

高架桥下方高铁地震波场的特征量提取

鲍铁钊^{1,2} 宁杰远^{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;

† 通信作者, E-mail: njy@pku.edu.cn

摘要 通过互相关方法, 提取高铁列车经过前后沿着高铁桥梁传播的地震波信号。将不同车次的互相关函数叠加, 得到稳定的平均互相关函数, 可以作为高铁地震波场的特征量。该特征量有监测高铁桥梁结构变化的潜力。

关键词 高铁地震波场; 互相关函数; 被动监测

Extraction of Characteristics of Wavefield under Viaduct Produced by High-Speed Rail

BAO Tiezhao^{1,2}, NING Jieyuan^{1,2,†}, ZHANG Xianbing¹

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

Abstract The seismic signal propagating along the viaduct of a high-speed rail when the train is approaching or departing is extracted by cross-correlation method. Stable average cross-correlation function can be obtained by stacking the cross-correlation functions of different trains. The average cross-correlation function can be used as the characteristic quantity of the wavefield produced by high-speed rail. This quantity has potential to monitor the structural changes of the high-speed rail viaduct.

Key words wavefield of high-speed railway; cross-correlation function; passive monitoring

中国幅员辽阔, 地形复杂, 为保证列车高速行驶下的平顺性和稳定性, 铁路建设施工中因地制宜, 采用各种高新技术, 例如大量以桥代路的设计^[1]。高铁及其配套设施(铁轨、地基、桥梁等)的故障可能导致列车晚点和经济损失, 甚至人员伤亡等问题。因此, 高铁及其配套设施的安全性监测具有重要意义。

铁路的日常监测与维护有以下几种模式: 1) 在铁路及配套设施上大规模布设传感器, 如应变片、位移计和温度计等, 观测特征参数的变化^[2], 但由于特征参数的波动范围较大, 难以提取细节的变化; 2) 白天开车、晚上养护的人工模式, 具有一定的主观性^[3-4]; 3) 综合检测列车, 对高铁线路固定设施进行多项目、高速度和高精度的检测^[2], 但检测的时

间间隔较长, 为 10~15 天。

本文将高铁记录视为地震信号, 通过互相关的方法, 提取沿着铁路桥梁传播的振动信号。该振动信号在站台对之间的到时差是一个不变量, 其互相关函数经过叠加后是一个稳定的信号。这个稳定的互相关函数可以作为高铁波场的特征量, 反映桥梁结构的性质, 该特征量的变化有监测桥梁安全性的潜力。

1 站台对间的到时差

高铁列车行驶时, 会发出沿铁路方向传播的振动信号。选取沿着铁路布设的两个观测台站, 当高铁列车处在站台对的延长线上时, 这个信号在站台对间的到时差是一个不变量。如果该信号足够强,

将两个台站相应时段的波形进行互相关, 互相关函数的峰值位置就是信号在台站对间的到时差。如果截取两个台站不同时间段的信号进行互相关, 若得到的峰值位置在较长的时段内保持稳定, 那么该时段的主要信号可能是沿着铁路方向传播的信号。

1.1 数据概况

2018 年 4—6 月, 高铁地震学联合研究组在河北省保定市容城县附近布设两期面状台阵, 观测当地铁路、公路和环境噪音信号。其中一期台阵共布设 EPS 便携式数字地震仪(短周期三分量加速度计) 183 个, 台间距从几十米到几千米不等, 观测时间为 4 月 22 日至 5 月 5 日, 采样频率为 200 Hz。本文采用的数据是第一期台阵中高铁桥梁下方仪器的记录, 主要是 PK021 和 PK050 台站(台间距 2.40 km)垂直分量的记录(图 1)。

1.2 台站对间的到时差

当高铁列车在台站对的延长线上时, 不论高铁列车距离台站对的距离大小, 沿铁路传播的信号在台站对间的到时差不变。如果该信号是高铁列车到

来前仪器记录到的主要信号, 那么在高铁列车到来前, 选用高铁列车在不同位置的信号(也就是高铁列车到来前不同时间段的信号)进行互相关, 互相

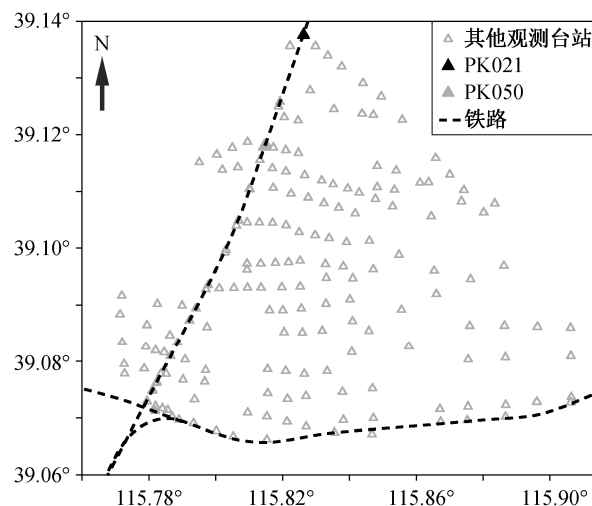
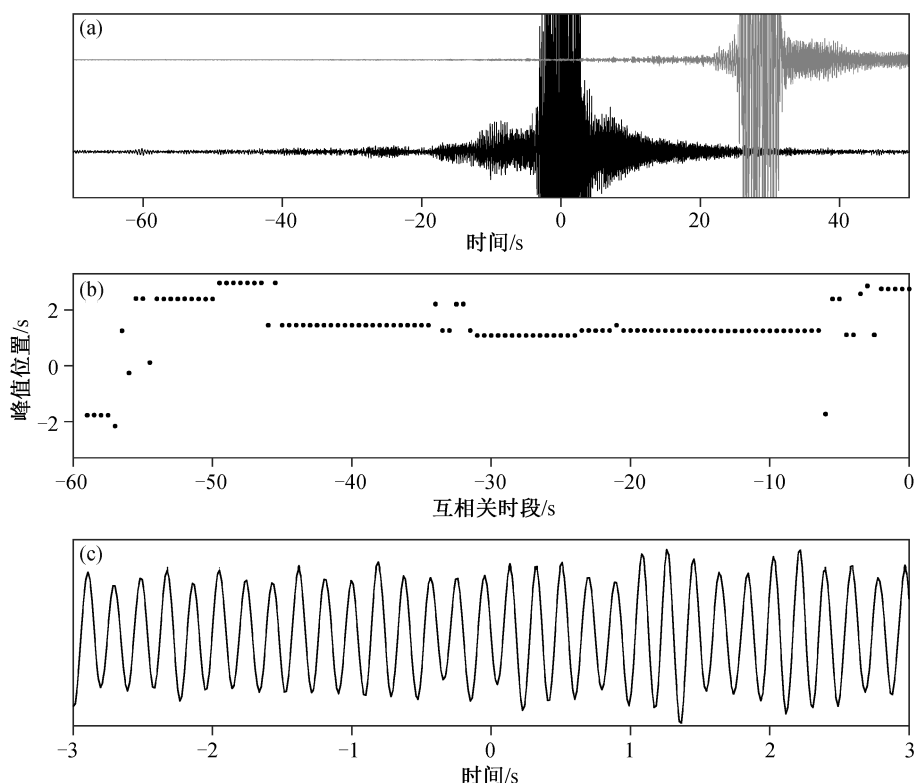


