

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1801972

干涉雷达在高铁桥梁振动检测中的应用*

邵泽龙^{1,2} 张祥坤^{1,2} 李迎松^{1,3}

(1.中国科学院国家空间科学中心 中国科学院微波遥感技术重点实验室 北京 100190; 2.中国科学院大学 电子电气与通信工程学院 北京 100049; 3.哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院 哈尔滨 150001)

摘要: 由于高速铁路对桥梁的稳定性及安全性要求高。因此,利用干涉测量技术和相位反演技术,设计了一种能够测得桥梁微弱振动的雷达检测系统。其不仅系统简单、操作灵活,而且振动检测精度及效率高。此外,其能够快速检测获得毫米级的桥梁微弱振动。从而克服了常规桥梁检测方法过程复杂、成本高、精度和效率低等问题,可以广泛应用于高铁桥梁振动的检测中。通过该雷达对京津城际高速铁路凉水河特大桥的检测实验,证明了该雷达的有效性和正确性。实验结果表明,该雷达不仅能够准确获得桥梁振动的实时形变信息,也能对桥梁振动的类型进行判断。

关键词: 高铁桥梁; 雷达干涉测量; 振动检测; 相位反演

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Application of radar interferometry on measuring
high-speed railway bridge vibrationShao Zelong^{1,2} Zhang Xiangkun^{1,2} Li Yingsong^{1,3}

(1. Key Lab of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Information and Communication Engineering College, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Because there is a high demanding on stability and safety for high-speed railway, bridge vibration monitoring radar is designed using interferometry and phase inversion techniques. It has advantages such as simple structure, operated easily, high-precision and high accuracy. Moreover, it can measure weak vibration in mm levels. Thus, it can solve the problem of complex processes, high cost, low accuracy, and low efficiency of conventional bridge monitoring methods. In addition, it can be applied into high-speed railway bridge monitoring regions. The monitoring experiment of Cool Water Mega Bridge of Beijing-Tianjin intercity high-speed railway proves that the radar is effective and right. It can not only obtain the real-time deformation of the bridge vibration accurately, but also can acquire the type of bridge vibrations.

Keywords: high-speed railway bridge; radar interferometry; vibration monitoring; phase inverse

0 引言

伴随高速铁路的快速发展,我国高铁里程已经超过 25 000 km,成为名副其实的高铁强国^[1]。由于,高速铁路对线路的坡度、曲率等要素具有较高的要求^[2],而我国幅员辽阔、地势复杂。因此,在高铁线路的建设中,大量采用了“以桥代路”的方式。高铁线路中,桥梁占比已经超过 50%^[3]。为了提高高速铁路的安全性,预防各类事故的发生,高速铁路桥梁的检测和维护愈发重要。

目前,高速铁路桥梁的安全检测大多是依靠大规模铺设加速度计、应力计等传统器件来实现^[4]。该方法施工过程复杂、耗时长、成本高,而雷达干涉测量的方法能够避免这些缺陷^[5-6]。从而,为桥梁检测提供了一种新的研究方向。

常见的脉冲雷达需要笨重的信号发射机,体积大,安装不够灵活。而在桥梁检测过程中,雷达需要根据实际状况的变化,灵活调整其位置。因此,文中采用了线性调频连续波(linear frequency modulation continuous wave, LFM CW)信

收稿日期:2018-08-16

* 基金项目:北京市自然科学基金(4182077)、中国博士后科学基金(2017M620918)项目资助

号作为桥梁检测雷达的发射信号。从而,减小了雷达系统的体积,使得该雷达得以小型化,并具有操作方便、观测灵活、精度高、重复观测周期短等优点^[7-8]。同时,该桥梁检测雷达与常用的遥感测绘设备如水准仪、全站仪、GPS 接收机等一样,具有遥测、安全、携带方便等优点。而且具有全天时、全天候的检测能力。因此,与上述常见的遥测方法相比,具有更广泛的应用范围。此外,本方法检测精度高,对于桥梁安全及健康状态的早期评估具有重要的意义。

