

doi: 10. 3969/j. issn. 1001 - 358X. 2009. 05. 013

INSAR 在地质灾害监测中的应用

潘 元

(广东省地勘局七五六地质大队, 广东 惠州 516300)

摘要:文中综述了遥感卫星合成孔径雷达 (SAR) 干涉测量及差分干涉测量的基本原理。针对近年来国外 InSAR 在地质灾害监测方面的研究, 重点讨论了有限数据条件下低相干地区地表形变监测关键问题。

关键词:遥感; D - InSAR; 地质灾害; 监测

中图分类号: P237

文献标识码: B

文章编号: 1001 - 358X (2009) 05 - 0042 - 04

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar - SAR) 由于可以穿透云雾、具有全天候、全天时工作能力, 同时又具备一定的穿透天然植被、人工伪装和地表层土壤一定深度的能力, 与可见光、红外遥感相比, 有着独特的优越性, 因此在很多领域显示出越来越大的应用潜力。目前在测绘领域得到了越来越多的重视, 尤其适用于传统光学传感器成像困难的地区的地形测绘, 如热带雨林地区, 中国的西南、华南等多云雾、多雨的地区等。在地形测绘领域的应用得益于两个方面: 一是硬件的改善, 传感器分辨率得到了很大的提高, 目前的星载 (如 ERS, Radarsat, ENVISAT) 的分辨率都达到了 10 m 左右, 机载已经达到了米级的精度, 目前国内的机载的精度已经达到了 0.5 m 的精度, 在国外甚至达到了 0.2 m 的精度。二是数据处理方法得到了很大的提高, 除了传统的数字图像处理的方法外, 还有许多最新的数据处理技术在其中得到了广泛的应用, 如小波技术、模式识别、神经网络等。

该技术在许多领域得到了应用, 特别是地质灾害方面。利用地震前后的干涉影像 (例如, 震前的一个像对和震后的衣服影像), 可以检测到同震和余震的地表变形, 同震变形的观测精度达厘米级。如果能够和 GPS 观测数据结合起来, 可以进一步提高对地震灾害的分析与解译能力。同样的原理也可以用于火山活动的监测, 检测火山爆发前、爆发期间和爆发后的形变情况。

1 D - InSAR 技术的基本原理

InSAR 技术的核心是利用相位观测值获取目标的几何特征及变化信息。干涉纹图中任一像元的相

位表示的是雷达与该像元间距离的变化和该目标的散射相位变化之和。若两次观测期间散射相位保持稳定, 则干涉相位反映的是两次观测期间目标与雷达间距离的变化, 其中包含地形信息, 地表形变以及大气活动引起的相位延迟。因此, 可以根据各分量对干涉相位“贡献”的大小, 分别解算出地形信息、两次观测期间目标沿雷达视线向的变化量以及大气延迟量等。

由于干涉相位对微小形变极其敏感, 毫米级的形变在干涉相位中都会有所反映。因而, 利用重复轨观测获取的干涉相位, 通过差分处理去除两次观测相位中的共有量 (平地效应、地形相位和大气延迟等), 可以得到形变相位, 进而反算形变量。这就是差分干涉测量 (D - InSAR) 监测地表形变的基本原理。

通常情况下, 干涉相位的解缠是在规则的二维格网上进行的。但由于相干性的降低, 多数情况下, 重复轨生成的干涉纹图上只有部分像元保持了较好的相干性, 这些相干目标在空间分布上是离散的、间断的。这使得部分相邻点间的相位差的绝对值超限。对于相位积分而言, 干涉纹图上大量出现的间断点或区域将阻断相位积分的过程。此时, 首先需要将这些离散的间断点或区域连接起来, 使其构成一个完整的网络, 然后再根据一定的法则进行相位解缠。Delaunay 法则就是一个很好的选择, 利用它可以将二维平面上所有的相干点用若干个没有重叠的三角形连接起来, 每一个点至少是一个三角形的顶点。差分干涉纹图中具有高质量相位的像元就成了 Delaunay 三角网中的不规则格网点。此时, 可以人为认定每一个三角形的重心是一个节点, 沿该三

角形三条边做三个顶点的相位的闭合线积分,如果任意两顶点间相位差的绝对值不超限,则其积分值为 0,若积分值不为 0,则表示该节点有一个正留数或负留数,计算每一个三角形对应的留数。为了防止解缠误差扩散,将正负留数用弧段成对的连接起来。解缠时,避免积分路径穿过这些连有正负留数的弧段。此时,可以利用枝切法,区域增长法和最小费用流法等进行相位解缠,但较为方便有效的还是最小费用流法。由于质量较高的点都在三角网中,该方法抑制了噪声对解缠过程的影响,如此就可以从一幅噪声较大的干涉图中提取出相干目标的相位信息。借助 Delaunay三角网进行差分干涉纹图的相位解缠,可解决很大一部分地区的地面沉降信息提取问题,特别是在数据量少,干涉基线相对较小,观测时间间隔不大而相干性较低的情况。该算法将质量较高的数据都引入到三角网中,可以对低相干或者噪声较高的干涉纹图进行相位解缠。但该方法只解决了离散点相位解缠,本身并未涉及大气影响的去除,这还需要其他方法来弥补。

