

基于 SARscape 的干涉叠加在 地表形变监测中的应用

王昊,董杰,邓书斌

(Esri 中国(北京)有限公司,北京 100007)

摘要:地表形变主要表现为地震形变、地面沉降、山体滑坡等,由 InSAR 技术发展而来的干涉叠加通过挖掘时间序列 SAR 图像获取 mm 级的形变信息。本文介绍了干涉叠加技术的基本原理和技术流程、基于永久散射体的方法,利用 2008 年~2010 年的 23 幅 Cosmo-skymed 数据对北京奥林匹克公园内的主要区域进行了地表形变的监测。

关键词:干涉叠加;地表形变;永久散射体(PS-InSAR);短基线(SBAS);SARscape

doi:10.3969/j.issn.1000-3177.2012.01.022

中图分类号:TP751 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3177(2011)118-0109-05

Application of Interferogram Stacking in Surface Deformation Based on SARscape

WANG Hao, DONG Jie, DENG Shu-bin

(Esri China (Beijing) Co., Ltd, Beijing 100007)

Abstract: Land surface deformation include earthquake deformation, landslide and surface subsidence etc. The interferogram stacking technique, extending SAR interferometry to the analysis of large sets of multi-temporal acquisitions, enables to get the displacement information with few millimeters measurement. This paper introduces the fundamental and technique process of interferogram stacking. And we take the Beijing Olympic park as study area to do the surface deformation monitoring using 23 Cosmo-skymed data between 2008 to 2010, based on PS technique.

Key words: interferogram the year stacking; surface deformation; Persistent Scatterers; Small Baseline; SARscape

1 引言

地表形变主要表现为地震形变、地面沉降(地下水/油气开采、矿区塌陷等)、山体滑坡、冰川流动、活火山隆起或者下沉、地壳断层运动等。这些地表形变现象与人类活动息息相关,掌握这些地表形变信息显得尤为重要。

合成孔径雷达干涉测量—InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry) 技术逐渐成熟并得到了工程化应用,已经成为地表形变监测的主要技术手段,在全球及区域性地形测图、大尺度地表形变

监测中得到广泛应用。InSAR 技术是利用雷达系统获取同一地区两幅 SAR 影像所提供的相位信息进行干涉处理,来获取地表的三维信息,可以建立目标地区的数字高程模型^[1]。如美国的 SRTM 项目就是采用 InSAR 技术获取全球 80% 陆地覆盖的中分辨率 DEM 数据。

地表形变监测主要用到的几种技术均由 InSAR 发展而来:差分干涉测量(D-InSAR)、永久散射体干涉测量(PS-InSAR)和短基线(SBAS),PS 和 SBAS 属于干涉叠加技术范畴,其他的还有相干目标法等。

收稿日期:2010-12-05 修订日期:2011-02-10

作者简介:王昊,男,主要从事遥感应用研究。

E-mail: wh@esrichina-bj.cn

2 干涉叠加技术

2.1 概述

干涉叠加是挖掘时间序列中 N 个 SAR 图像信息,可以识别区域或者像素范围内,一定时间内表现相干性和一致性的信号,即位移信息。主要包括两种方法:永久散射体和短基线。

(1)永久散射体

重复轨道差分干涉 SAR(D-InSAR)的应用目前受到两大因素的制约:时间失相关和大气相位延迟,由其产生的相位噪声降低了形变测量的可靠性^[2]。近些年发展的永久散射体干涉测量(Persistent Scatterers Interferometric SAR, PSInSAR)技术的主要目的是为克服空间去相干及大气的影响,发展最为迅速。永久散射体技术首先由意大利 Ferretti 等人于 2000 年提出^[3]。

PS 技术将 InSAR 技术扩展到多时相的数据,可将测量精度从厘米级提高到毫米级。PS 技术的特点是利用了密集分布的散射体消除大部分电磁波信号传播延迟(对流层变化引起)的优势。PS 技术可以推断在时间段上的变形速度,包括独立的、无空间相关的位移,主要适用于人为因素引起的位移现象(如城市区域等)。

