

# 基于 SAR 影像构建三维同震形变场方法研究<sup>\* 1</sup>

刘 斌<sup>1,2,3)</sup> 张景发<sup>2)</sup> 罗 毅<sup>2)</sup> 姜文亮<sup>2)</sup> 李永生<sup>1)</sup>

(1) 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080  
(2) 中国地震局地壳应力研究所(地壳动力学重点实验室), 北京 100085  
(3) 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083

**摘 要** 以 2008 年改则地震为例, 利用 InSAR 和 MAI 技术分别获取雷达视线向和方位向的形变量, 并采用 InSAR + AZI(模型 1)与 Multi-LOS(模型 2)两种模型解算改则地震三维同震形变场。结果发现, 在东西、垂向上两种模型解算结果较为一致; 南北方向模型 1 的结果基本符合实际, 模型 2 的结果严重失真。

**关键词** MAI; InSAR; 三维同震形变场; Offset-tracking; 改则 Ms6.9 地震

**中图分类号:** P315.72<sup>+5</sup> **文献标识码:** A

## STUDY ON RECONSTRUCTING 3D COSEISMIC DEFORMATION FIELD BASED ON SAR IMAGES

Liu Bin<sup>1,2,3)</sup>, Zhang Jingfa<sup>2)</sup>, Luo Yi<sup>2)</sup>, Jiang Wenliang<sup>2)</sup> and Li Yongsheng<sup>1)</sup>

(1) *Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080*  
(2) *The Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085*  
(3) *China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083*

**Abstract** Taking the 2008 Gaize earthquake as an example, we use InSAR and MAI techniques to measure line of sight (LOS) and azimuth (AZI) deformations, respectively. InSAR + AZI(model 1) and Multi-LOS(model 2) models are applied to reconstruct 3D coseismic deformation fields. Compared with simulations, we discover that the deformations in east-west, vertical directions of the two models are consistent with each other; however, in north-south direction, the results of model 1 are tally with the actual situation, while massive distortions occur in that of model 2.

**Key words:** Multiple-aperture SAR Interferometry (MAI); InSAR; 3D coseismic deformation field; Offset-Tracking; Gaize Ms6.9 earthquake

## 1 引言

目前, 利用 SAR 影像解算三维形变场的算法大致分为三类: 1) 升、降轨 InSAR + AZI(方位向形变); 2) 升、降轨 Multi-LOS(多种视线向 InSAR); 3) InSAR + 外部数据或地壳形变模型。在第一类方法

中, 方位向形变难于精确测量, 目前一般采用 Offset-Tracking 法测量, 但是这种方法的精度有限。第二类方法中的观测数据精度虽然较高, 但由于现今运行的雷达卫星大多是采用近极太阳同步轨道、近东西向右视扫描, 即使选用最大的人射角间隔, 解算的南北向精度也很低<sup>[1]</sup>。第三类方法中, 所采用的外

\* 收稿日期: 2012-12-23

基金项目: 中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研专项(ZDJ2013-22, ZDJ2011-17); 国家自然科学基金(41204004, 40774023); 科技部与欧空局合作项目(“龙计划 III”)

作者简介: 刘斌, 男, 1982 年生, 博士, 主要从事 InSAR 地震形变观测及地震三维形变场重建研究. E-mail: lbin0226@163.com

部数据一般为 GPS 观测数据,但昂贵的安置费用限制了 GPS 的空间分辨率;此外合适的地壳形变模型的选取对于精确解算三维形变场至关重要,如 Okada 弹性形变模型比较适合发生地震、产生断层的地区,而 Mogi 形变模型更适合分析火山区的变形情况<sup>[2]</sup>。

