doi: 10.6046/gtzyyg.2020107

引用格式:何海英,陈彩芬,陈富龙,等.张家口明长城景观廊道 Sentinel – 1 影像 SBAS 形变监测示范研究[J].国土资源遥感, 2021,33(1):205 – 213. (He H Y, Chen C F, Chen F L, et al. Deformation monitoring along the landscape corridor of Zhangjiakou Ming Great Wall using Sentinel – 1 SBAS – InSAR approach[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(1):205 – 213.)

张家口明长城景观廊道 Sentinel - 1 影像 SBAS 形变监测示范研究

何海英1,2,陈彩芬3,陈富龙1,唐攀攀1

(1. 中国科学院空天信息创新研究院,北京 100094; 2. 中国科学院大学,

北京 101408; 3. 北京聚才振邦企业管理顾问有限公司,北京 100038)

摘要:裸露于地表的张家口明长城遗产易受地表形变影响,使得长城沿线景观廊道整体性保护颇具挑战。为了弥补长城大型线性遗产系统形变监测的方法与实践空白,本研究选用 SBAS – InSAR 方法进行前沿示范。在干涉处理中,为降低大气延迟对干涉图的影响,研究引入 GACOS(generic atmospheric correction online service for InSAR)气象数据进行大气校正;同时试验区地势复杂,研究综合采用 40 m Gauss 与 Goldstein 滤波器以降低自然场景噪声相位。实验选取 2017 年 5 月—2018 年 7 月升轨 33 景、降轨 34 景的 Sentinel – 1 影像进行 SBAS – InSAR 处理,获取雷达视线向(line of sight,LOS)形变信息并经投影变换获取垂直向形变速率场。为验证结果可靠性,研究分别选择长城景观廊道典型山地区、平地区的升降轨沉降速率场作剖线交叉互检,得到两者数据的均方根误差最大值和平均值分别为9.3 mm/a 和 4.0 mm/a。考虑显著性水平,以 10 mm/a 为阈值,结果表明总长度 85.1 km 的张家口明长城景观廊道中 79.5%占比的景观廊道相对稳定,形变速率处于 – 10 ~ 10 mm/a 之间;而剩余 20.5%占比的景观廊道则存在显著形变,最大沉降速率为 – 64.5 mm/a。示范研究揭示了 SBAS – InSAR 在大型线性遗产宏观形变监测和评估的应用潜力。

关键词:长城; SBAS - InSAR; 升降轨; 大气校正

中图法分类号: TP 79 文献标志码: A 文章编号: 1001 - 070X(2021)01 - 0205 - 09

0 引言

张家口明长城墙体遗产裸露于地表并可受自然 与人类过程诸多因素影响^[1]。尽管长城沿线地区 在一定周期和范围内未发生地震等大型自然灾害, 长时间缓慢地表形变仍可成为影响张家口明长城文 化景观整体稳定性的重要因素之一。考虑到张家口 明长城部分墙段紧邻采矿工业区和自然不稳定坡 体,加之冬奥会修建场馆的影响(例如,位于崇礼区 东部的北欧中心跳台滑雪场和越野滑雪场选址规划 紧邻明长城遗址);因此亟须以微形变为典型定量 指标,监测并评估地质活动和人为扰动等综合因子 对长城可持续化保护的影响;以通过形变危害识 别,指导墙体的保护修复措施和支撑长城景观廊道 的整体科学保护。

由于张家口明长城及周边地区地形、地貌复杂, 实地观测较为困难;而遥感因宏观、客观和远距离探 测具备独一无二优势。受制于时空失相干、大气延迟 等因素影响,常规差分雷达干涉技术(differential interferometric synthetic aperture Radar, D – InSAR)在自 然场景的长城文化景观时序形变监测并不适用^[2-3]。 近年来,为了改进 D – InSAR 技术的缺陷,获取时序 形变信息,科研工作者们提出了小基线集(small base– line subsets InSAR,SBAS – InSAR)方法^[4-5]。该方法 可在抑制时空去相干的同时,利用长时间序列影像获 取自然场景区雷达视线向形变场^[6-9]。为了弥补长 城大型线性遗产系统性形变监测的方法与实践空白, 本研究基于已有研究成果,利用 Sentinel – 1 升降轨 数据开展 SBAS – InSAR 形变反演,并经投影变换获

