

文章编号: 1000-8349(2006)04-0296-12

星载 SAR 干涉技术最新研究进展

陈艳玲^{1,2}, 黄 斌¹, 丁晓利³, 李志伟¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港)

摘要: 简要介绍了 SAR、InSAR、D-InSAR 的发展概况, 以及 InSAR、D-InSAR 的基本原理。重点讨论了 InSAR、D-InSAR 技术的最新理论及存在的问题, 包括多基线 SAR 干涉技术、极化干涉技术、大气效应的削弱、永久散射体方法、InSAR 与 LIDAR 和 GPS 等数据源的融合技术, 以及 InSAR 并行算法等。详细论述 InSAR、D-InSAR 技术在地球科学及气象学等领域所取得的最新进展。最后对 InSAR 技术的发展前景作了展望。

关键词: 天体测量学; 合成孔径雷达 (SAR); 综述; 合成孔径雷达干涉 (InSAR); 差分干涉 (D-InSAR)

中图分类号: P237; P228 **文献标识码:** A

1 引 言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 的概念始于 20 世纪 50 年代^[1], 作为有源系统, SAR 具有全天时、全天候的工作能力, 能够穿透云层, 对某些地物也具有一定的穿透能力, 并能够在不同的微波频段、不同极化状态下得到地面目标的高分辨率图像, 这些独特的优点是其他遥感手段 (如红外遥感、光学遥感等) 所不具备的, 因此很快引起各国的热切关注, 得到飞速发展。

20 世纪 60 年代末, 新兴的交叉学科合成孔径雷达干涉技术 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 出现了。它是 SAR 与射电天文学干涉测量技术的完美结合。当 SAR 扫过地面同一目标区域时, 利用成像几何关系, 通过成像、一些特殊的数据处理和几何转换, 即可提取地表目标区域的高程信息和形变信息。1974 年, Graham^[2] 首次将 InSAR 用于对地观测, 他利用机载 SAR 数据获取了满足 1: 250000 地形图所需的高程数据, 开创了 InSAR 对地观测获取三维信息的先河。1988 年, Goldstein 等人^[3] 开始使用 SEASAT 星载 SAR 数据进行干涉测量的研究, 获得了死亡谷 Cottonball 盆地的地形图, 与已出版的 USGS 的地形图相当吻合。由于 InSAR 技术有效利用了 SAR 的回波相位信息, 测高精度为米级甚至亚米

收稿日期: 2006-03-21; 修回日期: 2006-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40404001、40374003)

级, 而一般雷达立体测量方法只利用灰度信息来实现三维制图, 测高精度仅能达到数十米, 因此该技术迅速引起了地学界及相关领域科研工作者极大的兴趣, 现已成为微波遥感领域的研究热点。

D-InSAR (Differential InSAR, 差分干涉) 技术是在 InSAR 的基础上发展起来的, 它以合成孔径雷达复数据提供的相位信息为信息源, 可从包含目标区域地形和形变等信息的一幅或多幅干涉纹图中提取地面目标的微小形变信息。1989 年, Gabriel 等人^[4]首次论证了 D-InSAR 技术可用于监测毫米级的地表形变。1993 年, Massonnet 等人^[5]利用 ERS-1 卫星 SAR 数据获取了 1992 年 Landers 地震 (M7.3) 的同震形变场, 其结果与弹性形变模型以及其他相关测量数据吻合得相当好。该成果在《Nature》上发表后, D-InSAR 探测地表形变的能力引起了国际地学界的极大重视。实验证明, D-InSAR 技术对垂直方向的形变比较敏感, 并且能够大规模监测几天到几年、厘米级甚至毫米级的形变场信息, 其高分辨率和空间连续覆盖的特征是 GPS、SLR、VLBI 等手段不具有的, 从而可以揭示出更多的地球物理现象, 最终为地球物理学提供一种全新的动态研究途径。

随着 ERS-1、ERS-2、JERS-1、RADARSAT-1、ENVISAT 等 SAR 卫星的成功发射以及新一代星载 SAR 系统 ALOS、RASARSAT-2 的实验研制, 世界上掀起了雷达遥感研究的热潮, InSAR 也逐步走向成熟。目前, D-InSAR 技术在测绘、资源勘探、环境保护、灾害监测、海洋观测、森林调查、农作物估产、国家安全等方面发挥着愈来愈广泛的作用, 日益受到各国政府部门以及科学工作者的重视。本文将简单介绍 InSAR 的基本原理, 详细地论述国内外近年来在 InSAR 理论和应用方面取得的最新进展, 最后对 InSAR 的发展趋势进行了总结。