目前,国内一些研究人员虽然对干涉雷达系统进行了相关研究。但是,并未研究出专门应用于桥梁检测的雷达系统。一些研究人员采用了国外 IDS 公司研制的 IBIS 系列雷达系统,对桥梁的状态进行了检测和分析^[9-10]。但是,这些分析未对桥梁振动的细节进行分析,也未对桥梁振动的原因给出合理的解释。文中利用中国科学院国家空间科学中心研制的高分辨微形变检测雷达对高铁桥梁的振动现象进行了检测和分析,实验结果表明,该雷达系统能够准确检测高铁桥梁的振动现象。从而在高铁大发展的背景下,为桥梁的检测提供了一种新手段。

本文首先给出了该桥梁振动检测雷达的原理。此后,简要介绍了该雷达的系统组成及实验场景设置。最后,通过该雷达对京津高铁凉水河特大桥的振动检测试验,验证了该雷达测量桥梁振动的准确性和有效性。

1 振动测量原理

当列车经过桥梁时,桥梁受到列车的冲击而产生强迫振动^[11]。此时,在列车给予桥梁的移动力作用下,桥梁在空间中的振动方程为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F} \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 为轨道-桥梁耦合系统的质量矩阵; \mathbf{C} 为系统的阻尼矩阵; \mathbf{K} 为系统的刚度矩阵; \mathbf{F} 为系统的荷载列阵; \mathbf{q} 为系统的位移。

根据该振动方程,可以求得系统受外力作用下的动力响应。从而,可以对系统的振型及其相应振动频率进行判断和分析。由于车辆经过桥梁时,桥梁受到的外力主要为车体质量变化引起的竖向重力变化。因此,文中主要分析了桥梁的纵向振动。

在列车经过桥梁时,雷达向桥梁发射线性调频的电磁波信号。该发射信号到达桥梁后被反射回雷达接收机。雷达根据不同时刻间的回波信号之间的相位差,求得桥梁受外力作用下形变的大小^[12]。

当雷达系统与桥梁之间的距离 R 不同时,不同时刻回波之间的相位差 $\Delta\phi$ 与不同时刻雷达与桥梁间的距离差 ΔR 之间的关系如式(2)所示。

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R \quad (2)$$

式中: λ 为雷达系统发射信号的中心频率信号所对应的波长。

2 振动检测实验

2.1 实验条件

该桥梁检测雷达由 LFM CW 一体化收发机、数据反演工作站等部分共同组成。该雷达采用了中心频率为 36.05 GHz 的调频连续波为发射信号,其带宽为 300 MHz。同时,雷达发射链路采用了高稳定性的频率合成器以产生 36.05 GHz \pm 150 MHz 的发射信号。同时,雷达接收链路的前端采用了低噪声放大器以接收微弱的回波信号。回波信号在接收端经过放大处理后,送入高速的模数转换器完成采样处理,传输给控制器以实现数据后处理及存储等功能。

文中以京津城际高铁跨越南六环路附件的凉水河特大桥为研究对象,实验对象如图 1 所示。该桥梁为连续的多跨混凝土箱梁式桥梁,由多个连续的横梁拼接而成。其每一跨中箱梁的竖向高度为 15 m,横向跨度为 32 m,宽度为 10 m^[13]。



图 1 凉水河特大桥

京津高铁是我国一个时速可达到 350 km/h 的高速铁路线路。该线路上运行的列车是 CRH2 型高速列车,其由 4 辆动车和 4 辆拖车共同组成一个编组,车身总长度近似为 200 m,每辆子车厢长度近似为 25 m。利用文中设计的桥梁检测雷达,可以测得列车通过该桥时的桥梁振动现象。从而验证该桥梁检测雷达的有效性。

如图 2 所示,利用该雷达对凉水河特大桥过车时的振动现象进行了监测。雷达安装在桥梁的正下方,天线指向桥梁的底部。从列车即将到达桥梁开始,到桥梁趋于稳定,用时约为 10 s。因此,实验中分析了该时间段内的桥梁振动。

2.2 实验结果

当列车通过桥梁时,桥梁受到列车给予的移动负荷激励,从而产生强迫振动。该振动与列车对该桥的冲击系数、桥梁的结构及材料有关。同时,作为一个具有多个自由度的弹性系统,该桥梁在外力作用下,易产生自振^[14]。