收稿日期: 2020-04-17;修订日期: 2020-08-15

基金项目:国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项"星载雷达干涉非侵入式文化遗产脆弱性监测与评估"(编号: 2017YFE0134400)和国家自然科学基金项目"面向文化遗产异常形变监测与评估的双尺度星载雷达干涉方法研究"(编号: 41771489)共同资助。

第一作者:何海英(1995-),女,硕士,研究方向为雷达遥感。Email: hehy@radi.ac.cn。

通信作者:陈彩芬(1976-),女,硕士,研究方向为测绘遥感与地理信息系统。Email: chencaifenhome@ sohu.com。

取升降轨垂直向形变速率场。研究结果可有效探测 并甄别长城显著形变热点地区,为张家口明长城宏观 监测保护提供科学数据和技术支撑。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

实验区位于张家口市区以北,崇礼城区以东,其 地理坐标范围为 N40.75°~41.06°,E115.17°~ 115.60°,整个实验区还包括矿坑和不稳定坡体以及 多个为 2022 年张家口冬奥会修建的场馆及配套设 施。实验区影像覆盖范围如图 1 所示,黄线框为实 验区范围,红线框为 Sentinel – 1 升轨影像范围,蓝 线框内为降轨影像范围。



图 1 实验区范围示意图 Fig. 1 Schematic diagram of test area

1.2 数据源

本次实验使用欧空局提供的 Sentinel – 1 SAR 数据,时间跨度从 2017 年 5 月—2018 年 7 月,包括 33 景升轨和 34 景降轨数据,成像模式为干涉宽幅 模式(IW),数据参数如表 1 所示。DEM 数据采用 美国宇航局(NASA)提供的 SRTM1 数据,空间分辨 率为 30 m × 30 m,用于针对 TOPS (terrain observation with progressive)模式的增强谱分集(enhanced spectral diversity, ESD)配准、模拟地形相位及地形 相位去除^[10]。

表 1 Sentinel -1 影像数据参数 Tab. 1 Parameters of Sentinel -1 data

卫星	轨道方向	开始获取日期	截止获取日期	极化方式	数量
S1A	А	20170519	20180728	VV	33
S1B	D	20170520	20180729	VV	34

2 研究方法与数据处理

2.1 研究方法

SBAS – InSAR 技术原理为:根据时空基线阈 值,对配准后的 N 幅影像进行干涉组合生成由 M 幅 干涉图组成得若干子集。在去除地形相位后,由 t_B 时刻的主影像与 t_A时刻的从影像生成的第 *i* 幅干涉 图,在坐标点(*x*,*r*)点上的干涉相位为^[2,11]:

 $\delta \varphi_i = \varphi(t_{\rm B}, x, r) - \varphi(t_{\rm A}, x, r) \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left[d(t_{\rm B}, x, r) - d(t_{\rm A}, x, r) \right] + \varphi_{\rm dem} + \left[\varphi_{\rm atm}(t_{\rm B}, x, r) - \varphi_{\rm atm}(t_{\rm A}, x, r) \right] + \Delta n_i \quad (1)$

式中: φ 表示干涉相位;*i*表示干涉图景号,*i*=1, 2,…,*M*; λ 表示中心波长;*d*(t_{B} ,*x*,*r*) 和*d*(t_{A} ,*x*,*r*) 分别表示坐标点(*x*,*r*)在 t_{B} 和 t_{A} 时刻相对于起始时 刻的雷达视线方向(line of sight,LOS)形变累积量; φ_{dem} 表示外部数字高程模型(digital elevation model, DEM)带来的残余高程误差相位; $\varphi_{atm}(t_{B}$,*x*,*r*) 和 $\varphi_{atm}(t_{A}$,*x*,*r*)表示坐标点(*x*,*r*)在 t_{B} 和 t_{A} 时刻的大 气变化引起的大气延迟相位; Δn_{i} 表示噪声相位。

去除误差相位后,式(1)可写成以下形式:

$$A\varphi = \delta\varphi , \qquad (2)$$

式中 A 为一个 $M \times N$ 的矩阵。

当 M≥N,且A 为满秩矩阵时,可利用最小二乘

$$D_{\rm los} = D_{\rm U} \cos\theta - D_{\rm E} \sin\theta \sin \alpha - \alpha$$