图 1 容城周边观测台阵一期台站分布
Fig. 1 Distribution of observations of the first session around Rongcheng County



(a) 高铁列车经过前后台站的垂直方向波形记录, 0 时刻近似为高铁列车车身中点到达 PK021 台站上方的时间, 黑线为 PK021, 灰线为 PK050; (b) 高铁列车来临前不同时间段 8 s 信号的互相关函数峰值位置, 横坐标定义为截取的信号的中点对应的时刻(本文其他图中不同时段互相关函数峰值位置横坐标的定义与此相同); (c) 典型的互相关函数波形

图 2 不同时间段的互相关函数峰值位置

Fig. 2 Positions of the peak values of the cross-correlation function for different cross-correlation segments

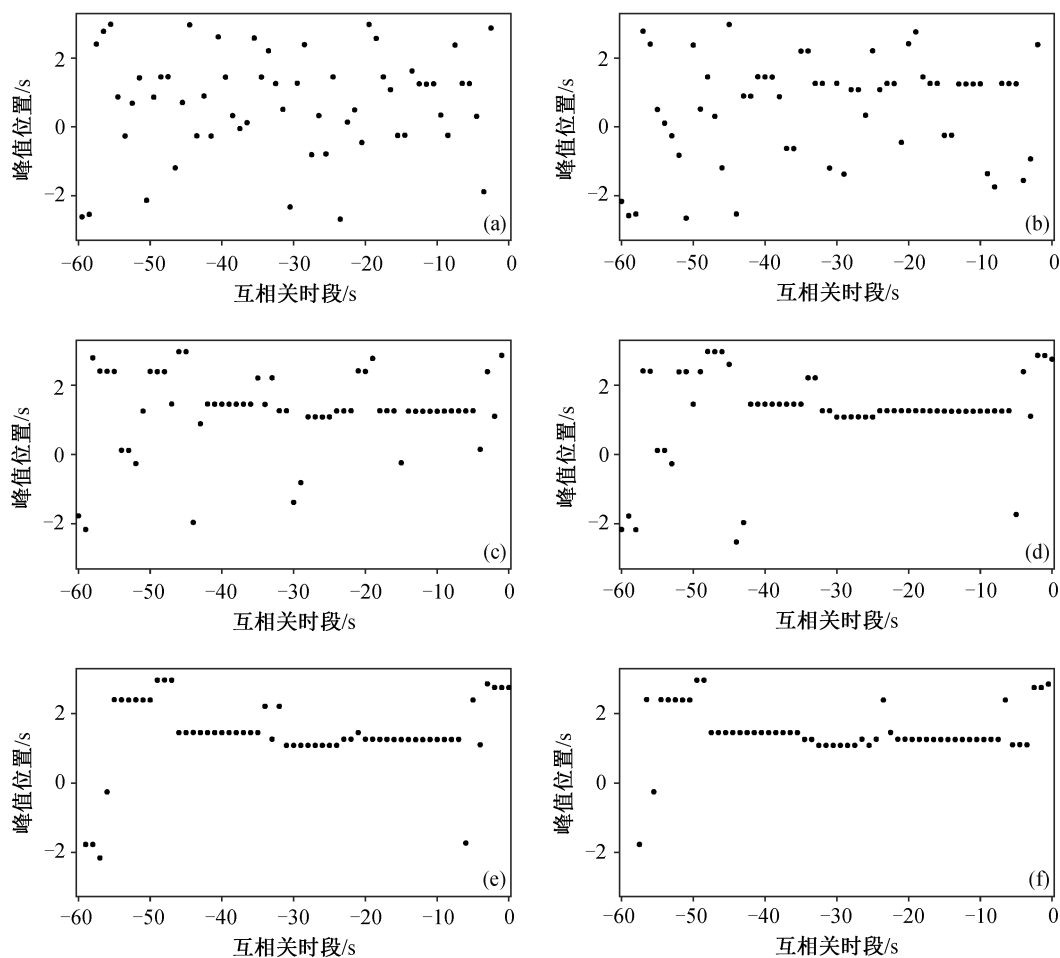
关函数的峰值位置应该保持稳定, 这就是台站对间信号的到时差。

选取一个往南行驶的高铁列车的垂直方向记录, 以高铁列车中点到达 PK021 台站的时间作为 0 时刻, 从 -60 s 开始, 每隔 0.5 s 选取一个时刻, 截取 PK021 台站在该时刻前 4 s 至后 4 s 的数据, 与 PK050 台站对应时段的记录进行互相关, 记录互相关函数在 -3 s 至 3 s 内的峰值位置, 如图 2(b) 所示。

在高铁列车到来前的 60 s 内, 垂直方向波形记录的振幅大于背景噪音, 说明此时台站已经记录到与高铁列车有关的信号(图 2(a))(本文每个图中的多个波形、互相关函数以及频谱等, 均按照最大振幅归一化)。对于高铁列车到来前 7 s 以内的信号(图 2(b)), 由于高铁列车与台站的间距较小, 其他高铁列车相关的信号会影响互相关的结果, 继而影响峰值位置的分布。在高铁列车到来前 7~45 s 时段内, 互

相关函数的峰值位置稳定, 约为 1.260 s(图 2(b))。通过台间距和到时估算的波速为 1.90 km/s。互相关函数频率成分较单一, 主频为 5.3 Hz(图 2(c))。在高铁列车到来前 24~45 s 的部分时段, 峰值也可能出现在 1.085 s 和 1.455 s 附近(图 2(b)), 原因可能是高铁列车距离台站较远时, 沿铁路方向传播的信号振幅较小, 在其他信号的污染下, 峰值位置移动了一个周期。在高铁列车到来的 45 s 之前, 互相关峰值位置会改变(图 2(b)), 反映主要信号的性质发生改变。一些零星的散点可能是局部事件和噪音造成的。由此看来, 在高铁列车到达台站前约 7~45 s 时段内, 沿着铁路方向传播的信号是台站记录的主要信号, 而这个信号在台站对间的到时差, 对于同一列高铁列车是一个不变量。