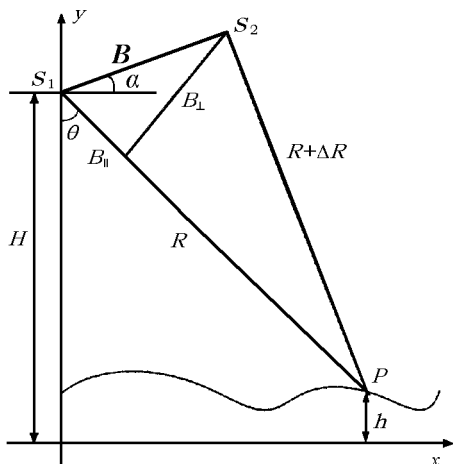
2 InSAR 基本原理

InSAR 测量模式主要有两种: 一种是双天线单轨 (Single Pass) 模式, 主要用来生成数字高程模型, 一般用于机载 SAR; 另一种是双轨 (Two Pass) 模式, 主要用于获取地表变形, 一般用于星载 SAR。下面以重复轨道干涉测量为例, 简要介绍 InSAR 技术的基本原理 (见图 1)。假设卫星以一定的时间间隔和轨道偏离 (通常为几十米到 1 km 左右) 重复对某一区域成像, 并在两次飞行过程中处于不同的空间位置 S_1 和 S_2 , 则空间干涉基线向量为 \mathbf{B} , 长度为 B ; 基线向量 \mathbf{B} 与水平方向的夹角为基线倾角 α ; S_1 和 S_2 至地面点 P 的斜距分别为 R 和 $R + \Delta R$; 将基线沿视线方向分解, 得到平行于和垂直于视线向的分量 B_{\parallel} 、 B_{\perp} ; H 为 S_1 到参考面的高度; 从 S_1 发射波长为 λ 的信号经目标点 P 反射后被 S_1 接收, 得到测量相位 φ_1 ,

$$\varphi_1 = \frac{4\pi}{\lambda}R + \arg\{u_1\} . \quad (1)$$

同样, 另一空间位置 S_2 上测量到相位 φ_2 ,

$$\varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}(R + \Delta R) + \arg\{u_2\} . \quad (2)$$

图 1 InSAR 基本原理图^[6]

由于 $R \gg \Delta R$, 且 $R \gg B$, 则:

$$\Delta R \approx B \sin(\theta - \alpha) = B_{\perp} . \quad (6)$$

(4)、(5) 两式即为 InSAR 确定高程的原理性公式。

监测形变的 D-InSAR 技术的基本思想如下: 首先选取重复时间间隔尽量短的 SLC 图像对, 用来生成反映数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 的干涉相位图; 然后选择跨越同一目标区域形变发生时间段的 SLC 图像对生成包含地形和形变信息的相位图; 将前后两幅相位图相减, 即得到反映视线向形变的相位图; 再根据相应的成像几何关系计算垂直、水平方向上的形变^[7]。

理论上, 由相位解缠 (相位模糊度解算)、成像几何和轨道参数就可以重建 DEM, 但实际的处理过程相当复杂, 一般包括 SAR 信号预处理、图像配准、生成干涉图、去除平地效应、相位解缠、基线估计、地理编码、DEM 建立等过程。长期以来, 成像处理、复数影像的精配准、相位解缠、大气效应的改正等都是 InSAR 数据处理的重点和难点。从 InSAR 理论提出以来, 大部分研究工作都集中在这些方面。但是, 至今相位解缠以及大气效应的改正仍未得到很好解决。

3 InSAR 理论的最新进展

3.1 多基线 SAR 干涉技术

相位解缠是干涉技术的核心, 也是重复轨道 InSAR 数据处理的关键环节, 通常也是 InSAR 产品的主要误差源之一, 目前仍是 InSAR 获取高质量产品的瓶颈问题。采用多基线干涉技术可以减少甚至避免相位解缠, 从而避免了解缠误差的大面积传播, 得到精度较高的 DEM 或地形图。

多基线 SAR 干涉算法类似于光学干涉中多时相位解缠算法, 采取极大似然估计来估算地

式中, $\arg\{u_1\}$ 和 $\arg\{u_2\}$ 表示不同散射特性造成的随机相位。假设两幅图中随机相位的贡献相同, 则 S_1 和 S_2 关于目标 P 点的相位差

$$\phi = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R , \quad (3)$$

ϕ 也称为干涉相位 (Interferometric Phase), 可由经过配准的两幅 SAR SLC (Single Look Complex, 单视复数) 图共轭相乘得到。根据图 1 中的几何关系并利用余弦定理可得:

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{R^2 + B^2 - (R + \Delta R)^2}{2RB} , \quad (4)$$

$$h = H - R \cos \theta . \quad (5)$$

形^[8,9]。它需要至少 3 幅图像以组成 2 图像对, 其中一图像对的基线距较短, 另一图像对基线距较长, 分别得到 2 幅干涉纹图。先用第一幅干涉纹图对目标区域逐个像元的高程进行粗估计, 然后用第二幅图进行更加精确的估计。基于 1996 年 Ferretti 等人^[10]在多基线干涉研究中提出的相邻像素具有相似的成像几何这一特征, Eineder 和 Adam^[11]利用成像几何完全不同(不同交叉轨道、波长、入射角等)的多幅干涉图, 通过调整干涉图的数量和观测条件, 采用极大似然估计, 不经过相位解缠估算出了绝对高程, 在地形起伏较大区域获得了相当好的结果。

目前, 即使是频率(或波长)、基线距、入射角不同的干涉图像对, 都可以使用这种方法来减少甚至避免相位解缠。可以预见, 这种方法具有极其广阔的发展前景, 在未来多卫星 SAR 干涉数据的融合技术中有很大的发展潜力。

