

# 地面微波干涉雷达与 GPS 测定 桥梁挠度的对比试验分析

黄声享<sup>1</sup> 罗 力<sup>1</sup> 何 超<sup>1,2</sup>

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)  
(2 易智瑞(中国)信息技术有限公司,北京市东直门南大街甲 3 号,100007)

**摘 要:**将步进频率连续波技术、合成孔径雷达技术和干涉测量技术相结合而构成的地面微波干涉雷达系统,可实现对地面目标的静动态高精度监测。介绍了利用该技术的 IBIS 系统在武汉阳逻长江公路大桥所开展的动态挠度测试情况,并与 GPS 测量结果进行对比分析。结果表明,地面微波干涉雷达技术不仅可以精细地测量桥梁挠度的动态变化,且精度高,可以真实地反映结构物的动态变形特征。

**关键词:**地面随着微波干涉测量;GPS;桥梁挠度动态变形

**中图法分类号:**P228.41; P225

国民经济建设的发展,人们对大型、超高、大跨度建筑物的动态变形监测技术要求越来越高,而与此同时,建筑物体积、跨度和高度的不断增大,传统的测量手段已不能很好地满足变形监测的技术要求。近 10 a 来,微波干涉测量技术以其特有的“非接触性”和“实时性”等优势,逐步成为人们对大型、高层建筑物进行非接触式变形监测的手段之一<sup>[1,2]</sup>。最近推出的一种地面微波干涉雷达系统,即微变形监测系统(image by interferometric survey, IBIS),集成了步进频率连续波技术(steped frequency-continous wave, SF-CW)、合成孔径雷达技术(SAR)和干涉测量技术(interferometric survey),对地面目标的监测具有长测程、高精度和高时间分辨率等特点,有利于实现对高层建筑物、桥梁、高塔、坝体、边坡等工程的微小位移变化监测。目前,地面微波干涉雷达技术已在国内外进行了相关的试验研究工作<sup>[3-7]</sup>。

## 1 地面微波干涉雷达技术原理

IBIS 系统采用了步进频率连续波(SF-CW)、合成孔径雷达(SAR)和干涉测量(interferometry)等 3 种先进的技术<sup>[6]</sup>,以达到高精度、高分辨

率的变形信息获取的目的。其中, SF-CW 和 SAR 技术用于提高雷达影像的距离向分辨率和方位向分辨率,干涉测量技术用于提取变形信息。

1) 步进频率连续波技术

SF-CW 技术在于提高雷达的距离向分辨率。距离向分辨率是指雷达能区分的距离方向的最小目标距离。雷达的距离向分辨率  $\Delta r$  与扫频带宽  $B$  有关:

$$\Delta r = \frac{c}{2B} \tag{1}$$

式中,  $c$  为光速。

IBIS 的雷达采用了 SF-CW 技术,即在一个周期内发射步进频率为  $\Delta f$  的一组电磁波。由于 IBIS 的雷达处于 16.6~16.9 GHz 的 Ku 波段,其带宽  $B$  为 0.3 GHz,将其代入式(1),可得 IBIS 雷达的距离向分辨率可达 0.5 m,且该雷达的距离向分辨率与作用距离无关。

2) 合成孔径雷达技术

SAR 技术是利用雷达与目标的相对运动,把尺寸较小的真实天线孔径用数据处理的方法合成一个较大的等效天线孔径的雷达信号。IBIS 系统利用 SAR 技术提高系统的方位向分辨率。IBIS-L 型设备配置有一条长为 2 m 的线形扫描器

轨道,雷达天线在电脑的控制下,沿着轨道运动,使雷达从不同的角度发射电磁波,并收集回波信息,从而提高雷达的方位向分辨率。

IBIS 系统使用 2 m 长的滑轨,好比雷达的天线孔径为 2 m,则其方位向分辨率可计算为:

$$\Delta\varphi=\frac{\lambda}{2L}=4.5\text{ mrad}$$

(2)

