第19卷 第2期
2000年6月
紫金山天文台台刊
PUBLICATIONS OF PURPLE MOUNTAIN OBSERVATORY
Vol.19 No.2
June, 2000

合成孔径雷达干涉技术及其在地表形变监测中的应用

丁晓利　陈永奇　李志林　刘国祥　章国宝
(香港理工大学 土地测量及地理资汛讯学系)

摘　要

合成孔径雷达干涉是一项较新的空间测量技术。它使用卫星或飞机搭载的合成孔径雷达系统获取高分辨率地面反射复数影像,每一分辨元的影像信息中不仅含有灰度信息,而且还包含干涉所需的相位信号。干涉技术主要是从覆盖同一地区的多幅合成孔径雷达图像提取干涉相位图,通过影像处理、一些特殊的数据处理方法(如相位解缠等)和几何转化来获取数字高程模型或探测地表形变等。尤其重要的是,用此技术监测地表形变最高可达毫米级精度。近十年来,合成孔径雷达干涉测量技术一直是研究的热点。随着合成孔径雷达干涉技术的逐渐成熟及新一代星载系统的发射,其图像分辨率和产品精度仍会继续得到提高。

由于合成孔径雷达干涉技术具有前所未有的连续空间覆盖、高自动化和高精度的监测地表形变的能力,加上此技术广泛的应用前景,它已经吸收了各国学者的普遍关注。在地壳变形、地震监测和震后形变测量、火山运动、地面下沉以及冰川漂移等方面,均已开始运用合成孔径雷达干涉技术,有些已取得了较满意的成果。

本文首先介绍合成孔径雷达的基本原理、发展及其特点,最后回顾及分析该技术在监测地面变形中的研究及应用。

关键词　合成孔径雷达,干涉技术,地表变形

1　引　言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种使用微波探测地表目标的主动式成像传感器,具有全天候、全天时成像能力及对一些地物表面的穿透特点,使得SAR图像可以应用到许多领域中去。SAR传感器可通过机载或星载的方式对地球表面成像,一般情况下,机载SAR系统使用以固定间距分开的两个天线采集信号,即可同时获得两个不同视角观测的覆盖同一区域的SAR图像;而星载SAR系统使用单天线采集信号,故对某个局部地区来说一次卫星通过只能获得一幅影像,卫星以一定的时间间隔和轻微的轨道偏离(相邻两次轨道间隔为几十米至一公里左右)重复对该地区成像。对于星载SAR系统成像粗数据经相应的地面接收站存储,然后通过SAR处理器进行预处理以形

2000年1月10日收到

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http:/

成标准格式的单视复数图像(SLC image)产品,其中附带有关卫星轨道状态矢量和传感器的重要参数。

经过预处理后的 SAR 图像与一般的可见光和近红外遥感图像存在着本质的区别,除了 SAR 图像的高分辨率特征外,每一分辨元的影像信息记录地表反射的能量(称灰度)大小和相位信号,一般以复数表示,故称之为 SLC 影像。尽管借助于覆盖同一地区的两个 SAR 图像的干涉处理(SAR interferometry, InSAR)和雷达平台的恣态数据重建地表三维模型(即数字高程模型)的精度在 1—20 米的范围内(Santitamnont, 1998),令人的是,利用差分干涉方法(Differiential InSAR,简称 DInSAR)对地球表面形变监测可达毫米级精度(Fujwara 等,1998;Massonnet 等,1997;Nakagawa 等,1997),而且具有连续空间覆盖特征,从这个意意义上来说,这种技术为我们提供了前所未有的对地观测新途径。

1951 年,Carl Wiley 首次发现多普勒频移(Doppler shift)现象能用来逻辑地合成一个更大的雷达孔径,因而极大地改善了真实孔径的方位向(Azimuth)分辨率(Curlander, 1991),自此,掀起了对合成孔径雷达的理论和应用研究的高潮。近十年来,欧美一些发达国家对机载和星载(包括航天飞机)的合成孔径雷达的理论和应用做了大量的研究,并获取了大量的商用 SAR 图像,其中以欧洲空间局的 ERS-1/2、日本的 JERS-1 和加拿大的 RADARSAT 等卫星SAR 图像为代表,应用最普遍的是 ERS-1/2 获取的SAR 图像。最为可喜的是欧洲空间局继 ERS-1/2 操作取得成功后计化在 2000 年 11 月发射一颗 ENVISAT-1 卫星,该卫星是一多学科、多任务的遥断平台,其中掘带一高级 SAR 传感器 ASAR,具有五种不同操作模式,将可以满足不同类型用户的需要提供不同分辨率、不同割幅(Swath)大小的高质量 SAR 图像。