3.2 极化干涉技术

极化 InSAR 将 SAR 极化和 SAR 干涉融为一体, 堪称当今微波遥感领域最为先进的技术^[12]。干涉 SAR 对地物的空间垂直结构和分布比较敏感, 而极化 SAR 可测量每一个像元的全散射矩阵, 可合成包含线性极化、圆极化和椭圆极化在内的多种极化散射信息, 因此对散射体尤其是植被的形状和方向比较敏感。多极化的引入使得 InSAR 在地球物理参数、生物参数的反演, 以及土地利用分类等新领域的应用有了很大改善。最先将多极化概念引入雷达干涉的是 Papathanassiou 和 Moreira^[13], 他们利用 SIR-C/X-SAR (Shuttle Imaging Radar) 重复轨道数据分析了频率、发射/接收天线各种极化方式组合对干涉相干的影响, 指出相干性对极化具有强烈依赖性。Papathanassiou 和 Cloude^[14,15]详细分析了极化在重复轨道 InSAR 中的作用, 于 1998 年提出了极化干涉相干最优过程和基于相干最优的目标分解理论, 从而奠定了极化干涉的理论基础。

由于极化干涉对植被的高度、形状以及方向都比较敏感, 因此相干散射模型与植被高度和结构的反演成为极化干涉研究的热点之一。Papathanassiou 和 Cloude^[16]在极化干涉理论的基础上, 将适合森林参数估计的相干散射模型与极化干涉理论相结合, 提出了单基线极化干涉植被高度参数反演的算法(SBPI)。在此基础上, Cloude^[17]提出了极化干涉 SAR 双基线反演算法(DBPI); 同年, Tabb 等人^[18]基于极化干涉数据进行了相干散射模型的研究, 并将坡度和植被结构引入到模型中。Jong-sen 等人^[19]接着提出一种新的相干性估计的算法—— 6×6 极化干涉矩阵滤波, 并证实这种方法的确能够改善相干性和森林高度估计的精度。于大洋等人^[20]将 Cloude 极化干涉散射模型和 ESPRIT 算法(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique)结合, 利用我国天山地区全极化干涉数据做了森林地区植被树高的反演实验, 与单独使用 Cloude 极化干涉模型相比, 运算速度大大提高。当然, 极化干涉也可用于农作物参数的估计^[21]。

极化干涉另一个重要的应用领域为植被覆盖地区高精度 DEM 的提取。Li 等人^[22]利用 1994 年的 SIR-C/X-SAR L 波段数据在地表植被覆盖茂盛区域进行了提取 DEM 和误差分析的研究, 得到较好的结果。Brandfass^[23]和 Luciano 等人^[24]分别利用 P 波段、P 和 X 波段极化干涉数据在森林地区作了 DEM 信息提取的类似研究。

除了提取物理参数和生成 DEM 之外, 极化干涉还可用于相干斑的滤除、地雷探测等^[25], 其他新的应用领域仍有待于进一步探索。

3.3 永久散射体方法

针对因图像获取期间地表散射特性发生改变引起的失相干以及大气的影响, Ferretti 等人^[26]提出了永久散射体 (Permanent Scatterers, PS) 方法。他们在使用 34 幅 ERS SAR 图像对意大利 Ancona 滑坡进行监测时, 发现存在大量不随时间变化的相位稳定且亮度很高的反射点, 即 PS。它包括一些天然物体 (如坚固的岩层) 和人造物体 (如特制的角反射器、灯柱等)。由于能在长时间间隔内仍保持高度相干, 当它的尺寸小于像元尺寸, 即使基线距超过临界基线距时仍保持较高的相干性^[27], 这大大提高了 SAR 图像的利用率, 也为如 ERS-1/2、ENVISAT 的数据集成提供了条件, 并且能够很好地解决差分干涉技术中失相干、空间失相干以及大气的影响等问题, 在变化缓慢的形变测量中呈现出较强的优势, 现已成为干涉雷达遥感研究的前沿之一。

PS 方法的基本步骤主要包括: PS 候选点的查找、估计并消除大气效应、计算 DEM 误差和 PS 点视线向位移以及提取 PS 点构成不规则网络。其中的关键为 PS 点的识别, 而最有意义的步骤就是由 PS 拟合生成的网络剔除大气对相位的贡献^[28]。获取的 PS 点类似于一个“天然的 GPS 网”, 可被用来探测毫米级的形变 (如监测城市沉降, 反演及分析滑坡和其他地质构造运动^[29], 甚至估算城市个别建筑物的拉伸变形)。

为更好地进行地形测绘和形变监测, PS 技术提出后所开展的相关研究主要集中在数据处理过程中数学模型的不断改进方面。Nutricato 等人^[30]分析了 PS 候选点识别的最优内插和重采样理论, 并在实验中进行验证。Ferretti 等人^[31]使用 PS 方法估计非线性沉降时提出了一种新的滤波方法估计大气对相位的贡献, 同时基于统计假设的局部位移场又提出了解决目标位移的新方案。Colesanti 等人^[32]联合利用星载 SAR 干涉数据序列和稀疏 PS 网络逐点恢复高精度的高程和地面变形信息, 又一次证明 PS 方法是一种实用的监测大面积高精度变形的强有力的工具。乔学军等人^[33]对三峡地区的 ERS 串行数据作了详细的分析, 发现受基线、季节等条件影响保持高度相干的图像对较少, 而该地区已建立的角反射器将会提高 SAR 图像的利用率。

相比 PS 方法数据处理方面的研究, 对 PS 特性的探讨相对较少。Won 等人^[34]利用 AIRSAR 和实验室数据, 研究了沿海地区人工角反射器阵的散射特性, 得出当垂直杆位于水中发射 L 波段 HH、VV 极化状态的微波时可以有效估计水平面变化的结论。

