

王勇, 田硕, 刘严萍, 等. 融合 GPS 与 DInSAR 的区域地表三维形变获取研究[J]. 灾害学, 2020, 35(3): 82–89.
[WANG Yong, TIAN Shuo, LIU Yanping, et al. Study on 3D Deformation of Regional Surface by Integrating GPS and DInSAR[J].
Journal of Catastrophology, 2020, 35(3): 82–89. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2020.03.018.]

融合 GPS 与 DInSAR 的区域地表三维形变获取研究*

王 勇¹, 田 硕¹, 刘严萍², 石 强¹

(1. 天津城建大学 地质与测绘学院, 天津 300384; 2. 天津城建大学 经济与管理学院, 天津 300384)

摘 要: 合成孔径雷达差分干涉测量(DInSAR)是监测地表形变的有效方法,而地表形变是三维形变,因水平方向形变信息的不敏感性,通过 DInSAR 视线向形变难以获得准确的三维形变信息。综合 GPS 水平形变精度高、DInSAR 垂向精度高和空间分辨率高的特点,研究融合 GPS 与 DInSAR 获取区域地表三维形变。首先介绍 GPS 水平形变、DInSAR 垂向形变与三维视线向形变以及三维视线向转化为三维形变的理论基础;然后以雄安新区为例,开展三维视线向形变与 DInSAR 视线向形变的比较,两者存在较好的相关性,存在一定的偏差;其次针对短时形变监测和长期地表形变监测的需求,通过不同时间间隔的 GPS、DInSAR 形变结果,分别构建了基于 SAR 重访周期和一年间隔的 DInSAR 视线向形变校正模型,并以实测 GPS、DInSAR 结果进行模型可靠性验证;最后将三维视线向形变转化为水平方向形变和垂向形变,该三维形变在保证精度的基础上保留了 SAR 数据的高空间分辨率特征。研究表明:对于 SAR 重访周期时间间隔来说,DInSAR 视线向形变与三维视线向形变差异较小,仅存在 1 mm 的校正,说明对于短时期来说,水平方向的形变微小。对于 1 年时间间隔来说,DInSAR 校正后的视线向形变与三维视线向形变的平均偏差为 0.34 mm,均方根误差为 0.49 mm,其误差均小于校正前的 DInSAR 形变。

关键词: GPS; DInSAR; 视线向形变; 区域; 地表三维形变

中图分类号: X43; X915.5; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2020)03–0082–08

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2020.03.018

由于人类对水资源和矿产资源的过度开采使得地表层发生压密和塌陷,快速准确获得区域地表形变,可为政府相关部门的决策提供参考。合成孔径雷达差分干涉测量(Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, DInSAR)技术因监测范围大、时效性强的优点被广泛应用于形变监测。韩宇飞利用 DInSAR 技术测得长白山天池火山形变,并与同期水准数据做对比,发现数据具有一致性^[1]。但传统的 DInSAR 技术只能监测一维(即视线向)地表形变,主要反映的是以垂直形变为主要参与量的形变,而地表形变是三维形变,直接采用传统 DInSAR 方法不能获得真实的地表三维形变值。多位学者开展了 GPS 与 DInSAR 的融合技术研究,将 GPS 与 InSAR 结合,对由地下水抽取和地震等因素造成的地表形变进行反演,提高了对地表沉降观测精度^[2–4]。何秀凤^[5]利用蚁群优化方法,将 GPS 散点三维形变观测量与 DInSAR 进行深度融合,提高三维形变观测量精度。曹海坤等^[6]利用对 DInSAR 升降轨监测方程中添加去除误差函数方法,并通过与 GPS 监测数据结合提高了 DIn-

SAR 监测精度。VDe Novellis^[7]、D Cheloni^[8]、Hans N. Lechner 等^[9]利用 GPS 与 DInSAR 联合测量方法,反演得到了意大利相关研究区域的地震模型。以上文献将 DInSAR 与 GPS 结合,提高了形变监测精度,但使用的 GPS 散点三维形变存在点位少,垂向精度较低,点位分布不均匀,分布范围小等不足。仅对单点进行校正,不能进行区域(面)有效的校正。

地表形变是三维形变,因 DInSAR 水平方向形变信息的不敏感性,仅通过视线向形变难以获得准确的三维形变信息。该文综合 GPS 水平形变精度高、DInSAR 垂向精度高和空间分辨率高的特点,研究融合 GPS 与 DInSAR 获取区域地表三维形变。该文拟以雄安新区及周边范围为例,利用河北省 GPS 连续观测网(CORS)结合研究区 SAR 观测资料,将 10 个 GPS 站点的水平方向形变量结合卫星入射角度计算得到 GPS 视线向形变量,与 DInSAR 视线向形变量叠加获得三维视线向形变量,构建 DInSAR 视线向形变校正模型,对研究区形变进行整体校正。通过卫星入射角度参与计算

* 收稿日期: 2020–01–09 修回日期: 2020–05–05

基金项目: 天津市自然科学基金(17JCYBJC21600)

第一作者简介: 王 勇(1978–),男,江西宁都人,博士,教授,主要从事 GPS 数据处理与应用研究。

E-mail: wangyongjz@126.com.

