



融合InSAR和GNSS的三维形变监测:利用方差分量估计的改进SISTEM方法

汪友军, 胡俊, 刘计洪, 孙倩

引用本文:

汪友军, 胡俊, 刘计洪, 等. 融合InSAR和GNSS的三维形变监测:利用方差分量估计的改进SISTEM方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(10): 1598–1608.

WANG Youjun, HU Jun, LIU Jihong, et al. [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1598–1608.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[InSAR双向矩形角反射器阵列形变监测精度评估与验证](#)

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1471–1477, 1488 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210101>

[时序InSAR用于安康膨胀土机场稳定性监测](#)

Time-Series InSAR for Stability Monitoring of Ankang Airport with Expansive Soil

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1519–1528 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210223>

[青藏高原西北缘时序InSAR对流层延迟改正方法评估](#)

Evaluation of Time-Series InSAR Tropospheric Delay Correction Methods over Northwestern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1548–1559 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210254>

[西藏易贡滑坡演化光学遥感分析与InSAR形变监测](#)

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1569–1578 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210168>

[星基反演TEC与地基GNSS TEC数据融合可行性分析](#)

Feasibility of the Data Fusion Between Space-Borne and Ground-Based TEC Products

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 557–564 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180293>



融合 InSAR 和 GNSS 的三维形变监测:利用 方差分量估计的改进 SISTEM 方法

汪友军^{1,2} 胡俊¹ 刘计洪¹ 孙倩³

1 中南大学地球科学与信息物理学院,湖南 长沙,410083

2 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北 武汉,430074

3 湖南师范大学地理科学学院,湖南 长沙,410081

摘要:利用干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术可以获取空间连续的地表形变监测结果,但仅能得到真实三维形变在雷达视线方向上的一维投影,降低了地表形变解译的可靠性。全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)可提供高精度的三维形变结果,但其空间分辨率较低。因此可通过融合 InSAR 和 GNSS 来实现高精度高空间分辨率的三维地表形变监测。提出利用方差分量估计(variance component estimation, VCE)方法对经典的联合大地和卫星同步形变测量值的应变张量估计(simultaneous and integrated strain tensor estimation from geodetic and satellite deformation measurements, SISTEM)方法进行改进,发挥 SISTEM 方法可以考虑相邻点地表形变的时空相关性的优势,优化了函数模型中 InSAR 和 GNSS 观测的构成比例,引入 VCE 方法精确估计了各类观测值的后验方差,进而实现了高精度的三维地表形变测量。首先通过设计模拟实验对所提方法进行了验证,然后将该方法应用于 2007 年夏威夷基拉韦厄火山喷发案例中。相较于 SISTEM 方法,该方法在东西、南北、垂直向解算的形变精度均有大幅提升。

关键词:干涉合成孔径雷达;全球导航卫星系统(GNSS);应力应变模型;方差分量估计;三维地表形变

中图分类号:P228;P237 **文献标志码:**A

中国地质灾害的频发给人们生命财产安全造成了严重危害。为监测地表形变,预防地质灾害的发生,干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)和全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)等监测技术脱颖而出。InSAR 技术具有作业全天时、全天候以及空间分辨率高等优势^[1],但 InSAR 技术只能观测到一维视线方向的形变,且时间分辨率较低。GNSS 技术是一种可以实时获得高精度三维地表形变的自动化监测技术,最高精度可达毫米级。由于其地面监测设备较为昂贵、布站周期较长等原因,导致空间分辨率很低。两者所具有的互补优势为融合监测三维地表形变提供了契机。

自从 1997 年 Bock 等^[2]提出了融合 InSAR 和 GNSS 的思想后,涌现了一大批融合 InSAR 和

GNSS 的研究,其主要是应用在地震^[3-4]、冰川移动^[5]、火山运动^[6]、地面沉降^[7]、断层^[8]、滑坡^[9]等地质灾害以及海岸线^[10]、山谷^[11]、城市^[12]等形变监测中。融合 InSAR 数据和 GNSS 数据主要分为 3 个方面:(1)利用 GNSS 数据去改正 InSAR 数据的某些误差,以提高 InSAR 数据的精度^[13-14];(2)融合高空间分辨率 InSAR 数据和高时间分辨率 GNSS 数据生成高时空分辨率数据^[15-17];(3)用 GNSS 三维形变数据去扩展 InSAR 三维形变监测能力,以得到高空间分辨率的三维形变数据。

文献[18]通过使 GNSS 和差分干涉合成孔径雷达(differential InSAR, DInSAR)数据的能量函数最小化,将贝叶斯统计方法和马尔可夫随机场理论应用在从 GNSS 和 InSAR 数据导出的高分辨率三维表面速度图中。随后,文献[19-21]在该领域进行了一系列研究。这些研究通常是

收稿日期:2021-05-11

项目资助:国家自然科学基金(42030112);湖南省自然科学基金(2020JJ2043);湖南创新型省份建设专项经费(2019GK5006);中南大学创新驱动项目(2019CX007)。

第一作者:汪友军,硕士生,研究方向为 InSAR 大地测量。youjunwang@cug.edu.cn

通讯作者:胡俊,博士,教授。csuhujun@csu.edu.cn

逐像素解算三维形变,而没有考虑相邻点地表形变之间的空间相关性,无法满足弹性形变理论^[22]中的相关要求。文献[23]提出了一种联合大地和卫星同步形变测量值的应变张量估计(simultaneous and integrated strain tensor estimation from geodetic and satellite deformation measurements, SISTEM)方法,并用于地表形变反演^[23-25]。该方法利用应力应变模型融合 InSAR 和 GNSS 测量数据估计三维形变及应变参数,不仅考虑了相邻点之间的应力联系,而且避免了为提高空间分辨率而对 GNSS 测量值进行空间插值。文献[26]提出了扩展 SISTEM(extended SISTEM, ESISTEM)方法,利用空间邻近点信息增加了 SISTEM 方法中函数模型的 InSAR 观测值数量。由于 InSAR 和 GNSS 观测值的精度差异较大,因此确定各类观测值的精确权重对于三维形变估计值的精度具有重要意义^[27]。已有部分研究使用移动窗口来估计形变观测值的先验方差^[28-29]。该方法假定观测值在有限范围内具有遍历性的特征,但是在现实中难以满足这一假设。另外还有部分研究采用距离定权的方式计算先验方差^[23]。因此,如何精确确定 InSAR 和 GNSS 观测值的先验方差仍然是目前研究中的一个瓶颈。