式中, $\lambda$  为电磁波波长。

3) 干涉测量技术

雷达每隔一定的时间段向观测目标发射电磁波,并接受反射回来的电磁波。由于目标的位移,不同时间反射回来的电磁波的相位是不相同的。干涉技术就是通过比较相位信息来获取目标在径向方向的变形量。目标的变形量  $d$  与目标反射回来的电磁波的相位差  $\Delta\varphi$  有关:

$$d=\frac{\lambda}{4\pi}\Delta\varphi$$

(3)

根据监测对象的不同,IBIS 分为 S 和 L 两种型号。IBIS-S 无 SAR 功能,可用于建筑物的远程静态和动态变形监测,其测程为 1 km,位移监测精度  $\pm 0.01\text{ mm}$ ,图像采集频率可达 200 Hz,距离向分辨率为 0.5 m;IBIS-L 可用于山体滑坡、大坝、地表等缓慢位移的监测,利用线形轨道器实现合成孔径雷达,其测程为 4 km,位移监测精度  $\pm 0.1\text{ mm}$ ,图像采集时间 5 min/次,方位向分辨率为 4.5 mrad。

2 试验方案

武汉阳逻长江公路大桥的主桥为钢箱梁悬索

桥,跨度布置为(250+1 280+440)m,矢跨比为 1/10.5。采用分离式 H 形空间索塔。为保证大桥运营期间的安全,并为大桥的维护提供及时指导,该桥建立有一套健康监测系统,其中包括 GPS 实时位移监测系统<sup>[8]</sup>。

2.1 GPS 动态监测系统的测点分布

桥梁已有的 GPS 监测系统包括一个基准站和 4 个监测点,其 4 个监测点分别布设在两主塔顶和跨中桥面的上、下游侧。该 GPS 系统采用了卡尔曼滤波三差解算法来进行 GPS 测量数据处理,可直接获取精度较高的位移结果。

为方便挠度测量的试验对比,本文利用其跨中上、下游安装在主缆上的两个 GPS 测点,其位置如图 1 所示。GPS 的采样率为 5 Hz,试验对比分析可用的 GPS 数据观测时段是 2009-11-14:09:14:00~10:00:00(跨中桥面下游测点,北京时间)和 10:00:00 至 11:10:00(跨中桥面上游测点,北京时间)。

2.2 微波干涉测量布置方案

地面微波干涉雷达设备采用了 IBIS-S 系统。由于本试验中的微波干涉测量的测点无法直接与桥梁已有的 GPS 测点相重合,所以,为了方便对比分析,特将 IBIS 测量的测点安装角反射器设置在跨中上、下游与 GPS 测点相一致的钢箱梁底部,如图 2 所示。IBIS 主机安置在桥梁的岸侧,如图 3 所示。IBIS 观测下游测点的开始时间是 2009-11-14:09:30:00,观测持续时间有 15 min,实测时的采样率为 21 Hz;IBIS 观测上游测点的开始时间是当天的 10:40:00,观测持续时间有 30 min,实测时的采样率为 26 Hz。



图 1 GPS 测点的位置  
Fig. 1 Location of GPS Monitoring Points



图 2 角反射器的位置  
Fig. 2 Location of the Corner Reflector



图 3 IBIS 设备的位置  
Fig. 3 Site of the IBIS Equipment

3 实测结果对比

以跨中下游的 GPS 和 IBIS 挠度测量结果为例。考虑到两者数据的采样率不同(GPS 的采样

率为 5 Hz,IBIS 的采样率为 21 Hz),为了使两者具有可比性,首先对两系统采集的数据序列进行重采样处理,让重采样后的 IBIS 数据与 GPS 数据相互错动,分析两个数据序列的相关系数,当相关系数达到最大时,则认为此时的两个序列是对

齐的。跨中下游的 GPS 和 IBIS 测量挠度时程图见图 4。

- 1) 经数据相关性计算,图 4(a)、4(b)中两者的互相关系数为 0.861 7,表明它们是强相关的。
- 2) 由图 4 可知,两者的挠度幅值存在较大差异。究其原因,主要是 GPS 测量结果是经过滤波处理后的,其挠度幅值偏小;而 IBIS 测量的挠度是实测值,其结果更为客观,同时也反映了 IBIS 测量挠度的高精度和高时间分辨率特性。

