

基于实测值分段线性内插模型的 InSAR 视线向同震位错分解 ——以青藏高原昆仑山 $M_s8.1$ 地震为例^{*}

马 超^{1, 2)} 单新建¹⁾

1) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室

2) 中国太原 030024 太原理工大学

摘要 利用现场 GPS 定位的实测值, 在尝试过最小二乘拟合并取得初步成果的基础上, 进而采用更符合破裂带形态的线性立方插值函数, 在破裂带主断面上, 建立起一种理论与实测相结合的 InSAR 视线向(LOS)变化量的分解方程, 得到了 InSAR 视线向位移分解的具有唯一性的解析解. 本文的解析法吸纳了 GPS 定点实测值的精度优势, 利用 InSAR 全天候、准实时获取连续形变场的技术特点, 通过数学近似, 最终获得了主破裂带上连续变化的水平位错及垂直位错同震形变曲线.

关键词 干涉合成孔径雷达(InSAR) 线性插值 视线向同震位错 昆仑山 $M_s8.1$ 地震
中图分类号: P313.4 **文献标识码**: A

引言

2001 年 11 月 14 日青藏高原昆仑山口西发生了 8.1 级强烈地震. 这次地震是有历史记录以来发生在东昆仑断裂带上震级最大、地表破裂带最长的一次特大型地震事件, 也是我国大陆自 1951 年西藏当雄 8.0 级地震之后 50 年来震级最大、地表破裂最长同时也是唯一的一次 8 级以上大地震(张国民等, 2003), 造成了大规模地表破裂和地面错动. 该地震地表破裂带从震中布喀达坂峰一带向东经红水河河口、库赛湖、昆仑山口, 终止于昆仑山口以东约 70 km 处, 总长度达 426 km. 2002 年 2 月中国地震局成立了“昆仑山口西 8.1 级地震综合科学考察队”, 其中地质考察组沿地震地表破裂带进行了追踪考察, 野外考察点 500 多个, 实测包括 GPS 定点观测位移数据点 271 个, 基本覆盖了整个地震地表破裂带. GPS 定点实测最大地表同震左旋水平位移 6~7 m, 最大垂直位错为 4 m, 地表水平位移沿地震破裂带走向出现 6 个峰值(尹光华等, 2002; 张瑞斌等, 2002).

地震考察区海拔 3 000~5 000 m 以上, 气候干燥寒冷, 空气稀薄. 区内沼泽密布, 河流纵横, 恶劣的自然环境给考察工作带来一定困难. 为了有效地配合此次科学考察, 我室购买了 40 景 ERS-1/2 SAR 图像, 运用差分雷达干涉测量技术(D-InSAR)获取了 8.1 级地震同震形变场, 特别是宏观震中区同震形变场(图 1 黄色粗线框), 并以此开展了宏观震中的地表破裂带变形特征及分段研究(单新建等, 2004).

^{*} 国家自然科学基金(40374013)和地震科学联合基金(106045)资助.
2005-02-01 收到初稿, 2005-10-26 收到修改稿并决定采用.

