

# InSAR 技术在地形测量和地质灾害研究中的应用

邓辉<sup>1</sup>, 黄润秋<sup>1</sup>

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 四川 成都 610059)

**摘 要:**合成孔径雷达干涉测量技术为地形测量和地质灾害的研究提供了一个全新的工具。如果在获取两景雷达图像的间隔期间地面发生了变形(比如地面沉降、滑坡、火山活动等),运用 InSAR 技术可以得到亚厘米级精度的地面位移图。本文作者向工程地质学家简略介绍了 InSAR 技术的基本原理以及一些实际地质应用,这些实例说明了 InSAR 技术在地形测量和地质灾害研究中具有独特的能力。

**关键词:**合成孔径雷达干涉测量技术;地形测量;地质灾害

**中图分类号:**P217;P694

**文献标识码:**A

## 0 前 言

地震、火山爆发、滑坡、地面沉降等地质灾害严重地威胁着人类的生命和财产。随着世界各国的高速发展,与人类工程活动有关地质灾害(如地面沉降、滑坡等)出现得越来越频繁,给人们的生命财产带来了灾难性的损失,严重阻碍着人类社会的发展。因此对灾害活动区构造活动及地面变形的监测和测量就显得尤为重要。传统方法主要是靠现场测量手段,这样不但消耗大量人力物力,而且效率较低。近年来,全球定位系统(GPS)技术成为测量地面变形的有力工具,但 GPS 测量得到的只是一些离散点,在点与点之间丢失了大量的重要信息。而新近快速发展起来的合成孔径雷达差分干涉技术(Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry 简称 D-INSAR)为地面变形测量提供了一种全新的手段。它不但弥补 GPS 测点稀疏带来的信息损失,而且能弥补普通 GPS 对高程测量精度不高的缺陷。当然,如果能将差分干涉测量技术和 GPS 结合起来将得到更为精确的三维地面变形。

常规遥感测量技术不但需要地面控制点,而且

受到时间、天气的限制。新近发展的合成孔径雷达干涉测量(InSAR)不但克服了常规摄影测量的缺点,而且具有较高的地面分辨率,更重要的是以 InSAR 为基础发展的差分雷达干涉测量对于高程的变化具有高度的灵敏性<sup>[1]</sup>。这意味着可以利用这一技术来精确地测定许多地球物理现象,如断层运动、地震区形变、火山爆发前的隆起、滑坡前的形变等。

## 1 合成孔径雷达干涉技术基本原理

合成孔径雷达干涉技术(InSAR,即 Interferometry SAR)是以波的干涉为基础,使用平行飞行的两个分离雷达天线(双天线方式)所获得的同一地区的两幅微波图像,或者同一个雷达对同一地区重复飞行两次(重复轨道方式)获得的两幅微波图像,其几何关系见图 1<sup>[2]</sup>,如果两幅图像满足干涉的相干条件,可对它们进行相位相干处理,从而产生干涉条纹(fringe),它反应的是相位的变化,这种图像叫做干涉图(interferogram)。它是因两幅图像对应的地面地形变化、数据获取轨道不同以及其他引起相位发生变化的因素所产生的。如果地面没有变形或受其

收稿日期(Received date):2002-10-11;改回日期(Accepted):2003-03-21。

基金项目(Foundation item):欧洲空间局 ESA 国际合作项目(AO3-147)资助。[Supported by No. AO3-147 international cooperation project of European Space Agency]

作者简介(Biography):邓辉(1969-),博士生,主要从事地质工程、遥感技术在地质灾害研究中的应用。[DENG Hui (1969-), post graduate, mainly engaged in geologic engineering and the use of remote sensing to study geohazards.]