本文首先简要介绍SAR 传感器及其成像特征,然后分析差分干涉方法的基本原理、应用中的局限性和改善途径,最后回顾和总结该技术在与地壳变形有关的地震监测和震后形变测量、火山运动、冰川漂移、地面下沉以及山体坡监测等方面应用的现状和前景。

2　SAR 传感器及其成像特征

(1) SAR 的成像几何及投影方式

以星载SAR 系统为例,其成像几何如图 1 所示,SAR 以一定的侧视角 θ 和一定的覆盖范围发射雷达脉冲、回收并记录每一分辨元的地表反射信号。拿 SAR 图像应用较成功的 ERS-1 卫星(欧洲空间局,1991 年 7 月 16 日发射)来说,它使用 C 波段(5.7cm,5.25Hz)垂直极化方式,最大割幅(Swath)约为 100km,卫星轨道高度为 785km。SAR 属于斜距投影方式,如图 2 所示,斜距方向垂直于卫星飞行轨道,沿此方向SAR 以一定的斜距间隔(即斜距分变率)探测地表目标,沿卫星轨道方向被称

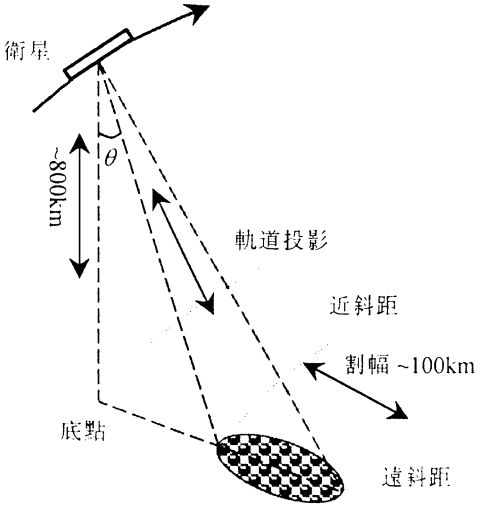

图 1　SAR 成像几何

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http:/

为方位向，关于SAR的这两维分辨率将在下节中进一步讨论。

从SAR卫星地面接收站获取的粗数据需要经过SAR后处理器的预处理，将其转化为如图3所示的等斜距(iso-range)和等多普勒(iso-Doppler)的影像矩阵(Small，1998)，每一像元(i 行 j 列)信号以复数形式表示为：

$$P(i,j)=a+b\cdot i=\sqrt{a^2+b^2}\cdot e^{-i\varphi} \tag{1}$$

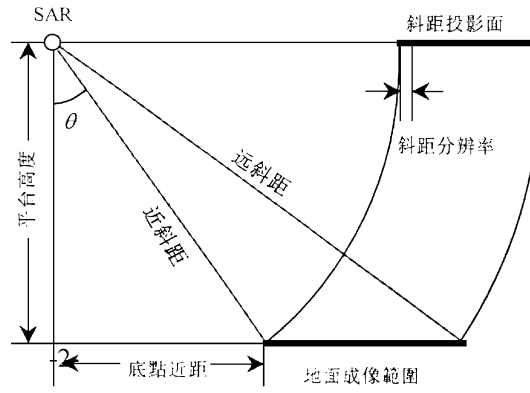

图2 SAR的斜距投影

其中，$\sqrt{a^2+b^2}$ 为振幅(即灰度值)，$\varphi\in[-\pi,\pi)$ 为相位值，实际上相位值与传感器中心至地面目标的斜距 R 有关，即：

$$R=\frac{2k\pi+\varphi}{4\pi}\cdot\lambda \tag{2}$$

这里，λ 为雷达所使用的微波波长，k 称为整周模糊值。图3所示的影像一般被称为单视复数图像(Single-look-complex (SLC) image)。

(2) SAR成像分辨率及其优点和局限性

对于一个合成孔径雷达系统，设其使用雷达波长为 λ，天线物理孔径长为 L_a，则其方位向(搭载平台飞行方向)分辨率为 δx^S：

$$\delta x^S=L_a/2 \tag{3}$$

而真实孔径雷达系统的方位向分辨率 δx^T 随天线物理孔径长度的增加而提高，且与探测斜距 R 有关，即：

$$\delta x^T=R\lambda/L_a \tag{4}$$

例如，1995年11月发射升空的加拿大卫星ARDARSAT，轨道高度为798km，雷达波长为0.056m，天线孔径为15m，如果使用真实孔径雷达操作模式，方位向分辨率将为3.0km；使用合成孔径操作模式的方位向分辨率大大提高，达到7m左右。