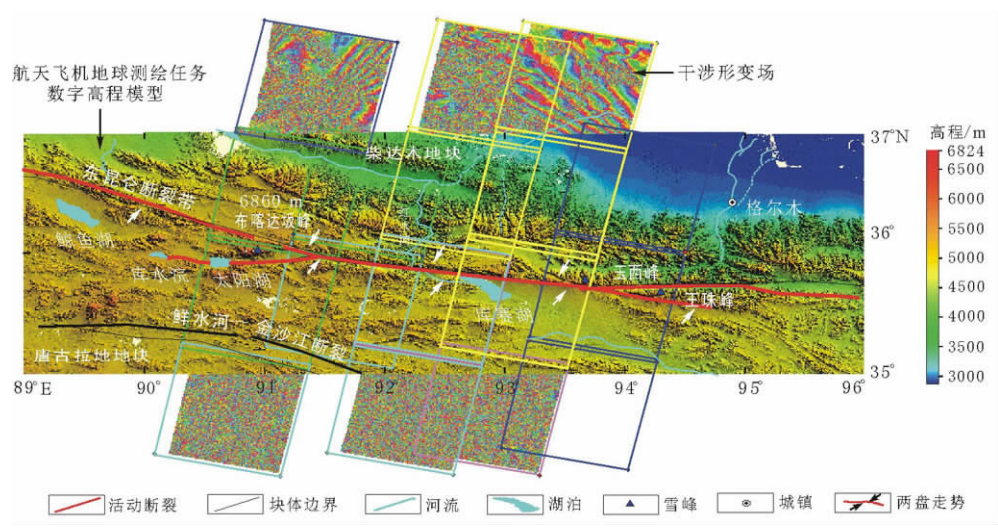


图 1 D-InSAR 提取昆仑山 M_s8.1 地震形变场实验区位置

1 InSAR 视线向变化量分解为水平位错与垂直位错的不唯一性

InSAR 以多次通过测区所取得的 SAR 多时相数据所承载的相位信息为信息源, 采用干涉或差分技术获得地表三维或变化信息. 地震同震形变场的提取就是一种 SAR 的差分技术. 以三通 (three pass) 差分为例 (图 2), 两次 SAR 传感器过境期间经历了地震事件, 地球表面一点由 $A(x_a, y_a, z_a)$ 移动到 $B(x_b, y_b, z_b)$, 由此产生了地表点的位移矢量 $\Delta s(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$. 由于差分技术不能形成三维立体影像, 除去基线距 (B_{\parallel}/B_{\perp}) 的影响, 只能获得地表点变化量 Δs 在雷达视线向上的投影 Δd_r , 所以同震形变场的形变量只是地表点相对于 SAR 传感器方向的变化量. 故将通过一次矢量合成、一次矢量投影后所获得的雷达视线向变化量 Δd_r , 通过坐标变换换算成地表点位移的 3 个分量 Δx 、 Δy 、 Δz , 至少需要经过 9 次坐标旋转和平移. 而通常至少 3 个分量是未知的, 因为我们无法监测地震瞬间地表点从 A 到 B 的移动过程, 如再顾及地形、入射角、航向等影响, 将雷达视线向变化量转化成水平和垂直位错是目前差分测量中一个悬而未决的难题 (单新建, 叶洪, 1998).

