

# 多模式 SAR 玉树地震协同分析

郭华东, 王心源, 李新武, 刘广, 张露, 阎世勇

中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 数字地球重点实验室, 北京 100190  
E-mail: hdguo@ceode.ac.cn

2010-04-26 收稿, 2010-04-29 接受

国家重点基础研究发展计划(编号: 2009CB723906)资助项目

**摘要** 2010年4月14日发生在青海省玉树县的里氏7.1级地震对人民的生命和财产造成了严重的损害. 利用宽幅、干涉和极化3种模式SAR数据, 课题组进行了如下研究: ① 利用RADARSAT-2宽幅SAR数据, 分析了玉树地震的区域地质构造和岩性分布特征; ② 利用ALOS/PALSAR干涉SAR数据, 获取同震形变场, 结合区域地质背景分析了形变程度以及空间分布; ③ 利用极化SAR数据, 采用 $H-\alpha-\rho$ 方法提取地震造成的玉树县城倒塌建筑物空间分布, 并分析了建筑物的倒塌原因. 研究证明了多模式SAR在地震灾情协同分析与评价中的有效性和重要潜力.

## 关键词

多模式 SAR  
协同分析  
地表形变  
玉树地震

2010年4月14日发生在青海省玉树县的里氏7.1级地震对人民的生命和财产造成了严重损害. 快速、准确、有效地进行地震灾情航空航天遥感监测和评估, 可对政府应急指挥和灾后重建提供重要的科学依据和决策支持.

近年来, 集宽幅合成孔径雷达(SAR)、干涉SAR和极化SAR为一体的先进星载SAR系统的发展为地震灾情监测和评估提供了有效技术手段. 目前, 先进的星载SAR主要有ALOS/PALSAR, TerraSAR-X以及RADARSAT-2, 它们具有宽幅、干涉和极化测量能力.

在2008年汶川地震遥感研究基础上<sup>[1]</sup>, 研究组综合利用ALOS/PALSAR和RADARSAT-2采集的宽幅SAR、干涉SAR和极化SAR多模式数据, 对地震发生的区域地质特征、地表形变以及建筑物倒塌情况进行了协同分析.

## 1 宽幅 SAR 玉树地震地质特征分析

玉树地震发生在甘孜-玉树断裂带上. 该断裂带整体呈北西向展布, 全长近500 km, 破碎带宽50 m

至数百米. 从板块构造背景分析, 玉树地震发生在印度板块向欧亚大陆挤入形成的喜马拉雅碰撞带以北的青藏高原. 在此挤压作用下, 青藏高原内部的块体发生侧向滑移, 造成高原主体及内部块体向东移动, 在块体边缘形成不同规模的走滑断裂系<sup>[2]</sup>.

陈立春等人<sup>[3]</sup>在堪口附近发现的同震地表破裂带, 其总体走向 $320^\circ$ , 为纯剪切破裂, 运动学性质为左旋走滑, 推测地表破裂带长度介于31~46 km之间, 最大同震左旋水平位错量约2.1~2.2 m, 平均左旋位移约1~1.5 m.

陈运泰等人<sup>[4]</sup>利用全球31个台站的波形资料反演得到了这次地震的地震矩张量解, 并根据玉树地区的断层构造背景, 判定走向 $119^\circ$ 、倾角 $83^\circ$ 的断层为发震断层; 利用全球35个台站的远震资料, 反演得到玉树地震的破裂过程, 得到断层面上有两个活动区域, 第一个位于微观震中附近, 第二个位于其东南10~30 km处, 其最大滑动量为2.4 m, 它是1条近乎直立的左旋走滑断层.

