

GB-InSAR 技术在地铁变形监测中应用

Application of GB InSAR Technology in Subway Deformation Monitoring

杨盛波

Shengbo Yang

广东省水文地质大队 中国·广东广州 510510

Guangdong Hydrogeology Battalion, Guangzhou, Guangdong, 510510, China

摘要: 城市轨道交通建设过程可能造成附近地面和建筑物的变形,因此根据城市轨道交通监测的实际需要,以广州市城市轨道交通十号线广州大道中站为例,2023年6月采用了GB-InSAR技术开展了地铁周边地面、建筑物位移变化实施自动化成像监测研究,结果显示该区域沉降在1.4~17.5mm,和水准监测的位移变化趋势基本一致。研究表明,利用GB-InSAR在城市地铁施工区域实现高效、经济快速、高精度密度的变形监测是可行的。

Abstract: The construction process of urban rail transit may cause deformation of nearby ground and buildings. Therefore, based on the actual needs of urban rail transit monitoring, taking Guangzhou Metro Line 10 Guangzhou Avenue Middle Station as an Example, in June 2023, GB-InSAR technology was used to carry out automated imaging monitoring research on the displacement changes of ground and buildings around the subway. The results showed that the settlement of the area was between 1.4~17.5mm, The trend of displacement changes is basically consistent with the level monitoring. The research shows that it is feasible to use GB InSAR to realize Deformation monitoring with high efficiency, economic speed and high precision density in urban subway construction area.

关键词: 城市轨道交通; 变形监测; GB-InSAR

Keywords: urban rail transit; deformation monitoring; GB-InSAR

DOI: 10.12346/se.v5i2.8693

1 引言

GB-InSAR(地基合成孔径干涉雷达)是一种将步进频率连续波或调频连续波、合成孔径雷达、干涉测量等多种先进技术相结合的一种微形变远程监测技术。这项技术的独特之处是它可以突破自然条件约束,全天候、大范围、远距离的监控,给形变监控领域带来了一场新的技术革命。GB-InSAR技术将合成孔径雷达成像原理和电磁波干涉技术成功地结合在一起,利用传感器系统参数,姿态参数,轨道间几何关系,准确测量地表上某一点的空间位置以及细微变化,可以得到高精度、高分辨率形变信息,它可以探测到地面的微米甚至是亚微米尺度的变形。现在传统监测方式已经渐渐不能适应日益深化的应用需要,例如在建筑物、桥梁、滑坡等众多应用领域,都迫切需要一种稳定、准确、远程和实时的安全监测系统。因此对新型GB-InSAR变形监测技术进行人造大型建筑及自然灾害方面的研究显得尤为重要。目前,

虽然GB-InSAR技术已经被广泛应用于地表沉降、大坝、人工边坡、冰川等变形监测领域,但是它在地铁施工形变监测方面的应用还不普遍。

论文以广州地铁10号线广州大道中地铁站为例,利用GB-InSAR技术连续监测基坑周边位置,得到了其周围地面和建筑物形变场以及形变演变情况,并分析了地铁建设对周围基础设施产生影响的范围。

2 GB-InSAR 测量原理

GB-InSAR测量的基本原理就是对两幅雷达图像进行对比,再从一幅实测相位图像中和另一幅图像相位差值取得观测目标形变相位。在GB-InSAR系统中,距离 r 确定了相位的函数,而 r 则代表了传感器与目标之间的距离,可以用来表达:

$$2r = -\frac{\lambda}{2\varphi\pi}\varphi \quad (1)$$

【作者简介】杨盛波(1987-),男,中国广西桂林人,本科,工程师,从事工程测量及不动产测绘研究。

$$\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda}r \quad (2)$$

观测相位 φ^o (即缠绕相位) 为一个相对相位, 它的变化范围一直是 $(-\pi, \pi)$ 。绝对相位 (即解缠相位) 与相对相位 φ^o 之间的关系可表示为:

$$\varphi^\omega = \omega\{\varphi\} = \text{mod}\{\varphi + \pi, 2\pi\} - \pi = \varphi - 2\pi n \quad (3)$$

其中, φ^o 为缠绕相位, 相位模糊度 n (即相位总和的整数倍) 是未知的, 表示无法确定沿视线方向 (LOS) 发射信号和散射信号之间相位周期总和的具体数值。

因此, 在实际应用中不可能精确地测量出目标与雷达的绝对距离, 仅能得到相对距离 Δr 。图 1 是 GB-InSAR 差分干涉测量, 干涉条纹一般显示为有规律变化的彩色条纹, 其周期为 2π 。

