

基于合成孔径雷达差分干涉测量技术的济南 轨道交通 1 号线地表沉降监测*

刘学敏¹ 路林海¹ 韩 林¹ 夏磊凯² 杨小凤¹

(1. 济南轨道交通集团有限公司, 250101, 济南; 2. 南京市测绘勘察研究院股份有限公司,
210019, 南京//第一作者, 工程师)

摘 要 针对传统水准测量点观测的工作量大、易受外界环境影响、观测结果不直观等问题, 利用 20 景 Sentinel-1A 卫星数据, 依托合成孔径雷达差分干涉测量技术的空中遥感、形变敏感度高、微波穿透力强、几乎不受气象制约等特点, 对济南轨道交通 1 号线地表沉降进行监测探究, 并与传统精密水准测量数据进行对比分析。结果表明: 此方法可直观显示济南轨道交通 1 号线沿线周围地表沉降情况, 且监测结果与传统精密水准测量监测结果间的一致性很高, 对轨道交通建设和运营的安全管理、安全预警具有一定的参考意义。

关键词 城市轨道交通; 地表沉降; 合成孔径雷达差分干涉测量技术; 监测

中图分类号 U456.3⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.06.008

Detection of Ground Subsidence Deformation on Jinan Rail Transit Line 1 Based on DInSAR Technology

LIU Xuemin, LU Linhai, HAN Lin, XIA Leikai, YANG Xiaofeng

Abstract Traditional observation of leveling points suffers problems like enormous workload, vulnerability to the external environment and intuitive observation results. By using the 20 scenes satellite data of Sentinel 1A, the differential synthetic aperture radar interferometry (DInSAR) technology features the characteristics of air remote sensing, high deformation sensitivity, strong penetrating power, almost unaffected by weather constraints, etc. The technology is applied to the monitoring of ground subsidence deformation of Jinan rail transit Line 1, the observed data are compared with traditional precise leveling one. The results show that this method can directly show the surface subsidence along the rail transit Line 1 in Jinan City, the monitoring results are highly consistent with that of the traditional precision leveling monitoring, therefore has referential

meaning to the safety management and early warning of rail transit construction and operation.

Key words urban rail transit; ground subsidence; DInSAR technology; detection

First-author's address Jinan Rail Transit Group Co. Ltd., 250101, Jinan, China

运营中的城市轨道交通线路, 沿线会不可避免地出现地表沉降。非均匀性沉降会损害桥梁结构和路基结构、破坏轨面, 严重者还将造成地面塌陷, 给线路安全运营、周边居民、建构物带来安全隐患。因此, 定期开展城市轨道交通线路沿线的地表沉降监测具有重要意义。

合成孔径雷达差分干涉测量(DInSAR)技术具有空中遥感、形变敏感度高、微波穿透力强、几乎不受云雨气象制约等特点, 因此普遍认为其是基于面的空间大地测量技术。与传统的水准测量相比, DInSAR 技术进行地表沉降监测时的主要优势在于: 监测范围大, 可根据需要选择研究区域; 节省大量人力物力、方便快捷、成本低; 监测结果可直观显示, 可获取研究区域地表的连续形变信息。近年来, InSAR 技术在城市地表沉降、高速公路、高速铁路、城市轨道交通, 甚至大桥等项目的纵向位移形变监测中发挥着越来越大的作用^[14]。

本文基于此技术, 利用 20 景 Sentinel-1A 的卫星数据, 探究 DInSAR 在济南轨道交通 1 号线地表沉降监测中的应用。

1 DInSAR 变形监测原理

合成孔径雷达可主动发射微波信号并接收地面返回的微波信号, 获取影像的强度信息和相位信

* 住房和城乡建设部科学技术项目(2016-K4-053); 山东省住建厅科学技术项目(FW-20161001:A7); 济南市社会民生重大专项(201704140)