总之, 目前对 PS 干涉技术的研究仍然较少, 已有的成果表明 PS 方法因其自身要求数据量大, 研究区域的类型和大小以及研究对象形变速度均受到限制, 这在很大程度上制约了该方法的广泛应用。其次, 所采用的 SAR 数据大多为 ERS 数据, 若考虑多颗卫星, 则又面临新的问题, 必须考虑不同工作频率、极化方式、入射角、分辨率的 SAR 数据对 PS 的总体影响。此外, 如果 PS 为角反射器, 那么接收信号可能是奇次反射和偶次反射的混合信号, 而偶次反射的距离不能反映真实的斜距, 产生类似于 GPS 中的多路径效应, 需要考虑这一问题如何解决。最后, PS 方法估计并消除大气效应的效果也是一个值得探讨的问题。

3.4 大气效应的削弱

大气对雷达信号的影响主要包括大气折射引起的雷达信号的传播延迟和路径弯曲, 其中传播延迟占主导地位。大气影响 (尤其是大气水蒸汽的影响) 严重损害了 InSAR DEM 以及形变监测的精度。研究表明, 大气相对湿度 20% 的变化会导致 10 cm 的视线向形变监测误差和通

常基线的情况下高达 100 m 的 DEM 的误差, 基线不是最优的情况下所受的影响则更大^[35]。双频或多频观测有助于减少和消除电离层的影响, 而对流层包含 80% 分子质量和几乎所有的大气水汽, 大气水汽变化非常剧烈且规律性不强, 很难模拟, 因此对流层的影响成为 InSAR 测量比较棘手的问题之一。

削弱大气效应的方法有以下几种^[36]: 选取天气条件好的图像对; 将多幅 SAR 干涉图平均; 使用滤波器; 利用外部数据校准。前两种方法削弱了结果的时间分辨率, 因此不适用于连续变形地区。Crosseto 等人^[37]采用随机滤波器来减少在沉降监测中大气对 D-InSAR 技术的影响, 研究结果表明它甚至可以用于单个图像对。利用外部数据源(比如探空气球、地面气象资料、地基 GPS 气象资料等)可削弱 InSAR 中的大气效应。Bock 和 Williams^[38]首先提出用连续 GPS 观测资料减少大气对 InSAR 的影响, Bonforte 等人^[39]证明了 GPS 推算出的全天顶延迟(TZDs)和由对流层模型以及气象数据得出的 TZDs 之间的一致性。由此可以看出, 多种数据源融合来消除大气对 InSAR 的影响具有一定的可行性。Delacourt 等人^[40]综合地面气象观测资料、对流层延迟模型、气象参数垂直梯度模型以及 DEM 来校正大气对 InSAR 的影响, 并给出了实例。

目前利用外部数据削弱大气影响存在的问题是: 外部资料极其有限, 远远达不到 InSAR 对空间分辨率的要求。

3.5 多种数据源融合技术

InSAR 时间分辨率不够、受大气影响明显等局限性限制了 InSAR 数据的应用。InSAR 与多种资料的融合可弥补这一缺陷, 这也成为理论研究的一个热点问题。它主要体现在与 GPS、LIDAR、GIS 数据库、地震网资料以及其他遥感数据源的融合上。下面着重介绍 InSAR 与 GPS、LIDAR 技术相结合的有关研究。

InSAR 与 GPS 数据的结合既可以改善 InSAR 基线估计和相位解缠的质量, 也可以估计和削弱大气层的影响, 并可作为 InSAR 监测地形和形变信息的参考和校准源。

首先, 将 GPS 技术测得的角反射器的精确三维坐标转换成绝对相位值, 利用 GPS 得到的绝对相位值来选取最优积分路径, 确定枝切法解缠过程中孤岛之间解缠相位的关系, 这将会对枝切法相位解缠的质量有所改进^[41]。其次, GPS 与 InSAR 融合可削弱对流层大气水汽在 SAR 干涉图像对成像期间发生变化而引起的失相干, 改进 InSAR 生成 DEM 及监测地表形变的精度。其基本原理是利用 GPS 资料测出天顶延迟和电离层电子含量, 然后通过插值来修正 InSAR 中的大气延迟。Bock 和 Williams^[38]首先提出 InSAR 与 GPS 数据融合的思想, 之后, Williams 等人^[42]、Bonforte 等人^[39]以及 Webley 等人^[43]陆续提出用连续 GPS 网减少 InSAR 中大气引起的噪声。Webley 等人^[43]用 Etna 山区 GPS 网测出 ERS-2 两次成像期间折射率变化引起的延迟 RMS 为 0.6 cm。2004 年, Li 等人^[44]用香港地区连续 GPS 网及地面气象资料对 InSAR 中大气效应建立了模型并加以改正, 结果表明用这两种资料得到的 TZD 模型使干涉图距离的精度改善了 15% 到 39%, 若采用的 GPS 及地面资料更加丰富, 则精度会更高。

美、意宇航局联合地形科学工作组认为, InSAR 技术与激光测高仪(Light Detection And Ranging, LIDAR)配合将是改进地形数据质量最有希望的途径。一般说来, 机载激光测高仪所获取的高程精度要比 InSAR 获取的高程精度高, 在不同的实地条件下, LIDAR 系统高程的

