

基于地面雷达的结构微小位移监测

贺佳欣 杜强 李佳航

新疆理工职业大学, 新疆, 844004;

摘要:现代结构微变形健康监测技术对监测方法的精度、便捷性和成本提出了更高要求。传统监测方法难以满足工程需求, 因此迫切需要新的技术手段来适应现代健康监测的需求。随着调频连续波(FMCW)毫米波雷达技术的快速发展, 其已开始进入人们的视野。为此, 本文以 FMCW 毫米波雷达为研究对象, 阐述了地基干涉雷达测量的基本原理, 介绍了地基雷达一维测距的基本原理, 并对某桥梁进行了现场监测, 获取并分析了动态挠度曲线、固有频率等竖向振动参数, 以衡量桥梁的运营性能。结果表明, 该监测结果符合铁路桥梁相关通用规范对铁路桥梁的要求。

关键词:健康监测技术; 调频连续波(FMCW); 干涉测量法; 结构位移测量

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 06. 052

引言

地基雷达是一种基于调频连续波(FMCW)毫米波雷达技术的监测方法。与光学监测不同, 它存在一定局限性, 但能够全天候监测结构的微小变形。其具有安装简便、测量精度高、可多目标测量等优势, 因此在医学、土木工程、历史勘测等领域也得到了广泛应用^[1]。结构体位移参数在结构健康监测中是一个非常重要的参数^[2]。十多年来, 雷达系统一直被用于结构位移测量研究。雷达系统发射调频信号并接收物体反射的信号, 通过发射信号与接收信号之间的时延, 估算视线(LOS)方向的位移。雷达系统不受天气或光照条件影响, 已被用于大跨度桥梁的位移监测^[3]。然而, 在许多民用基础设施应用中, 其测量仍面临挑战。一些学者在研究中提出了采用非接触传感器进行桥梁监测的方法。通过使用雷达系统检测微小位移, 平均误差已降至 3.8×10^{-4} ^[4]。

1 地基雷达原理

1.1 LFM CW

线性调频信号(LFM 信号)是一种特殊的调制信号。其频率随时间变化, 也就是说, 在一段时间内信号的频率以恒定速率线性增加或减小。

时域表达式为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j2\pi(f_c t + \frac{K}{2}t^2)} \quad (1)$$

在公式中, f_c 为中心频率, $K = B / T$, 其为调频斜率

$\text{Rect}(t/T)$ 是矩形信号, 表达式为

$$\text{Rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

时域和频域仿真如图 1 所示。

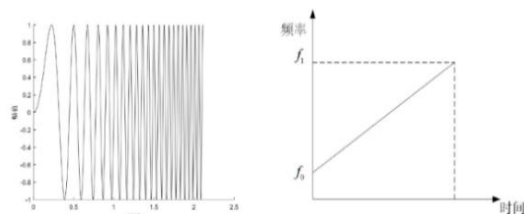


图 1 线性调频信号的时域和频域仿真

瞬时相位是 $\phi(t) = 2\pi f_c t + k\pi t^2$, 角频率的瞬时变化是 $\omega(t) = 2\pi f_c + 2K\pi t$ 。信号的瞬时频率是

$$f(t) = \frac{\omega(t)}{2\pi} = f_c + Kt \quad (-T/2 \leq t \leq T/2) \quad (3)$$

1. 线性调频信号(LFM 信号)广泛应用于雷达、通信、声纳等领域, 其具有以下特点:

2. 带宽: 线性调频信号(LFM 信号)的带宽与调频斜率成正比。调频斜率越大, 信号带宽就越宽。这使得 LFM 信号在雷达系统中具有较高的距离分辨率和目标分辨率。

3. 脉冲压缩: LFM 信号可通过脉冲压缩技术实现高分辨率目标检测。通过对接收到的 LFM 信号进行相关运算, 能够压缩信号的时域, 提高目标分辨率。

4. 抗干扰性能: LFM 信号具有良好的抗干扰性能。由于信号频率呈线性变化, 其对多径效应和杂波干扰具有较强的抑制能力。

5. 距离分辨率: LFM 信号在雷达系统中可实现较高的距离分辨率。基于脉冲压缩技术, 能够有效区分近距离目标。

LFM 信号常用于雷达系统的目标检测、测距、测速等应用。同时, 因其优异的抗干扰性能和高分辨率, 也广泛应用于通信、声纳等领域。

1.2 干涉测量法原理

雷达以一定周期间隔向结构发射电磁波, 并接收反射回来的电磁波。不同时间反射回来的电磁波, 由于变形体发生位移, 其相位存在差异。干涉技术通过对比相

位信息来获取径向变形量。

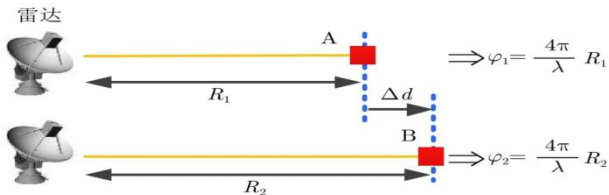


图 2 FMCW 雷达系统干涉测量示意图

雷达将微波信号从发射天线 (TX) 馈送至目标并与之相互作用, 形成反向散射信号, 该信号最终由接收天线 (RX) 接收。经过相关的信号和数据处理步骤后, 可得到包含信号强度和观测相位值 ϕ_1 的复信号。雷达系统持续照射监测区域内的目标。假设目标第二次移动了距离 Δr , 雷达所获取的第二个复信号中包含相应的信号强度和观测相位值 ϕ_2 。形变相位为观测相位的差值, 其计算公式为:

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (4)$$

2 桥梁现场监测

在桥梁施工过程中, 为防止工程施工质量问题的发生、提升项目的整体经济效益及后续使用效益, 需实施科学有效的质量控制与管理。桥梁建成投入使用后, 受降雨、结冰等行车荷载因素及自然环境的影响, 桥梁自身的稳定性会下降, 使用质量也会降低。为此, 需定期开展公路桥梁检测工作, 以便及时发现桥梁使用过程中产生的质量问题, 如裂缝、沉降等^[5]。根据检测结果, 采用可靠的技术和方法进行加固与养护, 从而有效延长桥梁的使用寿命。

2.1 桥梁监测方案

2023 年 8 月 17 日, 在内蒙古自治区呼和浩特市, 采用调频连续波 (FMCW) 微变形监测雷达对当地一座桥梁进行监测。与传统的桥梁直接接触式测量方法相比, 微变形雷达新系统在桥梁挠度及固有频率的长期监测方面具有更大优势, 不仅保障了监测人员的安全, 还提高了桥梁监测的效率与安全性^[6]。

本实验采用动态荷载测试方法, 通过信噪比 (SNR) 在观测目标区域选取稳定点, 随后对桥梁梁体目标位置的位移变化进行测量, 并依据动态挠度曲线观测梁体目标位置的变化关系。列车过桥时采集动态荷载数据, 同时记录雷达角度、雷达位置及列车过桥时间。竖向变形关系如下:

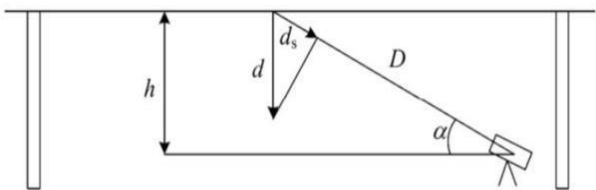


图 3 竖向变形位移模型

$$d = \frac{d_s D}{h} \quad (5)$$

在公式中, d_s 为雷达相对桥梁监测点的径向位移; α 为雷达与监测点连线与水平面的夹角, h 为监测点到雷达的垂直距离, D 为调频连续波毫米波雷达到监测点的距离位移变化量。

由上述公式可知, 当调频连续波 (FMCW) 毫米波雷达测量桥梁动态挠度时, 只需测量雷达到观测梁体的垂直距离 h , 即可以将雷达观测方向的挠度转换为桥梁的竖向挠度^[7]。

2.2 实际测量分析

在实验中, 选取了一座 24 米长的 T 型双线箱型简支梁桥作为监测对象。该线路呈东西走向, 西侧为下行线, 东侧为上行线。首先, 根据信噪比图和一维距离图上的对应点, 通过倾角仪确定实验点的位置及雷达的倾角, 以及监测点与雷达在视线上的距离。这两个点对应的动态挠度曲线变化明显, 符合列车过桥时桥梁的变形规律。

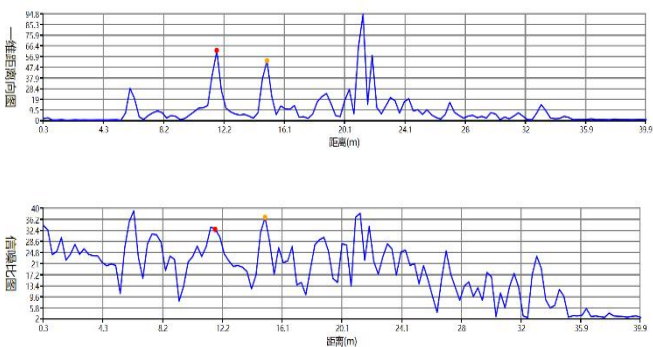


图 4 桥梁监测点的一维距离剖面图与信噪比

桥面挠度即桥面沿桥梁轴向的竖向位移。承受外部荷载的桥面会不可避免地发生变形, 这导致桥梁实际轴线产生一定差异。这些差异会影响桥梁内部的受力状态, 对桥梁的安全运营存在一定影响, 还可能直接缩短桥梁的使用寿命。利用软件对调频连续波 (FMCW) 毫米波雷达接收的原始二进制 ADC 采样数据进行解码, 绘制出同步测点的距离时间序列图。如图 7 所示, 列车过桥时间约为 27 秒, 桥梁产生的变形量约为 0.3 毫米。