脉冲压缩技术运用到SAR系统后其斜距(垂直平台飞行方向)分辨率 δR_r 不再受脉冲长度(以时间为单位)的限制，而只与频率带宽(Frequency bandwidth) B_r 有关，即：

$$\delta R_r=c/(2B_r) \tag{5}$$

其中，c 为光速。RADARSAT使用的频率带宽为 3.03×10^7Hz，则斜距分辨率为4.947m。

SAR传感器具有如下的优点：(1) 全天候、全天时成像能力；(2) 成像分辨率与平台高度无关(从(3)和(5)式不难看出)；(3) 雷达波束能穿透云层。这些优点是可见光及近红外传感器所不具备的，尤其是SAR不受云层的约束，这样使得对赤道附近地区的探测变得较为容易，因为这些地区常常被云层所覆盖，而常规遥感是无能为力的。表1列出了目前使用较为广泛的几种商用星载SAR系统及其特征参数。

从SAR的侧视即斜距投影特点不难看出，对于高山地区和建筑物密集的城区成像时不可避免地存在雷达波束迭掩(Layover)和雷达阴影(Shadowing)现象(舒宁，1996)，这是

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://

雷达成像的几何局限性。

表 1　几种商用卫星 SAR 系统

卫星 SAR 系统	发射时间	设计任务时间	轨道高度	波段(波长)	极化方式	侧视角(度)	割幅宽度	备注
ERS-1	1991 年 7 月 16 日	5 年	785km	C 波段 5.7cm	VV	20-23	100km	
ERS-2	1995 年 4 月 20 日	4 年	785km	C 波段 5.7cm	VV	20-23	100km	
EVISAT-1	2000 年 11 月	5 年	799.8km	5 种模式	HH 或 VV	15-45	100-405km	待发射
JERS-1	1992 年 2 月	2 年	570km	L 波段 23.5cm	HH	35-38	75km	
RADARSAT	1995 年 11 月 4 日	5 年	793-821km	C 波段 5.7cm	HH	20-59	45-500km	

3　合成孔径雷达干涉技术的基本原理

自从 1969 年首次应用合成孔径雷达干涉技术(SAR Interferometry,以下简称 InSAR)对金星和月球观测以来(Zebker,1986),InSAR 技术开始发展,尤其是近十年来,欧美等发达国家已开始致力于研究使用该技术生成大规模的数字高度模型(Digital Elevation Model, DEM)和研究使用该技术监测地表形变。特别是其测量精度可达毫米级精度的潜能及连续空间覆盖的能力,已被认为是前所未有的新的空间观测技术。众所周知,使用差分 GPS 技术监测地表位移无疑是一个很好的选择,但 GPS 只对有限数目的离散点监测,而且 GPS 的垂直分量一直是相对较弱的一项。对于典型的一景 SAR 图像(对应实地范围 100km×100km,设平均分辨率为 20m×20m),如果全部使用 GPS 观测,则大约需要 2.5×10^7 台接收机,毫无疑问这将是极不经济的。

下面将以如图 4 所示星载重复轨道为例简要说明 InSAR 的基本原理。如前所述,对某一局部地区来说卫星以一定的时间间隔和轻微的轨道偏离(一般相邻两次重复轨道间隔为几十米至一公里左右)重复对该地区成像,正是这种轨道重复的轻微偏离为干涉处理提供了条件。让我们考察在 S_1、S_2 空间位置的两个 SAR 和地面任意一点 P 构成的面。S_1、S_2 至地面点 P 的斜距(Slant range)分别为 R_1、$R_1+\Delta r$,H 为 S_1 到参考面的高度,基线 B 是两个卫星轨道的偏离量,相对于 R_1 来说,B 是一个非常小的量。