它因素的影响,通过对干涉图像的解缠处理,可以解算出每一点正确的相位,然后由解算出的相位,进一步计算得出地面点到雷达的斜距以及地面点的高程。

利用重复轨道飞行的方法进行 InSAR 数据获取和地面三维信息提取的方法与双天线的原理、目的相同,只是数据获取和处理的方法有所区别。下面介绍采用重复轨道干涉测量的原理(即一般星载干涉雷达)。

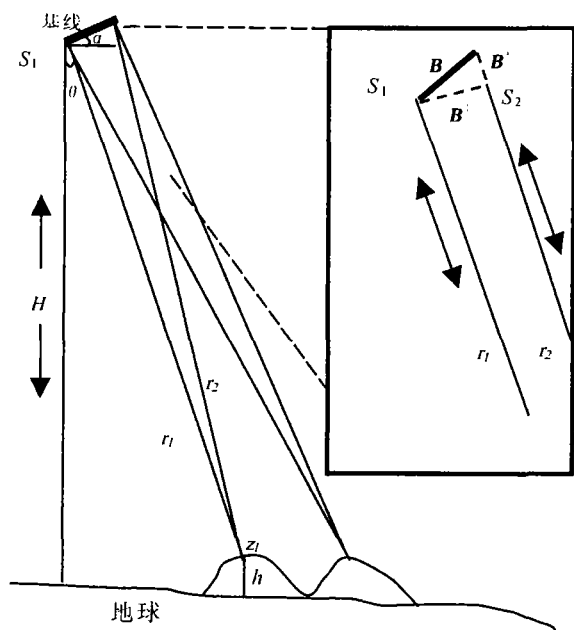


图 1 InSAR 的几何条件  
Fig. 1 The geometry of InSAR

如图 1 所示,假设  $S_1, S_2$  是卫星两次对同一地区成像的位置(即天线的位置),  $S_1$  位置的轨道高度为  $H$ , 两个卫星雷达之间的基线长为  $B$ , 基线的水平角为  $\alpha$ , 入射角为  $\theta$ , 则地面目标  $Z_1$  的高程  $h$  为

$$h = H - r_1 \cdot \cos \theta \quad (1)$$

式中  $r_1$  为  $S_1$  至目标  $Z_1$  的距离。根据余弦定理得

$$\begin{aligned} r_2^2 &= r_1^2 + B^2 - 2r_1 \cdot \cos(\alpha + 90^\circ - \theta) \\ &= r_1^2 + B^2 + 2r_1 \cdot \sin(\theta - \alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $r_2$  为  $A_2$  至目标  $Z_1$  的距离

若令  $\delta r = r_2 - r_1$ , 则由(2)式得

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{(r_1 + \delta r)^2 - r_1^2 - B^2}{2B \cdot r_1} \quad (3)$$

整理(3)式得到

$$r_1 = \frac{\delta r^2 - B^2}{2B \cdot \sin(\theta - \alpha) - 2\delta r} \quad (4)$$

干涉相位是指目标在  $S_1$  和  $S_2$  处接收的回波的相位差  $\Delta\phi$ , 而相位差  $\Delta\phi$  与距离差  $\delta r$ 、波长  $\lambda$  有如下关系

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot \frac{\delta r}{\lambda} \quad (5)$$

考虑到重复轨道的雷达所接收的回波信号都是经过发射和返回路程的信号, 所以有

$$\Delta\phi = 4\pi \cdot \frac{\delta r}{\lambda} \quad (6)$$

将(6)式和(4)式代入(1)式得

$$h = H - \frac{(\frac{\lambda \cdot \Delta\phi}{4\pi})^2}{2B \cdot \sin(\theta - \alpha) - \frac{\lambda \cdot \Delta\phi}{2\pi}} \cdot \cos \theta \quad (7)$$

式中  $\theta, H$  为已知,  $H$  可以由卫星上的雷达高度计测得, 基线距  $B$  和天线的连线与水平线的夹角  $\alpha$  可以由卫星轨道参数确定, 但精度不高, 可以通过一定数量的地面已知点(控制点), 根据其成像原理, 来解算成像时的轨道参数, 用以提高  $B, \alpha$  的精度。相位差  $\Delta\phi$  的计算方法有两种方法: 两复值图像相位直接相减和两复值图像共扼相乘——干涉处理, 两者之间完全等效, 但第二种方法较为常用。通过干涉处理得到的是位于  $[-\pi, \pi]$  之间的相位主值, 必须对其进行相位解缠才能得到  $\Delta\phi$  的相位全值。