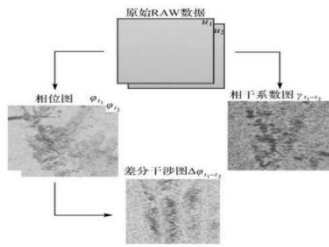


图 1 GB-InSAR 差分干涉测量

两幅图像干涉相位 φ^o 由地形相位 (φ_{topo})、大气相位 (φ_{atmo})、位移相位 (φ_{disp}) 及系统噪声相位 (φ_{noise}) 组成, 即

$$\varphi^\omega = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{atmo}} + \varphi_{\text{disp}} + \varphi_{\text{noise}} - 2\pi n$$

对绝大部分变形监测来说, 关心的是 φ_{disp} 问题。所以只要从差分干涉图上识别和剔除其他相位即可获得监测目标变形结果。相对于星载, 机载合成孔径雷达 GB-InSAR 系统的一个显著优点是在两次数据采集期间天线的位置不会改变。在这个特定的情况中 φ_{topo} 是可以被忽略的。但是, 在长期连续反复观测的情况下, 与仪器重新定位相关的错误的现象可能会出现, 导致引起空间基线的变化。此时需要考虑到 φ_{topo} 因素, 并利用监测区的 DEM 对地形相位进行校正^[1]。

3 监测区概况

监测区是广州轨道交通 10 号线广州大道中站的施工场地, 该场地位于天河区广州大道中段的东段, 沿着广州大道中段的南北方向, 该场地采取了半覆盖式 (明挖) 顺筑的方法。车站大小里程位置端均采用盾构法, 两端都考虑了盾构起始条件。施工周边区域有道路广州大道中、富力盈丰大厦、邦华环球广场、星汇国际、华普广场等重要基础设施, 如图 2 所示。在此区域内, 人流密集, 车辆高速行驶, 常规的地基监控手段很难在人流密集区实现大规模自动化监控。为此, 本项目采用 GB-InSAR 技术, 实现该区域的长距离、全天候、自动化的地表变形监测。



图 2 地铁施工现场

4 监测数据处理与评价

4.1 数据采集

在监测区域内使用 GB-InSAR 系统进行了 20 天的持续观测, 监测期间为 2023 年 6 月 2 日至 6 月 22 日, 在这段时间里有过 2 次大雨天气。GB-InSAR 系统布置在广州大道中人行天桥上 (如图 3 所示), 主要的观测参数如表 1 所示, 该次观测获得了原始的雷达资料 5612 个。



图 3 GB-InSAR 测量系统

表 1 InSAR 测量系统主要观测参数

观测参数	参数值
天线倾角 /°	10
最远监测距离 /m	286.5
总监测时间 /h	428
距离角分辨率 /m	0.5
角度向分辨率 /mrad	4.5

4.2 数据处理

在 GB-InSAR 系统数据采集完成后, 接下来需对原始的雷达图像数据进行阈值设置, 数据定标, 图像配准, 干涉测量, 干涉图滤波, 相位解缠, 大气校正等操作, 从而获得轨道交通周围地表和建筑物的变形场。

4.2.1 预处理

①选取部分连续的原始数据, 设置相应阈值, 如热信噪比, 估计信噪比, 相干系数, 相位稳定度等。本次所获得的数据质量良好, 实现热源信噪比 > 10dB, 预计信噪比 > 10dB, 相干度 > 0.5, 相稳定性 > 0.3。

②对选定的雷达数据利用 IBIS-DV 软件进行分析, 选择出适当的标定和聚焦参数, 然后将已选定的阈值、标定和聚焦参数应用于所有的雷达数据, 从而获得满足雷达干涉处理的数据^[3]。

4.2.2 干涉处理

获取的雷达数据需要进行干涉处理。首先选取第一个图像作为主影像，然后将它与其他图像进行干涉处理，再将两个图像进行相位共轭运算，就可以获得它的干涉图像。然后，并将其转换成被测量对象的位移量。在此过程中，干扰相位信噪比将因噪声因素影响而降低。为了消除噪声影响，需要采用一些有效的方法如平均滤波等。由于干扰因素的存在，造成了相位和变形的不连续和不一致，通过对滤波后的图像进行处理，可以看出图像的相位变化和变形变化都是比较连续的^[2]。

4.2.3 环境因素校正

GB-InSAR 发射的雷达波是一种微波，在不同的环境下电磁波的传播速度不同，在长时间的监测过程中，气温、湿度和压力等环境因素的存在，电磁波会产生折射现象，从而对检测结果产生影响。为消除这种影响，必须选择一个稳定的观测地点，并对运动目标的观测值进行大气扰动校正。在本次监测的过程中，温度下降了 8°，湿度增加了 68%，这些变化都会对监测结果产生影响。结合监测区的实际地形条件，在距离地铁施工区域很远的建筑上选择了 2 个 GCP 点，GCP 的时序变化受气温变化为主。在气温变化较大的时段内，环境控制点的位移量变化较大。在此基础上，利用 GCP 数据对各像元的变形场进行校正，获得各像元的实际变形量，从而获得监测区的变形场（视距方向）。