针对上述问题,本文引入方差分量估计(variance component estimation, VCE)方法对 SISTEM 方法进行改进,充分利用应力应变模型

$$B_{sm}^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x^{E(i)} & \Delta x^{N(i)} & \Delta x^{U(i)} & 0 & 0 & 0 & \Delta x^{U(i)} & -\Delta x^{N(i)} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x^{E(i)} & 0 & \Delta x^{N(i)} & \Delta x^{U(i)} & 0 & -\Delta x^{U(i)} & 0 & \Delta x^{E(i)} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x^{E(i)} & 0 & \Delta x^{N(i)} & \Delta x^{U(i)} & \Delta x^{N(i)} & -\Delta x^{E(i)} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$X = [d^{E(0)} \quad d^{N(0)} \quad d^{U(0)} \quad \xi_{11} \quad \xi_{12} \quad \xi_{13} \quad \xi_{22} \quad \xi_{23} \quad \xi_{33} \quad \omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3]^T \quad (4)$$

$\omega_r (r=1, 2, 3)$ 和 $\xi_{pq} (1 \leq p \leq 3, p \leq q \leq 3)$ 为应力应变模型中的未知参数。

1.2 InSAR 成像几何

InSAR 的雷达视线向(line of sight, LOS)观测向量 L 与三维形变分量 d 之间的函数关系可以表示为^[30-31]:

$$L = B_{geo} \cdot d \quad (5)$$

式中,

$$B_{geo} = [a \quad b \quad c] \quad (6)$$

$$\begin{cases} a = -\sin\theta \sin(\alpha - \frac{3\pi}{2}) \\ b = -\sin\theta \cos(\alpha - \frac{3\pi}{2}) \\ c = \cos\theta \end{cases} \quad (7)$$

式中, α 、 θ 分别表示获取 InSAR 数据时卫星的方位角和雷达入射角。

建立的相邻点应力关系以提供大量的多余观测值,增加 InSAR 数据在函数模型中的占比,进而使用 VCE 对 InSAR 和 GNSS 观测值进行迭代精确定权,解算得到高精度、高空间分辨率的三维形变。并开展了模拟实验和真实实验,与 SISTEM 方法进行对比,验证改进方法的可行性和精度。

1 基本理论与方法

1.1 应力应变模型

假设兴趣点 P^0 的三维坐标和三维形变为 $x^0 = [x^{E(0)} \quad x^{N(0)} \quad x^{U(0)}]^T$, $d^0 = [d^{E(0)} \quad d^{N(0)} \quad d^{U(0)}]^T$, 在 P^0 附近有 K 个邻域点 P^i , 它们的三维坐标和三维形变分别为 $x^i = [x^{E(i)} \quad x^{N(i)} \quad x^{U(i)}]^T$, $d^i = [d^{E(i)} \quad d^{N(i)} \quad d^{U(i)}]^T$, 上标 E、N、U 分别代表东西、南北、垂直方向。根据应力应变模型^[22], P^0 的形变分量 d^0 与 P^i 的形变分量 d^i 之间的关系可以表示为:

$$d^i = H \cdot \Delta^i + d^0 \quad (1)$$

式中, $\Delta^i = x^i - x^0 = [\Delta x^{E(i)} \quad \Delta x^{N(i)} \quad \Delta x^{U(i)}]^T$ 表示 P^0 与 P^i 之间的坐标增量矩阵; H 代表应变参数矩阵。

将式(1)改写为:

$$d^i = B_{sm}^i \cdot X \quad (2)$$

式中, B_{sm}^i 代表应力应变模型中的设计矩阵; X 代表 P^0 处的未知参数向量,表达式分别为:

2 基于 VCE 的改进 SISTEM 方法

虽然 SISTEM 方法考虑了相邻点地表形变的空間相关性,但是其仅采用当前点的 InSAR 数据和周围若干 GNSS 数据参与解算,导致解算数据构成比例不太合理,难以在缺少 GNSS 或者 InSAR 数据区域达到较好的解算效果。此外,该方法确定的先验方差的准确性有待分析和估计。本文通过扩充函数模型中的 InSAR 数据,并引入 VCE 对 SISTEM 方法进行改进。

针对 SISTEM 方法中解算数据构成比例不合理的问题,改进的 SISTEM 方法按照一定比例选取解算点位置及周围若干 InSAR 和 GNSS 数据点。在确定解算点周围各类观测值的选取数量时,本文首先计算 P^0 与各类数据点之间的三维

距离,按距离从小到大选取 K_1 个升轨 InSAR、 K_2 个降轨 InSAR 和 K_3 个 GNSS 数据点。为满足后续 VCE 方法中各类观测值的个数应该基本相等的要求,故取 $K_1 \approx K_2 \approx 3K_3$, 即 InSAR 升、降轨数据点个数均约为 GNSS 数据点的 3 倍。同时考虑到 VCE 会因为分类较多而降低其改善效果,因此本文仅将所有观测值按照来源分为 3 类进行解算。图 1 显示了各类数据点的选取过程,其中黄色方块表示 GNSS 数据点,蓝色、橙色方块分别表示升、降轨数据点,对勾表示参与解算的点。

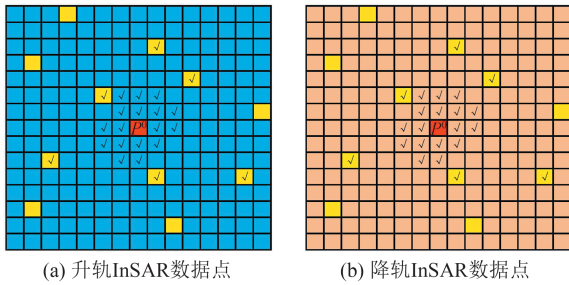


图 1 各类数据点选取示意图

Fig.1 Diagram of Selecting Various Data Points

首先,建立 InSAR 和 GNSS 观测值 $L_j^i (j=1, 2, 3, \text{分别表示升、降轨 InSAR 和 GNSS 观测值})$ 与 P^i 处三维形变 d^i 之间的函数关系:

$$L_j^i = B_{\text{geo},j}^i \cdot d^i \quad (8)$$

式中, $B_{\text{geo},j}^i = \begin{cases} [a_j^i & b_j^i & c_j^i], j=1, 2 \\ I, j=3 \end{cases}$; I 为 3×3 的单位矩阵。

由式(6)和(7)得:

$$\begin{cases} a_j^i = -\sin\theta_j^i \sin(\alpha_j^i - \frac{3\pi}{2}) \\ b_j^i = -\sin\theta_j^i \cos(\alpha_j^i - \frac{3\pi}{2}) \\ c_j^i = \cos\theta_j^i \end{cases} \quad (9)$$

然后,综合式(2)和式(8)得:

$$L_j^i = B_j^i \cdot X \quad (10)$$

其中, $B_j^i = B_{\text{geo},j}^i \cdot B_{\text{sm}}^i$

则最终可得:

$$L = B \cdot X \quad (11)$$

式中, $L = [(L_1)^T (L_2)^T (L_3)^T]^T$, $L_j = [L_j^1 L_j^2 \dots L_j^{K_j}]^T$; $B = [(B_1)^T (B_2)^T (B_3)^T]^T$, $B_j = [(B_j^1)^T (B_j^2)^T (B_j^{K_j})^T]^T$ 。

