

# 微波干涉雷达系统对桥梁的变形监测

汤振苏<sup>1</sup>, 郑七振<sup>1</sup>, 吴华勇<sup>2</sup>, 贾鹏飞<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学, 上海 200093; 2. 上海市建筑科学研究院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 针对传统的桥梁监测方式复杂且效率低等问题, 本文阐述了 IBIS-S 系统的基本测量原理, 介绍了雷达监测的两种关键技术, 与传统的变形监测手段相比, IBIS-S 更具效率高、测量距离远、精确度高等优点。设计了微变形系统以验证 IBIS-S 系统的精确性, 试验分析表明 IBIS-S 的精确度较高, 误差较小, 在监测条件良好的情况下仅为 5%; 通过该雷达对某地铁桥梁的实时振动监测, 分析获得的桥梁时序变形数据, 结果表明 IBIS-S 系统对桥梁动态监测的有效性。

**关键词:** IBIS-S 系统; 微变形监测; 精确度; 桥梁监测

**中图分类号:** P258 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2021) 10—0155—03

地基干涉雷达测量是一种无接触的具有高精度、测量距离远、效率高的一种新兴的无损遥感技术, 目前正处于核心技术优化, 工程的变形监测推广阶段<sup>[1]</sup>。目前, 国内外学者都对 IBIS-S 进行了相关研究。刁建鹏等<sup>[2]</sup>使用了地基干涉雷达技术对中央电视台发射塔进行了变形监测实验; Sofi M<sup>[3]</sup>等使用 IBIS-S 对一座人行天桥进行动态监测, 并与加速度传感器进行比较, 得出了两种测量方式高度一致性结果。

本文使用 IBIS-S 系统与设计的微变形系统进行变形对比, 验证该雷达系统的精度, 在室内监测情况下其相对误差仅为 5%; 最后通过 IBIS-S 系统对上海某一地铁桥梁的振动测试, 验证 IBIS-S 系统对桥梁动态振动监测的有效性。

## 1 IBIS-S 系统与基本原理介绍

IBIS-S 系统 (图 1 所示) 是由意大利 IDS 公司和佛伦伦萨大学经过六年合作的成果<sup>[4]</sup>, 该系统主要监测分析建筑物或者桥梁上每一点的变形振动情况。



图 1 IBIS-S 系统

IBIS-S 系统主要使用了两种雷达技术来获取建筑物的变形信息。步进频率波技术为 IBIS-S 系统提供了很高的距离分辨率, 其距离向分辨率为 0.5m<sup>[5]</sup>, 即每隔 0.5m 雷达就可获得一个测量点的变形数据。干涉测

量技术通过获取雷达反射波的相位差求得物体的位移变化, 其精度可达 0.01mm。

### 1.1 步进频率连续波技术

IBIS-S 系统通过步进频率连续波技术能够一段时间内发射  $n$  组步进频率为  $\Delta f$  的电磁波, 这些电磁波是有规律地进行阶梯变化的雷达信号, 如图 2 所示。雷达的距离分辨率  $R$  和带宽  $B$  的关系如下式<sup>[6]</sup>:

$$R = \frac{c}{2B} \quad (1)$$

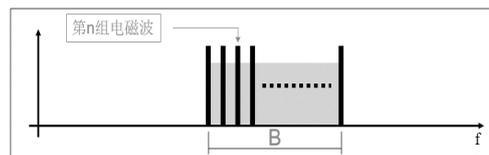


图 2 步进频率连续波信号体制

由式 (1) 可得, 距离分辨率仅仅与带宽  $B$  有关, 其中  $c$  为光速。IBIS-S 系统采用的系统带宽 0.3GHz, 由式 (1) 可得雷达的距离分辨率为 0.5m。

### 1.2 干涉测量技术

干涉测量技术是通过获得不同时间内的反射波的相位差异来获取物体的位移, 如图 3。雷达发射电磁波, 在电磁波的传播方向上由电磁波相位差获取的物体位移为  $d$ 。

$$d = -\frac{\lambda}{4\pi}(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (2)$$

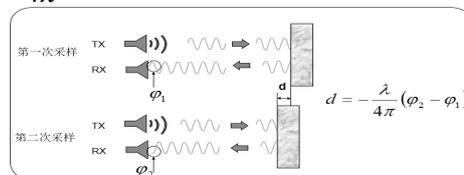


图 3 干涉测量技术原理

上式中,  $\lambda$  为电磁波的波长,  $\varphi_2$  为第二次测得的

相位,  $\varphi_1$  为第一次测得的相位。

$\lambda$  可由下式算得:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.0e+8m/s}{17GHZ} = 17.679mm \quad (3)$$