(2)短基线

2002 年 Berardino 等人首次探讨了短基线干涉测量(Small Baseline InSAR, SBAS)并验证了其在地表形变中的应用^[4]。短基线是用来检测时间序列上地表表面的动态演变。可利用小的空间和时间基线的干涉像对,进行地表位移制图;也可利用自定义基线间隔的干涉像对,进行 DEM 的提取。

SBAS 基本原理为:应用奇异值分解来连接由长基线造成的相互独立的 SAR 影像,形成短基线 SAR 影像集合,以增加数据获取的采样率,从而可在已有的 SAR 影像数据集中形成若干小集合,每个小集合内 SAR 影像间的基线较小,集合间 SAR 影像的基线较大,在小集合内地表形变信息利用最小二乘法求解^[5]。

2.2 技术流程

SARscape 由 sarmap 公司研发,是国际知名的雷达图像处理软件。该软件架构于专业的 ENVI 遥感图像处理软件之上,提供图形化操作界面,具有专业雷达图像处理和析功能,能将原始 SAR 数据进行处理和分析,输出 SAR 图像产品、数字高程模型(DEM)和地表形变图等信息^[8]。全面支持雷达强

度图像处理(SAR Intensity Image)、雷达干涉测量(InSAR/DInSAR)、极化雷达处理(PolSAR)、极化雷达干涉测量(PoInSAR)的处理与分析。SARscape 主要应用于地形数据(DEM)提取、地表沉降监测、滑坡/冰川移动监测、目标识别与跟踪、原油泄漏跟踪、作物生长跟踪、农作物产量评估,以及洪水、火灾和地震的灾害评估等领域。

2.2.1 PS 技术流程

PS 是进行点目标分析,得到高相干性的局部散射体的形变信息和精确的高程信息。输入图像的数量对最后要进行 PS 鉴定的像元相干性的估算非常重要,如果输入 SAR 图像的数量不足的话,在整个处理过程中,整个区域会有大量的高相干性目标和很多“假形变”信息,一般来说,为保证正确的相干性和 PS 鉴定结果,输入影像的数量应该大于 20 幅。输入 SAR 数据集,必须是相同的传感器相同的观测几何(如相同的入射角)获取的多景 SAR 数据,时间分布也应与预期的位移相匹配。

在 N 幅 SAR 影像中选取其中一幅基线较为合适的影像作为主影像,生成 N 幅干涉条纹图,利用参考 DEM 去除地形相位的影响,基于幅度特征或相干系数筛选 PS 候选点的模型。在卫星轨道不准确或 DEM 地理定位不准确的情况下,用地面控制点(GCP 文件)来修正 SAR 数据,详细流程如图 1 所示。

PS 输出的结果是在斜距方向的位移速率的矢量文件,每个 PS 点包括以下信息:①每个数据对于参考文件或是原始输入数据的位移;②用全部的输入数据测出的总的位移;③平均相干性系数;④用干涉测量的方法,对 PS 点相对于 DEM 的坐标和高度上的修正;⑤输入的 DEM 的高程修正。

2.2.2 SBAS 技术流程

进行离散目标分析,和 PS 比起来,SBAS 技术对输入 SAR 图像的个数不是非常敏感,因为用的是离散分布的相干目标而不是一个点目标,而且在 SBAS 中,做了一些空间位移相关性的假设。不过 SAR 图像个数越多,得到的结果越好,输入的 SAR 数据数量至少是 5 幅。

在连接图生成环节中,定义了 SAR 相对组合和连接网络,用来生成多个差分干涉。对所有图像建立对应关系,看每对主从影像的基线是否在阈值内,将所有的数据都配准到一个主图像。之后使用三维解缠方法得到每一时间段间的相位,详细流程如图 2 所示。

