

哈尔滨地铁环境振动噪声测试与降噪处理^{*}

于海英^{1,2}, 祝 达^{1,2}, 周宝峰^{1,2}, 徐 旋^{1,2}, 马温喜^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 考虑地铁环境振动噪声对未来城市地铁地震警报系统中地震信号识别的影响, 以包含Ⅱ类和Ⅲ类2种场地土类型的哈尔滨市4个地铁站的上行线首部和尾部作为观测点, 展开地铁环境振动噪声的测试、分析以及降噪处理研究。首先, 对采集的列车振动数据进行统计分析; 其次, 基于滑动平均法, 提出确定帕曾窗带宽 b 值的经验方法, 并利用其对采集的地脉动数据进行平滑滤波处理; 最后, 采用本方法确定哈尔滨地铁地震P波预警的滤波频带, 并与日本气象厅仪器地震烈度以及新干线地震预警系统的滤波频带进行对比。结果表明: ①三轴向地铁列车振动信号中, 竖向振动比水平向振动要大, 切向振动比径向振动要大。②帕曾窗带宽 b 值为0.4 Hz时, 平滑滤波处理后的频谱能较好地反映地脉动信号的频谱主频, 且滤波后的地脉动信号的卓越频率和场地土类型有明显的对应关系, 即水平向卓越频率和场地土类型的相关性较好, 而竖向卓越频率的误差较大。③哈尔滨地铁地震P波预警的滤波频带为0.3~10 Hz时, 能较好地滤除地震动信号中的地铁环境振动噪声, 满足地震警报系统对地震记录信噪比的要求。

关键词: 城市地铁; 环境振动噪声; 噪声处理; 滤波频带

中图分类号: P315.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-0666(2020)01-0166-10

0 引言

20世纪初, Omori (1908) 首次使用测震仪器观测地脉动; Kanai 等 (1954) 在20世纪50年代将1 s以下短周期的地脉动观测值作为评估工程场地动力性能的一种方法; Udawadia 和 Trifunac (1973) 通过对美国加州同一场地获得的地脉动与EL Centro地震波进行比较, 发现两者没有相关性, 并且地脉动在不同的时段亦不稳定; Thompson (2013) 认为, 与空气噪声类似, 不同类型的在轨列车 (如地面上和地下隧道内高速运行的列车) 引起的振动通过大地传播后, 同样会成为附近居民区的重要噪声干扰源, 地面振动问题变得日益重要。地下隧道内高速运行的列车引起的振动会传递到上方地面及其周边建筑物, 与地面上运行的列车引起的振动相比, 其振动具有高频成分 (30~250 Hz)。因此, 感官上, 此类振动噪声会比其它振动噪声更令人烦躁, 该现象被称为“地

面诱导结构声”。瑞士学者证实该现象的确存在, 日本学者对日本新干线的调查结果亦有相似结论 (Muller, 2008; Yokoshima, Tamura, 1999)。20世纪80年代以后, 随着我国地震观测技术的不断进步, 地脉动观测方法得到广泛应用。彭远黔等 (2000) 将地脉动卓越周期作为场地类型分类的标准, 并给出各种场地土类型所对应的卓越周期。综上所述, 国内外学者的研究主要集中在利用地脉动观测值评估工程场地动力性能、铁路环境振动噪声对列车运行线路附近居民的干扰程度, 以及如何建立环境振动噪声的评价标准和制定噪声减缓措施等方面。然而, 在城市地铁地震紧急处置领域, 鲜有针对环境振动噪声对地震紧急处置系统中地震信号识别的影响方面的研究。事实上, 在城市地铁采取地震紧急处置时, 地震P波预警的效果受实时采集到的地震波的信噪比影响很大, 且在P波触发后3 s内的加速度幅值与地铁环境振动噪声 (尤其是在轨运行的列车引起的振动噪声) 混叠在一起, 使得地震P波更难被有效识别。

^{*} 收稿日期: 2019-11-15.

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC1500803)、国家自然科学基金高铁联合基金项目 (U1534202) 及黑龙江省自然科学基金面上项目 (E2015070) 联合资助。

为了研究地铁环境振动噪声对未来城市地铁地震警报系统中地震信号识别的影响，并分析处理地铁环境振动噪声对地震信号识别的影响，针对修建城市地铁所常见的Ⅱ类和Ⅲ类场地，本文选取哈尔滨地铁 1 号线的 4 个地铁站的上行线首部和尾部作为环境振动观测点，采集凌晨安静时段和白昼列车工作时段的地脉动数据以及环境振动噪声数据。基于滑动平均法，提出确定帕曾窗带宽 b 值的经验方法，对所采集的数据进行分析处理，给出地脉动和地铁列车振动的加速度均方根值统计结果以及相应的频谱，并确定哈尔滨地铁地震 P 波预警滤波频带范围。

1 地铁环境振动观测

1.1 测试仪器

为了满足哈尔滨市地铁环境振动噪声测试的频率要求，即既要保留地脉动信号（地脉动成分在 20 Hz 以下的频率段内，长周期地脉动信号的频率甚至低于 0.1 Hz），也要监测到外界振动干扰信号（列车振动成分高于 30 Hz），因此要求测试仪器采样频段的下限要低于所获取信号的频段下限（曾立峰，2012）。在哈尔滨地铁的地脉动信号测量中，测试仪器主要包括 2 套强震动记录器和加速度传感器，分别采用美国凯尼公司（Kinometrics Inc.）生产的 Basalt 型号和 FBA ES-T 型号。加速度传感器的频率响应范围为 0 ~ 100 Hz，完全可以

满足测试的频率要求。

1.2 测点布设

薄景山（2003）指出，在哈尔滨市地铁 1 号线（一期）18 个车站中，太平桥站、交通学院站、桦树街站和哈尔滨东站所在场地为Ⅱ类场地，其它车站所在场地均为Ⅲ类场地。考虑哈尔滨市地铁环境振动噪声测试观测点应保证包括两种场地类别的车站，因此选取博物馆站、和兴路站、理工大学站和桦树街站作为测试车站。测试车站的场地参数见表 1。