研究组获取了2010年4月21日的RADARSAT-2 HH极化宽幅SAR数据, 数据空间分辨率为40 m, 入

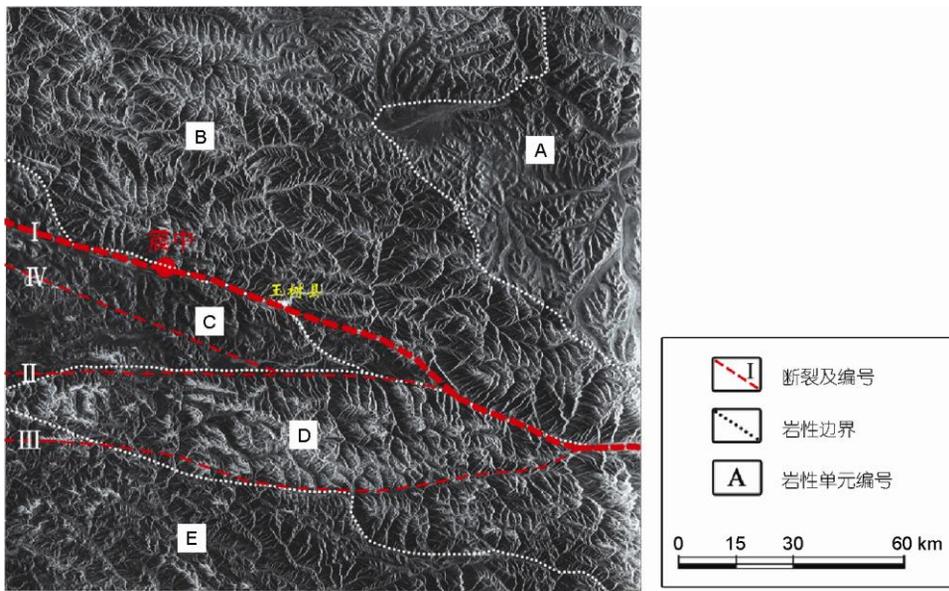


图1 RADARSAT-2 HH 极化宽幅 SAR 地质分析

射角 21°, 基于该数据进行了区域地震地质分析.

地表破碎现象往往反映不同岩性信息. 结合地质资料, 基于雷达图像反映地表破碎度和图像亮度的不同, 把研究区分为 5 个区域(图 1 中 A~E 区), 其形态特征具体描述如下.

(1) A, C 区山体浑圆, 较完整, 沟谷浅而宽, 雷达后向散射弱, 本区以石灰岩、页岩为主, 兼有砂岩、粉砂岩、千枚岩; (2) B, E 区山体峰脊尖棱, 沟谷细长, 雷达后向散射较强, 本区以砂岩为主, 夹粉砂岩、片岩等; (3) D 区山体破碎严重, 沟谷短促、密集, 雷达后向散射强, 图像浅白且比 B, E 区域亮, 以砂砾岩、黏土岩、泥岩为主, 结构破碎; (4) 分布于沟谷中新生代的松散型冲积、洪积、坡积物, 颜色深暗.

由于雷达波对线性构造敏感<sup>[5-7]</sup>, 基于 SAR 图像分析并参照已有活动构造研究结果<sup>[8]</sup>, 在本区解译出 4 条主要断裂: 区域主断裂 I 和 IV 呈 NW-SE 向分布, 其中断裂 IV 发育在图幅内的灰岩区; 断裂 II 与 III 呈东西向. 从断裂的构造组合和已有的活动构造结果来看, 显然主断裂 I 是走滑性左旋断裂.

## 2 干涉 SAR 玉树地震地表同震形变场信息提取与分析

干涉 SAR 是获取地震地表形变的有效手段之一<sup>[9]</sup>. 为了对玉树地震地表形变的大小以及空间分布进行分析和研究, 研究组采集了日本 ALOS/PALSAR

升轨重轨干涉测量数据, 表 1 为 PALSAR 重轨干涉数据参数.

表 1 PALSAR 重轨干涉数据参数

传感器	获取时间	轨道号	像幅号	垂直基线/m	时间间隔/d
PALSAR	2010-01-15	487	650	700.5	92
PALSAR	2010-04-17	487	650		

### 2.1 干涉 SAR 数据处理

利用干涉雷达数据处理软件 DORIS 和 SRTM3 90 m 分辨率 DEM 数据, 采用双轨差分干涉方法对 ALOS/PALSAR 干涉数据进行处理, 李正红<sup>[10]</sup>和朱建军<sup>[11]</sup>等也对此地区数据进行了处理. 由于玉树地震区地形起伏很大, 为了有效去除平地相位和地形相位信息, 数据处理采用了 ALOS/PALSAR 的精确轨道测量数据.