与 P^0 不同距离的 GNSS 观测值应赋以不同的权重, P^i 处的 InSAR 和 GNSS 观测值的初始权重为:

$$\begin{cases} W_1^i = W_2^i = \exp(-\frac{(D^i)^2}{(D_0)^2}) \\ W_3^i = \exp(-\frac{(D^i)^2}{(D_0)^2}) \cdot [1 \ 1 \ 0.5]^T \end{cases} \quad (12)$$

式中, $D^i = \sqrt{(\Delta x^{\text{E}(i)})^2 + (\Delta x^{\text{N}(i)})^2 + (\Delta x^{\text{U}(i)})^2}$ 表示 P^i 与 P^0 之间的距离; D_0 表示反距离定权衰减因子,其计算公式为:

$$D_0 = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N D^{mn} \quad (13)$$

式中, M 表示整个形变场中所有 GNSS 站点的个数; N 表示距离 P^0 最近的 GNSS 站点的个数。本文进行了大量实验,从统计数据中得出 N 的最优取值范围为 5~7,与 SISTEM 方法中^[23]经过大量实验所得到的最佳取值 $N=6$ 相吻合,因此本文取值 $N=6$,以便进行两种方法的对比分析。 D^{mn} 代表所有 M 个 GNSS 站点中的第 m 个站点与距离 P^0 最近的 N 个 GNSS 站点中的第 n 个站点之间的距离。

考虑到 GNSS 垂直向的观测精度普遍比水平向精度低,因此根据文献[12],式(12)中 GNSS 垂直向观测值的权重比例系数取为 0.5。

此时,便可以确定各类观测值的初始权重矩阵:

$$W_j = \text{diag}(W_j'), j=1, 2, 3 \quad (14)$$

式中, $W_1' = [W_1^1 \ W_1^2 \ \dots \ W_1^{K_1}]^T$; $W_2' = [W_2^1 \ W_2^2 \ \dots \ W_2^{K_2}]^T$; $W_3' = [(W_3^1)^T (W_3^2)^T \dots (W_3^{K_3})^T]^T$ 。

$$\text{令 } M_j = B_j^T W_j B_j, N_j = B_j^T W_j L_j, M = \sum_{j=1}^3 M_j,$$

$N = \sum_{j=1}^3 N_j$, 得:

$$X = M^{-1} N \quad (15)$$

由方差分量估计算法得:

$$\hat{\theta} = S^{-1} W_0 \quad (16)$$

式中, $\hat{\theta} = [\sigma_1^2 \ \sigma_2^2 \ \sigma_3^2]^T$ 表示各类观测值的单位权方差; $S = [S_1 \ S_2 \ S_3]$ 表示转换矩阵,其中,

$$S_1 = \begin{bmatrix} K_1 - 2\text{tr}(M^{-1}M_1) + \text{tr}(M^{-1}M_2)^2 \\ \text{tr}(M^{-1}M_1M^{-1}M_2) \\ \text{tr}(M^{-1}M_1M^{-1}M_3) \end{bmatrix}$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} \text{tr}(M^{-1}M_1M^{-1}M_2) \\ K_2 - 2\text{tr}(M^{-1}M_2) + \text{tr}(M^{-1}M_2)^2 \\ \text{tr}(M^{-1}M_2M^{-1}M_3) \end{bmatrix}$$

$$S_3 = \begin{bmatrix} \text{tr}(M^{-1}M_1M^{-1}M_3) \\ \text{tr}(M^{-1}M_2M^{-1}M_3) \\ K_3 - 2\text{tr}(M^{-1}M_3) + \text{tr}(M^{-1}M_3)^2 \end{bmatrix}$$

$W_\theta = [V_1^T W_1 V_1 \quad V_2^T W_2 V_2 \quad V_3^T W_3 V_3]^T$ 表示观测值改正数二次型向量, $V_j = B_j \cdot X - L_j$ 表示观测值改正数。

当各类观测值的单位权方差近似相等时,便满足了方差分量估计方法中的条件,当条件不满足时,方差分量估计的解就不会收敛,即得不到最终的三维形变结果。但根据本文的实验结果,由于提供了足够多的冗余观测,该条件是可以满足的。即:

$$\sigma_1^2 \approx \sigma_2^2 \approx \sigma_3^2 \quad (17)$$

此时的观测值权重矩阵为最优权阵。若不近似相等,则利用下式对各类观测值权重进行更新:

$$\begin{cases} W_1' = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 W_1^{-1}} \\ W_2' = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2 W_2^{-1}} \\ W_3' = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_3^2 W_3^{-1}} \end{cases} \quad (18)$$

更新观测值权重矩阵后,重新计算式(15)和式(16),重复此过程,直至各类观测值单位权中误差满足式(17),本文选取迭代终止阈值为 1 mm^2 。此时根据式(15)即可得到高精度三维地表形变结果,即未知参数向量 X 的第 1~3 个元素。对每一个地表点经过上述步骤即可实现融合 InSAR 和 GNSS 观测值估计高精度三维地表形变。

综上所述,本文提出的基于 VCE 的改进 SISTEM 方法的具体流程可用图 2 表示。

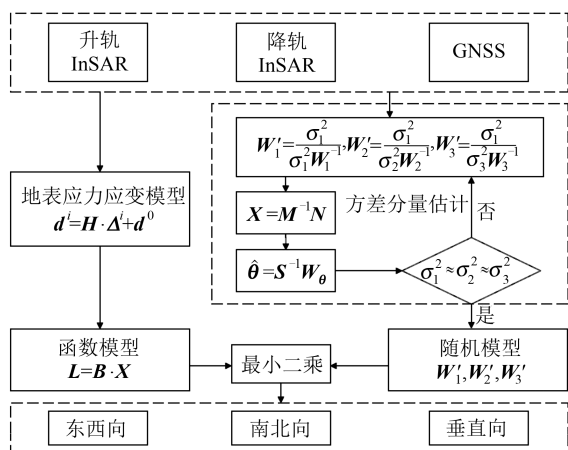


图 2 基于 VCE 的改进 SISTEM 方法流程

Fig.2 Flowchart of the Improved SISTEM Method Based on VCE

3 三维地表形变反演实验

3.1 模拟三维地表形变反演

首先根据地下流体的体积分数变化,在 400×450 像素的网格上生成三维地表形变场^[29]。网格实际大小为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。然后根据式(5)使用从夏威夷基拉韦厄火山上获得的合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)数据参数生成升、降轨 LOS 向形变测量值。为简化起见,InSAR 升、降轨误差由方差分别为 5、7 mm 的加性高斯噪声模拟。GNSS 数据是从生成的三维地表形变场中随机挑选的 100 个像素点,同时在 GNSS 水平、垂直形变观测值中分别加入方差为 1、2 mm 的高斯噪声。之所以上述观测值误差均由高斯噪声模拟,是因为 VCE 对高斯误差的改善效果非常明显。最终模拟实验数据如图 3 所示,其中白色三角形表示 GNSS 站点的分布情况。