表 1 测试车站的场地等效剪切波速、覆盖层厚度和场地类别

Tab. 1 Site equivalent shear wave velocity, cover thickness and site class of the testing station

车站名称	等效剪切波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	场地覆盖层厚度/ m	场地类别
博物馆站	229	63.5	Ⅲ
和兴路站	207	69.5	Ⅲ
理工大学站	225	75	Ⅲ
桦树街站	181	49	Ⅱ

由图 1 可见，加速度传感器 LEA 和 LSA 分别布设在各测试车站地铁隧道底部上行线的首部和尾部，各观测点加速度传感器与轨道间的距离见表 2。加速度传感器的 X 轴与地铁上行线（径向）同方向，Y 轴与地铁上行线（切向）同方向，Z 轴为竖向。

表 2 各观测点传感器与地铁轨道的距离

Tab. 2 The distance between sensors and tracks at all observing sites

单位：m

传感器位置	博物馆站 - LEA	博物馆站 - LSA	和兴路站 - LEA	和兴路站 - LSA	理工大学站 - LEA	理工大学站 - LSA	桦树街站 - LEA	桦树街站 - LSA
传感器与地铁轨道的距离/m	1.60	1.90	1.88	2.34	1.80	1.85	1.73	1.65

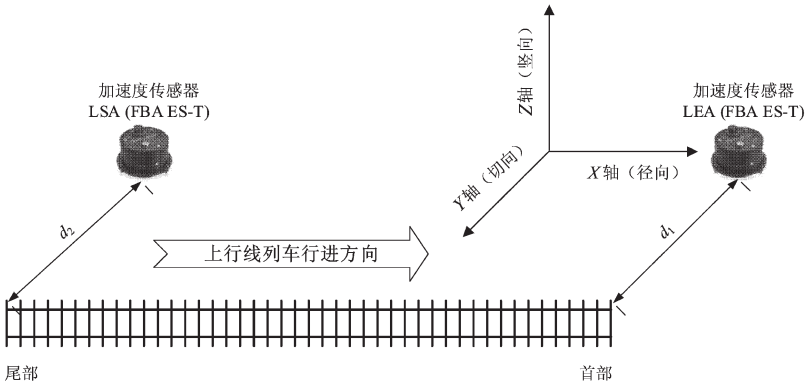


图 1 环境振动噪声观测点测试仪器布置示意

Fig. 1 Diagram of arrangement of testing instruments at observing sites of environmental noises

2 噪声分析

城市地铁环境振动噪声包括地铁列车振动、地脉动以及市电等产生的干扰。本文分析地铁环境振动中地脉动和列车振动噪声，仅考虑 LEA 和 LSA 所获取的加速度波形信号。从连续多天各时段观测采集的数据中提取。虽然是在凌晨进行地脉动信号的测量，但结果仍然受到地面行驶车辆等因素的干扰。干扰信号与地脉动信号相比有明显的区别：干扰信号的振动过程较短，而地脉动信号则会一直存在。这是由于地脉动信号的最大幅值不能代表地脉动的振动幅值，而是代表干扰信号的振幅（李友鹏，邹桂高，2004）。本文利用从各测试车站采集的各时段地脉动数据计算加速度均方根平均值（表 3），结果表明：各测试车站洞体的地脉动加速度均方根平均值为 $(3.7 \sim 8.5) \times 10^{-2}$ gal。

表 3 各测试车站地脉动加速度均方根平均值

Tab. 3 Average MSR of ground pulsation

acceleration at all testing stations 单位: gal

传感器位置	竖向	切向	径向	平均值
博物馆站 - LEA	0.088 8	0.027 2	0.057 9	0.064
博物馆站 - LSA	0.076 7	0.029 6	0.056 3	0.064
和兴路站 - LEA	0.101 8	0.030 7	0.067 9	0.075
和兴路站 - LSA	0.247 7	0.030 8	0.078 7	0.085
理工大学站 - LEA	0.039 4	0.020 4	0.039 0	0.044
理工大学站 - LSA	0.040 1	0.022 2	0.040 2	0.046
桦树街站 - LEA	0.089 4	0.020 9	0.030 6	0.037
桦树街站 - LSA	0.046 0	0.021 2	0.038 9	0.044

从采集的各时段地脉动数据中提取加速度均方根平均值最小的、记录长度为 1 min 的地脉动信号作为典型，并绘制其时程曲线（图 2）。从采集的各时段列车振动数据中提取典型的列车振动信号，并绘制其时程曲线（图 3）。

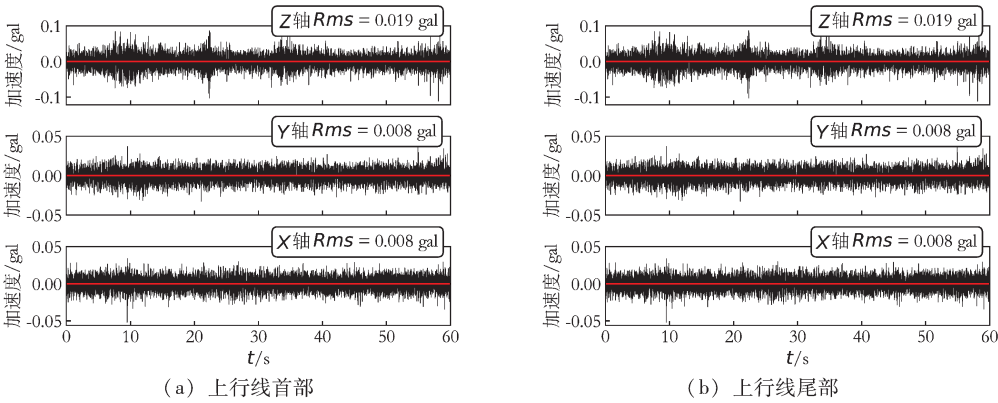


图 2 博物馆站的典型地脉动时程曲线
Fig. 2 Typical time - series curves of ground pulsation at the Museum Station