获得地表水平方向形变与垂向形变。通过 GPS 与 DInSAR 的融合研究, 充分保留 DInSAR 技术空间分辨率高的特点, 解决以往 GPS 水平形变场仅由 GPS 点插值得到的问题, 提高地表形变监测精度。

1 数据选取及数据处理

1.1 DInSAR 处理与 SAR 数据选取

(1) DInSAR 处理

DInSAR 处理的方法有二轨法、三轨法以及四轨法, 本文选取二轨法做为 DInSAR 的处理方法。相位干涉图每一像元上的初始干涉相位可表示成多个参数分量贡献的总和^[10]:

$$\phi_{\Delta} = \phi_{\text{ref}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{defo}} + \phi_{\text{atmo}} + \phi_{\text{noise}} \quad (1)$$

式中: ϕ_{Δ} 表示干涉对生成的干涉相位; ϕ_{ref} 为参考椭球面引起的相位可以通过去除二次项相位加以去除; ϕ_{topo} 为地形相位通过引入外部 DEM 可以去除; ϕ_{defo} 为两次成像期间因地表位移引起的形变相位; ϕ_{atmo} 为两次成像时大气状态不一致引起的相位延迟可以通过去除大气相位得以去除; ϕ_{noise} 残余噪声相位可以通过相位滤波去除。最后得到只保留主从影像干涉之后的形变相位, 最后输出结果得到视线向 (Line of Sight, Los) 形变值。

DInSAR 的 Los 形变测量对三维形变分量的敏感度存在差异, 视线向观测结果对三维形变矢量间的敏感度因子计算公式为^[10]:

$$\begin{aligned} |\partial R / \partial DE| &= |-\cos \varphi \sin \theta|, \\ |\partial R / \partial DN| &= |\sin \varphi \sin \theta|, \\ |\partial R / \partial DV| &= |\cos \theta|. \end{aligned} \quad (2)$$

式中: θ 为雷达信号入射角, φ 为卫星航向角。研究区雄安新区及其周边地区 SAR 卫星影像的卫星航向角 346.6° , 以及雷达侧视角范围是 $[30.45^{\circ}, 45.86^{\circ}]$ 计算得 SAR 卫星对东西向、南北向和垂向位移的敏感度区间分别为 $[0.493, 0.698]$ 、 $[0.117, 0.166]$ 、 $[0.696, 0.862]$ 。根据敏感度区间可知 DInSAR 对垂向位移的敏感度最高, 对东西向位移的敏感度次之, 对南北向位移的敏感度最低。依据 DInSAR 形变观测量虽然可以对三维位移量进行重建与恢复, 但其对南北向位移的敏感度最低, 故南北向形变估算精度也将最低, 东西向形变估算精度次之, 而垂向形变分量的估算精度基本与常规 DInSAR 获得的 Los 向形变测量结果相当。在水平位移两个方向的分量中, 部分平台在东西向可能获得较可靠的三维分析结果, 但南北向与卫星极轨方向很接近, 受到投影关系制约, 精度难得到保证。本文采用经过 InSAR 软件处理后并去除大气相位得到的常规 DInSAR 获得的 Los 向形变测量结果作为垂向的三维形变分量。

(2) SAR 数据选取

本文同时选取了 2016 年 7 月至 2017 年 6 月的 Sentinel-1A 卫星跨度约一年的 20 幅 SAR 卫星影像, 并通过 SAR Studio 软件处理获得了 SAR 重访周期 (12 d) 时间间隔的 17 幅 DInSAR 形变干涉图。研究数据的时间段见表 1。通过点提取值的方法从常规 DInSAR 干涉图中提取出与 10 个 GPS 测站在对应时间段内的形变值。

表 1 DInSAR 数据时间与 GPS 测站形变信息数据选取

时间段	站名									
	SZAG	SZAX	SZHZ	SZLF	SZLY	SZME	SZSE	SZYQ	SZYX	SZZZ
20160724 - 20161016	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
20161016 - 20161109	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
20161109 - 20161121	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
20161121 - 20161203	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1
20161203 - 20161215	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1
20161215 - 20161227	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1
20161227 - 20170108	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
20170108 - 20170201	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
20170201 - 20170213	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
20170213 - 20170225	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
20170225 - 20170309	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
20170309 - 20170321	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
20170321 - 20170402	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
20170402 - 20170414	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
20170414 - 20170426	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
20170426 - 20170508	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
20170508 - 20170520	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0
20170520 - 20170601	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0
20170601 - 20170613	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0

注: 表中站点和时段取得观测值设为 1, 未取得观测值设为 0。

1.2 GPS 数据选取

GPS 数据用于获取区域水平形变信息, 本研究选取河北省 GPS 连续观测网络观测数据, 由于研究区为雄安新区及其周边区域, 研究站点包括: SZAG(安国)、SZAX(安新)、SZHJ(河间)、SZLF(廊坊)、SZLY(涞源)、SZME(满城)、SZSE(三河)、SZYQ(永清)、SZYX(易县)、SZZZ(涿州)10 个站点(研究区及 GPS 站点分布如图 1 所示)。数据时间与研究选用的 SAR 数据时间一致。GPS 观测数据采用高精度定位定轨软件 GAMIT/GLOBK 进行解算, 解算出的北方向(N 方向)形变值和东方向(E 方向)形变值均方根误差为 3 mm 和 2.7 mm。GPS 水平形变加入卫星平台航向角和雷达信号入射角, 经过公式转化合成视线向形变量。