精度可达 10 cm, 但覆盖面积却限于小区域, 远不如星载 SAR 覆盖范围广。两者的结合互相弥补了对方的缺陷, 目前正被用于植被高度的反演和高精度地形图测绘的研究。Harding 等人^[45]首先在 1995 年对全波段 LIDAR 数据和 InSAR 数据作出定性的比较, 得出 InSAR 数据的估计植被高度的半经验模型。2001 年, Slatton 和 Evans^[46]将两种技术融合, 同时也把物理模型与多尺度估计相结合, 最终改善了遥感手段估计地面高程和植被高度的精度。

至今, InSAR 和 GPS、LIDAR 数据的融合还没有一套完整的理论和方法, 目前所开展的研究多数只是比较和实验, 需要进一步开展的研究包括: 每种产品的特点、数据的相容性和融合方法等。

3.6 并行 InSAR 数据处理技术

目前 SAR 卫星数据实属海量, 但数据处理速度受硬件及软件影响, 还不尽如人意。为了提高运算效率, 有必要开展高效的并行分布式计算。针对 InSAR 预处理, 徐永健等人^[47]在上海超级计算中心曙光 2000-II 型巨型并行计算机上开展了星载 SAR 数据 CS 成像算法的并行和实时处理研究, 获得了很好的效果。在并行 InSAR 数据处理方面, 美国俄亥俄州立大学曾经使用 MPI、PLAPACK 等并行工具, 联合雷达数据及 InSAR 数据, 开展过恢复冰川速度的研究^[48]; 美国加利福尼亚理工学院高级计算研究所(CACR)的 InSAR 项目将使用不同平台包括并行超级计算机对 InSAR 数据实时处理作为研究目标^[49]。我国并行 InSAR 数据处理的相关研究尚处于起步阶段。

4 InSAR 应用最新进展

4.1 地形及地面形变测绘

4.1.1 地形测绘

InSAR 是目前唯一可有效建立全球 DEM 的工具。InSAR 的概念提出后不久, Graham^[2]就将其用于地形图的测绘。国外许多学者对此作了大量的研究, 第一颗 SAR 卫星 SEASAT 的统计测高精度已达 1.2~1.6 m。随着越来越先进的 SAR 卫星的相继发射, InSAR 测高精度也在逐步提高, 目前已达亚米级。

InSAR 在一些地形复杂、气候条件恶劣、不适合进行传统大地测量手段观测的地区, 显示出了无与伦比的优势, 尤其对南北极地区的地形测绘更具有巨大的发展潜力, 被认为是获取南北极 DEM 和地图的最有效的途径。目前, 南极洲地区精度最高的 DEM 即是 RADARSAT 南极测图计划数字高程模型(RADARSAT Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model)。2004 年, 周春霞^[50]针对南极 Grove 山区作了 InSAR 技术提取 DEM 的研究, 结果表明平坦且相对稳定区域 DEM 精度最高, 与 GPS 所得的高程值之差的均值为 2.3 m。

4.1.2 地面形变监测

早期 D-InSAR 形变监测主要集中在地震、火山、冰川等形变显著的地质现象上, 随着 D-InSAR 技术的不断成熟和研究的不断深入, 监测形变的精度已达毫米级, 研究重点已逐步转移到监测地面的微小形变(如地面沉降、滑坡等)引起的细微的形变位移。

地面沉降主要是由构造运动和人为因素引起的。1989 年起, D-InSAR 技术即被用于地面沉降监测, 精度高达厘米级甚至毫米级, 它同时具有大面积、快速、准确的优势, 成为传统

城市地面沉降技术 (GPS 和水准测量方法) 极为有效的补充。中国许多城市因地下水开采过度而导致地面及建筑物下沉, 王超等人^[51] 以及李德仁和杨杰^[52] 利用 D-InSAR 技术分别研究分析了苏州地区、天津地区的地表沉降。刘国祥等人^[53] 利用 D-InSAR 技术监测香港赤腊角机场的沉降情况, 总体精度优于 1 cm。

滑坡是危害极大的一种自然灾害, 而地表变形监测是滑坡监测中一项重要的内容。Nagler 等人^[54] 描述了滑坡监测 SAR 数据的选择标准和方法, 监测到奥地利和瑞士 Alps 山脉的山坡每年以厘米级的速度缓慢移动, 证实了用 D-InSAR 监测滑坡切实可行。中国地震局地壳应力研究所关于三峡库区重庆市万州区地质灾害监测预警系统的项目计划中, 将 InSAR 作为探测三峡库区滑坡形变的手段之一。

InSAR 用于国际地球参考架 (International Terrestrial Reference Frame, ITRF) 的精细化及维持是其形变监测的新应用。ITRF 是由国际地球自转服务 (International Earth Rotation Service, IERS) 综合多种空间技术 (包括 VLBI、SLR、LLR、GPS 和 DORIS 等) 建立的。目前, 最新的地球参考架是由 IERS 发布的 ITRF2000。要建立和维护高精度的地球参考架, 就必须考虑地壳形变等因素对参考架的影响。Tisserand 条件要求台站尽可能均匀分布, 且位于板块稳定区域内^[55], 但是 GPS、VLBI 和 SLR 等技术要做到这一点相当困难。因此, 虽然 GPS、VLBI 和 SLR 等技术能以每年几毫米的高精度确定地壳形变, 但是它们只能提供离散台站位置变化的点状形变监测结果, 继而根据板块构造理论, 利用板块运动模型近似用点的变化拟合板块的形变。InSAR 的高精度监测形变、面状成像以及全球覆盖的能力恰恰弥补了这一不足, 从而为地球系统物质运动提供整体约束, 精化参考系的维持, 有望建立更高精度的 ITRF^[56]。如果将 InSAR 技术测得的连续面状区域地壳形变结果和 VLBI、SLR、GPS 等空间技术测得的离散点的单点坐标及速度结合起来, 对于 ITRF 的维护及精度的提高将具有重大意义, 这将是天文地球动力学领域的崭新课程。

