

利用单检波器数据估计高铁列车运行速度

王晓凯^{1,2} 王保利^{2,3} 陈文超^{1,2,†} 李嘉琪^{2,4}

1. 西安交通大学信息与通信工程学院, 西安 710049; 2. 高铁地震学联合研究组, 北京 100029; 3. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 西安 710049; 4. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

† 通信作者, E-mail: wencchen@xjtu.edu.cn

摘要 在列车结构基本上固定的前提下, 仅利用高铁线路隔离区外单个检波器采集的地震数据来估计高铁的运行速度。通过给出列车经过铁路上一点时该点的受力函数振幅谱与列车运行速度的关系, 提出一种基于速度扫描的列车速度估计方法。首先根据列车结构参数及预设列车运行速度生成一系列受力函数振幅谱, 然后计算各种速度下的受力函数振幅谱与单个检波器所接收到信号振幅谱的互相关函数, 最终选取互相关函数值最大时对应的速度作为列车运行速度的估计值。合成数据及实测数据的结果均证明所提方法的合理性, 有望将此方法推广到其他道路交通中具有固定结构交通工具的速度估计中。

关键词 速度估计; 高铁列车; 振幅谱; 互相关; 速度扫描

Using the Data from One Receiver to Estimate Running Velocity of High-Speed Train

WANG Xiaokai^{1,2}, WANG Baoli^{2,3}, CHEN Wenchao^{1,2,†}, LI Jiaqi^{2,4}

1. School of Information & Communication Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049; 2. The Joint Research Group of High-Speed Train Induced Seismology, Beijing 100029; 3. Xi'an Research Institute of China Coal Research Institute, Xi'an 710049; 4. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: wencchen@xjtu.edu.cn

Abstract Based on the fixed carriage structure assumption, the acquired dataset from one receiver near the high-speed railway can be used to estimate running velocity of high-speed train (HST). We derive the relationship between the load function and the speed of the railway, and then propose the HST velocity estimating method based on velocity scanning. Firstly, this method generates a series of amplitude spectra of load function according to a series of preset velocity. Then a series of cross-correlation coefficients between the pre-computed amplitude spectra and the amplitude spectrum of the real signal from one pre-buried receiver can be computed. The velocity with maximum cross-correlation coefficients is chosen as a final velocity estimation of HST. Finally, one synthetic data example and some real data examples illustrate our method's effectiveness. Furthermore, the proposed method has the potential to be further extended to estimate running velocity of moving objects with the fixed structure in other road traffic.

Key words velocity estimation; high-speed train; amplitude spectrum; cross-correlation; velocity scanning

1964年, 日本新干线的商业运营开启世界高铁发展的新时代。随后, 法国、德国、加拿大、意大利、瑞典及韩国等国家争相建设高铁, 并开通商业运营。中国于2008年8月1日开通首条商业运营高铁线路——京津城际铁路。根据国家发展改革委

会、交通运输部及中国铁路总公司2016年7月13日联合发布的《中长期铁路网规划》, 到2025年, 中国的高速铁路将达到3.8万公里左右。截至目前, 中国高铁营业里程达3.1万公里, 接近世界高铁总营业里程的70%。2019年7月10日零时起, 全国铁

国家自然科学基金(41974131, 41774135)、中央高等学校基本科研业务费(bgjs2018003, xjj2016065)和国家重点研发计划(2017YFB0202902)资助

收稿日期: 2019-07-23; 修回日期: 2019-08-12

路实施新的列车运行图,每天开行动车组列车达3310对。

数量如此庞大的列车高速运行在高铁线路上,获得高铁列车运行速度,是监测列车运行安全的重要手段之一。直接利用列车上的转速计可以获得列车运行速度,但无法确定列车在通过某个位置时的速度。此外,高铁列车携带的GPS设备可提供列车速度以及列车实时位置。上述两种方法所需的设备均安装在列车上,如何利用独立于高铁列车的设备来估计列车运行速度,是提高高铁监控系统冗余性及保障列车安全的重要手段^[1]。

常用的外部测速系统和方法有基于摄像机的速度估计系统、基于光学传感器或两个震动传感器的列车速度估计方法、利用多普勒效应的雷达测速方法以及基于车轮计数的速度估计方法等。