息。对同一研究区域内两幅 SAR(合成孔径雷达)影像进行差分,得到相位差,利用这些高敏感信号提取研究区域的形变信息。影像中每个像元值用 $a + bi$ 复数形式表示,则其相位值为:

$$\phi = \arctan \frac{b}{a} \quad (1)$$

式中:

- ϕ ——影像中单个像元相位值;
- a ——影像中表示单个像元值的整数部分;
- b ——影像中表示单个像元值的复数部分。

两幅影像进行干涉即为对应像元值的共轭相乘,结果可表示为对应像元相位相减:

$$\phi_{IF} = \phi_M - \phi_S \quad (2)$$

式中:

- ϕ_{IF} ——影像对于干涉后的像元相位值;
- ϕ_M ——影像对中的主影像像元相位值;
- ϕ_S ——影像对中的从影像像元相位值。

假设式(2)中干涉相位不包含其他因素的影响,仅由形变量引起,则 ϕ_{IF} 通过相位解缠可得到同一地面点不同时刻雷达波绝对相位差值,其斜距差为^[5]:

$$\Delta R = R_M - R_S = \frac{\lambda}{P4\pi} \phi_{abs} \quad (3)$$

式中:

ΔR ——主影像与从影像地面点到雷达的斜距差;

R_M ——主影像地面点到雷达的斜距;

R_S ——从影像地面点到雷达的斜距;

P ——固定参数。对于机载系统 P 为 1,对于星载系统 P 为 2;

λ ——雷达波长;

ϕ_{abs} ——影像对于干涉后相位解缠得到的影像对绝对相位差值。

针对传统 DInSAR 技术的时空失相干和大气失相干问题,小基线集算法^[6]对此作了改进,式(3)可转化为:

$$\phi_{abs} = \frac{4\pi}{\lambda} (d_{t_2} - d_{t_1}) = \frac{4\pi}{\lambda} vT \quad (4)$$

式中:

- d_{t_1} ——同一地点 t_1 时刻的形变量;
- d_{t_2} ——同一地点 t_2 时刻的形变量;
- v ——形变速率;
- T ——主从影像时间间隔。

对于时间序列 (t_1, t_2, \dots, t_N) 上 N 幅影像生成的 $N-1$ 幅干涉图,每个相干点均可建立成像时刻形变量与差分相位线性方程组,并利用最小二乘方法求解 N 幅图像的形变。

小基线集算法将获取的影像数据组合成若干多主影像集合,提高了影像利用效率。集合内基线距小,集合间基线距大,可有效解决时空去相干问题。本文基于上述原理进行数据处理。

2 济南轨道交通 1 号线地表沉降监测

2.1 工程概况

济南轨道交通 1 号线工程位于济南市西部新城,是济南市轨道交通网中南北走向、贯穿西部新城的一条主干线(见图 1)。1 号线基本沿既有城市道路敷设,全长 26.1 km。其中:地下线 9.7 km,高架线 16.2 km,过渡段 0.2 km。全线设置车站 11 座:工研院站至玉符河站 7 个车站为高架车站;王府庄站至方特站 4 个车站为地下车站。根据勘察报告显示:1 号线沿线地形南高北低,从南至北经过山地和平原;高架段地质稳定性较好,地下段沿线主要为冲洪积平原地貌,局部低山丘陵地貌,地质条件复杂,深基坑开挖存在一定的风险性。1 号线根据施工实际,从 2016 年初陆续开启第三方监测,到 2018 年 8 月随着主体施工的完成监测工作已基本结束。

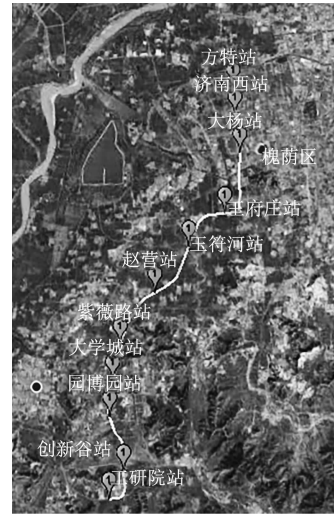


图 1 济南轨道交通 1 号线线路走向图

2.2 SAR 影像数据与处理

所获取到的 20 景 Sentinel-1A 降轨单视复数 (SLC) 影像,均为 IW(干涉宽幅)成像模式,时间跨度为 2016 年 1 月至 2018 年 8 月,影像地面分辨率

