

# 联合 GPS、InSAR 建立同震地表三维位移场<sup>\* 1</sup>

徐克科<sup>1,2)</sup> 牛元甫<sup>3)</sup> 伍吉仓<sup>2)</sup>

(1)河南理工大学测绘与国土信息工程学院,焦作 454000  
(2)同济大学测绘与地理信息学院,上海 200092  
(3)河南工业和信息化职业学院,焦作 454000

**摘 要** 通过 GPS 观测位移与 InSAR-LOS 形变的投影转换模型将 GPS 点位移归算到 LOS 方向。利用 GPS 点归算的 LOS 向位移,在构建 Delaunay 三角网基础上,进行三次内插,对 InSAR-LOS 形变误差进行纠正。基于非均匀滑动分布的位错模型,利用 GPS 观测数据反演断层参数。根据同震引起的地表位移在一定范围内方向具有一致性的特点,由断层参数正演同震位移场方向,将其作为已知方向,对 InSAR-LOS 位移实现了三维转换。结果表明,用此方法建立的同震地表三维形变场与地表实际破坏情况整体上吻合较好。

**关键词** GPS; InSAR 视线向; 同震; 三维形变; 位错模型

**中图分类号**: P315.72<sup>+5</sup>

**文献标识码**: A

## ESTABLISHMENT OF 3-D COSEISMIC TERRAIN DISPLACEMENT FIELD WITH GPS AND InSAR

Xu Keke<sup>1,2)</sup>, Niu Yuanfu<sup>3)</sup> and Wu Jicang<sup>2)</sup>

(1) School of Surveying and Land Information Engineering of Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000  
(2) College of Surveying and Geo-Information of Tongji University, Shanghai 200092  
(3) Henan Collgeg of Industry and Information Technology, Jiaozuo 454000

**Abstract** The geometric transformation model between the INSAR-LOS deformation and GPS displacement is established. The model is employed to convert GPS displacement into the deformation in LOS direction. Based on Delaunay triangulations and cubic interpolation, the errors existed in InSAR-LOS deformation are rectified. According to variable fault slip model, the fault parameters are acquired by accurate GPS observations. According to the characteristic that the displacement direction derived from coseism is accordant in certain range, the displacement direction derived from forward modeling was applied to realize the transformation from InSAR-LOS to three-dimensional deformation. The result shows that the displacement field is consistent with actual damage of surface ruptures.

**Key words**: GPS; InSAR-LOS; coseism; three-dimensional deformation; fault slip model

## 1 引言

利用 GPS 观测数据可以得到高精度的 E、N、U 方向位移,但是 GPS 测量空间分辨率低,难以获得

空间连续形变场。而 InSAR 观测具有空间分辨率高,覆盖范围广,空间无接触遥感等技术特点,尤其对于大尺度的地表形变能够获得空间连续的地表形变场,正好可以弥补 GPS 之不足。但 InSAR 探测得

\* 收稿日期:2013-06-30

基金项目:中美国际合作项目(2010DFB20190);国家自然科学基金(41074019);河南省教育厅自然科学基金(12A420001);河南理工大学青年基金(Q2012-32A)

作者简介:徐克科,男,1979年生,博士,主要研究方向为地壳形变监测与反演. E-mail:12xkk@tongji.edu.cn

到的是雷达视线向 LOS 的位移,是地表三个方向形变量叠加的结果,是一维形变。因此需要将 LOS 向位移转换到真实的地表三维方向。目前,转换算法可归结为四类:一是利用不同的卫星,如 Envisat、ALOS、Radarsat 等观测数据联合求解来确定,但对同一个区域往往只有一种卫星的观测数据;二是在同一个时间段内,从三个以上不同雷达视线方向如升轨、降轨、左视、右视方向获得同一个监测地区的干涉图,通过轨道参数算得三维形变量;三是方位向偏移量法<sup>[1-4]</sup>。通过计算形变前和形变后干涉图的幅度信息在方位向上变化,获得不同于雷达视线方向上的形变量,这样通过一个干涉数据对可到了 2 个不同方向上的地表形变信息,用 2 个干涉数据对便可得到 3D 形变场,但转换精度较低;四是借助 GPS 点通过拟合内插的方法将观测区域所有点的 InSAR-LOS 方向恢复到三维位移<sup>[5]</sup>,但 GPS 测站常常受野外地形条件,设备安装等因素限制,分布稀疏,内插结果与真实情况的很大差异。基于此,本文开展了两方面工作,一是对 InSAR-LOS 位移误差进行纠正。将 GPS 点位移归算到 InSAR-LOS 方向,在构建 Delaunay 三角网基础上进行三次方程内插,对 InSAR-LOS 方向形变误差进行了纠正。二是对 InSAR-LOS 方向进行三维 E、N、U 方向转换。基于非均匀分布的位错模型,利用 GPS 观测数据反演断层参数,再正演地表位移场。考虑到地震引起的地表位移在局部区域方向上具有一致性的特点,利用正演后得到的地表位移方向将 InSAR-LOS 视线向位移恢复到 E、N、U 方向。