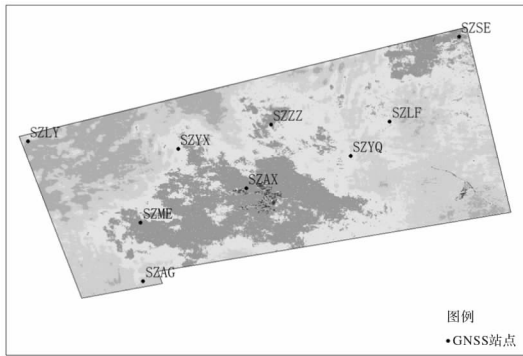


图 1 研究区及 GPS 站点分布

1.3 融合 GPS 与 InSAR 的三维视线向形变

三维坐标系下东方向形变值(E)、北方向形变值(N)和垂向形变值(V)与视线向(Los)形变值之间的转化如图 2 所示^[10]。

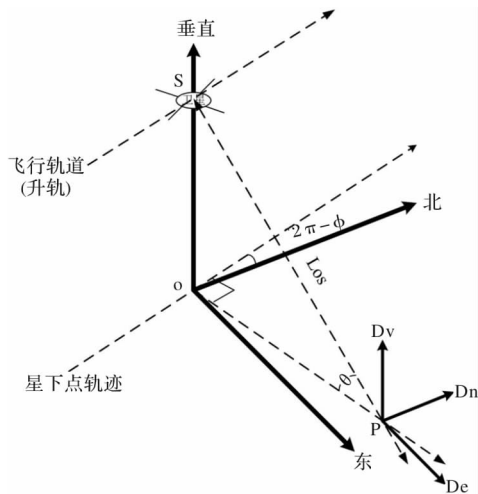


图 2 SAR 卫星成像几何关系图

图 2 以东向、北向和垂向为基准构建坐标框架。S 为成像时卫星位置, P 为地面目标 S 和 P 的连线为雷达视线(Los)方向, Los 方向和垂直方向的夹角 θ 为雷达信号入射角, 星下点轨迹是卫星轨道在水平面上的投影, φ 为卫星航向角, 即从北方向沿顺时针到卫星飞行方向的夹角。星下点 O 和

目标点 P 的连线为 Los 向在水平面投影。P 点的 Los 方向是 P 点的三维位移量在 Los 方向上的投影之和。卫星测得各方向形变值合成视线向(Los)方向的公式为:

$$D_{Los} = D_V \cos \theta + D_N \sin \varphi \sin \theta - D_E \cos \varphi \sin \theta. \quad (3)$$

式中: D_E 为 DInSAR 监测水平形变沿东西向的形变量, D_N 为 DInSAR 监测水平形变沿南北向的形变量, D_V 是 DInSAR 监测的垂直方向形变量, D_{Los} 是卫星视线向(Los)方向形变量。由于常规 DInSAR 对水平方向形变监测不精确, 但对垂直方向的形变敏感, 且对于视线向(Los)形变量的贡献最大, 在数值上与垂直方向形变量在视线向方向分量大小相当, 但水平方向形变量在视线向方向分量可以忽略不计, 所以卫星视线向(Los)方向形变量与 DInSAR 监测的垂直方向形变量的关系为:

$$D_{Los} = D_V \cos \theta. \quad (4)$$

GPS 连续观测站可获得高精度水平形变, 但垂直形变精度略差, 故 GPS 测站的东方向和北方向形变值与依据 SAR 卫星成像几何原理得到的水平方向三维形变分量值的关系如式 5 所示。

$$D_H = D_N \sin \varphi \sin \theta - D_E \cos \varphi \sin \theta. \quad (5)$$

式中: D_H 为 CORS 站经过转换得到的水平方向三维形变分量值, D_E 为 CORS 站沿东西向的形变值, D_N 为 CORS 站点沿南北向的形变值。

本文取卫星视线向(Los)方向形变值作为常规 DInSAR 垂直形变值在三维方向的分量值, 并根据 SAR 卫星成像几何原理, 通过雷达信号入射角和卫星航向角将其和 CORS 站转换得到的水平形变值在三维形变的分量值相结合, 合成三维视线向形变值。正值代表三维视线向抬升, 负值代表三维视线向沉降。各方向形变值分量到三维视线向方向形变值的转化为:

$$D_R = D_{Los} + D_H. \quad (6)$$

式中: D_R 为 CORS 站所在位置根据 SAR 卫星成像几何关系转换后的三维视线向形变值。

2 三维视线向形变与 DInSAR 视线向形变的比较

将表 1 对应时间的 GNSS 站点水平方向形变结合合同坐标格网的 InSAR 视线向形变, 按照式(4)和式(5)融合成三维视线向形变, 与同期 DInSAR 视线向形变比较, 图 3 给出了随机取的 4 个时间段两者的比较。由图 3 可得, 由于重访周期时间仅为 12d, GPS 站点水平形变较小, 融合得到的三维视线向形变与 DInSAR 视线向形变在数值上比较接近。对研究时段 10 个站点的三维视线向形变与 DInSAR 视线向形变开展相关性计算, 相关系数为 0.982, 显著性检验值 sig. 为 0, 由此可知相关性强, 表明可以利用三维视线向形变进行 DInSAR 视线向的校正。

