

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

曹海坤¹ 赵丽华¹ 张 勤¹ 瞿 伟¹ 聂建亮²

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054
2 国家测绘地理信息局大地测量数据处理中心,陕西 西安,710054

摘 要:针对合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)监测形变时空分辨率的优势以及 GPS 监测数据高精度、高时间分辨率的特点,对升、降轨 InSAR 与 GPS 数据融合获取高精度的三维形变场的方法展开研究。提出以高精度的 GPS 观测值为约束,对升、降轨 InSAR 观测方程分别添加一个跟点的位置有关的系统误差函数,以对 InSAR 数据中残留的系统误差进行修正,减弱或消除系统误差的影响。模拟数据和实测数据表明,该方法能够有效地补偿不同轨道 InSAR 数据与 GPS 数据间的系统误差影响,且计算简单;采用附加系统误差参数的升、降轨 InSAR-GPS 综合形变分析模型建立的三维形变场具有更高的精度。

关键词:GPS;升降轨 InSAR;系统参数;三维形变场

中图分类号:P228;P237 **文献标志码:**A

GPS 与合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)数据融合既可以改正 InSAR 数据本身难以消除的误差,又可以实现 GPS 技术高时间分辨率、高平面位置精度与 InSAR 技术高空间分辨率、高程监测精度的有效统一^[1]。在如何有效融合两种具有互补性的对地观测手段以得到监测区域高分辨率的三维形变场的研究方面,文献[2]基于 Markov 随机场理论和 Bayes 统计方法率先建立了获取地表形变的 Gibbs 能量方程,但模拟退火求解方法计算复杂且解不稳定。此后的多种方法都集中在对优化算法的研究上,如文献[3]通过简化能量方程的平滑约束项,提出了解析优化法;文献[4]通过证明该能量方程局部最优解即为全局最优解,提出了布罗依丹拟牛顿迭代方法;文献[5]提出利用蚁群优化算法在连续空间求解能量函数最小值。但上述方法基本都是非线性迭代求解算法,对于需要逐点求解的速度场来说,计算量相当大。文献[6]通过对 Gibbs 能量函数的特性进行分析,建立了 GPS-InSAR 数据联合解算的基本平差模型,从而可以引进近代测量平差的一些理论和方法来进行优化求解。

由于 GPS 观测值的存在,理论上不需要同时具有升轨和降轨观测,但升、降轨的成像几何差异有助于改善三维形变速率的估计精度^[7]。然而 InSAR 因其固有的限制,数据处理过程中大气噪声、轨道误差、相位解缠参考点的选取等问题会导致 InSAR 形变监测结果与 GPS 观测值之间产生一个系统性偏移量;同时,不同轨道的 SAR 数据在相位解缠处理时,参考点选取的不一致会导致两者的起算基准不一致,因此升、降轨数据之间也存在一个系统性的偏差。GPS 与 InSAR 数据获取方式、处理流程都不同,如果按照系统误差的特点来确定系统误差参数是有困难的^[8]。考虑到 InSAR 形变监测误差源中大气噪声、数字高程模型(digital elevation model, DEM)误差等与地形的相关性较大,本文在现有 InSAR-GPS 数据联合解算模型的基础上,以高精度 GPS 观测数据为基准,对升、降轨 InSAR 数据分别加入一个跟点的位置有关的系统误差函数作为系统误差整体改

正项,建立了附加系统误差参数的升、降轨 InSAR-GPS 综合形变分析模型,以减弱或消除 GPS 与 InSAR 以及升、降轨 InSAR 数据之间系统误差的影响。通过模拟数据和西安地区的实测数据验证了该方法的可行性。

1 升降轨 InSAR-GPS 数据联合解算基本模型

根据 SAR 影像的成像几何原理可知,升、降轨 InSAR 干涉图的视线向(line of sight, LOS) 地表形变速率 L_{InSAR}^A 和 L_{InSAR}^D 与东(east, E)、北(north, N)、高(up, U)3 个正交方向的形变速率 $[v_E \ v_N \ v_U]^T$ 的关系为:

$$\begin{bmatrix} L_{\text{InSAR}}^A \\ L_{\text{InSAR}}^D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x^A & S_y^A & S_z^A \\ S_x^D & S_y^D & S_z^D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_E \\ v_N \\ v_U \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中, $[S_x^A \ S_y^A \ S_z^A]$ 和 $[S_x^D \ S_y^D \ S_z^D]$ 分别为升轨和降轨视线向的单位投影矢量。