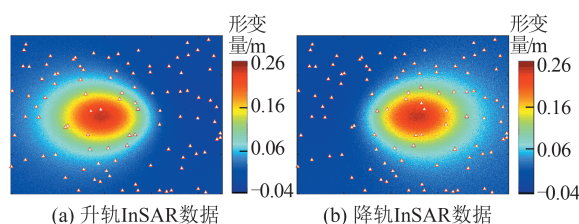


图 3 模拟实验数据

Fig.3 Simulated Experimental Data

分别应用本文方法和 SISTEM 方法解算三维地表形变,结果如图 4、图 5 所示。图 4(a)~4(c) 为模拟形变,图 4(d)~4(f) 为本文方法解算结果,图 4(g)~4(i) 为 SISTEM 方法解算结果,图 5 为本文方法和 SISTEM 方法解算结果与模拟形变的较差。不难看出,两种方法解算的三维形变与模拟形变的一致性较好,但具体来说,在 3 个分量中,本文方法解算结果的偏差都是更小的。为定量评估解算效果,表 1 给出了两种方法解算结果的均方根误差(root mean square error, RMSE)。

由表 1 可知,本文方法解算结果的 RMSE 值明显低于 SISTEM 方法。与 SISTEM 方法的解算结果相比,本文方法在东西向、南北向、垂直向 3 个方向分别实现了 56.3%、41.9% 和 41.8% 的提升。此外,本文通过计算 3 类观测值的平均权重来验证不同方法在确定各类观测值权重方面的准确性。计算公式为:

$$\bar{W}_j = \frac{m \times n}{\sqrt{\prod_{i=1}^{m \times n} W_i}} \quad (19)$$

式中, W_i 表示在点 i ($i = 1, 2, \dots, m \times n$, m, n 分别是

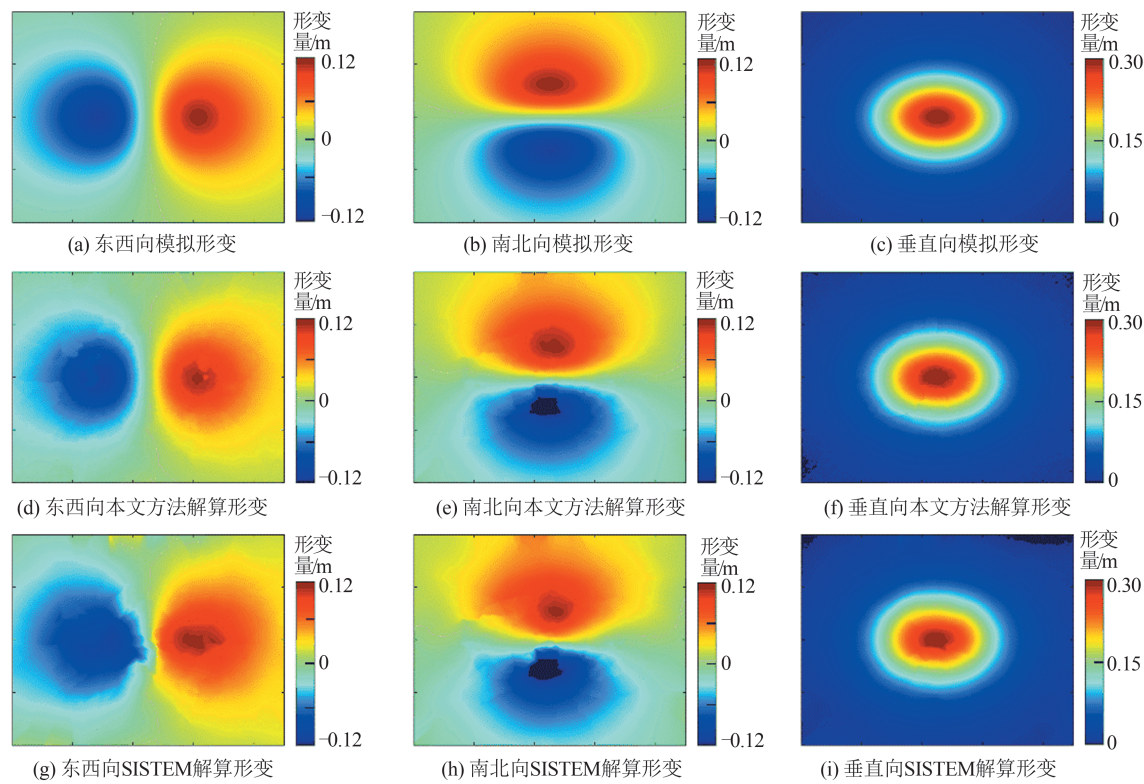


图4 模拟与解算的三维形变结果

Fig.4 Simulated and Estimated Three-Dimensional Deformation Results

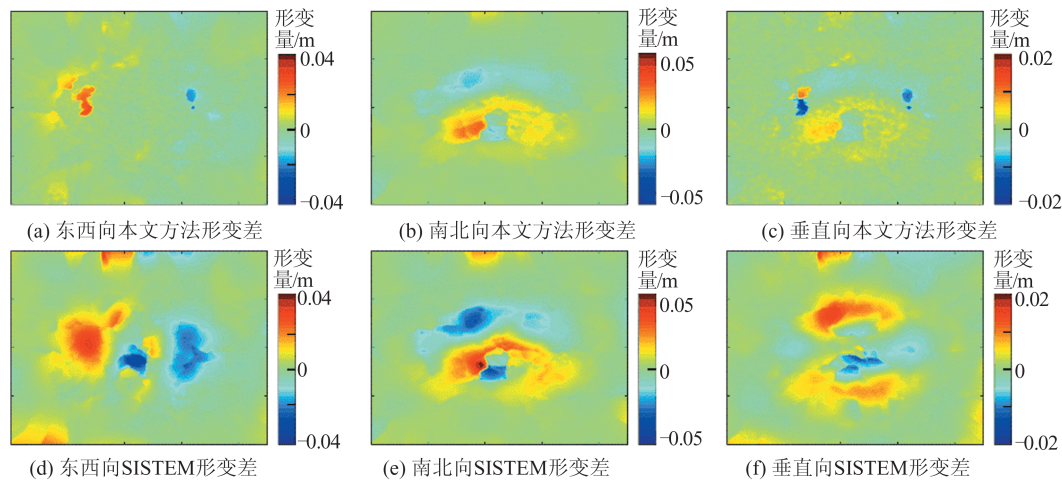


图5 解算形变与模拟形变较差

Fig.5 Differences Between Simulated and Estimated Deformations

表1 不同解算方法的RMSE对比/mm

Tab.1 Comparison of RMSE of Different Methods/mm

方法	东西向	南北向	垂直向
本文方法	1.39	2.11	0.92
SISTEM	3.18	3.63	1.58

实验区域的像素行列数,即 $m=400,n=450$)处观测值的权重; \bar{W}_j 表示第 j 类观测值的平均权重。本文将由高斯噪声的标准偏差加到模拟观测值中产生的权重视为理论值。其中,将升轨 InSAR

