

# 永久散射体雷达干涉测量技术

李德仁<sup>1</sup> 廖明生<sup>1</sup> 王 艳<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘 要:** 论述了永久散射体干涉测量(permanent scatterer interferometry, PSI)产生的背景和基本原理, 并介绍了其应用实例, 讨论了 PSI 的技术特点和今后的发展方向。

**关键词:** 永久散射体; 形变监测; 大气效应; 雷达干涉测量

**中图分类号:** P236

合成孔径雷达干涉测量(synthetic aperture radar interferometry, InSAR)技术的应用领域广泛, 包括地形测量以及地球动力学研究、冰川研究、森林调查与制图、海洋测绘等诸多领域<sup>[1~3]</sup>。

干涉测量技术之所以能够进行高精度的地表形变监测, 其原因就在于其测量精度取决于相干雷达波所独具的相位信息, 而不是普通光学影像的图像分辨率单元的大小。因此, 干涉雷达波的相位是决定干涉测量精度的主要因素。在差分干涉测量中, 相位对地表形变的灵敏度只是与雷达波相位值有关的常量, 而与地形等其他因素无关<sup>[4]</sup>。这表现在利用 InSAR 技术生成的 DEM 精度只能达到数 m 的精度, 而利用差分干涉测量(differential InSAR, D-InSAR)技术<sup>[1, 3, 5]</sup>进行地表形变监测时, 理论上却能达到 mm 级精度<sup>[1]</sup>, 即高分辨率光学影像空间分辨率的百分之一。

在实际应用中, 相干雷达波由于在传递的过程中受大气效应影响, 以及地表变化造成的时间去相关和长基线引起的空间去相关, 所有这些因素将会造成测量上的误差, 剔除这些误差是获得高精度地形量测结果的先决条件之一<sup>[6]</sup>。常规差分干涉测量技术难以很好地解决这些系统误差带来的问题, 因而, 永久散射体干涉测量技术(PSI)就应运而生。

PSI 技术的目的是解决 D-InSAR 中时间、空间的去相关和大气效应等限制测量精度的问题<sup>[8]</sup>。与传统方法比较而言, 该技术真正实现了生成 m 级的 DEM 和 mm 级地表形变监测, 所获

得的永久散射体(permanent scatterer, PS)可被用作构成一个“天然”的角反射器网, 可以高精度地监测城市沉降、滑坡、地震断层和火山地区等地表形变。同时, 由于 PS 点不受时间和空间去相关的影响, 使可利用的 SAR 影像突破了已有的时间和空间基线的极限限制, 大大增加了 SAR 影像的可用数量, 也为不同的 SAR 影像(如 ERS 系列、ASAR 等)数据集成提供了基础条件。

## 1 PSI 技术概述

时间、空间去相关和大气的非一致性是限制高精度变形监测的主要原因。时间去相关使利用 InSAR 技术在植被覆盖地区进行地形测量非常困难, 这主要是因为电磁场和/或散射体的物理特性随时间的变化而造成的。空间去相关限制了适合干涉测量应用的影像数目。大气效应贡献值双向作用于 SAR 影像相位, 可严重影响形变监测精度。即便是使用最长基线的影像, 大气效应贡献值和其他噪声也可能造成数 10m 的误差<sup>[8]</sup>。文献[9~11]发现, 大气效应分别对垂直位移和水平位移观测的影响不可忽视。文献[6]认为, 大气水汽是影响雷达干涉测量的主要因素: 相对湿度 20% 的变化会导致 10cm 的视线向(line of sight, LOS)形变监测误差, 以及使用一般基线的情况下 100m 的 DEM 的误差。

PSI 技术的基本原理是利用多景(一般要求大于 25 景)同一地区的 SAR 影像, 通过统计分析

所有影像的幅度信息, 查找不受时间、空间基线去相关和大气效应影响的永久散射体。利用这些永久散射体的插值拟合曲面, 计算出 DEM 误差、视线方向目标物体的偏移值和大气效应线性贡献值, 达到估计并去除大气效应相位贡献值、提高变形监测精度的目的<sup>[12]</sup>。

考虑各种因素, 就差分干涉图来说, 每个像元的干涉相位值  $\phi$  (未解缠) 可以表示为:

$$\phi = \Delta\Psi + \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r + \Delta\alpha + \Delta\Psi_{\text{noise}} \quad (1)$$