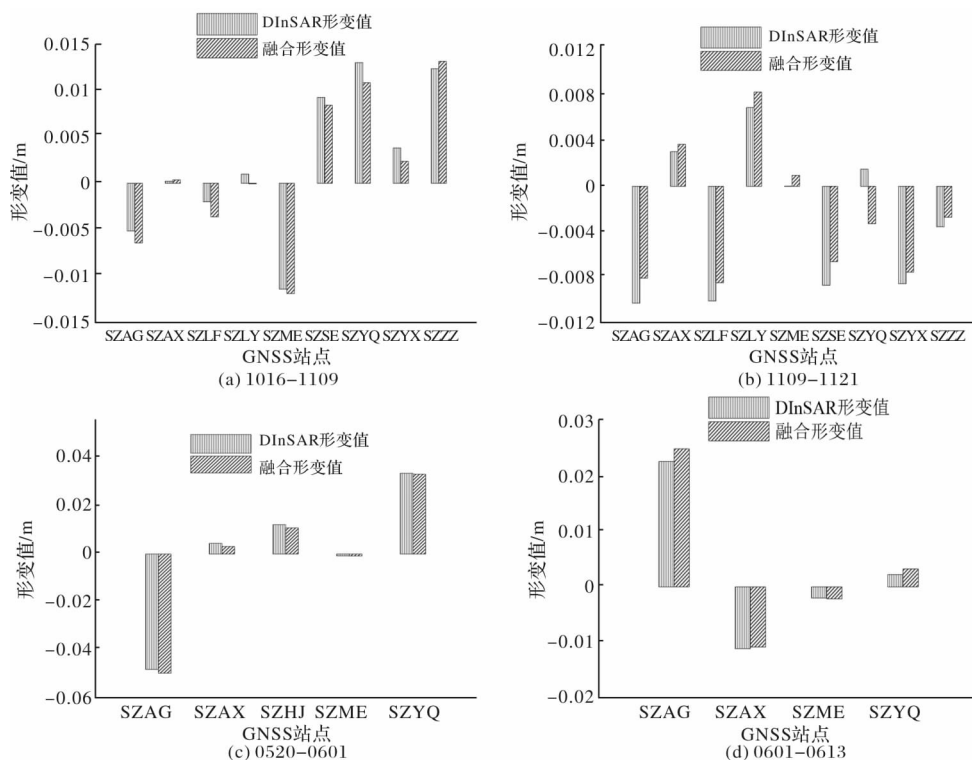


图3 三维视线向形变与 DInSAR 视线向形变的比较

3 基于三维视线向形变的 DInSAR 视线向校正

针对短时形变监测和长期地表形变监测的需求, 以下研究通过不同时间间隔的 GPS、DInSAR 形变结果, 分别构建基于 SAR 重访周期和一年间隔的 DInSAR 视线向形变校正模型, 并以实测 GPS、DInSAR 结果进行模型可靠性验证。

3.1 基于 SAR 重访周期的 DInSAR 视线向形变校正模型

由于三维视线向形变与 DInSAR 视线向形变的相关性强, 采用线性回归的方法开展三维视线向形变实现 DInSAR 视线向的校正。因 GPS 站点 SZHJ 数据量不足, 本文运用其余 9 个站点的除 2017 年 1 月 8 日至 2 月 1 日的形变量数据(该时间段数据用于模型检验)之外的 139 组形变量参与线性回归模型的构建, 回归模型为:

$$Y = X - 0.001. \quad (7)$$

由式(7)可知, 模型的改正量较小, 仅为 0.001 m, 这是由于模型构建依据的 SAR 时间间隔为 12 d, 此时水平形变较小。选择 2017 年 1 月 8 日至 2 月 1 日的 9 个站点三维视线向形变与 DInSAR 视线向模型校正值相比较如(图 4), 检验模型的可靠性。

由图 4 可知, 经过模型校正后的 DInSAR 形变值相比于经过模型校正前 DInSAR 形变值更接近于三维视线向形变值, 说明校正模型可在一定程度上改善 DInSAR 形变值精度。但由于观测间隔时间短, 形变值较细微, 为了直观看出改正效果, 本文将 9 个样本点的三维视线向形变值分别与校正前

后的 DInSAR 形变值作差, 验证样本数据经改正前后的均方根误差分别为 3.14 mm 和 2.17 mm, 说明改正后的 DInSAR 形变值比改正前 DInSAR 形变值与三维视线向形变值更加吻合。为了达到对整个 DInSAR 干涉图的形变值的改正, 本文利用 ArcGIS 软件运用线性回归模型通过栅格计算器对 DInSAR 形变干涉图进行整体校正, 图 5 为校正前和校正后的区域 DInSAR 形变。由图 5 可知, 校正后相对于校正前各个 CORS 站点周围以及整个干涉图的颜色均有深浅变化, 在实验区中部区域校正后相较于校正前颜色均变浅, 说明校正后 DInSAR 形变相对于校正前 DInSAR 形变存在差异。由图 5 可知在 2017 年初, 沉降区域主要集中于实验区两侧大城市以及经济较为发达的廊坊、天津和保定南部地区。此时间段内考虑到雄安新区概念还未正式提出, 周边的建设活动也处于规划之中, 所以沉降发生不明显。