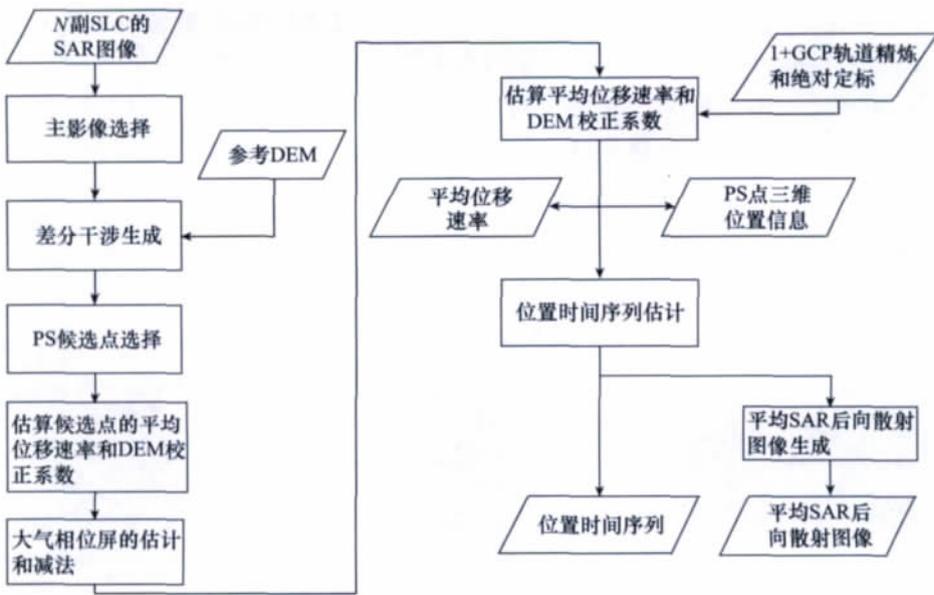


图1 PS技术流程图

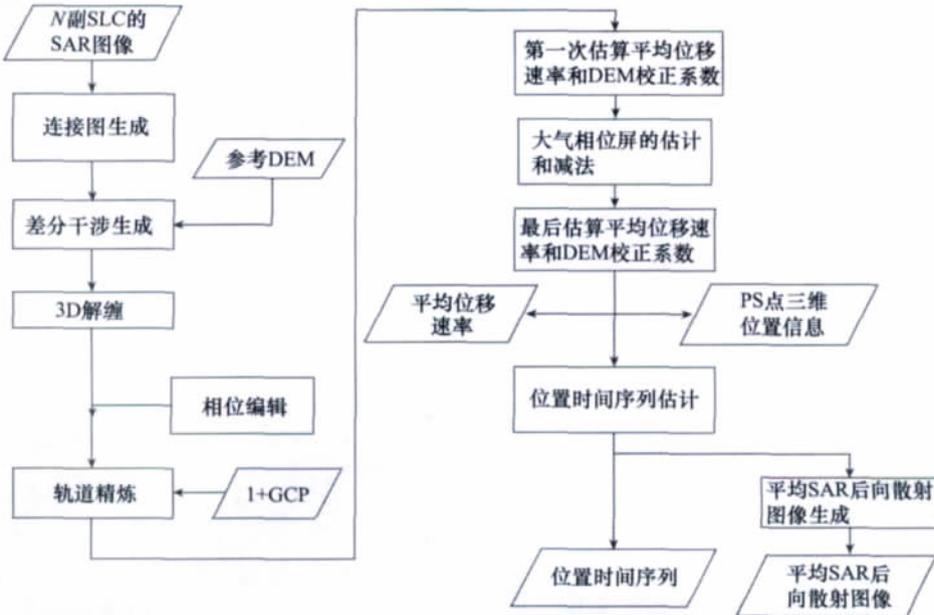


图2 SBAS技术流程图

在最终生成相关的位移过程中,位移可用以下公式表达:

$$Disp = K + V * (t - t_0) + 1/2A * (t - t_0)^2 + 1/6\Delta A * (t - t_0)^3 \quad (1)$$

其中: *Disp* 表示在时间 *t* 内的位移; *K* 是一个零阶矩的常数; *V* 表示位移速率; *A* 表示位移加速度; ΔA 示加速度变化值。

3 星载 SAR 数据

SAR 数据按其承载的飞行平台不同被分为机载和星载系统,星载 SAR 开始于海洋卫星 SeaSat。

1978 年 6 月,美国国家航空航天局发射了海洋卫星 (SeaSat),在卫星上首次装载了 SAR 传感器,标志着星载 SAR 技术由实验室向应用研究的关键转变^[6]。此后,其他许多国家也开展了星载 SAR 的研究工作,欧空局 1991 年 7 月和 1995 年 4 月分别发射了欧洲遥感卫星 ERS-1 和 ERS-2;日本于 1992 年发射了 JERS-1;加拿大于 1995 年发射了地球资源卫星 RADARSAT-1。