## 2 InSAR-LOS 与 GPS-E、N、U 转换投影模型

设雷达飞行坐标方位角为  $\alpha$ , 雷达侧视角为  $\theta$  (图 1), 地面任一点三维形变在 E、N、U 方向分量大小分别是  $D_E$ 、 $D_N$ 、 $D_U$ , 该点的 InSAR-LOS 方向形变量大小为  $D_{LOS}$ 。

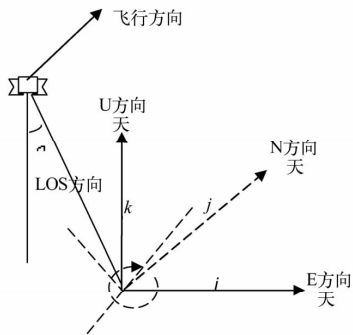


图 1 InSAR-LOS 与 E、N、U 方向形变转换三维示意图

Fig. 1 The transformation relationship between InSAR-LOS and E, N, U

根据图 1, LOS 方向单位矢量为

$$\mathbf{L} = -\sin\theta\cos\alpha\mathbf{i} + \sin\theta\sin\alpha\mathbf{j} + \cos\theta\mathbf{k} \quad (1)$$

因为雷达视线 LOS 方向形变是由 E、N、U 三个方向形变的投影叠加而成, 所以得出 InSAR-LOS 形变大小与 E、N、U 方向形变大小之间的转换关系为

$$D_{LOS} = [-\sin\theta\cos\alpha \quad \sin\theta\sin\alpha \quad \cos\theta] [D_E \quad D_N \quad D_U]^T \quad (2)$$

## 3 利用 GPS 数据纠正 InSAR-LOS 误差

由于 InSAR 在干涉过程中受轨道误差、大气效应、相位解缠、失相干的影响, 用 GPS 高精度测量结果纠正 InSAR-LOS 形变值的误差。其步骤如下:

1) 根据式(2)将所有 GPS 点的 E、N、U 方向的形变量归算到 LOS 方向;

2) 由 InSAR 生成 LOS 形变图, 根据 GPS 点的分布, 内插得到 GPS 点的 InSAR-LOS 方向形变值;

3) 由 GPS 点三维方向解算得到的 LOS 形变和由 InSAR 形变图内插得到的 LOS 形变量求差。根据 GPS 点分布, 构建 Delaunay 三角网, 以三角形为基础, 找出内插点四周的 3 个点, 然后按

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j \quad (3)$$

进行三次内插, 计算出 InSAR 形变图上所有点的 InSAR-LOS 方向的改正值, 从而得到纠正后的 InSAR-LOS 形变值  $D_{LOS}'$ 。

## 4 InSAR-LOS 位移的三维转换

因为同震引起的地表位移, 在一定范围内, 方向具有一致性。因此采用 GPS 反演断层参数后正演的位移场方向作为已知方向, 进而把 InSAR-LOS 位移转换到 E、N、U 方向。首先, 以反演的位移场为基础, 按三次内插生成所有 InSAR 点的三维位移值设为  $d_e, d_n, d_u$ 。位移矢量设为  $\mathbf{G}$ , 则

$$\mathbf{G} = d_e\mathbf{i} + d_n\mathbf{j} + d_u\mathbf{k} \quad (4)$$

由式(1)得到 InSAR-LOS 方向的单位矢量为  $\mathbf{L}$ , 设  $\beta$  为  $\mathbf{L}$  与  $\mathbf{G}$  的夹角, 则

$$\cos\beta = (\mathbf{L} \cdot \mathbf{G}) / (|\mathbf{L}| |\mathbf{G}|) \quad (5)$$