2 InSAR 测量处理流程

雷达干涉测量的数据处理包括:用轨道参数法或控制点法测定基线,图像的粗配准和精配准,相位解缠 (unwrapping) (相当于 GPS 相位测量中的整周模糊度的解求,是一项十分重要且有难度的步骤)。雷达干涉测量的数据处理流程参见图 1、图 2。

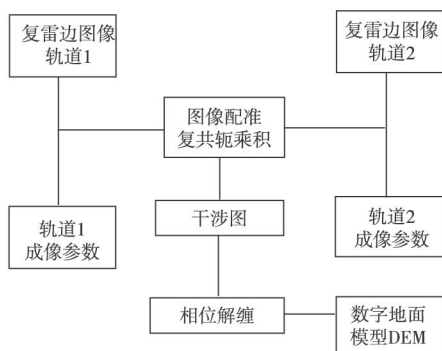


图 1 InSAR 数据处理流程

多源干涉堆栈是在假定静态过程的前提下,地面沉降呈线性增加,对于某个量测了先验相对估算误差的沉降速率来说,可以定义出其累计时间。举例来说,10个以上的独立干涉堆栈,可以以小于 1mm/a 误差的期望沉降速率来量测累计时间间隔超过 20 年的地面沉降量。

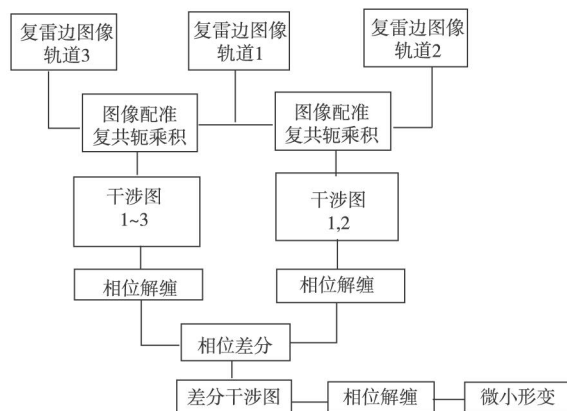


图 2 D-InSAR 三轨道法作业流程

3 NSAR在地质灾害监测中的应用

自上世纪 90 年代初,合成孔径雷达干涉测量 (InSAR) 技术就开始在全球及区域性地形测图、大尺度地表形变监测中得到广泛的研究和应用。与可见光遥感相比较, InSAR 实现了遥感技术对地表变化的几何测量,能够量化地研究自然环境的活动变化状况,是传统遥感技术和测量手段的有益补充。促使 InSAR 技术迅速发展的原因可归结为两个方面,一是区域性地表形变灾害监测与预报的需要;二是连续可靠的数据源。全球地形测图,地震、地面沉降、滑坡、火山移动、冰川活动等地表形变监测是 InSAR 技术常见的应用领域,其中,尤以地质灾害监测最为广泛。近几年来,ESA - GMES (Europe Space Agency, Global Monitoring for Environment and Security) 启动的 SLAM (Service for Landslide Monitoring) 和 Terrafirma 计划,以及 PSC 4 等研究项目,旨在利用 InSAR 技术开展全欧洲地质灾害调查与监测,促进 InSAR 技术在灾害性地表形变监测中的应用。通过这些计划的开展,已查明了全欧洲各主要城市的地面沉降、重点地震带地壳形变速率、矿山地面塌陷以及滑坡活动和火山活动等情况,将 InSAR 技术工程化应用向前推进了很大一步。1991 年和 1995 年,ESA 相继发射了雷达卫星 ERS - 1 和 ERS - 2,2002 年又发射 ENVISAT 卫星,这些卫星为 InSAR 技术的研究和应用提供了大量的 SAR 数据,其稳定的数据源和可靠的轨道控制为广泛进行 InSAR 技术应用提供了基础。同时,加拿大 RADARSAT 卫星,日本 JERS 卫星以及 ALOS 卫星也都为开展 InSAR 技术的应用提供了更多的 SAR 数据。在地形测图方面,美