4.2 专题制图

4.2.1 农林业

InSAR 在农业方面的应用主要涉及农作物识别、生长情况估计以及土壤湿度分析等。若结合气象观测数据, 则有可能建立稳健的模型对农作物估产。利用 SAR 图像色调以及纹理分析, 则可以区分农作物的类型。土壤湿度会受地形影响, 可以通过对地形的分析推断土壤湿度情况, 利用高分辨率的地形数据甚至可以估计雨后土壤的饱和度。目前, InSAR 在农业方面的应用还处在起步阶段。

在林地观测方面, 通过极化 InSAR 提取地表植被特别是森林的垂直结构参数是近年来的热点问题。李新武等人^[57] 用模拟-退火算法, 将反演的防护林平均高度与和田地区墨玉县林相调查实测数据作比较, 证明反演算法的确能够准确地估计植被高度。除了树高测量, InSAR 还可用于林区地形测量、分类制图等。如果在 InSAR 计划中配合以激光测量, 则可以反映砍伐和再生的状况、林地的变化^[58]。

4.2.2 海洋测绘

在海洋学领域, 顺轨干涉合成孔径雷达主要用于测量海浪方向谱和海水表面流速, 交轨干涉合成孔径雷达用于测量海面高度的 DEM, 通过计算 DEM 的方差谱可直接计算海浪高度。此外, InSAR 还可用于舰船检测、海岸线动态监测等。1987 年, Goldstein 和 Zebker^[59] 最

先通过 San Francisco 海湾的 SAR 顺轨干涉数据对潮汐流锋面的流速梯度进行成图,得到了海浪的方向谱和海水表面流速。之后,顺轨干涉测量方法在海洋其他方面的应用相继开展,并取得了可喜的成果。目前 InSAR 技术用于海波和海流监测以及海洋动力学方面的研究还有一定的局限性,主要是因为干涉数据需要满足一定的海洋条件。另外,遥感技术用于海洋波谱的有效性也有待于进一步的证实。

4.2.3 洪涝灾害监测

InSAR 相干图和 SAR 图像结合可以用来识别和测定洪水灾区的范围和分布,进而为评估洪涝灾害的影响及组织救灾工作提供依据。Nico 等人^[60]已经在法国南部 Beziere 地区利用 SAR 幅度图和相干系数图开展了水灾探测方法的研究。

此外, InSAR 在土地利用和分类的应用也是一门相对较新的学科,利用城市、农业区、荒野以及林地的相干特性,结合亮度图可以进行土地分类图的绘制,置信水平一般能达到 90%^[61]。

4.3 InSAR 气象学

InSAR 气象学是一门新兴的交叉学科。水汽场在全球、地区和局部的天气分析和预报中非常重要,但是目前依然普遍认为水汽场没有充分研究清楚,这是由于水汽观测的稀少和水汽场在空间和时间上的高度可变性而引起的。1999 年, Hanssen 等人^[62]在 InSAR 生成地表形变的测量研究中把认为是噪声的大气分量作为信号,进行了水蒸气成图的研究,成果发表在《SCIENCE》上,从此诞生了一个新的研究领域——InSAR 气象学。InSAR 技术弥补了探空气球费用高昂、空间分辨率较低的不足,同时相对于 GPS 又具有面状监测大气中水汽信息的能力,已成为气象学领域一种新兴的观测手段。

雷达在成像过程中信号需穿越大气层,可以认为 InSAR 的测量结果是地形、地表变形、大气影响和观测噪声的综合反映。假设形成干涉图期间地形变化的信息可以忽略或者已知,即可以假定在两次雷达成像期间地面无变形(如成像间隔很短)或该变形量已知,那么根据干涉图就可以确定沿雷达信号方向的大气延迟,进而推出视线方向的水汽含量。基于这一基本原理,衍生出各种 InSAR 测量确定大气水汽含量的方法,分别简介如下:(1)抑制或消除干涉图中地形、地表变形以及噪声(Hanssen 等人^[62]);(2)3 轨干涉测量法(Goldstein^[63]):设卫星 3 次经过目标区域上空生成的 2 幅相干图相位分别为 ϕ_1 和 ϕ_2 ,因受地表变形和大气影响, ϕ_1 相对 ϕ_2 的曲线会偏离最佳椭圆。假设 2 幅图像之间没有形变,则认为偏离完全由大气引起,据此估计大气效应;(3)Pair-wise logic 方法(Massonnet 和 Feigl^[64]):通过比较不同时间跨度的干涉图,确定对流层的湍流或水汽含量的增量,缺点是不能完整测量大气的影响,如果所有干涉图在不同时间跨度内特点相似,则无法确定大气扰动;(4)PS 方法:一种是建立 PS 的相位模型,假设大气相位沿距离向和方位向线性增加,然后对大气相位的常数项、斜率和其他参数进行估计;另一种是利用时空滤波,估计 PS 对大气相位的贡献。