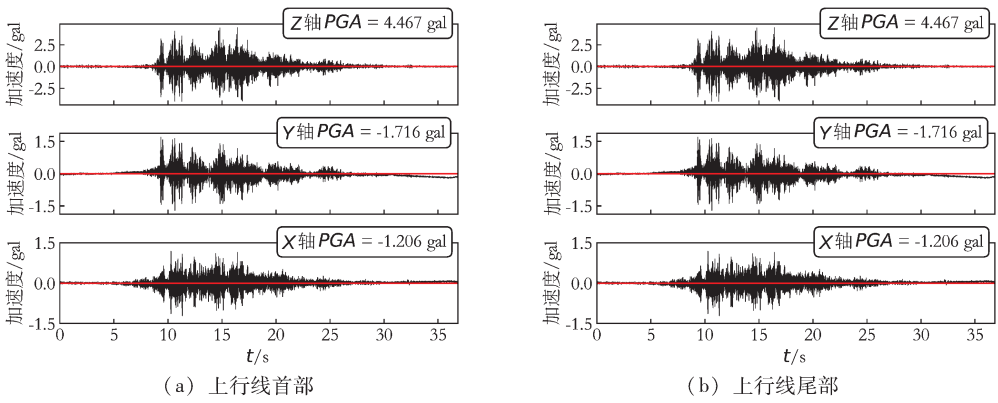


图 3 博物馆站的典型列车振动时程曲线
Fig. 3 Typical time - series curves of train vibration at the Museum Station

由各测试车站采集的列车振动数据计算得到列车振动信号峰值加速度平均值由表4可见：与水平向振动相比，各测试车站列车的竖向振动较大；在水平向振动中，轨道切向振动大于径向振动，且水平向合成值为2.1~18.0 gal。

表4 各测试车站列车振动峰值加速度平均值

Tab. 4 Average peak acceleration of train

vibration at all testing stations

单位：gal

传感器位置	竖向	切向	径向	水平向合成值
博物馆站 - LEA	4.19	1.85	1.07	2.10
博物馆站 - LSA	28.14	9.21	4.87	10.40
和兴路站 - LEA	9.78	2.78	2.40	3.70
和兴路站 - LSA	14.74	5.83	3.14	6.60
理工大学站 - LEA	27.78	17.37	4.72	18.00
理工大学站 - LSA	15.68	8.64	8.11	11.90
桦树街站 - LEA	13.19	4.59	4.83	6.70
桦树街站 - LSA	4.70	2.34	3.41	4.10

根据以上分析，结合地震P波双参数阈值高铁I级地震警报预测方法（宋晋东等，2018），选取地震P波触发后3 s内的速度幅值大于0.05 m/s（相当于加速度幅值 2.5 m/s^{-2} ）作为信噪比的评价标准对数据进行筛选。警报参数 τ_c 的计算结果受地震信号的信噪比影响较大，计算时应选取满足一定信噪比要求的地震信号。虽然地铁地脉动信号的加速度均方根平均值远远小于地震警报系统对地震信号信噪比的要求，但是地铁列车振动信号的加速度幅值（即便采用水平向合成值）与地震P波触发后3 s内的加速度幅值几乎处在同一数量级，若不对其进行降噪处理则无法有效识别地震波。

3 降噪处理

为了使城市地铁地震警报系统在地震发生时能够准确拾拾地震动信息，必须采用滤波技术有效滤除城市地铁环境振动噪声。降噪处理通常采用滑动平均法，但适用于城市地铁P波预警降噪处理的滑动谱窗的选择以及窗口带宽的确定方法尚未统一。本文基于滑动平均法，提出确定帕曾窗（Parzen Window）窗口带宽 b 值的经验方法。最后，利用滤波技术确定合适的滤波频带，并将列车振动及市电干扰滤除。

3.1 滑动平均法

地震动信号的傅里叶谱、功率谱会出现锯齿状起伏现象，很难确定频谱峰值的准确位置。为了解决该问题，需要对频谱做平滑化处理。基于大崎顺彦（2008）的研究，本文提出一种频谱的滑动平均法，即依次以样本点为中心点，在数据宽度为 b 的区间内计算中心点的平均值，并将其作为样本点的值（图4）。

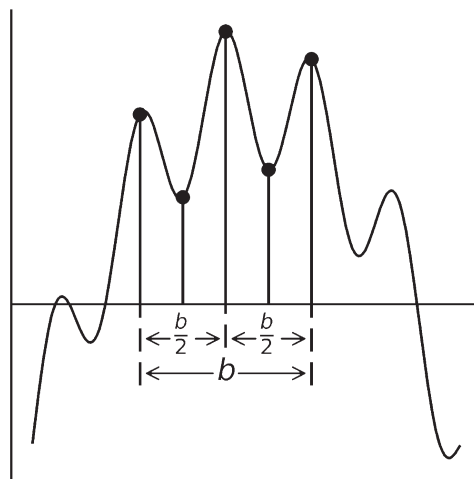


图4 滑动平均法示意

Fig. 4 Diagram of the moving average method

经滑动平均法处理后，列车振动信号频谱的主要频率成分被凸显出来，且该方法能对从测试车站采集的海量列车振动数据进行批量地频谱平滑化处理。

在利用卷积运算对频谱进行平滑化处理时，本文只对功率谱进行平滑化，以保证不改变原频谱的功率。

设 $G(f)$ 为功率谱，将它与谱窗 $W(f)$ 进行卷积运算后，即可获取平滑后的功率谱 $\bar{G}(f)$ ：

$$\bar{G}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} G(g) \cdot W(f-g) dg \quad (1)$$

3.2 确定帕曾窗带宽 b 值的经验方法

为保证功率谱平滑后的面积不变，且对某个中心点取值时，能够使中心点两侧数值的处理保持均衡， $W(f)$ 需满足以下条件：

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} W(f) df = 1 \\ W(f) = W(-f) \end{cases} \quad (2)$$

满足式 (2) 的谱窗 $W(f)$ 有多种, 本文采用帕曾窗 (图 5) 作为谱窗, 即

$$W(f) = \frac{3}{4}u \left(\frac{\sin \frac{\pi u f}{2}}{\frac{\pi u f}{2}} \right)^4 \quad (3)$$

