

InSAR 相位分解及其在生成 DEM 和研究地震形变场中的应用

罗小军, 黄丁发, 刘国祥

(西南交通大学土木工程学院测量工程系, 四川 成都 610031)

摘要: InSAR 是极具发展潜力的微波遥感新技术, 可应用于数字高程模型的产生、制图和大范围微小地表形变的测量。考虑参考面、地形和地表形变等因素, 本文从几何角度分析和讨论了 InSAR 的相位分解, 并给出了各相位分量的函数表达式, 阐述了地表高程和形变信息提取的基本原理。最后以 JERS 和 ENVISAT 卫星数据为例, 展示了合成孔径雷达干涉测量在生成数字高程模型和提取地震形变场中的应用及其数据处理过程。

关键词: 合成孔径雷达干涉; 差分干涉; 干涉相位分解; 数字高程模型; 地震

中图分类号: TP722.6; P227 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2006)03-0204-06

Phase Decomposition of Interferometric Synthetic Aperture Radar and Relevant Application in DEM Formation and Research on Earthquake Deformation Field

LUO Xiao-jun, HUANG Ding-fa, LIU Guo-xiang

(Dept. of Surveying Eng., School of Civil Eng., Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) is a new microwave remote sensing technique with great developing potential. It can be applied to form DEM (Digital Elevation Model), mapping and monitoring minor terrestrial deformation in large area. In this paper, considering the reference surface, terrain and surface deformation, the interferometric phase decomposition in InSAR is analyzed and discussed from geometry point, and the relevant function expressions of specific phase components are presented. Then the basic principle of generating DEM and acquiring deformation is described. Finally, taking JERS and ENVISAT data as example, application and process of DEM formation and earthquake deformation field abstraction are displayed.

Key words: SAR interferometry; Differential interferometry; Decomposition of interferometric phase; Digital elevation model; Earthquake

0 引言

合成孔径雷达干涉 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 是正在发展中的极具潜力的微波遥感新技术, 它是合成孔径雷达遥感成像与电磁波干涉两大技术融合的结果, 主要用于生成数

字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)、地图制图和监测大范围微小地表形变。InSAR 在地形测绘、城市目标探测和城市形态分析、海洋表面及其流速场探测、极地冰川监测、农业和资源调查等领域有着极其广阔的应用前景。InSAR 基本思路是: 通

收稿日期: 2006-04-05

基金项目: 国家自然科学基金 (40374003) 和 (40474008); 教育部优秀教师资助计划 (2003109)

作者简介: 罗小军 (1974-), 男 (汉族), 四川安岳人, 博士生, 主要从事 InSAR 理论及应用研究。

过两副天线同时观测(单轨双天线模式)或两次平行观测(重复轨道模式),获得同一地区的重复观测数据(复数影像对),提取同一目标对应的两个回波信号之间的相位差,结合观测飞行平台的轨道数据提取高程信息,可以获取高精度、高分辨率的地面高程信息。在 InSAR 基础上进一步发展了差分干涉技术(differential interferometric synthetic aperture radar, DInSAR),利用该技术可以精密测定地表的微小形变,精度可达厘米级甚至毫米级^[1]。目前该技术已在地震、地面沉降、火山活动、冰川漂移、山体滑坡等大范围地面形变的监测和研究方面表现出极大的潜力。

从上世纪 80 年代以来,大批相关学者已开始致力于 InSAR 的研究,尤其是欧美国家掀起了 InSAR 研究的热潮。我国对雷达干涉的研究至今尚处于起步阶段,但已引起了国内测绘界与地学界同仁们的极大兴趣和广泛关注。本文从分析干涉相位形成机理出发,阐述合成孔径雷达干涉的基本原理,重点剖析干涉相位中各种成分的组成。在此基础上,利用日本 JERS 卫星和欧洲空间局 ENVISAT 卫星数据进行实验,分析并讨论利用干涉相位重建地表三维和提取地震形变场的方法及其数据处理过程。

