DOI:10.19789/j.1004-9398.2016.06.015

应用相干点目标干涉测量分析方法监测北京市地面沉降

王 琴[1,2,3] 陈 蜜[1,2,3] 刘书军[1,2,3]

(1. 首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室,北京 100048; 2. 北京市城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地,北京 100048; 3. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048)

摘 要

本文介绍了合成孔径雷达差分干涉测量(Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar,简称 D-InSAR)和小基线集(Small Baselines,简称 SBAS)时间序列分析方法的原理,利用 D-InSAR 和 SBAS 分析方法,基于 ENVISAT ASAR 数据,研究了 2007—2010 年期间北京东郊主要地面沉降区域的空间分布特征,并对两种方法获得的结果进行对比验证,选取均匀分布的 1 000 个点的年平均沉降速率进行对比,结果显示,二者之间的相关性达到 0.91,均方根值(RMS)为 13.57 mm/a.

关键词: D-InSAR,SBAS,地面沉降,相关性,RMS.
中图分类号: P642.26; P208

0 引 言

地面沉降是大多数平原城市已经面临,或者具有潜在隐患的一种严重的地质灾害. 随着人类活动的日益频繁,因人类活动而触发的地面沉降已经引起国内外的高度关注. 自 20 世纪 50 年代以来,华北平原持续发生了大面积的地面沉降灾害,且自发现以来,沉降呈加速发展趋势. 据北京市矿产勘查开发局的调查统计资料显示,至 2005 年底,北京平原区地面沉降量大于 50 mm 的面积为 4 114.12 km^2,大于 100 mm 的积为 2 815.29 km^2,其中,沉降中心最大累计沉降量为 1 086 mm,最严重地区的地面沉降量仍在以 30 ~ 60 mm/a 的速度在下沉[1]. 最大年均沉降速率达 66.3 mm/a[1-4]. 至 2009 年底,累计最大沉降量达 1 163 mm,最大年沉降速率达 137.51 mm[5-6].

目前,地面沉降的监测方法和技术主要包括:传统的高精度水准测量、分层动态监测(基岩标、分层标、地下水动态监测等)、现代的 GPS 测量、InSAR 监测[7]. 近年来,随着北京地面沉降的快速发展,沉降区的不断扩大,传统的水准测量、GPS 测量等常规监测方法由于作业时间长、实时性差、资源耗费大等固有缺陷而不能满足要求,与此同时,InSAR 作为一种无需布设地面测站,且成本低、效率高的一种对地观测技术而迅速发展起来,并受到世界各国地面沉降研究人员的广泛亲睐.

本文将重点介绍差分合成孔径雷达干涉测量(D-InSAR)和小基线集(SBAS)时间序列分析方法的原理,并利用两种方法,基于 31 景 C 波段 ENVISAT ASAR 数据,分析北京平原区 2007—2010 年地面沉降中心的分布和时间变化趋势[8].

1 原 理

1.1 差分干涉测量方法

合成孔径雷达差分干涉测量的概念最早是由 Gabriel 提出,其中心思想是如果空间基线足够小,在保证相干性良好的前提下,利用多次重复观测所获 SAR 影像进行差分处理,从而获取地表的微小形变. D-InSAR 目前主要有三种模式:二轨法、三轨法和四轨法. 其中,最常用且最方便的是二轨法,它最早由 Massonnet 等提出,其基本思想是利用研究区域内地表形变前后的两幅 SAR 影像进行干涉,生成干涉图,再利用干涉对基线信息和已知的外部 DEM 模拟区域地形相位,从干涉图中减去模拟地形相位,从而得到地表形变信息[9-10].

D-InSAR 技术是通过不同时间对同一地区观测所获取的两景 SAR 影像的相位比较,从而获得形变信息的方法. 通过主、辅影像的共轭相乘计算得到干

收稿日期:2014-12-01

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

涉相位 φ_{int},它包含以下几个组成部分[9-11]:

$$\varphi_{int} = \varphi_{flat} + \varphi_{topo} + \varphi_{def} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise}, \quad (1)$$

式中,φ_{flat} 是参考椭球面引起的参考相位(即平地相位);φ_{topo} 是地形起伏引起的地形相位,可通过引入外部 DEM 模拟进行去除;φ_{def} 是地表形变引起的形变相位,是用来估计获取的两景 SAR 影像间的地表形变量的相位;φ_{atm} 是大气延迟引起的延迟相位,是由于获取两景 SAR 影像时大气状况改变导致的传播延迟;φ_{noise} 是由于时空变化,导致散射体后向散射特性改变引起的残留相位[12-13].

