

高分辨率 TerraSAR-X 雷达干涉 及其在工程形变探测中的应用

贾洪果, 刘国祥, 张 瑞

(西南交通大学 土木工程学院 测量工程系 四川 成都 610031)

High-resolution TerraSAR-X Radar Interferometry and Its Application to Detecting Deformation of Engineering Structures

JIA Hongguo, LIU Guoxiang, ZHANG Rui

摘要:工程形变是工程建设风险分析的重要因素,对其进行有效监测十分必要。使用德国 TerraSAR-X 卫星所获取的多幅 X 波段高时空分辨率 SAR 影像,采用两轨差分干涉方法,提取天津西郊南水北调工程施工形成的弃土场快速形变信息。试验结果表明, TerraSAR-X 雷达干涉技术在工程或地表垂直位移探测方面具有高时空分辨率、高精度(内符合精度可达 ± 2 mm)和高自动化特征,在工程形变监测方面具有较大的应用潜力。

关键词:TerraSAR-X; 两轨差分干涉; 南水北调; 弃土场; 地表形变

一、引言

南水北调工程是经过长达 50 年的野外勘查和测量后,规划形成的一项分东线、中线和西线调水的超大型工程。通过三条调水线路将长江、黄河、淮河和海河四大江河联系起来,构成以“四横三纵”为主体的总体布局,以利于实现我国水资源南北调配、东西互济的合理配置格局^[1-2]。这种大型线性工程的施工(尤其是土石填挖)会引起工程自身及周边地表的形变,从而对工程建设和周边环境造成不利影响,对其进行有效的监测尤为重要。

惯用地表形变监测一般采用重复精密水准测量方法,即通过布设水准网并进行观测、平差后提取地面微小沉降变化值。该方法具有很高的监测精度,但存在野外工作劳动强度大、周期长且耗时耗力等技术劣势。近几年来,随着空间大地测量技术的发展,GPS 也逐渐被应用于地表形变的监测。GPS 的优点在于监测自动化及精度高,但它只能监测有限数目的离散点的变形,且对垂直位移分量的测量精度相对较低^[3]。合成孔径雷达差分干涉测量(D-InSAR)是在合成孔径雷达干涉高程测量基础上发展起来的用于监测大面积微小地面形变的对地观测新技术^[4]。由于它具有视域广、几乎不受云雨天气影响、数据量丰富、更新快等优点,能高度自动化和高精度地监测地表变形,因此,近几年来被

广泛应用于地表形变的探测。

目前,D-InSAR 的主要数据源以中等时空分辨率 SAR 影像为主(如欧空局卫星 ERS-1/2 和 ENVISAT C 波段 SAR 影像等),它们已成功应用于城市沉降^[5]、山体滑坡^[6]等方面的监测与研究,但仍存在时空分辨率低,短期内(如 10 d 左右)提取微小形变较为困难的缺点。2007 年由德国发射升空的 TerraSAR-X 是世界上第一颗高分辨率雷达卫星,其重访周期为 11 d,SAR 影像空间分辨率最高可达 1 m。该雷达发射波长为 3.1 cm 的 X 波段进行影像数据获取,其形变探测精度比波长为 5.6 cm 的 C 波段雷达和波长为 23.5 cm 的 L 波段雷达更高,对短期内的地表微小形变也更为有效。

目前,国内外关于使用 D-InSAR 技术监测工程形变的应用较少,尤其将高时空分辨率 SAR 影像应用于工程或地表形变信息提取的报道较少。为此,本文以南水北调工程为研究背景,选择天津市西郊作为试验区域,使用德国 TerraSAR-X 卫星于 2009 年 6—7 月所获取的 3 幅高分辨率 SAR 影像,通过两轨差分干涉方法,提取 22 d 时间间隔内由于南水北调工程引起的区域地表形变信息。通过对比时间跨度分别为 11 d 及 22 d 的差分相位图及垂直位移图,并对最大形变量进行内符合精度评定,考察高分辨率 TerraSAR-X 雷达干涉应用于工程引起的短期地表形变探测的精度和可靠性,并基于垂直位

收稿日期: 2010-10-18

作者简介: 贾洪果(1980—),女,四川泸州人,博士生,研究方向为合成孔径雷达干涉。

移图重点分析工程引起的地表沉降的分布情况、沉降量级及发展趋势。

二、地表形变探测方法

当卫星 SAR 系统成像时,传感器的回波信号中包含了地物的后向散射相位和强度信息,D-InSAR 通过对雷达两次观测同一地区所获取的回波信号进行干涉处理(即相位差分),生成干涉相位图。如果地面目标在雷达两次观测期间发生了位移,那么其相应像素的差分相位($\Delta\phi$)将会包含成像区域的参考椭球面相位分量(ϕ_{flat}),地形相位分量(ϕ_{topo}),两次成像期间地表相对运动的相位分量(ϕ_{def}),卫星轨道误差(ϕ_{orbit})以及大气效应(ϕ_{atmos})和失相关噪声(ϕ_{noise})相位贡献量^[7]。即