1 合成孔径雷达干涉基本原理与高程信息提取

合成孔径雷达干涉测量的原理起源于杨氏双缝干涉实验,它通过获取目标点的干涉相位并结合干涉几何来获取目标点的高程信息和形变信息。目标点的干涉相位是雷达接收的目标两次回波信号之间的相位差,它是两雷达天线到目标点的路径差的函数。下面以重复轨道干涉测量为例说明干涉提取地面高程信息的基本原理。图 1 是其几何原理示意图:雷达卫星两次(S_1 、 S_2)沿不同的轨道(轨道 1、轨道 2)对地面某目标 P 重复进行观测, H 表示卫星第一次通过时的飞行高度; θ 为第一次通过时雷达对目标 P 进行观测的视角; B 为卫星两次对目标观测时的轨道间距,称为基线; α 是基线 B 沿水平方向的倾角; $B_{\parallel}$ 、 $B_{\perp}$ 是基线 B 沿雷达视线方向 $\overrightarrow{S_1P}$ 进行分解的分量,分别称为平行基线和垂直基线; R_1 、 R_2 分别是雷达卫星两次观测时到目标点的斜距。卫星两次对同一目标进行观测时,两雷达天线两次获取同一目标的回波信号,根据波动方程,两次回波信号可用复数分别表示为

$$\left. \begin{aligned} S(R_1) &= A(R_1) \exp(i\phi(R_1)) \\ S(R_2) &= A(R_2) \exp(i\phi(R_2)) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

回波信号包含振幅和相位两部分。 $A(R_1)$ 、 $A(R_2)$ 分别为两回波的振幅; $\phi(R_1)$ 、 $\phi(R_2)$ 为相位,它们分别是两天线到目标 P 的斜距的函数。回波信号以复数形式记录并处理形成影像,这种影像称为单视 SAR 复数图像。将两幅 SAR 图像精确配准后^[3],对应像素值作共轭相乘^[4],乘积的虚部与实部比值的反正切值就是干涉相位,干涉相位以图像形式表示出来就是干涉条纹图(interferogram)。

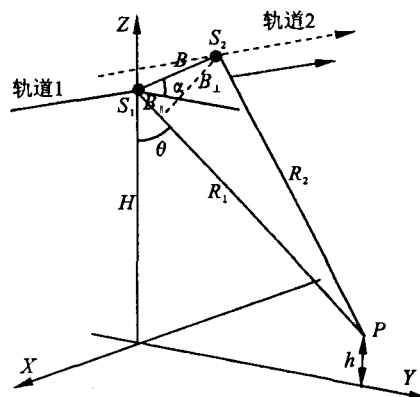


图 1 合成孔径雷达干涉测量成像示意图
(据文献[2]修改)

Fig. 1 Illustration of InSAR imaging.

从几何上来说,干涉相位可表示为

$$\Delta\phi = \phi(R_1) - \phi(R_2) = \frac{4\pi}{\lambda}(R_1 - R_2) \quad (2)$$

而由图 1 所示的几何模型,地面目标 P 的高程 h 可表示为

$$h = H - R_1 \cdot \cos \theta \quad (3)$$

结合式(2),利用余弦定理进一步推导,地面点 P 的高程可表示为干涉相位 $\Delta\phi$ 的函数:

$$h = H - \frac{B^2 - \left(\frac{\lambda}{4\pi}\Delta\phi\right)^2}{- \frac{\lambda}{2\pi}\Delta\phi + 2B\sin(\theta - \alpha)} \cos \theta \quad (4)$$

式(4)说明,利用干涉相位和干涉成像几何参数就可计算出地表的高程值 h ,这就是干涉测量获取地面高程信息的基本原理。

实际干涉处理中,其计算和处理过程是比较复杂的。一方面,雷达回波的相位以及干涉相位只记录了相位的主值(即不足整周数部分),而计算高程需要的 $\Delta\phi$ 是包含整周数的干涉相位,因而在解算地面高程之前需要进行相位解缠(phase unwrapping),以恢复干涉相位中的整周数部分^[4-7],这是干涉测量中的一个难点,也是关键步骤之一;另一方