其中  $c$  为光速,  $f$  为电磁波的频率。

相位差的表达式由下可得:

$$(\varphi_2 - \varphi_1) = 1'' = \frac{\pi}{64800} \quad (4)$$

将式子(3)和式子(4)带入式子(2)可得  $d=0.000068mm$ , 理论上精度为万分之一毫米。但是由于实际情况, 这个精度在观测条件良好的情况下, 监测精度可达 0.01mm。

## 2 IBIS-S 与微变形系统的精度对比试验

为了验证 IBIS-S 的静态精度, 试验采用 IBIS-S 和微变形系统真值进行对比。试验的目标为安装有角反射器的微分头微变形系统, 调节微分头将 IBIS-S 监测数据与微变形系统的真值进行对比, 现场试验布置如图 4 所示。



图 4 IBIS-S 系统和目标位置

实验中将微变形系统作为变形体, 微变形表座的刻度为一圈 50 格, 每格为 0.01mm, 即精度为 0.01mm。本次试验设计了 0.5mm、0.01mm 两种精度对比方案。

第一次试验, 向靠近雷达的方向调节角反射器移动 0.5mm 共三次, 最后退回调节前的位置。如图 5 所示, 角反射器经过三次 0.5mm 移动后, 位移线在 -0.5mm、-1mm 和 -1.5 处波动, 最后回到了原始位置处, 雷达获得的数据光滑平稳。

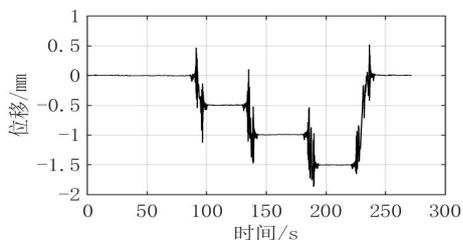


图 5 位移变形监测数据图

第二次精度对比试验中角反射器先向雷达靠近

0.01mm。使用真值变形量 0.01mm 与雷达的监测变形量对比。由图 6 可以看出, 雷达测得的位移数据在 -0.01mm 处波动, 其平均值为 -0.0095mm, 与真值的绝对误差为 0.0005mm, 相对误差仅为 5%。

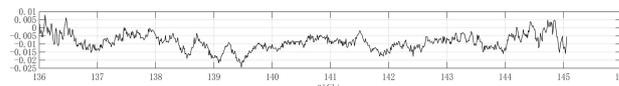


图 6 位移变形监测数据图

综上所述, 本次试验验证了雷达系统的精确度, 该雷达系统的精度达到了亚毫米级别, 能够准确地监测物体的微小位移。

## 3 IBIS-S 的桥梁动态监测试验

### 3.1 试验条件和数据采集

2020 年 9 月 27 日, 试验的对象为上海市某一地铁桥梁, 桥梁的跨度约 75m, 高度约 19m 的三跨连续梁。本次试验的设备垂直放置于桥梁 1/4 跨的底部(如图 8), 雷达垂直照射梁底, 雷达到测点的距离为 18.35m。雷达设置的最大测量距离为 25m, 采样频率为 98HZ, 一共采集时间约 11 分钟。



图 7 现场图

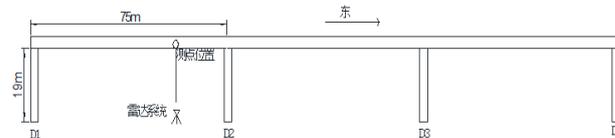


图 8 试验现场示意图

### 3.2 结果分析

#### 3.2.1 变形分析

本次试验观测 D1 号墩柱和 D2 号墩柱之间梁 1/4 跨处点的动态位移(如图 8)。观测到了两班列车通过, 第一列车由西向东行驶, 第二辆列车由东向西行驶, 从图 9 可以看出, 310s 之前, D1 和 D2 之间梁处于自由微振动的状态, 可以很好地说明雷达的精度。从 310s 到 335s 之间车辆向东行驶, 列车先进入 D1 柱和 D2 柱间, 由于车重力, 所以梁先下凹, 当经过 D2 柱时, 由于连续梁 D1 和 D2 间梁体上凸, 列车经过 D3 柱, 梁体再次