基于摄像机的速度估计系统利用列车在视频中的帧数和帧速率,可估计列车运行速度,但对设备的要求较高(高清高速摄像机),同时需要安装在能够看到铁轨的位置^[2]。

基于光学传感器的估计方法是在线路两侧分别放置一个持续发射激光的发射器及一个激光接收器,列车通过时,接收器将接收不到激光,可利用未接收到激光的时间及车长来估计列车运行速度^[3]。与基于光学传感器的列车速度估计方法类似,在高铁线路一侧相隔一定距离布置两个振动传感器,利用两个传感器接收到信号的时差来计算列车运行速度^[4]。该方法的主要缺点是需要将仪器安装至铁轨附近,有可能对列车安全造成一定的危害。

基于多普勒效应的雷达测速方法主要利用多普勒效应来测速,但速度测量精度与设备的安装位置相关,例如当雷达与线路平行且正对列车行驶方向时,可获得最高的精度。

基于车轮计数的方法需要在铁轨上安装传感器,对通过的车轮数目进行计数^[5],由此计算列车速度。该方法需要接触铁轨,因此需要得到特别许可,且必须由经过专业培训的人员实施。

综上所述,如何使用在线路隔离区外的仪器来获取高铁列车运行速度,是一个值得研究的课题。由于中国高铁列车具有相对固定的结构,因此铁轨上某一点的受力函数与高铁列车运行速度密切相关。高铁高速运行在线路之上,受力铁轨会产生形

变,并以地震波的形式将振动传播出去。因此,地震波与铁轨受力函数之间会有明显的相似性^[6]。本文尝试利用高铁线路单个检波器接收到的信号振幅谱与铁轨受力函数振幅谱之间的相关性,给出一种基于速度扫描的高铁列车运行速度估计方法。

1 铁轨受力函数的理论振幅谱

一些学者在研究高铁铁轨及路基振动时,将移动的列车对钢轨某处的作用力建模为点力的累加^[7-9]^①。若一列列车中有 M 对车轮,高铁列车匀速通过铁轨且速度为 v ,假设列车车头通过铁轨上 A 点的时刻为0时刻,第 m 对车轮到第一对车轮的距离为 $d(m)$,则 A 点受力的计算公式^①为

$$f(t) = C \sum_{m=1}^M \delta \left[t - \frac{d(m)}{v} \right], \quad (1)$$

其中 C 为常数,与列车的轴重及负载有关。对式(1)做傅里叶变换,得到 A 点受力 $f(t)$ 的傅里叶变换为 $F(\omega)$:

$$F(\omega) = C \sum_{m=1}^M \delta \exp \left[-j\omega t \frac{d(m)}{v} \right]. \quad (2)$$

中国高铁列车的典型运行速度为250, 300和350 km/h。列车典型参数如下: 8节或16节车厢;一节车厢长度约为25 m;一节车厢的4对车轮距该车厢头部的距离分别为4, 6.5, 18.5和21 m。将上述典型参数(车速设定为300 km/h)带入式(2),则对应 A 点受力的振幅谱如图1(a)所示。该振幅谱呈现典型的窄带分立谱特征^[10-11]^①,且谱峰的位置与深圳某高铁线路附近单趟列车经过时单检波器观测到的实际数据振幅谱(图1(b))以及多趟列车经过时单检波器观测到的实际数据平均振幅谱(图1(c))基本上一致。

