

新学科·新发现·新技术

极具潜力的空间对地观测新技术 ——合成孔径雷达干涉*

刘国祥^①, 晓利^①, 陈永奇^①, 李志林^①, 郑大伟^{①②}

① 香港理工大学土地测量及地理资讯学系; ② 中国科学院上海天文台, 上海, 200030

摘要:“合成孔径雷达干涉 (InSAR)”是近十年发展起来的对地观测遥感新技术。它具有从覆盖同一地区的星载(或机载)合成孔径雷达复数图像对提取干涉相位图,借助于雷达成像时的姿态数据重建地表三维模型(即数字高程模型)的巨大潜力。尤其是基于多幅雷达复数图像处理的差分干涉技术(D-InSAR)可以用于监测地表形变,精度可达厘米级甚至更高,其监测空间分辨率是前所未有的。介绍了 InSAR 和 D-InSAR 的基本原理,对影响干涉结果的一些重要因素做了分析,重点回顾了展望了差分干涉技术在与地表形变有关的地震监测和震后形变测量、地面前下沉和山体滑坡、火山运动监测等方面应用的现状和前景。

关键词:合成孔径雷达干涉;差分干涉;数字高程模型;地表形变

中图分类号: P237 文献标识码: A 文章编号: 1001-8166(2000)06-0734-07

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、全天时成像能力和高分辨率的特点。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同时采集信号,即可获得两个不同视角且覆盖同一区域的 SAR 图像。而星载 SAR 系统一般使用单天线采集信号,对某个局部地区来说一次卫星通过只能获得一幅 SAR 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 1 km 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成标准格式的单视复数 (Single Looking Complex, SLC 产品,其中附带有卫星轨道的姿态(即空间位置和速度矢量)和传感器的系统参数。经过预处理

后的 SAR 图像每一分辨元的影像信息记录地表反射的能量(灰度)大小和相位信号,一般以复数表示,故称之为 SLC 影像。基于覆盖同一地区的 SAR 图像对的干涉处理 (SAR Interferometry, 以下简称 InSAR) 生成数字高程模型 (DEM) 的精度,目前为 1 ~ 20 m, 但极有潜力进一步提高^[26], 许多学者认为, InSAR 将可能成为全球 DEM 建立的唯一有效技术。基于 InSAR 技术的扩展,差分干涉方法 (Differential InSAR, 以下简称 D-InSAR) 对地球表面形变监测精度可达厘米级或更高^[8, 20], 而且具有连续空间覆盖特征(惯用技术如 GPS、VLBI 和 SLR 等仅具有离散特征),从这个意义上来说,这种技术为我们提供了前所未有的对地观测新途径。

1969 年, InSAR 技术首次应用于对金星和月球的观测。1974 年, Graham 等首次提出用 InSAR 技术来制图的构想,接下来的十多年,未见有关 InSAR 技术较为深入的文献报道,直到 1986 年,

* 第一作者简介: 刘国祥 (1968-), 男, 湖南临澧人, 讲师 (在读博士生), 主要从事干涉雷达数据处理、地理信息系统 (GIS) 研究。

收稿日期: 2000-01-04; 修回日期: 2000-04-04

JPL 的 Zebker 等^[28]才首次发表了他们使用机载 SAR 系统获取的数据生成 DEM 的实际接结果。1989 年, Gabriel 等^[9]首次使用 D-InSAR 技术监测地面垂直位移。近 10 年来, 欧美一些发达国家对合成孔径雷达干涉技术的理论和应用作了大量的研究, 并获取了大量的商用 SAR 图像(以 ERS-1/2、JERS-1 和 RADARSAT 等卫星 SAR 图像为代表)。由于 ERS-1/2 卫星的定轨质量好, 轨道数据精度相对较高, 图像质量好且二者能构成联合飞行方式(Tandem Mode, 相互重复周期仅 1 天), 故它们获取的图像应用最为普遍。