由雷达回波的相位信息,可求得桥梁过车时的竖向振动形变,如图 3(a)所示。同时,通过傅里叶变换可求得桥梁振动的频谱,如图 3(b)所示。



图2 桥梁检测场景

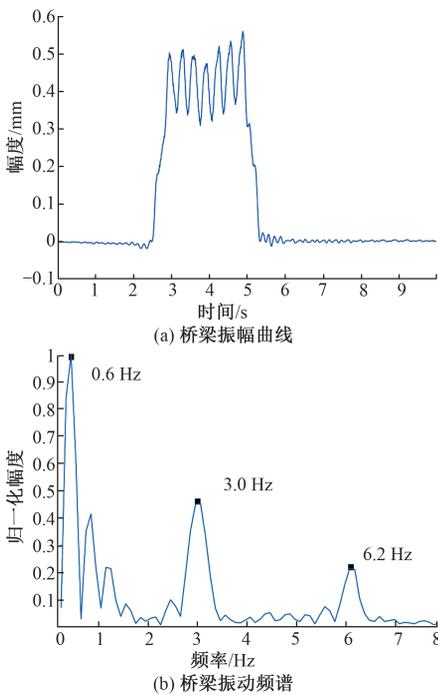


图3 实验结果

由图3(a)可得,桥梁的竖向振动幅度约为0.5 mm。同时,桥梁约在第2.3 s到第5.3 s之间振幅最大,共用时3 s。由列车时速约为250 km/h得,该段时间内列车运行距离为208 m,近似等于列车车身长度。由图3(b)可得,桥梁的振动频率有3处峰值:分别是较小的激绕振动频率(约0.6 Hz)、中间的强迫振动频率(3.1 Hz)和较高的桥梁自振频率(6.2 Hz)。

当列车经过时,桥梁受到列车给予的冲击力,从而产生激绕振动。该振动的频率与列车的速度有关^[15]。二者的关系如式(3)所示。

$$f = 0.011 \times v \quad (3)$$

即当列车速度为250 km/h时,该激绕振动的频率约

为0.7 Hz。而雷达观测到的激绕振动频率为0.6 Hz,二者近似一致。

高铁每一跨中的箱梁受到列车冲击后经多重调频质量阻尼器(multiply turned mass damper, MTMD)减震后的强迫振动频率为列车经过车厢长度所需要的时间的倒数^[16],相应的频率为 $f = v/l$ 。当列车速度为250 km/h时,列车车厢长度为25 m。从而可求得,桥梁箱梁受到的强迫振动频率约2.8 Hz。这与图2(b)中的实验结果(3.1 Hz)近似一致。

为了区分桥梁振动的不同类型,利用桥梁余振反映桥梁自振的方法,分别对第2.3~5.3 s间的桥梁强振和第5.3~10 s的桥梁余振分别做快速傅里叶变换,可得到如图4所示的振动频谱。

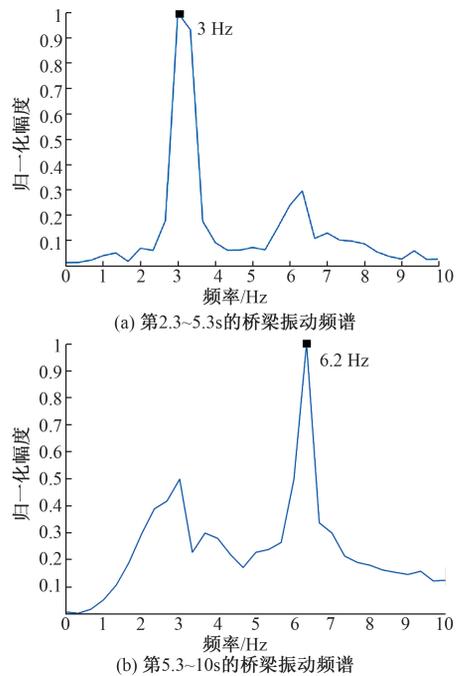


图4 不同时间段的桥梁振动结果

由图4(a)可得,在第2.3~5.3 s,桥梁振动的主要成分为频率较小的每一跨箱梁受到的列车强迫振动频率。而由图4(b)可得,在第5.3~10 s间,桥梁振动的主要成分为频率较高的桥梁自振^[17]。