式中,  $\Delta\Psi$  是地物后向散射的差异而引起的相位变化, 如果两次成像时地物与电磁波的相互作用不变, 则  $\Delta\Psi=0$ ;  $\frac{4\pi}{\lambda}\Delta r$  反映了传感器与地物之间距离的变化, 即检测地表形变的相位信号;  $\Delta\alpha$  是大气效应的附加相位;  $\Delta\Psi_{\text{noise}}$  是其他噪声引起的误差, 如热噪声、斑点噪声和 DEM 的误差等。如上所述,  $\frac{4\pi}{\lambda}\Delta r$  是需要提取出来的有用信号,  $\Delta\alpha$  是必须求解并应去除掉的<sup>[6,9~11]</sup>,  $\Delta\Psi_{\text{noise}}$  则可作为微小项被忽略<sup>[12]</sup>。

经过研究发现, 尽管大气效应对每一景 SAR 影像表现了一种很强的去相关, 但通过对长时间序列的多景 SAR 影像的综合分析, 大气效应的影响可以被估计并去除<sup>[13]</sup>。其主要思想是: 充分利用尽可能多的影像, 提高对大气效应估计的准确性; 在这些影像集中, 选择那些受时间和空间去相关影响比较小的点状目标, 作为相位稳定的散射体。通常, 这些点状目标小于图像分辨率像元, 且不受基线距的限制, 它们被称为 PS 点——永久散射体。识别其方法是根据对差分干涉影像的幅度稳定性的统计分析, 计算幅度稳定系数 (amplitude stability index, ASI), 再通过设置适当的阈值, 达到选择符合要求的 PS 点的目的。在由许多 PS 点组成的格网中, 只要 PS 点的空间分布密度足够大 (10 点/km<sup>2</sup>), 利用这些点的插值拟合曲面, 就可以去除大气效应贡献值, 即式 (1) 中的  $\Delta\alpha$ 。

PSI 技术的基本步骤主要包括: PS 候选点的查找; 估计并去除大气效应; 计算 DEM 误差和 PS 点视线方向的移动速度以及提取 PS 点构成不规则格网。识别 PS 是整个技术流程的关键, PS 点过多或过少都对测量精度有很重要的影响。通过计算由 PS 拟合生成的格网图并剔除大气效应贡献值, 是整个技术流程最有意义的步骤。该技术的流程如下。

1) 每景影像根据主影像配准并生成参考

DEM。假设有同一地区同轨道号的  $N+1$  景 SAR 影像, 所有的  $N$  景影像都分别对同一景主影像配准, 生成  $N$  幅干涉纹图。同时, 由短时间基线的干涉影像像对生成该地区的 DEM。DEM 也可以利用已有的数据生成。

2) 计算 ASI。为了对不同影像的幅度值进行比较, 各影像通过能量均衡化进行辐射校正。逐个像元地进行幅度值的分析, 计算 ASI, 即每个像元的幅度平均值和标准偏差的比值。这个统计量提供了关于每个采样单元分布重心的期望稳定性的重要信息——幅度稳定性系数。通过设置阈值来筛选出 PS 候选点 (PS candidator, PSC), 这些点构成不规则格网, 它们具有 PS 点的特征。

3) 生成 PSC 的不规则格网。利用幅度稳定系数, 一些影像像元被挑选出来作为 PSC, 并且对分散的 PSC 组成的格网进行相位解缠。对于重建和补偿大气效应贡献值而言, PSC 的空间密度大于等于 3~4 点/km<sup>2</sup> 就足够了。

4) 抑制大气效应的影响。估计并去除大气相位  $\Delta\alpha$ 。实际上, 这个操作允许将地表形变对应的干涉相位分离出来, 即式 (1) 中的第二项。从每个 PSC 估计出来的大气相位项被重采样, 并用 Kriging 插值法对主影像规则格网滤波。该方法仅适用在 PSC 分布密度足够大的地区 (大约 5~10PSC/km<sup>2</sup>)。

作为该步骤的结果, 可以得到相对于所有数据集的干涉纹图的解缠相位值、精确估计的高程值和 PSC 的视线方位向位移速度, 这些结果是根据参考点的高程且假设参考点不移动的情况下计算得到的。