式中: θ 表示卫星入射角; α 为方位角(正北方向与 卫星飞行方向的顺时针夹角)。

考虑到 SAR 卫星近极地飞行,卫星轨道与南北 向形成夹角小,因此基于 D – InSAR 技术解算得到 的 LOS 向形变结果对南北向不敏感^[15]。同时本研 准则求解式(2)得到:

$$\varphi = (\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^{\mathrm{T}} \delta \varphi_{\mathrm{o}} \qquad (3)$$

若 A 为秩亏矩阵,式(3)中方程无唯一解,可利 用奇异值分解得到 A 的广义矩阵,从而得到 φ 的最 小范数解。

SAR 卫星沿轨道飞行并进行观测,通过联合地 面点的相位值与 SAR 幅度值,可经 SBAS – InSAR 形变反演得到 LOS 向的地表形变量 $D_{\text{los}}^{[12]}$ 。根据 雷达成像几何可知,LOS 形变矢量可根据投影关系 分解为垂直向、东西向及南北向形变矢量,用 D_{U} , D_{E} , D_{N} 分别表示,投影关系如下式所示^[13-14]:

$$\sin\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right) - D_{\rm N}\sin\theta\cos\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right) \quad , \tag{4}$$

究以 Sentinel – 1 影像为例,升降轨 LOS 向形变场在 垂直向投影系数($\cos\theta$)分别为 0.776 6 和 0.721 0, 在东西向投影系数($-\sin\theta\sin\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right)$)分别为 – 0.612 4 和 0.673 6,表明 LOS 向形变主要来源于 第1期

垂直向形变贡献。

2.2 数据处理

本次实验基于开源 InSAR 处理软件 GMTSAR 和 GIAnT 进行 SBAS 时序处理,并利用 ArcGIS 软件做结果优化与专题制图。主要步骤包括 InSAR 干涉处理和 SBAS 时序反演。

针对覆盖研究区的升(降)轨影像,选择 20171210(20171209)作为升(降)轨数据的公共主 影像,基于 GMTSAR 软件对影像进行包括数据预处 理、增强谱分集配准、生成干涉图、去地形相位、干涉 图滤波、相位解缠等处理。其中,设定时间基线阈值 为48 d,空间基线阈值为200 m,升降轨干涉影像数 据集共产生110个和115个干涉对。多视处理时采 用方位向视数为1,距离向视数为5。相位滤波联合 采用40 m Gauss 与7×7窗口 Goldtein 自适应滤波 器以抑制噪声相位,并进而提高相位解缠的可靠性。 实验升降轨时空基线分布如图2所示。





Fig. 2 Spatiotemporal baselines of Sentinel -1 ascending and descending InSAR data

利用干涉处理获取的时序相干系数图,通过 Matlab 工具包处理得到升(降)轨数据的平均相干 系数图,并以此作为高相干点筛选的依据。设定平 均相干系数阈值为0.2,生成平均相干掩模图与解 缠图、相干系数图作为 GIAnT 软件的同步输入数 据,通过对解缠图进行平均相干掩模以提高自然场 景高相干点空间分布密度。考虑到张家口长城段隶 属山区,其与地形相关的大气效应较为严重,传统的 时空滤波不能满足该地区的大气相位校正需求^[16]。 因此亟须引入外部大气建模数据,进行大气系统误 差模拟和纠正,以提升干涉图质量。考虑到 GIAnT 软件附带的 ECMWF(European centre for medium range weather forecasts) ERA - intrim 气象数据当天 每隔6h更新,升、降轨影像成像时间与当天最近发 布的同化分析数据可分别相差1小时47分和1小 时41分;相较于GACOS(generic atmospheric correction online service for InSAR)提供的近实时(一分钟 更新)气象数据其时间分辨率较低。此外 GIAnT 软 件附带的 ERA - intrim 数据空间分辨率为 0.7°, 而 GACOS 数据空间分辨率更高,为0.125°,因此在地 形复杂地区相较于 ECMWF 模型有更好的适应 性[17-19]。综上所述,本研究选用 GACOS 气象数据 来估计并校正大气延迟系统误差。