式(7)表明了干涉相位信息与雷达参数、天线位置、入射角以及地面高程的关系。这就是 InSAR 能够从干涉相位中得到地面高程的原理。

## 2 InSAR 在地形测量中的应用

利用干涉雷达技术提取数字高程模型的一般步骤是: ① 数据输入, ② 两雷达图像配准, ③ 卫星轨道校正, ④ 进行干涉处理, ⑤ 干涉图的相位解缠, ⑥ 高程转换及地理编码。我们选取了 1996 年 1 月份的两幅 ERS-1 和 ERS-2 卫星轨道号分别为 23467 和 03794 的 Tandan pair 雷达数据进行干涉处理, 所得到的干涉图如图 2 所示, 通过此干涉图进行相位解缠、地面控制点校正后, 得到了重庆地区的地形高度图(图 3)。这两幅图的基线距为 136 m, 所得干涉图的相位差对地形的相当敏感, 经过引入地面控制点校正后, 得到了 2~5 m 的高程精度。

## 3 InSAR 在地质灾害研究中的应用

在地质灾害研究中, 我们最关心的是能测量地

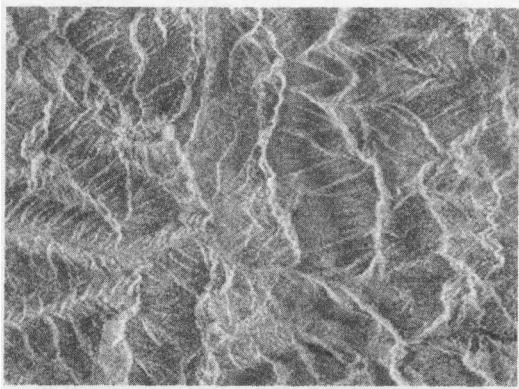


图 2 反应地形的干涉图(重庆)  
Fig.2 The interferogram showing topography(Chongqing)

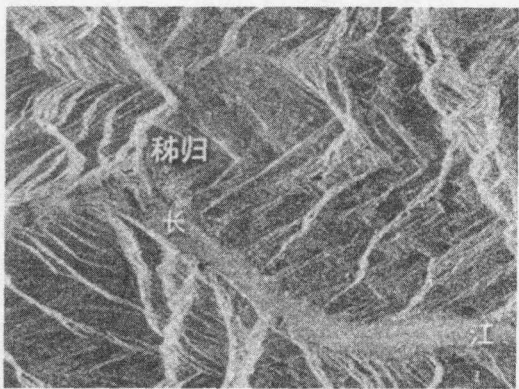


图 3 重庆地区的高程图  
Fig.3 The elevation chart of Chongqing

面变形的差分干涉技术。当卫星在不同时间对同一地点进行两次或两次以上的观测,如果在两次观测的时间段之中,发生了地面位移,那么由这两幅图像获得的干涉图中不仅反应了地面地形的信息,而且包含了地面位移的信息。在 InSAR 测量中如果卫星的两次飞行能精确处于相同轨道,则干涉基线长为零且观测到的相位差与均匀的水平或垂直移动有联系。但实际上基线是有一定距离的,这样就容易出现模糊问题:由单张干涉图判断为由地面高程引起的一些干涉条纹,实际可能是因变化所致,而判断为由变化引起的相位差却是由高程引起。但在包含有地形信息和地面位移信息的干涉图中由地面高程引起的干涉条纹与基线距有关,而由地面变化引起的干涉条纹与基线距无关,所以我们可以用差分的方法消除由地形引起的干涉条纹。这是我们就需要一张能精确反应地形干涉图或精确的 DEM 来小区干涉图中由地形引起的干涉条纹,这种方法就是我们所说的差分干涉雷达技术。如果在两次数据获取期间地表无变化,则差分干涉图上既没有相位偏移也不存在干涉条纹;如果地表出现某些移动,无论是垂直方向还是水平方向,都可产生相位偏移并生成干涉条纹,这种方法能感受到毫米级的变化。观测到的相位变化  $\Delta\phi$  与高程变化  $\Delta h$  之间有如下关系