国 SR TM (Shuttle Radar Topography Mission) 任务利用 11 天时间获取了全球 80% 地区的 DEM 数据, 其空间分辨率和测量精度均达到应用的要求。此外, 在研究提高 InSAR 测量精度的同时, 通过利用 InSAR 技术研究大气水汽分布与变化也促使 InSAR 在大气状况反演这一领域的研究。当前, 新一代的雷达卫星, 包括德国宇航院 (DLR) 的 TerraSAR - X、意大利的 Cosmo Skymed 以及加拿大即将发射的 RADARSAT - 2 等, 在雷达波长、分辨率、重复观测周期以及轨道控制等方面均有所改进, 为 InSAR 技术的实用化提供了更多更可靠的数据源。

地表形变监测是 InSAR 技术最成功, 也是最能体现其优势的应用领域。从其方法技术发展过程而言, InSAR 技术经历了从单时相少量 SAR 数据, 到多时相多源数据集成处理。以常规 InSAR 数据处理方法为基础, 分别形成了累积干涉纹图法 (Stacking Interferograms)、永久散射体干涉测量 (Permanent Scatterer Interferometry) 以及角反射器干涉测量 (Corner Reflector InSAR) 等技术。其中, 利用 PS 技术研究长时间条件下地面形变的演变过程已被广泛用于辅助常规大地测量手段, 角反射器测量也在局部低相干区域特殊变形体的监测中发挥作用。目前, 这些方法和技术也正随着应用领域的扩大而逐步改进和趋于完善。

4 地表形变监测关键问题

地表形变监测对 D - InSAR 技术的要求表现在于时间频率、空间覆盖范围和测量精度三个方面。时间频率指的是 D - InSAR 监测能反映形变的时间特征, 如地面沉降监测, 获取年沉降速率即可很好的反映变化的情况, 但对于其他情况, 如滑坡监测等, 则需要尽可能多的时间采样, 如每月一次甚至更高。空间覆盖则往往针对大区域覆盖范围而言, 对于区域性的地表形变监测, 则要顾及整个研究区的变化趋势以分析产生形变的原因。但多数情况下, 能获取的数据是有限的, 并且多数监测地区的相干性都相对较低。因而, 在 SAR 数据量有限的条件下解决低相干区地表形变监测中的问题就成为应用中的关键。以下将重点分析有限数据条件下相干目标识别和大气相位影响的改善以及地面植被及湿度的影响问题。

多数情况下, 重复轨观测 InSAR 的相干性降低, 仅有部分像元保持了较高的相干性, 其相位稳定。

尽管相干值高不是高质量相位的充分条件, 但多数高相干值的目标具有高质量的相位。这些目标在时间序列上具有稳定后向散射特性, 保持稳定相位。相干目标有的是点目标, 有的则为连续目标。地表形变量的求解就是基于这些目标的相位变化进行的。为进行时间序列分析, 需要确定具有稳定相位的相干目标。当前主要方法为相干系数均值、强度稳定性以及点目标检测算法检测具有稳定相位的目标。根据序列干涉纹图的相干系数均值作为判断依据, 将满足给定阈值条件的目标作为相位解缠基础, 提取干涉相位, 进行空间域相位解缠。由于相干系数基于空间域窗口运算, 窗口大小对相干系数的影响较大, 低相干目标有可能被错误检测到, 同时也降低了解缠相位图的空间分辨率。利用均值相干系数识别出的相干目标可以用基于 Delaunay 三角网的不规则格网相位解缠方法进行相位解缠, 由此也可以适用于累积干涉纹图的处理和 PSI 类似的方法。在雷达影像数量较大的情况下, 可通过对目标的在不同时刻后向散射强度变化的统计来检测相干性的变化。其前提是雷达数据作定标处理, 根据目标强度随时间的变化特征, 以均值与方差比作为测度, 选择强度值大于给定阈值且具有稳定相位的目标为相干目标。一个雷达分辨单元由若干个散射体构成, 其中对该分辨单元的后向散射强度起主导作用的散射体称为点目标。点目标的几何尺寸小于雷达分辨单元, 但由于其具有稳定的相位特征, 因而可将起视为相干目标。由于点目标稳定的后向散射特性, 因而在获取原始信号过程中各个子视图图像上必然表现出相似的散射特征。将 SLC 图像作反变换, 生成若干个子视图 (sub - looks), 按照子视图作相关, 根据相关程度确定点目标。与以空间相干系数为测度的方法不同, 点目标识别由于不受周围其他雷达目标散射强度的影响, 因而保持了空间域相干目标可靠性。同时也抑制了具有斑点噪声的扩展目标以及杂波等影响。这种方法可以从单个 SAR 数据检测点目标, 也可以对多景数据处理, 在数据量较少时也可以得到较好的结果。实际中, 可以将上述几种方法综合起来使用。相干目标选择只是相位解缠或相位回归分析的预处理, 而另一个判断原则则是模型系数, 这在累积干涉纹图方法和 PSI 以及角反射方法中均有所体现。因而, 在数据预处理时有效选择出相干目标, 通过不规则格网相位解缠获取每一干涉纹图的