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \phi_{\text{def}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{flat}} + \phi_{\text{orbit}} + \phi_{\text{atmos}} + \phi_{\text{noise}} \quad (1)$$

为了从干涉图中提取形变相位信息 ϕ_{def} ,本文首先通过轨道参数和所选定的参考基准^[8]消除参考椭球面所引起的平地效应 ϕ_{flat} 。由于天津市西郊海拔高度范围一般在3.0~5.0 m之间,且3个干涉对的空间基线较短,地形相位分量可忽略,因此,差分干涉处理中无需进行地形影响扣除的处理^[9]。此外,因试验区范围较小(约3 km²),大气延迟影响在空间尺度上呈现强相关,因此对相对形变探测的影响可忽略。最后,根据差分干涉图的质量选择合理的解缠方法^[10-12],本文采用最小费用流(minimum cost flow, MCF)方法进行相位解缠。设某像素上解缠绕后的相位为 ψ_{def} ,则沿雷达视线向(line of sight, LOS)的形变量 Δr 可表示为

$$\Delta r = \frac{\lambda}{4\pi} \psi_{\text{def}} \quad (2)$$

由式(2)可知,当使用波长为3.1 cm的X波段 SAR 进行地表形变探测时,如果地面 LOS 方向发生1.5 cm的位移,在差分干涉条纹图中将增加一个条纹。因此,理论上来说,利用 TerraSAR-X 差分干涉技术可监测毫米级的形变量。因最终关注的是垂直形变量,因此可用下列近似计算式将雷达视线方向的形变转换为垂直位移($\Delta r'$),即

$$\Delta r' = \frac{\Delta r}{\cos \theta} \quad (3)$$

式中 θ 为 TerraSAR-X 卫星的雷达入射角。

三、试验及结果分析

本次试验选用德国 TerraSAR-X 卫星分别于

2009-06-23、07-04 以及 07-15 沿升轨方向获取的3幅单视复数 SAR 影像(入射角为41°,极化方式为 HH,斜距向分辨率为1.36 m,方位向分辨率为1.9 m),将它们分别按11 d和22 d间隔组合生成3个干涉对,干涉对参数如表1所示。

表1 本研究所使用的3个干涉对参数

干涉对数目	主影像获取时间	从影像获取时间	垂直基线 /m	时间基线 /d
1	2009-06-23	2009-07-04	59.1	11
2	2009-07-04	2009-07-15	-15.3	11
3	2009-06-23	2009-07-15	43.8	22

天津市西郊是南水北调中线一期工程、天津干线第5段工程的施工区。由于输水干渠的建设,沿其边沿形成了呈条带状分布的弃土场。图1为研究区域高分辨率 SAR 影像图(覆盖范围:2 km × 1.5 km)。从图中可以看出,道路、河沟等特征地物在高分辨率 TerraSAR-X SAR 影像上清晰可见,特别是输水干渠及其周边区域呈现出高亮的白色,表明这些位置对 TerraSAR-X 雷达波具有较好的后向散射效果,这对弃土场形变的监测十分有利。

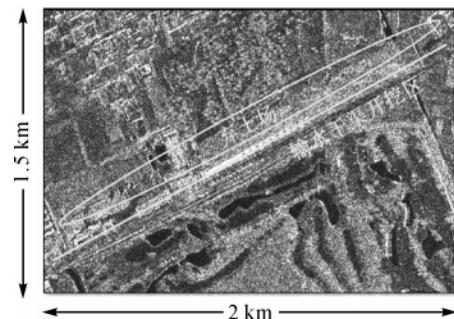


图1 试验区强度影像

在2009-06-23—2009-07-15期间,弃土场的土层保持稳定。同时,由于该弃土场形成不久,土质松软,在自身重力及外部荷载作用下产生了轻微下沉。本文通过提取弃土场在22 d时间内的垂直位移信息,说明高分辨率、短波段 SAR 数据在探测工程引起的短期快速地表形变中的优势。

在对3幅 TerraSAR-X SAR 影像进行两轨 D-InSAR 处理后,获得了试验区时间跨度分别为11 d及22 d的差分相位图及垂直位移图(如图2所示)。其中(a)、(c)、(e)为差分相位图,(b)、(d)、(f)为对应的垂直位移图。注意,图2的左侧已标注出时间跨度。