面,根据前面的分析,干涉相位由两雷达天线到目标点的路径差决定,而路径差主要由目标点所处状态:选取的参考面、目标点相对参考面的位置(地形)以及两次观测期间目标点的变化(形变)所决定。由此可知,干涉相位是参考面、地形和地表形变等因素的综合贡献,理解这些因素对干涉相位的作用机理是InSAR应用的基础。下面对这三个因素所作用的干涉相位分量的形成原理以及相应的数据处理过程和方法进行分析。

2 干涉相位组成分析

2.1 参考面相位 ϕ_{ref} 构成分析

在星载合成孔径雷达干涉测量中,通常以WGS84椭球面作为基准参考面,参考面的干涉条纹具有规律性。如图2所示,对于参考面S上的一点 P_1 ,两雷达天线 S_1 、 S_2 获取的来自 P_1 点的回波信号的波程差 δR 为 $2(R_1 - R_2)$ 。在实际干涉测量中,因为天线基线距 B 远小于斜距 R_1 、 R_2 ,根据远场近似原理认为 $R_1 \parallel R_2$ ^[7],则

$$\delta R = 2(R_1 - R_2) = 2B \sin(\theta - \alpha) \quad (5)$$

其中 $B \sin(\theta - \alpha)$ 为平行基线距 $B_{\parallel}$ ^[3],即 $\delta R = 2B_{\parallel}$,将它代入式(2)得到参考椭球面上 P_1 点的干涉相位为 $4\pi/\lambda B_{\parallel}$,称该干涉相位为参考面相位 ϕ_{ref} (或平地相位),表示为

$$\phi_{\text{ref}} = \frac{4\pi B_{\parallel}}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta - \alpha) \quad (6)$$

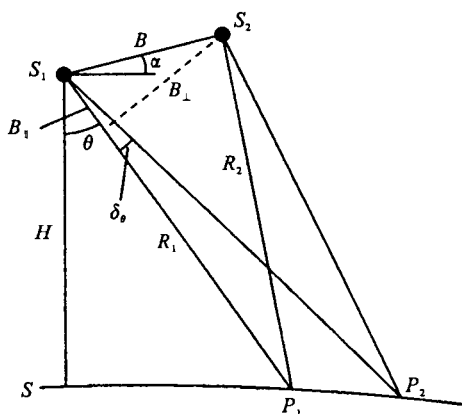


图2 参考面相位变化示意图

Fig. 2 Illustration of phase change on reference surface.

对于同一距离向(range)上的像素(或目标点),它们对应的 λ 、 B 、 α 相同,相当于 P_1 点在参考面上沿距离(range)向逐像素移动,此时对应的雷达波视角 θ 逐渐变化($\theta + \delta\theta$)。由式(6)可得干涉相位随 θ 变化的关系: $\sigma_{\phi_{\text{ref}}} = \frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta - \alpha) \cdot \sigma_{\theta}$ 。以欧洲空

间局环境资源卫星一号(ERS-1)为例($\lambda = 5.6$ cm, $\theta = 23^\circ$),取 $B = 100$ m, $\alpha = 15^\circ$,当 θ 变化 0.2° 时,干涉相位变化量为77.549弧度,其中包含12个整周相位跳变(图3)。这说明当 P_1 点在距离向上移动而引起雷达波视角 θ 的一个很小变化量时,它将引起干涉相位很大的变化,并且是以 2π 为周期的规律性变化。此外也不难知道,沿卫星飞行方向,同一列像素对应的干涉条纹连续成直线。因此对于参考面,其干涉条纹是呈规律性变化的密条纹(图版I图4),这就是参考面相位的特点。参考面干涉条纹的形成原理实质上与杨氏双缝干涉实验相同。其实干涉条纹不仅在参考面上表现出这种规律性,对较平坦或呈一定规律变化的表面,其干涉条纹也具有这种特性。