基于 SAR 影像的精确配准,Offset-tracking 方法可以获取卫星飞行方向上(即方位向)的形变量,但其观测精度和空间分辨率都相对较低。针对上述缺点,Bechor 等人<sup>[3]</sup>提出一种多孔径雷达干涉测量技术(MAI, Multiple-Aperture SAR Interferometry)来监测卫星飞行方向形变。本文在通过 MAI 技术获取 2008 年改则地震方位向形变量的基础上,利用第一、二类方法分别解算了改则地震三维同震形变场,并以此次地震为例,评价了两类解算方法的精度。

## 2 数据处理

### 2.1 数据选取

2008 年 1 月 9 日西藏改则发生  $M_s6.9$  地震,1 月 16 日和 23 日又相继发生了  $M_s 6.0$  和  $M_s 5.4$  两次强余震,震中位置与主震几乎相同。为使干涉像对记录的是相同的形变过程,选取的震后影像其成像时间尽可能相近,同时兼顾基线长度尽可能短(表 1)。

表 1 改则地震 ENVISAT ASAR 数据

Tab.1 ENVISAT ASAR data of Gaize earthquake					
轨道	日期 (年-月-日)	震中入 射角(°)	轨道方 位角(°)	垂直基 线(m)	模式
348	2007-11-23/2008-02-01	22.48	193.20	8	IM D IS2
341	2007-08-09/2008-01-31	25.92	346.88	-74	IM A IS2
427	2007-03-28/2008-02-06	41.68	346.87	-83	IM A IS6

### 2.2 MAI 监测方位向形变<sup>[3,4]</sup>

利用两幅单视复数影像分裂生成前视、后视两对主辅影像,将前视和后视主辅影像分别进行干涉处理得到前视和后视干涉纹图;然后将前、后视干涉图共轭相乘产生一幅多孔径差分干涉图。

### 2.3 InSAR 和 MAI 数据处理

InSAR 和 MAI 数据处理分别采用 JPL ROI\_PAC<sup>[5]</sup> 和 MAI<sup>[6]</sup> 处理程序,ENVISAT 轨道信息采用 DORIS 精密轨道数据。分别以地震前后影像为主辅影像,精确配准主辅影像并对震后影像重采样,然后进行干涉处理。形变相位提取采用二轨差分法,利用 SRTM DEM<sup>[7]</sup> 消除地形相位影响,并对最终结果地理编码。地形相位从干涉相位中去除后,生成差分干涉图(图 1(b)、(c)和(d),图中黑色实线为此次地震的发震断层)。然后采用改进的 Goldstein 滤波方法对差分干涉图进行去噪处理,并利用 SNA-

PHU 程序完成相位解缠。MAI 方法实际上是 InSAR 技术的延伸,但 MAI 无需地形相位消除和相位解缠,因此主辅影像精确配准后的干涉处理会同时生成 InSAR 和 MAI 干涉相位图(图 1(a),沿卫星飞行方向地壳运动为正值)。