4.3 数据质量评价

GB-InSAR 系统是一种利用高频电磁波相位差异来监测目标物体细微形变的方法，其成像和干涉质量将直接影响到目标物体最终形变的准确性。影响数据质量的因素主要有反射光强，相干性，热信噪比。监测位置信号反射强度较大，代表着监测目标对信号的反射性较强，且具有较高的反射性和较高的数据质量。图 4 为观测现场雷达信号反射强度图，图中富力盈力 (a)、富力盈丰 (b)、邦华环球 (c)、地铁施工现场 (d)、地铁施工现场 (e)、地铁施工现场 (f)、富力盈力 (g) 各部分的反射强度达 30dB 以上，说明所采集到的资料具有较高的质量。其中，相干性是指在不同时间内被测对象的干扰特性，其最大值为 1，最小值为 0。当相干系数趋于 1 时，相应的目标的干扰特性就会变得更好。图 5 显示监测目标大部分雷达信号相干性都接近于 1，反映了此次监测具有良好的数据质量。图 6 是消除了小于 40dB 的热信噪比值的监测区域的热信噪比图，其能清晰地反映获取的数据质量。

5 监测结果分析

经过一系列原始雷达影像处理后，最后求出了地铁基坑周围的地表和建筑等基本结构的变形结果以及它们的演化过程。

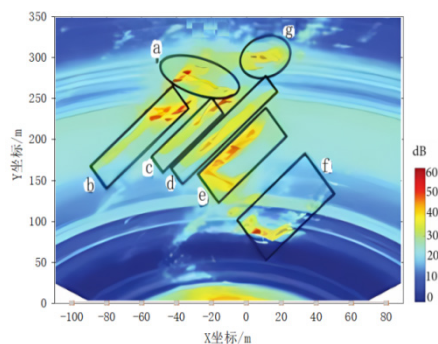


图 4 监测区域雷达信号反射强度

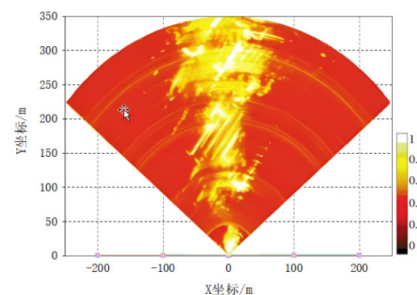


图 5 雷达相干性图

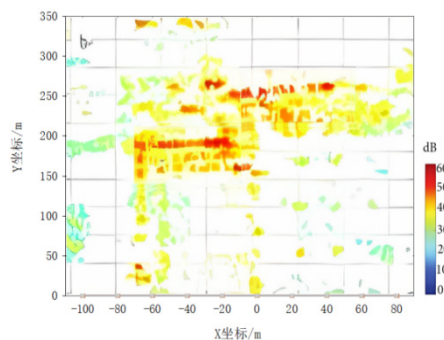


图 6 热信噪比值图

5.1 监测区形变场

基于研究区的地形特征和信号反射强度，在远离地铁施工区域的建筑上选择了两个 GCP 点，对其进行了大气校正和相位解缠，并设置了不同的阈值和滤波处理，最后得出了该监测区域的形变图。针对研究区的真实地形状况以及其信号的反射强度，从远离地铁施工区的建筑中选择两个 GCP 点（如图 7 所示），对其进行大气校正和相位解缠，并对其进行不同的阈值和滤波处理。X 方向代表的是雷达的方位，Y 方向代表的是距离，也就是视线的方向，从图表上可以看到，在经过 428 个小时的持续监控之后，大多数监控区域的累积形变都在 10 毫米以下，这说明了地面和周围的建筑物都是比较稳定的，地铁建设对周围环境的影响不大。然而，有一处（图中的红色区域）的变形较大，最大变形为 17.5mm（沿雷达视线向靠近仪器），这说明了该区域附近受到地铁施工的影响比较大，有较大的形变。

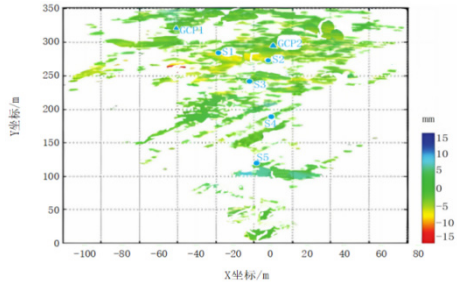


图7 监测区形变场(视线向)

5.2 监测点形变量

为了对道路和建筑变形过程进行详细的分析,在监控范围内,选择了图7的中点S1, S2, S3, S4, S5作变形分析。图8和图9是所选择的监测点在大气校正前和校正后的变形曲线,可以看到除了S2以外,其他的监测点在校正后的变形都在15mm之内。