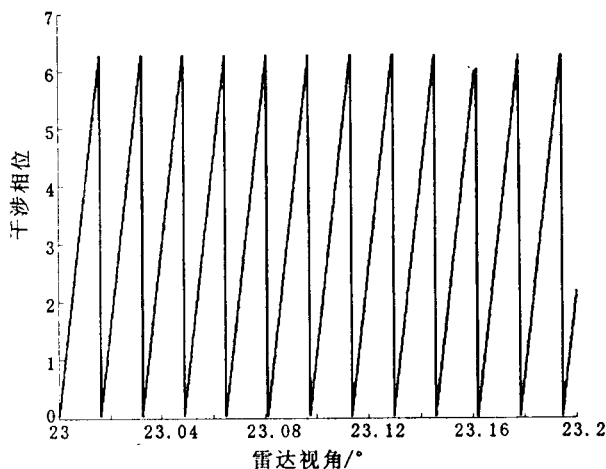


图3 参考面干涉相位距离向随雷达视角变化图

Fig. 3 The change of interferometric phase on reference surface with look angle at range direction.

2.2 地形相位 ϕ_{topo} 构成分析

地表面是一个不规则的复杂曲面。对于地表面上的高程点 P_2 (图5),它在参考面上有唯一的对应点 P_1 ,它们到主影像雷达卫星 S_1 的斜距相等($R_1 = R'_1$)。此时相当于参考面上的点 P_1 沿地表面移动至高程点 P_2 ,引起雷达天线到 P_2 的视角较 P_1 变化了 $\delta\theta$ 。根据图5可得

$$\delta R = 2(R'_1 - R'_2) = 2B \sin(\theta - \alpha) \cdot \cos \delta\theta + 2B \cos(\theta - \alpha) \cdot \sin \delta\theta \quad (7)$$

对于星载雷达系统,地面高程引起的雷达视角变化量 $\delta\theta$ 很小,可近似认为 $\cos \delta\theta = 1$, $\sin \delta\theta = \delta\theta$;而 $B \cos(\theta - \alpha)$ 为两天线的垂直基线距 $B_{\perp}$ ^[4],由此得高程点 P_2 的干涉相位为

$$\phi_{P_2} = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta - \alpha) + \frac{4\pi}{\lambda} B_{\perp} \cdot \delta\theta \quad (8)$$

式中 $\frac{4\pi}{\lambda}B\sin(\theta-\alpha)$ 正是 P_2 点在参考面上的对应点 P_1 的参考面相位 ϕ_{flat} ; $\frac{4\pi}{\lambda}B_{\perp} \cdot \delta\theta$ 是因雷达视角变化 $\delta\theta$ 引起的相位值, 此处雷达视角变化 $\delta\theta$ 是由点 P_2 的地形(高程)因素引起的, 故将 $\frac{4\pi}{\lambda}B_{\perp} \cdot \delta\theta$ 称为地形相位 ϕ_{topo} 。因此高程点 P_2 的干涉相位由一参考面相位 ϕ_{flat} 和地形相位 ϕ_{topo} 之和构成: $\phi_{P_2} = \phi_{\text{flat}} + \phi_{\text{topo}}$ 。

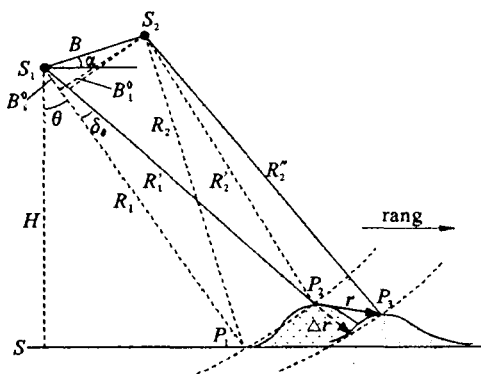


图5 地形、地表形变引起干涉相位变化示意图

Fig. 5 Interferometric phase change resulted of terrain and the change on earth surface.