观测值的权重作为单位矩阵。由表2可知,本文方法中各类观测值的平均权重更接近理论值。显而易见,本文方法解算结果优于SISTEM方法的主要原因是前者定权精度更高,从而解算出来的三维形变精度也更高。

各解算点在选取数据时,需要寻找距离解算点最近的若干GNSS和InSAR数据来建立观测方程。随着解算点周围被利用的数据点个数的增加,解算结果的精度也会随之变化,具体变化关系如图6所示。图6中,蓝色方块、红色菱形、

绿色五角星和紫色三角形分别表示东西、南北及垂直向的 RMSE 值及三者平均值,黑色圆形表示各点解算时距离周围数据点的平均距离。

表 2 平均权重对比

Tab.2 Comparison of Average Weights

方法	升轨 InSAR	降轨 InSAR	GNSS
理论值	1	0.564 1	0.214 5
本文方法	1	0.562 5	0.218 7
SISTEM	1	0.663 8	0.295 1

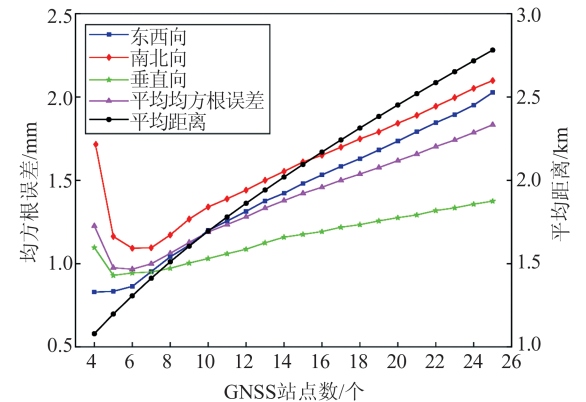


图 6 最佳 GNSS 点个数确定

Fig.6 Determination of the Optimal Number of GNSS Points

从图 6 可知,随着各解算点周围参与解算的 GNSS 点个数的增加,解算结果的 RMSE 值呈现先减小后增大的趋势,并在 GNSS 点个数为 6 时取得最小值。当 GNSS 点个数小于 4 时,各个方向的 RMSE 值非常大,故图 6 中没有表示出来。这主要是由于较少的 GNSS 数据在某些区域难以较为正确合理地反映解算点的形变趋势,从而导致整体解算效果不佳。当 GNSS 点个数大于 6 时,各个方向的 RMSE 值逐渐增大,原因在于随着 GNSS 数据的增多,距离解算点愈远的 GNSS 数据的可靠性会显著降低,而且各点解算时与周围数据点之间的平均距离也急剧增大,其中解算点到 GNSS 点的距离占较大比例。

从以上解算结果图及各项误差分析中可以得出结论,本文方法解算的三维形变精度较 SISTEM 方法高,这也在模拟实验阶段证明了本文方法的有效性和可用性。

3.2 夏威夷岛三维地表形变监测

夏威夷岛的基拉韦厄火山(Kilauea Volcano)自 1983 年以来一直处于活动状态。2007 年 6 月 17 日上午,火山的东断裂带附近发生了多次地震和快速塌陷。岩浆侵入始于莫纳乌鲁(Mauna

Ulu)地区的浅层,在持续的地震中,侵入活动沿东断裂带向东移动了约 6 km。2007 年 6 月 19 日上午,基拉韦厄火山地区没有明显的活动,表明该地区的扰动已基本结束^[28]。如图 7(a)所示,黑色方框内为真实实验所选择的一块约 24.8 km×35.6 km 的火山喷发区作为研究区域。在此次所选实验区域中可用的 GNSS 站点有 29 个,各个站点的分布以及监测到的形变值都已经表示在了图 7(b)中,其中,黑色三角形为参与形变解算的 GNSS 站点(22 个),黑色圆形为用于精度验证的 GNSS 站点(7 个),红色箭头表示水平向的形变,蓝色箭头表示垂直向的形变。

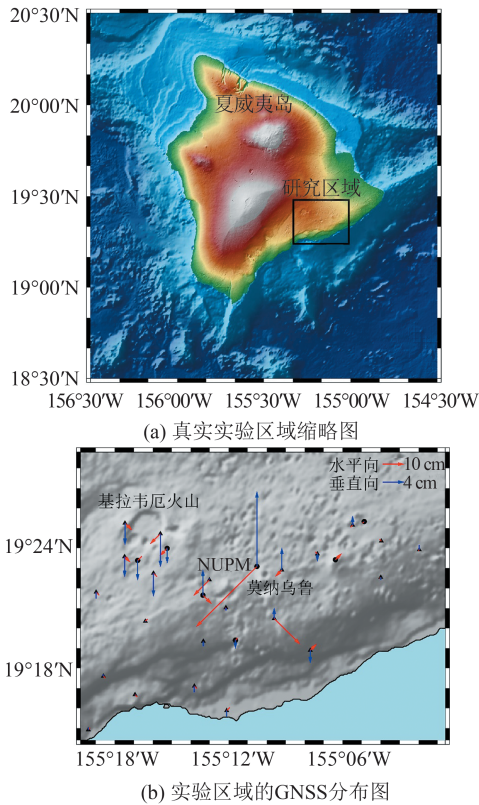


图 7 真实实验研究区域情况

Fig.7 Experimental Area with Real Data

在此次火山活动前后,日本的先进陆地观测卫星(advanced land observing satellite, ALOS)均对该区域成像。本文选取 30 m 航天飞机雷达地形测绘使命(shuttle radar topography mission, SRTM)数据用作 InSAR 处理中的外部数字高程模型数据^[32]。所选取的两幅相控阵型 L 波段合成孔径雷达(phase array type L-band synthetic aperture radar, PALSAR)影像的成像具体信息如表 3 所示。使用 InSAR 技术从升轨和降轨数据得出空间分辨率为 30 m×30 m 的 LOS 向形变图,如图 8 所示。

表3 ALOS PALSAR影像成像信息

Tab.3 Imaging Information of ALOS PALSAR

轨道	主影像获取	辅影像获取	基线长 度/m	入射角/ (°)	方位 角/(°)
	日期	日期			
升轨	2007-05-05	2007-06-20	352	38.75	349.24
降轨	2007-02-28	2007-07-16	284	38.76	190.77

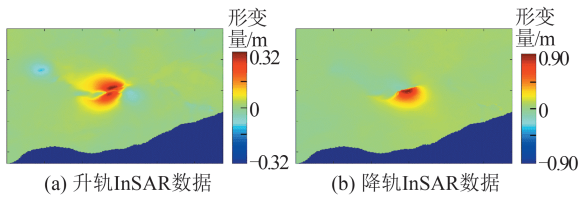


图8 InSAR升降轨LOS向形变观测值
Fig.8 InSAR Ascending and Descending LOS
Deformation Measurements