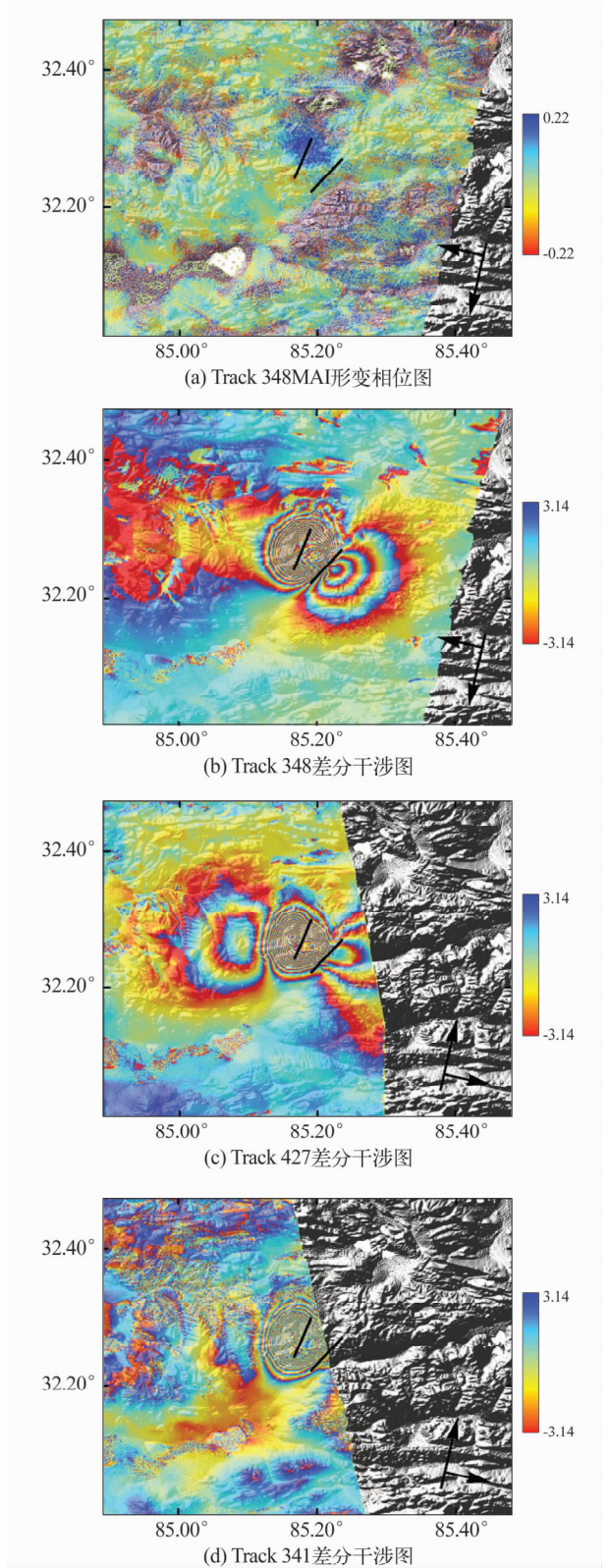


图 1 InSAR 和 MAI 干涉相位图(单位:rad)  
Fig. 1 InSAR and MAI interferograms (unit:rad)

### 3 三维同震形变场重建解算方法

目前利用 SAR 影像提取地震三维形变分量与视线向形变的转换关系为<sup>[8]</sup>:

$$[U_n \sin \alpha - U_e \cos \alpha] \sin \theta + U_u \cos \theta + \delta_{\text{LOS}} = d_{\text{LOS}} \quad (1)$$

$$U_n \cos \alpha + U_e \sin \alpha + \delta_{\text{AZI}} = d_{\text{AZI}} \quad (2)$$

式中,  $u_n$ 、 $u_e$  和  $u_u$  分别表示南北、东西和垂直向的形变量,  $\alpha$  为卫星轨道方位角 (自北顺时针为正),  $\theta$  为雷达入射角,  $\delta$  为测量误差,  $d$  为观测值。

据式(1)和(2)可构造:

$$\mathbf{V}_{n \times 1} = \mathbf{S}_{n \times 3} \mathbf{U}_{3 \times 1} - \mathbf{D}_{n \times 1} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{D}_{n \times 1}$  为有  $n$  组观测值的观测矩阵,  $\mathbf{S}_{n \times 3}$  为投影矩阵,  $\mathbf{V}_{n \times 1}$  为相应的观测误差。根据最小二乘  $\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} = \min$  原理, 得三维同震形变场为:

$$\mathbf{U} = (\mathbf{S}^T \mathbf{P} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{P} \mathbf{D} \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{P}$  为观测值权阵。

### 4 不同解算模型所得三维同震形变场结果的比较

#### 4.1 两种模型解算得到的改则地震三维同震形变场

利用 SAR 影像提取地震三维形变场的第一、三类方法需要水平向和视线向两类观测值, 两者构建的误差方程组类似, 因此本文只讨论 InSAR + AZI

结合法和 Multi-LOS 联合解算法这两种方法在解算三维同震形变场中的应用。

模型 1: InSAR + AZI 结合解算法是利用一个干涉像对同时获得雷达视线向和方位向的形变量, 假设存在升、降轨 SAR 影像对, 就可根据公式(1)和(2)构造相应的误差方程组, 利用最小二乘法求解三维形变量。