当该观测点同时被 GPS 监测时,上述方程就可以扩展为:

$$\begin{bmatrix} L_{\text{GPS}}^E \\ L_{\text{GPS}}^N \\ L_{\text{GPS}}^U \\ L_{\text{InSAR}}^A \\ L_{\text{InSAR}}^D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ S_x^A & S_y^A & S_z^A \\ S_x^D & S_y^D & S_z^D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_E \\ v_N \\ v_U \end{bmatrix} \tag{2}$$

写成矩阵形式则有:

$$L = AX \tag{3}$$

式中, $[L_{\text{GPS}}^E \ L_{\text{GPS}}^N \ L_{\text{GPS}}^U]^T$ 为 GPS 在 E、N、U 方向的观测值; $X = [v_E \ v_N \ v_U]^T$ 为该点的三维形变速率; A 为系数矩阵。式(3)即为 InSAR-GPS 联合解算基本函数模型。

2 附加系统参数的升、降轨 InSAR-GPS 综合形变分析模型

InSAR 升、降轨成像的几何差异有助于提高地表三维形变监测的能力,考虑到大气噪声、DEM 误差等对 InSAR 监测结果影响较大,且这些误差与点的区域分布具有较强的相关性,因此在升、降轨 InSAR 观测方程中分别添加一个跟点的位置有关的函数对 InSAR 数据中残留的系统误差进行拟合,即:

$$\begin{bmatrix} L_{\text{InSAR}}^A \\ L_{\text{InSAR}}^D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x^A & S_y^A & S_z^A \\ S_x^D & S_y^D & S_z^D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_E \\ v_N \\ v_U \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中, $[S_1 \ S_2]^T$ 为待求的升、降轨 InSAR 的系统误差拟合参数; B 为该点系统误差参数的设计矩阵; BS_1 和 BS_2 为跟点的位置有关的函数,可采用多项式函数形式,即 $BS = \sum_{ij} a_{ij} x^i y^j$ 。鉴于二次曲面形式逼近不规则表面的有效性,一般可采用二次曲面函数^[9]。若测区范围较小或者 GPS 观测站点较少,考虑到参数过度化问题,可采用一次平面函数模型。

令 $S = [S_1 \ S_2]^T$, 则考虑系统误差影响的 InSAR-GPS 同测点观测方程可写为:

$$L_i = A_i X_i + \bar{B}_i S \tag{5}$$

其中, $\bar{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B \end{bmatrix}^T$ 为综合形变分析模型系统误差设计矩阵。

利用该区域的 N 个 InSAR-GPS 同测点建立观测方程为:

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & & & \\ & A_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & A_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{B}_1 \\ \bar{B}_2 \\ \vdots \\ \bar{B}_N \end{bmatrix} S \tag{6}$$

写成矩阵形式:

$$L = AX + BS \tag{7}$$

按照附加系统参数平差原理联合求解出系统误差拟合参数 \hat{S} 后,利用式(5)即可求解区域内任意一点的三维形变速率。

3 算例分析

3.1 模拟数据算例分析

基于 Matlab 软件在 100×100 的二维栅格点上模拟其形变速率:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x^0 \cdot x \\ V_y^0 \cdot y \\ [a + 2\pi b \cos(2\pi t)] \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{w}} \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中, V_x 、 V_y 为水平方向的形变速率; V_z 为垂直方向的形变速率; V_x^0 、 V_y^0 为水平方向的形变初始速率; a 、 b 为常数; w 是一个调整形变梯度和范围的尺度参数; t 为形变发生的时间间隔^[9]。这个模型具有一定的现实意义,水平方向形变量与时间及该点坐标呈正比关系,这类似于有一个恒定的应力拉伸速率;而垂直方向的形变速率则由两部分组成,包括线性变化(随时间的推移持续地抬