为了证明互相关结果中峰值稳定的时段内主要信号是沿着铁路传播的, 我们分别测试截取时长、



(a)~(f)中截取时长分别为 1, 2, 4, 6, 8 和 11 s

图 3 不同长度的信号的互相关峰值位置

Fig. 3 Positions of peak values of cross-correlation function for different length of cross-correlation segments

采样频率、车型、火车行驶方向以及台站对选取几个因素对互相关函数峰值位置分布的影响。

1.3 截取时长的影响

为测试截取时长对不同时段互相关函数峰值位置分布的影响,我们选取同样的事件(图 2(a)),分别截取 1, 2, 4, 6, 8 和 11 s 的信号长度,计算互相关函数的峰值位置(图 3)。

当截取的信号较短时,互相关的峰值位置主要是一些零星的散点。当信号长度增加时,峰值位置稳定的时段加长。在信号长度大于 4 s 后,截取时长的增加不会显著地加大稳定时长,但零星的散点会减少。对于不同长度的信号,峰值移动一个周期出现的时段和持续时长稍有不同。就整体而言,当截取信号的长度足够时,截取时长对互相关函数的峰值位置的影响较小。

1.4 采样频率的影响

为测试采样频率对不同时段互相关函数峰值位置分布的影响,我们选取同样的事件(图 2(a)),先将原始信号降采样(分别降采样至 100, 50 和 20 Hz),再截取 8 s 的信号进行互相关,分别计算互相关函

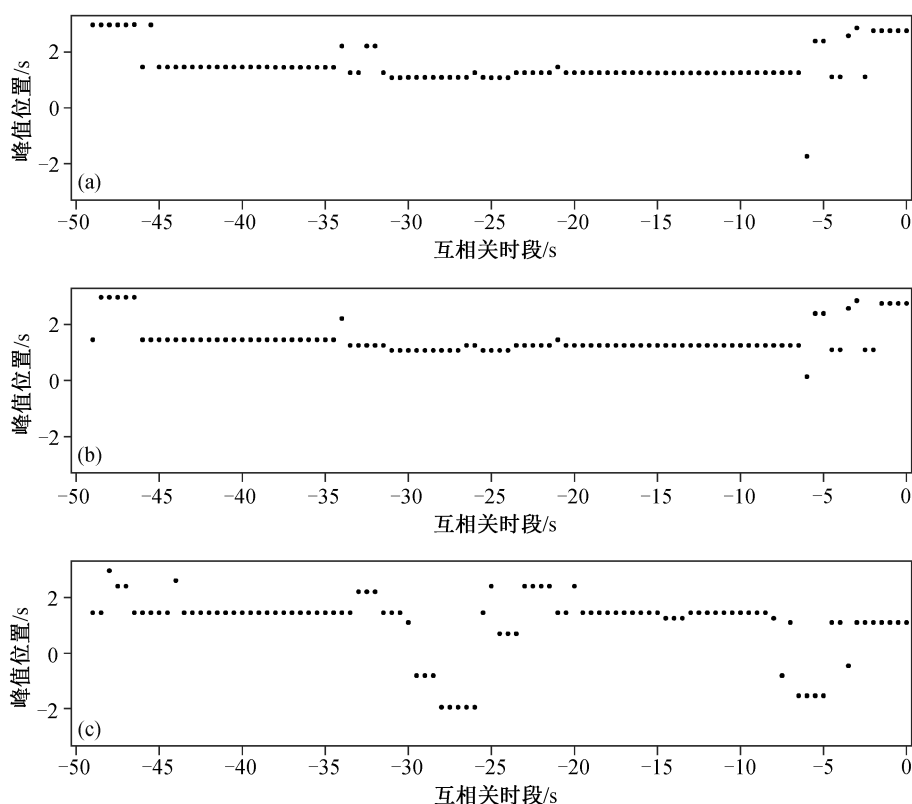
数的峰值位置(图 4)。信号降采样前,先经过 1 型 8 阶切比雪夫低通滤波^[5],防止高频信号的混叠。

当采样频率不低于 50 Hz 时,降采样的操作几乎不影响互相关峰值的位置,有零星散点的峰值位置移动了一个周期。当降采样至 20 Hz 时,部分时段互相关峰值的位置发生改变,可能是由降采样时带来的波形畸变导致的,但峰值位置整体上依旧稳定在 1.260 s。就整体而言,当截取信号的采样频率足够大时,采样频率对互相关函数峰值位置的影响较小。

1.5 车型的影响

为测试车型对不同时段互相关函数峰值位置分布的影响,我们选取不同车型列车经过时的垂直方向记录,截取 8 s 的信号进行互相关,分别计算互相关函数的峰值位置(图 5)。

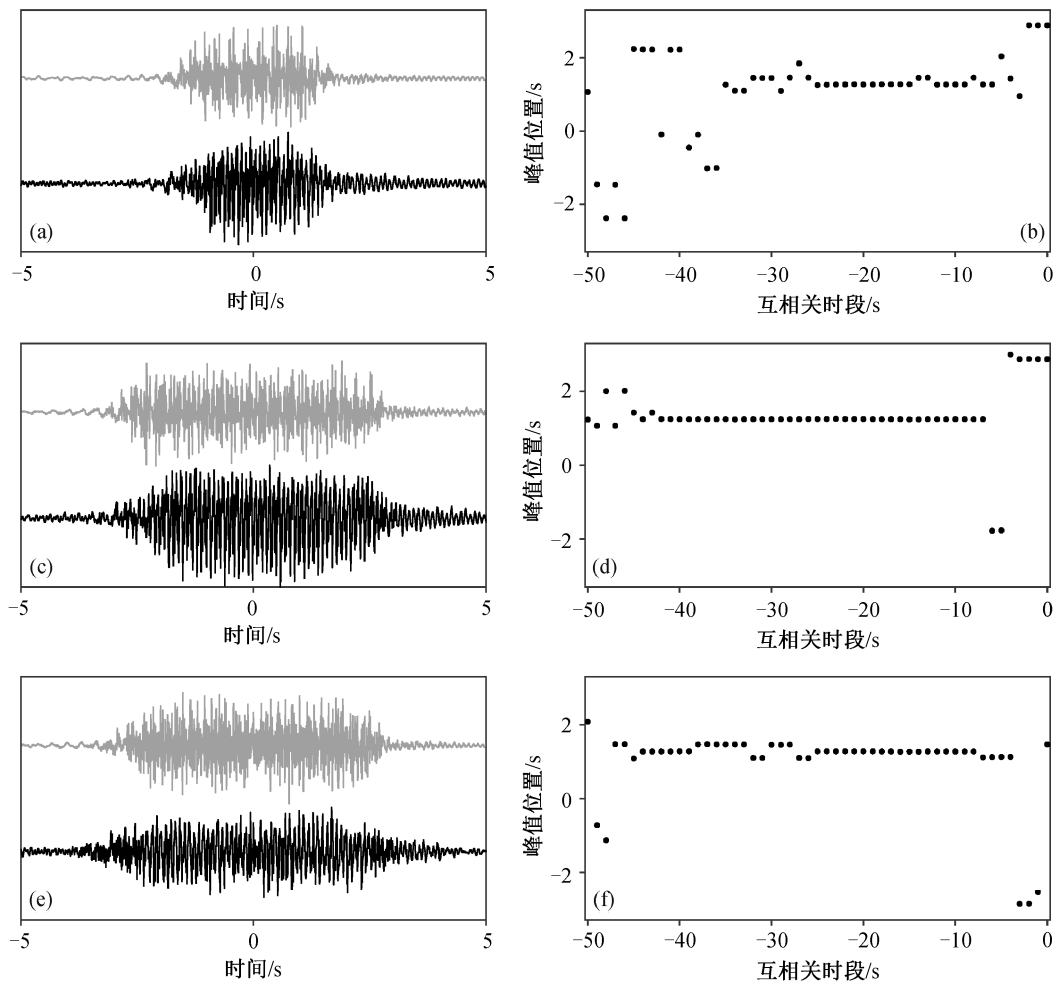
中国现行的高铁动车组列车主要有一列 8 节车厢(记为 8 型)、一列 16 节车厢(记为 161 型)和两列 8 节车厢的编组重联(记为 162 型)3 种车型。同一台站 3 种车型对应的波形记录(图 5(a), (c)和(f))有区别: 8 型的记录时长较短, 161 型和 162 型的记录时