将式(1)、(4)代入式(5)得

$$\cos\beta = (-\sin\theta\cos\alpha d_e + \sin\theta\sin\alpha d_n + \cos\theta d_u) / \sqrt{d_n^2 + d_e^2 + d_u^2} \quad (6)$$

因 InSAR-LOS 形变量是三维位移方向投影的叠加, 因此由

$$D_S = D_{LOS} / \cos\beta \quad (7)$$

得到点的三维位移值  $D_S$ , 进而根据

$$D_E = D_S d_e / \sqrt{d_n^2 + d_e^2 + d_u^2} \quad (8)$$

$$D_N = D_S d_n / \sqrt{d_n^2 + d_e^2 + d_u^2} \quad (9)$$

$$D_U = D_S d_u / \sqrt{d_n^2 + d_e^2 + d_u^2} \quad (10)$$

将  $DS$  分解到三维方向。

## 5 算例分析

利用日本 ALOS 卫星获取的地震前后的 6 个轨道的 PALSAR 影像,通过差分干涉计算得到汶川地震产生的地表沿 LOS 方向 300 米分辨率的形变量(图 2)。形变图范围为北纬  $30.28^{\circ} \sim -33.11^{\circ}$ ,东经  $102.55^{\circ} \sim 106.24^{\circ}$ ,以  $104^{\circ}$  为中央子午线进行高斯投影,得到平面坐标范围为  $X: 3\,353.599 \sim 3\,666.000\text{ km}$ ,  $Y: 364.200 \sim 715.541\text{ km}$ 。通过处理地震前后 178 站的 GPS 观测数据,得到所有站的位移大小和方向。GPS 站分布见图 2,圆圈代表 GPS 点的位置,箭头线代表 GPS 观测的水平形变大小与方向。

首先对 InSAR-LOS 方向位移值的大小进行纠正,消除差分干涉所产生的误差。InSAR-LOS 向纠正前后位移与 GPS 解算的 LOS 向位移的差值见图 3。由图 3,改正后残差明显降低,中误差为 6.837 cm。

基于位错模型由 GPS 观测位移值反演断层参数并正演位移场方向,对 LOS 位移值进行三维转换。为更加真实地反映地震造成的断层面的非均匀滑动分布,根据地质资料,将断层划分为走向 5 km,倾向 5 km,共 216 个子块<sup>[6,7]</sup>,由 GPS 数据反演残差情况见图 4。