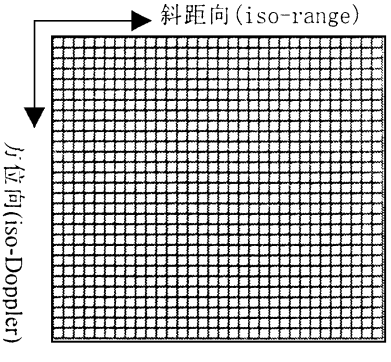

图 3　SLC 复数图像坐标系

从 S_1 发射雷达信号到目标点 P 且返回到 S_1 得

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http:/

到测量相位 ϕ_1，由于分辨元内后向散射特性(Backscattering character)引起相位偏移 ϕ_{obj}，卫星至 P 点的瞬时斜距为 r_0。设雷达信号波长为 λ，那么：

$$\phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} r_0 + \phi_{obj} \tag{6}$$

同样，对于位于另一轨道上的卫星 S_2 可以得到相同的结论，即：

$$\phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}(r_0 + \Delta r) + \phi_{obj} \tag{7}$$

其中，Δr 为 S_2 至 P 的斜距相对于 S_1 至 P 的斜距的差异量。将(6)和(7)式相减，得到以斜距差表示的相位差(Phase difference)：

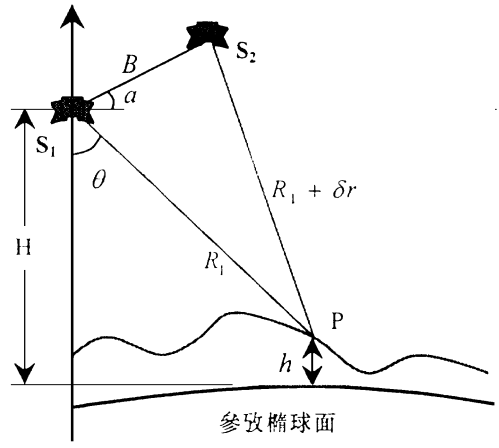

图 4 InSAR 几何

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta r \tag{8}$$

这里，相位差 ϕ 通常被称为干涉相位(Interferometric Phase)或绝对相位差。设两个空间配准的复数图像分别为 C_1 和 C_2，则干涉相位图(ϕ_G，Interferogram)可通过 C_1 和 C_2 的复共轮相乘可得(Santitamnont，1998)，即：

$$\phi_G = C_1 \cdot C_2^* \tag{9}$$

通过两个 SLC-SAR 图像计算所得的干涉图 ϕ_G，而相位差 $\phi_g \in [-\pi, \pi)$，与(8)式中的 ϕ 相比存在整周模糊度的问题(参考式(2))，为了计算地面点的高程或监测地表形变量，必须确定每一配准分辨元对应的整周相位数，这是 InSAR 技术中具有挑战性的处理环节，被称为相位解缠(Phase unwrapping)。目前，所采用的相位解缠算法可分为两类：1) 基于路径的数论方法，2) 基于最小二乘的数字处理方法(Ghiglia，1998)。但适用于一般情况的可靠而有效的算法需要进一步研究(Small，1998)。

实际上，绝对干涉相位对应于斜距差，根据卫星轨道数据(也称为状态矢量)可计算空间基线长度 B 及其高度角 α，由三角函数关系和相应的几何变换可最终计算地面点的高程即获得 DEM(Zebker 等，1986)。在 InSAR 处理中干涉图的生成、滤波、相位解缠和基线估计是极为重要的处理环节。

对于监测地表形变的处理思路如下：首先选择重复时间间隔尽量短(不含形变，如 ERS-1/2 Tandem 方式，重复间隔仅一天)的两个 SLC-SAR 图像，用于生成反映 DEM 的干涉相位图 ϕ_h；然后选择跨越变形发生时间段且覆盖同一地区的另外一对 SLC-SAR 图像生成包含地形起伏和变形信息的相位图 ϕ_S，将 ϕ_h 从 ϕ_S 中减去便可得到净的反应形变的相位图 ϕ_d(对应于沿侧视方向由变形引起的斜距差改变量 δr_d)；最后根据相应的基线参数及几何关系计算垂直位移量 δh 和水平位移量 δ_S。基于SAR 图像序列的这种处理思想即被称为差分雷达干涉方法(Differential SAR interferometry，简称 DInSAR；Fujiwara 等，1998；Goldstein 等，1997；Massonnet，1993，1997a)。其处理流程如图 5 所示，值得注意的是：所有的 SAR 图像应配准到同一影像空间，另外，ϕ_h 不仅可以借助于两个 SAR 图像干涉生成，还可以利用已有的 DEM 和轨道参数模拟生成。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http:/