此外,考虑到大气校正后可能引入的趋势性相 位斜坡,研究基于 GIAnT 反演线性系统来精确估算 每个 SAR 影像的轨道参数,并对干涉图进行趋势校 正;进而可利用联合 DEM 误差估计的 SBAS 反演算 法估算形变时序信息。基于 python 工具包,利用线 性回归模型拟合 LOS 向年形变速率图,经地理编码 得到 WGS84 坐标系下的 LOS 向年形变速率图。然 后根据投影关系转换为垂直向年形变速率图,投影 转换公式为:

$$\mathbf{v}_{\mathrm{U}}^{\mathrm{A(D)}} \approx \frac{\mathbf{v}_{\mathrm{los}}^{\mathrm{A(D)}}}{\cos \theta^{\mathrm{A(D)}}} , \qquad (5)$$

式中: v_U表示垂直向形变速率矢量; v_{los}表示 LOS 向 形变速率矢量; A(D)表示升(降)轨。

3 结果与分析

3.1 升降轨长城景观廊道地表形变分析

通过上述 SBAS 时序处理,获取升降轨垂直向 形变场,根据长城墙体设置 250 m 的缓冲区并叠加 幅度图以提供地形信息,得到升降轨长城景观廊道 垂直向形变速率场,如图 3 所示。



(a)升轨长城廊道垂直形变场





已知该长城段总长度为85.1 km,由图3可知, 大部分长城段年形变速率在-10 mm/a到10 mm/a 之间,但在(E115°27′,N40°44′)附近存在较大的 沉降区,邻近长城景观廊道升轨 InSAR 监测沉降 最大值为-34.5 mm/a,降轨 InSAR 监测沉降最大 值为-55.2 mm/a,如图4(a)和(b)所示。结合 SAR 幅度图及 DEM 数据可知,该处位于山脊,推 测可能存在不稳定自然坡体,导致该区段廊道存 在显著形变。同时在(E115°13′,N40°47′)附近存 在采矿工业区,其相邻景观廊道升轨 InSAR 监测 沉降最大值为-35.8 mm/a,降轨 InSAR 监测沉降 最大值为-64.5 mm/a,如图4(c)和(d)所示,表 明采矿对邻近长城景观廊道地表稳定性有一定影 响。实地考察这2个主要沉降区,如图5所示,定 性分析了沉降区段的主导驱动力,即人类采矿活 动及自然滑坡风险。考虑到冬奥会场馆等建设活 动对邻近长城遗址的影响,选择邻近冬季2项场 馆中心明长城景观廊道,监测结果发现升轨 InSAR 沉降最大值为-41.6 mm/a,降轨 InSAR 沉降最大 值为-44.7 mm/a,如图4(e)和(f)所示,揭示人 工建设活动对长城廊道周边地表形变的扰动和触 发作用。

垂直向形变速率/ (mm·a⁻¹)

坡体墙体

[0,1.2)

[-10,0)

[-20,-10)

[-64.5,-30)



(a) 坡体邻近廊道升轨垂直形变场



(c) 矿区邻近廊道升轨垂直形变场



(e) 冬奥会场馆邻近廊道升轨垂直形变场

垂直向形变速率/ $(mm \cdot a^{-1})$ 矿坑墙体 [10,12.7) [0, -10) [-10,-20) [-20, -30)[-30,-20) [-35.8,-30)

> 场馆墙体 [10,13.3)

[0, 10)

[-10,0)

[-20,-10)

[-30,-20)

坡体墙体

[0,11.0)

[-10,0)

[-20,-10)

[-30,-20) [-34.5,-30)



(d) 矿区邻近廊道降轨垂直形变场



(f)冬奥会场馆邻近廊道降轨垂直形变场



Fig. 4 Vertical deformation field of ascending and descending key areas adjacent to the Great Wall corridors



(a) 采矿实地核查照片

(b) 不稳定坡体实地核查照片



3.2 升降轨形变交叉互检

由于缺少外部地面实测数据(水准或 GNSS), 研究利用相同观测周期的升降轨 SBAS - InSAR 形 变测量值的交叉互检来评价形变反演精度及可靠 性。考虑实验区包括山地和平地地貌,其中山地占 主导。为不失典型性与普适性,根据地形图分别选 取采矿山区和龙观镇平地区的长城廊道做剖线,开 展升降轨 SBAS - InSAR 沉降速率精度定量评价: 对应剖线的相关统计信息,如图6所示。其中,剖线 Ⅰ和Ⅱ位于长城景观廊道的采矿山区;而剖线Ⅲ和 Ⅳ位于景观廊道的平地区。剖线上选取的相干点沉 降速率测量值,如表2所示。