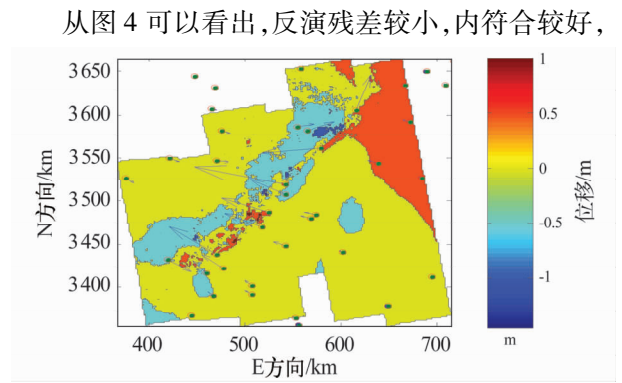


图 2 InSAR-LOS 方向位移场

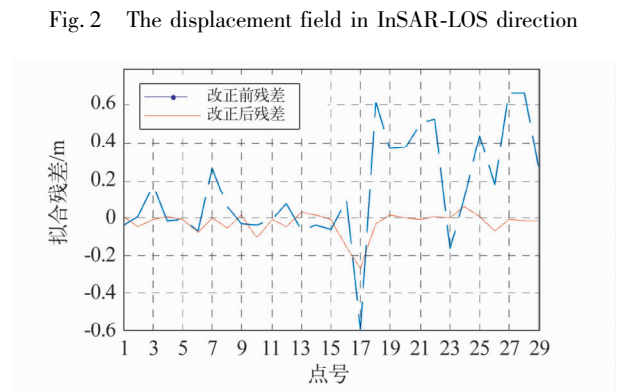


图 3 改正前后残差对比

Fig. 3 Contrast between before and after rectification

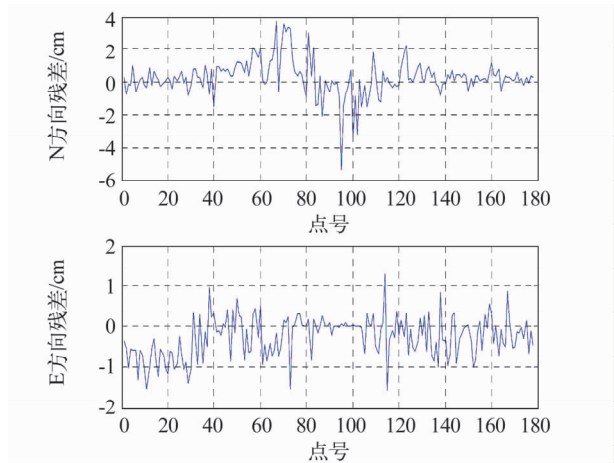


图 4 GPS 反演残差图

Fig. 4 Residuals inverted by GPS

反演断层参数结果与实际情况相符。利用反演的断层参数正演得到地表位移场每点的三维位移方向。根据此方向,将 InSAR-LOS 向形变转换为 E、N、U 方向形变见图 5,其中三个红点由左到右分别代表汶川,北川和青川,斜线代表地震断层迹线。

从图 5 可以看出,距离断层较远区域形变较小,而在主震区,如汶川、北川、青川有明显位移,尤其北川遭受破坏程度更加严重,这与实际情况相符。水平位移,上盘主要向 EN 向移动,下盘主要 WS 向移动,最大位移超过 2 m,说明本次地震以右旋运动为主,这与其他学者的研究结果相符<sup>[7-9]</sup>。U 方向形变量,上下盘汶川、北川、青川三地地表明显有抬升,最大抬升量超过 1.5 m,周围部分地区有下沉,下沉量约为 0.5 m。

为了验证 InSAR-LOS 位移三维转换精度,选定范围内 30 站将其 GPS 观测值与 InSAR-LOS 转换得到的三维位移值进行比较。水平位移拟合情况见图 6,垂向位移拟合情况见图 7,三维拟合残差见图 8。

由图 6~8,北向位移拟合中误差为 4.62 cm,东向位移拟合中误差为 6.05 cm,垂向位移拟合中误差为 6.88 cm。两者整体符合较好,但在部分点相差甚大。分析原因有:一是由于地震使地表产生了很大的破坏,在 InSAR 观测前后存在严重失相干导致相位解缠错误;二是解算的 InSAR 形变图分辨率为 300 m,其内插点并不一定和 GPS 点重合;三是 InSAR 监测精度为 cm 级,而 GPS 是 mm 级,本身就存在差别。

## 6 结论

InSAR 差分干涉所得到的 LOS 值不能反映地表真实的形变,需要将其转换到地表三维空间。在建立同震地表位移场时,首先利用 GPS 数据纠正 InSAR-LOS 形变的误差,然后根据同震引起的地表