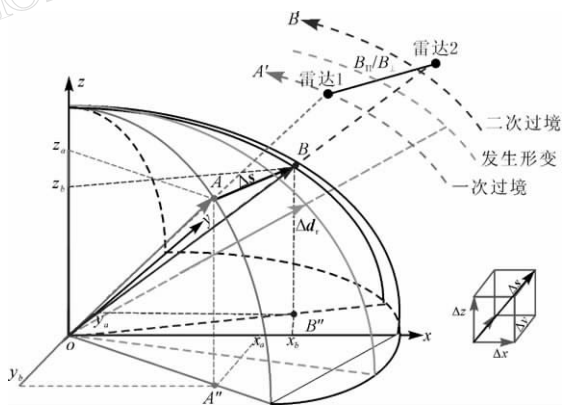


图 2 InSAR 视线向 LOS 形变量分解的不唯一性

2 利用 GPS 定点实测值进行 InSAR 视线向变化量分解

InSAR 差分干涉测量无法确切测得形变场水平位错和垂直位错分量, 这对地震构造解

释及发震机理研究无疑是个缺憾. 为弥补这方面的不足, 作者利用现场 GPS 定点的观测值 (徐锡伟等, 2002; 陈杰等, 2003. 以下分别简称为文献 A 和文献 B), 采用散点拟合的方法, 对文献 A, B 的 GPS 定点水平与垂直观测值进行样本分析. 通过方差分析剔除了文献 A 中水平观测值离散度较大的值, 在库赛湖破裂段上进行最小二乘拟合, 获得连续的随经度变化的水平位错变化曲线, 同理可得垂直位错变化曲线. 然而, 地震地表破裂是复杂的、非线性的, 实测值也证实主破裂带位移量离散度很大. 因此用一条单纯数学的高次曲线进行拟合是一种极其粗略的近似, 其结果必然不会理想. 该实验在横跨 1° (弧) 的实验区, 每隔 0.03° 均匀采样, 共产生了 33 个采样点, 按前述的算法进行了 InSAR 视线向位移分解. 回归分析得到视线向分解值与实测值偏差中误差为 ± 0.451 m. 鉴于此, 在充分依据实测数据的基础上, 作者在继续研究中引入了分段插值的方法 (马超, 单新建, 2005).

2.1 实验区的选取

为了对比实验效果, 本文继续选用了库赛湖破裂段 (图 1). 该实验区破裂段的主体沿布喀达坂峰—库赛湖断裂的中段分布, 西起红水河口东 (92.6°E 附近), 东止于库赛湖东的玉西峰南麓 (93.6°E), 总长约 98 km, 总体走向约为 94° . 该破裂段位于宏观震中区, 地表破裂显著, 野外地质调查实测资料充分, 且有高分辨率遥感 (SPOT, IKONOS) 解译结果 (单新建等, 2005a, b; Shan *et al.*, 2005). InSAR 干涉测量在该破裂段也获得了效果较好的同震形变场 (单新建等, 2004).

2.2 野外破裂带调查资料选取

直接选用采样率较高, 采样密度较均一的文献 B 的实测数据. 试采用多种插值算法, 依据断裂构造知识及实地破裂带形态野外调查结果, 分析对比插值获得的破裂带形态, 筛选出最接近实际破裂带形态的立方插值方法 (图 3).

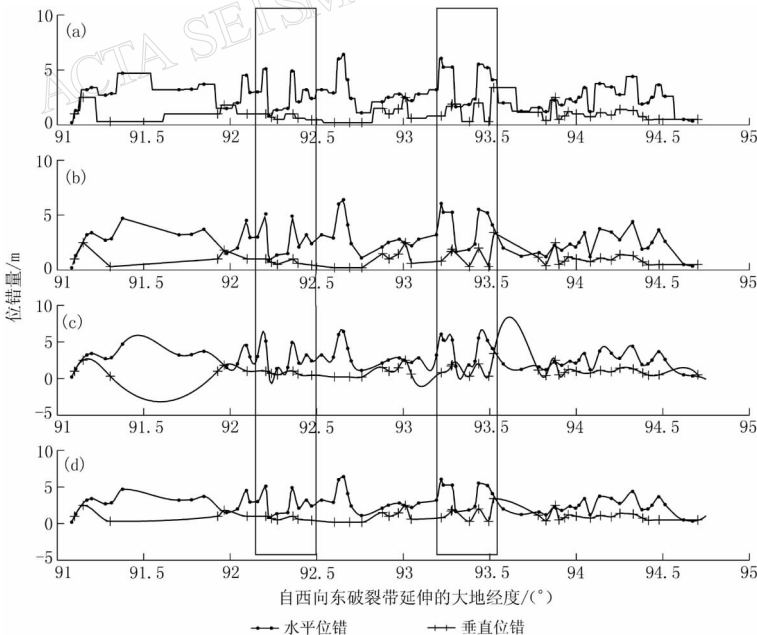


图 3 昆仑山 8.1 级地震实测水平与垂直位错几种插值方法的比较 (方框说明见本文 2.5 节内容)

(a) 最邻近插值法; (b) 线性插值法; (c) 3 次样条插值法; (d) 立方插值法

2.3 InSAR 视线向形变量的归算

由轨道资料知卫星轨道方向为 98.5° ，则卫星视线向在水平面的投影与此垂直，其走向为 278.5° ，因此视线向投影与断层走向存在一个约为 4.5° 的夹角 α 。故对 InSAR 数据分解前，需构造一个函数关系 $\Delta d'' = \Delta d' \cos \alpha$ ，将视线向变化量 $\Delta d'$ 归算成断层走向方向的变化量 $\Delta d''$ (见马超，单新建，2005 中图 3)。归算后的 InSAR 视线向变化量，通过插值而得到 InSAR 视线向位移曲线 (图 4)。