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\cos\theta}{\lambda}\Delta h \tag{8}$$

式中  $\theta$  为入射角, $\lambda$  为雷达波长。

算法的灵敏度受干涉测量相位估算中的噪声所限制,这种噪声包括接收信号中的热噪声和因基线引起的去相关作用。但通过在较大区域对相位差分求平均能够显著地提高灵敏度更进一步的研究是使用同一物景、不同时刻的 3 次雷达图像,制成 2 个

干涉图像,由 2 个干涉图像解算出每一点的相位,再将相应的相位相减,就会生成一个新的差分干涉图像,差分后的相位就可以用来推算地面变形的变化量。

干涉相位对获取一个像对间的地面地形以及相干位移都很敏感。差分干涉处理的基本思想是将两种影响分开。根据研究区有效的 SAR 数据量和数字高程模型(DEM),可以利用以下一种或几种差分干涉处理方法以及相应需要输入的数据集和处理过程(表 1)。

对于不同的处理方法主要是根据工作者手里有效数据的多少和数据质量的好坏。其中 3 次差分方法比 2 次差分方法的主要优点是不需要 DEM。从

表 1 几种差分干涉处理方法所需条件

Table 1 The requirements of the differential interferometric processing approaches

所需条件	2 次差分干涉	3 次差分干涉	4 次差分干涉	合并复干涉图
数据集	一个 INSAR 像对和 DEM	三幅 INSAR 数据	两个 INSAR 像对	两个 INSAR 相对
地理编码	需要	不需要	不需要	不需要
相位解缠	不需要	需要或不需要	需要	不需要

另一个角度而言,采用 DEM 来产生地形相位,避免了相位解缠中的问题,也避免了在差分相位作用下由于大气和电离层的影响而产生的错误。

3 次差分方法比 4 次差分方法的主要优点在于对于两幅干涉图来说采用了同样的参照几何系统,这样避免了额外的配准和重新取样步骤。从另一方面而言,4 次差分方法使用两个完全无关的像对,允

许在选择数据时具有更大的自由度。

作者正在进行“干涉雷达技术在三峡地质灾害研究中的应用”研究,在目的区主要研究滑坡地质灾害,作者选取了 1996 年 1 月份的两幅 ERS-1 和 ERS-2 卫星轨道号分别为 23610 和 03937 的 Tandem pair 雷达数据来提取反应地形的干涉条纹(图 4)。选用 ERS-1 卫星 1992 年和 1993 年的两幅数据 04729 和 09238(轨道号)来生成另一张干涉图,由于这两幅数据的相干性较小,进行相位解缠有困难,所以我们采用合并复干涉图的方法来生成差分干涉图(图 5)。从图中可以看出,图中除了秭归老

县城处有一点差分干涉条纹外,其余地方几乎没有干涉条纹,其地质意义还有待验证。一方面是由于当地无大型的地面变形,另一方面,由于当地为山区峡谷地区,雷达阴影、叠掩较多,加之电离层、大气以及植被的影响<sup>[3]</sup>,使 04729 和 09238 这两幅数据的相干性较小,可能未能完全反应当地的实际情况。用干涉雷达技术来研究滑坡位移,本身就是一个巨大的挑战,因为滑坡一般均分布于坡度较陡的斜坡上,很有可能受雷达阴影或叠掩的影响,同时对于山区的植被对雷达图像的相干度影响也很大,这是一个值得深入研究的问题。



图 4 秭归地区的干涉图(23610-03937 像对)

Fig.4 The interferogram of Zigui (23610-03937 pair)



图 5 秭归地区的差分干涉图

Fig.5 The differential interferogram of Zigui

干涉雷达技术在别的地质灾害研究中已取得了良好的结果:如监测地面沉降、地震位移<sup>[1]</sup>、火山变形<sup>[4]</sup>、冰川运移<sup>[5]</sup>等等。