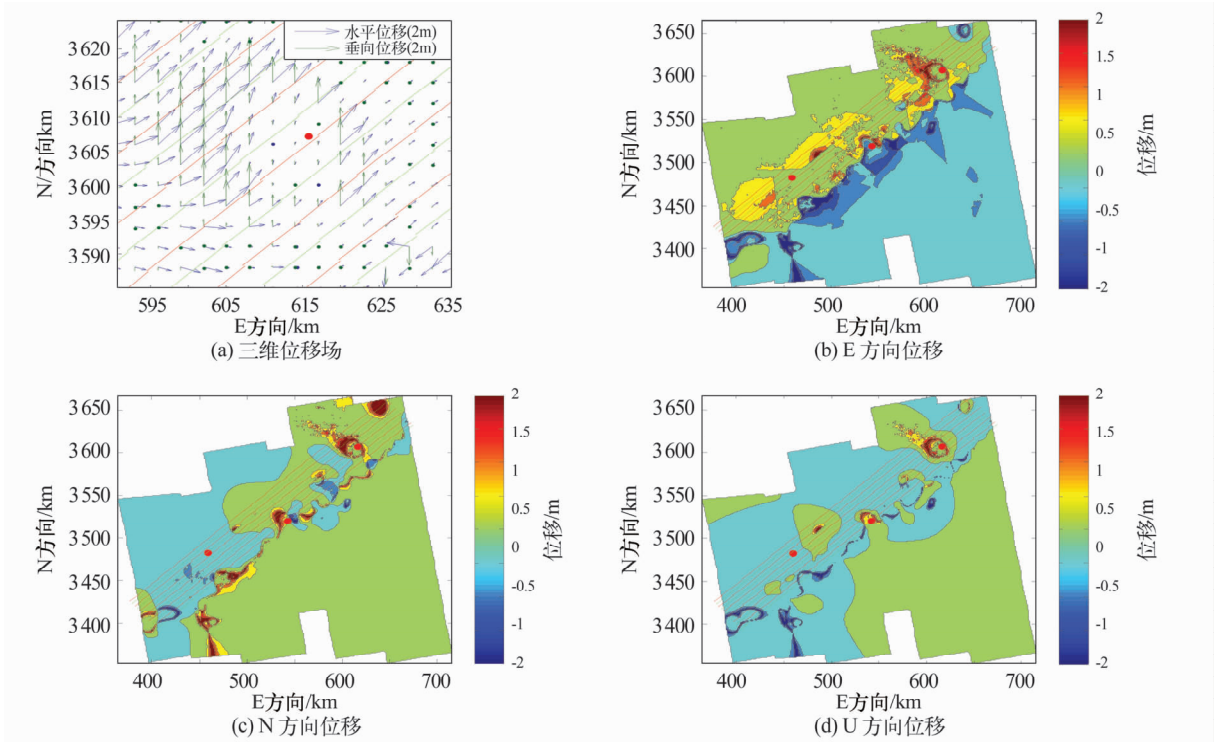


图 5 InSAR-LOS 转换的三维位移图

Fig. 5 Three-dimensions displacement from InSAR-LOS

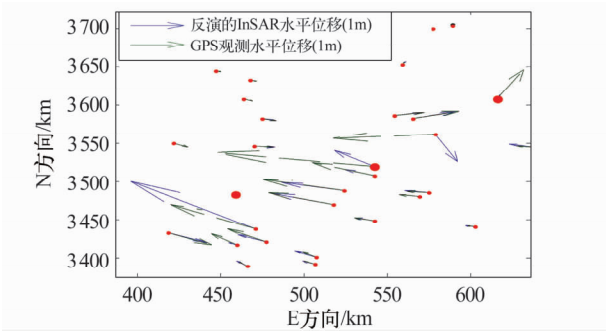


图 6 水平位移拟合图

Fig. 6 Comparison between two kinds of horizontal displacements

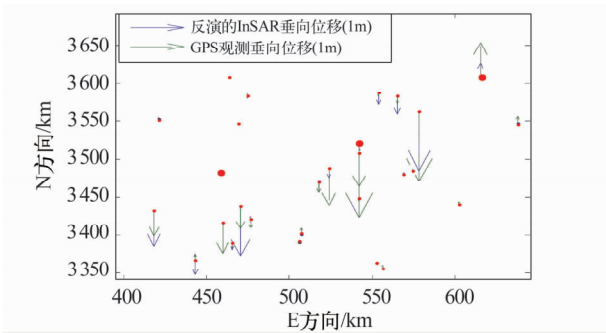


图 7 垂向位移拟合图

Fig. 7 Comparison between two kinds of vertical displacement

位移在一定范围内方向具有一致性的特点,利用 GPS 数据准确反演断层参数,通过得到的断层参数

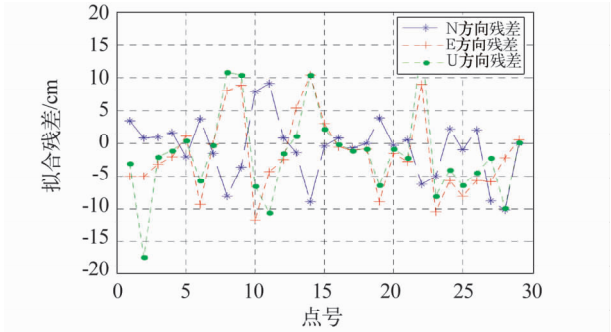


图 8 拟合残差图

Fig. 8 Fitted residuals

正演同震位移场,将其方向作为已知方向,对 InSAR-LOS 向位移值进行三维转换,从而建立地表三维形变场。这充分利用了高精度的 GPS 位移观测和高密度的 InSAR 雷达视线位移测量,实现了同震三维形变位移场的精确建立。

参 考 文 献

1 Gudmundsson S,Sigmundsson F and 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):2250.

2 Wright T J,Parsons B E and Lu Z. Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR[J]. Geophysical Research Letters, 2004,31(1): L01607.