### 2.2 干涉测量结果分析

雷达干涉相位图清楚地反映了玉树地震地表形变场的空间分布, 形变场在图像范围内占据了沿断层长约 82 km、宽约 40 km 的范围. 由雷达干涉相位图的分布特点可知玉树地震同震形变场是以北西向发震断层甘孜-玉树断裂带(图 1 中的主断裂 I)为中轴分布的, 基本与该断层平行分布. 该发震断层的走向为 NW-SE 向, 沿发震断裂带有两处比较主要的地

表形变量大的区域,图 2(b)中①和图 2(c)中②所示,其中①与国家地震台网计算的仪器震中位置相对应,②应与宏观震中相对应,为方便叙述,以下采用仪器震中和宏观震中来表述这两个区域.

从 SAR 干涉条纹的分布格局可以看出,断层两盘的干涉条纹相位变化方向和密度有所不同.断层南侧条纹干涉相位由最南端 A 点向断层方向,经历了“红-绿-蓝”颜色变化周期,干涉相位由南向北呈现递增趋势;而断层北侧干涉条纹相位由最北段向断层方向,经历了“蓝-绿-红”颜色变化周期,干涉相位由北向南呈现出递减趋势.从雷达干涉相位图整体上来看,沿断层雷达视线向距离变化较大,发震断层具有明显的左旋走滑特性.此外,从雷达干涉相位图的条纹密度分布可以看出,断层北部干涉条纹紧邻断层分布,而南部干涉条纹扩散到南部 30 km 左右,这表明断层南北地质条件有较大不同.分析认为是由于南部地区为石灰岩(图 1 中 C 区),具有较大脆性,因此形变传播范围大,而北部以砂岩为主(图 1 中 B

区),弹性较大,大部分地震能量被断层附近的岩体所吸收.

从仪器震中区域放大的干涉相位图 2(b)和宏观震中区域放大的干涉相位图 2(c)还可以看出,前者附近的雷达干涉相位图周边条纹变化非常剧烈,而宏观震中中心区域则由于大的地表变化造成干涉相位图出现明显的失相干现象,两个区域地震断层滑动错位量相对都较大,但是由于宏观震中区域接近玉树城区,势必造成玉树城区及周边地区比较强烈的震感,该处破裂带是造成巨大的人员伤亡和经济损失的重要原因.

PALSAR 为 L 波段雷达,其干涉相位图中的干涉条纹一个周期的变化代表雷达视线方向上 11.8 cm 的斜距变化.从远离断层点 A 到仪器震中区域附近的 C1 点的卫星视线向形变逐渐增加,至少有 2 条干涉条纹,由点 A 到宏观震中区域附近的 D1 点的视线向形变也是逐渐增加,至少有 3 条干涉条纹.而从远离断层的点 B 到仪器震中区域附近的 C2 点和宏观震中