1.2 小基线集方法

小基线集又称短基线集,最初是由 Berardino 等人于 2002 年提出,其初衷是用于提取低分辨率、大尺度地表形变[10]. 其基本思想是将所有覆盖同一地区的 SAR 影像按照子集内的影像基线距小,子集间的基线距大的原则进行组合,再利用奇异值分解(sigular value decomposition,简称 SVD)方法将多个小基线集联合起来获取最小范数解.

假设有 N+1 幅覆盖同一区域的单视复数 SAR 影像,且影像获取的时间序列为:

$$t = [t_0, t_1, \cdots, t_N]^T. \quad (2)$$

根据时间基线阈值和空间基线阈值的条件组合干涉对,生成 M 幅干涉图,且有:$N/2 \leqslant M \leqslant [N(N+1)/2]$.

为了简化模型,忽略地形相位、形变相位、大气相位等因素,对于任一干涉图 $j(j=1,2,\cdots,M)$ 中像元(x,r) 由 t_B 和 $t_A(t_B > t_A)$ 两个时刻生成的解缠相位为:

$$\Delta\varnothing_j = \varnothing(t_B,x,r) - \varnothing(t_A,x,r) = \frac{4\pi}{\lambda}[d(t_B,x,r) - d(t_A,x,r)], \quad (3)$$

式中:λ 为雷达波长;$d(t_A,x,r)$ 和 $d(t_B,x,r)$ 分别为像元(x,r) 在时间 t_A,t_B 的 LOS 方向的形变;$\phi(t_B,x,r)$、$\phi(t_A,x,r)$ 分别为 $d(t_B,x,r)$、$d(t_A,x,r)$ 引起的形变相位.

由式 3 可得到一个由 M 个等式和 N 个未知数组成的方程组系统,且可构建线性模型:

$$A_{\phi} = \Delta\varnothing, \quad (4)$$

式中,ϕ 为 N 个时刻的 SAR 图像上待求点的未知形变相位矢量;$A\phi$ 为 M 幅干涉图上的相位值组成的矩阵;系数矩阵 A $[M \times N]$ 的每行对应一幅干涉图.

将 4 式进行转换,用两个时间点之间的平均速率来代替其中的未知形变相位矢量,可得到:

$$Dv = \Delta\varnothing. \quad (5)$$

再将 SVD 分解应用于矩阵 D,从而得到速度矢量 v 的最小范数解,并获得不同 SAR 获取期间的形变速率[14].

2 实验及分析

2.1 实验数据

实验选取 C 波段 ENVISAT ASAR 数据作为数据源,其空间覆盖范围为:116°10′27.59″~116°46′38.21″E,39°40′22.24″~40°8′16.66″N,时间覆盖范围为 2007 年 4 月 18 日~2010 年 8 月 25 日,轨道号为 Track 218. 外部 DEM 选用的是美国国家航空航天局(NASA)对外提供的 SRTM3 DEM,其空间分辨率是 90 m,高程精度是 10 m.

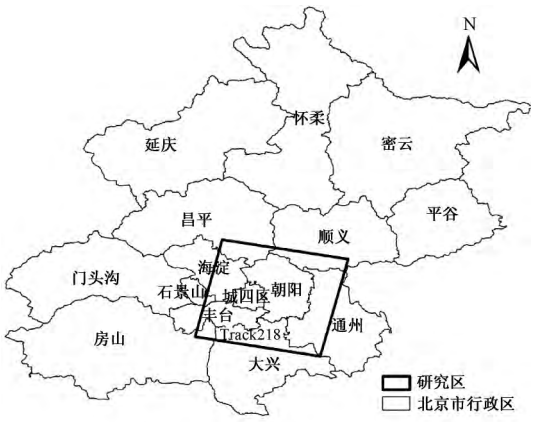


图 1 研究区域

2.2 技术路线

本文利用 SAR 影像对北京平原区进行地面沉降监测实验,获取相应时间段的地表形变速率,数据处理主要包括 D-InSAR 处理和 SBAS 处理两个步骤,并将 D-InSAR 结果作为参考,对 SBAS 结果进行验证,分析北京平原区地面沉降中心的分布以及时间变化趋势. 具体处理过程如图 2 所示.