下巴并恢复原有状态，四十秒后，另一列车由西向东行驶，变形的模式与前述模式相反，二者的变形模式与连续梁的位移影响线<sup>[7]</sup>相吻合。

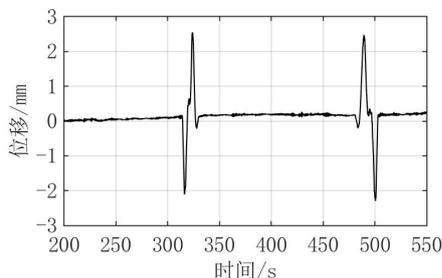


图9 点位移图

### 3.2.2 频率分析

使用脉动法对桥梁进行振动特性识别。由图9可知，在310s之前，没有车辆荷载的影响，桥梁由于周边环境（大地脉动、风载）等随机激励而引起微幅振动响应，此时的振动变形经过频谱分析可得桥梁的自振频率，如图10所示。

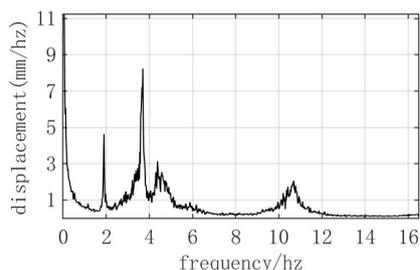


图10 0-310s 桥梁频谱图

当有列车通过时，桥梁在列车荷载的激励下，便会产生强迫振动<sup>[8]</sup>，该振动与桥梁的自身属性有关。同时，也可以用车余振法<sup>[9]</sup>获得桥梁的自振频率。如图11所示，对330~460s的时间余振数据进行处理，得到的频谱与脉动法是几乎一致的。

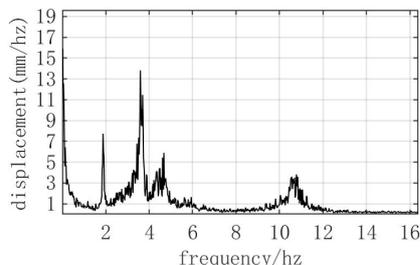


图11 310-340s 桥梁频谱图

在图9中可以看出，桥梁在314~330s经历了较大的振动，历时约16s。列车的时速约80km/h，在16s内列车前进了355m，而该距离正好约等于该列车的长度和三跨连续梁的和。因此，该段时间为列车车头进入第一跨到车尾离开第三跨的时间。桥梁的强迫振动频率为

列车经过车厢长度（23.54m）所需的时间的倒数<sup>[10]</sup>，频率为  $f = v/l$ 。列车速度为80km/h时，从而可得强迫振动频率0.94Hz，这与图12的试验结果（0.76Hz）相似。

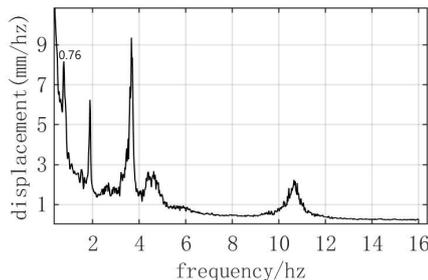


图12 频谱图

综上，IBIS-S雷达可以对桥梁振动状态进行有效的检测。

## 4 结语

本文研究了IBIS-S雷达系统的基本原理，该系统的步进频率连续波技术、干涉测量的关键技术，可以实现点的微变形监测。采用IBIS-S系统对微变形系统进行监测对比表明该雷达系统具有精确度高、稳定性好、效率高等巨大优点。IBIS-S系统不仅能对桥的位移影响线进行监测，也能获得桥梁的模式参数，更有利于对桥梁健康状态进行评价。

### 参考文献：

- [1] 王鹏, 刑诚, 项霞. 地基干涉雷达 IBIS-S 桥跨结构振动变测量与模态分析 [J]. 测绘通报, 2019(10):35-39.
- [2] 刁建鹏, 黄声享. 地面干涉雷达在建筑变形监测中的应用 [J]. 测绘通报, 2009(9):50-52.
- [3] Sofi M, LUMANTARNA E, MENDIS P, et al. Assessment of a pedestrian bridge dynamics using interferometric radar system IBIS-FS [J]. Procedia Engineering, 2017.
- [4] 金旭辉, 汪森, 华远峰等. 微波干涉测量技术及其在桥梁变形观测中的应用 [J]. 现代测绘, 2013, 36(6):3-9.
- [5] 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, 2012, 37(10):1173-1175.
- [6] 陈伟民, 李寸龙. 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(9):1251-1265.
- [7] 郑平安. 连续梁影响线的微机算法 [J]. 武汉城市建设学院学报, 1991.8(3):40-45.
- [8] 李兆仁. 风及列车荷载作用下大跨度桥梁振动响应研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [9] 施尚伟, 向中富. 桥梁结构试验检测技术 [M]. 重庆大学出版社, 2012:109-111.
- [10] 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.