(a)~(c)中采样频率分别为 100, 50 和 20 Hz

图 4 不同采样频率的信号的互相关峰值位置

Fig. 4 Positions of the peak values of the cross-correlation function with different sampling rates



(a) 一个 8 型高铁列车事件在台站的垂直方向记录, 0 时刻定义为高铁列车到达各自台站的时刻, 黑线为 PK021, 灰线为 PK050; (b) 为(a)中事件对应的互相关函数峰值分布; (c)~(d) 一个 161 型高铁列车事件在台站的垂直方向记录和对应的互相关函数峰值分布; (e)~(f) 一个 161 型高铁列车事件在台站的垂直方向记录和对应的互相关函数峰值分布

图 5 不同车型的信号的互相关峰值位置

Fig. 5 Positions of the peak values of the cross-correlation function for different train types

长较长; 8 型和 161 型的记录振幅相对稳定, 而 162 型在 0 时刻附近振幅会降低。3 种车型的互相关函数峰值位置都稳定在 1.260 s 附近(图 5(b), (d)和(e)), 峰值位置移动一个周期和有零星散点存在的现象在 3 种车型的互相关函数结果中都存在。

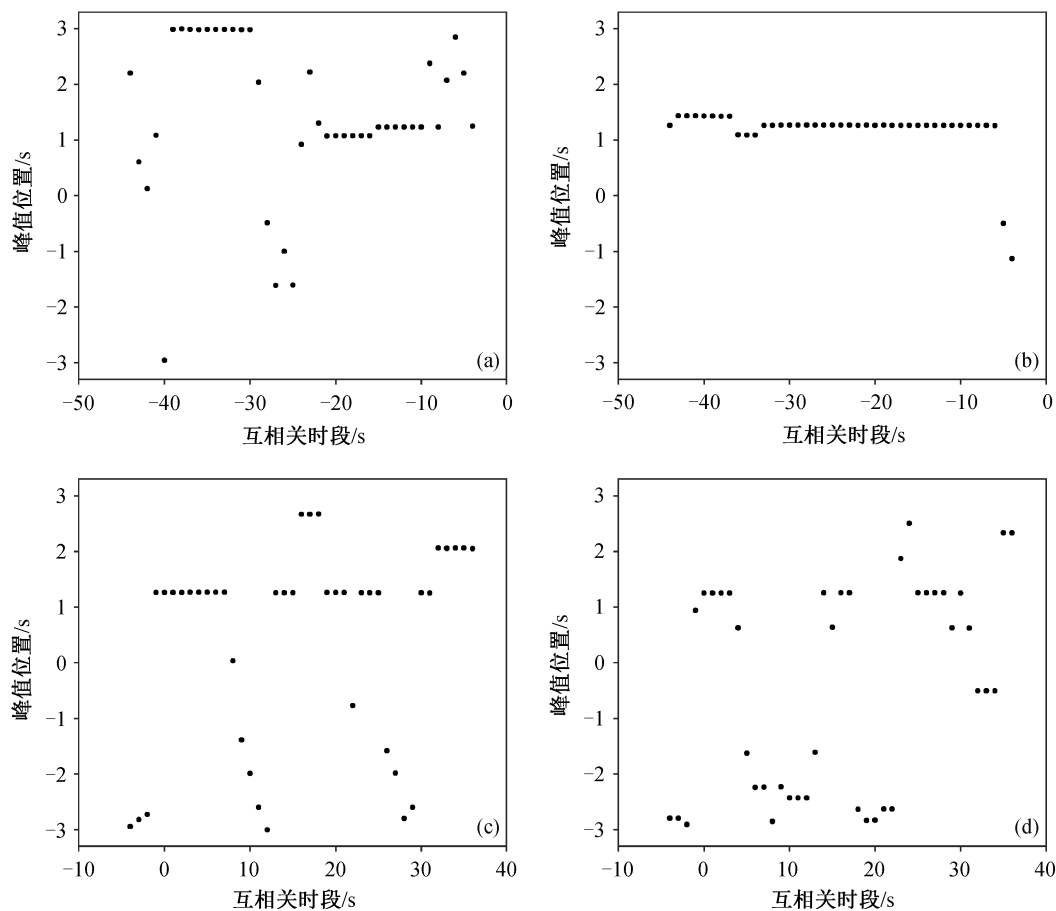
1.6 高铁列车行驶方向的影响

为测试高铁列车行驶方向对不同时段互相关函数峰值位置分布的影响, 我们选取列车在台站对不同方位的记录, 截取 8 s 的信号进行互相关, 分别计算互相关函数的峰值位置。

当高铁列车处在台站对的延长线上时, 根据高铁列车的行驶方向和高铁列车相对于台站的位置, 可以分为以下 4 种类型: 1) 南向行驶的高铁列车靠近北边的台站(记为 R1); 2) 南向行驶的高铁列车离