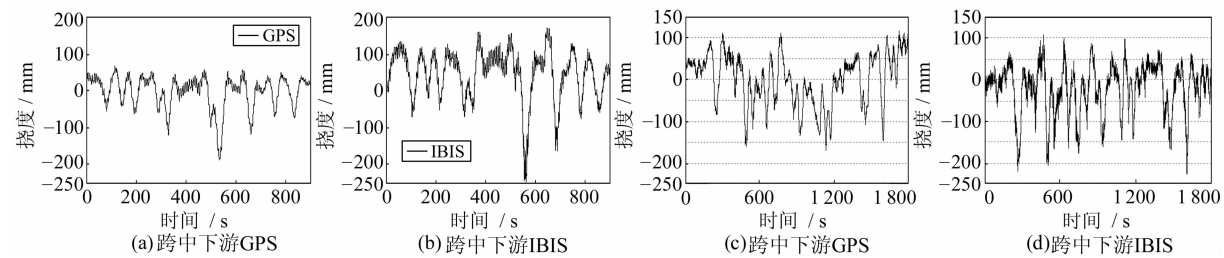


图 4 跨中下游与跨中上游 GPS 与 IBIS 的挠度时程曲线

Fig. 4 Deflection Displacement of GPS Monitoring Point and IBIS in the Mid-span, Downstream and Upstream Location

4 频谱分析对比

针对跨中下游 GPS 与 IBIS 测量的挠度时程数据,采用频谱分析法可以得到其相应的频谱图。为了方便对比,去掉其高频部分,两者测量动态挠度的频谱特征见图 5(a)。其中,GPS 测量挠度数据反映的主频为 0.136 6,幅值为 8.43 mm;IBIS 测量挠度数据反映的主频为 0.136 8,幅值为 12.43 mm。可见,两者测定动态挠度的主频结果基本一致,但 GPS 测定其幅值的效果比 IBIS 要差。

同样,可以得到跨中上游 GPS 与 IBIS 测量动态挠度的频谱图,见图 5(b)。图中,GPS 测量得到的动态主频为 0.135 5,幅值为 5.49 mm;I-

- 同样,可以给出跨中上游 GPS 和 IBIS 测量挠度时程图,分别见图 4(c)、4(d)。经分析可见:
- 1) 两者测量挠度变化的相关性较好;
- 2) IBIS 测量挠度的变化幅值要大于 GPS 测量的结果,与上述跨中下游挠度测量结果的分析一致;
- 3) 在时间 1 100~1 200 s 的位置,两者虽然测量挠度变化的折点趋势基本一致,但其变化幅值存在较大差异。

BIS 测量得到的动态主频为 0.135 6,幅值为 7.74 mm。可见,两者测定动态挠度的主频结果是一致的,而 GPS 测定幅值的效果比 IBIS 要弱。

另外,由图 5(b)的 IBIS 测量动态挠度频谱图可见,在其主频附近,还呈现一明显的次频,其频率为 0.107 8,幅值有 5.07 mm,而该动态特征在 GPS 的频谱图中并没有得到反映。

根据大跨度桥梁动力特性的分析方法,阳逻大桥的竖向弯曲(第一对称竖弯)的计算值为 0.11 Hz<sup>[8]</sup>,有限元法的计算值为 0.138 3 Hz<sup>[9]</sup>,加速度计的实测值为 0.12 Hz<sup>[8]</sup>,它们与 GPS 和 IBIS 测量的结果对比见表 1(需说明的是,加速度计实测的时间不是本试验的时间)。