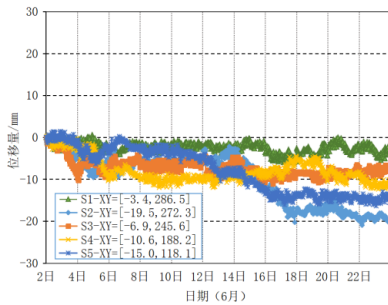


图8 校正前的变形量过程曲线图

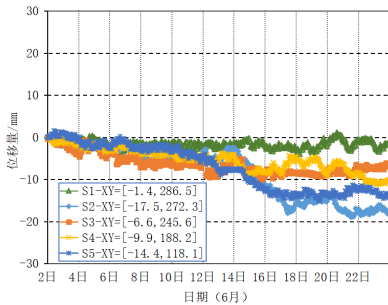


图9 校正后的变形量过程曲线图

① S1形变量为-1.4mm左右,此点位于富力盈力大厦柱子角点,说明S1所处的那栋楼离雷达较远,S1从一开始监测到结束沉降变化曲线都是比较平稳,说明S1的变形受到开挖和机械振动影响小,且形变量都在3mm范围内,表明该建筑物尚处于安全状态^[4]。

② S2最大形变累积量达到-17.5mm,点埋在富力盈丰地面,表明S2受到地铁基坑开挖的影响较大,随着基坑不断开挖变形有可能有变大的方向发展,较其他地方较严重,通过现场巡查发现,由于地铁基坑开挖有10多米深,大楼周边路面有明显变形迹象,伴随着细小的裂纹,地基损坏较为严重,与GB-InSAR监测数据一致。

③ S3是邦华环球建筑点形变累积量最大达-6.6mm, S4是邦华环球广场地面点形变累积量达到-9.9mm,说明该位置发生了轻微的偏移,这说明在某种程度上,地铁的建设对建筑

产生了微小的变形,也印证了此处地面和建筑物的形变受到的影响是一致的。

④ S5为广州大道中段地面点,其累计形变达-14.6mm,且存在着一些位移,说明地铁建设对地表产生了一定的影响。

同时在地铁基坑开挖监测的过程中,同时也采用了SDL1X水准仪每天一次监测的频率对所有测点进行了监测。论文中选取GB-InSAR监测数据S2、S4的结果与对应的S2、S4水准仪监测结果进行对比,如图10所示。S2与S2水准测量最终差值为1.4mm, S4与S4水准测量最终差值为1.1mm。

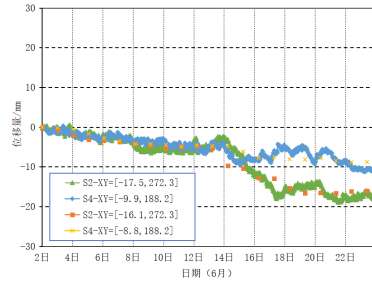


图10 GB-InSAR监测数据与水准测量比对

综上所述,各监测点的变形趋势都是比较平稳的,即使在强降雨的影响下,也没有发现施工周围的变形异常,施工对周围的基础设施造成的影响也较小。

6 结语

论文采用基于GB-InSAR技术进行了地铁施工阶段监测的研究,得到结论如下:

①本研究以广州大道中地铁建设区为研究对象,采用基于GB-InSAR的监测方法,对该地区地铁建设区进行高精度、高时空分辨率的微形变测量,研究得出广州大道中地铁站建设区周边,多数变形积累不超过10mm,变形变化趋势较为平稳,满足地铁监测要求。

②GB-InSAR技术测量具有非接触、遥测距离远、一次性监测范围大、精度高优势,通过周边地面、建筑物精密水准数据分析比较沉降结果与时间的变化关系,验证GB-InSAR变形结果可靠。通过本次试验,验证了InSAR干涉测量进行地铁监测可行性和可靠性,为地铁工程快速、准确监测提供了一种新技术,同时也为未来的地表形变监测及科学防灾减灾工作提供有益的借鉴。

参考文献

- [1] 马静,刘智强.非接触式GB-InSAR技术用于深基坑应急监测的可行性探讨[J].城市地质,2015(10).
- [2] 饶雄,曹成度,滕欢乐,等.地基雷达干涉测量技术在城轨交通变形监测中的应用[J].工程实践,2018(7).
- [3] 娄明明,巩华刚.基于D-InSAR技术的鄂尔多斯市矿区形变监测与分析[J].测绘地理信息,2021(6).
- [4] 郭森,王玉洁.地基合成孔径雷达干涉测量技术在形变监测中的应用[J].测绘与空间地理信息,2018(12).