图9为本文方法和SISTEM方法解算的结果。可以发现,本文方法与SISTEM方法解算结

果的差异主要表现在莫纳乌鲁地区,该地区发生了地面破裂,导致周围GNSS站点测量值较大,而SISTEM方法中采用的GNSS数据较InSAR数据多,所以解算结果受GNSS数据的影响较大。对比可以发现本文方法在这种情况下的局部抗干扰能力更强,其不同来源数据的采用比例更为合理。此外,在东北部区域的垂直向形变解算结果中,SISTEM方法的精度较低,从图7(b)中可以直观地看到,东北部地区的GNSS站点较少,解算时使用了较远距离的GNSS数据,从而弱化了应力应变模型中的空间相关性。本文方法采用更多的InSAR数据来组成观测方程,从而加大了InSAR数据的占比,弥补了GNSS数据导致的空间失相关。因此,在缺少GNSS数据区域,本文方法较SISTEM方法有更好的抗空间失相关性。

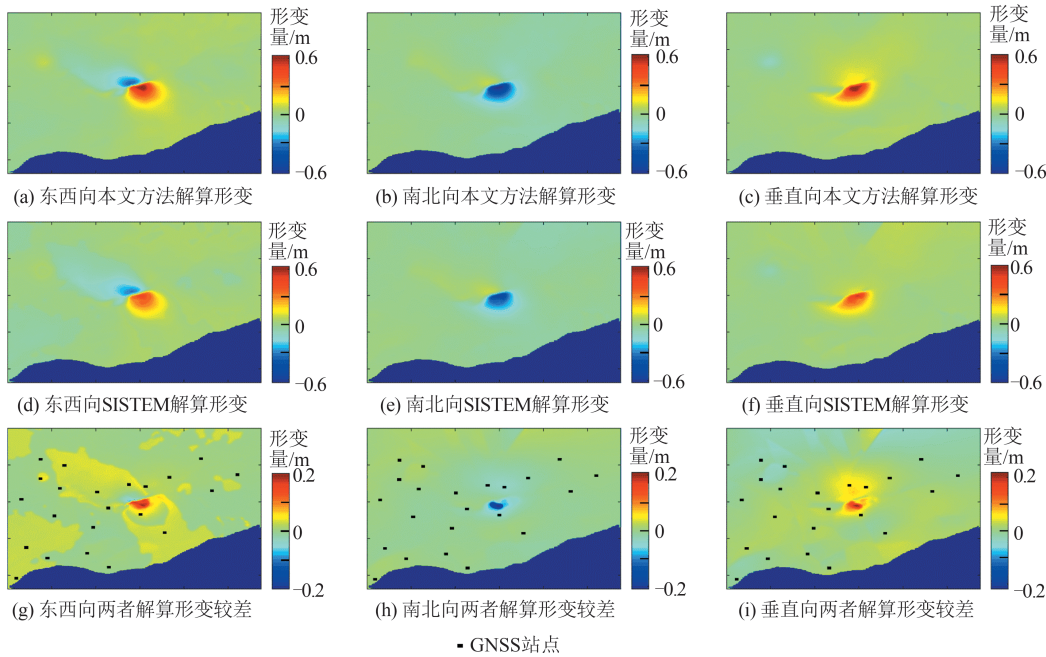


图9 真实实验解算结果
Fig.9 Results of the Experiment with Real Data

表4为7个GNSS站点的解算结果与观测值的差值。表5为根据已有GNSS站点数据计算的解算三维形变的RMSE值,其中,“6”表示去除GNSS站点NUPM。
在采用7个GNSS站点数据计算RMSE值时,本文方法解算结果的精度较SISTEM方法在东西向、南北向和垂直向提升了30.0%、10.1%、20.3%。可以发现南北方向的改善效果较差,造成这种结果的主要原因是在GNSS站点NUPM处监测的南北向形变数据较其他站点的

大许多,并且在解算过程中,GNSS数据在南北向形变上起主要作用。此外,引起这种偏差的部分原因是强烈的地震振动在GNSS站点NUPM处造成了局部的地面破裂^[33]。排除这个点重新评估其准确性,从而让南北向的改善水平提高到了18.6%。
将本文方法应用在实际案例中,并与SISTEM进行对比分析,结果进一步证明了本文方法在实际情况下的可用性以及相较于SISTEM方法的优越性。

表 4 各 GNSS 站点解算差值/cm
Tab.4 Differences of Each GNSS Station/cm

站点	东西向		南北向		垂直向	
	本文方法	SISTEM	本文方法	SISTEM	本文方法	SISTEM
PGF2	-1.95	-2.77	-3.79	-4.24	-2.26	-3.1
NUPM	3.52	4.74	-16.52	-17.81	-9.34	-11.51
DEST	-2.88	-4.03	4.93	5.68	-3.29	-3.83
932_	-2.09	-2.85	1.88	1.63	-2.49	-3.86
MANU	-0.83	-1.92	3.49	3.18	-2.76	-2.54
69FL	-3.05	-4.36	-4.73	-7.29	-1.74	-3.24
KALR	-2.48	-3.86	0.57	0.42	-3.06	-3.89

表 5 不同解算方法 RMSE/cm
Tab.5 RMSE of Different Methods/cm

方法	东西向		南北向		垂直向	
	7 个站点	6 个站点	7 个站点	6 个站点	7 个站点	6 个站点
本文方法	2.54	2.16	7.07	3.32	4.30	2.46
SISTEM	3.63	3.15	7.87	4.08	5.40	3.19
改善比例/%	30.0	31.4	10.1	18.6	20.3	22.8

4 结 语

准确的三维地表形变对于调查地质灾害具有重要意义。本文提出利用 VCE 对 SISTEM 方法进行改进,将应力应变模型和方差分量估计算法应用到 InSAR 和 GNSS 数据融合中,可以解算得到高精度、高空间分辨率的三维地表形变。该方法可以利用若干相邻点形变的空間相关性来估计没有实际观测值的点的形变值。应力应变模型充分考虑了相邻点之间地表形变的空間应力关联,以此组成较为符合实际情况的函数模型;方差分量估计则通过迭代计算进行精确定权组成随机模型,继而使用最小二乘法达到获取准确三维地表形变的目的。本文分别利用模拟实验和真实实验对本文方法和 SISTEM 方法进行对比研究。在模拟实验中,本文方法的解算精度在东西向、南北向、垂直向上较 SISTEM 方法分别改进了 56.3%、41.9% 和 41.8%。在真实实验中,本文方法的解算精度改善在东西向、南北向、垂直向上也分别达到了 31.4%、18.6%、22.8%。由此可知,本文方法较 SISTEM 方法有了较大幅度的改进,证明了本文方法的有效性和优越性。