2.4 InSAR 视线向位移的分解

根据 GPS 定点实测的垂直位错及水平位错曲线方程，我们可以得到沿主破裂带上任意点位移垂直分量 $\Delta h'$ 与水平分量

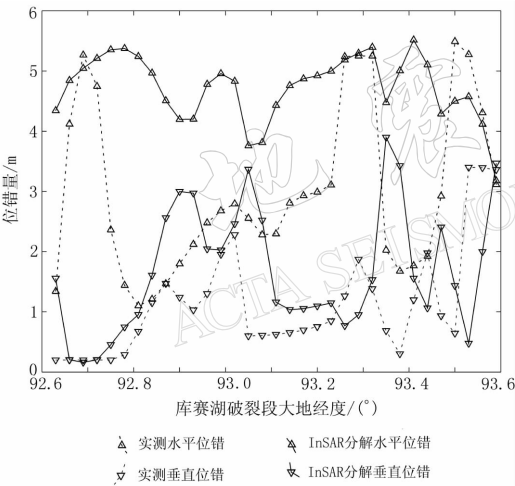


图 5 InSAR 的视线向位移分解为垂直与水平位移特征曲线

某些段落，如在 $93.3^\circ \sim 93.5^\circ \text{E}$ 区域分解值与实测值一致性较差。这与本文所选用的实测资料有关。对文献 A、B 的实测数据整理发现，由于实地考察与发震时隔 3 个多月，震区复杂的地质条件和恶劣的高原气候等影响了观测者的判读。此次野外调查时间有先后、地点有差别、观测人员各不相同，因而每个考察队测量标准不尽一致，造成几个考察队的实测值均存在较大偏差。从已发表的结果看，文献 B 提供 271 个水平位移观测值，91 个垂直位移数据，在该区域实测水平位移不足 2 m，而在此区域两侧却出现了高达 5~6 m 的峰值，研究同时确定宏观震中位于 93.518°E ， 35.719°N 处 (陈杰等，2003)；文献 A 获得 43 个水平位移观测值，8 个垂直位移数据，该区域没有获得水平位移；最近发表的文献提供

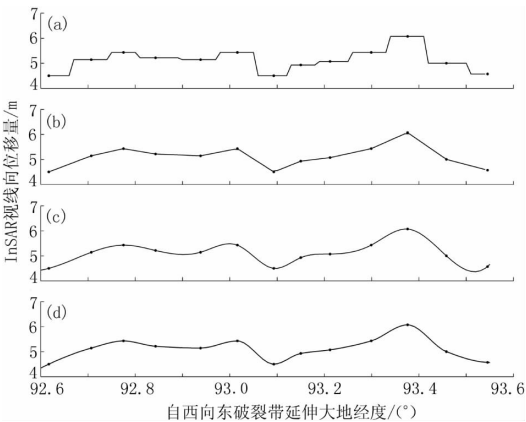


图 4 宏观震中区 InSAR 视线向 (LOS) 位移插值曲线

(a) 最邻近插值法；(b) 线性插值法；
(c) 3 次样条插值法；(d) 立方插值法

$\Delta d'$ 的夹角 $\beta = \arctan(\Delta h' / \Delta d')$ ，则破裂带上任意点 InSAR 差分测量所获得的视线向位移 Δs ，可分解为 InSAR 垂直分量 Δh 与水平分量 Δd (图 5) 为

$$\begin{cases} \Delta d = \Delta s \cos \beta \\ \Delta h = \Delta s \sin \beta \end{cases}$$