在补偿了地形和移动相位差值的 PSC 格网图上, 大气效应贡献值被估计出来。这个处理过程的关键是 PSC 的选择。如果 PSC 具有太多的噪音或者从它们当中可提取的 PS 点很少, 那么大气效应贡献值就不能被成功地估计, 即不能保证后续步骤的实施。

5) 识别 PS 点和生成平均偏移率图。相对于参考主影像, 每景 SAR 影像时间序列上的偏差值说明了每个 PS 点的 LOS 位置, 每个 PS 点的单独测量精度范围通常在 1~3mm 之间。

地形和大气效应贡献值相位项的分离是基于其特征的, 即地形相位贡献值是正比例于空间基线的, 然而, 形变是在时间上相关的。这个步骤被应用在前面得到的不同干涉纹图 (已经用大气效应贡献值补偿) 上, 所有的 PS 点被逐个像元地计算和识别出来, 最终生成地表形变的平均偏移率

图。

目前,该流程只适用于小范围(数  $10\text{km}^2$ )的研究,大范围区域的研究需要的步骤仍然一样,但是其中的方法要更复杂些。在 PS 点上,只要大气效应贡献值估计出来并被去除,就可以计算出  $m$  级高程精度的 DEM 和  $mm$  级的地表形变。同时,目标的 LOS 方向形变速率可以以极高的精度估计出来,部分情况下精度甚至可以小于  $0.1\text{mm}/\text{a}$ <sup>[13]</sup>。

## 2 PSI 技术的特点

通过前面的技术分析可以看到,PSI 技术具有与其他 InSAR 技术显著不同的特点,正因为它利用的是稳定且小于像元尺寸的永久反射体,实现了大气效应贡献值的有效去除,才有可能获得如此高精度的地表形变值。PSI 技术的特点如下<sup>[14]</sup>。

1) 大信息量。永久散射体是一种新的信息资源,它提供的基准点——永久散射体的密度远远大于其他传统测绘方法(如 GPS 测量和水准测量)得到的数据点的密度。可以处理时间上跨越十余年的干涉影像,识别上百万个 PS 点并量测视线方向的地表偏移量。

2) 低成本、高精度。利用数十景影像就可以监测十年的地表形变,节省了布置长期地面 GPS 观测站和布设水准测量的费用,而精度却几乎可以与这两种测量技术的结果相媲美,如该技术可测得小于  $0.1\text{mm}/\text{a}$  的视线向移动速度。

PSI 技术也受到它自身缺点的限制,主要如下。

1) 要求数据量大。每个研究地区的影像是  $20\sim 30$  景,在 Ferretti 等人的试验中,一般数据量都达到  $50\sim 60$  景,这很大程度上制约了该方法在一些地区的应用。

2) 研究区域类型和大小的限制。目前,在城市和岩石出露较多的地区,该技术取得了比较好的效果。在植被覆盖密集地区,还有待进一步的试验。研究范围不超过  $5\text{km}\times 5\text{km}$ ,大范围的运算在算法上还有待改进。

3) 研究对象形变速度的限制。由于算法的限制,研究对象希望是运动速度比较小的对象,这样可以假设对象是作匀速运动。目前, Ferretti 等研究的主要都是在每年数  $\text{cm}$  到数  $\text{mm}$  运动速度的范围内。目前,该技术有时还需要其他工具的辅助,如 GPS、大地水准测量、角反射器等工具辅助测量或检测该方法的形变监测结果。

此外,水准测量、GPS 和 PSI 三种技术同时

使用,能够极大地提高地表变形的精度,减少各种制约因素的影响。同时,在已建有角反射器的地区,角反射器也是一种可利用的消除制约因素的良好工具。通过综合运用多种技术途径,一定能够极大地提高在地表形变监测中的测量精度。

## 3 应用实例

2003 年 12 月,在意大利米兰举行的 Fringe2003 会议上,PSI 技术和长时间 D-InSAR 技术被并列作为目前和将来最常用和最有前景的两项技术提出<sup>[15]</sup>。而 PSI 技术的应用领域也在该会议上作了深入讨论,其中包括区域沉降特别是城市地区沉降、火山、大地构造及特别提出的滑坡变形监测。此外,还有独立的建筑物拉伸变形等。

滑坡的变形监测是 PSI 技术应用较多且效果较明显的一个方向。在星载 SAR 影像上,滑坡体只表现为很小的范围,应用传统的 D-InSAR 方法则难以实施变形监测。