由上述实验结果的分析得,该桥梁的振动可以由如表1所示的桥梁子振动构成。

表1 高铁桥梁的子振 (Hz)

子振类型	激绕振动	强迫振动	自由振动
子振频率	0.6	3.1	6.2

综上所述,文中所提出的雷达系统能够对桥梁振动状态进行准确有效地检测。同时,该桥梁振动检测雷达能够获得毫米级的微弱振动,将在桥梁健康监测方面发挥重要的作用。

3 结 论

文中设计了一种能够检测高铁桥梁振动的雷达系统。实验结果表明,所设计的高铁桥梁检测雷达不仅能够准确有效测量桥梁的振动状态,还能准确的区分桥梁的振动类型。同时,该雷达具有小型化、使用方便,准确度高等优点,为高铁桥梁的状态检测提供了一种有效的手段。

参考文献

- [1] 王亦军. 中国高速铁路建设回顾与发展思考[J]. 铁道经济研究, 2016(1):6-11.
- [2] FRA. Vehicle/Track Interaction Safety Standards, High-Speed and High Cant Deficiency Operations[S]. Washington: Federal Register, 2013.
- [3] 李义兵. 客运专线铁路桥梁设计新理念[J]. 铁道标准设计, 2007(2):1-4.
- [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[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(1):67-74.
- [5] 沈小军, 杜勇, 王仁德, 等. 基于地面激光雷达的输电线路铁塔倾斜度测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(4):516-521.
- [6] 刘春, 程起军, 李俊义, 等. 基于地基干涉雷达的大型桥梁动态挠度监测与分析[J]. 工程勘察, 2017, 45(1):53-58.
- [7] 陈伟民, 李存龙. 基于微波雷达的位移/距离测量技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1251-1265.
- [8] 温宗周, 刘垚, 段俊瑞, 等. 基于 DSP 的 LFM CW 雷达信号处理技术研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(5): 101-104.
- [9] 黄声享, 罗力, 何超. 地面微波干涉雷达与 GPS 测定桥梁挠度的对比试验分析[J]. 武汉大学学报(信息科学

版), 2012, 37(10):1173-1176.

- [10] 徐亚明, 王鹏, 周校, 等. 地基干涉雷达 IBIS-S 桥梁动态形变监测研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(7):845-849.
- [11] 利远翔, 雷晓燕, 张斌. 高速列车—无砟轨道—桥梁耦合系统振动特性分析[J]. 华东交通大学学报, 2010, 27(3):14-20, 26.
- [12] 蔡永俊, 张祥坤, 姜景山, 等. 地基差分干涉微形变监测实验系统[J]. 电子技术应用, 2015, 41(9):82-84, 91.
- [13] 国家铁路局. TB-10621/J1942 高速铁路设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2014.
- [14] 孟鑫, 刘鹏辉, 姚京川, 等. 高速铁路 32 m 简支箱梁动力特性试验分析[J]. 铁道建筑, 2016(1):10-15.
- [15] 杨宜谦, 尹京, 姚京川, 等. 高速铁路桥梁联调联试进展[J]. 中国铁路, 2017, 35(2): 11-20.
- [16] 李小珍, 张志俊, 冉汶民, 等. 桥上列车高速运行引起的地面振动试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5):815-823.
- [17] 王巍, 杨宜谦, 刘鹏辉, 等. MTMD 对高速铁路 32 m 预应力混凝土简支箱梁竖向振动特性的影响分析[J]. 环境工程, 2012, 30(S1):153-155.

作者简介

邵泽龙, 1989 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为雷达测量技术。

张祥坤, 1972 年出生, 研究员, 主要研究方向为新体制雷达技术。

E-mail: zhangxiangkun@mirslab.cn

李迎松, 1982 年出生, 教授, 主要研究方向为雷达天线设计及技术。