模型 2: Multi-LOS 联合解算法是对同一形变过程, 利用不同雷达视线向上获得的差分干涉图, 结合 SAR 卫星的成像几何关系, 解算出该形变的三维形变量。

由于升、降轨 SAR 影像的 InSAR 和 MAI 处理在地理编码时均重采样为 DEM 分辨率, 因此同名点像元具有一一对应关系。鉴于改则地震形变波及的范围有限, 像元之间的雷达入射角差别较小, 其引起的误差在亚毫米级, 不会影响三维形变的解算精度。为简化计算量, 选取各图像震中像元的入射角作为解算入射角, 而同一图像中的卫星轨道方位角相同 (表 1)。根据模型 1、2 构造误差方程组, 考虑到解算方程组中的观测值组数和未知参数个数皆为 3 个, 由此把式(4)简化为:

$$\mathbf{U} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{D} \quad (5)$$

根据式(5), 两种模型解算的改则地震三维同震形变场如图 2 所示。

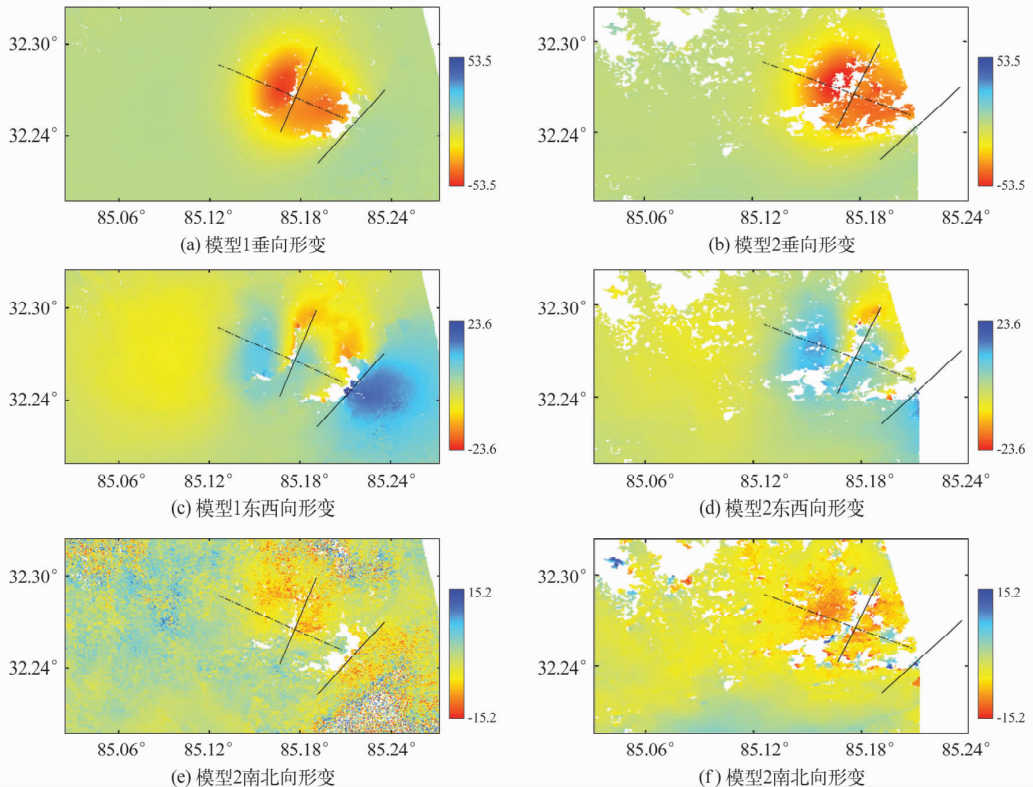


图 2 两种模型解算的改则地震的三维形变场 (单位: cm)