式中: u 称为时滞域上的截断宽度, 一般将 u 当作单纯的常数处理, 单位为 s (大崎顺彦, 2008)。

帕曾窗的带宽 b 为:

$$b = \frac{280}{151u} \quad (4)$$

确定帕曾窗的带宽 b 值是检验滑动平均法频谱平滑化效果的关键参数。若 b 值过小, 则经平滑化处理的频谱锯齿状现象仍十分明显, 难以分辨出主频; 若 b 值过大, 经平滑化处理的频谱将过于平缓, 导致主频的位置更不明显甚至削去主频。以博物馆站的地脉动信号的傅里叶谱为例, 分别选取不同的

b 值, 检验滑动平均法频谱平滑化效果 (图 6)。结果表明: 带宽 b 值较小或较大均不合适; 当带宽 b 值取 0.4 Hz 时, 平滑化后的频谱能较好地反映地脉动信号的频谱主频。经测试, 其它测试车站地脉动信号的频谱亦显示同样的平滑化效果。

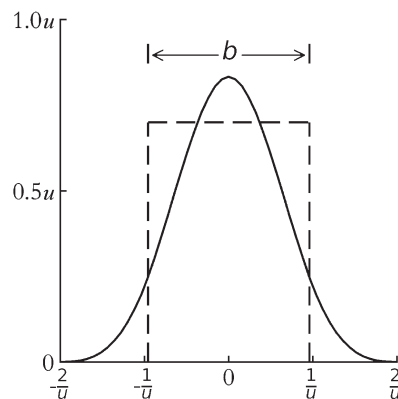


图 5 帕曾窗示意

Fig. 5 Diagram of the Parzen Window

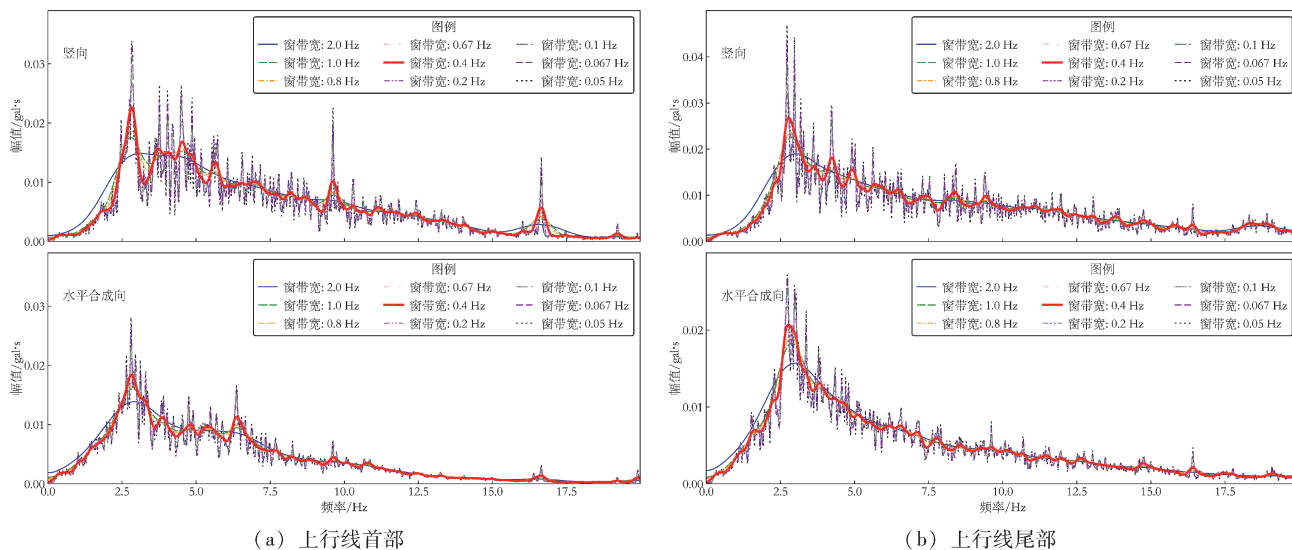


图 6 不同带宽 b 值滤波后的博物馆站地脉动傅里叶谱

Fig. 6 Smoothed Fourier spectrum of ground pulsation using different bandwidth b at the Museum Station

3.3 地脉动及市电干扰

首先, 计算各测试车站三轴向地脉动信号的傅里叶谱和功率谱; 其次, 采用滑动平均法对功率谱进行平滑化处理; 然后, 由经平滑化处理的功率谱计算傅里叶谱; 最后, 由水平向 (径向和切向) 的傅里叶谱计算水平合成向的傅里叶谱。

水平合成向傅里叶谱 f_h 的计算公式为:

$$f_h = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (5)$$

式中: f_x 和 f_y 分别表示径向和切向的傅里叶谱。

各测试车站未滤波的地脉动信号的傅里叶谱如图 7 所示, 由图可见, 各测试车站上行线首部和尾部测点的频率主要集中在 2.8 ~ 50 Hz, 且频率在 50 Hz 处尤为明显, 该频率成分属于市电干扰。市电干扰主要是各观测点周围存在大量电气设备, 并且测量时由于测试仪器没有接地条件造成的。为了消除市电干扰造成的影响, 本文采用巴特沃斯低通滤波器 (高频截止频率为 10 Hz)。