升或沉降)以及周期性运动(如地下水的季节性抽取等)。因为本文着重于年平均速率,因此取 $t =$

1,模拟的原始三维形变场如图 1 所示。

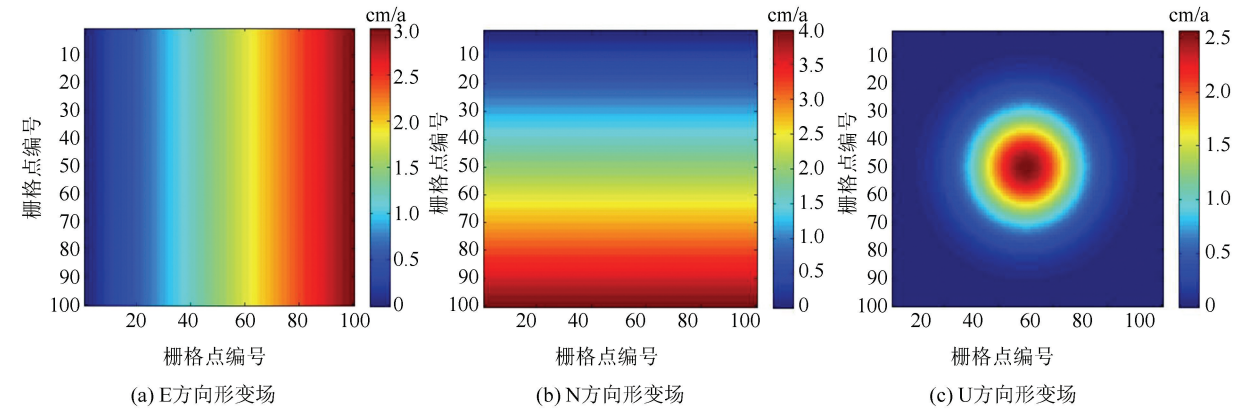


图 1 无噪声的三维形变场模拟

Fig.1 Simulation of Three-Dimensional Deformation Field Without Noise

模拟该地区 D-InSAR 升、降轨投影矢量 $\mathbf{S}^A = [0.340 \ -0.095 \ 0.935]$, $\mathbf{S}^D = [-0.340 \ 0.095 \ 0.935]$ 。由此根据 InSAR 成像的几何原理,即可得到升、降轨 D-InSAR 视线向的形变。为了更加贴合地表形变的实际情况以及反映实际应用中的观测数据情况,需要对上述模拟数据作加噪处理。经研究,对模拟的三维形变场的水平方向和垂直方向分别加入服从 $N(0,0.25^2)$ cm 和 $N(0,0.5^2)$ cm 的加性 Gauss 白噪声,并从中随机选出 100 个点,作为该区域的 GPS 观测数据。同时,对升、降轨 InSAR 数据加入服从 $N(0,0.25^2)$ cm 的 Gauss 白噪声^[10],并基于上述系统误差源分析对升、降轨 LOS 向形变数据分别加入 3 cm 和 2 cm 的系统误差。

设计如下 4 种计算方案:

1)方案 1。GPS 与升轨 InSAR 数据联合解算(GA);2)方案 2。GPS 与降轨 InSAR 数据联合解算(GD);3)方案 3。GPS 与升、降轨 InSAR 数据联合解算(COMBINE);4)方案 4。GPS 与附加系统误差参数的升、降轨 InSAR 数据联合解算(COMBINE+)。

计算时,在方案 4 中加入与点的位置相关的一次多项式函数拟合系统误差参数。

图 2、3 为各方案拟合残差。表 1 为不同计算方案 E、N、U 方向均方根误差(root mean square error, RMSE)。其中, RMSE 为由各方案计算所得三维形变场在 100×100 个格网点处的拟合值与其原始模拟值(即真值)的不符值 d 计算:

$$RMSE = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (d_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