Fig. 2 3D deformation fields of Gaize earthquake with two models (unit: cm)



4.2 两种模型解算结果精度评价

根据冯万鹏<sup>[9]</sup>反演得到的改则地震发震断层几何参数,利用 Okada 模型<sup>[10]</sup>模拟改则地震同震三维形变场,如图 3 所示(文中所有结果分别以东、北和垂直向上为正)。模拟的形变场表明改则地震在南北向上的最大形变量约为 ±13.6 cm,垂向的最大沉降量为 46.3 cm。由于改则地震发生在具有左旋走滑的 NEE 向依布茶卡-日干配错断裂西段的北侧,是一次典型的正断层破裂过程,因此三分量的最大形变量级比较符合实际。

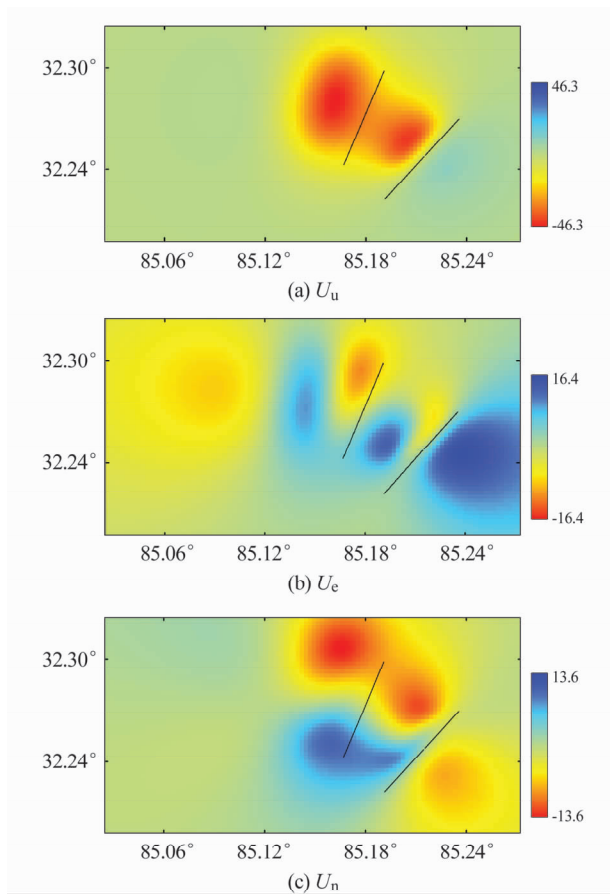


图 3 改则地震模拟三维形变图(单位:cm)

Fig. 3 Simulated 3D deformation of Gaize earthquake(unit: cm)

为评价两种模型的解算精度,我们采用:1)以模拟地震形变场作为参考,评价两种模型解算结果在各方向上的形变趋势和最大形变量级与实际的符合程度;2)分别计算模型 1、2 解算结果与模拟值的差值标准差  $\sigma$  (差值标准差的计算范围定为两种模型解算结果的公共区域),评价两种模型解算结果精度差异,其中均方根误差计算公式为:

$$\sigma = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / n}, \bar{x} = \sum x_i / n, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中,  $x_i$  表示影像中某一位置处模型解算结果与模拟值的差值,  $n$  是影像中有效解算像元的个数。图 2 (a)、(c)和(e)为模型 1 解算的改则地震三维形变

场,其形变趋势和最大量级与模拟地震形变场基本一致;图 2(b)、(d)和(f)为模型 2 解算的三维形变场,与模型 1 结果比较,东西、垂向的形变最大量级较为一致,南北向的形变量明显被放大甚至出现错误。模型 1 在南北、东西和垂向上的差值标准差分别为 3.93、1.84、2.51 cm;对应的模型 2 在各方向上的差值标准差分别为 15.85、1.92、2.79 cm。可见,模型 1、2 的解算结果在东西和垂向上精度相当;两种模型结果在东西向形变精度最高,南北向精度最低,特别是模型 2 受到方程组病态性的影响,其南北向解算结果精度远远低于观测精度。