2.3 SAR 数据处理

2.3.1 D-InSAR 处理

实验选用分别于 2007 年 4 月 18 日、2008 年 6 月 11 日、2009 年 8 月 5 日、2010 年 8 月 25 日获取的 4 景 SAR 数据,采用二轨法获取研究区对应时间段的地表形变信息,再将所得三个时间段内形变量采用叠加分析法中的对应区域相加,获取 2007 年~2010 年的年平均速率. 实验中所设置的时间基线阈值为 385~420 天,实验所用数据如表 1 所示.

2.3.2 SBAS 处理

选用 2007 年 4 月 18 日至 2010 年 8 月 25 日的

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

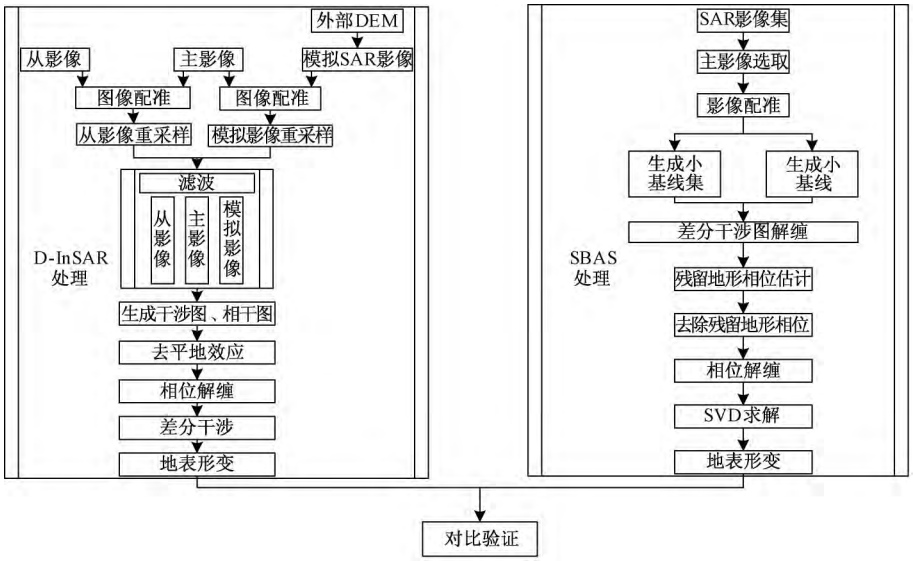


图 2　技术路线

表 1　实验所用数据

主影像获取时间	从影像获取时间	时间基线/天	空间基线/m
2007/04/18	2008/06/11	420	261.630
2008/06/11	2009/08/05	420	217.057
2009/08/05	2010/08/25	385	52.887

31 景 ASAR 数据，基于 SABS 网络构建的原则创建小基线集并生成小基线干涉图，选取时间基线阈值为 35 ~ 550 天，空间基线小于 550 m 的干涉对，利用 SBAS 的方法进行处理，共产生 500 对干涉图. 基线分布情况如图 3 所示.

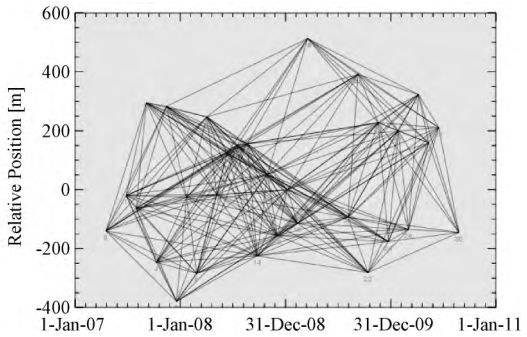


图 3　小基线集干涉图组合方式

2.4　实验区地面沉降分布情况

利用 D-InSAR 获取的沉降结果作为参考，对 SBAS 结果进行相互对比验证[8]，对比过程采用叠加分析方法中的相同区域相减的方法，分别对 3 年总的沉降量以及年平均沉降量进行分析. 图 4 为 D-InSAR 获取的沉降量与 SBAS 获取的沉降量，其中，图 $4A_1$、$4B_1$ 为总的沉降量，图 $4A_2$、$4B_2$ 为年平均沉降图.