2 干涉技术的基本原理

下面将以如图 1 所示星载重复轨道为例说明 InSAR 和 D-InSAR 的基本原理。S₁、S₂ 分别为参考轨道、重复轨道上对地面分辨元 P 成像的 SAR 瞬时空间位置, 且到 P 的斜距分别为 R₁、R₂, H 为卫星高度, 基线 B 是两个卫星轨道的偏离量, T 为基线倾角。为处理方便, 取参考椭球面上点 P' 且到 S₁ 具有斜距长度 R₁, 称其为参考侧视方向, Q₀ 为参考侧视角, W₀ 为地形起伏引起的侧视角增量。相对于 R₁、R₂ 来说, B 显得非常小, 故可认为 R₁ 与 R₂ 平行, 设卫星前后两次通过期间点 P 没有发生地表形变, 则它们间的斜距差(δR₊ + δR₁)和雷达绝对干涉相位差的关系可近似表达为:

$$\begin{aligned} \Delta h_{e+} &= h_e - h \approx -\frac{4c}{\lambda} \cdot B \sin(\theta_0 + W_0 - a) \\ &\approx -\frac{4c}{\lambda} \cdot (B_{\parallel} + W_0 B_{\perp}) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, λ 为雷达波长; W_R、W_T 分别为由椭球面和地形起伏引起的斜距差分量; B_∥ = B sin(θ₀ - a), B_⊥ = B cos(θ₀ - a) 分别表示基线相对于参考侧视方向的平行和垂直分量。从图 1 不难看出, 对总相位差 Δh_e 来说, 椭球面贡献 Δh_e 和地形起伏贡献 Δh_a 分别为:

$$\Delta h_e = -\frac{4c}{\lambda} \cdot B_{\parallel} \quad \Delta h_a = -\frac{4c}{\lambda} \cdot B_{\perp} W_0 \quad (2)$$

实际处理时, 为了得到反应地形起伏的净相位和随后处理(如相位解缠)的方便, 椭球面相位去除(Flat Earth Phase Removal)是必需的。最后地面分辨元 P 的高程为 h = H - R₁ cos(θ₀ + W₀)。

从式(1)和(2)可以看出, P 到雷达的斜距之差可以依赖于相应的相位差来求解, 使得斜距差具有很高的精度, 即达到子波长级精度(如 ERS-1/2 SAR 系统使用 C 波段, 波长为 5.6 cm)。然而, 实际处理时, 利用空间配准的 SAR 图像间对应像素的直

接相位之差可以生成存在整周模糊度的干涉相位图, 因此须利用相位解缠(Phase Unwrapping)技术求解其相位整周数^[12, 16]; 另外, 从式(1)和(2)可以发现, 基线数据 B 和 a 的确定也是求解地面高程的关键所在^[27]。因此, InSAR 的本质是: 从空间配准的合成孔径雷达图像对提取干涉相位图并解缠, 最后借助于雷达成像时的姿态数据可生成 DEM。

下面来探讨差分干涉技术的基本原理。若卫星前后两次通过期间发生了地表形变, 即地面分辨元 P 移动量为 D (如图 1 所示), S₂ 的侧视斜距变为 R_d, W_d 为形变引入的侧视角增量, 对于星载 SAR 系统, 三个斜距方向可认为相互平行(即 R₁ ∥ R₂ ∥ R_d), 因此 W_d 趋于 0, 沿 R_d 方向因位移引入的斜距改变量为 WR_d, 值得指出的是, D-InSAR 仅能观测到地面点沿侧视方向的位移量。此时的绝对干涉相位差 Δh_{e+d} 可如下表达:

$$\begin{aligned} \Delta h_{e+d} &= \frac{4c}{\lambda} (WR_e + WR_1 + WR_d) \\ &= -\frac{4c}{\lambda} (B_{\parallel} + WR_e B_{\perp} - WR_d) \end{aligned} \quad (3)$$

去除椭球面相位影响后包含地形起伏和地表形变信息的干涉相位 Δh_{a+d} 为:

$$\Delta h_{a+d} = -\frac{4c}{\lambda} (W_0 B_{\perp} - WR_d) \quad (4)$$

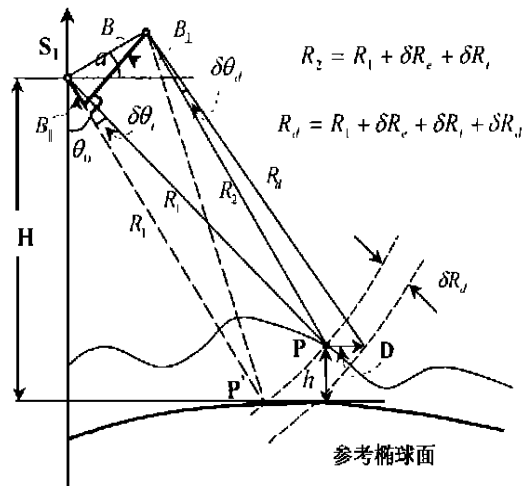


图 1 InSAR 和 D-InSAR 原理

Fig. 1 Working theory of InSAR and D-InSAR

基于 InSAR 的处理, 利用一个干涉像对(成像间未发生地表形变)可以生成仅反映地形的第一个绝对干涉相位图 h_{e1}(经过解缠后); 另外, 利用另一个干涉像对(成像间已发生地表形变, 可与前一干涉对共用一幅图像)可以产生包含地形和形变信息的

第二个绝对干涉相位图 h_{t2} (经过解缠后)。由式 (2) 和 (4) 不难得出求解形变量 WR_d 的差分方程:

$$h_{t2} - \frac{B_{\perp 2}}{B_{\perp 1}} h_{t1} = \frac{4C}{\lambda} WR_d \quad (5)$$

一旦沿 SAR 侧视方向的形变量被求出, 水平位移量和垂直位移量便可通过分解得到。上述处理模式称为三通 (Three Passes) D-InSAR 技术。如果研究区域存在足够高精度的 DEM, h_{t1} 亦可通过 DEM 数据、SAR 成像几何和轨道状态矢量数据模拟合成^[27], 因此实际所需 SAR 图像为 2 幅, 这种处理模式称为两通加 DEM (Two Passes plus DEM) 方法。由此可以看出, D-InSAR 的处理中, SAR 图像配准、相位解缠和基线估计等仍是关键的处理环节。

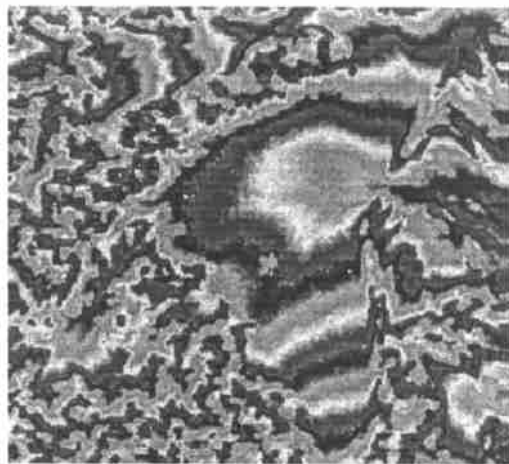
3 影响因素分析

3.1 干涉相位图

从干涉技术的原理可以看出, 干涉相位的质量是影响产品精度的关键因素之一。如果覆盖同一地区 SAR 图像对间相位信号的相关性很低, 干涉相位图质量会很差, 因而会导致干涉产品精度降低或处理失败。一些实际存在的因素降低了相位间的相关性 (相关测度的表示及计算可参考有关文献 [16, 27]), 其中, 物理因素包括: ① SAR 系统的热噪声; ② 时间失相关 (由成像期间的地表反射特性变化引

起, 如植被生长、土壤湿度变化等); ③ 影像预处理引入的相位错误; ④ 气象变化。而几何因素包括: ① 空间失相关 (由基线长度和轨道轻微不平行引起); ② 雷达成像的几何局限性, 从 SAR 的侧视即斜距投影特点不难看出, 对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^[1]。特别地, 由于时间和基线失相关的影响, 有效的干涉对常常较难获得, 这一问题需要在雷达系统设计和优化方面加以改进^[16]。例如, ERS-1/2 的 Tandem 操作方式, 两颗卫星重复同一地区的时间间隔仅为一天, 这样大大降低了时间失相关的可能性。