两种模型结果对比发现,这两种模型在东西、垂向上均存在明显的线性关系(图 4(a)和(b)),说明两种模型解算结果在这两个方向的趋势是一致的,但存在偏移(约 ±2 cm)。南北向,两种模型的解算误差都很大,为更直观地展示其特征,我们垂直断层方向作剖面图(图 2 虚线为剖面线),从图 4(f)可清晰地看到,模型 2 结果在南北向出现了失真。仔细分析数据发现,Track 341 和 348 升轨数据的时间间隔达 6 天,由于存在震后滑动,两幅干涉图记录的改则地震主震及强余震形变存在一定的偏差,这种偏差还受到模型 2 病态方程组放大,这可能是导致两种模型解算结果出现偏移的主要原因。

5 结论

- 1)在相干性理想的情况下,MAI 技术能够监测到 Offset-tracking 监测不出的方位向形变;
- 2)模型 1 中,南北向解算精度绝大部分来源于方位向形变观测值贡献,然而 AZI 的测量精度对解算东西/垂向形变影响微弱;
- 3)模型 2 由于受病态方程组的影响,小幅度的测量误差经过模型 2 解算后,会产生难以接受的解算误差甚至是错误。因此,在利用模型 1 解算三维同震形变场时,提高方位向形变测量精度是提高模型 1 解算精度的关键。而应用模型 2 时,不同视角的干涉像对应尽量反映同一次形变,例如在地震震后滑动剧烈的情况下,要尽可能的避免使用该方法,最大限度地消除 InSAR 处理过程中的误差贡献。然而即便是遵从上述原则,利用模型 2 解算南北向形变的精度也不会很高,随着新一代具有左视扫描能力雷达平台的出现,南北向形变解算精度不高的问题有望得到解决。

参 考 文 献

- 1 Wright T J, Parsons B E and Lu Z. Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR [J]. Geophys Res Lett., 2004, 31, L01607, doi:10. 1029/2003GL018827.
- 2 胡俊,等. DInSAR 监测地表三维形变的方法[J]. 工程勘