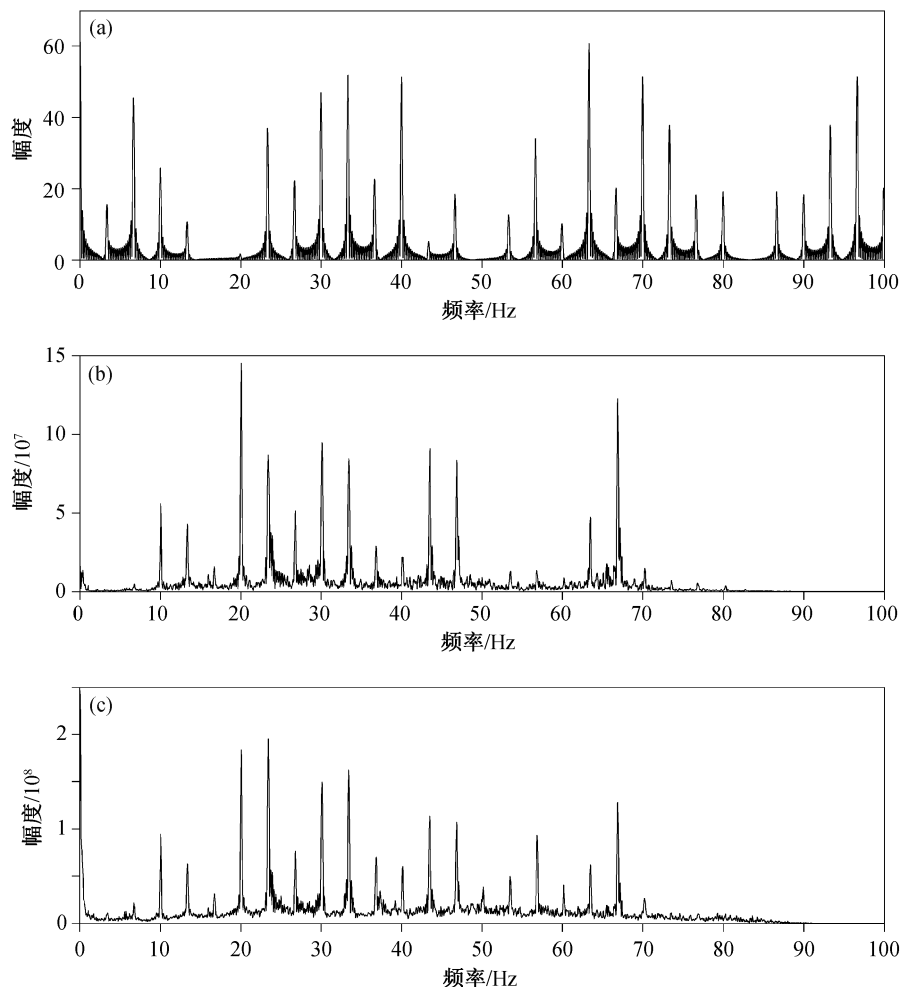
假设中国高铁列车具有 N 节车厢,一节车厢长度为 D (单位: m),第一对车轮与第二对车轮之间的距离为 D_1 ,第一对车轮与第三对车轮之间的距离为 D_2 ,高铁列车匀速通过铁轨 A 处且速度为 v ,则式(1)可变形为3个函数的卷积形式:

$$f(t) = C s_1(t) * s_2(t) * s_3(t), \quad (3)$$

其中,

$$s_1(t) = \delta(t) + \delta \left[t - \frac{D_1}{v} \right], \quad (4)$$

① 骆毅,私人通信。



(a) 铁轨受力函数的振幅谱; (b) 一趟列车经过时单检波器接收地震数据的振幅谱; (c) 多趟列车经过时单检波器接收地震数据的平均振幅谱

图1 实际观测数据振幅谱与铁轨受力函数理论振幅谱对比

Fig. 1 Comparison of real dataset's amplitude spectra and railway load function's theoretical amplitude spectrum

$$s_2(t) = \delta(t) + \delta\left[t - \frac{D_2}{v}\right], \quad (5)$$

$$s_3(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \delta\left[t - \frac{nD}{v}\right]. \quad (6)$$

根据卷积的性质, 式(3)的傅里叶变换为

$$F(\omega) = CS_1(\omega)S_2(\omega)S_3(\omega), \quad (7)$$

其中,

$$S_1(\omega) = \cos\left(\frac{\omega D_1}{2v}\right) e^{-j\omega \frac{D_1}{v}}, \quad (8)$$

$$S_2(\omega) = \cos\left(\frac{\omega D_2}{2v}\right) e^{-j\omega \frac{D_2}{v}}, \quad (9)$$

$$S_3(\omega) = \frac{\sin\left(0.5N\omega \frac{D}{v}\right)}{\sin\left(0.5\omega \frac{D}{v}\right)} e^{-j0.5(N-1)\omega \frac{D}{v}}. \quad (10)$$

因此, 铁轨上一点受力函数的理论振幅谱可简化为3项的乘积:

$$|F(\omega)| = C |S_1(\omega)| |S_2(\omega)| |S_3(\omega)| = C \left| \cos\left(\frac{\omega D_1}{2v}\right) \right|$$

$$\cos\left(\frac{\omega D_2}{2v}\right) \left| \frac{\sin\left(0.5N\omega \frac{D}{v}\right)}{\sin\left(0.5\omega \frac{D}{v}\right)} \right|. \quad (11)$$