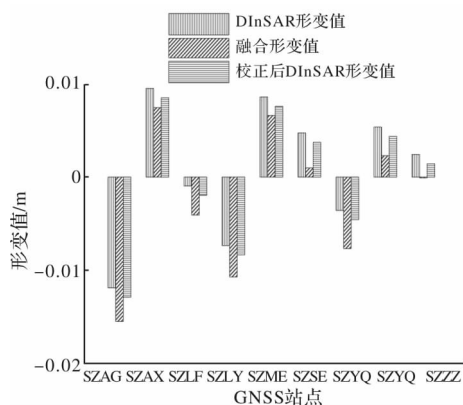


图4 三维视线向形变与 DInSAR 视线向模型校正值比较

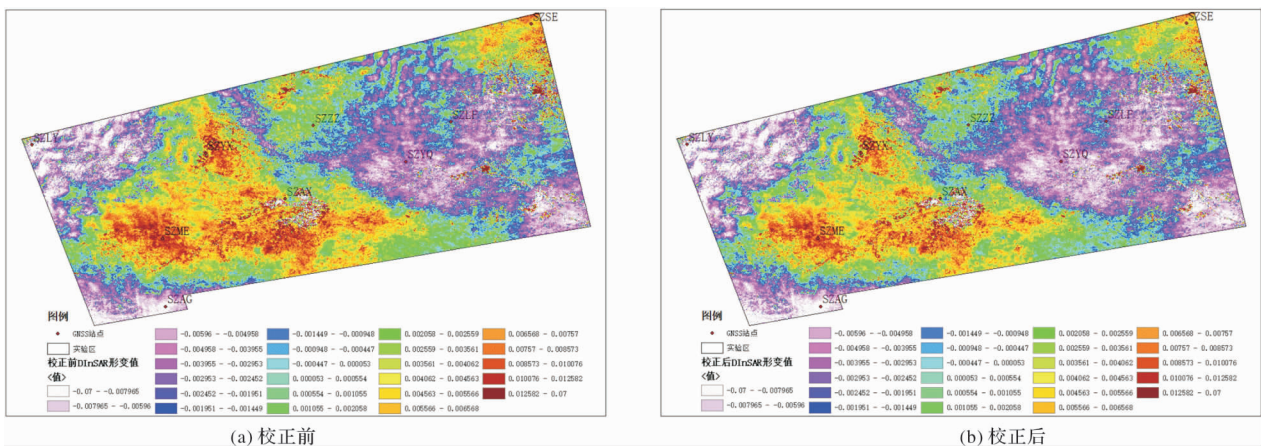


图5 校正前后的区域 DInSAR 形变

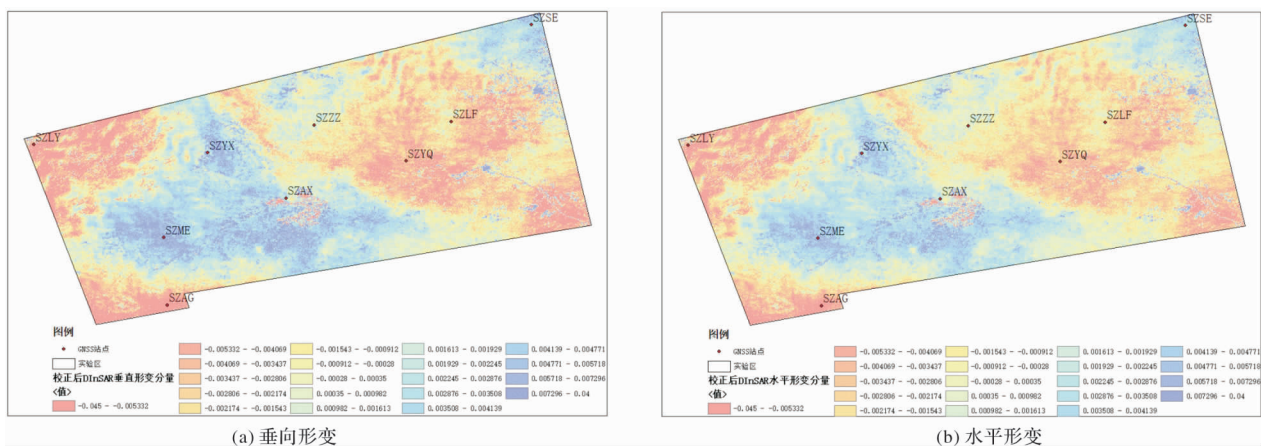


图6 校正后 DInSAR 形变分解为垂直形变和水平形变

为了得到校正后研究区 DInSAR 形变的水平和垂直形变分量,考虑到各个 CORS 站点的入射角度接近。本文取各个站点的入射角的平均值 (39.21°) 参与栅格运算,通过栅格计算得到研究区的水平和垂直方向的形变图如图 6 所示。由图 6a 可知,校正后在实验区两侧两个卫星重返周期内,在垂直方向发生沉降。叠加卫星图可知,发生沉降区域主要集中在廊坊天津还有保定南部区域,雄安新区整体未发生大规模沉降,考虑到是因为雄安新区建设在 2017 年初仍在起步和筹备阶段,且拥有白洋淀等大量水体,由于未进行大规模基建,开采地下水数量少以及对自然水体的保护,所以地表沉降不明显。根据 SAR 卫星成像原理以及站心坐标系原理,由图 6b 可知,雄安新区等区域水平形变以东北方向为主,实验区周边廊坊和天津地区水平形变以西南向为主,且水平形变量较小。