根据 D-InSAR 和 SBAS 技术提取的地面沉降的空间分布特征，发现北京市平原区的地面沉降不均匀. 其中，沉降较为严重的区域主要集中在通州、朝阳等地. 根据图 4 可看出，SBAS 得到的结果比 D-InSAR 得到的结果明显偏大，在朝阳区等重大沉降区，3 年总的沉降量之差达到了 114.21 mm，年平均沉降速率之差达到 38.14 mm/a，这表明在 2007 年 4 月 18 日至 2010 年 8 月 25 日期间，北京市平原区的地面沉降有明显加速的趋势.

分别在 D-InSAR 平均沉降速率图和 SBAS 平均沉降速率图上选取均匀分布的 1 000 个点，并对两平均速率值样本进行对比分析，分析结果显示，其相关性为 0.91，均方根值(root mean square，简称 RMS)为 13.57 mm/a，说明运用 D-InSAR 和 SBAS 方法用于北京市平原区地面沉降监测结果的有效性、可靠性.

在重点沉降区域选取 8 个验证点，验证重点区域 D-InSAR 和 SBAS 监测得到的沉降演变趋势，如图 5 所示. 在趋势上，两种监测方法得到的 8 个点的形变累积趋势基本一致，这也说明了结果的可靠性.

3　结　论

本文利用 31 景 ENVISAT ASAR 数据，通过利用 D-InSAR 和 SBAS 两种监测手段得到了北京市平原区 2007—2010 年期间的年平均沉降速率，并利用两种方法得到的结果进行相互对比验证，结果显示，北京市的地面沉降分布不均匀. 其中，沉降较