开南边的台站(记为 R2); 3) 北向行驶的高铁列车靠近南边的台站(记为 L1); 4) 北向行驶的高铁列车离开北边的台站(记为 L2)。这 4 种类型用于互相关的记录时段有所不同。以靠近高铁列车的台站记录为参考信号(0 时刻定义为高铁列车中点到达靠近台站的时间, 对于 R1 型和 L2 型, 是高铁列车中点到达 PK021 台站; 对于 R2 型和 L1 型, 是高铁列车中点到达 PK050 台站), 与远离高铁列车的台站记录进行互相关, 互相关函数反映台站间传播的高铁列车信号。前面的各种测试都是利用南向火车靠近 PK021 台站前的数据, 因此都属于 R1 型。

4 种类型的互相关函数均在 1.260 s 附近出现稳定的峰值(图 6)。R1 型和 L2 型互相关函数峰值稳定的时间段显著长于 L1 型和 R2 型。R1 型和 L2 型的



(a)~(d)分别为L1型、R1型、L2型和R2型互相关函数峰值分布; R2型和L2型互相关函数的参考信号是高铁列车经过之后的信号, 所以截取信号的时间为正值

图 6 不同方向的列车的互相关峰值位置

Fig. 6 Positions of the peak values of the cross-correlation function for different train direction

互相关函数都是用 PK021 台站的记录作为参考信号, 而 L1 型和 R2 型的互相关函数是用 PK050 台站的记录作为参考信号。

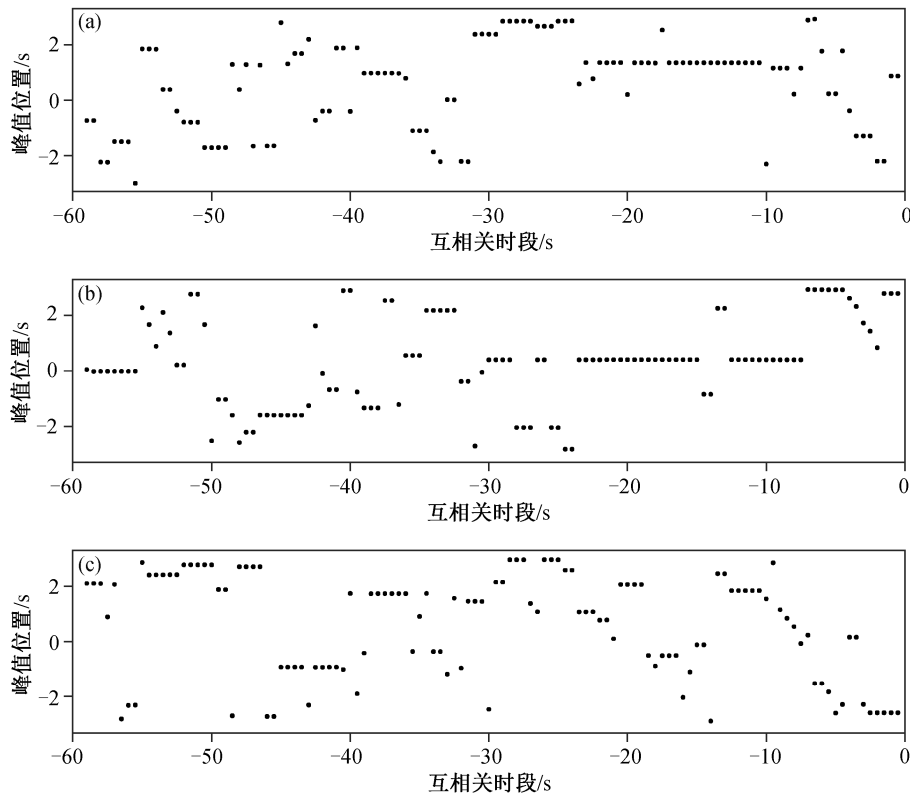
当台站附近有其他结构体时, 仪器记录到的信号除沿着桥梁传播的目标信号之外, 还有其他结构体的振动信号。徐善辉等^[6]的观测也得到类似的结论: 轨道和高架结构的差异会导致不同位置台站的信号不一致。当台站距离桥梁较远, 或台站与地面的耦合情况较差时, 仪器记录的信号中目标信号振幅较小, 噪音变大。当用这样的信号作为参考信号时, 由于噪音和其他信号的干扰, 互相关函数峰值位置稳定的时长减小, 甚至不出现互相关函数峰值位置稳定的时段。

1.7 不同台站对的信号

为测试不同台站对对不同时段互相关函数峰值位置分布的影响, 我们选取图 2(a)中列车在其他台

站对的记录, 截取 8 s 的信号进行互相关, 分别计算互相关函数的峰值位置(图 7)。

部分台站对在不同时段的互相关函数找不到稳定的峰值位置(图 7(c)), 可能与局部结构、台站与桥梁的距离以及台站与地面的耦合等因素相关。多个台站对在不同时段的互相关函数都能找到峰值位置稳定的时段(图 7(a)和(b)), 表明信号的普遍性。稳定的峰值位置更可能在高铁列车到来前 25~10 s 的时间段出现。图 7(a)和(b)中, 通过台站间距与峰值位置估算的波速都是 1.67 km/s, 与图 2(b)中估算结果(1.90 km/s)量级相当。进一步地, 如果将 1.260 s 增加一个周期, 采用 1.455 s 来计算 PK021 和 PK050 台站对间的波速, 估计的速度变为 1.65 km/s, 与图 7(a)和(b)中的结果更为一致。可能是局部结构或其他原因, 使得 PK021 和 PK050 台站对间互相关函数的峰值位置前移了一个周期。



(a) 台间距为 2.25 km, 峰值稳定位置为 1.345 s; (b) 台间距为 0.66 km, 峰值稳定位置为 0.395 s; (c) 台间距为 1.66 km, 无长时间持续稳定的峰值位置

图 7 不同台站对的互相关峰值位置

Fig. 7 Positions of the peak values of the cross-correlation function for different station pairs

1.8 互相关信号的性质

互相关信号的峰值位置在不同的采样频率、不同的信号截取长度下保持稳定, 不同车型、不同行驶方向高铁列车的互相关信号峰值位置一致。这说明这个信号普遍存在, 且主要反映介质结构信息。互相关函数的峰值位置是一个不变量。

如果目标信号的震源是铁路附近的一个异常结构体, 高铁列车经过时激发地震波, 那么振动的持续时间与高铁列车经过的时间相当(约 5 s), 此时互相关函数峰值稳定的时间不会超过振动的持续时间。但是, 实际观测到的互相关函数峰值稳定的时间远超过 5 s, 说明震源是随着高铁列车移动的。高铁列车在不同位置时, 信号的到时差保持不变, 说明信号的路径差在较长时段内保持不变。此时, 高铁列车和台站对正好在一条直线上, 信号是沿着列车与台站的连线传播的, 可以通过桥梁传播, 也可以通过桥梁下方的浅地表传播, 信号的传播方向就是桥梁的走向。