根据上述分析可知: 地面每一点的干涉相位都由它在参考面上对应点的参考面相位 ϕ_{flat} 和该点高程引起的地形相位 ϕ_{topo} 之和组成。而由前面分析知道, 参考面干涉条纹是规律变化的密条纹, 实际干涉图正是受参考面相位的调和而变得稠密, 增加计算量和相位解缠难度。为了减少计算量和降低相位解缠难度, 在提取地面高程信息的干涉处理中, 都需要从干涉相位中去除参考面相位, 即“去平地效应”处理^[2,4]。

2.3 形变相位 ϕ_{def} 构成分析

由图5, 如果卫星第二次成像时地表已发生形变, 地面点 P_2 沿矢量 r 方向平移到 P_3 点, 点 P_2 的位移量 r 在雷达视线 S_1P_2 上存在投影分量 Δr , 这时雷达天线 S_2 获取目标点 P_3 信息的有关参数与 P_2 点相比已发生了变化, 得到形变后观测影像。 S_1 、 S_2 获得的两影像经配准后进行干涉处理, 得到地表发生形变后的干涉相位 $\phi_{P_3} = \frac{4\pi}{\lambda}(R'_1 - R''_2)$ 。因 $r \ll R'_2$, 且 R'_1 近似平行于 R''_2 , 故 $R''_2 \approx R'_2 + \Delta r$, 则

$$\phi_{P_3} = \frac{4\pi}{\lambda}(R'_1 - R'_2) + \frac{4\pi}{\lambda}(-\Delta r) \quad (9)$$

结合地形相位的分析式(7)、(8), 可得发生形变后的

P_2 点(即 P_3 点)的干涉相位为

$$\phi_{P_3} = \phi_{P_2} + \frac{4\pi}{\lambda}(-\Delta r) = \phi_{\text{flat}} + \phi_{\text{topo}} + \frac{4\pi}{\lambda}(-\Delta r) \quad (10)$$

其中 $\frac{4\pi}{\lambda}(-\Delta r)$ 是由地面点位移引起的相位, 称之为形变相位 ϕ_{def} 。因此地面形变后其干涉相位就由参考面相位 ϕ_{flat} 、地形相位 ϕ_{topo} 和形变相位 ϕ_{def} 构成: $\phi_{P_3} = \phi_{\text{flat}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{def}}$ 。

由上述分析可知: ①当地面发生形变时, 在干涉相位中可探测到这种信号的存在, 并且根据 $\frac{4\pi}{\lambda}(-\Delta r)$ 可知, 对于波长 5.666 0 cm(C 波段)的微波, 当地表沿雷达视线方向发生约 2.8 m 的形变量时, 即可产生一个整周相位(2π)的变化, 在干涉纹图上表现为一条完整干涉条纹的出现。因此采取适当的运算处理, 可从这样的干涉相位中提取出形变相位, 从而研究地表的形变, 这就是差分干涉测量可提取地表形变的原因及其研究内容。②当地面点发生位移时, 其干涉相位就由形变前的参考面相位 ϕ_{flat} 、地形相位 ϕ_{topo} 和形变引起的相位 ϕ_{def} 组成, 要从干涉相位中提取地表形变, 需要从中去除参考面相位和地形相位而得到形变相位, 再由形变相位反演地表形变。③由图5可知, 利用差分干涉获取的地表形变并不是地表实际的形变位移矢量, 而是它在雷达视线方向上的投影 Δr 。

3 InSAR 数据处理及应用

3.1 InSAR 数据处理流程

基于上述对 InSAR 干涉相位组成的分析, 不难理解利用干涉测量和差分干涉测量提取地面高程信息和形变信息的基本原理及数据处理过程。对任一地面点, 其干涉相位主要由参考面相位和地形相位组成。为了降低干涉处理难度, 从中提取地面高程信息, 必须先去除参考面相位影响, 其具体过程见图6。

首先要将两幅雷达影像按同名像素点精确配准, 然后进行干涉处理生成干涉条纹图, 再对干涉图进行去平地效应处理以得到地形相位, 最后利用地形相位提取 DEM。当卫星两次成像期间地面发生形变时, 地面点的干涉相位中就包含有参考面相位、地形相位和形变相位, 要从中提取地表形变信息, 首先要进行去平地效应处理以去除参考面相位, 再利用已有 DEM 或更多的雷达影像作去地形相位处理, 最后根据形变相位提取地表形变场, 图7是三轨