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

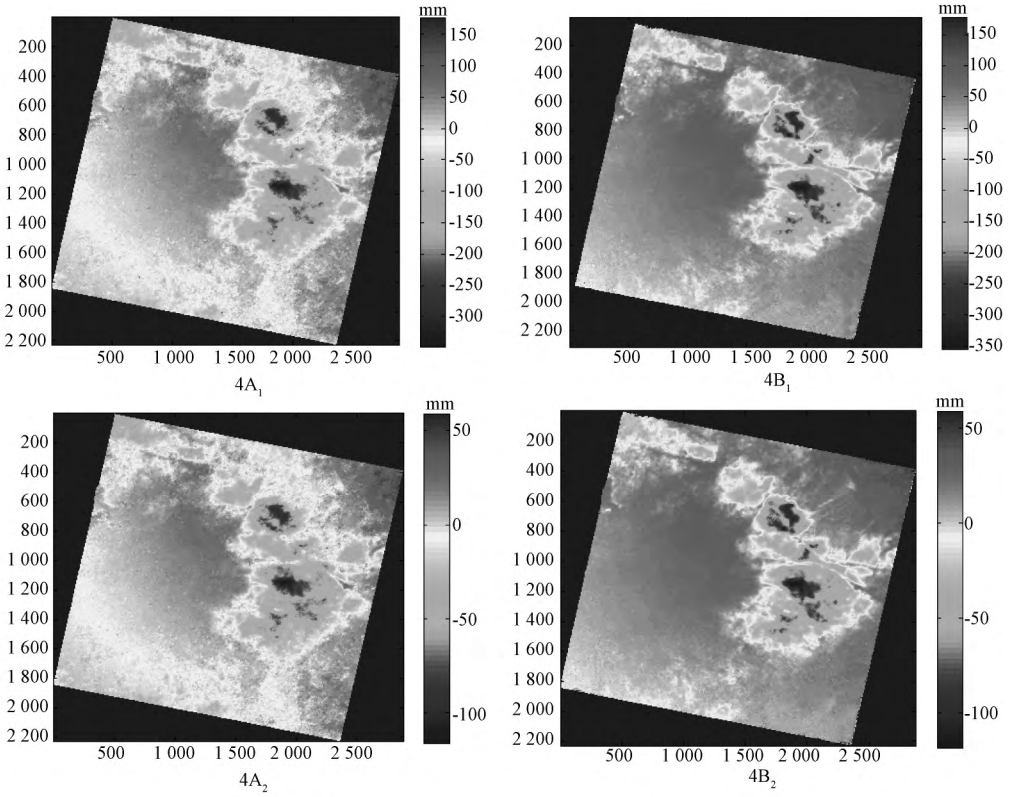


图 4 D-InSAR 与 SBAS 结果

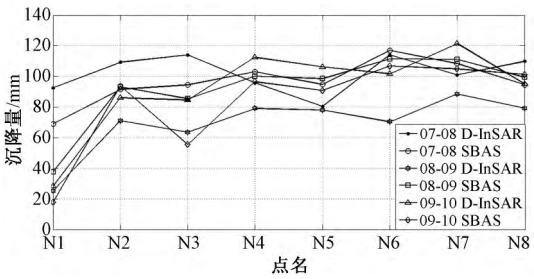


图 5 不同监测方法结果对比

为严重的区域主要集中在通州、朝阳等地. 且沉降正处于迅速扩张的状态,在朝阳、通州等严重沉降区的部分区域,年平均沉降达到了 80 mm/a 以上,局部区域达到了 100 mm/a 以上. 并选取均匀分布的 1 000个点的年平均沉降速率进行分析,结果显示,D-InSAR 和 SBAS 监测手段所获取的年平均沉降速率之间的相关性达到 0.91,RMS 值为 13.57 mm/a. 在重点沉降区域选取 8 个点,验证两种监测方法得到的沉降演变趋势基本一致. 这也说明了结果的可靠性.

参 考 文 献

[1] 北京市地质矿产勘查开发局,北京市水文地质工程地质大队. 北京地下水 [M]. 北京: 中国大地出版社,2008.
[2] 贾三满,王海刚,赵守生,等. 北京地面沉降机理研究初探 [J]. 城市地质,2007,2(1):20 - 26.
[3] 宫辉力,张有全. 基于永久散射体雷达干涉测量技术的背景地面沉降研究 [J]. 自然科学进展,2009,19(11):1261 - 1266.
[4] 陈蓓蓓,宫辉力,李小娟,等. 基于 InSAR 技术北京地区地面沉降监测与风险分析 [J]. 地理与地理信息科学,2011,27(2):16 - 20.
[5] 杨艳,贾三满. 北京平原区地面沉降现状及发展趋势分析 [J]. 上海地质,2010,31(4):23 - 28.
[6] 杨艳,贾三满,罗勇,等. 北京地面沉降工作分析及展望 [J]. 研究评价,2012,7(2):9 - 13.
[7] 刘明坤,贾三满,褚宏亮. 北京市地面沉降监测系统及技术方法 [J]. 地质与资源,2012,21(2):244 - 249.
[8] 李永生,张景发,李振洪,等. 利用短基线集干涉测量时序分析方法监测北京市地面沉降 [J]. 武汉大学学报,

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2013,11(38):1374 – 1377.

[9] Rott H, Nagler T, Rocca F, et al. MuSCL-monitoring urban subsidence, cavities and landslides by remote sensing Final Report, EC Droject EVG_1-CT-1999-00008 [R]. Innsbruck: Institute for Meteorology and Geophysics, University of Innsbruck, 2002.

[10] 王宏宇. 短时空基线 PS-InSAR 技术在大同地区的形变监测研究 [D]. 西安: 长安大学,2011.

[11] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A New algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [J]. IEEE TGRS,2002,40(11):2375 – 2383.

[12] 张金芝. InSAR 技术在地面沉降监测中的应用 [D]. 青岛: 山东科技大学,2011.

[13] 山锋. 基于 SBAS-InSAR 技术的大同市地面沉降监测研究 [D]. 西安: 长安大学,2011.

[14] 刘一霖. 矿区开采沉陷大量级形变监测与反演分析 [D]. 西安: 长安大学,2013.

Monitoring the Land Subsidence of Beijing Area: Application of Coherent Point Target Interferometric Analysis Method

Wang Qin[1,2,3]　Chen Mi[1,2,3]　Liu Shujun[1,2,3]

(1. 3D Information Acquisition and Application Key Laboratory of the Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing　100048;
2. State Key Laboratory Cultivation Base of Urban Environment Process and Digital Simulation of Beijing, Beijing　100048;
3. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing　100048)

Abstract

The principles of time series analysis methods of Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar(D-InSAR)) and Small Baselines(SBAS) were introduced. The spatial distribution characteristics of land subsidence in Beijing's eastern suburbs during 2007-2010 were studied with ENVISAT ASAR data by SBAS and D-InSAR, and the results obtained by the two methods were compared and validated. The average annual subsidence rates of 1 000 points in uniform distribution of the two methods were selected and compared, the results showed, the correlation reached 0.91, RMS value was 13.57 mm/a.

Key words: D-InSAR, SBAS, land subsidence, correlation, RMS.

作者简介　王琴(1990 –),女,穿青人,贵州织金人,首都师范大学在读硕士研究生,主要研究方向为干涉雷达和高分辨率影像技术研究.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net