站上表现出稳定的频谱模式。

基于此,我们提出一种考虑车型和叠加的4D地频图,即在考虑车型变化的情况下,将一段时间内高铁地震三分量的频谱叠加起来,并考虑其时间和空间变化的方法。借助沿高铁分布的长期观测的密集台站,积累不同车型和台站的三分量资料,建立4D地频图;利用4D地频图得到稳定的频谱模式,并监测频谱模式的变化,同时借助聚类算法和机器学习等分析工具,从中提取相应的高铁及其环境变化信息的方法。这种方法有望成为监测高铁安全运行状态和其周围介质状态变化的有力手段。

5 结论

本文基于对大范围的高铁地震信号的三分量频谱特征的分析及聚类研究,得到以下结论。

1) 高铁地震信号的频谱主要由等间距分立的峰构成,峰对应的能量随着与高铁线路的距离衰减,高频衰减快,基频衰减慢。

2) 与不叠加情况相比,叠加后的频谱具有更高的信噪比,在距高铁更远的台站上也能观测到分立谱的特征。

3) 高铁地震信号的三分量具有不同的频谱特征;不同类型的动车组车型也具有不同的频谱特征。

4) 高铁地震信号受传播路径及其介质的影响,在环境相似的台站上,高铁地震信号的频谱也相似。

5) 在考虑车型的情况下,研究叠加后的三分量频谱随时间和空间(台站)变化的4D地频图可能有助于高铁安全运行状态及其周边环境变化的监测。

致谢 中国科学院地质与地球物理研究所李幼铭研究员提出建设性意见,高铁地震联合研究组成员之间曾进行有益的讨论,西安交通大学王晓凯副教授和北京大学盖增喜副教授给予中肯建议,在此一并感谢。

参考文献

- [1] 李丽,彭文涛,李纲,等.可作为新震源的列车振动及实验研究.地球物理学报,2004,47(4): 680-684
- [2] 翟培合,韩忠东,李丽,等.运行列车振动产生的瑞雷波特征及数据分析.噪声与振动控制,2008,28(1): 18-21
- [3] Quiros D A, Brown L D, Kim D. Seismic interferometry of railroad induced ground motions: body and surface wave imaging. Geophysical Journal International, 2016, 205(1): 301-313
- [4] 徐善辉,郭建,李培培,等.京津高铁列车运行引起的地表振动观测与分析.地球物理学进展,2017,32(1): 427-431
- [5] 李智敏,苟先太,秦娜,等.高速列车振动监测信号的频率特征.仪表技术与传感器,2015(5): 99-103
- [6] 颜秀珍.基于车载检测数据的高速列车转向架振动传递特征研究[D].成都:西南交通大学,2016: 37-55
- [7] 刘磊,蒋一然.大量高铁地震事件的属性体提取与特性分析.地球物理学报,2019,62(6): 2313-2320
- [8] 王晓凯,陈文超,温景充,等.高铁震源地震信号的挤压时频分析应用.地球物理学报,2019,62(6): 2328-2335
- [9] 张固澜,何承杰,李勇,等.高铁地震震源子波时间函数及验证.地球物理学报,2019,62(6): 2344-2354
- [10] 蒋一然,鲍铁钊,宁杰远,等.高架桥下方高铁地震信号频谱特征研究.北京大学学报(自然科学版),2019,55(4): 829-838