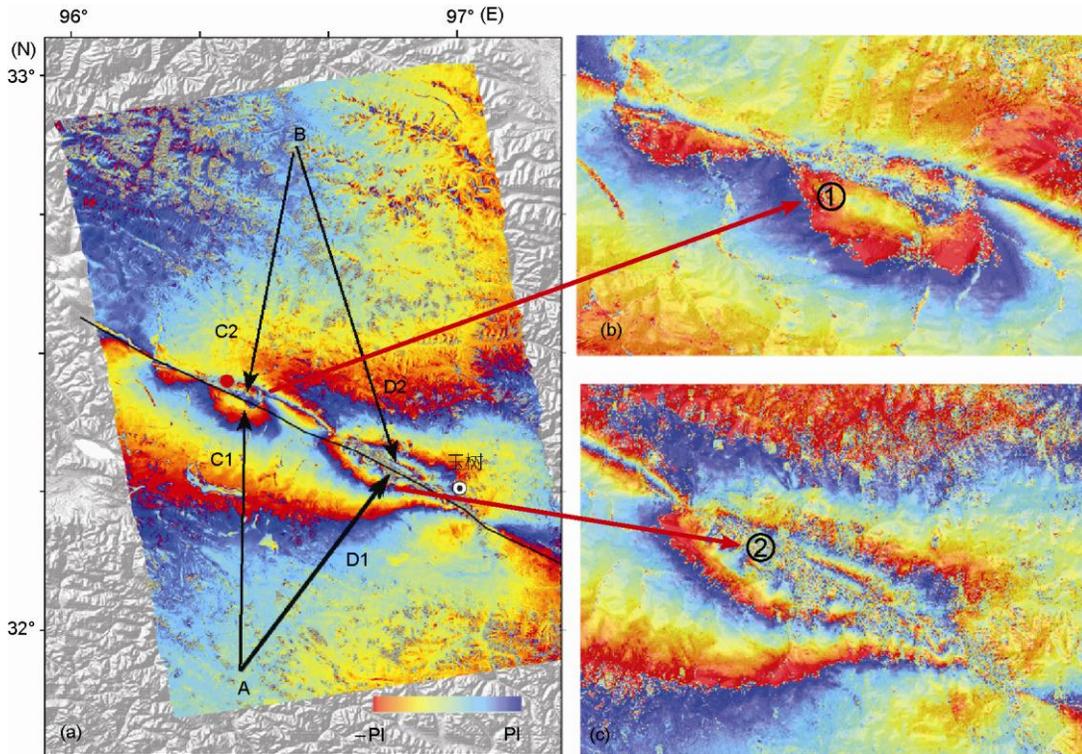


图 2 ALOS PALSAR 数据同震形变干涉相位图

(a) 全幅雷达干涉相位图; (b) 仪器震中区域雷达干涉相位图; (c) 宏观震中区域雷达干涉相位图

区域附近的 D2 点的雷达视线向形变均逐渐减少, 分别至少可以数出 2 条和 3 条干涉条纹. 在发震断层附近点 D1 和 D2 分别达到最大正值和最小值, 因此可以推断出断层南侧最大可解译的雷达视线向隆起位移量为  $11.8 \times 3 = 35.4$  cm, 断层北侧最大可解译雷达视线向下沉位移量为  $11.8 \times 3 = 35.4$  cm. 由于靠近宏观震中区域的地表在震中遭到破坏, 造成了两幅雷达图像相应区域之间的相关性降低, 无法形成有效的干涉条纹, 保守分析左右各按一个条纹计算, 断层两盘相对的视线向位移量应不低于  $11.8 \times 8 = 94.4$  cm.

### 3 极化 SAR 倒塌建筑物信息提取与分析

研究组获取了玉树县城 4 月 21 日升轨的 RADARSAT-2 精细模式极化数据, 空间分辨率为 8 m, 入射角为  $21^\circ$ . 同时, 用 4 月 15 日中国科学院对地观测与数字地球科学中心的机载高分辨率光学影像建筑物倒塌人工解译图进行比较和分析.

#### 3.1 $H-\alpha-\rho$ 方法

基于 RADARSAT-2 精细极化模式数据和极化分解模型, 我们提出了基于震后单幅极化雷达图像进行倒塌建筑物提取的  $H-\alpha-\rho$  方法. 该方法主要利用了 3 个重要的极化参数—— $H$ ,  $\alpha$  和  $\rho$  来进行倒塌建筑物

的提取.  $H$  代表熵, 反映的是目标散射的随机程度,  $\alpha$  代表目标的平均散射机制类型,  $\rho$  为圆极化相关系数,  $\rho$  对人造目标具有非常高的敏感性, 未倒塌的房屋具有较高的  $\rho$  值, 倒塌的房屋  $\rho$  值较低. 然而,  $\rho$  也与地表粗糙度有关, 对于粗糙度较小的裸地, 该值同样表示为高值<sup>[12]</sup>, 因此需要首先去除裸地.