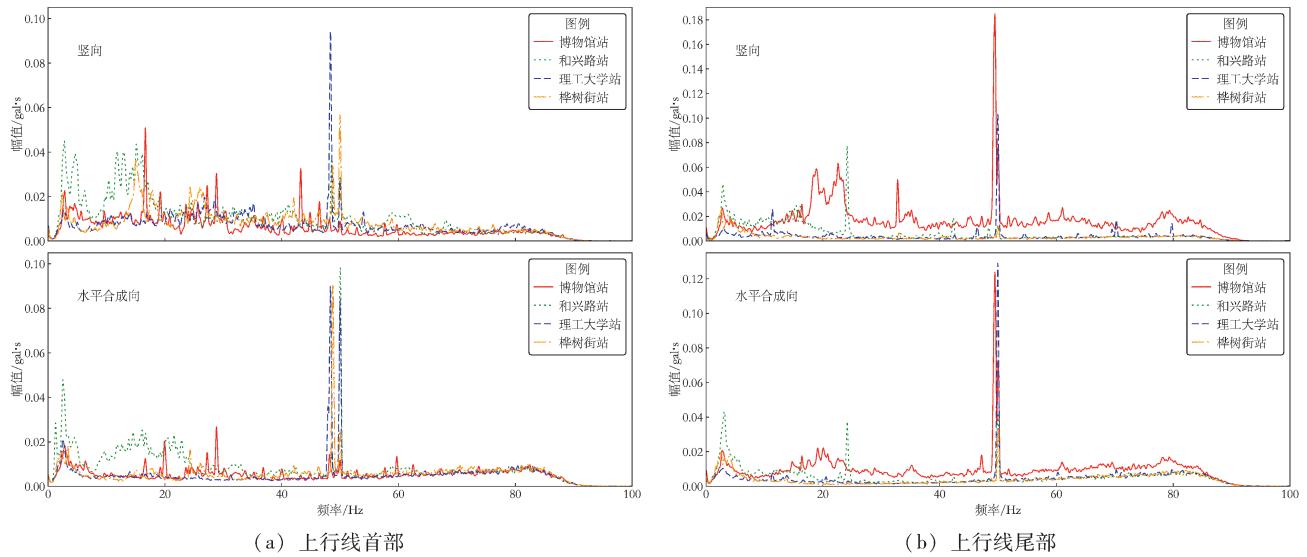


图 7 各测试车站未滤波的地脉动傅里叶谱

Fig. 7 Unfiltered Fourier spectrum of ground pulsation at all testing stations

Kanai 等 (1954) 认为地脉动和场地土类型存在关系, 可以利用地脉动观测值进行场地划分; 黄蕾等 (2009) 则进一步认为场地土类型与地脉动的卓越周期或卓越频率存在明确的对应关系 (表 5)。为了探究各测试车站观测点地脉动信号的卓越频率与场地土类型之间的相关性, 本文分析各测点滤波后的地脉动信号傅里叶谱。而建设部综合勘察研究院 (1995) 认为, 地脉动信号各轴向的卓越周期不同时, 应以水平向的卓越周期为主, 必要时可分别提出水平向和竖向的卓越周期。因此, 本文分别绘制各测点滤波后的地脉动信号

竖向和水平合成向的傅里叶谱 (图 8), 并统计各测点相应的卓越频率 (表 6)。

表 5 按卓越周期或卓越频率划分场地土类型

Tab. 5 Site soil types categorized by predominant period or predominant frequency

卓越周期 T/s	场地土类型	卓越频率 f/Hz
$T < 0.17$	坚硬场地土	$f > 5.88$
$0.17 \leq T < 0.30$	中硬场地土	$3.33 < f \leq 5.88$
$0.30 \leq T < 0.53$	中软场地土	$1.89 < f \leq 3.33$
$0.53 \leq T$	软弱场地土	$f \leq 1.89$

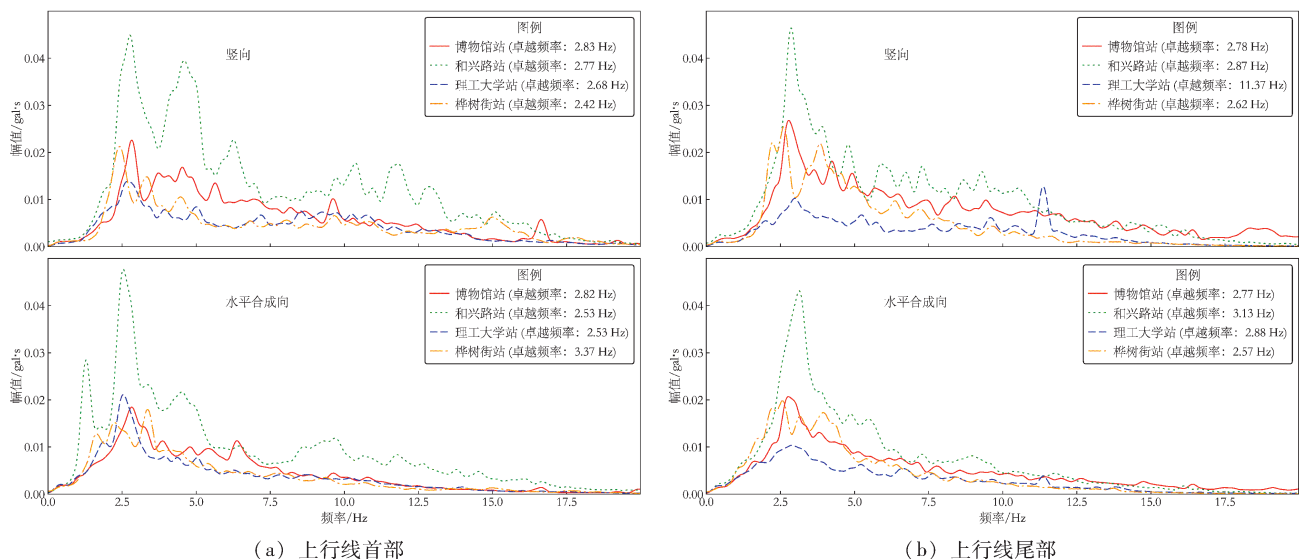


图 8 各测试车站滤波后的地脉动傅里叶谱

Fig. 8 Filtered Fourier spectrum of ground pulsation at all testing stations

表 6 各测点的卓越频率
Tab. 6 Predominant frequency at all stations

传感器位置	竖向/Hz	水平向/Hz
博物馆站 - LEA	2.8	2.8
博物馆站 - LSA	2.8	2.8
和兴路站 - LEA	2.8	2.5
和兴路站 - LSA	2.9	3.1
理工大学站 - LEA	2.7	2.5
理工大学站 - LSA	2.9	2.9
桦树街站 - LEA	2.4	3.4
桦树街站 - LSA	2.6	2.6