进入 21 世纪,更多性能更优越的星载 SAR 陆续上天,包括欧空局 2002 年发射的 ENVISAT 携带的先进合成孔径雷达 (ASAR),日本 2006 年发射的

ALOS 携带的 L 波段相控阵型合成孔径雷达(PAL-SAR), 德国 2007 年发射的 TerraSAR-X, 意大利 2007 年发射的 Cosmo-skymed, 加拿大 2007 年发射的 RADARSAT-2。星载 SAR 系统正朝着高分辨

率、多极化方向发展, 重访周期越来越短。并且拥有丰富的 SAR 存档数据, 使得开展长时间缓慢形变监测成为可能。当前主流可用于 InSAR 的国外星载 SAR 的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 国外星载 SAR 的主要技术指标

系统	发射时间(年)	波段	极化	图幅宽度(km)	方位向分辨率(m)	重复周期(天)	轨道精度(cm)	接受模式	国家/地区
ERS-2	1995	C	VV	100	25	35	30	Stripmap	欧洲
RADARSAT1	1995	C	VV	10-500	10-30-100	24	>100	Stripmap ScanSAR	加拿大
ENVISAT	2002	C	VV	100-400	20	35	30	Stripmap ScanSAR	欧洲
ALOS	2006	L	Full	40-350	7-14-100	46	>100	Stripmap	日本
TerraSAR-X	2007	X	Full	5-10-30-100	1-3-16	11	10	Spotlight Stripmap ScanSAR	德国
Cosmo-skymed	2007	X,L	Full	10-30-200	1-3-15	1-16	10	Spotlight Stripmap ScanSAR	意大利
RADARSAT2	2007	C	Full	10-500	3-100	1-24	10	Spotlight Stripmap ScanSAR	加拿大

4 实验与结果分析

北京奥林匹克公园位于城市中轴线的北端, 面积约 1215ha, 其中包括 760ha 的林绿地, 占地 50ha 的中华民族博物馆以及占地 405ha 的展览馆、体育场馆及奥运村。其中展览馆、体育场及奥运村包括众多新建人工建筑, 这些新建人工建筑对所在地表以及周边地表造成一定的沉降作用。本文以体育场馆及周边一定范围区域为实验区(如图 3 所示), 包括国家体育场(鸟巢)、国家体育馆、国家游泳中心(水立方)、玲珑塔、会展中心等, 中心点经纬度: 116.3577E, 40.0274N。

实验采用意大利的 Cosmo-skymed 的 SLC 数

据, 主要参数如表 2 所示, 使用 SRTM90m 的 DEM 去除地形影响。

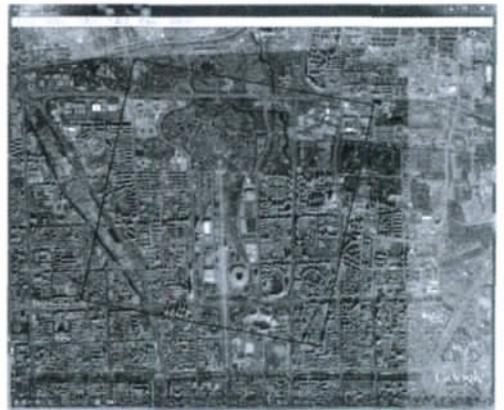


图 3 实验数据覆盖区

表 2 实验数据概要

地区	图像数量	获取时间	最小时间间隔(天)	最大时间间隔(天)	平均时间间隔(天)
北京市国家体育场(鸟巢)附近	23	2008-03-06~ 2010-02-08	9	129	46

处理过程采用 SARscape 软件的 Persistent Scatterers 工具,这个工具将图 1 所示的 PS-InSAR 流程整合到一个界面中。使用自动选择的方式,相干系数阈值 0.80,选择得到垂直基线长度为 180m 的 2009 年 4 月 18 日成像的影像作为主影像,距离向和方位向视数都为 2,估算候选点的平均位移速率为 2.03695mm/年,DEM 校正系数为 0.563513m。