地震后玉树县城区主要地物覆盖有 3 类: 倒塌建筑物、未倒塌建筑物和裸露地表. 利用  $H-\alpha-\rho$  方法进行倒塌建筑物提取的基本流程如下: (1) 裸露地表的提取. 利用  $H-\alpha$  定理计算  $H$  和  $\alpha$ , 将  $H < 0.5$  且  $\alpha < 42^\circ$  的像素划分为裸露地表<sup>[13,14]</sup>; (2) 基于统计分析的未倒塌和倒塌建筑物划分的  $\rho$  值的确定. 基于高分辨率光学数据, 从雷达图像中选取倒塌和未倒塌建筑物典型区域进行  $\rho$  值的统计分析, 根据统计结果确定合适的  $\rho$  阈值; (3) 根据  $\rho$  的阈值进行倒塌和未倒塌建筑物的划分, 得到倒塌建筑物分布图.

#### 3.2 提取结果与效果分析

图 3 为利用  $H-\alpha-\rho$  方法提取的玉树县城倒塌建筑物分布图, 分析得到玉树城区建筑物倒塌率约为 58%. 为了对结果进行验证, 在图中选择了  $a, b$  两个区域,  $a$  为倒塌严重区,  $b$  为基本未倒塌区, 与左下角  $a', b'$  所示的机载 33 cm 分辨率光学图像人工分析结果进行对比. 从两图的对比可见, 极化 SAR 提取

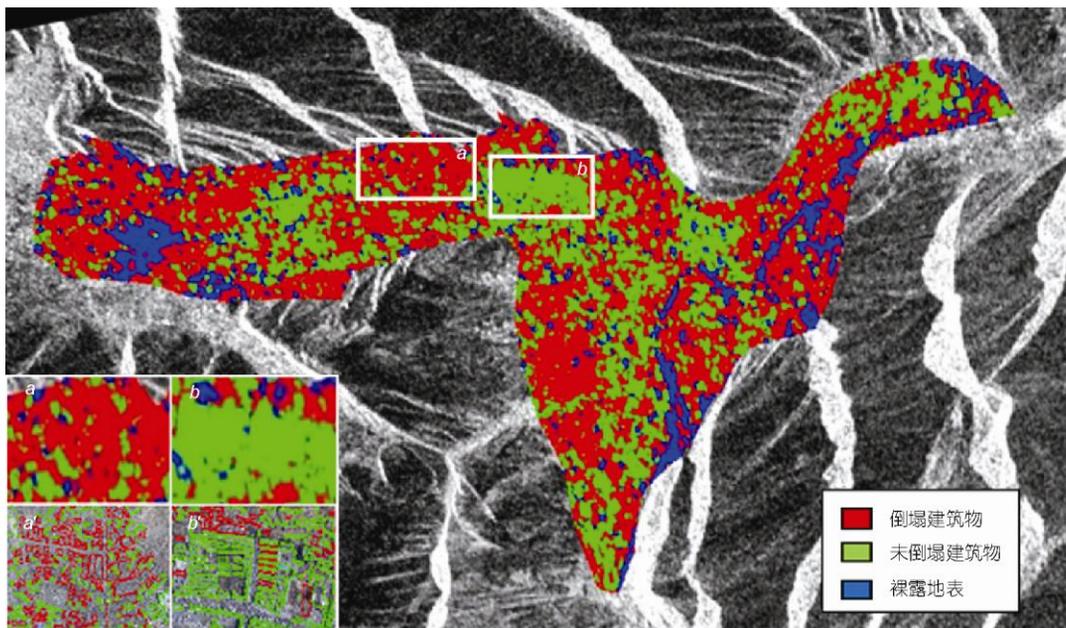


图 3 用极化雷达  $H-\alpha-\rho$  方法提取的玉树县城倒塌建筑物分布图

与光学人工解译基本吻合. 为进一步验证该方法的有效性, 在图中  $a, b$  区域分别选择像素数 10000 左右的样本区, 利用高分辨率光学图像分解结果对该方法的检测结果进行验证. 通过统计分析, 得出本文方法对于倒塌建筑的识别率为 88%, 未倒塌建筑的识别率为 80%. 应该指出的是, 若在恶劣天气条件下, 极化 SAR 倒塌建筑物识别方法会发挥更重要的作用.