目前, 一般只能通过选择具有合理时间间隔和基线长度的 SAR 图像对以及滤波技术来提高干涉图质量^[16, 20]。Gens^[11] 处理的干涉图和相关图例子如图 2 所示, 使用的两个原始 SAR 图像由 ERS-1/2 Tandem 方式获取: ERS-1, 1996 年 1 月 16 日; ERS-2, 1996 年 1 月 17 日。研究目标是中国宁夏某地区。图 2(b) 显示了它们之间的相位相关性, 颜色越深表示相关性越低, 反之亦然。相应于相关图, 图 2(a) 表达了相位干涉图 (未解缠), 平坦地区的干涉条纹 (Fringe) 清晰可见, 而高山地区和河流区域的干涉条纹比较模糊 (即出现不连续现象), 这将增加相位解缠的难度。



(a)



(b)

图 2 宁夏某地区的干涉相位图

Fig. 2 Interferometry image of one site in Ningxia

3.2 基线参数

除了干涉相位图的质量是关键因素外, 基线参数的合理确定也是必须考虑的问题。理论上来说, 基

线参数可通过轨道状态矢量数据 (卫星平台的瞬时位置和速度) 直接求解, 如 ERS-1/2 的轨道精度算是最高的 (JERS-1 和 RADARSAT 的轨道精度相

对较低),其轨道径向精度达到 30 cm,然而,这种精度仍然难以满足干涉处理的要求^[4, 26]。因此,不少学者建议采用基于联系点(Tiepoints)的最小二乘算法优化轨道状态矢量或直接求解基线参数^[4, 27]。

4 差分干涉技术在地表形变监测中的应用

干涉技术除了用于大规模的数字高程模型的建立和地形制图外,其它的应用领域包括洋流、水文、极地研究、地震、火山运动、地表沉降、森林研究和山

体滑坡等。用于地表形变监测的差分干涉数据处理过程包括干涉影像对的空间配准、重取样、干涉图的生成、相位解缠、基线参数计算、差分干涉图的生成和几何转换等过程,一般处理流程如图 3 所示, φ_{G2} 其中为含形变和地形的干涉图, φ_{G1} 为仅含地形的干涉图, φ_d 为反应地表形变的二次差分干涉图。以下将重点回顾和展望 D-InSAR在与地表形变有关的地震监测和震后形变测量、地面下沉和山体滑坡监测、火山运动等方面应用的现状和前景,并讨论了应用中亟待解决的实际问题。

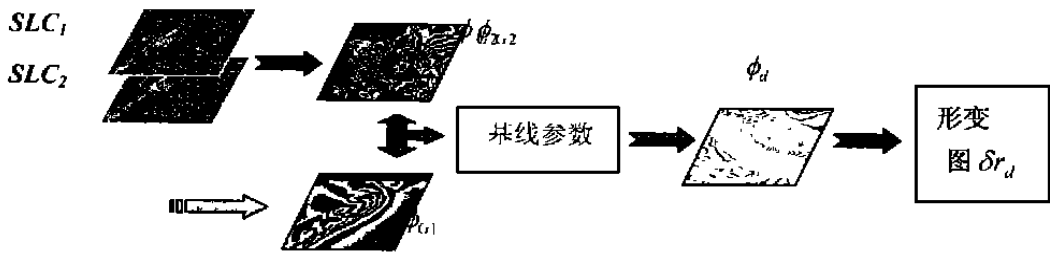


图 3 差分干涉处理流程

Fig. 3 Process of differential interferometry

4.1 地震监测和震后测量

地震灾害是地壳形变积累的结果,对地壳形变过程的监测和震后测量具有重要的意义。目前,监测地震灾害主要依赖于 GPS 技术、VLBI 技术、SLR 技术、水准测量、应力测量和张力测量等传统方法,但这些方法局限于有选择性地监测一些离散站点,具有高分辨率、连续空间覆盖和高精度等特征的 D-InSAR 技术给与地震有关的形变监测提供了一种极具潜力的新途径。1997 年, Ponte^[25] 率先提交了使用差分雷达干涉技术预测地震的初步研究报告,但结果不太令人满意。Zebker 等^[29]认为,差分干涉技术应用与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。1993 年, Massonnet 等^[17] 最先基于差分干涉技术使用 ERS-1 SAR 图像序列对 1992 年 6 月 28 日发生在美国加利福尼亚州 Landers 的 7.3 级地震震后位移场进行测量,他们使用地震前(4 月)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; 1994 年, Zebker 等^[29]也发表了利用这一技术对该地区震后位移进行测量的相似研究报告。他们的研究表明:使用 D-InSAR 技术测量震后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^[24]。针对 1993 年发生在美国加利福尼亚州尤里卡-瓦利(Eureka Valley)地区的 6.1 级地震,类似的研究也有相继报道^[18, 24]。Murakami^[22]也使用 JERS-1 SAR 数据研究了美国加利福尼亚州 Northridge 地震所造成的形变,他认为: 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,而且对降低时间的失相关更加有利^[18]。