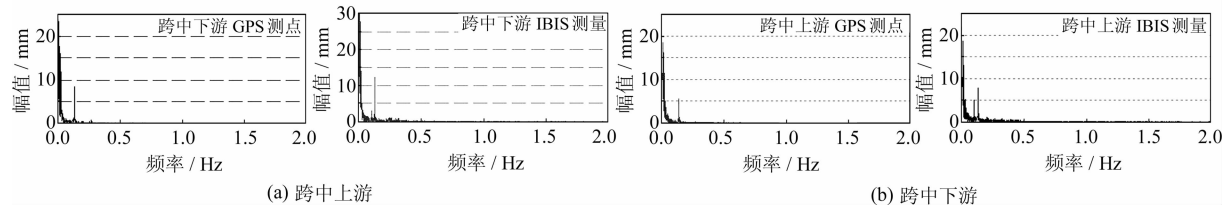


图 5 GPS 与 IBIS 测量挠度的频谱图

Fig. 5 Spectrogram of the Deflection Displacement Measured by GPS and IBIS

表 1 不同方法得到的桥梁主跨竖向主频对比分析/Hz					
Tab.1 Comparative Analysis of Different Methods to Get the Bridge Main Span Vertical Frequency					
项目	GPS	IBIS	有限元法	经验公式法	加速度计实测值
竖弯基频	0.136 6 下游	0.136 8 下游	0.138 9	0.11	0.12
	0.135 5 上游	0.135 6 上游			

由表 1,有限元法的计算值与 GPS 和 IBIS 的测量值接近,而经验公式法的计算值与加速度计的实测值接近,最大差异在 0.03 Hz 以内。

致谢:感谢中铁大桥局集团有限公司武汉桥梁科学研究院提供的试验数据。

参 考 文 献

[1] Pieraccini M, Luzzi G, Mecatti D, et al. Ground-based SAR for Short and Long Term Monitoring of Unstable Slopes[C]. Proceedings of the 3rd European Radar Conference, Manchester, UK, 2006

[2] Tarchi D, Casagli N, Fanti R, et al. Landslide Monitoring by Using Ground-Based SAR Interferometry: An Example of Application to the Tessina Landslide in Italy[J]. Engineering Geology, 2003, 68(2): 15-30

[3] Fratini M, Pieraccini M., Dei D, et al. An Experimental Comparison of Interferometric Radar vs Accelerometers for Monitoring of Large Structures [C]. The 4th European Radar Conference, Munich, Germany, 2007

[4] Fratini M, Pieraccini M, Parrini F, et al. An Interferometric CW-SF Radar for Remote Testing and Monitoring Large Structures[C]. The 3rd European

Radar Conference, Manchester, UK, 2006: 135-138

[5] Pieraccini M, Fratini M, Parrini F, et al. High-Speed CW Step-Frequency Coherent Radar for Dynamic Monitoring of Civil Engineering Structures [J]. Electron Lett, 2004, 40(14): 907-908

[6] 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): 45-47

[7] 何宁, 关秉洪, 齐跃. 微变形监测雷达在桥梁健康监测中的应用[J]. 现代交通技术, 2009, 6(3): 31-33

[8] 田启贤, 钟继卫, 李星新. 大跨度悬索桥变形与振动监测系统设计与实施[J]. 桥梁建设, 2009(z2): 101-105

[9] 吴坤平. 大跨度悬索桥动力特性计算及参数分析 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007

第一作者简介: 黄声享, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事变形监测与灾害预警、卫星导航定位技术应用的教学与科研工作。  
E-mail: sxhuang@ whu. edu. cn

Comparative Test Analysis for Determining Bridge Deflection by Using Ground-Based SAR and GPS

HUANG Shengxiang<sup>1</sup> LUO Li<sup>1</sup> HE Chao<sup>1,2</sup>

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)  
(2 Esri China Information Technology Co., Ltd., A 3 South Dongzhimen Street, Beijing 100007, China)

**Abstract:** By the stepped frequency-continuous wave technology, synthetic aperture radar and interferometric techniques, combining integrated ground-based SAR, can achieve high-precision monitoring of static and dynamic targets on the ground. This paper describes the dynamic deflection test carried out by the IBIS in the Wuhan Yangluo Yangtze River Bridge, and GPS measurements were compared. The results show that the ground-based SAR can not only fine to measure the dynamic changes in the bridge deflection, high accuracy; and can truly reflect the structure of the dynamic deformation characteristics, its high sampling rate feature provides a new means of technology for the bridge vertical bending test.

**Key words:** ground-based SAR; GPS; bridge deflection dynamic deformation

About the first author: HUANG Shengxiang, professor, Ph. D. Ph. D supervisor. He is concentrated on the research and education in high precision deformation monitoring and GNSS engineering application.  
E-mail: sxhuang@ whu. edu. cn