为 5 m × 20 m。轨道校正采用精密轨道数据,地形相位去除采用 30 m 分辨率 ASTGTM2_DEM 模型。表 1 给出了 20 景影像成像时间,相邻影像的平均时间间隔为 48 d。

表 1 影像时间列表

序号	成像时间	序号	成像时间
1	2016-01-14	11	2017-07-19
2	2016-03-02	12	2017-09-05
3	2016-04-19	13	2017-10-23
4	2016-06-06	14	2017-12-10
5	2016-07-24	15	2018-01-27
6	2016-10-04	16	2018-03-04
7	2016-11-21	17	2018-04-21
8	2017-01-08	18	2018-06-08
9	2017-02-25	19	2018-07-26
10	2017-05-20	20	2018-08-31

采用小基线集算法进行影像配对,选取幅度离差指数小于 0.2 的像元作为相干像元,采用 Goldstein 滤波方法进行滤波,利用 3D 解缠和 Delaunay MCF 解缠相结合进行相位解缠。经检查选取,最终保留了质量较好的 78 对影像干涉结果。这些结果中最大空间基线为 -119.94 m,最大时间基线为 360 d。图 2 给出了研究区域强度图和解缠后差分干涉图,因获取的影像均为降轨数据,所以影像显示均为镜像影像,影像清晰可见,解缠结果理想。

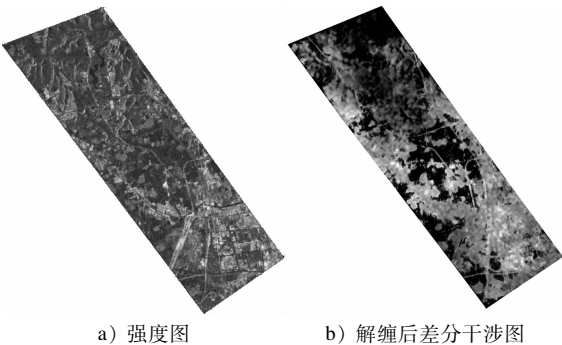


图 2 SAR 强度图和解缠后差分干涉图截图

以 2016-01-14 的影像作为初始参考影像,获取时间序列上的形变及其形变速率信息,并转换到 WGS-84 坐标系。图 3 为所研究区域的竖直向形变速率图。从图 3 可见,1 号线周围地表沉降总体处于稳定状态,年沉降速率为 -12 ~ +12 mm。其中:王府庄站至园博园站以东、园博园站以南整体线路

区段的沉降呈增大趋势。而王府庄站以北、王府庄站至园博园站以西的线路整体呈现沉降稳定趋势。究其原因主要为王府庄至园博园站以西、王府庄站以北区段的线路多为冲洪积平原地貌,地质条件复杂,且建筑物集中,人群生活集中,存在大量的建设活动;而王府庄站至园博园站以东、园博园站以南区段线路则处于山区,地质条件较稳定,且人群生活聚居区分布零散,相应的建设活动较少。在方特站东侧的深色区域显示线路的竖向年沉降速率达到了 20 mm,经探查,该区段线路的周围长期存在着大面积施工。