4.2 地面沉降与滑坡监测

地质构造、板块运动和人为因素如城市发展、地下水抽取、固体矿物、石油及天然气的开采等都会导致地面沉降。许多学者已报道使用 D-InSAR 技术测量因地下开采而引起的地表沉降的精度可达厘米级或更高^[6, 21]。由于地下开采而引起的地表下沉速度较慢,年平均下沉量一般不超过几厘米,已有的研究表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 D-InSAR 技术的极限,而使用相隔几年的 SAR 图像对时,相位相关性将可能相当低甚至完全失相关。

山体滑坡也是极具危险的自然灾害, Achache 等^[2]和 Fruneau 等^[7]对法国南部 Saint-Etienne-de-Tin 的滑坡现象应用 D-InSAR 技术进行监测, 几十个干涉图使用 ERS-1/2 SAR 图像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, 处理结果与常规离散监测方法吻合程度很高。

4.3 火山运动监测

火山爆发由地表以下不同层次的岩浆压力及其剧烈运动所造成, 它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难的, 而干涉技术极其适合其监测。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, 如意大利的维苏威火山 (Vesuvius) 成像, 获取的 SAR 图像主要用于 DEM 的建立^[3], 目的是以此分析火山坡度分布, 岩溶厚度和宽度, 并提出灾害预防措施。Massonnet 等^[19]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变形信号。1997 年, Briole 等^[5]也选取埃特纳 (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), 然而应用 D-InSAR 技术动态监测火山运动仍然处于研究之中。

此外, 极地冰川漂移速度和冰川边缘位置变化的监测对其活动的物理机制解释和研究全球气候的变化具有重要的意义, D-InSAR 已表现出良好的技术优势^[13, 15]。随着干涉雷达系统和相应数据处理技术的发展和完善, D-InSAR 技术的应用领域将会继续扩展。

4.4 应用中的问题

从干涉雷达的理论研究来看, 尽管一些处理算法和处理流程组合还存在一些争议^[26], 但对一些核心问题的看法基本上趋于一致, 如相位干涉图 (或差分干涉图) 的生成和解释、相位误差来源、基线参数的重要性等。理论上来说, 差分干涉技术可以监测厘米级或更小的地表形变, 且具有高分辨率和廉价的特点, 但实用上, 还存在一些问题没有实质性的解决。前已述及, 由于现有卫星 SAR 系统的局限性, 尤其是时间失相关的影响等因素导致有效的干涉对常常很难获得, 因此注重新一代 SAR 系统的优化设计与实现是相当重要的^[27], 其中包括轨道重复周期、雷达系统参数设计等, 以利于获取高质量的干涉像对。如 2000 年 2 月, 美国影像制图局 (NIMA) 和宇航局 (NASA) 已联合发射航天飞机进行为期 11 天

的覆盖全球 80% 地区的制图任务飞行 (Shuttle Topography Mission, SRTM), 且使用单轨双天线 (基线长度为 60 m) 操作模式。这将为 DEM 的建立和制图提供极好的干涉数据; 欧洲空间局将于 2000 年年底发射一颗名为 ENVISAT-1 卫星, 该卫星是一多学科、多任务的卫星遥感平台, 其中携带一个高级的 SAR 传感器 ASAR, 具有 5 种操作模式, 将可以满足不同用户的需要, 提供不同分辨率、不同割幅大小的高质量 SAR 图像, 系统综合参数更趋合理; 另外, 加拿大也将发射 RADARSAT-2 卫星。此外, 空间和时间尺度上的大气变化 (尤其是湿度的变化) 导致相位延迟影响也是亟待解决的问题^[14, 20, 21], 尤其是大气中的水汽分量的影响, Zebker 等的研究表明: 20% 相对湿度的变化可导致 10 cm 左右的变形量误差, 在基线条件较差的条件下, 可导致 100 m 左右的高程误差, 如果使用基于气象改正模型的方法解决这一问题, 这要求有及时的高分辨率气象数据, 实现起来具有很大的难度, 目前, 一般使用多基线方法来平滑气象变化的影响^[16, 29]。