差分干涉测量的基本数据处理流程。

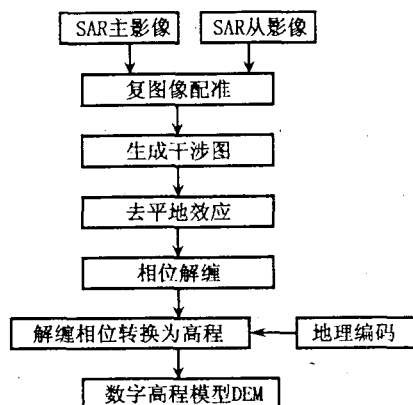


图6 合成孔径雷达干涉提取DEM流程

Fig. 6 Flowchart of abstracting DEM in InSAR.

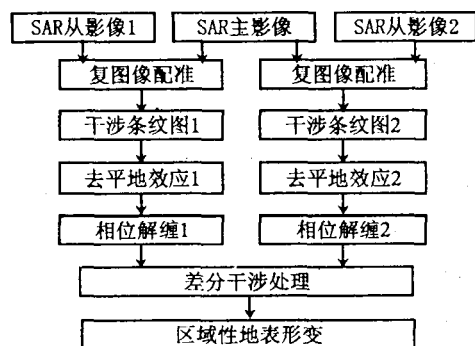


图7 三轨差分干涉测量处理流程

Fig. 7 Flowchart of differential interferometry based on three orbits.

3.2 InSAR 及 DInSAR 应用

根据上述合成孔径雷达干涉和差分干涉处理步骤,我们利用 JERS 于 1993 年 7、8 月获取日本富士山地区的两幅雷达影像数据和 ENVISAT 于 2003、2004 年获取的伊朗巴姆地区的三幅降轨影像数据分别进行干涉和差分干涉处理,得到相应的数字高程模型和地震形变场。图 8(图版 I)为富士山地区影像,图 8(a)是单视复数影像的幅度图,可看出富士山地区的地形特征;图 8(b)是未去平地效应的干涉图,因为有参考面相位的调和,干涉条纹变得稠密模糊。经去平地效应处理后,干涉条纹变得稀疏清晰,可直观地反映地形特征(图 8(c)),在此基础上结合卫星成像参数和成像方程,可提取地面的数字高程模型(图 8(d))。灰度值越高表示高程值越大,高灰度区附近的低灰度团块是影像去相干区,表示该处不能获得正常高程值。对比图 8(d)的 DEM 和图 8(a)的幅度图可知,干涉获取的 DEM 与实际地形一致,说明利用合成孔径雷达干涉可有效提取地

面数字高程模型。

在利用合成孔径雷达差分干涉提取巴姆地震形变场中,我们选取三幅 ENVISAT 卫星 ASAR 雷达影像数据,成像时间分别是 2003 年 12 月 3 日、2004 年 1 月 7 日和 2004 年 2 月 11 日,覆盖面积约 107 km×40 km。选取 2004 年 1 月 7 日影像作为公共主影像,由于 1 月 7 日和 2 月 11 日的两幅影像均是在地震后获取,因此将它们组成的干涉对作为地形对,其干涉相位视为不受形变影响的地形相位;将 1 月 7 日与 2003 年 12 月 3 日获取的影像组成形变对,因为这两幅影像获取时间跨越地震时间,其干涉相位就包括了地形相位和地震形变引起的相位。将两个干涉对按图 7 的步骤进行处理,得到相关结果见图 9(图版 I)。图 9(a)就是经去平地效应后的地形对干涉图(地形相位);图 9(b)是去平地效应后的形变对干涉图,图中右下角是地形引起雷达影像畸变而产生的噪声区。分析图 9(b),由于有地形相位的调和,其干涉条纹变得密集,从表面上看与地形对干涉图 9(a)基本没有差别,无法分辨出表示地表形变的相位信息。如果要得到反映地表形变的相位,就必须从图(b)的干涉相位中去除地形相位。根据前面对干涉相位的分解可知,只需将地形对干涉图和形变对干涉图再次进行差分处理(二次差分),就可得到形变相位信息。