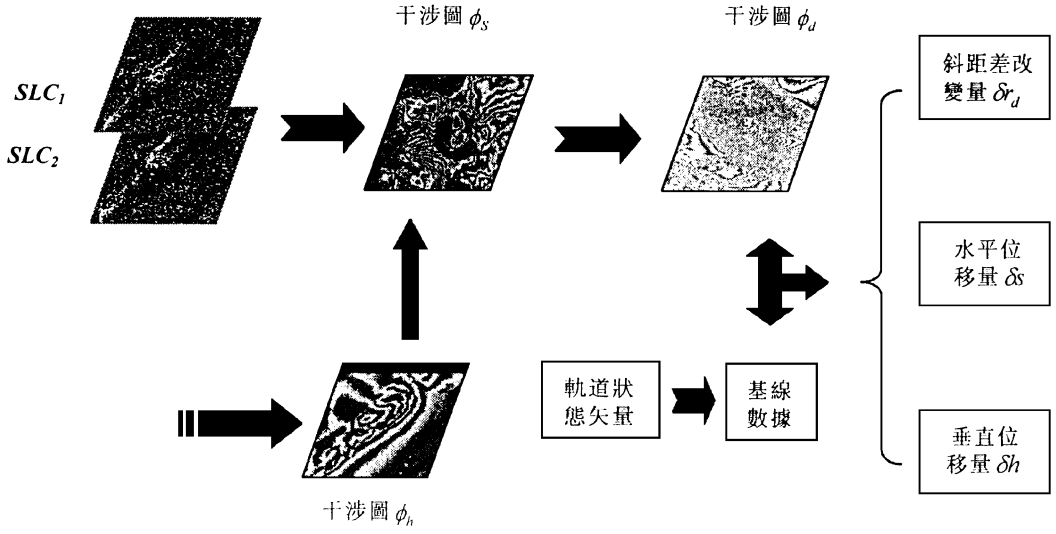

图 5　差分干涉处理流程

实际上,星载 InSAR 技术中直接影响结果精度的两个最关键的因素是:

(1) 干涉图的质量;

(2) 轨道状态矢量(卫星平台的瞬时位置和速度)的精度。

未解缠干涉图的质量通过 SLC-SAR 图像的相关性来衡量,相关性越高,表明所生成的干涉图质量越好,而影响相关性的主要因素包括:(1)空间失相关(与基线长度有关);(2)获取图像的时间失相关(尤其与地表植被变化有关);(3)成像时的气象条件不相同;(4)两次成像间地面变形;(5)传感器 SAR 的热噪声;和(6)处理中所引起的相位误差(Gens 等,1996)。因此,选择 SAR 图像时一般要注意时间间隔和基线的状况,基线的长短不仅影响空间相关性而且影响高程和形变量相对于干涉相位差的灵敏度(Li 等,1990;Small,1998)。另外,气象所引起的相位延迟差别(Goldstein,1995;Massonnet,1995a)及解缠算法的可靠性也是至关重要的。

如 ERS-1/2 的轨道粗度算是最高的(JERS-1 和 RADARSAT 的轨道精度相对较低),达到 20cm,然而,这种精度仍难满足 InSAR 的要求(Santitamnont,1998),因此,不少学者采用基于联系点(Tiepoints)的最小二乘算法优化轨道状态矢量(轨道参数模型不尽相同)或直接优化基线长度和高度角(Atlantis,1999;Kimura 等,1997)。

4　差分干涉方法在地表形变监测中的应用

从已有的研究报告可以看出,InSAR(包括 DInSAR)技术应用领域比较广泛,除了用于大规模的数字高程模型(DEM)的建立和地形制图外,其它的应用领域包括洋流(Ocean currents),水文(Hydrology)、极地研究(Polar research)、地震(Seismic events)、火山灾害(Volcanic hazards)、地表沉降(Land subsidence)、森林研究(Forestry research)和山体滑坡(Landslide)等。随着 InSAR 技术的发展,其应用领域将不断扩大。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http:/

1989 年，Gabriel、Goldstein 和 Zebker 三人首次使用差分干涉方法利用 SEASAT-SAR 数据(SEASAT 于 1978 年 7 月 28 日发射，SAR 成像任务持续时间 105 天，使用 L 波段)对美国 California 的 Imperial Valley 区域进行了垂直位移监测的试验。在这一地区，由于黏土(Clays)的吸水性引起地表收缩和膨胀(Gabriel 等，1989)。自此，星载 SAR 数据(尤其是 ERS-1/2 和 JERS-1 SAR 数据)和航天飞机 SAR 数据(如 SIRC/X、SAR)不断地被用于地球表面变形监测的研究中，许多试验结果表明：利用差分干涉方法监测地表形变的精度在厘米或毫米级。正如前已提及，这一技术的监测精度、连续空间覆盖能力和较高自动化处理特征表明了它具有很强吸引力的技术优势。下面将重点回顾和总结差分干涉(DInSAR)技术近十年来在地表形变监测中下述 5 个方面的应用情况：