式中, m 为检核格网点个数^[11]。

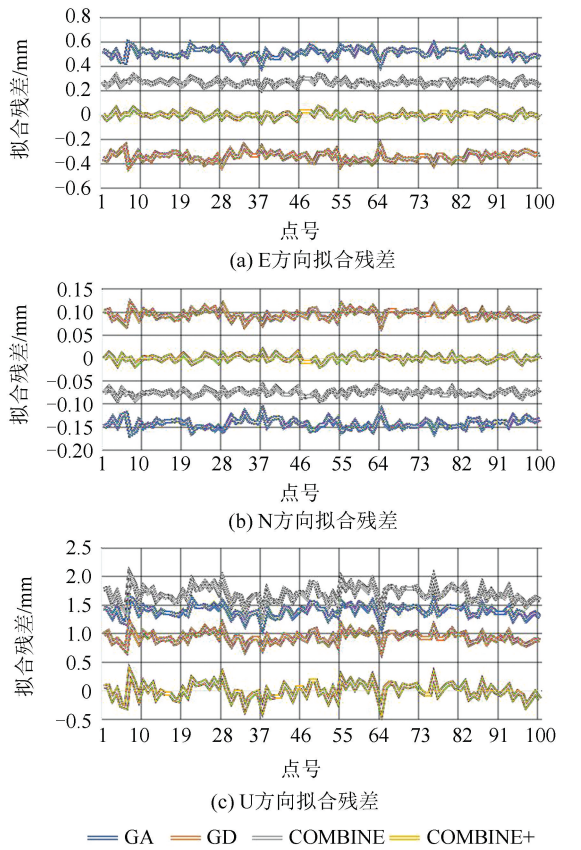


图 2 4 种计算方案在 100 个 GPS 点处 E、N、U 方向的拟合残差

Fig.2 Fitting Residuals of Three Deformation Directions in 100 GPS-Points by Different Schemes

表 1 不同计算方案 E、N、U 方向均方根误差(模拟数据)/cm

Tab.1 RMSE in E、N、U Directions by Differents Schemes (Simulated Data)/cm

RMSE	GA	GD	COMBINE	COMBINE+
E	0.462 5	0.408 6	0.267 4	0.203 8
N	0.228 2	0.189 5	0.177 5	0.173 8
U	1.487 3	1.013 7	1.747 3	0.360 7

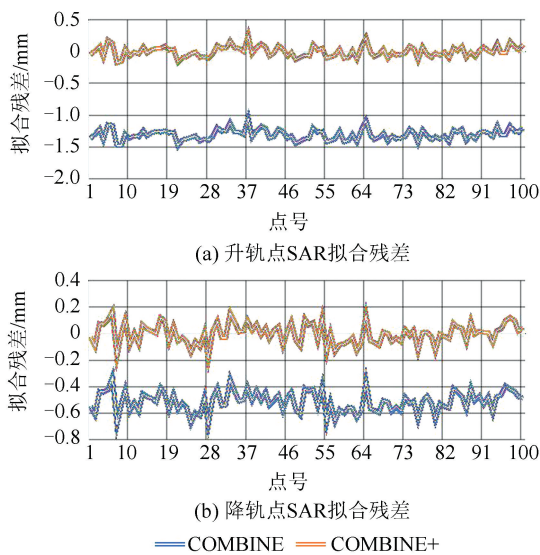


图 3 InSAR-LOS 向的拟合残差
Fig.3 Fitting Residuals of InSAR-LOS Direction

由计算结果可以看出：

1)图 2 中,GA 比 GD 在 E、N、U 3 个方向的拟合残差都要大,这是因为升、降轨数据分别加入 3 cm 和 2 cm 的系统误差,说明 InSAR 数据中所含系统误差会直接影响三维形变场的解算精度。COMBINE 方法在水平方向的拟合残差要比 GA/GD 效果都好,这说明升、降轨数据联合解算可以提高三维形变场解算的精度和可靠性。而 COMBINE 方法在垂直方向的精度反而比 GA/GD 方法的精度要差,经分析可能是升、降轨 InSAR 观测值同时加入了正性的系统误差,而且升、降轨 SAR 卫星在垂直方向的投影矢量大小均为 0.935,因此导致其垂直方向精度降低。

2)方案 4(COMBINE+)显示,由于通过系统误差拟合很好地削弱了 InSAR 数据中系统误差的影响,因此在 E、N、U 3 个方向的拟合残差都在 0 附近,精度在 4 种方案中效果最好。从图 3 也可以看出,COMBINE+方法的拟合残差更小,拟合效果最好。