结合表 5、表 6 可知：水平向卓越频率中，只有桦树街站上行线尾部的观测点不满足场地土类型的要求；而在竖向卓越频率中，桦树街站观测点则完全不满足场地土类型的要求。综上所述

述，水平向卓越频率和场地土类型的相关性较好，而竖向卓越频率的误差较大。因此，巴特沃斯带通滤波器的高频截止频率选择 10 Hz 是比较合理的。

3.4 列车振动干扰

为了从地震动信号中有效滤除列车振动干扰，需要对列车振动信号进行傅里叶谱分析，以获得地铁列车振动信号的主要频率成分。

各测试车站观测点采集的地铁列车振动信号的傅里叶谱（图 9）表明：各测试车站观测点的上行线首部和尾部的列车振动信号的频率成分均集中在 30 ~ 90 Hz。由于测试专用的加速度传感器频率响应范围为 0 ~ 100 Hz，因此本文引言中所提及的“欧洲地铁列车振动噪声具有高频成分（30 ~ 250 Hz）”亦得到印证。

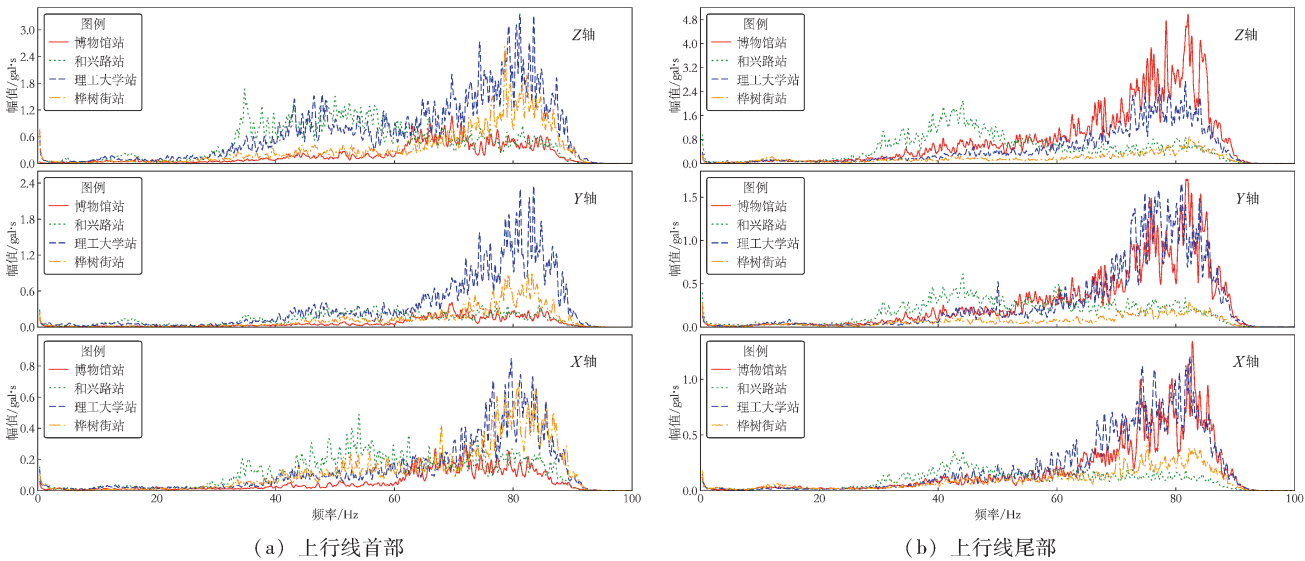


图 9 各测试车站列车振动信号傅里叶谱

Fig. 9 Fourier spectrum of passing train vibration at all testing stations

由图 9 可知，列车振动信号同样存在低频成分，故仍需找出地铁列车振动信号的低频成分所在范围。虽然地铁列车振动信号的低频部分的谱幅值较高，但其频带较窄。徐旋（2018）对大量地震动信号的低频截止频率进行统计分析，发现地震动的低频截止频率主要集中在 0.3 Hz 附近。因此，巴特沃斯带通滤波器的低频截止频率选择 0.3 Hz 是比较合理的。

3.5 噪声处理效果比较

为了满足地铁地震警报系统对准确性的要求，需要从各种环境振动噪声中有效提取地震动信号。

环境振动噪声主要包括地铁电气设备工作引起的 50 Hz 市电干扰和列车振动噪声。地震动信号的频率主要集中在 10 Hz 以下，且列车振动信号的高频成分大于 10 Hz，因此，环境振动噪声的高频成分可以较为容易地从地震动信号中被滤除。

日本新干线地震预警采用的是两个级联滤波器，滤波频带为 0.05 ~ 5 Hz，由于此种滤波器设计难度比较大，因此实际采用 0.075 ~ 5 Hz 的 4 阶带通滤波器（宋晋东，2013）。在计算仪器地震烈度时，日本气象厅所使用的幅值滤波器的滤波频带为 0.5 ~ 10 Hz（张红才，2013）。为了尽可能滤

除地震动信号中属于地铁环境振动噪声（列车振动以及市电干扰），本文分别选择 0.3 Hz 和 10 Hz 作为巴特沃斯带通滤波器的低频和高频截止频率。日本气象厅仪器烈度、日本新干线地震预警以及本文所采用的滤波器的频率响应如图 10 所示。

综上所述，本节首先基于频谱滑动平均法计算确定各测试车站地脉动信号和列车振动信号的频谱滤波频带范围为 0.3 ~ 10 Hz，然后采用巴特沃斯带通滤波器滤除地震动信号中环境振动噪声，