在城市个别建筑物形变监测中,大量的 PS 点被识别出来,且测量出了建筑物的变形,对于建筑物保护、房地产评估等具有现实意义。这充分显示了 PSI 技术的应用向更广阔的商业领域拓展的良好前景。

### 3.1 PSI 技术在滑坡监测方面的应用

1982 年 12 月 13 日,意大利中东部的 Ancona 镇发生了大滑坡,给意大利政府带来了 1 亿美元的损失。此后,为了监测该地区的持续缓慢的地表移动(小于  $1\text{cm}/\text{a}$ ),意大利政府分批次地布设了 GPS 和大地水准测量系统。

试验区大小为  $5\text{km}\times 4\text{km}$ ,其中约  $1/4$  的地区是海面,另有部分植被区域。试验数据采用 34 景 ERS-1/2 影像,其中最大的时间基线超过  $5\text{a}$ ,空间基线超过  $1\ 600\text{m}$ 。它们分别对惟一景主影像配准,生成 33 景干涉图。试验所采用的 DEM 是使用 6 对串联飞行方式影像对,利用小波进行多基线干涉信息融合而生成的。与引入已有的 DEM 方法对比而言,该方法具有很强的数据现势性,不易引入由于不是同期生成 DEM 而带来的误差。以其中一个 PS 点为例,去除大气效应贡献值后,最终的计算结果表明可监测平均形变值为  $(5\pm 0.4)\text{mm}/\text{a}$  的地表变形。

### 3.2 PSI 技术在城市建筑物方面的应用<sup>[16]</sup>

1994~1995 年期间,意大利 Rovigo 市一个历史博物馆受到地表沉降的影响,导致出现房屋裂缝等毁坏建筑物的现象。专家利用 PS 技术,

利用客观的数据确定房屋毁坏的原因是离博物馆大约 100 ~ 150m 远建造一个地下停车场的施工而造成的。

其研究区域是一个 700m×600m 的街区。使用的数据包含升轨和降轨的 ERS-1/2 的 SAR 影像, 时间范围是从 1992 年 4 月到 2000 年 11 月。研究区内共有 142 个 PS 点被识别出来, 相当于每 km<sup>2</sup> 约有 338 个 PS 点, 这个 PS 点格网的密度非常大。其中通过某一个 PS 点在时间序列上前后 8a 中的变化情况显示, 该点在垂向上的变化超过了 30mm。

## 4 结 语

常规的 InSAR/D-InSAR 技术由于 SAR 所特有的成像方式和干涉测量机理引起的空间-时间去相关和大气效应等问题, 一直是困扰该新型遥感探测技术走向实用化的主要障碍。从国际前沿发展来看, PSI 技术是解决这些问题最具潜力的途径之一。在数据获取方面, 无论是已有的还是计划中的星载 SAR, 均具备干涉成像能力, 商业数据来源越来越丰富。欧洲空间局在 2003 年 3 月发射的 ENVISAT-1/ASAR、日本 2004 年将要发射的 ALOS/POLSAR 和加拿大的 RADARSAT-II, 都把干涉成像能力作为其重点。为了提高干涉成像性能, 美国在 SRTM 计划中特别推出了双天线 SAR 系统, 甚至许多科学家和航天企业都积极推动小卫星星座计划。我国在经过多年的机载试验后, 星载 SAR 计划已被提上日程。InSAR 数据获取能力在不久的将来会有较大的提高, 使之初步具备 InSAR 技术推广应用的数据条件。在掌握永久散射体干涉测量核心技术的基础上, 继续完善和提高其实用性和可推广性, 可以真正深化和拓展 InSAR 这一新型遥感探测技术的应用。