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范围的反应地形起伏的数字高程模型, 而且还可以使用二次差分干涉相位图及基线数据估计地表形变量, 其精度可达厘米级甚至更高。其表现出来的高分辨率、连续空间覆盖能力、高精度等特征已吸引了众多学者投入极大的研究热情。目前, 干涉技术仍处于研究发展阶段, 除了新一代 SAR 系统的优化设计与实现外, 而一些相应数据处理技术的研究热点在于: 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; ④ 大气变化引起的相位延迟减弱或消除的有效途径。随着合成孔径雷达干涉技术的不断发展, 其应用领域将继续扩大, 特别地, 它将为建立全球 DEM 提供良好的技术支持; 与其它传统观测手段相配合, 也将为地表形变引起的自然灾害监测提供前所未有的空间对地观测新途径。

致谢: 本研究得到了香港理工大学建设与地政学院的“区域战略发展计划”项目资助, 同时第一作者对香港理工大学提供的博士奖学金深表谢意。另外感谢德国汉诺威大学 Gens 博士提供了有价值的

图像数据(图 2).

参考文献

- [1] 舒宁. 雷达遥感原理 [M]. 北京: 测绘出版社, 1996. 12~ 35.
- [2] Achache J, Fruneau B, Delacourt C. Applicability of SAR interferometry for operational monitoring of landslides [A]. In: Proceedings of the Second ERS Applications Workshop [C]. London, 1995. 165~ 168.
- [3] Alberti G, Esposito S, Ponte S. Three-dimensional digital elevation model of Mt. Vesuvius from NASA/JPL TOPSAR [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(10): 1 797~ 1 801.
- [4] Atlantis Scientific Incorporation. EV InSAR User's Guide[Z]. Canada: Atlantis Scientific Incorporation, 1999. 13~ 17.
- [5] Briole P, Massonnet D, Delacourt C. Post-eruptive deformation associated with the 1986-87 and 1989 lava flows of Etna detected by radar interferometry [J]. Geophysical Research Letters, 1997, 24: 37~ 40.
- [6] Carone C, King C, Massonnet D. Measurement of land subsidence by means of differential SAR interferometry [A]. In: Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence [C]. The Hague, The Netherlands, 1995. 139~ 148.
- [7] Fruneau B, Delacourt C, Achache J. Observation and modeling of the Saint-Etienne-de-Tin landslide using SAR interferometry [EB/OL]. FRINGE 96, 1996, <http://www.geo.unizh.ch/rs1/fringe96/papers>.
- [8] Fujiwara S, Rosen P A. Crustal deformation measurements using repeat-pass JERS-1 Synthetic Radar Interferometry near the Izu Peninsula, Japan [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B2): 2 411~ 2 426.
- [9] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(B7): 9 183~ 9 191.
- [10] Gens R, Van Genderen J L. SAR interferometry: issues, techniques, applications [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(10): 1 803~ 1 835.
- [11] Gens R. Quality assessment of SAR interferometry data [D]. Hannover: Hannover University, 1998. 23~ 45.
- [12] Ghiglia D C, Pritt M D. Two-dimensional Phase Unwrapping Theory, Algorithms and Software [M]. New York: John Wiley & Sons, INC, 1998. 1~ 38.
- [13] Goldstein R M. Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an Antarctic ice stream [J]. Science, 1993, 262: 1 525~ 1 530.
- [14] Goldstein R M. Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry [J]. Geophysical Research Letter, 1995, 22: 2 517~ 2 520.
- [15] Kwok R, Fahnestock M A. Ice sheet motion and topography from radar interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(1): 189~ 200.
- [16] Li F K, Goldstein R M. Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars [J]. IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28: 88~ 97.
- [17] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, *et al.* The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry [J]. Nature, 1993, 364: 138~ 142.
- [18] Massonnet D, Feigl K L. Satellite radar interferometric map of the coseismic deformation field of the M= 6.1 Eureka Valley, California earthquake of May 17, 1993 [J]. Geophysical Research Letter, 1995, 22: 1 541~ 1 544.
- [19] Massonnet D, Briole P, Arnaud A. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry [J]. Nature, 1995, 375: 567~ 570.
- [20] Massonnet D, Vadon H. Land subsidence caused by the East Mesa geothermal field, California, observed by SAR interferometry [J]. Geophysical Research Letter, 1997, 24(8): 2 677~ 2 680.
- [21] Massonnet D, Holzer T, Vadon H. Land subsidence caused by the East Mesa geothermal field, California, observed using SAR interferometry [J]. Geophysical Research Letters, 1997, 23(19): 2 677~ 2 680.
- [22] Murakami M. Coseismic crustal deformations of 1994 Northridge, California earthquake detected by interferometric JERS-1 synthetic aperture radar [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 101(B4): 8 605~ 8 614.
- [23] Peltzer G, Hudnut K W, Feigl K L. Analysis of coseismic surface displacement gradients using radar interferometry: New insights into the Landers earthquake [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(B11): 21 971~ 21 981.
- [24] Peltzer G, Rosen P. Surfacement of the 17 May 1993 Eureka Valley, California, Earthquake Observed by SAR Interferometry [J]. Science, 1995, 268: 1 333~ 1 336.
- [25] Ponte S. ERS tandem data for earthquake prediction: preliminary results [EB/OL]. <http://earth1.esrin.esa.it/florence/>. 1997.
- [26] Santamant P. Interferometric SAR processing for topographic mapping [D]. Hannover: Hannover University, 1998. 1~ 30.
- [27] Small D. Generation of Digital Elevation Models through Spaceborne SAR Interferometry [D]. Zurich: University of Zurich, 1998. 3~ 50.
- [28] Zebker H A, Goldstein R M. Topographic mapping from interferometric Synthetic Aperture Radar observations [J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91: 4 993~ 4 999.
- [29] Zebker H A, Rosen P A, Goldstein R M, *et al.* On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers Earthquake [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(B10): 19 617~ 19 634.