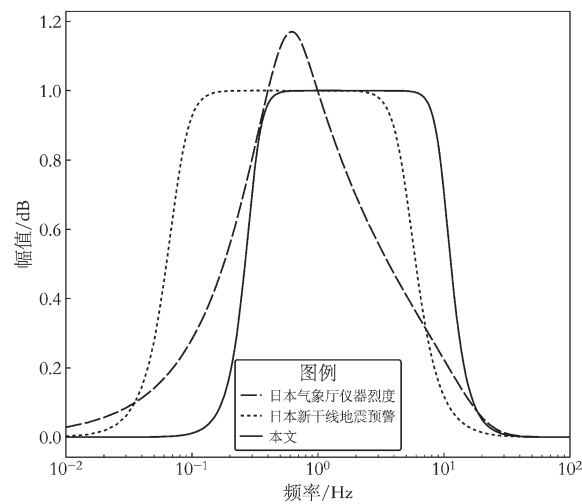


图 10 滤波器频率响应示意
Fig. 10 Diagram of filter frequency response

最后计算得到各测试车站经滤波处理后的列车振动信号的峰值加速度均方根平均值（表 7）。

表 7 各测试车站滤波后的列车振动的峰值加速度均方根平均值

Tab. 7 Average MSR peak acceleration of filtered train vibration at all testing stations					单位: gal
传感器位置	竖向	切向	径向	三轴向合成值	
博物馆站 - LEA	0.046 1	0.012 6	0.020 4	0.052	
博物馆站 - LSA	0.035 7	0.016 0	0.021 9	0.045	
和兴路站 - LEA	0.059 1	0.018 8	0.029 9	0.069	
和兴路站 - LSA	0.067 0	0.014 7	0.025 6	0.073	
理工大学站 - LEA	0.041 9	0.016 8	0.031 6	0.055	
理工大学站 - LSA	0.030 9	0.013 0	0.016 6	0.038	
桦树街站 - LEA	0.068 5	0.018 1	0.025 6	0.076	
桦树街站 - LSA	0.039 6	0.020 1	0.027 1	0.052	

对比表 3 和表 7 可知，经滤波处理后的列车振动 $(3.8 \sim 7.6) \times 10^{-2}$ gal 与地脉动信号的峰值加速度均方根平均值 $(3.7 \sim 8.5) \times 10^{-2}$ gal 处于相同数量级，且被包含在地脉动信号的峰值加速度均方根平均值区间内。

考虑博物馆站观测点列车振动信号的滤波前后效果，从图 11 可以看出：经过滤波处理后，市电干扰以及列车振动干扰均被滤除。因此，本文确定的巴特沃斯带通滤波器的滤波频带（0.3 ~ 10 Hz）

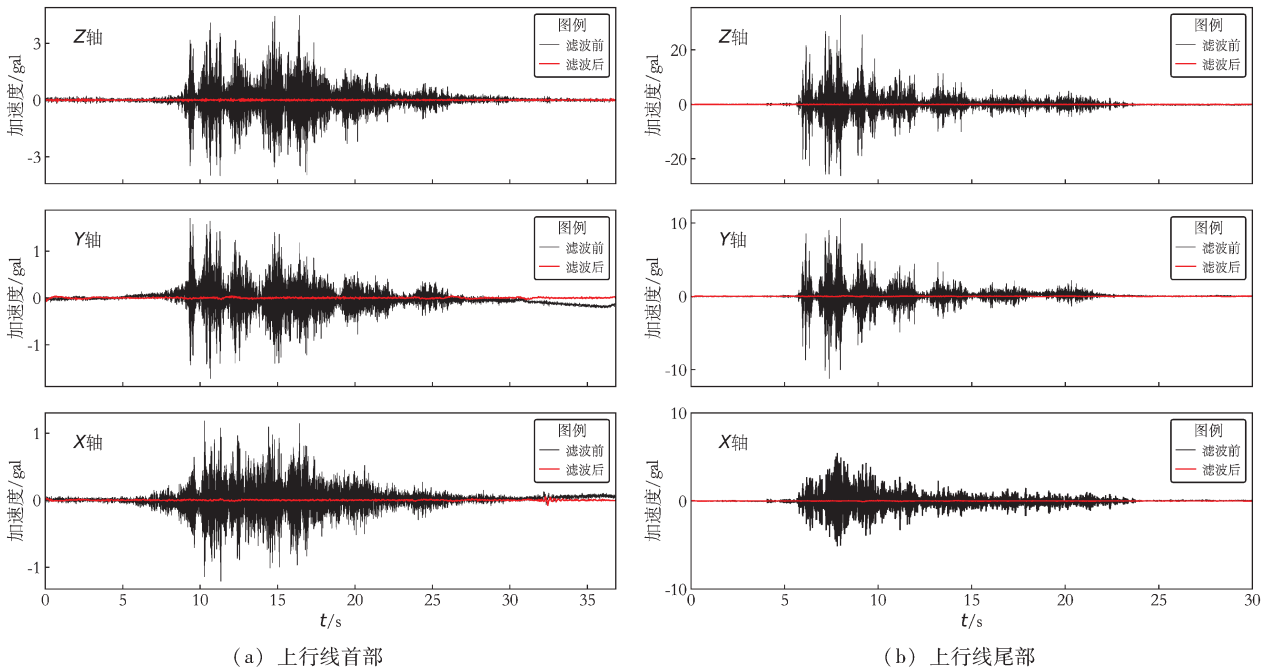


图 11 博物馆站观测点列车振动滤波前后的时程曲线
Fig. 11 Time-series curves of filtered and unfiltered train vibration at the Museum Station

是合理的,其对哈尔滨地铁环境振动噪声的滤波处理效果是明显的。

经过以上降噪处理后,地铁地脉动信号和列车振动信号的峰值加速度均方根平均值远远小于地震警报系统对地震信号信噪比的要求,可更容易识别出地震 P 波信号。

4 结论

本文以哈尔滨地铁 1 号线包含Ⅱ类和Ⅲ类 2 种场地土类型的 4 个地铁站的上行线首部和尾部作为观测点,展开地铁环境振动噪声的测试、分析以及降噪处理研究,得出以下结论:

(1) 各测试车站观测点洞体的地脉动信号的加速度均方根平均值在 $(3.7 \sim 8.5) \times 10^{-2}$ gal。三轴向地铁列车振动信号中,与水平向振动相比,各测试车站列车的竖向振动较大;在水平向振动中,轨道切向振动较大于径向振动,且水平向合成值在 2.1 ~ 18.0 gal。