在 GNSS 数据较少的区域,本文方法虽然较 SISTEM 方法有一定的改进,但是某些地区的 InSAR 和 GNSS 观测数据仍较为缺乏,且各类数据质量不一。因此,后续研究可以寻找其他来源的数据,如像素偏移追踪/多孔径 InSAR、水准测量观测值等^[34-36],实现多源异质数据有机结合,提高

观测数据的多源性与互补性,进而估计更为准确的三维地表形变。

参 考 文 献

[1] Tang Xinming, Tao Li, Gao Xiaoming, et al. Research on Key Technologies of Precise InSAR Surveying and Mapping Applications Using Automatic SAR Imaging [J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2019, 2(2): 27-37

[2] Bock Y, Williams S. Integrated Satellite Interferometry in Southern California [J]. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 1997, 78(29): 293-300

[3] Wan Yongge, Shen Zhengkang, Wang Min, et al. Coseismic Slip Distribution of the 2001 Kunlun Mountain Pass West Earthquake Constrained Using GPS and InSAR Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(4): 1 074-1 084 (万永革, 沈正康, 王敏, 等. 根据 GPS 和 InSAR 数据反演 2001 年昆仑山口西地震同震破裂分布 [J]. *地球物理学报*, 2008, 51(4): 1 074-1 084)

[4] Xu Caijun, He Ping, Wen Yangmao, et al. Coseismic Deformation and Slip Distribution for 2011 Tohoku-Oki Mw 9.0 Earthquake: Constrained by GPS and InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37 (12) : 1 387-1 391 (许才军, 何平, 温扬茂, 等. 日本 2011 Tohoku-Oki Mw 9.0 级地震的同震形变及其滑动分布反演:GPS 和 InSAR 约束 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2012, 37(12): 1 387-1 391)

[5] Milillo P, Minchew B, Simons M, et al. Geodetic

- Imaging of Time-Dependent Three-Component Surface Deformation: Application to Tidal-Timescale Ice Flow of Rutford Ice Stream, West Antarctica [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(10): 5 515-5 524
- [6] Chen Guohu, Shan Xinjian. A Modeling of the Magma Chamber Beneath the Changbai Mountains Volcanic Area Constrained by InSAR and GPS Derived Deformation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(4): 1 085-1 092 (陈国浒, 单新建. 基于 InSAR, GPS 形变场的长白山地区火山岩浆囊参数模拟研究 [J]. *地球物理学报*, 2008, 51(4): 1 085-1 092)
- [7] Cao Haikun, Zhao Lihua, Zhang Qin, et al. Ascending and Descending Orbits InSAR-GPS Data Fusion Method with Additional Systematic Parameters for Three-Dimensional Deformation Field [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(9): 1 362-1 368 (曹海坤, 赵丽华, 张勤, 等. 利用附加系统误差参数的升降轨 InSAR-GPS 数据融合方法建立三维形变场 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(9): 1 362-1 368)
- [8] Su Zhe, Wang E C, Hu J C, et al. Quantifying the Termination Mechanism Along the North Tabriz-North Mishu Fault Zone of Northwestern Iran via Small Baseline PS-InSAR and GPS Decomposition [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 10(1): 130-144
- [9] Akbarimehr M, Motagh M, Haghshenas-Haghighi M. Slope Stability Assessment of the Sarcheshmeh Landslide, Northeast Iran, Investigated Using InSAR and GPS Observations [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(8): 3 681-3 700
- [10] Buckley S, Mills J, Clarke P, et al. Synergy of GPS, Photogrammetry and InSAR for Coastal Zone Monitoring [J]. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2002, 34(4): 581-586
- [11] Houlié N, Funning G J, Burgmann R. Use of a GPS-Derived Troposphere Model to Improve InSAR Deformation Estimates in the San Gabriel Valley, California [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(9): 5 365-5 374
- [12] Wang Xiaying, Zhang Juqing, Zhang Qin, et al. Inferring Multi-dimensional Deformation Field in Xi'an by Combining InSAR of Ascending and Descending Orbits with GPS Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(7): 810-817 (王霞迎, 张菊清, 张勤, 等. 升降轨 InSAR 与 GPS 数据集成反演西安形变场 [J]. *测绘学报*, 2016, 45(7): 810-817)
- [13] Hoeven A, Hanssen R, Ambrosius B. Cross-Validation of Tropospheric Delay Variability Observed by GPS and SAR Interferometry [J]. *GPS Newsbrief*, 2000, 2(15): 2-7
- [14] Li Zhiwei, Ding Xiaoli, Liu Guoxiang. Modeling Atmospheric Effects on InSAR with Meteorological and Continuous GPS Observations: Algorithms and Some Test Results [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, 66(11): 907-917
- [15] Ge Linlin, Han Shaowei, Rizos C. Interpolation of GPS Results Incorporating Geophysical and InSAR Information [J]. *Earth, Planets and Space*, 2000, 52(11): 999-1 002
- [16] Ge Linlin, Han Shaowei, Rizos C. The Double Interpolation and Double Prediction (DIDP) Approach for InSAR and GPS Integration [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33(B2): 205-212
- [17] Liu Ning, Dai Wujiao, Santerre R, et al. High Spatio-Temporal Resolution Deformation Time Series with the Fusion of InSAR and GNSS Data Using Spatio-Temporal Random Effect Model [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(1): 364-380
- [18] Gudmundsson S, Sigmundsson F, Carstensen J M. Three-Dimensional Surface Motion Maps Estimated from Combined Interferometric Synthetic Aperture Radar and GPS Data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107 (B10): ETG 13-1-ETG -4
- [19] Samsonov S, Tiampo K. Analytical Optimization of a DInSAR and GPS Dataset for Derivation of Three-Dimensional Surface Motion [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(1): 107-111
- [20] Samsonov S, Tiampo K, Rundle J, et al. Application of DInSAR-GPS Optimization for Derivation of Fine-Scale Surface Motion Maps of Southern California [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(2): 512-521
- [21] Hu Jun, Li Zhiwei, Zhu Jianjun, et al. Measuring Three-Dimensional Surface Displacements from Combined InSAR and GPS Data Based on BFGS Method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(1): 117-126 (胡俊, 李志伟, 朱建军, 等. 基于 BFGS 法融合 InSAR 和 GPS 技术监测地表三维形变 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56(1): 117-126)
- [22] Segall P. Earthquake and Volcano Deformation