互相关函数估计的速度大于 1.60 km/s, 超过浅地表的弹性波速度。高铁经过时, 信号的频率特征

是 3.3 Hz 的窄带等间距谱^[7-9], 而互相关函数也具有窄带频谱, 频率成分单一, 主频率约为 5 Hz, 不是高铁列车的特征频率, 可能是特定的介质结构导致的。近似单频的信号更有可能源自窄长的桥梁结构, 而非地下介质。较高的波速以及近似单频的互相关函数, 说明信号是沿着高铁桥梁, 而不是桥下的土层传播的。

综上所述, 在列车经过前后, 高铁桥梁下方台站记录的互相关函数是沿着桥梁传播的振动信号的互相关函数, 可以反映桥梁的介质特征。台站间信号的到时差虽然稳定, 可以作为不变量, 然而, 当桥梁局部结构发生变化(如出现裂缝)时, 由于到时的传播路径上慢度的积分, 局部结构的变化对到时的影响十分有限, 因此我们需要寻找其他对介质结构变化更敏感的特征量。

2 通过互相关函数波形变化监测桥梁结构变化

互相关函数的波形对介质结构更敏感。当震源

满足一定的条件时,两个台站的连续记录的互相关函数叠加的结果可以导出台站之间真实的格林函数^[10-12]。根据互相关函数的变化,可以监测介质结构的变化。当互相关函数足够稳定时,即使互相关函数只是部分重构格林函数,也可以监测介质的变化^[13]。

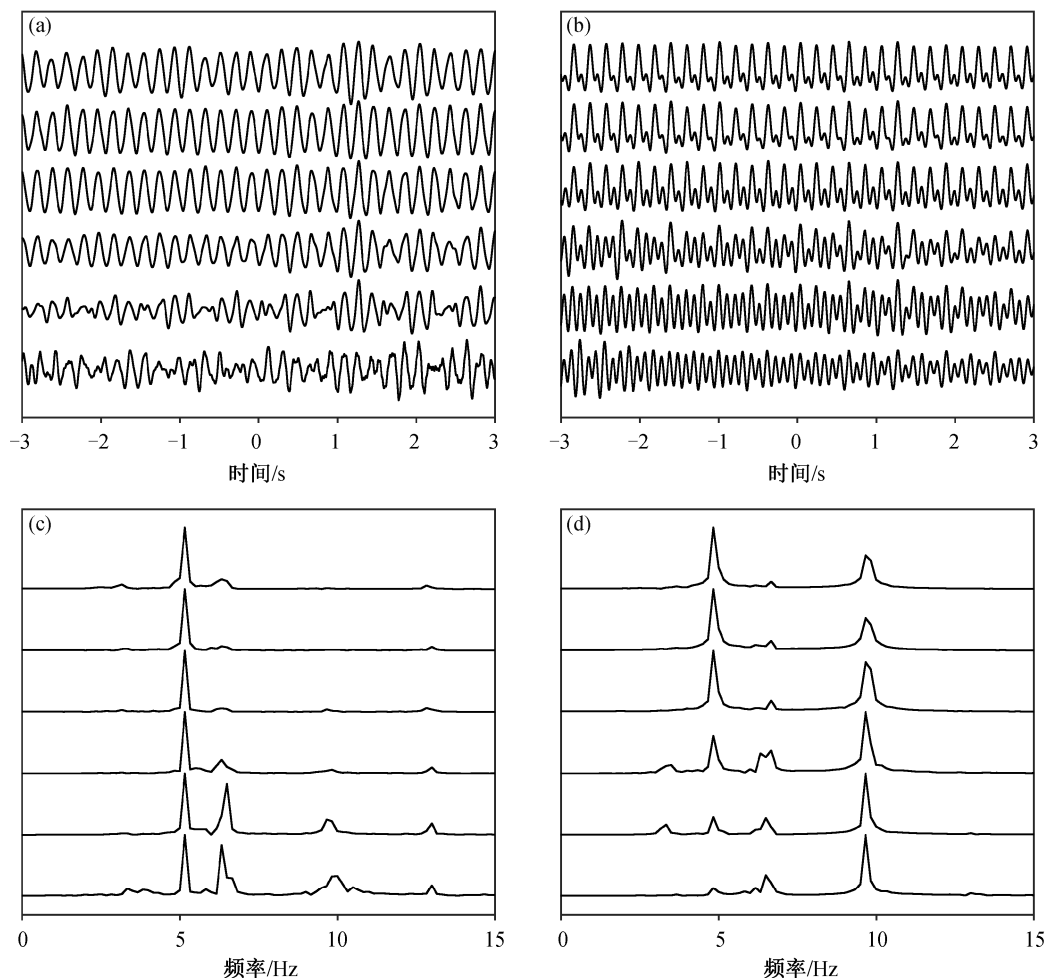
因为桥梁在短时间内保持稳定,我们需要得到稳定的互相关函数,然后才能通过稳定的互相关函数的变化来反映桥梁结构的变化。当信号的波形相近时,通过叠加可以得到稳定的互相关函数。

2.1 互相关类型的选择

R1 型与 L2 型互相关,参考信号是 PK021 台站的数据;R2 型与 L1 型互相关,参考信号是 PK050 台站的数据。采用不同台站的信号作为参考信号

时,互相关函数的波形不一致,因此得到的互相关函数不能直接叠加。对 PK021 和 PK050 台站而言,R1 型与 L2 型互相关函数峰值稳定的时段更长(图 6),所以选择 R1 型与 L2 型互相关。

R1 型与 L2 型互相关,高铁列车都在 PK021 的北边,震源位置一致,但是互相关函数的波形并不一致(图 8(a)和(b)),因此两种类型的互相关函数不能简单地叠加。R1 型与 L2 型互相关函数都含有频率约为 5 Hz 和 10 Hz 的信号,两者的振幅比(5 Hz 信号的振幅除以 10 Hz 信号的振幅)随高铁列车与台站的距离而变化:当高铁列车从远处靠近台站时,两个频率信号的振幅逐渐增加,振幅比逐渐减小;当高铁列车刚离开台站时,互相关函数的主频约为 10 Hz,此时振幅比极小;随着高铁列车远离台站,



(a) 一个典型事件不同时段 R1 型互相关函数,从下至上截取信号的中点依次为高铁列车到来前的 4, 10, 16, 22, 28 和 34 s; (b) 一个典型事件不同时段 L2 型互相关函数,从下至上截取信号的中点依次为高铁列车离开后的 4, 10, 16, 22, 28 和 34 s; (c) 为(a)中互相关函数的对应频谱; (d) 为(b)中互相关函数的对应频谱