其中法国的 Didier Massonnet 于 1992 年用干涉雷达技术研究了同年发生在加利福尼亚的地震<sup>[1]</sup>,取得了突出的成果,成为应用干涉雷达技术研究地面位移的最早的成功范例。Stow R. J. 等 1993 年<sup>[6]</sup>利用差分干涉技术研究了英国约克郡 Selby 煤矿由于地下采矿引起的地面沉降,取得了较好效果。Fruneau Bénédicte 等采用合成孔径雷达的差分干涉技术研究 the Saint-Etienne-de-Tinée landslide 和 the landslide of Séchilienne 这两个滑坡的空间位移情况。对 the Saint-Etienne-de-Tinée 滑坡<sup>[7]</sup>,他们根据 1995~1996 年的雷达数据作出了 6 幅差分干涉图,在图中有许多证据表明滑坡东部的一个小滑块位移相对较大,并且是不稳定的,并测量了位移值,通过与地面监测结果比较表明,合成孔径雷达的差分干涉测量结果与地面监测基本吻合。

## 4 结论及建议

近年来,许多国家的科研单位和个人都开展了 InSAR 和 D-InSAR 技术的应用研究,并取得了一定的应用成果。国际合作与交流十分紧密,为干涉雷达技术的应用研营造了良好的研究环境。作为雷达遥感中的尖端技术,采用时间序列雷达遥感图像的干涉雷达和差分干涉雷达技术,可以精确地测定地面的微小位移变化,它能够解决用常规手段非常困难或无法解决的许多问题,或者提供了更简洁、直接、高效和低成本的方法。当然,本项技术还处于试验性研究阶段,还存在许多亟待解决的技术难题,比如各种干扰因素的消除。

致谢:非常感谢欧洲空间局提供的 ERS1、ERS2 卫星雷达数据。

## 参考文献(References):

[1] Didier Massonnet and Thierry Rabaute. Radar interferometry: limits

- and potential. *IEEE Transaction On Geoscience And Remote Sensing*, 1993, **31**(2): 455~464.
- [2] DEM Generation Using SAR Interferometry. [http://www. geo. unizh. ch/rsl1/projects/DEM-gen-interfero/](http://www.geo.unizh.ch/rsl1/projects/DEM-gen-interfero/).
- [3] Zebker H. A. & Rosen P. A. Atmospheric artefacts in interferometric SAR surface deformation and topographic maps. *submitted to Journal of geophysical Research - Solid Earth*, 1996.
- [4] Massonnet, D., Briole, P. & Arnaud, A. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature*, 1995, **375**: 567~570.
- [5] Goldstein, R. M., H. Engelhardt, B. Kamb and R. M. Frolich, "Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion: Application to an Antarctic Ice Stream". *Science*, 1993, **262**(3): 1525~1530.
- [6] Stow, R. J., "Application of SAR interferometry to survey neotectonic movement due to mining subsidence". *Proceedings of SAR Interferometry Workshop*, 1996. 27. 11.
- [7] Fruneau Bénédicte, Delacourt Christophe & Achache José, Observation and modelling of the Saint-Etienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry. [http://www. geo. unizh. ch/rsl/fringe96/papers/derauw](http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/papers/derauw), 1996.

## The Use of Synthetic Aperture Radar Interferometry to Study Geohazards and Survey Topography

DENG Hui and HUANG Run-qiu

(National Laboratory of Geohazards Prevention and Geo - Environment Protection,  
Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059 China)

**Abstract:** Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) provides a new tool to study geohazards and survey topography. A map of the surface displacement with subcentimeter accuracy can be constructed using, if the Earth's surface deformed between two radar image acquisitions, for example land subsidence, landslide, volcano and so on. This article gives a basic overview of InSAR for engineering geology scientists and presents a selection of geologic applications that demonstrate the unique capabilities of InSAR for studying geohazards and surveying topography.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR); survey of topography; geohazards