- [M]. Princeton: Princeton University Press, 2010
- [23] Guglielmino F, Nunnari G, Puglisi G, et al. Simultaneous and Integrated Strain Tensor Estimation from Geodetic and Satellite Deformation Measurements to Obtain Three-Dimensional Displacement Maps [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(6): 1 815-1 826
- [24] Guglielmino F, Bignami C, Bonforte A, et al. Analysis of Satellite and in Situ Ground Deformation Data Integrated by the SISTEM Approach: The April 3, 2010 Earthquake Along the Pernicana Fault (Mt. Etna-Italy) Case Study [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 312(3-4): 327-336
- [25] Guglielmino F, Anzidei M, Briole P, et al. 3D Displacement Maps of the 2009 L'Aquila Earthquake (Italy) by Applying the SISTEM Method to GPS and DInSAR Data [J]. *Terra Nova*, 2013, 25(1): 79-85
- [26] Luo Haipeng, Chen Ting. Three-Dimensional Surface Displacement Field Associated with the 25 April 2015 Gorkha, Nepal, Earthquake: Solution from Integrated InSAR and GPS Measurements with an Extended SISTEM Approach [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(7): 559
- [27] Hu Jun, Li Zhiwei, Sun Qian, et al. Three-Dimensional Surface Displacements from InSAR and GPS Measurements with Variance Component Estimation [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(4): 754-758
- [28] Jung H S, Lu Z, Won J S, et al. Mapping Three-Dimensional Surface Deformation by Combining Multiple-Aperture Interferometry and Conventional Interferometry: Application to the June 2007 Eruption of Kilauea Volcano, Hawaii [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(1): 34-38
- [29] Hu Jun, Ding Xiaoli, Zhang Lei, et al. Estimation of 3-D Surface Displacement Based on InSAR and Deformation Modeling [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(4): 2 007-2 016
- [30] Hu Jun, Li Zhiwei, Zhu Jianjun, et al. Inferring Three-Dimensional Surface Displacement Field by Combining SAR Interferometric Phase and Amplitude Information of Ascending and Descending Orbits [J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(4): 550-560
- [31] Jung H S, Lu Z, Shepherd A, et al. Simulation of the Super SAR Multi-Azimuth Synthetic Aperture Radar Imaging System for Precise Measurement of Three-Dimensional Earth Surface Displacement [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(11): 6 196-6 206
- [32] Hu Jun, Wang Qijie, Li Zhiwei, et al. Retrieving Three-Dimensional Coseismic Displacements of the 2008 Gaize, Tibet Earthquake from Multi-path Interferometric Phase Analysis [J]. *Natural Hazards*, 2014, 73(3): 1 311-1 322
- [33] Fujiwara S, Nishimura T, Murakami M, et al. 2.5-D Surface Deformation of M6.1 Earthquake Near Mt Iwate Detected by SAR Interferometry [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(14): 2 049-2 052
- [34] Liu Guoxiang, Zhang Bo, Zhang Rui, et al. Monitoring Dynamics of Hailuoguo Glacier and the Secondary Landslide Disasters Based on Combination of Satellite SAR and Ground-Based SAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 980-995 (刘国祥, 张波, 张瑞, 等. 联合卫星 SAR 和地基 SAR 的海螺沟冰川动态变化及次生滑坡灾害监测 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7): 980-995)
- [35] Zhu Bangyan, Yao Fengyu, Sun Jingwen, et al. Attribution Analysis on Land Subsidence Feature in Hexi Area of Nanjing by InSAR and Geological Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 442-450 (朱邦彦, 姚冯宇, 孙静雯, 等. 利用 InSAR 与地质数据综合分析南京河西地面沉降的演化特征和成因 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(3): 442-450)
- [36] Wang Zhidong, Wen Xuehu, Tang Wei, et al. Early Detection of Geological Hazards in Longmenshan-Dadu River Area Using Various InSAR Techniques [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 451-459 (王之栋, 文学虎, 唐伟, 等. 联合多种 InSAR 技术的龙门山-大渡河区域地灾隐患早期探测 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(3): 451-459)

Measurements of Three-Dimensional Deformations by Integrating InSAR and GNSS: An Improved SISTEM Method Based on Variance Component Estimation

WANG Youjun^{1,2} HU Jun¹ LIU Jihong¹ SUN Qian³

¹ School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

² School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

³ College of Geographic Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

Abstract: **Objectives:** Simultaneous and integrated strain tensor estimation from geodetic and satellite deformation measurements(SISTEM) is a popular method in this field due to its advantage of no-need for the interpolation of global navigation satellite system(GNSS) observations. However, the performance of the SISTEM method is greatly limited due to the inaccurate determination of the prior variance. **Methods:** Variance component estimation(VCE) algorithm is introduced to improve the SISTEM method. The strain model (SM) is used to establish the linear relationship between three-dimensional surface deformation of the target point and those of the neighborhood point. Different from the SISTEM method that only employs the InSAR observations of the target point when constructing the function model, the proposed method not only employs the InSAR observations of the target point, but also exploits an amount of nearest InSAR observations around it. This can improve the reliability of the SISTEM method in the region of lacking GNSS observations. In order to meet the requirement of VCE that the number of all types of observations are roughly equal, the number of both types of InSAR observations (i.e., ascending and descending) are approximately 3 times as that of GNSS observations. **Results:** Compared with those of the SISTEM method, the root mean square error(RMSE) from the proposed method achieve an improvement of 56.3%, 41.9% and 41.8% in east west(EW), south north(NS), up down(UD) components, respectively. In addition, the average weights of the interferometric synthetic aperture radar(InSAR) and GNSS observations derived from the proposed method is closer to the theoretical value than those from the SISTEM method. The real data experiments were then carried out by using the data acquired from the area near Kilauea Volcano on the island of Hawaii, US, including 29 GNSS observations and two pairs of ALOS PALSAR images in 2007. As expected, the accuracies of the proposed method are also improved by 31.4%, 18.6% and 22.8% in EW, NS, UD components, respectively, compared with those of the SISTEM method. **Conclusions:** It is found that the proposed method has better resistance to spatial decorrelation in the regions without sufficient GNSS data since more InSAR observations were used to form the observation equation. In addition, the results from the proposed method are less affected by local abrupt deformation.

Key words: interferometric synthetic aperture radar; global navigation satellite system (GNSS); strain model; variance component estimation; three-dimensional surface deformations

First author: WANG Youjun, postgraduate, specializes in InSAR Geodesy. E-mail: youjunwang@cug.edu.cn

Corresponding author: HU Jun, PhD, professor. E-mail: esuhujun@csu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (42030112); the Natural Science Foundation of Hunan Province (2020JJ2043); Special Funds for the Construction of an Innovative Province in Hunan (2019GK5006); Innovation Driven Project of Central South University (2019CX007).

引文格式: WANG Youjun, HU Jun, LIU Jihong, et al. Measurements of Three-Dimensional Deformations by Integrating InSAR and GNSS: An Improved SISTEM Method Based on Variance Component Estimation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10):1598-1608. DOI:10.13203/j.whugis20210113(汪友军, 胡俊, 刘计洪, 等. 融合 InSAR 和 GNSS 的三维形变监测: 利用方差分量估计的改进 SISTEM 方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(10):1598-1608. DOI:10.13203/j.whugis20210113)