若取列车运行速度为300 km/h, 列车车厢数为16节, 车厢长度约为25 m, 一节车厢内第一对车轮与第二对车轮之间的距离 $D_1=2.5$ m, 第一对车轮与第三对车轮之间的距离 $D_2=14.5$ m, 上述3个函数的振幅谱分别如图2(a)~(c)所示, 而受力函数的理论振幅谱(图2(d))为上述3个振幅谱的乘积。经过分析, 各窄带谱峰之间的距离基本上由列车运行速度

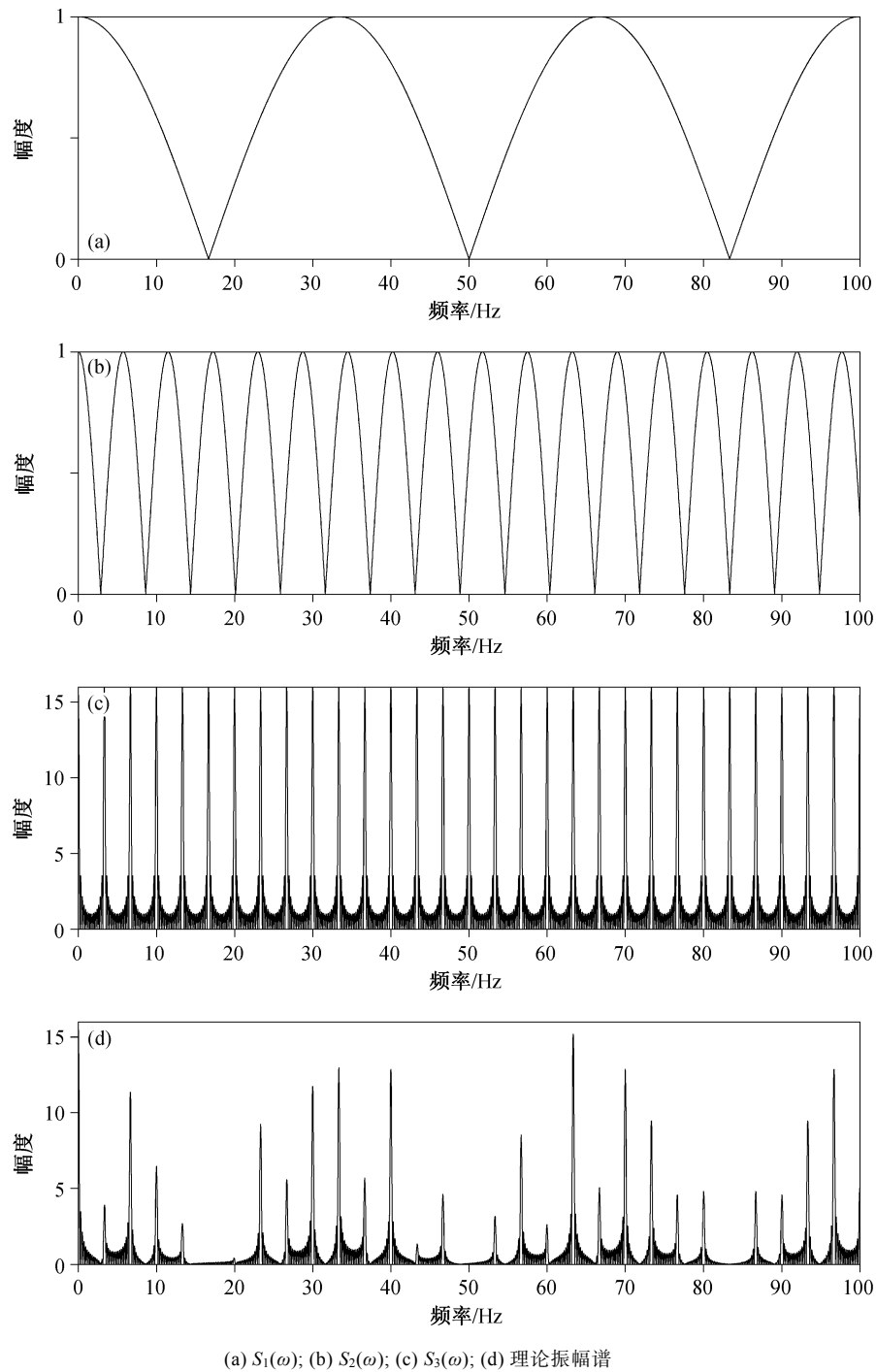


图 2 铁轨受力函数的理论振幅谱分解示意图

Fig. 2 Decomposition of railway load function's theoretical amplitude spectrum

及单节车厢长度确定。

2 仅利用单检波器估计高铁运行速度的方法

由于中国高铁列车的车厢长度基本上相同, 轮对之间的距离也相对固定, 因此式(11)中受力函数

振幅谱的主要变化因素即为列车的运行速度。当假设运行速度与列车的真实运行速度相近时, 铁轨上一点受力函数的振幅谱与实际观测数据的振幅谱在某个频段内具有很强的相似性(如图 1 所示), 尤其是各谱峰之间的距离。将铁轨上各点受力函数作为震源, 可将单个检波器接收到的地震波看成众多震

源综合积分的结果,则检波器接收到的信号与受力函数振幅谱必然有着强相似性(虽然检波器接收到信号的振幅谱与铁轨上一点的受力函数振幅谱有区别,尤其是各分立谱峰的幅度有差异,但分立谱的间隔仍保持不变)。因此,若能根据运行速度和中国高铁列车的典型参数设计一系列振幅谱模板函数,然后将振幅谱模板函数与高铁线路旁布置的单个检波器接收信号振幅谱做互相关,得到相关系数最大的模板函数,则可获得高铁列车在经过该检波器时的运行速度估计值。

1) 设计振幅谱模板函数。选择典型列车参数:车厢数16节,车厢长度25 m, $D_1=2.5$ m, $D_2=14.5$ m。以一定的速度间隔 Δv_1 ,不断地改变预设的列车速度 v (例如可从30 km/h变化到400 km/h,间隔为1 km/h),得到一系列与速度有关的振幅谱模板函数 $|F(\omega, v)|$:

$$|F(\omega, v)| = C \left| \cos\left(\frac{\omega D_1}{2v}\right) \right| \left| \cos\left(\frac{\omega D_2}{2v}\right) \right| \left| \frac{\sin\left(0.5N\omega\frac{D}{v}\right)}{\sin\left(0.5\omega\frac{D}{v}\right)} \right|, \quad (12)$$