InSAR 具有时间分辨率不够高的缺点,若与 GPS 气象数据、地面气象以及气象卫星资料有机地结合,就可以平衡各数据源的优缺点,得到时间和空间分辨率均较为理想的水汽观测结果,进而建立高精度、高时空分辨率的水汽模型,这对大气模型参数的确定也会起很大作用。目前,国内在这方面的研究还很少。

5 展 望

基于以上讨论, InSAR 未来的发展趋势可以概括为以下几个方面:

(1) 星载 SAR 平台更为先进。即将发射的 ALOS、RADARSAT-2、TerraSAR 以及小卫星、分布式雷达体制的实现必将为雷达干涉测量技术提供更为丰富的数据, 使 InSAR 数据不论在质量还是数量上都会登上一个新的台阶。

(2) InSAR 数据处理的精度和速度进一步提高。相位解缠、极化干涉、PS 技术等在未来的一段时期内仍是 InSAR 理论研究的热点和焦点。与 GPS、LIDAR、SLR、VLBI 等数据的融合技术, 将成为 InSAR 未来的发展趋势。此外, 随着并行计算、网络计算等高速智能化技术的日新月异, 并行 InSAR 将成为新的研究热点。

(3) 应用范围更加广泛。InSAR 气象学、InSAR 海洋遥感以及 InSAR 用于 ITRF 的建立和维护是相当新颖的课题, 它们将会得到更加深入的研究。同时, InSAR 技术的空间尺度可以不再局限于地球, 对太阳系行星地形的探测也将成为可能。

2002 年, NASA 固体地球科学工作组在年度报告中将 InSAR 作为其未来 25 年发展计划中的重点支持对象^[65]。相信在未来的几十年中, InSAR 不论在技术还是应用上都会有突破性的发展, 进而为全球资源、环境、灾害以及城市建设作出更大的贡献。

参考文献:

- [1] 刘永坦. 雷达成像技术, 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999: 9
- [2] Graham L C. Proceedings of IEEE, 1974, 62(6): 763
- [3] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Radio Science, 1988, 23(4): 713
- [4] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. JGR, 1989, 94(B7): 9183
- [5] Massonnet D, Rossi M, Carmona C *et al.* Nature, 1993, 364(8): 138
- [6] 王超, 张红, 刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量, 北京: 科学出版社, 2002: 33
- [7] 丁晓利, 陈永奇, 李志林等. 紫金山天文台台刊, 2000, 19(2): 158
- [8] Ghiglia D C, Wahl D E. In: Proc. of the 1994 Sixth IEEE Digital Signal Processing Workshop, New York: Wiley-IEEE Press, 1994: 33
- [9] Homer J, Longstaff I D, Callaghan G. In: Proceedings of IGARSS'96, IEEE, New York: Wiley-IEEE Press, 1996: 796
- [10] Ferretti A, Guarnieri A M, Prati C *et al.* In: Fringe 96' Workshop on ERS SAR interferometry, Switzerland: ESA, 1997: 17
- [11] Eineder M, Adam N. In: Proceedings of IGARS'04, IEEE, New York: Wiley-IEEE Press, 2004: 477
- [12] Boerner W M, Cloude S R, Lee J S *et al.* IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2002: 408
- [13] Papathanassiou K P, Moreira J R. In: Proceedings of IGARSS'96, IEEE, New York: Wiley-IEEE Press, 1996: 1227
- [14] Papathanassiou K P, Cloude S R. In: IGARSS'97, IEEE, New York: Wiley-IEEE Press, 1997, 4: 1926
- [15] Cloude S R, Papathanassiou K P. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1551
- [16] Papathanassiou K P, Cloude S R. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2352
- [17] Cloude S R. In: IGRASS'02, IEEE, New York: Wiley-IEEE Press, 2002, 2: 838
- [18] Tabb M, Flynn T, Carande R. In: IGARSS'02, IEEE, New York: Wiley-IEEE Press, 2002: 1020