升降轨剖线Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ和Ⅳ垂直形变交叉验证 图 6

Cross – verification of vertical deformation of ascending and descending using profiles of ~I , II , II and IVFig. 6

表 2	升降轨沉降速率剖线测量值
-----	--------------

Tab. 2	Measurements of	ascending and	descending	vertical	deformation	profiles
1	incubal entents of	useenaning and	acocontaing	, ci ticui	actormation	promes

Tab. 2 Measurements of ascending and descending vertical deformation profil							$(\mathbf{mm} \mathbf{a}^{-1})$	
剖线Ⅰ		剖約	戋 Ⅱ	剖线Ⅲ		剖线Ⅳ		
升轨沉降速率	降轨沉降速率	升轨沉降速率	降轨沉降速率	升轨沉降速率	降轨沉降速率	升轨沉降速率	降轨沉降速率	
-26.386 500	- 36.359 664	-2.954 666	-3.787 196	-4.295 417	-2.776 092	-3.029 664	-2.478 660	
-23.221 746	- 30.817 969	-4.743 141	-7.881 187	-2.506 129	-2.619 370	-2.880 021	-2.698 201	
-22.714 194	- 30. 374 685	-7.372 725	-7.107 225	-1.507 744	-2.431 923	-2.151 036	-3.522 589	
-23.615 474	- 30. 359 094	-8.140 943	-6.869 733	-0.311 431	-2.613 713	-1.978 628	-4.144 786	
-23.543 893	-29.345 527	-8.627 688	-7.422 558	-0.717 868	-3.090 406	-1.748 386	-4.782 313	
-23.374 061	- 29.196 741	-8.467 884	-8.232 046	-2.652 864	-2.517 831	-0.431 528	-2.531 183	
-21.171 342	- 27.141 972	-7.597 846	-6.272 651	-2.673 597	-2.647 359	1.146 827	1.037 039	
-20.007 305	-27.036 656	-5.700 915	-3.545 717	-4.462 548	-3.822 364	-0.518 566	-1.215 172	
-20.511 334	-27.782 669	-1.000 416	-2.343 803	-5.443 761	-5.075 118	-1.651 547	-1.209 820	
- 19.954 611	-27.064 594	-1.160 462	-2.475 457	-3.300 535	-5.246 339	-3.534 750	-2.576 534	
- 15.568 379	-23.739 264	-3.159 606	-2.924 525	-0.432 296	-3.413 042	-3.683 268	-3.270 100	
- 10. 927 718	-23.326 770	-6.981 864	-3.587 688	1.056 834	-1.087 861	-3.860 244	-2.825 739	
-7.685 485	-24.305 581	-9.950 955	-5.713 572	1.378 777	1.485 126	-5.101 048	-3.416 404	
-1.134 007	- 19.275 776	- 13.391 594	-7.084 895	-1.031 696	-0.010 015	-4.242 044	-3.341 172	
-5.592 829	- 19.692 338	-8.871 876	-5.414 864	-2.021 653	-1.197 983	-3.637 222	-1.908 386	
-6.037 808	- 19.051 580	-6.126 122	-1.374 303	-2.796 964	-2.629 911			
-8.260 981	- 11.274 084	-7.283 288	-0.174 217	-3.379 837	-3.441 530			
-9.759 655	-7.831 146	- 10.272 661	-3.401 144	-3.132 522	-3.763 355			
-6.249 528	-7.195 139	-11.418 052	-7.455 137	-2.651 378	-4.778 665			
-3.935 778	-6.614 104	-9.772 344	-5.020 131	-0.793 225	-6.553 204			
		-6.512 675	-4.355 627	-1.774 932	-2.209 514			
		-7.287 250	-4.826 895					
		-9.053 184	-4.979 769					
		-9.107 149	-4.379 564					
		-8.193 869	-5.001 902					