的直方图中(图 4)可以看到平均形变速率主要集中在 $-4.33\text{mm}/\text{年} \sim 4.4\text{mm}/\text{年}$ 之间,占 $25633/26587 = 96\%$,其余 4% 的 PS 点(其中小于 $-4.33\text{mm}/\text{年}$ 的有 156 个 PS 点,大于 $4.4\text{mm}/\text{年}$ 的有 798 个 PS 点)主要分布在图中西北角奥运村旁边,PS 点形变速率直方图见图 5。

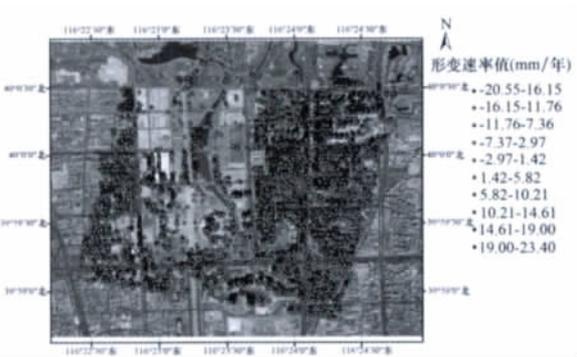


图 4 地面形变速率结果

图 4 是采用 PS 方法提取的该实验区地面形变速率结果(背景底图是 0.5m 的卫星影像图)。选用相干系数阈值 0.80,本实验共提取 26587 个高质量的 PS 点,每平方公里 2188 个 PS 点,主要分布在屋顶、桥梁等人工建筑物上。获取 2008 年~2010 年在雷达视线向(LOS)最大抬升平均速率为 $23.4\text{mm}/\text{年}$,最大下沉速率为 $20.5\text{mm}/\text{年}$ 。从 PS 点

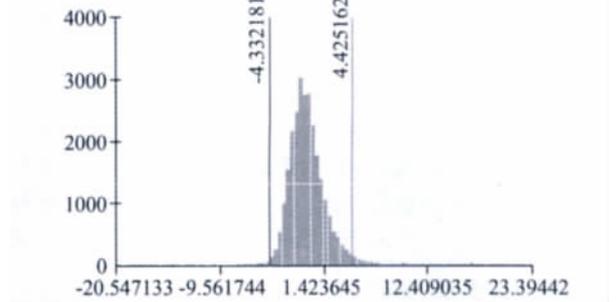


图 5 PS 点形变速率直方图

5 结束语

本文介绍了干涉叠加技术的基本原理和 SARscape 软件中的 PS-InSAR 和 SBAS 的技术流程。基于永久散射体的方法,利用 2008 年~2010 年的 23 幅 Cosmo-skymed 数据对北京奥林匹克公园内的主要区域进行了地表形变的监测。随着星载 SAR 数据的日渐增多,InSAR 技术的日益完善,以及 SAR 软件的逐渐成熟,InSAR 技术将逐渐在地表形变监测中发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1] 王超,张红,刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 科学出版社,2002.
- [2] Ferretti A,Prati C,Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2001,39(1):8-20.
- [3] Ferretti A,Prati C,Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent Scatterers in differential SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2000,38(5):2202-2212.
- [4] Berardino p,Fornaro G,Lanari R. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small base line differential SAR interferograms[J]. IEEE Aerospace and Electronic,2002(40):2375-2383.
- [5] 周志伟,鄢子平,刘苏,李振洪. 永久散射体与短基线雷达干涉测量在城市地表形变中的应用[J]. 武汉大学学报信息科学版,2011,36(8).
- [6] 曾琪明,焦健. 合成孔径雷达遥感原理及应用简介[J]. 遥感信息,1998(1).
- [7] P. Berardino,G. Fornaro,R. Lanari,E. Sansosti. A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Base-line differential SAR Interferometry[J]. IEEE Aerospace and Electronic,2002,40(11).
- [8] sarmap Inc. SARscape 4.3 User Guide[Z]. 2010.