- [19] Jong-sen Lee, Cloude S R, Papathanassiou K P *et al.* IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(10): 2254
- [20] 于大洋, 董贵威, 杨健等. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(3): 334
- [21] Hajnsek I, Cloude S R. In: Proceedings of IGARSS'04, IEEE, New York: Wiley-IEEE Press, 2004, 2: 1224
- [22] Li X W, Guo H D, Wang C L *et al.* In: IGARSS'02, IEEE, New York: Wiley-IEEE Press, 2002, 5: 2705
- [23] Brandfass M. In: IGARSS'02, IEEE, New York: Wiley-IEEE Press, 2002, 2: 1014
- [24] Luciano V D, Marcos T E, Britaldo S S *et al.* In: IGARSS'02, IEEE, New York: Wiley-IEEE Press, 2002: 3617
- [25] Kim Y J, Zyl J V. In: Proceedings of IEEE 2000 Aerospace Conference, New York: Wiley-IEEE Press, 2000, 3: 231
- [26] Ferretti A, Prati C, Rocca F. In: Proceedings of IGARSS'99, IEEE, New York: Wiley-IEEE Press, 1999, 3: 1528
- [27] Ferretti A, Prati C, Rocca F. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8
- [28] 李德仁, 廖明生, 王艳. 武汉大学学报信息科学版. 2004, 29(8): 664
- [29] Colesanti C, Ferretti A, Prati C *et al.* Engineering Geology, 2003, 68: 3
- [30] Nutricato R, Bovenga F, Refice A. In: Proceedings of IGARSS'02, IEEE, New York: Wiley-IEEE Press, 2002, 6: 3626
- [31] Ferretti A, Prati C, Rocca F. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2202
- [32] Colesanti C, Ferretti A, Prati C *et al.* In: Proceedings of the International Radar Conference, IEEE, New York: Wiley-IEEE Press, 2003: 239
- [33] 乔学军, 李澍荪, 王琪等. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(2): 122
- [34] Won J S, Lee S K, Kim S W *et al.* In: Proceedings of IGARSS'04, IEEE, New York: Wiley-IEEE Press, 2004, 6: 3633
- [35] Zebker H A, Rosen P A, Hensley S. JGR, 1997, 102(B4): 7547
- [36] Li Z W, Ding X L, Liu G X *et al.* Geomatics Research Australasia, 2003, 79: 43
- [37] Crosseto M, Tscherning C, Crippa B *et al.* GRL, 2002, 29(9): 26
- [38] Bock Y, Williams S. EOS Trans. of the American Geophysical Union, 1997, 78(29): 293, 299
- [39] Bonforte A, Ferretti A, Prati C *et al.* Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2001, 63: 1343
- [40] Delacourt C, Briole P, Achache J. GRL, 1997, 25(15): 2849
- [41] 许才军, 王华, 黄劲松. 武汉大学学报, 2003, 28(特刊): 58
- [42] Williams S, Bock Y, Fang P. JGR, 1998, 103(B11): 27051
- [43] Webley P W, Bingley R M, Dodson A H *et al.* Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27: 363
- [44] Li Z W, Ding X L, Liu G X. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2004a, 66: 907
- [45] Harding D J, Blair J B, Rodriguez E *et al.* In: Proceedings of Second Symposium on Combined Optical-Microwave Earth and Atmosphere Sensing (COMEAS), New York: Wiley-IEEE Press, 1995: 22
- [46] Slatton K C, Evans B L. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2470
- [47] 徐永健, 王贞松, 罗小广. 电子与信息学报, 2001, 23(8): 736
- [48] Shum C K. http://www.osc.edu/hpc/cluster_ohio/sites/rev2/osus.index.shtml
- [49] <http://www.cacr.caltech.edu/SDA/InSAR/insardesc.html>
- [50] 周春霞. 博士论文, 武汉: 武汉大学, 2004: 84
- [51] 王超, 张红, 于勇等. 地理学与国土研究, 2002, 18 (3): 13
- [52] 李德仁, 杨杰. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(2): 1
- [53] 刘国祥, 丁晓利, 李志林等. 科学通报, 2001, 46(14): 1224
- [54] Nagler T, Rott H, Kamelger A. In: Proceedings of IGARSS'02, IEEE, Wiley-IEEE Press, 2002, 1: 198
- [55] 叶叔华, 黄斌. 天文地球动力学, 济南: 山东科学技术出版社, 2001: 267
- [56] 乔书波, 李金岭, 孙付平等. 天文学进展, 2003, 21(1): 11
- [57] 李新武, 郭华东, 廖静娟等. 遥感学报, 2002, 6(6): 424

- [58] 舒宁. 雷达影像干涉测量原理, 武汉: 武汉大学出版社, 2003: 95
- [59] Goldstein R M, Zebker H A. *Nature*, 1987, 328: 707
- [60] Nico G, Pappalepore M, Pasquariello G *et al.* *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(8), 1619
- [61] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R *et al.* *Proceedings of IEEE*, 2000, 88(3): 333
- [62] Hanssen R F, Wechwerth T M, Zebker H A *et al.* *Science*, 1999, 283: 1297
- [63] Goldstein R. *GRL*, 1995, 22(18): 2517
- [64] Massonnet D, Feigl K L. *GRL*, 1995, 22(12): 1537
- [65] Solid Earth science working group. report 2002, Living on a restless planet, <http://solidearth.jpl.nasa.gov>

Updated Progress in Theories and Applications of Spaceborne SAR Interferometry

CHEN Yan-ling^{1,2}, HUANG Cheng¹, DING Xiao-li³, LI Zhi-wei¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Department of Land Surveying and Geoinformatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) and D-InSAR (Differential InSAR) are rapidly developed new technologies of space geodesy during the late 20th century, and now obviously become hot research topics in the field of microwave remote sensing. Compared with the other sensors, InSAR possesses many incomparable advantages such as the capability to work at all-time and under all weather, very high spatial resolution and strong penetrability through the ground surface. This paper introduces general status of SAR, InSAR, D-InSAR technology, and the principles of InSAR and D-InSAR. New theories and the potential problems of (D-) InSAR technology are largely discussed, including multi-baseline interferometry, Pol-InSAR technique, the correction of atmospheric effects, permanent Scatterers method, the synthesization technique between InSAR and GPS, LIDAR etc., and the InSAR parallel algorithm. Then the new applications of InSAR and D-InSAR are described in detail including 3D topographic mapping, deformation monitoring (including surface subsidence, landside monitoring and ITRF's foundation and maintenance, etc.), thematic mapping (including agriculture and forestry, oceanic surveying, and flood monitoring, etc.) and meteorology etc. . Finally, the prospect and future trends of InSAR development are summarized.

Key words: astrometry; SAR; review; InSAR; D-InSAR