2.5 结果分析

可以看出，分解后的 InSAR 水平及垂直位错曲线与实测水平及垂直位错曲线在几个段落上具有趋势上的一致性，大体反映出地表破裂的分段特征。此外，分解后的 InSAR 水平与垂直位错曲线波峰与波谷相对应，与实测值规律相同，体现了强震的应变释放特征 (滕吉文等，1996)。文中所有计算采用 MATLAB 编程实现。

291 个水平位移观测值, 111 个垂直位移数据, 实测与文献 B 基本相同(陈杰等, 2004). 此外, 遥感解译确定了该区域的西端 93.283°E、35.783°N 为宏观震中, 最大左旋位错 7.8 m (单新建等, 2005a, b; Shan *et al*, 2005). 野外实测该区域垂直位移很小. 这样, 在该区域形成了一个水平位移与垂直曲线低谷, 未能体现出强震的应变释放特征(相似的情形也出现在 92.0°~92.5°E 区域, 图 3 中方框). 而 InSAR 研究表明, 在 93.4°E 附近存在最大值视线向位移量, 这给依赖于实测值的 InSAR 视线向位移分解工作造成了一定困难, 故该段分解结果与实测一致性很差.

众所周知, 地球物理学测量的误差受多种因素影响, 偏差是难以避免的. 作者的工作旨在为减小误差进行一些尝试, 无意评价野外考察、遥感解译或干涉测量孰优孰劣. 经统计分析得出, 总体水平位错实测值与 InSAR 视线向分解的水平位错值偏差中误差±1.525 m, 实测垂直位错值与 InSAR 视线向分解的水平位错值偏差中误差±0.976 m. 为对实验结果做出中肯评价, 选取了与实测相关性较高的 8 个 InSAR 测量点的视线向形变量, 将分解值与实测值进行了对比(表 1). 分析表明, 实测水平位错值 x_i 与 InSAR 视线向分解的水平位错值 x_j 偏差中误差为

$$m = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i,j=1}^n (x_i - x_j)^2} = \pm 0.272\ 6\ \text{m}$$

实测垂直位错值 y_i 与 InSAR 视线向分解的垂直位错值 y_j 偏差中误差为

$$m = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i,j=1}^n (y_i - y_j)^2} = \pm 0.054\ 2\ \text{m}$$

故以垂直位错分解值与实测吻合较好. 可见分解结果包含了实测误差的显著影响. 本文的分解方法主要依赖实测结果, 如果实测点有足够的密度及精度, 则分解效果较好. 考虑到地球物理学问题的相似性, 可以将单一破裂带分解推广到整个视线向同震形变场向水平及垂直位移场的分解.

表 1 InSAR 的视线向位移分解结果统计表

采样点	破裂带经度 /(°)	InSAR 视线 向位移/m	实测水平 位错/m	分解水平 位错/m	实测垂直 位错/m	分解垂直 位错/m
1	92.66	4.849	4.751	4.844	0.200	0.204
2	92.72	5.216	5.144	5.212	0.200	0.203
3	93.26	5.241	5.240	5.185	0.776	0.768
4	93.29	5.382	5.250	5.297	0.942	0.951
5	93.32	5.609	5.250	5.396	1.490	1.531
6	93.53	4.598	5.276	4.574	0.549	0.476
7	93.56	4.578	4.307	4.119	2.090	1.998
8	93.59	4.705	3.114	3.178	3.399	3.469
Σ		40.178	38.332	37.805	9.646	9.600

3 结论

目前, 国内外地震研究中, 对 InSAR 视线向同震位移分解尚无切实可行的方法. 本文的解析法 InSAR 视线向位移的分解, 是有唯一性的解析解. 此外, 与作者前期的研究相比, 插值法优于拟合法. 本文所采用的分段线性插值更好地利用了现场实测值, 是最小二

乘拟合方法的一个进步. 本文的分解精度尚可满足地球物理学研究的需要, 而且, 如果实测值具有较高的稳定性, 这种分解可为地震学家提供更准确的、沿破裂带连续的走滑与倾滑位错信息, 为进一步的震源机制解析解与数值解作必要的准备.