							(
剖线 I		剖线 Ⅱ		剖线Ⅲ		剖线Ⅳ	
升轨沉降速率	降轨沉降速率	升轨沉降速率	降轨沉降速率	升轨沉降速率	降轨沉降速率	升轨沉降速率	降轨沉降速率
		-6.870 626	-4.661 846				
		-5.238 107	-5.061 211				
		-4.095 639	-7.598 280				
		-6.956 030	-9.836 517				
		-8.646 734	-9.555 167				

研究以升轨沉降速率为参考,降轨沉降速率为 对照,采用均方根误差和最大偏离度来评估两者测 量数据的一致性,即

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} [y(i) - x(i)]^{2}}{N}} , \quad (6)$$

式中:y表示降轨沉降形变值;x表示升轨沉降形变值;N表示升(降)轨沉降形变值个数, $i = 1, 2, \cdots, N_{\circ}$ 。

结果表明(表3),升降轨4条采样剖线的形变 测量差异性指标:均方根误差分别为9.3 mm/a, 3.4 mm/a,1.9 mm/a,1.4 mm/a(计算获得均方根 误差平均值4.0 mm/a),对应最大偏离度为3.0~ 18.1 mm/a;间接验证了SBAS – InSAR 形变反演的 定量精度。研究同时发现,剖线在沉降量大的山区 可能存在少量不可靠监测点(例如剖线I最大偏离 度可达18.1 mm/a),如图6(a)所示;揭示了在加 密山区场景(地形与地貌相对复杂)相干点测量空 间密度的同时(选用0.2 平均空间相干系数阈值), 不可避免引入了少量随机观测误差。

表 3 升降轨沉降速率剖线交叉对比测度 Tab. 3 Measurement indices in the cross comparison of vertical deformation profiles between

ascending and descending results $(mm^2 a^{-1})$							
指标	剖线 I	剖线Ⅱ	剖线Ⅲ	剖线Ⅳ			
均方根误差	9.3	3.4	1.9	1.4			
最大偏离度	18.1	7.1	5.8	3.0			

由以上研究可知,平地区升降轨沉降速率吻合 度高(剖线 III 和 IV),其均方根误差在 2 mm/a 以 内,表征 SBAS – InSAR 技术在平地区形变监测可达 mm 级;而在采矿山区(剖线 I 和 II),升降轨沉降速 率趋势总体一致,但仍可表征为较为显著的均方根误 差:剖线I均方根误差为9.3 mm/a,剖线II为3.4 mm/a。 进一步研究发现,均方根误差可随着沉降速率强度 的增大而增大。升降轨沉降速率交叉互检在山区产 生了较大均方根误差,分析可由地表稀疏植被扰动、 存在南北 – 东西向形变、以及 InSAR LOS 测量在山 区(坡向、叠掩和阴影等)固有局限性等综合原因共 同决定。

3.3 长城廊道形变风险制图

综合形变显著性水平和平均均方根误差测度 (4.0 mm/a),均值融合升降轨长城廊道垂直形变 场并以10.0 mm/a为阈值进行地表相对稳定和显著 变化专题分类,得到专题风险图(图7)^[20],图7中A, B和C分别标示了采矿区、不稳定坡体和冬奥会场馆 位置。对长城墙体左右两侧各250m缓冲带的地表 形变趋势进行统计,结果表明,因地表破碎、不稳定坡 体、人工开矿以及冬奥会场馆修建等综合因素影响, 景观廊道地表形变速率绝对值大于10 mm/a 阈值的 长城段,其长度约为17.5 km,即占比观测段总长的 20.5%。对照而言,79.5%占比的长城段沉降速率 较小,景观廊道地表相对稳定。形变风险制图为 后续明长城景观廊道及其墙体遗产潜在病害重点勘查 提供了靶区,便利长城大型线性遗产的整体性规划与 保护。



图 7 长城廊道地表形变稳定性专题分类 Fig. 7 Thematic deformation risking mapping of the Great Wall corridor

4 结论

本文利用 Sentinel -1 升降轨影像,基于 SBAS - InSAR 技术开展张家口明长城景观廊道 2017 年 5 月—2018 年 7 月地表形变前沿示范研究。基于 GACOS 大气相位系统校正、联合 Gauss 与 Gold-stein 滤波的 SBAS - InSAR 方法获得了张家口