## 参 考 文 献

- 1 廖明生, 林 珺. 雷达干涉测量——原理与信号处理基础. 北京: 测绘出版社, 2003
- 2 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
- 3 Zebker H A. Studying the Earth with Interferometric Radar. *Computing in Science & Engineering*, 2000, 52 ~ 60
- 4 Hanssen R F. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. London: Kluwer Academic Publishers, 2001
- 5 郭华东, 王长林, 董 庆, 等. 雷达对地观测理论与应用. 北京: 科学出版社, 2000
- 6 Zebker H A, Rosen P A, Hensley S. Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102: 7 547 ~ 7 563
- 7 Colesanti C, Ferretti A, Locatelli R et al. Multiplatform Permanent Scatterers Analysis: First Results. *GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, 2003, 52 ~ 56
- 8 Ferretti A, Prati C, Rocca F. Multibaseline InSAR DEM Reconstruction: The Wavelet Approach. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1999, 37: 705 ~ 715
- 9 孙和平, 罗少聪. 地球物理场观测中的大气效应问题研究. *地球物理学进展*, 2002, 17(3): 507 ~ 513
- 10 Rabbel W, Zschau J. Static Deformations and Gravity Changes at the Earth's Surface Due to Atmospheric Loading. *Geophysics*, 1985, 56(2): 81 ~ 99
- 11 van Dam T, Wahr J. Detection of Atmospheric Pressure Loading Using Very Long Baseline Interferometry Measure2 Ments. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(B2): 4 505 ~ 4 517
- 12 Alessandro F, Claudio P, Fabio R. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8 ~ 20
- 13 Colesanti C M, Alessandro F, Claudio P, et al. Monitoring Landslides and Tectonic Motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology*, 2003, 68: 3 ~ 14
- 14 TRE Company. TRE Company Brochure. <http://213.215.195.35/tresite-eng/download/index.htm>, 2003
- 15 ESRIN. ESA. <http://earth.esa.int/fringe03/FRINGE-recommendations.html>, 2003
- 16 TRE Company. Case Study: The Structural Settlements of Buildings Investigated by the PS Technique. *Rovigo Law-Court Judgement: the Probative Effectiveness of a New Satellite Technology—the PS Technique*. <http://213.215.195.35/tresite-eng/download/index.htm>, 2003

第一作者简介: 李德仁, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 中国工程院院士, 欧亚科学院院士。现主要从事以遥感、全球定位系统和地理信息系统为代表的空间信息科学与技术的科研和教学工作。代表成果: 高精度摄影测量定位理论与方法; GPS 辅助空中三角测量; SPOT 卫星像片解析处理; 数学形态学及其在测量数据库中的应用; 面向对象的 GIS 理论与技术; 影像理解及像片自动解译以及多媒体通信等。已发表论文 350 余篇。  
E-mail: dli@wtusm.edu.cn

# Progress of Permanent Scatterer Interferometry

LI Deren<sup>1</sup> LIAO Mingsheng<sup>1</sup> WANG Yan<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,  
Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** This paper overviews the background and the basic principle of PSI technique, illustrates some examples of its application in details. Finally, the prospect of its potential application is discussed.

**Key words:** permanent scatterer; deformation monitoring; atmospheric artifact; InSAR

**About the first author:** LI Deren, professor, Ph. D supervisor, academican of the Chinese Academy of Sciences, academican of the Chinese Academy of Engineering, member of the Euro-Asia International Academy of Sciences. He is concentrated on the research and education in spatial information science and technology represented by remote sensing (RS), global positioning system (GPS) and geographic information system (GIS). He has made unique and original contribution in the areas of theories and methods for high precision photogrammetric positioning, GPS aerotriangulation, analysis and processing of SPOT imagery, mathematical morphology and its application in spatial databases, theories of object-oriented GIS, image understanding and automatic photointerpretation, multi-media communication and mobile mapping systems, etc. The research findings have promoted the progress of the technology directly and are being turned into products. His published papers are more than 350.

E-mail: dli@wtusm.edu.cn

(责任编辑: 晓平)

## 下期主要内容预告

- ▶ 地球空间信息学的机遇
- ▶ 一个新的 GNSS 模糊度估计类
- ▶ 关于引力位虚拟压缩恢复级数解的一致收敛性证明
- ▶ 不确定性线状目标之间拓扑关系的描述与判别
- ▶ 空间数据立方体分析操作原理
- ▶ GPS 基准站坐标与速度场精度及随时间变化规律的探讨
- ▶ 我国北斗卫星导航系统应用需求及效益分析
- ▶ 基于高分辨率影像的城市三维建模
- ▶ 一种改进的 MODIS 影像 BRDF 辐射校正方法
- ▶ 扫描输入数据的颜色校正
- ▶ 色彩表示的宽带多光谱空间研究
- ▶ 基于卡尔曼运动模型模糊图像恢复技术研究
- ▶ 基于 MPM 准则的无监督 SAR 图像分割