3)外部精度检核显示(表 1),方案 3 在水平方向上的 RMSE 小于方案 1 和方案 2,但是在垂直方向上反而更大;而方案 4 在各方向上 RMSE 均为最小,与图 2 中反映的结果一致,其中垂直方向检核精度的提高尤为明显。同时,各方案中 N 方向的精度变化一直不是很明显,经分析可能是由于极轨轨道运行的 SAR 卫星对南北向的形变不是很敏感,本文模拟的 SAR 卫星在该方向的投影矢量大小仅为±0.095。

4)不管是拟合残差还是均方根误差,各方案

均表现出垂直方向最大,东西方向次之,南北方向最小,原因除了在 InSAR-LOS 向加入的系统误差影响外,还应该跟卫星的投影矢量有关,且投影矢量的绝对值大小与上述数值大小相对应。

5)计算过程中,通过计算系统误差拟合项 $BS_1=2.98\text{ cm}$ (升轨)、 $BS_2=1.97\text{ cm}$ (降轨),极为接近初始加入的 3 cm 和 2 cm 的系统误差,存在的误差可能是由于 InSAR 监测噪声导致的。

3.2 西安地区实测数据算例分析

利用 2010 年西安地区所获得的升、降轨 InSAR 和 GPS 数据来验证该方法的可行性和精度,其中 InSAR 数据为 ENVISAT 卫星获取的 10 景 C 波段的降轨 ASAR 数据,时间跨度 2009-12-18—2010-01-03 和 ALOS 卫星获取的 8 景 L 波段的升轨 PALSAR 数据,时间跨度 2009-12-23—2010-12-20,具体的卫星参数如表 2 所示^[12]。经商业软件 GAMMA 处理得到该地区 2010 年的年均 LOS 向形变,并根据卫星参数求得其在 E、N、U 3 个方向的投影矢量,ALOS 卫星大约为 $S^A=[-0.618\ 1\ -0.110\ 8\ 0.778\ 3]$,ENVISAT 卫星为 $S^D=[0.355\ 2\ -0.075\ 4\ 0.931\ 8]$ 。当升、降轨数据联合解算时, $S=[S^A\ S^D]$,矩阵 S 的条件数仅为 1.765,显示其有良好的适定性,说明升、降轨数据的配置能够很好地估计三维地表形变。

表 2 SAR 卫星传感器参数			
Tab.2 Parameters of SAR Satellite Multi-sensor			
SAR 卫星	方位角/(°)	入射角/(°)	轨道
ALOS	10.167 54	38.720 5	升轨
ENVISAT	168.022 30	22.818 2	降轨

同期的 GPS 数据采用的是该地区连续观测的 20 个 GPS 台站,项目组每半年观测一次,本文所用数据外业监测时间分别为 2009-12、2010-05、2010-12。采用 GAMIT 进行基线解算,平差后各 GPS 监测点的内符合精度在平面方向上优于 6.8 mm,在高程方向上优于 7.6 mm,经坐标转换得到其 E、N、U 方向的形变量。

为论证本文方法的有效性,在 20 组 GPS 观测数据中均匀选取 6 组作为水平方向外部检核点,其余 14 组观测数据通过 Kriging 插值进行区域网点加密,并对 InSAR 数据按照插值密度进行降采样处理,以达到相同的空间分辨率。

同时,研究区域内分布有 12 个同期的形变监测水准网点,形变观测数据外业监测时间分别为 2009-12、2010-07、2010-12,监测满足二等水准的精度要求。

InSAR-LOS 向数据、GPS 点、水准点分布如

图 4 所示,图 4(a)为 14 个用作 Kriging 插值的 GPS 点,底图为 ALOS 卫星获取的 LOS 向形变,图 4(b)为选取的 6 个作为水平方向外部检核的

GPS 点和 12 个二等水准点,底图为 ENVISAT 卫星获取的 LOS 向形变。
同样设计以下 4 种方案:

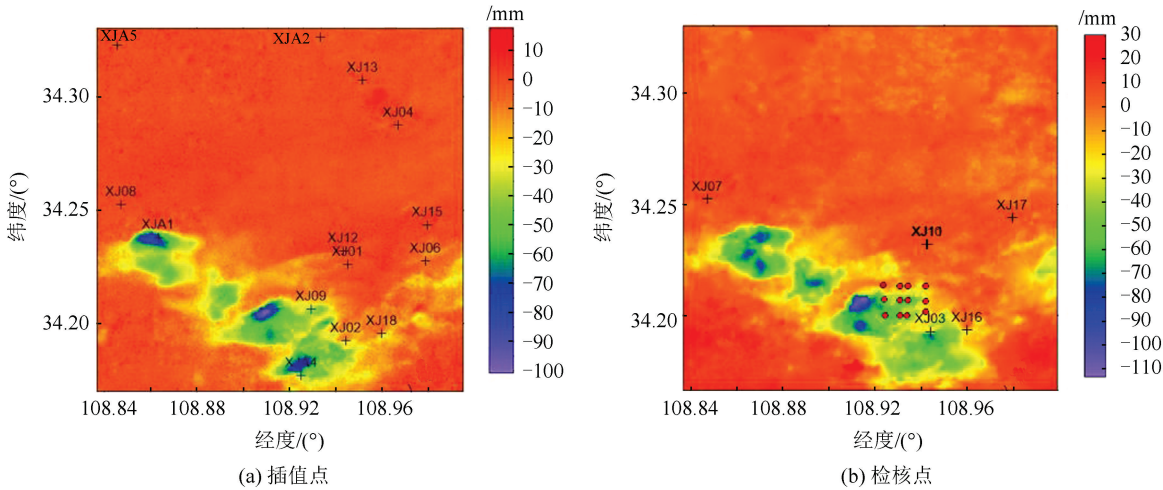


图 4 InSAR 原始数据及 GPS 点位分布
Fig.4 Original Data of InSAR and Spatial Distribution of GPS-Points

- 1) 方案 1。GPS 数据与升轨 ALOS 数据联合解算(ALOS)。
- 2) 方案 2。GPS 数据与降轨 ENVISAT 数据联合解算(ENVISAT)。
- 3) 方案 3。GPS 数据与升、降轨 ENVISAT-ALOS 数据联合解算(COMBINE)。
- 4) 方案 4。GPS 数据与附加系统误差参数的升、降轨 InSAR 数据联合解算(COMBINE+)。

采用上述 4 种方案就可以得到相应数据配置与算法下的三维形变场。其中,InSAR 形变观测量的标准差可通过一个 5×5 的移动窗口进行估计;GPS 观测的标准差由 GPS 测量标准差和 Kriging 插值标准差计算得到^[13-14]。综合考虑区域内实测 GPS 点的数量以及附加系统误差参数模型的合理性,在方案 4 中加入的系统误差拟合函数为跟点的位置相关的一次多项式。

同样,分别从内部可靠性检核(14 个实测 GPS 点处的拟合残差 V)和外部可靠性检核(检核点处的 RMSE)两个方面对比分析各方案解算地表三维形变场的有效性。其中,水平方向外部检核点为均匀选取的 6 组实测 GPS 观测点,垂直方向外部精度检核由该区域内 12 个同期的实测形变监测水准点进行。RMSE 的计算仍可通过式(9)计算,此时式中 d 为检核点上各方案拟合形变量与该点实测值之差。各方案拟合残差 V 分布如图 5 所示,检核点均方根误差列于表 3。

由计算结果可以看出:

1)图 5 中,COMBINE 方法所得结果在 3 个方向拟合残差整体趋势明显优于单一轨道数据结果;加入系统误差改正后(COMBINE+),整体拟合残差更小。

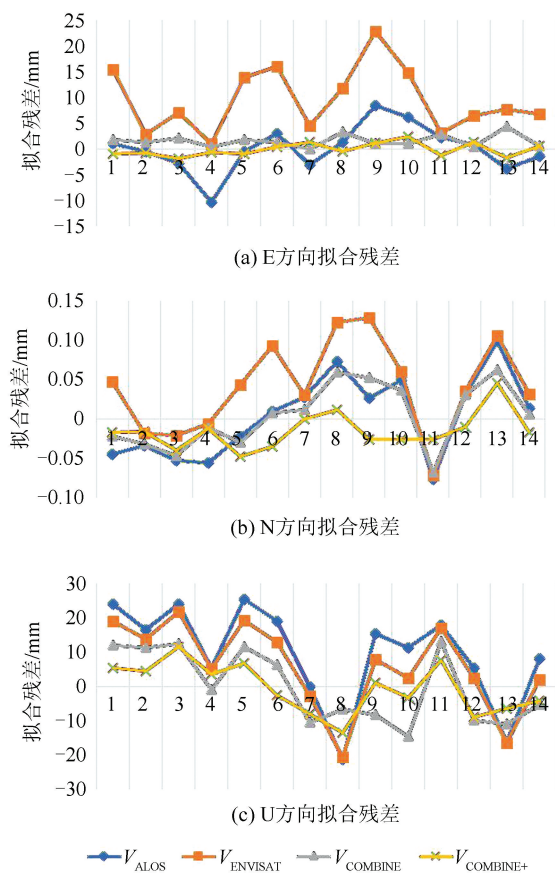


图 5 各方向拟合残差分析
Fig.5 Fitting Residuals of Three Deformation Directions

表 3 各方案 E、N、U 方向均方根误差比较/mm
Tab.3 Comparison of RMSE in E、N、U Directions
by Different Schemes/mm

RMSE	ALOS	ENVISAT	COMBINE	COMBINE+
E	17.739 8	14.995 8	13.154 8	11.168 8
N	19.226 3	19.570 3	19.216 7	18.741 3
U	9.705 3	8.412 8	7.655 6	4.729 1

2)如表 3 所示,COMBINE 方法外部检核点精度在 E、N、U 3 个方向都有提高。同时注意到南北方向的变化并不是很明显,可能原因是目前所有的 SAR 卫星都是以极轨方式运行,极轨轨道非常接近于南北方向,所以 LOS 向观测量几乎不能捕捉南北方向的形变信息,本文所用数据中 SAR 卫星在南北方向的投影矢量大小大约为-0.110 8和-0.075 4,因此精度提高有限。

3)COMBINE+方法相比于原来的结果在三维方向精度又有了一定提高,垂直方向更为显著,在原有的基础上又提高了 2.9 mm(表 3)。同时,以水准数据作为检核得到的 U 方向均方根误差的量值比 GPS 作约束得到的 U 方向的拟合残差的量值要小,这也体现了 InSAR 对高程形变的敏感程度最高。

同时,对系统误差参数的合理性进行统计假设检验,给定原假设与备择假设为:

$$H_0:E(\hat{\sigma}^2)=\sigma^2,H_1:E(\hat{\sigma}^2)\neq\sigma^2$$

由于 $\chi^2_{(r)}=\frac{r\hat{\sigma}^2}{\sigma^2}\sim\chi^2(r)$,给定显著性水平 $\alpha=0.05$,采用 χ^2 分布进行统计假设检验,计算可知: $2.180=\chi^2_{(1-\alpha/2)}\leq\chi^2_{(r)}=17.313\ 5\leq\chi^2_{(\alpha/2)}=17.535$,因此接受 H_0 ,表明引入的附加参数合理^[15]。

4 结 语

在融合 GPS、InSAR 两种对地观测技术监测地表三维形变时,升、降轨 SAR 数据的配置由于成像几何的差异,有助于提高地表形变监测的能力,能够取得更佳的融合效果;引入系统误差参数对不同基准的观测数据进行系统误差补偿后,能明显提高地表三维形变解算精度。采用附加系统误差参数的升、降轨 InSAR-GPS 综合形变分析模型解算西安地区三维形变场,有效地削弱了 InSAR 形变结果中残留系统误差的影响,得到了较高精度的三维形变场。研究表明,GPS、InSAR 两种方法的结合能突破单一技术在地表形变监测中的技术局限,采用合适的方法处理不同轨道的 InSAR 数据与 GPS 数据间的系统误差影响,能

更大限度地发挥二者的优势,获取研究区域高精度的三维形变场。

参 考 文 献

[1] Zhang Yongzhi. Dislocation Theory and Its Application in the Study of the Deformation of the Earth [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2011 (张永志. 位错理论及其在大地变形研究中的应用 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 2011)

[2] Gudmundsson S, Sigmundsson F. Three-Dimensional Surface Motion Maps Estimated from Combined Interferometric Synthetic Aperture Radar and GPS Data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B10):2 250-2 264

[3] Samsonov S V, Tiampo K F, Rundle J B, et al. Application of InSAR-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