图 8 典型的 R1 型和 L2 型互相关函数

Fig. 8 Typical cross-correlation functions of type R1 and L2

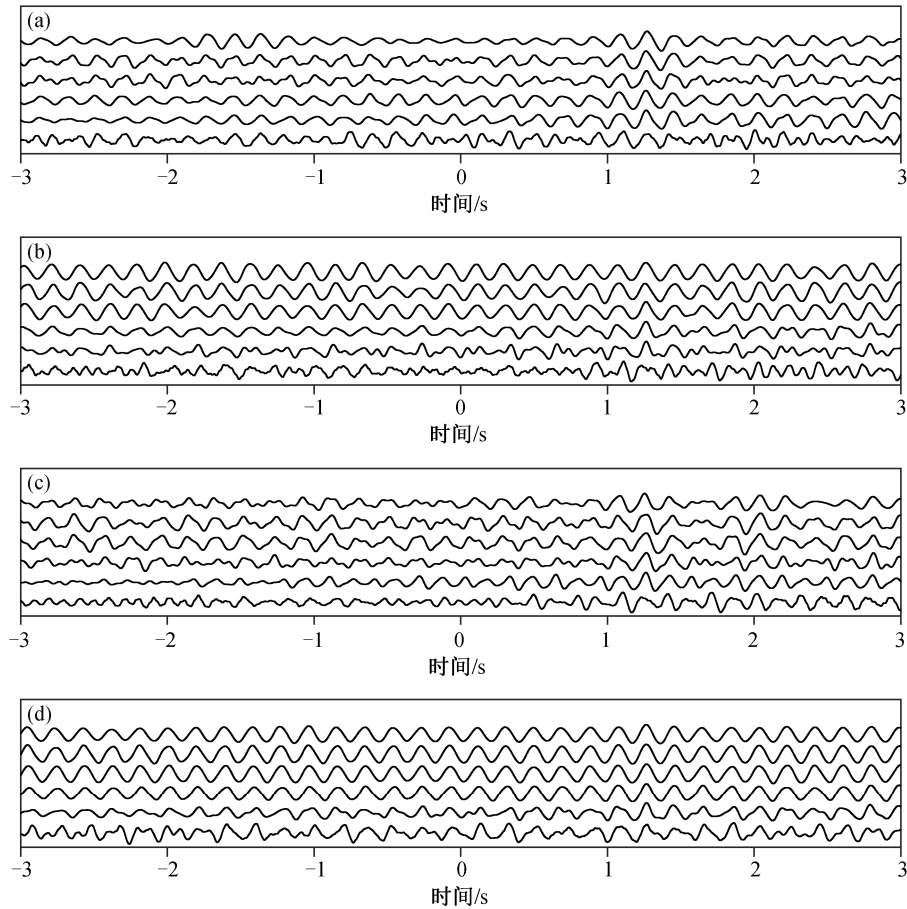
振幅比逐渐增加。频率约为 10 Hz 的信号是台站附近桥墩的自由振荡信号^[6,14]。当高铁列车靠近台站时,桥墩受迫振动,振幅逐渐加大;当高铁列车刚离开台站时,桥墩的振幅达到最大;随后振幅逐渐衰减,于是频率约为 10 Hz 信号的振幅先增大,再减小。R1 型中频率约为 6 Hz 和 13 Hz 的信号以及 L2 型中频率约为 6 Hz 的信号,振幅的变化规律与 10 Hz 的信号相似。这些信号可能是高铁列车靠近时引发的台站附近其他结构体的振动信号。频率约为 5 Hz 的信号是高铁列车所在位置发出,沿着铁路桥梁传播的信号。因此,当高铁列车离台站较远时,信号成分单一,互相关函数的波形稳定;当高铁列车距离台站较近时,信号成分多样,互相关函数的波形变化较大。

即使都是沿着铁路传播的信号,L2 型与 R1 型在 5 Hz 附近的峰值频率也不相同。图 8 中 L2 型为 4.833 Hz, R1 型为 5.167 Hz。这可能与多普勒效应有

关: R1 型是高铁列车靠近台站对, L2 型是高铁列车远离台站对,所以同样的信号在 R1 型中的频率更大。但是,这一点不能简单地通过 $f_{\text{obs}} = \frac{v_w}{v_w - v_t} f_{\text{real}}$

(f_{real} 是震源实际的频率, f_{obs} 为观测的频率, v_w 是沿桥梁传播的信号的速度, v_t 是高铁列车的速度,以靠近台站为正)来验证,因为高铁列车的速度影响频谱的峰值位置。可以将高铁列车信号视为相同的力延迟加载的结果,而延迟加载的频率与高铁列车的速度相关,所以信号的频谱就是速度的函数^[7,9]。更细致的研究需要综合考虑高铁列车速度、加(减)速过程以及多普勒效应对频谱的影响,这里不赘述。

互相关函数的信号在高铁列车远离台站时更稳定。对于 PK021 和 PK050 台站对, R1 型的信号在更长时段内的到时差保持稳定,因此我们选择 R1 型互相关函数作为特征信号。处理其他台站对的信号时,可根据具体情况,选择合适的互相关类型。



(a) 一列 8 型列车不同时段信号的互相关函数; (b) 和 (c) 两列 161 型列车不同时段信号的互相关函数; (d) 一列 162 型列车不同时段信号的互相关函数。(a)~(d) 中从下至上截取信号的中点依次为高铁列车到来前的 4、10、16、22、28 和 34 s

图 9 不同车次不同时段信号的互相关函数

Fig. 9 Cross-correlation function of different trains and different segments

2.2 叠加车次的选择

车型虽然不影响信号的到时差,但不同车型的波列长度以及信号的频谱有区别,互相关函数也会有区别(图 9(a), (c)和(d))。即使同样的车型,高铁列车来临前相同时段信号的互相关函数的波形也有较大的区别(图 9(b)和(c))。但是,对于同一列车,当高铁列车离台站较远时,互相关函数保持稳定。

2.3 叠加的互相关函数

由于高铁列车具有重复性,因此我们选取不同日期相同车次的高铁列车相同时段的互相关函数进行叠加。因为 -3 s 至 3 s 的时间域无法展现互相关函数的全部特征,所以我们将时间域扩大为 -8 s 至 8 s (图 10)。