其中, $v = m\Delta v_1$ 。

2) 单检波器振幅谱计算。从高铁线路旁的检波器接收的信号中寻找高铁经过时激发的信号,可以采用幅值与背景噪声的比值来选取,也可采用人工智能的方法截取^[12]。假设截取的高铁运行引起的信号为 $y(t)$,则对该信号做傅里叶变换,得到其振幅谱 $|Y(\omega)|$ 。另外,可以计算实际信号能量谱的累积函数,用来确定大部分能量所在的频率区间 $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ 。

3) 振幅谱模板函数与实际振幅谱互相关。将已有的一系列振幅谱模板函数与实际接收的数据振幅谱做互相关,得出归一化互相关系数 $\text{Corr}(v)$:

$$\text{corr}(v) = \frac{\int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} |F(\omega, v)| |Y(\omega)| d\omega}{\sqrt{\int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} |F(\omega, v)|^2 d\omega} \sqrt{\int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} |Y(\omega)|^2 d\omega}}. \quad (13)$$

4) 寻找最大互相关系数。在所有的互相关系数中寻找最大的互相关系数,并得到对应的速度 v_r :

$$v_r = \arg_v \max \text{corr}(v). \quad (14)$$

5) 缩小搜索范围,再次建立振幅谱模板函数。速度 v_r 确定后,在 $[v_r - \Delta v_1, v_r + \Delta v_1]$ 范围内用更小的速度搜索间隔,再次构建振幅谱模板函数 $|F(\omega, v)|$ 。

6) 通过计算互相关系数,继续获得精确的速度值。利用式(13),继续计算互相关系数,在 $[v_r - \Delta v_1, v_r + \Delta v_1]$ 范围内寻找互相关系数最大的速度 v_{final} ,即得到最终的列车运行速度估计值。