解缠结果,利用累积干涉纹图法或 PSI 方法对序列干涉图进行分析是解决有限数据量前提下低相干区地表形变信息提取的行之有效的方法。

大气相位的处理实际上是补偿干涉相位中的延迟量。一般存在 2 种方法对其进行处理,一是利用基于物理模型,即利用大气分布模拟对延迟量进行模拟,另一个则是基于统计模型,根据大气时空分布特征,通过对差分干涉相位的时间序列分析,消除或者减小大气波动对测量结果的影响。大气的成分随时间和空间的变化而变化,因而,其对雷达波传输的延迟也不相同。利用现有的与 SAR 数据同步的观测数据,如 MODIS、MERIS 测量的水汽通量以及 GPS 观测,根据物理模型模拟大气相位延迟量。对于数据量较少的情况,可以通过模拟大气延迟对每个解缠图进行修正,进而提高测量的准确性。干涉相位中大气延迟是两次观测不同延迟量的差,大气波动在时间域呈高频,在空间域则相对较低。对于两景 SAR 影像,中小尺度的大气变化的空间尺度一般为 2 - 40 km,其引起了干涉纹图上 $2/3$ 甚至 1 到 2 个的整周条纹变化。多数情况下,假设这种影响为时间失相干,不同的 SAR 影像其影响各不相同。因而,可利用序列 SAR 影像干涉分析来减弱大气波动的影响。PSI、IPTA 以及 CPT 等基于相干点目标的方法中,均按照大气延迟的时空分布做时间序列分析,去除其对差分干涉相位的影响。

在雷达两次成像之间,由于植被生长及湿度变化引起的地表反射特性的变化,导致干涉相位在时间上的失相关,会对结果产生很大影响,特别是两次成像时间相隔较长,地面反射特性有较大的变化时,有时甚至得不到有用的干涉图。这些影响需要深入研究加以减弱或消除。通过在一些地区(沧州地区)进行的 InSAR 技术监测地面沉降研究,我们认为植被问题是 InSAR 技术必须要考虑的,因为植被的情况直接关系到 InSAR 技术应用的时间和范围。另一

方面,从目前国内在 InSAR 监测地面沉降方面研究来看,三轨法是比较合适的方法,这就要求有一对数据来获取 DEM,这一对数据最好在植被枯萎期获取的,并且时间相隔越短越好。

5 结 语

尽管在应用方面受到诸多因素限制,但 InSAR 和 D-InSAR 技术已经在地形测量、地面形变监测、火山活动及其它地质灾害评估与监测方面得到了广泛的应用,也取得了许多可喜的成果。随着卫星雷达系统的不断改进及处理方法的不断提高,此技术必将在地球科学及其它学科中发挥更为重要的作用。未来全球的卫星雷达系统将增加欧空局 Envisat - 1、JPL 的 LightSAR、美国 Toposat - 1 和 Toposat - 2、加拿大 Radarsat - 2 共 5 套卫星系统,届时将有 10 套卫星雷达系统在空间分布。这为我们开展卫星雷达干涉测量提供了更多的资源和条件。可以预见,InSAR 在城市地面沉降领域必将大有前途。

参考文献:

- [1] 张拴宏,纪片胜.合成孔径雷达干涉测量(InSAR)在地面形变监测中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2004(1).
- [2] 李德仁,周月琴.卫星雷达干涉测量原理与应用.测绘科学[J].2000(1).
- [3] 刘国祥,刘文熙,黄丁发. InSAR 技术及其应用中的若干问题[J].测绘通报,2001(8).
- [4] 何庆成,方志雷,李志明,刘文波. InSAR 技术及其在沧州地面沉降监测中的应用[J].地学前缘,2006(13).

作者简介:潘元(1983-),男,毕业于河北理工大学交通与测绘工程系测绘工程专业,学士学位。现就职于广东省地勘局七五六地质大队,从事测绘工作。

(收稿日期:2009-06-24)

(上接第 41 页)

参考文献:

- [1] 徐绍铨等. GPS 测量原理及应用(3S 丛书)[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,1998
- [2] 朱华统等. GPS 坐标系统的变换[M]. 北京:北京测绘出版社,1994
- [3] GB/T18341—2001. 全球定位系统(GPS)测量规范

[S].北京:中国标准出版社.

作者简介:毛开森(1965-),男,工程师,毕业于郑州煤田地质职工学院测量专业,现在甘肃煤田地质局一三三队勘查设计院从事测量工作。

(收稿日期:2009-05-05)