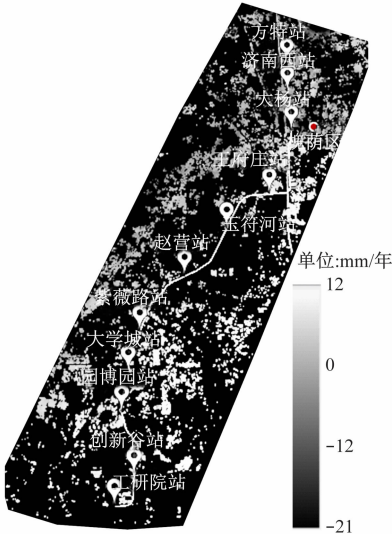


图 3 研究区域的竖直向形变速率图截图

2.3 地表沉降监测结果分析

为验证 DInSAR 的监测结果,特收集了各车站地表竖向位移第三方监测数据。第三方监测根据施工情况进行,时间跨度均不相同,一般监测至施工完成,其监测地表竖向位移精度较高。DInSAR 的监测时间跨度是 2016 年 1 月至 2018 年 8 月。表 2 给出了反映各车站及周围地表竖向位移监测范围内的第三方监测和 DInSAR 监测结果。通过对这两组数据的对比发现,大部分车站地表竖向位移范围一致性较好,园博园站和工研院站相差较大。根据收集的车站周围监测点数据计算车站的平均竖向位移,如图 4 所示,方特站至赵营站区段、园博园站、创新谷站的平均竖向位移基本一致,大学城站和工研院站平均地表竖向位移相差较大。对以上情况进行分析,产生上述结果主要有以下原因:一是监测的时间跨度不同,虽然第三方监测是从施工开始前监测至施工结束,地表竖向位移趋于稳定,但不

排除施工前和施工后发生沉降或抬升的情况；二是根据风险等级,各站监测点的密度分布和监测频率也不尽相同,如玉符河站至工研院站区段处于郊区,周围有大片原野和山地,此处获取的第三方监测数据较少,DInSAR 获取的监测点也较少；三是第三方监测点分布和 DInSAR 获取的监测点分布不完全相同,竖向位移数据分布不均匀,因而计算的平均数也有区别。

表 2 各车站地表竖向位移监测情况

车站名	第三方监测竖向 位移范围/mm	DInSAR 监测竖向 位移范围/mm
方特站	(-12.80,2.30)	(-11.03,-0.63)
济南西站	(-1.70,2.20)	(-4.88,0.65)
大杨站	(-20.10,6.50)	(-15.01,6.24)
王府庄站	(-10.41,2.82)	(-10.38,6.60)
玉符河站	(-4.20,0.10)	(-4.71,1.48)
赵营站	(-1.40,2.70)	(-4.85,6.28)
紫薇路站	(-1.30,0.70)	(-0.88,5.72)
大学城站	(-3.80,4.10)	(0.71,6.8)
园博园站	(-19.10,4.00)	(-3.35,2.63)
创新谷站	(0.10,4.50)	(-1.43,2.05)
工研院站	(-0.60,-0.50)	(10.81,13.12)

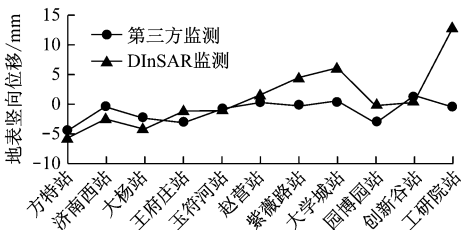
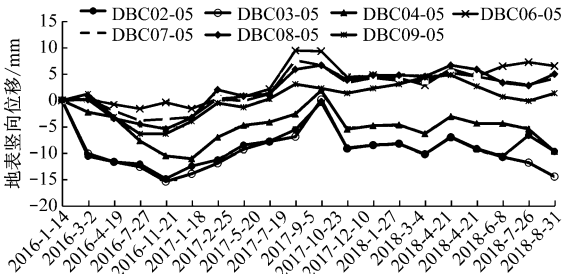