在3幅差分相位图中 TerraSAR-X 数据对弃土场区域显示出较好的相关性,干涉条纹清晰可见,

但在剧烈地表变化(施工引起)导致两次回波信号完全失相关的其余地段,条纹完全被噪声淹没,无法分辨。进一步分析两个 11 d 时间间隔的差分相位图(a)和(c),发现位于弃土场西部的干涉条纹较东部明显,即西部的沉降量大于东部;而对于 22 d 时间间隔的差分相位图(e)来说,弃土场的东部和西部均有干涉条纹出现,其余大部为噪声。该现象一方面说明在使用 D-InSAR 技术提取工程引起的快速形变信息应用上,干涉对时间基线参数的选择是非常重要的,时间基线过长会导致回波信号的失相关,从而无法进行沉降量的探测;另一方面对于弃土场来说,这一现象也说明了其东部的沉降量在 22 d 内呈逐渐递增的趋势。

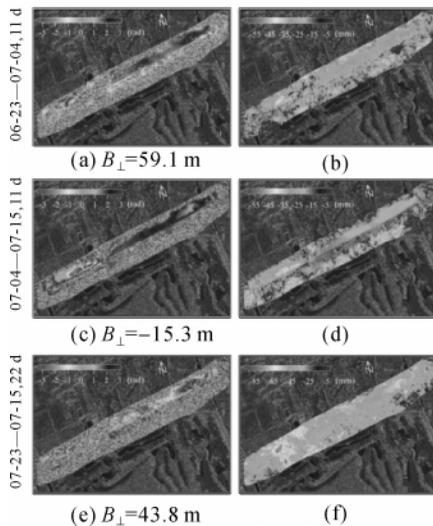


图2 时间跨度为 11 d 及 22 d 的差分相位图及垂直位移图

D-InSAR 相位解缠的原理是以影像上的某一个点为基准点(即假设该点的高程值或形变量为 0),来获得地面高程或形变的相对值,再通过一个高程或形变已知的地面控制点进行改正,最后得到各点的绝对高程或形变量^[13]。由于试验区内并无任何地面控制点,因此这里获得的形变量只是一个相对值,但从形变图中仍可分析回波信号较好的弃土场的形变信息及试验区形变的最大差异量。从图 2 的垂直位移图中可以发现,06-23—07-04 期间,弃土场的沉降量为 $-45 \sim -25$ mm 左右;07-04—07-15 期间,沉降量为 $-40 \sim -20$ mm 左右,试验区的最大沉降量为 -60 mm 左右。而对于 22 d 的垂直位移图来说,弃土场的沉降量为 $-85 \sim -45$ mm 左右,这与两个 11 d 弃土场沉降量的总和基本保持一致,同时 22 d 内试验区的最大沉降量为 -90 mm 左右。

为了对弃土场在 22 d 内的沉降量作进一步分

析,在弃土场内提取剖面 AA',获得了位于该剖面上各点分别在 11 d 及 22 d 的垂直位移量,如图 3 所示。

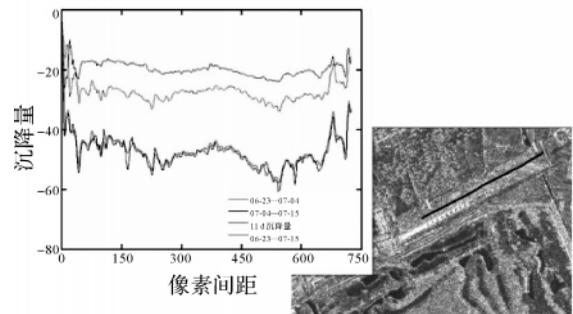


图3 剖面上各点沿地表垂直方向位移量比较图

由图 3 可知,06-23—07-04,沉降剖面上点的最大垂直位移量为 -30 mm(即下沉了 30 mm);07-04—07-15 的最大垂直位移量为 -25 mm;而 06-23—07-15 的最大垂直位移量为 -60 mm,这与两个间隔 11 d 的沉降量之和 -55 mm 基本吻合,沉降趋势也保持一致。通过计算,两个间隔 11 d 的沉降量之和与连续 22 d 沉降量的内符合精度达到了 ± 2.11 mm,充分说明了 TerraSAR-X 雷达干涉技术在工程引起的地表垂直位移探测应用方面具有高精度的特点,垂直位移分量的监测结果可达毫米级精度。此外,由于使用高分辨率 SAR 影像,采样间距最高为 1 m,这意味着从沉降图中能快速详细地了解沉降范围和沉降趋势,且能够对研究区域沉降情况的细节进行分析,这是惯用的大地测量技术(如水准测量、GPS 测量)所无法比拟的。