(1) 地震变形；

(2) 火山地表移动；

(3) 冰川漂移；

(4) 地面沉降；

(5) 山体滑坡。

(1) 地震监测

地震灾害是地壳变形的直接结果，对地壳变形过程的监测和震后测量具有重要的意义，至今人们仍在探索具有连续空间覆盖及动态监测地壳变形能力的方法。目前监测地壳变形主要依赖于 GPS 技术、VLBI 技术、水准测量等传统方法，但这些方法局限于有选择性地监测一些离散站点；对于震后位移一般采用 GPS 和水准测量方法同样具有选择性地量没测一些特征点，如台湾 9.21 级级大地震震后断裂带(车笼埔断层、大茅埔-双冬两大断层)位移已经采用 GPS 和水准方法测量完毕(台湾经济部中央地质调查所，1999)。1997 年，Ponte 率先提交了使用差分干涉雷达技术预测地震的初步研究报告(Ponte，1997)，但结果不太令人满意。根据 Zebker 等人观点(1994)，差分干涉技术应用于地震预测还有很长的路要走。然而，研究结果显示使用该技术测量震后位移却具有很好的前景。

Massonnet 等人最先基于 ERS-1 SAR 数据使用差分干涉技术对 1992 年 6 月 28 日发生在美国 California Landers 的 7.3 级地震震后位移场(Displacement field)进行测量，他们使用地震前(4 月份)和震后(7 月和 8 月)获取的几对 SAR 影像分别生成干涉图用以测量地震所造成的位移(Massonnet 等，1993)；Zebker 等人(1994 年)对这一地区的震后位移也做了相似的研究。他们的研究结果表明，使用 DInSAR 技术测量位移的精度与常规野外精密测量结果的精度相当。随后，一些学者对上述同一地区使用该技术做了进一步的研究(Peltzer 等，1994)。针对 1993 年发生在美国 California Eureka Valley 地区的标 6.1 级地震，相似的研究也有相继报道(Massonnet 和 Feigl，1995b；Peltzer and Rosen，1995)。Murakami 等人(1994)使用 JERS-1 SAR 数据研究美国 California Northridge 地震所造成的形变，他们认为：L 波段(JERS-1)SAR 数据比 C 波段(ERS-1/2，RADARSAT)SAR 数据更能有效地探测震后位移，因为 L 波段的雷达信号比 C 波段信号更能穿透植被，而且对空间和时间的相关更加有利(Fujiwara 等，1998)。

(2) 火山地表移动监测

火山爆发是最严重的自然灾害之一，使用常规方法监测其运动、变化和发展是相当困

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://

难的,除了安全的原因外,主要是SAR 传感器的穿透云层的能力和全天候、全天时的成像特点极其适合于火山运动的监测。差分干涉技术已经应用于对火山的制图、建立 DEM 以及监测其形变。机载 TOPSAR 系统(使用 C 波段,NASA DC-8 飞机)最先用于对世界上几个火山(如意大利的 Vesuvius)成像,获取的 SAR 图像主要用于 DEM 的建立(Alberti 等,1996),目的是以此分析火山坡度分布,严溶厚度和宽度,并提出灾害预防措施。

火山爆发由地表以下不同层次的严浆压力和剧烈运动所造成,1995 年,Massonnet 等人基于 DInSAR 技术使用 ERS-1 SAR 数据揭示了意大利 Sicily 的 Etna 火山运动所引起的地表形变信号(Massonnet 等,1995c)。1997 年,Briole 等人也选取 Etna 火山作为研究对象,使用 ERS-1 从 1992 年 5 月到 1993 年 10 月获取的 SAR 图像序列考查了 1986—1987 年、1989 年多次火山爆发后所造成的地表变形(主要是下沉)(Briole 等,1997)。除此之外,还有很多学者考查了类似的问题。所有这些研究表明:应用 DInSAR 技术动态监测火山运动具有巨大的潜力。