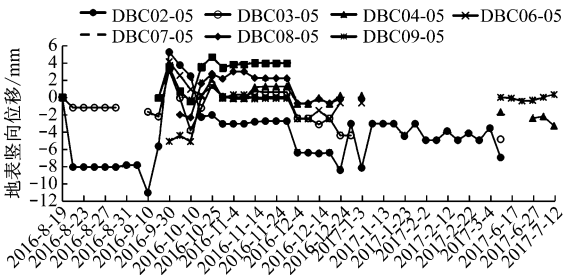
图 4 各站平均地表竖向位移对比

本文选取了王府庄站的 7 个监测点,并对监测点进行编号,用以验证数据的可靠性。图 5 a) 为 DInSAR 的监测结果,时间跨度为 2016 年 1 月 14 日至 2018 年 08 月 31 日;图 5 b) 为第三方监测结果,时间跨度为 2016 年 8 月 19 日至 2017 年 7 月 12 日。从两者监测结果中可见:DBC02-05、DBC03-05 及 DBC04-05 三个监测点的地表竖向位移均为负值(即下沉),且有增大趋势,DInSAR 监测值在 0 ~ -15 mm 间变化,第三方监测值在 0 ~ -12 mm 间变化;DBC06-05、DBC07-05 及 DBC08-05 三点的地表竖向位移均为正值(即隆起),DInSAR 监测值在 0 ~ 10 mm 间变化,第三方监测值在 0 ~ 5 mm 间变

化;DBC05-05 点的地表竖向位移,DInSAR 监测结果为正值,第三方监测结果中最后监测数据也显示其竖向位移有趋正的趋势。



a) DInSAR 的监测结果



b) 第三方的监测结果

图 5 两种方法的监测结果

表 3 给出了两组数据的对比结果:最大地表竖向位移相差最大为 10.47 mm,最小为 0.65 mm,平均为 4.12 mm。平均竖向位移相差最大为 8.2 mm,最小为 0.8 mm,平均为 3.33 mm。个别监测点的竖向位移相差较大,如 DBC03-05、DBC04-05 达到了 10 mm。分析其原因,一是两者的参考时间不同,由此竖向位移累积量会有所差别;二是 DInSAR 选取的点位与第三方监测的点位大致位于同一地点,但不能完全对应。但从总体分析可见,两者变形趋势一致性很高。

表 3 两种监测方法结果对比分析

点号	第三方监测			DInSAR 监测		
	最大竖向 位移/mm	平均竖 向位移 /mm		最大竖向 位移/mm	平均竖 向位移 /mm	
DBC02-05	5.19	-11.00	-4.53	0	-14.79	-8.66
DBC03-05	3.12	-4.85	-1.19	0.16	-15.32	-9.39
DBC04-05	1.23	-0.77	-0.40	1.88	-11.02	-4.94
DBC05-05	4.08	-2.50	-0.09	9.42	-1.57	3.24
DBC06-05	4.64	-0.49	2.74	7.57	-3.81	1.94
DBC07-05	2.94	-2.34	0.77	6.64	-5.40	2.09
DBC08-05	2.02	-5.12	-0.71	5.85	-6.32	0.29

(下转第 39 页)

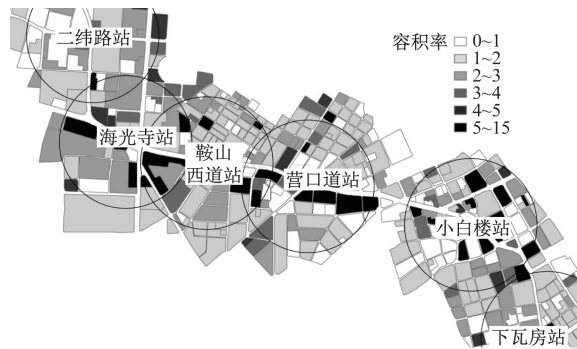


图2 天津中心区城市轨道交通沿线容积率

线、3号线沿线土地利用更新演变分析中发现,地铁1号线站域空间经过10年的发展,约25%的土地功能进行了置换,而地铁2号线和3号线开通仅5年,分别只有6.9%和12.1%的土地进行置换,且置换土地多位于城市的外缘区域。此外,天津市城市轨道交通沿线的开发与城市空间总体布局密切相关,线路沿线各区域的更新状况并不相同,城市副中心区车站的站域土地更新较快,而中心区域主要通过高强度的开发来激发城市活力。