[4] 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)

[5] He Xiufeng, Shi Guoqiang, Xiao Ruya. Integration of GPS and DInSAR for 3-D Deformation Monitoring Based on Ant Colony Optimization [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, 43(10):1 594-1 600(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): 1 594-1 600)

[6] Hu Jun. Theory and Method of Estimating Three-Dimensional Displacement with InSAR Based on the Modern Surveying Adjustment [D]. Changsha: Central South University, 2012(胡俊. 基于现代测量平差的 InSAR 三维形变估计理论与方法[D]. 长沙:中南大学, 2012)

[7] Hu J, Li Z W, Sun Q, 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

[8] Zhang Qin, Zhang Juqing, Yue Dongjie, et al. Advanced Theory and Application of Surveying Data [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2011 (张勤, 张菊清, 岳东杰, 等. 近代测量数据处理与应用[M]. 北京:测绘出版社, 2011)

[9] Samsonov S V, Tiampo K F, Rundle J B. Application of InSAR-GPS Optimization for Derivation of Three-Dimensional Surface Motion of the Southern California Region Along the San Andreas Fault [J]. *Computers & Geosciences*, 2008, 34(5):503-514

[10] 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

[11] Catalao J, Nico G, Hanssen R, et al. Merging GPS and Atmospherically Corrected InSAR Data to Map 3-D Terrain Displacement Velocity [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(6): 2 354-2 360

[12] Zhang Qin, Zhao Chaoying, Ding Xiaoli, et al. Research on Recent Characteristics of Spatio-Temporal Evolution and Mechanism of Xi'an Land Subsidence and Ground Fissure by Using GPS and InSAR Techniques [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(5):1 214-1 222(张勤, 赵超英, 丁晓利, 等. 利用 GPS 与 InSAR 研究西安现今地面沉降与地裂缝时空演化特征[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1 214-1 222)

[13] Lee C W, Lu Z, Jung H S. Simulation of Time-Series Surface Deformation to Validate a Multi-interferogram InSAR Processing Technique [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(22): 7 075-7 087

[14] Luo Haibin, He Xiufeng, Liu Yanxiong. Estimation of Three-Dimensional Surface Motion Velocities Using Integration of D-InSAR and GPS [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(2): 960-963(罗海滨, 何秀凤, 刘焱雄. 利用 DInSAR 和 GPS 综合方法估计地表 3 维形变速率[J]. *测绘学报*, 2008, 37(2): 960-963)

[15] Huang Weibin. Modern Adjustment Theory and Its Application [M]. Beijing: Chinese People's Liberation Army Publishing House, 1992(黄维彬. 近代平差理论及其应用[M]. 北京:解放军出版社, 1992)

Ascending and Descending Orbits InSAR-GPS Data Fusion Method with Additional Systematic Parameters for Three-Dimensional Deformation Field

CAO Haikun¹ ZHAO Lihua¹ ZHANG Qin¹ QU Wei¹ NIE Jianliang²

¹ School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

² Geodetic Data Processing Center, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Xi'an 710054, China

Abstract: According to the fact that InSAR has the advantages of the high spatial resolution while GPS has the advantages of the high precision and high time resolution, we discuss the method of obtaining high precision three-dimensional deformation field by integrating both ascending and descending orbits InSAR data and GPS data. To weaken the influence of the remaining systematic errors in InSAR data, an integrated deformation analysis model with additional systematic parameters is established, where systematic error functions related to the position of observed points are added in both ascending and descending orbits InSAR observation equations under the constraint of high accurate GPS observations. The simulated and practical examples show that the proposed method can identify systematic error in InSAR data effectively and the calculation is simple. As a result, the three-dimensional deformation field with a higher accuracy will be established by the method proposed in this paper.

Key words: GPS; ascending and descending orbits InSAR; systematic parameters; three-dimensional deformation field

First author: CAO Haikun, postgraduate, specializes in GPS-InSAR data processing. E-mail: 872720268@qq.com

Corresponding author: ZHAO Lihua, associate professor, PhD. E-mail: zhaoli@chd.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41604001, 41674001, 41574003, 41504005; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, Nos. 310826171005, 310826161023, 310826151050; the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China, No. 2016JMJM4005.