四、结束语

本文以天津市西青区境内南水北调工程局部地段的弃土场(3 km^2)作为研究区域,以高时空分辨率 TerraSAR-X SAR 影像为数据源,使用两轨 D-InSAR 方法分别提取了弃土场 2009-06-23—07-04、07-04—07-15 和 06-23—07-15 的沉降场,并对沉降剖面进行了分析。结果表明,两个 11 d 沉降周期的沉降量之和与 22 d 沉降周期的沉降量相差仅为 5 mm,表明 TerraSAR-X 雷达干涉技术在工程引起的短期微小地表形变探测应用方面具有较高的精度。TerraSAR-X 雷达干涉形变图的地面分辨率最高可达 1 m,有利于研究工程沉降的精细分布情况和发现不均匀沉降的边界。同时,这种技术几乎无需进行野外作业,劳动强度低,自动化程度高,提高了作业效率。研究表明,高时空分辨率 TerraSAR-X

雷达干涉可以准确提取线性工程(弃土场)的沉降(尤其是短期内的微小沉降)信息,精度可达毫米级,而且具有快速全面评估工程或地表的时空形变(特别是大范围的不均匀沉降)趋势的优点,在工程形变监测方面有很大的应用潜力。

参考文献:

- [1] 佚名. 世界最大的调水工程:南水北调工程简介[N]. 经济日报, 2005-09-19.
- [2] 顾辉. 南水北调中线河北省北段工程设计[J]. 河北水利水电技术, 2003(5): 1-4.
- [3] 程三友, 刘少峰, 申旭辉. 差分干涉雷达测量在地面沉降中的应用研究[J]. 东华理工学院学报, 2004, 27(4): 355-360.
- [4] 罗小军, 刘国祥, 黄丁发. 三通差分干涉测量探测城市地面形变的研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(4): 16-20.
- [5] 胡波, 汪汉胜. 二轨法 D-InSAR 技术监测城市地表沉降[J]. 测绘工程, 2010, 19(2): 37-41.
- [6] 张洁, 胡光道, 罗宁波. InSAR 技术在滑坡监测中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(2): 147-152.
- [7] 蒋弥, 丁晓利, 李志伟, 等. 用 L 波段和 C 波段 SAR 数据研究汶川地震的同震形变[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(1): 21-26.
- [8] 吴宏安, 汤益先, 张红, 等. 基于 ALOS/PALSAR 轨道参数的干涉平地效应消除研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35(1): 92-96.
- [9] 吴涛, 张红, 王超, 等. 多基线距 DInSAR 技术反演城市地表缓慢形变[J]. 科学通报, 2008, 53(15): 1849-1857.
- [10] 李陶, 张诗玉, 周春霞. SAR 干涉图滤波与相位解缠算法比较研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(1): 59-64.
- [11] 程璞, 许才军, 王华. InSAR 相位解缠算法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(3): 50-55.
- [12] 张素芳, 等. SAR 干涉条纹图滤波与相位解缠研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(S0): 125-128.
- [13] GHIQLIA D C, PRITT M D. Two-dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1998.

“北京国际无人机及航模展”将于 9 月举办

[本刊讯] 2011 年 9 月 23—25 日, 中国航空工业集团公司与中国航空学会将在中国航空博物馆联合主办“北京国际无人机及航模展”。本次展览是为庆祝中国航空工业创建 60 周年举办的系列活动之一, 展览同期还将举办“中航工业杯——国际无人飞行器创新大奖赛”。

“北京国际无人机及航模展”是国内首次举办的具有国际水平的无人机及航模类专业展览, 将充分展示国内外无人机和航空模型的最新技术和产品。预计参加展览的国内单位将超过 70 家, 展览面积 3 000 余平方米; 国际展商将超过 40 家, 面积 2 000 平方米, 在中国航空工业集团公司各项庆祝活动的相互配合与宣传带动下, 专业参展观众将超过 3 万人。

主办方强调, “北京国际无人机及航模展”作为中国航空工业创建 60 周年的重要活动之一, 将以推动航空科技创新、普及航空科技知识、营造航空文化氛围、提高国民航空意识为宗旨, 并融合技术的实用性、先进性和集成性为一体, 力争将本届展会打造成面向社会、面向国际展示无人机及航模领域的创新能力和创新产品的综合性盛会。

为加强无人机与航空模型的研制、生产、商贸、教学等领域的交流与合作, 促进我国无人机和航空模型事业的全面、协调、可持续发展, 本届展会也得到了中国科学技术协会、中国宋庆龄基金会、共青团中央、中国人民解放军空军的大力支持。同时, 中航文化股份有限公司、中国航空博物馆为展览承办单位, 北京高博特广告有限公司为国内独家招展联系单位。

届时, 主办方将邀请军民两地无人机科研、生产、使用部门的领导和专家参观指导, 还将联合电视、网络、平面等媒体进行全方位报道, 竭力搭建起无人机与航空模型的交流合作的国际平台。更多详情请关注高博特军工网(www.gobetter.com.cn)。

(本刊编辑部)