(3) 冰川漂移监测

极地冰川运动受极地内部的不稳定性和全球气候的变化等诸多因素的复杂影响。监测冰川漂移速度和冰川边缘的位置变化,对于研究冰川对全球气候变化的反应和其活动的物理机制有着重要的意义。冰川漂移速度相对较高(一般平均每天几十厘米),因此,监测时间间隔不能太长。1993 年 Goldstein 等人率先使用卫星 SAR 差分干涉技术对 Rutford 冰川运动速度和其边缘变形进行了监测(Goldstein,1993)。Kwok 和 Fahnestock (1996)使用四个依次间隔 3 天的 ERS-1 SRA 图像序列对 Greenland 的东北部生成了高分辨率的 DEM 和冰川位移图(Kwok 等,1996)。类似的研究表明,ERS-1/2 Tandem 方式为使用 DInSAR 技术监测冰川位移提供了极好的机会。

(4) 地面沉降监测

地质构造和板块运动和人为因素如地下水抽取、固体矿物、石油及天然气的开采等因素都会导致地面沉降。许多学者已经报道使用 DInSAR 技术测量因地下开采而引起的地表沉降的精度可达厘米或毫米级精度(Carnec 等,1995;Massonnet 等,1997c)。由于地下开采而引起的地表下沉速度一般较慢,年平均下沉量不超过几厘米,以前的研究证明该技术用于监测这种大范围(至少几十平方公里)的地表下沉不失为一种有效的方法。然而,由于地质构造和板块运动引起的地表下沉速度相对缓慢(如几年时间才可能产生厘米级左右的下沉量),因而从较短时间间隔的 SAR 图像序列探测这种地表下沉量已超过了 DInSAR 技术的能力,而使用相隔几年的 SAR 图像对时,图像之间的相关性将可能相当低,另外成像时大气条件的差异也会增加问题的复杂性。

(5) 滑坡监测

Achache 等人(1995 年)和 Fruneau 等人(1996 年)对法国南部的 Saint-Etienne-de-Tin 滑坡现象使用 DInSAR 技术进行了监测,几十个干涉图使用 ERS-1/2 SAR 数据序列生成并从中提取位移梯度图,利用它们模拟该地区的变形模型,处理结果与常规方法离散观测吻合程度很高。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http:/

5 结 论

合成孔径雷达干涉技术不仅可以从SAR图像序列提取干涉相位图并利用其基线参数派生大规模的反应地形起伏的数字高程模型(DEM),而且还可以使用差分干涉相位图及其基线参数估计地表变形,其精度可达毫米级。这是目前InSAR技术研究比较活跃的两大方面。尽管InSAR技术目前还处于研究试验阶段,但其表现出来的高分辨率、连续空间覆盖能力、高精度和高自动化处理等特征已吸引了众多学者投入极大的研究热情。而其中的技术研究热点在于:(1) 覆盖同一地区的SAR图像序列间精确配准,(2) 高质量的干涉图的生成和处理(包括滤波和相位解缠),(3) 轨道状态矢量的精化或基线估计。随着InSAR技术的不断发展,它将为地表变形自动化监测提供强有力的支持。

参 考 文 献

[1] 台湾经济部中央地质调查所(Central Geological Survey, Moea), http://www.moeacgs.gov.tw/921/index4.htm, 1999.

[2] 舒 宁,雷达遥感原理,测绘出版社,北京,1996.

[3] Achache, J., B. Fruneau and C. Delacourt., Proceedings of the Second ERS Applications Workshop, London, 6-8 December 1995, pp. 165-168.

[4] Alberti, G., S. Esposito and S. Ponte., *Int. J. Remote Sensing*, **17** (1996), 1797-1801.

[5] Atlantis Scientific Incorporation, EVInSAR User's Guide, pp. 13-17, 1999.

[6] Briole, P., D. Massonnet and C. Delacourt., Geophysical Research Letters, **24** (1997), 37-40.

[7] Carnec, C., C. King and D. Massonnet., Measurement of land subsidence by means of differential SAR interferometry, Proceedins of the Fifth International Symposium on Land Subsidence, The Hague, The Netherlands, pp. 139-148, 1995.

[8] Curlander, J. C., Synthetic Aperture Radar System and Signal Processing, Wiley & Sons, Inc., pp. 13-49, 1991.

[9] Fruneau, B., C. Delacourt and J. Achache, Observation and modeling of the Saint-Etiennede-Tin landslide using SAR interferometry, FRINGE 96, http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/papers, 1996.