85.1 km 明长城景观廊道统计意义上 mm 级的年 形变速率场。研究结果表明,对照 79.5% 的相对 稳定段,20.5% 的明长城景观廊道存在较为显著 形变(年形变速率大于 10 mm/a);为后期长城建 筑遗产形变危害识别、靶区定位和整改维修等保 护措施的规划与落实提供了定量监测数据和全新 监测手段。研究表明,基于相干目标的 SBAS – In-SAR 技术在自然场景地区具备较好适用性;技术 可望推广至长城、运河等大型线性遗产景观廊道 的整体宏观监测与动态评估。随机监测误差的自 动识别与噪声去除是今后算法改进方向;同时考 虑到张家口明长城及周边地表可能存在南北 – 东 西向形变,联合升降轨 InSAR 数据的三维形变反 演将是未来工作的又一重要方向。

参考文献(References):

 [1] 王晓轩.张家口——中国历代长城博物馆(中国城市•张家口 专版(二))[EB/OL].(2006-09-19)[2018-11-18].http://paper.people.com.cn/rmrbhwb/html/200609/19/content_ 11299006.html.

Wang X X. Zhangjiakou – Great Wall Museum of Chinese History (China City• Zhangjiakou Special Edition (2))[EB/OL]. (2006 – 09 – 19)[2018 – 11 – 18]. http://paper.people.com.cn/rmrbhwb/html/200609/19/content_11299006.html.

- Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping small elevation changes over large areas – differential Radar interferometry [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1989,94(B7):9183 – 9191.
- [3] 朱建军,李志伟,胡 俊. InSAR 变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1717-1733.
 Zhu J J, Li Z W, Hu J. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2017,46(10):1717-1733.
- [4] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 40(11):2375-2383.
- [5] Usai S. A least squares database approach for SAR interferometric data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003,41(4):753-760.
- [6] 许文斌,李志伟,丁晓利,等.利用 InSAR 短基线技术估计洛杉 矶地区的地表时序形变和含水层参数[J].地球物理学报, 2012,55(2):452-461.

Xu W B, Li Z W, Ding X L, et al. Application of small baseline subsets D – InSAR technology to estimate the time series land deformation and aquifer storage coefficients of Los Angeles area [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2):452 – 461.

[7] 张永红,吴宏安,康永辉.京津冀地区 1992—2014 年三阶段地面沉降 InSAR 监测[J]. 测绘学报,2016,45(9):1050-1058.
 Zhang Y H, Wu H A, Kang Y H. Ground subsidence over Beijing -

Tianjin – Hebei region during three periods of 1992 to 2014 monitored by interferometric SAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2016,45(9):1050 – 1058.

[8] 周 吕,郭际明,李 昕,等. 基于 SBAS - InSAR 的北京地区地表 沉降监测与分析[J]. 大地测量与地球动力学,2016,36(9): 793-797.

Zhou L, Guo J M, Li X, et al. Monitoring and analyzing on ground settlement in Beijing area based on SBAS – InSAR[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36(9):793 – 797.

- [9] 孙晓鹏,鲁小丫,文学虎,等. 基于 SBAS InSAR 的成都平原地面沉降监测[J]. 国土资源遥感,2016,28(3):123 129. doi: 10.6046/gtzyyg.2016.03.20.
 Sun X P,Lu X Y, Wen X H, et al. Monitoring of ground subsidence in Chengdu Plain using SBAS InSAR [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 28(3):123 129. doi: 10.6046/gtzyg.2016.03.20.
- [10] 吴文豪.哨兵雷达卫星 TOPS 模式干涉处理研究[D]. 武汉:武 汉大学,2016.

Wu W H. TOPS interferometry with Sentinel -1[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.