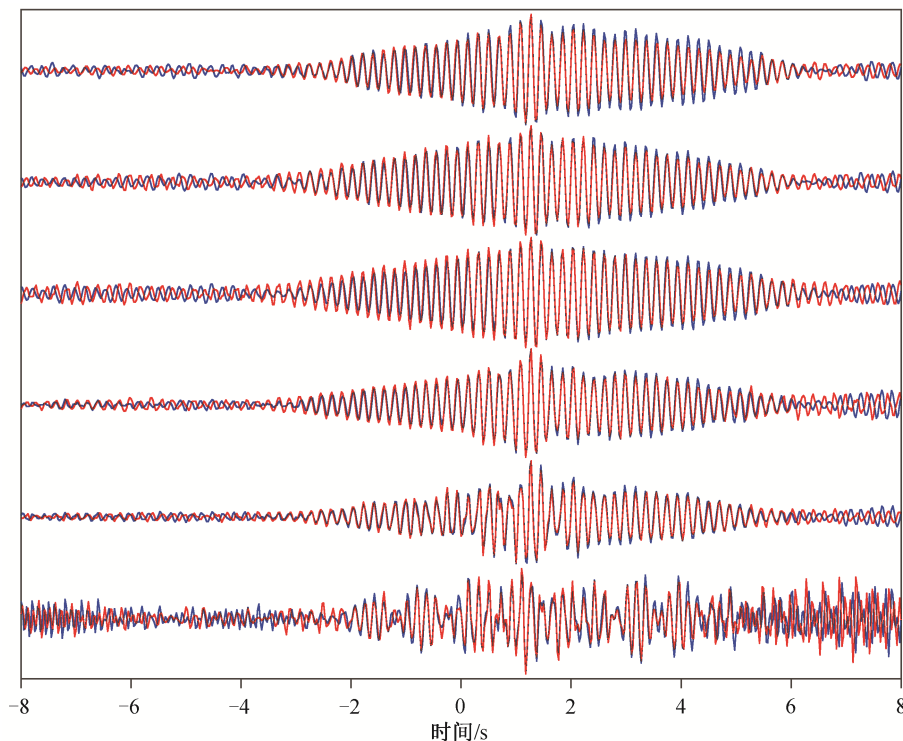
叠加后的平均互相关函数由 -3 s 至 5 s 之间的一个大波包及其前后的小波包组成。大波包为沿着高铁桥梁传播的信号,持续时间约为 8 s ,在时间为负的时候也有大的幅值。这是因为高铁震源的持续时间比台站间的到时差更长,同时台站间信号的频率成分较单一,导致互相关函数的振幅衰减较慢。除高铁列车到来前 4 s 的互相关函数外,其他平均互

相关函数具有很大的互相关系数($0.916\sim 0.945$)。如果只考虑 -3 s 至 5 s 的信号,则互相关系数会更大($0.963\sim 0.983$)。同时,同一日期不同时段平均互相关函数之间也具有很大的互相关系数($0.911\sim 0.990$)。可以将平均互相关函数作为特征量,这个特征量有检测桥梁结构变化的潜力。

3 监测前景讨论

当铁路桥梁的结构发生变化(如出现裂缝,产生破损)时,沿桥梁传播的信号波速可能发生细微的改变,也可能出现新的波,此时互相关函数的波形就会发生改变。通过监测互相关函数的变化,可以提取桥梁结构变化的信息,检测桥梁的稳定性和安全性^[15]。

采用高铁列车经过前后的互相关函数进行监测,有如下优势:1) 高铁列车震源能量大,互相关函数信噪比高;2) 高铁列车震源重复性好,可以使用的互相关函数数量多;3) 高铁列车事件数量多,时间间隔短,监测的时间分辨率高;4) 用于监测的仪器数量和位置,可以根据实际地形和监测需求等



4月25日(蓝线)和4月28日(红线)32列相同的列车在相同的截取时段对应的互相关函数平均值,从下至上截取信号的中点依次为高铁列车到来前的4, 10, 16, 22, 28和34 s

图 10 不同日期相同车次列车的互相关函数平均值

Fig. 10 Average cross-correlation function of the same train for different dates

灵活设定,从而达到足够的空间分辨率。

采用高铁列车经过前后的互相关函数进行监测,还需要解决以下问题。

1) 如何扩展互相关函数稳定的区间。直达波部分虽然稳定,但是绝对到时小,当介质的相对波速变化较小时,对应到时的绝对变化也会小,不容易测量。

2) 气温和降水等外源因素对互相关函数的影响。剔除这些因素,才能准确地监测桥梁结构的变化。

3) 理解高铁列车的变化对平均互相关函数的影响。介质性质的变化会影响互相关函数,震源性质的变化也会影响互相关函数。本文通过选取不同日期相同车次高铁列车的记录,在一定程度上降低了震源差异影响。如果能进一步理解高铁列车的状态(如车速、质量等)对互相关函数的影响,可以更准确地监测桥梁结构的变化。

4 结论

本文通过多种测试,说明了当高铁列车处在台站对的延长线上时,高铁列车发出的沿着铁路桥梁传播的信号是高铁列车到来前的主要信号,这个信号在台站对间的到时差是一个不变量。

不同日期相同车次的高铁列车在相同时段的互相关函数,相互之间具有很大的互相关系数,因此可以将其作为一个特征量,用来表征高铁桥梁的性质,这个特征量有监测桥梁结构变化的潜力。

致谢 感谢南方科技大学陈永顺教授研究组提供部分观测仪器,感谢长安大学包乾宗教授和中国科学院地质与地球研究所李幼铭研究员在数据采集过程中的帮助。

参考文献

- [1] 李义兵. 客运专线铁路桥梁设计新理念. 铁道标准设计, 2007(2): 1-4
- [2] 何华武. 高速铁路运行安全检测监测与监控技术. 中国铁路, 2013(3): 1-7
- [3] 金辉. 京沪高铁南京大胜关长江大桥养护模式探讨.

- 现代交通技术, 2013, 10(6): 51-55
- [4] 施洲, 蒲黔辉, 岳青. 基于健康监测的高铁大型桥梁运营性能评定. 铁道工程学报, 2017, 34(1): 67-74
- [5] 程乾生. 数字信号处理. 北京: 北京大学出版社, 2003
- [6] 徐善辉, 郭建, 李培培, 等. 京津高铁列车运行引起的地表震动观测与分析. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 0421-0425
- [7] 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
- [8] 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
- [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] Lobkis O I, Weaver R L. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field. The Journal of the Acoustical Society of America, 2001, 110(6): 3011-3017
- [11] Sneider R. Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: a derivation based on stationary phase. Physical Review E, 2004, 69(4): 046610
- [12] Wapenaar K, Fokkema J. Green's function representations for seismic interferometry. Geophysics, 2006, 71(4): SI33-SI46
- [13] Hadziioannou C, Larose E, Baig A, et al. Improving temporal resolution in ambient noise monitoring of seismic wave speed. J Geophys Res, 2009, 11: B07304
- [14] 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
- [15] Salvermoser J, Hadziioannou C. Structural monitoring of a highway bridge using passive noise recordings from street traffic. The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 138(6): 3864-3872