## 4 结论和讨论

(1) 结合宽幅 SAR 和干涉 SAR 分析, 2010 年 4 月 14 日玉树 7.1 级地震震源位于区域主断裂上, 并处于两种岩性相交部位.

(2) 根据干涉 SAR 分析, 发现两个明显位错段,

分别与仪器震中和宏观震中相对应; 同时发现本次地震在主断裂 I 两侧视线位移达到 94.4 cm 以上.

(3) 基于极化 SAR 分析, 地震造成玉树城区 58% 的建筑物倒塌. 倒塌程度与距断裂的距离相关, 一些建在冲积扇上的房屋, 基础不牢固, 又是土木结构, 抗震性能较差.

(4)  $H-\alpha-\rho$  方法提取的建筑物倒塌和未倒塌结果分别为 88% 和 80%, 证明该方法提取倒塌建筑物信息的有效性. 但是, 我们也注意到复杂地形条件会影响雷达图像信息的提取精度.

研究表明, 利用多模式 SAR 对地震地质和地震灾害进行协同分析与评价具有很大的优越性, 有极大的应用潜力.

**致谢** 感谢邓起东先生对本文提出宝贵修改意见; 感谢加拿大遥感中心(CCRS)以及日本宇航局(JAXA)提供卫星遥感数据.

## 参考文献

- Guo H D, Li X W, Zhang L. Study of detecting method with advanced airborne and spaceborne synthetic aperture radar data for collapsed urban buildings from the Wenchun earthquake. *J Appl Rem Sens*, 2009, 3: 31695
- 顾瑾萍. 青海玉树 7.1 级强震地震地质构造背景. <http://www.csi.ac.cn/manage/>
- 陈立春, 王虎, 冉永康, 等. 玉树  $M_s$ 7.1 级地震地表破裂与历史大地震. *科学通报*, 2010, 55: 1200—1205
- 陈运泰. 玉树地震震源机制和破裂过程快报第四版. <http://www.csi.ac.cn/manage/html/>
- 郭华东. 雷达对地观测理论与应用. 北京: 科学出版社, 2000
- Guo H D, Liao J J, Wang C L, et al. Use of multifrequency, multipolarization shuttle imaging radar for volcano mapping in the Kunlun mountains of western China. *Rem Sens Environ*, 1997, 59: 364—374
- Guo H D, Zhu L P, Shao Y, et al. Detection of structural and lithological features underneath a vegetation canopy using SIR-C/X-SAR data in Zhao Qing test site of southern China. *J Geophys Res*, 1996, 101: 23101—23108
- 邓起东, 冉永康, 杨晓平. 中国活动构造图. 北京: 地震出版社, 2007
- Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. The displacement field of the landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 1993, 364: 138—142
- 李正红. The 13 April 2010  $M_w$  6.9 Yushu (Qinghai, China) Earthquake from InSAR observations. [http://web2.ges.gla.ac.uk/~zhli/Qinghai\\_Yushu\\_EQ.htm](http://web2.ges.gla.ac.uk/~zhli/Qinghai_Yushu_EQ.htm)
- 朱建军. 基于 InSAR 的青海玉树地震同震形变场. <http://ipge.its.csu.edu.cn/chs/Default/NewsDetail.aspxID=81>
- Ainsworth T L, Schuler D L, Lee J S. Polarimetric SAR characterization of man-made structures in urban areas using normalized circular-pol correlation coefficients. *Rem Sens Environ*, 2008, 112: 2876—2885
- Cloude S R, Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Trans Geosci Rem Sens*, 1996, 34: 498—518
- Cloude S R, Pottier E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. *IEEE Trans Geosci Rem Sens*, 1997, 35: 68—78