(2) 各测试车站观测点凌晨安静时段的地脉动信号受地铁环境工作的电气设备引起的频率为 50 Hz 的市电干扰的影响较大。经高频截止频率为 10 Hz 的巴特沃斯低通滤波器进行滤波处理后的地脉动信号的卓越频率和场地土类型有明显的对应关系,即:水平向卓越频率和场地土类型的相关性较好,而竖向卓越频率的误差较大。

(3) 基于滑动平均法的经验方法确定帕曾窗带宽 b 值为 0.4 Hz,平滑化后的频谱能较好地反映地脉动信号的频谱主频。确定各测试车站地脉动信号和列车振动信号的频谱滤波频带为 0.3 ~ 10 Hz 时,能较好地滤除地脉动信号中地铁环境振动噪声(列车振动以及市电干扰)的频率成分。并与日本气象厅仪器地震烈度以及新干线地震预警系统的滤波频带进行对比。经过该频带滤波处理后的列车振动信号与地脉动信号的峰值加速度均方根平均值处于同一数量级上,且被包含在地脉动信号的峰值加速度均方根平均值区间内,而且远远小于地震警报系统对地震信号信噪比的要求。

本文所得到的从各测试车站观测点采集的凌晨安静时段的地脉动数据以及列车工作时段的车振动数据的分析结果可为今后城市地铁紧急处置技术研究提供参考依据,测试数据本身亦可为

今后城市地铁的地震安全性评价和设计提供极具价值的科学数据支撑。

本课题组在对哈尔滨地铁 1 号线进行环境振动噪声测试的过程中得到了哈尔滨地铁集团有限公司的宝贵支持与配合,在此表示衷心感谢!

参考文献:

- 薄景山. 2003. 哈尔滨市轨道交通一期工程场地地震安全性评价报告[R]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 大崎顺彦. 2008. 地震动谱分析入门[M]. 北京:地震出版社.
- 黄蕾,方云,严绍军,等. 2009. 地脉动测试测定场地的卓越周期[J]. 水利与建筑工程学报,7(1):122-123.
- 建设部综合勘察研究院. 1995. 场地微振动测量技术规程[M]. 北京:中国计划出版社.
- 李友鹏,邹桂高. 2004. 地脉动测试技术若干问题的讨论[J]. 岩土工程技术,18(4):199-203.
- 彭远黔,路正,李雪英,等. 2000. 场地脉动卓越周期在工程抗震中的应用[J]. 华北地震科学,18(4):61-68.
- 宋晋东,教聪聪,李山有,等. 2018. 基于地震 P 波双参数阈值的高速铁路 I 级地震警报预测方法[J]. 中国铁道科学,39(1):138-144.
- 宋晋东. 2013. 高速铁路运行控制用地震动参数及单台地震预警技术研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 徐旋. 2018. 城市轨道交通多参数地震报警研究——以哈尔滨地铁为例[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 曾立峰. 2012. 地脉动在黄土地区厚覆盖层探测中的应用研究[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所.
- 张红才. 2013. 地震预警系统关键技术研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- Thompson D. 2013. 铁路噪声与振动:机理、模型和控制方法[M]. 中国铁道科学研究院节能环保劳卫研究所译. 北京:科学出版社.
- Kanai K, Tanaka T, Osada K. 1954. Measurement of the microtremor[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, 32(2):199-209.
- Muller R. 2008. Measures for open lines against vibration and ground-borne noise: A swiss overview, from noise and vibration mitigation for rail transportation systems; Proceedings of the 9th International Workshop on Railway Noise[M]. Berlin: Springer.
- Omori F. 1908. On micro-tremors[J]. Bulletin of the Imperial Earthquake Investigation Committee, 2(1):1-12.
- Udwadia F E, Trifunac M D. 1973. Comparison of earthquake and microtremor ground motions in EL Centro, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 63(4):1227-1253.
- Yokoshima S, Tamura A. 1999. A study on factors constituting annoyance due to Shinkansen railway vibration[J]. Journal of Architecture and Planning, 64(526):1-7.

Environmental Vibration Noise Measurement and Reduction of the Harbin Metro

YU Haiying^{1,2}, ZHU Da^{1,2}, ZHOU Baofeng^{1,2}, XU Xuan^{1,2}, MA Wenxi^{1,2}

(1. *Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China*)

(2. *Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China*)

Abstract

Considering the impact of environmental vibration noise induced by current urban subways on the identification of seismic signals of earthquake alert system of future urban subway, we select the upline heads and tails of 4 subway stations of the Harbin Metro Line 1 whose types of site soil include both type II and type III as the observing points to carry out the measurement and reduction analysis of environmental vibration noise caused by the urban underground. Firstly, we use statistical methods to analyze the data collected from the testing stations, and the analytical result shows that the amplitudes of vertical vibration of the subway train are greater than that of the horizontal vibration and the amplitudes of tangential vibration are greater than that of the radial vibration among the tri-axial train vibration signals of subway train. Secondly, based on the moving average method, we propose an empirical method for determining the bandwidth of the Parzen Window, that is, b value. It shows that when the bandwidth is set as 0.4 Hz, the dominant frequency component of the Fourier spectrum of the ground pulsation signal is salient after the ground pulsation signal are smoothed and filtered. Besides, there are clear corresponding relationships between the predominant frequency of the filtered ground pulsation signal and the type of site soil. In other words, the correlation between the predominant frequency of horizontal ground pulsation signal and the type of site soil is better, while the predominant frequency of vertical ground pulsation signal has a larger error. Finally, based on the empirical method mentioned above, we determine the filtering frequency band of P-wave earthquake early warning system pertaining to the Harbin Metro and then compare it with the filtering frequency band designed for both the Japan Meteorological Agency's instrumental intensity and the Shinkansen earthquake early warning system. And we find that when the filtering frequency band is set between 0.3 Hz and 10 Hz, the P-wave earthquake early warning system of the Harbin Metro can better filter out the frequency components belonging to the environmental vibration noise of the urban subway among the mixture of seismic signal and vibration noise and meet the requirements of the earthquake alert system for the signal-to-noise ratio of the seismic record.

Keywords: urban subway; environmental vibration noise; noise treatment; filtering frequency band