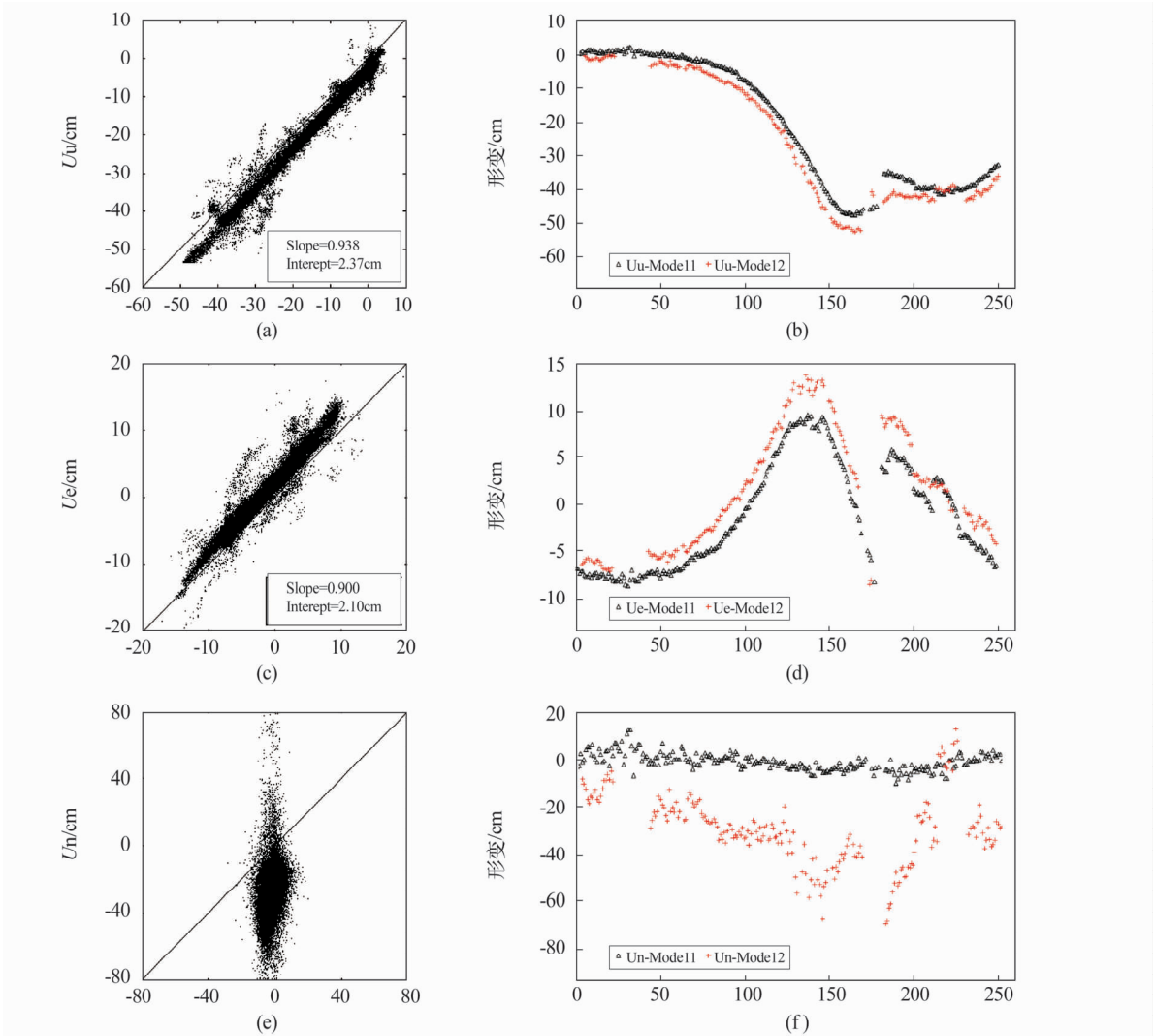


图 4 两种模型的散点图和剖面图(图 2 虚线位置)  
Fig. 4 Scatter and profile plots of two models (dotted lines in Fig. 2)

察,2008,12:35 – 38. (Hu Jun, et al. Measuring three dimensional surface motion using D InSAR[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2008,12:35 – 8)

3 Bechor N B D and Zebker H A. Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33, L16311, doi: 10. 1029/2006GL026883.

4 Jung H S, Won J S and Kim S W. An improvement of the performance of multiple-aperture SAR interferometry (MAI) [J]. IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8) : 2 859 – 2 869.

5 Rosen P A, et al. Updated repeat orbit interferometry package released[J]. Eos Trans AGU. , 2004, 85(5) :35.

6 Barbot, et al. Space geodetic investigation of the coseismic and postseismic deformation due to the 2003 *M*w7. 2 Altai earthquake: Implications for the local lithospheric rheology [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113, B03403, doi:10. 1029/2007JB005063.

7 Farr T G, et al. The shuttle radar topography mission[J]. Rev Geophys. , 2007, 45, doi:1029/2005RG000183.

8 Fialko Y and Simons M. The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 *M*w7. 1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations [J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28 (16) : 3 063 – 3 066.

9 冯万鹏,等. 利用 InSAR 资料反演 2008 年西藏改则 *M*w6. 4 和 *M*w5. 9 地震的断层参数[J]. 地球物理学报, 2009, 52(4) : 983 – 993. (Feng Wanpeng, et al. Source parameters of the 2008 Gaize *M*w6. 4 and *M*w5. 9 earthquake from InSAR measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(4) : 983 – 993)

10 Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space [J]. Bull Seismol Soc Am. , 1992, 82(2) :1 018 – 1 040.