考虑到目前中国运行的高铁车型相对较少,在已估计出列车速度的情况下,可根据不同车型设计振幅谱模板函数,进一步与观测信号振幅谱相匹配,有望估计出列车车型。

3 合成信号算例

我们采用车厢数为16节,车厢长度为25 m, $D_1=2.5$ m, $D_2=14.5$ m,列车速度为300 km/h(相当于83.33 m/s)的合成铁轨受力函数理论振幅谱(图2(d))。同时,采用速度扫描,将速度从1 m/s变化到160 m/s,其他参数不变,生成一系列铁轨受力函数振幅谱模板函数,将其与图2(d)所示的振幅谱做互相关,得到一系列互相关系数,如图3所示。可以看到,最大的互相关系数大约在83.3 m/s附近,这与我们合成图2(d)振幅谱时使用的速度一致,说明利用模板函数与信号振幅谱的互相关系数可估计列车的运行速度。

4 实际列车运行速度估计

我们在距离深圳某高铁线路75 m的位置布置一个检波器。该检波器位于高铁线路隔离区外,不会对列车运行安全造成威胁。由于高铁线路运行繁忙,大约每隔4分钟就有一趟高铁列车经过检波器所在位置。我们选取一趟列车经过时该检波器接收的数据,利用速度扫描方法得到一系列互相关系数,如图4所示。可以看到,最大的互相关系数在83 m/s附近。进一步减少速度扫描间隔,可以找出互相关系数最大的位置对应的速度为83.58 m/s(即300.89 km/h),这与中国高铁的商业运行速度基本上一致,证明了本文方法的有效性。

为了利用更多的数据验证本文方法的有效性,我们选取8趟列车经过时上述检波器接收的数据,分别利用本文方法估计列车运行速度,结论如表1。这8趟列车中有7趟都以约300 km/h的速度经过该检波器,与中国高铁的商业运行速度相匹配;还有1趟列车以248 km/h的速度经过该检波器,这与中国动车组的商业运行速度也基本上匹配。因此,利用本文方法可以很好地估计高铁列车的运行速度。

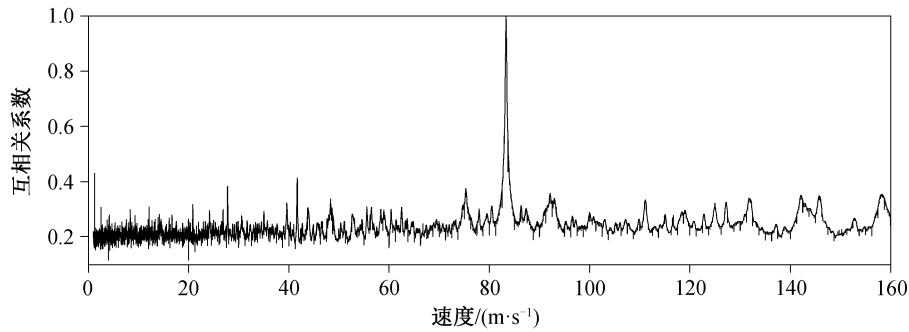


图3 合成数据振幅谱与不同速度振幅谱模板函数的互相关系数

Fig. 3 Cross-correlation coefficients between one synthetic dataset's amplitude spectrum and a series of spectrum templates with different velocity

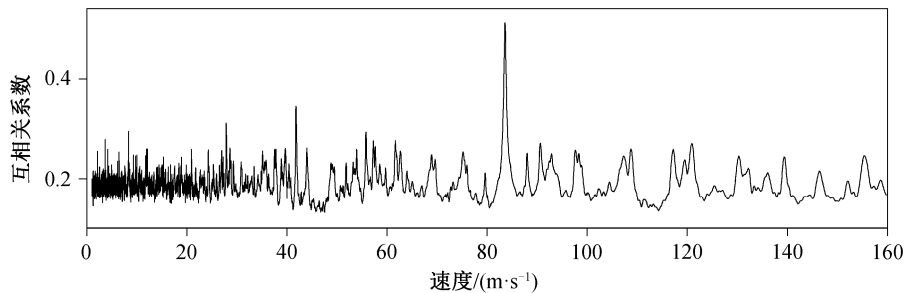


图4 实际数据振幅谱与不同速度振幅谱模板函数的互相关系数

Fig. 4 Cross-correlation coefficients between one real dataset's amplitude spectrum and a series of spectrum templates with different velocity

表1 8趟列车经过时本文方法速度估计结果
Table 1 Velocity estimation results of 8 trains by using the proposed method