3.2 基于一年间隔的 DInSAR 视线向形变校正模型

基于 SAR 重访周期的 DInSAR 视线向形变校正模型可用于短期形变变化较大区域,但大多数形变较为缓慢,因此本文开展基于一年时间间隔的 DInSAR 视线向形变校正研究。选择雄安新区建设提出前后两年为周期的数据,以及植被较少的季

节的地表形变数据为数据源,分别选择 2015 年 12 月 21 日、2016 年 12 月 27 日、2017 年 3 月 11 日和 2019 年 9 月 17 日,通过二轨差分干涉方法依次得到以一到两年时间为间隔的 3 幅实验区 DInSAR 形变图。提取出研究区 GPS 测站所在位置的 DInSAR 形变值作为垂直方向三维形变分量,后将其与同时间 GPS 测站水平方向三维形变分量相结合,得到融合后的三维视线向形变值。选取 2017 年至 2019 年的融合的三维视线向形变值作为模型验证数据,选取除模型验证数据之外的数据用于构建线性回归模型。本文首先运用 SPSS 软件对建模数据进行相关性分析, DInSAR 形变值与三维视线向形变值的相关性为 0.954,显著性检验值为 0,选择线性回归模型构建校正模型。建立的回归模型为:

$$Y = 1.275X + 0.006. \quad (8)$$

将验证数据代入校正模型中,获得校正后的 DInSAR 形变值,将校正前后 DInSAR 形变值与三维视线向形变值进行比较,如图 7 所示。可知,相比较于校正前的 DInSAR 形变值,校正后的 DInSAR 形变值更接近于三维视线向形变值,计算检验样本数据校正前后的 DInSAR 形变值与三维视线向形变值的平均偏差和均方根误差,如表 2 所示。

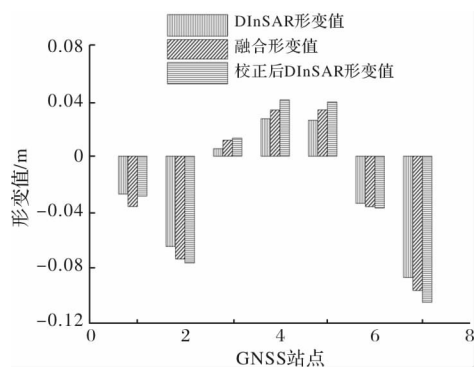


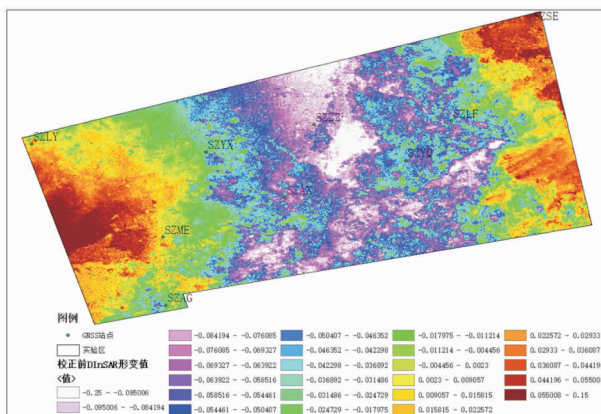
图7 三维视线向形变与 DInSAR 视线向模型校正值比较

表2 验证样本数据改正前后平均偏差与均方根误差对比

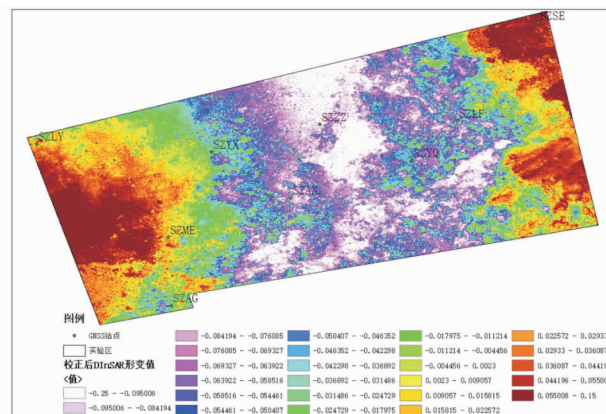
改正前 平均偏差	改正后 平均偏差	改正前均 方根误差	改正后均 方根误差
3.52 mm	2.42 mm	7.40 mm	5.64 mm

由表2可知,验证数据改正后的 DInSAR 形变值的平均偏差和均方根误差均减小,说明校正模型有效。为得到研究区整体形变值校正。本文运用 ArcGIS 软件依据线性回归模型对研究区 DInSAR 形变进行整体校正,图8为校正前后 DInSAR 形变对比。