[10] Fujiwara, S., P. A. Rosen., *Journal of Geophysical Research*, **103** (1998), 2411-2426.

[11] Gabriel, A. K. et al., *Jounal of Geophysical Resarch*, **94** (1989), 9183-9191.

[12] Gens, R. and J. L. Van Genderen, Analysis of the geometric parameters of SAR interferometry for spaceborne systems, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 31(B2), pp. 107-110, 1996.

[13] Ghiglia, D. C. and M. D. Pritt, Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms and software,

[14] Goldstein, R. M., et al., *Sience*, **262** (1993), 1525-1530.

[15] Goldstein, R. M., *Geophys. Res. Lett.*, **22** (1995), 2517-2520.

[16] Goldstein, R. M. and Werner, Radar ice motion interferometry, Florence 97, http://earthl.esrin.esa.it/florence/, 1997.

[17] Haynes, M., et al., Major urban subsidence mapped by differential SAR interferometry, http://earthl.esrin.esa.it/florence/papers/data/capes/index.html, 1997.

[18] Kimura, H. and M. Todo., Baseline estimation using ground points for interferometric SAR, IGARSS '97, pp. 442-444, 1997.

[19] Kwok, R. and M. A. Fahnestock, Ice sheet motion and topography from radar interferometry, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, **34** (1996), 189-200.

[20] Li F. K. and Goldstein R. M., *IEEE Trans. On Geoscience and remote Sensing*, **28** (1990), 88-97.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http:/

[21] Massonnet, D. et al., *Nature*, **364** (1993), 138-142.

[22] Massonnet, D., and K. L. Feigl, *Geophys. Res. Lett.*, **22** (1995a), 1537-1540.

[23] Massonnet, D., and K. L. Feigl, *Geophys. Res. Lett.*, **22** (1995b), 1541-1544.

[24] Massonnet, D., P. Briole and A. Arnaud., *Nature*, **375** (1995c), 567-570.

[25] Massonnet, D. and H. Vadon, Land subsidence caused by the East Mesa geothermal field, California, observed by SAR interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, **24** (1997a), 2677-2680.

[26] Massonnet, D., Producing Ground Deformation Maps Automatically: the DIAPASON Concept, 1997 IEEE International Geoscience and Remote Sensing, IGARSS '97. Remote Sensing-A Scientific Vision for Sustainable Development. **3** (1997b)(002), 1338-1340.

[27] Massonnet, D., T. Holzer and H. Vadon, Land subsidence caused by the East Mesa geothermal filed, California, observed using SAR interferometry, *Geophysical Research Letters*, **23** (1997c), 2677-2680.

[28] Murakami, M. et al., *Journal of Geophysical Research*, **101**, B4, 8605-8614.

[29] Nakagawa, H., M. Tobita, S. Fujiwara, S. Ozawa, K. Nitta, M. Murakami, M. Shimada, P. A. Rosen, Fault model of the 1995 Neftegorsk, Northern Sakhalin, earthquake based on crustal deformation detected by JERS-1/SAR interferometry, Geoscience and Remote Sensing, 1997. IGARSS '97. Remote Sensing-A Scientific Vision for Sustainable Development, 1997 IEEE International, **4** (1997), 1585-1587.

[30] Peltzer, G. et al., *J. Geophys. Res.*, **99** (1994), 21971-21981.

[31] Peltzer, G. and P. Rosen., *Science*, **268** (1995), 1333-1336.

[32] Ponte, S., ERS tandem data for earthquake prediction: preliminary results, Florence 97, http://earthl.esrin.esa.it/florence/, 1997.

[33] Price, E. J. and D. T. Sandwell: Small-scale deformation associated with the June 28, 1992 Landers, California Earthquake mapped by SAR interferometry, http://topex.ucsd.edu/evelyn/landers-paper.

[34] Santitamnont P., Interferometric SAR processing for topographic mapping, doctoral dissertation from Hannover University, 1998.

[35] Small D., Generation of Digital Elevation Models through Spaceborne SAR Interferometry, doctoral thesis, Dept. of RLS, University of Zurich, 1998.

[36] Zebker, H. A. and R. M. Goldstein, Topographic mapping from Interferometric Syn-thetic Aperture Radar Observations, *J. Geophys. Res.*, **91** (11986), 4993-4999.

[37] Zebker, H. A. et al., On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers aerthquake, *Journal of Geophysical Research*, **99** (1994), 19617-19634.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http:/