列车序号	估计速度/(km·h ⁻¹)
1	300.89
2	301.43
3	306.97
4	304.31
5	303.70
6	247.90
7	302.94
8	304.96

此外,本研究组于2018年12月9日在陕西省眉县境内进行数据采集。沿某高铁线路,在其附近平行于高铁线路布置28个三分量地震检波器,检波器间距约为30 m。上午12点30分30秒,研究组成员乘坐的G430次(兰州至北京)列车经过检波器阵列,列车上车载设备显示当时列车运行速度为253 km/h。对28个检波器接收到的数据,分别利用本文方法进行速度估计,得到28个检波器的平均速度为252.7 km/h,标准差为0.46 km/h。作为对比,我

们将28个检波器做互相关提取时差,利用时差和检波器间距,得到列车平均速度为253.1 km/s。车载设备的精确速度、本文方法估计的速度及利用相邻检波器互相关得到的速度估计值有很好的 consistency,进一步证明本文方法的有效性。

5 结论与讨论

高铁震源地震数据以及铁轨受力函数的振幅谱具有非常相似的振幅谱结构——窄带分立谱结构。本文充分利用这种相似性,提出一种仅利用高铁线路旁单个检波器数据进行高铁列车运行速度估计的方法。首先利用一系列速度值,合成一系列振幅谱模板函数,然后计算实际数据振幅谱与振幅谱模板函数的互相关系数,最后将最大互相关系数所在的速度位置作为高铁列车运行速度的估计值。在深圳的实测结果证实,所提方法的速度估计结果与中国高铁商业运行速度相吻合,在眉县的实测结果说明了本文方法的有效性和准确性。

由于本文方法仅需要一个地震检波器,且不需要将检波器安装在高铁线路隔离区内,同时只需要计算互相关系数等操作,因此与其他方法相比,具

有方法简单、成本低及安全性高的特点。同时,由于方法简单,在将相关算法植入检波器内后,有望实现速度的实时估计。后续工作中若增加更多车型数据,有望实现列车车型的估计。此外,本文方法有望推广到其他道路交通中具有固定结构交通工具的运行速度估计中。

本文方法需要提前利用手工或其他方法截取列车经过的信号,同时需要计算大量的模板函数。后续工作中可采用直接估计分立谱间隔的方法,提高对高铁列车速度的估计精度及效率。

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所李幼铭研究员以及高铁地震学联合研究组同仁的有益讨论,感谢中国科学院地质与地球物理研究所李学良博士及周艳伟先生在数据采集中给予的帮助,感谢刘拜龙先生在车次查询及车体查询方面给予的帮助。

参考文献

- [1] Kouroussis G, Connolly D P, Forde M C, et al. Train speed calculation using ground vibrations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2015, 229(5): 466–483
- [2] Ho C L, Huang H, Hyslip J P, et al. Field measurement of ground response of critical speed high speed trains on soft soil // *Proceedings of the 12th International Railway Engineering Conference*. London, 2013: 1–7
- [3] Ni S H, Huang Y H, Lo K F. An automatic procedure for train speed evaluation by the dominant frequency method. *Computers and Geotechnics*, 2011, 38(4): 416–422
- [4] Kouroussis G, Verlinden O, Conti C. Free field vibrations caused by high-speed lines: measurement and time domain simulation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(4): 692–707
- [5] Allotta B, D’Adamio P, Meli E, et al. Development of a new time domain-based algorithm for train detection and axle counting. *Vehicle System Dynamics*, 2015, 53(12): 1850–1875
- [6] 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
- [7] 和振兴, 翟婉明. 高速列车作用下板式轨道引起的地面振动. *中国铁道科学*, 2007, 28(2): 7–11
- [8] Sheng X, Jones C J C, Thompson D J. A theoretical study on the influence of the track on train-induced ground vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 272: 909–936
- [9] Chen F, Takemiya H, Huang M S. Prediction and mitigation analyses of ground vibrations induced by high speed train with 3-dimensional finite element method and substructure method. *Journal of Vibration and Control*, 2011, 17(11): 1703–1720
- [10] 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
- [11] 王晓凯, 陈建友, 陈文超, 等. 高铁震源地震信号的稀疏化建模. *地球物理学报*, 2019, 62(6): 2336–2343
- [12] 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