由图8可知,在各个 GPS 站周围地区,颜色都有深浅变化,说明形变值存在数值变化。且在实验区中部雄安新区及其周边地区,校正后颜色比较正前颜色变浅,说明经过模型校正后,实验区中部的雄安新区及其周边地区沉降值数值变小。实验区两侧形变图颜色也不同程度的加深,说明数值也在模型校正后发生了改变。图8也表明了雄安新区初步提出到开展建设两年以来的施工建设对地表的沉降有重要影响。本文取各个站点的入射角的平均值(39.21°)参与栅格运算,通过栅格计算得到实验区的水平和垂直方向的形变图如图9所示。由图9可知,2017-2019年两年间,实验区中部雄安新区及其周边地区在两年周期内垂向发生了较为明显的沉降,说明2017至2019年雄安新区的建设对地表沉降有重要的影响,实验区两侧由于天津、廊坊和河北南部地区等大城市区域已经在沉降治理方面采取了有效的措施。在实验区中部的水平形变以视线向西南方向为主,实验区两侧水平形变以视线向东北方向为主。

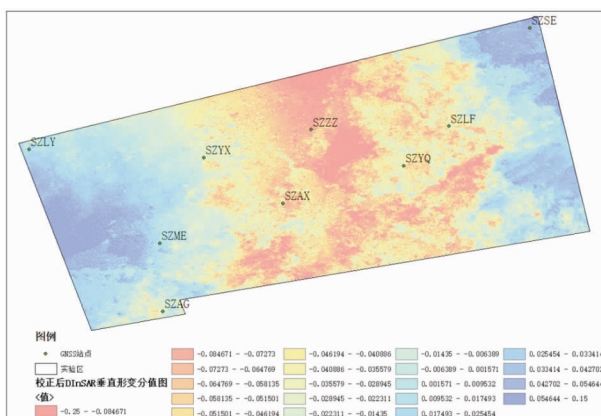


(a) 校正前DInSAR形变

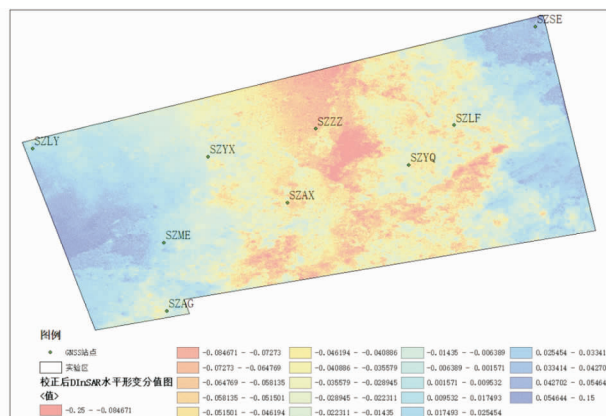


(b) 校正后DInSAR形变

图8 校正前后 DInSAR 形变



(a) 垂直形变



(b) 水平形变

图9 校正后 DInSAR 形变分解为垂直形变和水平形变

4 结论

本文以雄安新区为例,开展了融合 GPS 与 DInSAR 获取区域地表三维形变的研究。针对短时形变监测和长期地表形变监测的需求,通过不同时间间隔的 GPS、DInSAR 形变结果,分别构建了基于 SAR 重访周期和一年间隔的 DInSAR 视线向形变校正模型,并以实测 GPS、DInSAR 结果进行模型可靠性验证。研究结论如下。

(1)对于 SAR 重访周期时间间隔来说,DInSAR 视线向形变与三维视线向形变差异较小,仅存在 1 mm 的校正,说明对于短时期水平方向的形变微小。

(2)对于 1 年时间间隔来说,DInSAR 校正后的视线向形变与三维视线向形变的平均偏差为 0.34 mm,均方根误差为 0.49 mm,其误差均小于校正前的 DInSAR 形变。

(3)经模型校正,实现了 DInSAR 由视线向转化为水平方向和垂向,获得了区域地表三维形变。

本文的研究利用 GPS 与 DInSAR 获得地表三维形变,保留了 DInSAR 技术空间分辨率高的特点,解决了 GPS 水平形变场仅由 GPS 点插值得到的问题,提高了地表形变监测精度。该研究结果可用于区域地表三维形变的快速获取,为后期形变分析提供参考。

参考文献:

- [1] 韩宇飞,宋小刚,单新建,等. D-InSAR 技术在长白山天池火山形变监测中的误差分析与应用[J]. 地球物理学报, 2010, 53(7): 1571-1579.
- [2] 陈强,刘国祥,胡植庆,等. GPS 与 PS-InSAR 联网监测的台湾屏东地区三维地表形变[J]. 地球物理学报, 2012, 55(10): 3248-3258.
- [3] 王洵,王卫民,赵俊猛,等. InSAR、波形资料和 GPS 联合反演 2015 年皮山地震震源破裂过程[J]. 中国科学(地球科学), 2019, 49(2): 383-397.
- [4] 党亚民,杨强,薛树强,等. GNSS 监测的川滇地区地壳形变动态变化特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(2): 111-116, 177.
- [5] 何秀凤,史国强,肖儒雅. 基于蚁群优化的 GPS/DInSAR 三维形变监测方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(10): 1594-1600.
- [6] 曹海坤,赵丽华,毕研磊. 利用附加系统参数的 GPS-InSAR 综合形变模型建立三维形变[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(4): 344-348.
- [7] De Novellis. The 21 August 2017 Ischia (Italy) Earthquake Source Model Inferred From Seismological, GPS, and DInSAR Measurements[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(2): 1-10.
- [8] Cheloni Daniele. Geodetic model of the 2016 Central Italy earthquake sequence inferred from InSAR and GPS data[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(44): 1-10.
- [9] Lechner Hans. Magma storage and diking revealed by GPS and InSAR geodesy at Pacaya volcano, Guatemala[J]. Bulletin of Volcanology, 2019, 81(18): 1-13.
- [10] 刘国祥,陈强. InSAR 原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019.