受现场观测值的限制, 本文只沿主破裂带进行了 InSAR 视线向位移分解. 如果有足够的野外观测数据, 特别是 GPS 网点的观测数据的支持, 本文的思路则可推广到二维平面, 采用最小二乘趋势面拟合或多维样条插值算法, 可以获得 InSAR 水平位错场及垂直位错场.

参 考 文 献

- 陈杰, 陈宇坤, 丁国瑜, 等. 2003. 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震地表破裂带[J]. 第四纪研究, **23**(6): 629~639
- 陈杰, 陈宇坤, 丁国瑜, 等. 2004. 2001 年昆仑山口西 $M_s8.1$ 地震地表同震位移分布特征[J]. 地震地质, **26**(3): 378~392
- 马超, 单新建. 2005. 基于 GPS 实测最小二乘拟合的青藏高原昆仑山 $M_s8.1$ 地震 InSAR 的同震位错分解[J]. 地震研究, **28**(3): 246~249
- 单新建, 李建华, 马超. 2005a. SPOT 和 IKONOS 影像在昆仑山口西 8.1 级地震中的应用研究[J]. 地震地质, **27**(1): 145~154
- 单新建, 李建华, 马超. 2005b. 昆仑山口西 8.1 级地震地表破裂带高分辨率卫星影像特征研究[J]. 地球物理学报, **48**(2): 321~326
- 单新建, 柳稼航, 马超. 2004. 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震同震形变场特征的初步分析[J]. 地震学报, **26**(5): 474~480
- 单新建, 叶洪. 1998. 干涉测量合成孔径雷达技术原理及其在测量地震形变场中的应用[J]. 地震学报, **20**(6): 647~655
- 滕吉文, 张中杰, 杨顶辉, 等. 1996. 青藏高原地体划分的地球物理标志研究[J]. 地球物理学报, **39**(5): 629~641
- 徐锡伟, 陈文彬, 于贵华, 等. 2002. 2001 年 11 月 14 日昆仑山库赛湖地震($M_s8.1$)地表破裂带的基本特征[J]. 地震地质, **24**(1): 2~13
- 尹光华, 沈军, 蒋靖祥, 等. 2002. 2001 年 11 月 14 日东昆仑 8.1 级地震的构造背景[J]. 干旱区地理, **25**(1): 24~29
- 张国民, 田勤俭, 王辉. 2003. 可可西里—东昆仑活动构造带强震活动研究[J]. 地学前缘, **10**(1): 39~46
- 张瑞斌, 张晓梅, 王赞军, 等. 2002. 东昆仑断裂带强震构造条件研究[J]. 高原地震, **14**(1): 26~31
- Shan X J, Li J H, Ma C, *et al.* 2005. A character analysis of remote sensing images to the seismic rupture zone caused by the $M_s8.1$ earthquake west to the Kunlun Mountain Pass of 2001[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, **79**(1): 43~52

DECOMPOSING InSAR LOS DISPLACEMENT INTO COSEISMIC DISLOCATION BY LINEAR INTERPOLATION MODELING —— A CASE STUDY OF THE KUNLUN MOUNTAIN $M_s8.1$ EARTHQUAKE

Ma Chao^{1, 2)} Shan Xinjian¹⁾

1) State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake
Administration, Beijing 100029, China

2) Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

Abstract: In this paper, having tried a least square fitting models and gained preliminary conclusion, based on the firsthand observations made in the field by GPS, a linear interpolation model which fits the feature of rupture zone well is set up. An equation about decomposing co-seismic dislocation from InSAR slant range is set up and a unique value of the horizontal and vertical components is got. The method not only absorbs the authenticity and precision of fieldwork, but also it makes use of the InSAR technical characteristics such as real time, continuous record and all-weather *etc.* By approximation step by step co-seismic horizontal and vertical components curves are gotten along with main earthquake rupture zones.

Key words: InSAR (Interferometry Synthetic Aperture Radar); linear interpolation; LOS co-seismic dislocation; Kunlun Mountain $M_s8.1$ earthquake