图 9(c)就是经二次差分处理得到的表示地表形变信息的干涉图(形变相位),从图中可分析出地震形变场分布及形变程度,将形变相位解缠之后,就可由 $\phi_{\text{def}} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r$ 计算地面各点的形变量 Δr 。由于 ASAR 雷达采用 C 波段(波长 0.056 660 m)微波成像,所以 1 条整周干涉条纹就代表约 2.8 cm 的形变量,初步分析地震造成的最大形变量约 29.6 cm。图中虚线框所标示区域为地震形变最强烈的区域,也是震中所在区域。在虚线框内存在 4 个花瓣状的形变区,它们的形变方向不同,形变程度相差很大。其中形变区 3 与其他三个形变区的形变方向相反,其自身的形变量较大,而且与区域 1 的形变差异极大,因而在两者之间应该存在断裂构造,线 A 为大致的断裂构造线。在形变方向相同的两个区域 1、2 间形变量存在很大差异,单从干涉条纹数分析,区域 1 的最大形变量是区域 2 的 6 倍;此外,区域 3 与区域 4 的形变方向相反,区域 3 的最大形变量是区域 4 的 10 倍,并且两对区域间的变化界线基本在一条直线上,由此估计形变区内还存在一条断裂构造,线

B 为其大致断裂构造线。因此,在震中附近区域地震应力作用使地壳产生“X”型构造及相应形变。利用合成孔径雷达差分干涉提取的上述形变场,可作为地震学家进行地震预测预报、分析地震机理和研究地震发展的重要参考资料。

4 结论

合成孔径雷达干涉测量中的干涉相位是参考面、地形起伏和地表位移等因素贡献的结果。地表未发生形变时的干涉相位由参考面相位和地形相位构成,形变前后两幅影像形成的干涉相位由参考面相位、地形相位和形变相位构成。因此利用干涉测量提取数字高程模型时,影像经配准后形成干涉图的基础上需要去平地效应处理,再进行噪声滤波和相位解缠,最后提取数字高程模型。利用差分干涉测量获取地表形变信息时,除了去除参考面相位外还要剔除地形相位。

利用差分干涉测量可研究地震形变,从获取的地震形变场中分析出地震形变量的大小及方向,并进一步分析出震中位置以及地震形成的主体断裂构造。合成孔径雷达差分干涉测量为地震研究提供了一种新的技术手段和方法。

[参考文献]

- [1] 廖明生,林琚. 雷达干涉测量——原理与信号处理基础[M]. 北京:测绘出版社, 2002:3—100.
- [2] 舒宁. 雷达影像干涉测量原理[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2003:14—16.
- [3] 罗小军,刘国祥,黄丁发,等. 几种卫星合成孔径雷达影像配准算法的比较研究[J]. 测绘科学, 2006, 31(1):19—21.
- [4] Bert Kampes. Delft Object-oriented Radar Interferometric Software User's manual and technical documentation[EB/OL]. 1999: 85—122.
- [5] Giorgio Franceschetti, Riccardo Lanari. Synthetic Aperture Radar Processing[M]. Boca Raton London New York: CRC Press, 1999. 135—241.
- [6] Gordon W Davidson, Richard Bamler. Multiresolution Phase Unwrapping for SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 1999, 37(1): 163—175.
- [7] Curtis W Chen, Howard A Zebker. Network Approaches to Two-dimensional Phase Unwrapping: Intractability and Two New Algorithms[J]. Journal of Optical Society of America, 2000, 17(3): 401—414.
- [8] 刘国祥,丁晓利,等. 极具潜力的空间对地观测新技术——合成孔径雷达干涉测量[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 734—740.
- [8] 毛可,孙景芳,张国英,等. 1995年7月22日甘肃永登5.8级地震前兆异常的研究[J]. 高原地震, 1995, 7(4): 31—40.
- [9] 赵和云,阮爱国. 地电台址大范围介质条件的数值模拟研究[J]. 西北地震学报, 1992, 14(3): 64—70.
- [10] 燕明芝,白亚平,梅秀苹,等. 震(前)兆远场异常与德令哈6.6级地震临震特征分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2004, 25(3): 14—23.
- [11] 燕明芝,白亚平,张维友. 青新交界8.1级地震与远场地电阻率前兆异常的分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2003, 24(6): 58—63.
- [12] 张永仙,余素荣,张晓东,等. 中国大陆西部前兆异常涨落与强震短期预测研究[J]. 地震, 2004, 24(1): 7—18.
- [13] 李献智,侯建智. 应用综合前兆月异常判定地震进入中短期的研究[J]. 地震, 1998, 18(4): 337—347.
- [14] 李献智,李纲. 综合前兆异常月频次在地震预报中的应用及其意义[J]. 地震, 1999, 19(4): 323—330.
- [15] 梅世蓉,冯德益,张国民,等. 中国地震预报概论[M]. 北京:地震出版社, 1993.