NEW AND POTENTIAL TECHNOLOGY FOR OBSERVATION OF EARTH FROM SPACE SYNTHETIC APERTURE RADAR INTERFEROMETRY

LIU Guo-xiang^①, DING Xiao-li^①, CHEN Yong-qi^①,
LI Zhi-lin^①, ZHENG Da-wei^{①②}

① Dept. of Land Surveying and Geo-Informatics, Hong Kong Polytechnic University;

② Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) is a new and potential technology that has been developed in the last decade or so for observation of the Earth. It can be used to generate large-area (even global) DEM or to detect Earth surface deformation by means of interferometric phase data and attitude data of the radar platform. In particular, Differential InSAR (D-InSAR) has been demonstrated to have unprecedented ability to measure and monitor Earth surface change with excellent characteristics of continuous spatial coverage and nearly automatic processing and high accuracy (up to cm-level or even better). This paper first introduces the basic principles of InSAR and D-InSAR, and summarizes the involved key processing algorithms of interferometric technology, including SAR images coregistration, phase unwrapping and baseline estimation *etc.* Then, some factors, that affect the quality of interferometric products, are generally analyzed, *i. e.*, phase quality and baseline parameters play very important roles on interferometric processes. Finally, emphasis is placed on reviewing D-InSAR applications in measuring and monitoring Earth surface deformations caused by earthquakes, post-seismic displacements, ground subsidence, landslides and volcanic movements.

Key words SAR interferometry; Differential InSAR; Digital elevation model; Earth surface deformation.

欢迎在《地球科学进展》刊登广告

《地球科学进展》是一份综合性的学术刊物。她主要评述国内外地球科学研究进展,介绍全球变化研究、可持续发展研究等综合性跨学科重大研究领域发展态势,报道边缘学科、交叉学科最新信息,推动高新技术在地球科学中的应用。现竭诚欢迎有志宣传、报道自己的相关研究所、开放室在我刊刊登宣传广告,包括图片、文字等,价格优惠。

联系电话: 0931-8271245 联系人: 侯春梅 E-mail: adearth@ns.lzb.ac.cn