- [11] 陈富龙,林 珲,程世来. 星载雷达干涉测量及时间序列分析的 原理、方法与应用[M]. 北京:科学出版社,2013:41-68.
 Chen F L, Lin H, Cheng S L. Principles, methods and applications of spaceborne Radar interferometry and time series analysis [M].
 Beijing: Science Press, 2013:41-68.
- [12] 胡 俊.基于现代测量平差的 InSAR 三维形变估计理论与方法
 [D].长沙:中南大学,2013.
 Hu J. Theory and method of estimating three dimensional displacement with InSAR based on the modern surveying adjustment
 [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [13] Fialko Y, Simons M, Agnew D. The complete (3 D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 MW7.1 Hector Mine Earthquake, California, from space geodetic observations[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(16):3063 3066.
- [14] Hu J, Li Z W, Zhu J J, et al. Inferring three dimensional surface displacement field by combining SAR interferometric phase and amplitude information of ascending and descending orbits [J]. Science in China Series D (Earth Sciences), 2010, 53 (4):550 – 560.
- [15] 张晓博. 基于高分辨率 SAR 影像的城市二维时序形变建模与应用[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2018.
 Zhang X B. Modeling and application of the 2D time series deformation monitoring in urban area using high resolution SAR images
 [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing),2018.
- [16] 崔喜爱,曾琪明,童庆禧,等. 重轨星载 InSAR 测量中的大气校 正方法综述[J]. 遥感技术与应用,2014,29(1):9-17.
 Cui X A,Zeng Q M,Tong Q X, et al. Overview of the atmospheric correction methods in repeat - pass InSAR measurements[J]. Remote Sensing Technology and Application,2014,29(1):9-17.
- [17] 孙建霖,杨忠杰,马金辉.基于大气数据的时序 InSAR 大气延迟误差校正方法比较[J].科技创新与应用,2019(11):23-

26,30.

Sun J L, Yang Z J, Ma J H. Comparison of correction methods of time series InSAR atmospheric delay error based on atmospheric data[J]. Technology Innovation and Application, 2019(11):23 -26,30

[18] Yu C, Penna N T, Li Z. Generation of real – time mode high – resolution water vapor fields from GPS observations [J]. Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 2017, 122(3):2008 – 2025.

[19] Yu C, Li Z, Penna N T. Interferometric synthetic aperture Radar at-

mospheric correction using a GPS - based iterative tropospheric decomposition model [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 204:109 - 121.

[20] 王 琴,陈 蜜,刘书军,等.利用升降轨道 SAR 数据获取 DEM 的试验研究[J]. 测绘通报,2015(6):39-43.
Wang Q,Chen M,Liu S J,et al. DEM acquisition study using raise - orbit and lower - orbit SAR data [J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2015(6):39-43.

Deformation monitoring along the landscape corridor of Zhangjiakou Ming Great Wall using Sentinel – 1 SBAS – InSAR approach

HE Haiying^{1,2}, CHEN Caifen³, CHEN Fulong¹, TANG Panpan¹

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 3. Beijing Jucai

Zhenbang Enterprise Management Consultant Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: The cultural landscape of the Zhangjiakou Ming Great Wall is susceptible to surface deformation, making the systematic conservation of cultural landscape in this corridor quite challenging. In order to fix the methodology and application gaps of Great Wall monitoring (large - scale linear heritage) systematically, the authors applied the SBAS - InSAR technology to the time - series deformation surveillance in this pilot case study. In the procedures of InSAR data processing, an external weather model (GACOS) was firstly used to reduce the atmospheric artifacts on interferograms; moreover, a 40 m Gauss and the Goldstein filters were sequentially applied for the phase noise suppression relevant to the natural landscape. In total 67 Sentinel -1 SAR images including 33 ascending and 34 descending data acquired from May 2017 to July 2018 were collected for the line of sight (LOS) deformation calculation using the SBAS - InSAR approach. The derived deformation rates were then projected onto vertical direction for the further analysis. Afterwards, motion rate profiles of ascending and descending datasets from a typical mountain and a flat area were selected for cross - validation, resulting in the maximum and averaged root mean square errors of 9.3 mm/a and 4.0 mm/a, respectively. With considering the significance level, the result demonstrates that 79.5% of the Great Wall corridor (85.1 km totally observed) is relatively stable (with deformation rates in the range of -10 mm/a to 10 mm/a) while remaining 20.5 % shows significant motions (the maximum subsidence rate up to -64.5 mm/a) using the 10 mm/a as the threshold. This pilot study implied the applicability of the applied SBAS - InSAR approach to the synoptic deformation monitoring of large - scale linear heritage sites.

Keywords: the Great Wall; SBAS - InSAR; ascending and descending; atmospheric correction

(责任编辑:陈理)