Study on 3D Deformation of Regional Surface by Integrating GPS and DInSAR

WANG Yong¹, TIAN Shuo¹, LIU Yanping² and SHI Qiang¹

(1. School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. School of Economics and Management, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Differential synthetic aperture radar interferometry (DInSAR) is an effective method to monitor the surface deformation, while the surface deformation is three-dimensional deformation. Due to the insensitivity of horizontal deformation information, it is difficult to obtain accurate three-dimensional deformation information through DInSAR Los deformation. Based on the characteristics of high horizontal deformation accuracy of GPS, high vertical deformation accuracy of DInSAR and high spatial resolution, the fusion of GPS and DInSAR to obtain the three-dimensional surface deformation of the region is studied. Firstly, the theoretical basis of GPS horizontal deformation, DInSAR vertical deformation translated three-dimensional Los deformation is introduced. Then, taking Xiongan new area as an example, the three-dimensional Los deformation and DInSAR Los deformation is compared. Secondly, to meet the needs of short-term deformation monitoring and long-term surface deformation monitoring, through the deformation results of GPS and DInSAR at different time intervals, the Los deformation correction model of DInSAR based on the revisit period and one-year interval of SAR was constructed, and the reliability of the model is verified

by the measured GPS and DInSAR results. Finally, the three-dimensional Los deformation was transformed into horizontal deformation and vertical deformation, which preserves the high spatial resolution characteristics of SAR data on the basis of ensuring the accuracy. The results show that the difference between DInSAR Los deformation and three-dimensional Los deformation is small for the time interval of SAR revisit period, with only a correction of 1 mm, indicating that for a short period of time, the horizontal deformation is small. For the 1-year interval, the average deviation between the Los deformation after DInSAR correction and the 3D Los deformation is 0.34 mm, and the RMS error is 0.49 mm, both of which are smaller than the DInSAR deformation before the correction. The results of this study can be used to obtain the three-dimensional deformation of the regional surface quickly and provide a reference for post-deformation analysis.

Key words: GPS; DInSAR; Los Deformation; area; three-dimensional surface deformation

(上接第 66 页)

参考文献:

- [1] 雷友学. 大型商业综合体建筑火灾安全防护对策[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(4): 524–527.
- [2] 徐楠楠. 大型商业综合体火灾安全疏散研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [3] 王刘兵. 大型商业综合体防排烟系统性能化设计[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [4] 周扬, 夏登友, 高平. 城市商业综合体建筑火灾事故演变路径分析[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2): 170–174.
- [5] 李健行, 夏登友, 武旭鹏. 基于知识元与动态贝叶斯网络的非常规突发灾害事故情景分析[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(4): 167–170.
- [6] 夏登友, 钱新明, 段在鹏. 基于动态贝叶斯网络的非常规突发灾害事故情景推演[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 897–902.
- [7] 徐磊. 基于贝叶斯网络的突发事件应急决策信息分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] 李文艺. 证据理论中 Dempster 合成规则的等效计算方法[J]. 南阳理工学院学报, 2014, 6(6): 121–122.
- [9] 吴海秀. 基于贝叶斯网络和 D-S 证据理论的态势估计方法[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013.
- [10] GeNIe. Decision Systems Laboratory, University of Pittsburg. Available at: <https://www.bayesfusion.com/>, Accessed July 20, 2017.
- [11] 夏登友. 基于“情景-应对”的非常规突发灾害事故应急决策技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

Scenario Deduction Model of Urban Commercial Complex Fire Accidents

XINJing¹, ZHOU Yang², XIA Dengyou¹ and LI Jianhang¹

(1. China People's Police University, Langfang 065000, China; 2. Wuzhong Fire Rescue Division, Wuzhong 751100, China)

Abstract: In order to effectively solve the dynamic and uncertain problem during the scenario evolution process of the urban commercial complex fire accidents. Firstly, network node variables are determined using Dempster synthetic rule and the scenario network structure is developed based on Bayesian network in the paper. Secondly, joint probability formula is used to estimate the state probabilities of network node variables and the scenario deduction model is constructed to obtain the synthetic scenario evolution map. Finally, a certain urban commercial complex fire accident is applied to demonstrate the rationality and practicability of the scenario deduction model, which can provide feasible references for emergency commanders to make decisions.

Key words: urban commercial complex; fire accidents; scenario deduction; Bayesian network; Dempster synthetic rule; emergency decision