参考文献

[1] 吴韬,严建伟.城市轨道交通站点可达性度量及评价——以

(上接第35页)

3 结语

本文基于DInSAR技术,利用20景sentinel-1A影像对济南轨道交通1号线地表沉降进行了监测研究,并对监测结果进行了分析,得出以下结论:

1) 此方法监测结果和第三方监测结果一致性很高。DInSAR监测的精度和可靠性均较高,对轨道交通线路在建设和运营阶段的安全管理、安全预警具有一定的参考作用。

2) 相较于传统方法,此方法的面状、彩色显示更具有直观性,数据处理更方便快捷,可节省了大量的人力物力。

3) 此方法也存在一定的不足之处,如:一些感兴趣的点没有获取到;对数据的验证方面在时间跨度上和选点上不能完全一致等。

针对上述的问题,在接下来的试验中可以重点研究解决,解决思路如下:

1) 购买高分辨率的影像;

2) 对数据处理中的参数设置进行多次试验,寻求最优参数;

天津市为例[J].地理与地理信息科学,2020,36(1):75.

- [2] 阎小培,周素红,毛蒋兴,等.高密度开发城市的交通系统与土地利用:以广州为例[M].北京:科学出版社,2006:1.
- [3] CALTHROPE P. The next american metropolis: ecology, community, and the american dream [M]. New York: Princeton Architectural Press, 1993: 10.
- [4] CERVERO R, KOCKELMAN K. Travel demand and the 3Ds: density, diversity, and design [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 1997(3): 199.
- [5] 王成芳,黄铎.城市规划专业课程的设置与教学实践研究[J].规划师,2007(11):68.
- [6] 王锡福,徐建刚,李杨帆.基于GIS的城市轨道交通与土地复合利用研究——以南京为例[J].城市发展研究,2005(4):53.
- [7] 王成芳.广州轨道交通站区用地优化策略研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [8] 吴韬,张梦莹.基于GIS的轨道交通沿线土地发展演变研究[J].都市快轨交通,2019,32(3):39.
- [9] 任利剑.城市轨道交通系统与城市功能组织协调发展研究[D].天津:天津大学,2014.
- [10] 天津大学建筑学院.地铁站点上盖建设对城市发展影响研究[R].天津:天津大学,2013.
- [11] 吴韬.天津市轨道交通站域特征分析及优化策略研究[D].天津:天津大学,2018.

(收稿日期:2018-06-05)

3) 对DInSAR不同的数据处理方法进行研究对比,选择最优的算法;

4) 在线路沿线设置若干个永久散射点,定期进行水准测量,以进一步验证此方法的精度和可靠性。

若此方法精度和可靠性得到进一步验证,则可在城市轨道交通线路沿线及周边建筑物沉降监测方面发挥更为重要的作用。

参考文献

- [1] 路旭,匡绍君,贾有良,等.天津市测绘院应用InSAR技术监测滨海新区地面沉降[J].城市勘察,2012(10):122.
- [2] 师红云.基于时序雷达干涉测量的高速铁路区域沉降变形监测研究[D].北京:北京交通大学,2013.
- [3] 姜德才,张永红,张继贤,等.天津市地铁线不均匀地表沉降InSAR监测[J].遥感信息,2017,32(6):27.
- [4] 黄其欢,丁幼亮,王—安,等.基于InSAR的南京大胜关大桥纵向位移监测与分析[J].东南大学学报(自然科学版),2017,43(7):584.
- [5] 刘国祥.InSAR基本原理[J].四川测绘,2004,27(4):187.
- [6] USAI S. A Least Squares Database Approach for SAR Interferometric Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(4): 753.

(收稿日期:2019-01-09)