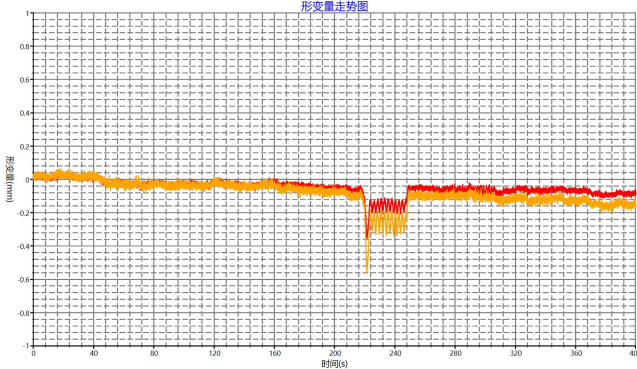


图 5 桥梁挠度变化曲线

在设计桥梁时,必须始终遵循桥梁荷载标准。若桥梁所受荷载超过其承载能力,桥梁的结构刚度会大幅下降,从而缩短桥梁的使用寿命,甚至影响列车运行安全^[8]。

根据雷达接收回波信号的测量方法,提取回波信号的视线方向形变相位差。振动固有频率是固体弹性体或弹性系统所固有的振动频率,又称“固有频率”,其大小与冲击初始状态相关。桥梁作为多自由度系统,其挠度是在激励作用下由高速行驶产生荷载而引起的,且这种挠度不可避免。通过对桥梁振动曲线进行傅里叶变换可得到桥梁振动频谱,固有频率由频谱峰值确定。

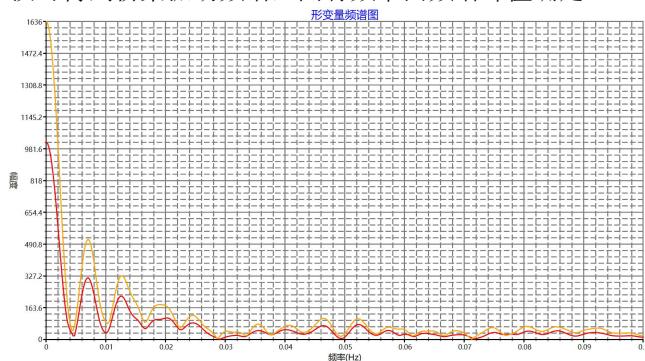


图6 桥梁振动频谱

从图中可以看出,该桥梁的一阶振动频率为 0.07 Hz,二阶振动频率为 0.13 Hz。通过对桥梁固有振动频率的分析还可看出,试验所测试的京包线 24 米简支梁桥满足中国高速铁路设计规范中关于固有振动频率的要求,同时也符合国际铁路联盟(UIC)的规范。

3 结论

目前,毫米波(mmWave)雷达已得到发展,由于其波长较短,成为测量微小位移的一种极具前景的技术。此外,毫米波雷达具有体积小、重量轻、功耗低、成本效益高的特点,且适用于各种极端天气^[9]。本文采用调频连续波(FMCW)微变形监测雷达,对京包铁路桥梁的动态挠度进行短时间序列监测。针对真实复杂的实际环境,通过数据分析得到了地基干涉雷达桥梁监测的动态挠度曲线和桥梁振动频谱。对其变化规律与特征进行了分析,结果与桥梁挠度理论吻合良好,体现了采用地基干涉雷达进行现代大型桥梁动态挠度监测的优势。

参考文献

[1]Liu Xiaoyang,Sun Guangtong,Li Feng,Qian An, Chen Li.: 'Operational Performance Verification of High Speed Railway Simply Supported Box G

irders Based on Ground Based Radar',China Railway Science,2020,41(01),pp50-56.

[2]Ma,Z.Choi,J.,Yang,L.,& Sohn,H.: 'Structural displacement estimation using accelerometer and FMCW millimeter wave radar',Mechanical Systems and Signal Processing,pp.182.

[3]G. Zhang,Y. Wu,W. Zhao,J. Zhang.: 'Radar-based multipoint displacement measurements of a 1200-m-long suspension bridge',ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 167.,2020,pp71-84.

[4]Dhiyani,A.A.,& Pramudita,A.A.: 'Multi-Point Small Displacement Detection of Bridge using FMCW Radar',Proceedings-11th Electrical Power,Electronics Communications,Control,and Informatics Seminar,EECCIS,2022,pp160-164.

[5]Liu Fuhai.: 'Research on Maintenance and Repair Reinforcement of Expressway Bridges',Engineering Technology Research,2022,7(10),pp152-154.

[6]Liu X,Tong X,Ding K,et al.: 'Measurement of long-term periodic and dynamic deflection of the long-span railway bridge using microwave interferometry',IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2015,8(9),pp4531-4538.

[7]Qin Wenxiao.: 'Study on influencing factors and preventive measure for vertical resonance of high speed train-bridge system',Changsha:Central South University,2012.

[8]Xia H,Zhang N,Guo W.: 'Dynamic interaction of train-bridge systems in high-speed railways Springer',Berlin. 2018,pp1007:978-3.

[9]H. Liu.: 'Robot Systems for Rail Transit Applications',Elsevier,2020.

本研究部分受内蒙古自然科学基金(项目编号:2021MS06004)、内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(项目编号:JY20220174)资助;另一部分受内蒙古自治区人才开发基金(项目编号:DC2000002412)及内蒙古工业大学重大科学与博士基金(项目编号:BS2020046)资助。