(上接 203 页)

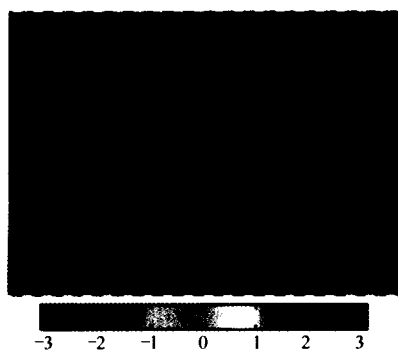
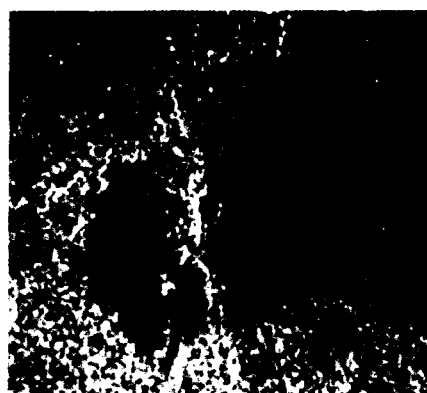


图 4 由参考面形成的规则干涉条纹

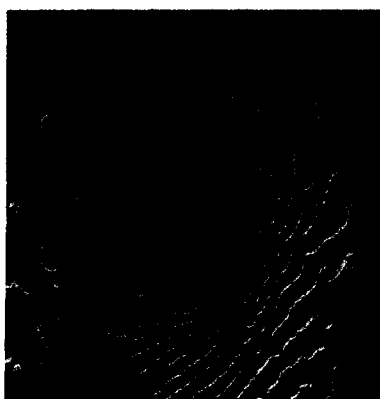
Fig.4 Regular interferogram on reference surface



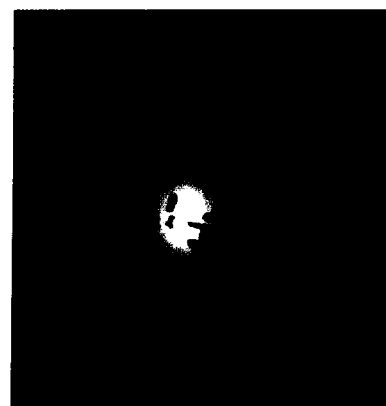
(a) SAR 复数影像幅度图



(b) 未去平地效应的干涉图



(c) 去除平地效应的干涉图



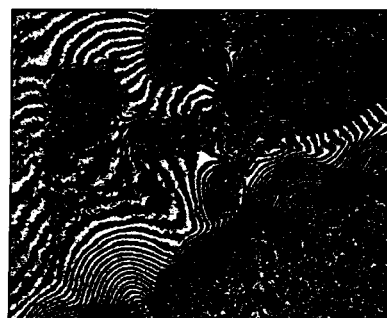
(d) 经地理编码的 DEM

图 8 富士山地区雷达影像经 InSAR 处理的 DEM

Fig.8 DEM of Fujiyama region from InSAR treatment



(a) 地形对干涉图



(b) 形变对干涉图



(c) 二次差分干涉图

图 9 伊朗巴姆地区经 InSAR 处理的地震形变图

Fig.9 Deformation field of Bam earthquake from DInSAR treatment