引文格式:张双成,王杰,李涛,等.陆地探测一号卫星用于干涉测量精度验证与分析——以大同市为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(11):2187-2197.DOI:10.13203/j.whugis20240424

Citation: ZHANG Shuangcheng, WANG Jie, LI Tao, et al. Accuracy Verification and Analysis of the Interferometry of Lutan-1 Satellite: A Case Study of Datong[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(11): 2187-2197. DOI: 10.13203/j.whugis20240424

陆地探测一号卫星用于干涉测量精度验证与分析——以大同市为例

张双成[1] 王 杰[1] 李 涛[2] 朱 武[1] 牛玉芬[3] 钟储汉[4]
王铭辉[1] 张成龙[1] 李振洪[1,5,6]

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054
2 自然资源部国土卫星遥感应用中心,北京,100048
3 河北工程大学矿业与测绘工程学院,河北 邯郸,056038
4 中石化石油工程设计有限公司,山东 东营,257026
5 黄土科学全国重点实验室,陕西 西安,710054
6 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安,710054

摘 要:陆地探测一号(Lutan-1, LT-1)是中国第一组以差分干涉为主要任务的合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)星座,该星座由两颗配置了L波段SAR载荷的A、B星组成,具有全天时、全天候、多极化对地成像能力,可应用于地质、地震、减灾、测绘、林业等领域。A、B双星编队构形运行,绕飞模式适用于地形干涉测量,跟飞模式适用于形变干涉测量。以山西省大同市为研究区,基于LT-1星座两种模式的数据,分别利用InSAR(interferometric synthetic aperture radar)和TCP(temporary coherent point)-InSAR技术获取了LT-1 DEM(digital elevation model)和形变速率,并对LT-1 DEM和形变速率精度进行验证与分析。以ICESat-2为参考数据,并结合光学遥感影像,将LT-1 DEM和Copernicus DEM产品进行精度验证。结果显示,以ICESat-2高程控制点作为验证数据,LT-1 DEM与Copernicus DEM的RMSE(root mean square error)分别为2.85 m和2.67 m,LT-1 DEM的最小误差、最大误差及平均绝对误差等指标均优于Copernicus DEM,LT-1 DEM具有更高的空间分辨率,能够展现出更加细致的地形地貌特征。对于LT-1形变速率精度验证,基于Sentinel-1A影像利用TCP-InSAR技术获取的形变速率作为参考数据进行对比分析。结果显示,LT-1形变结果与Sentinel-1A形变结果高度一致,二者重叠区域形变速率相关系数可达0.91,且LT-1影像的形变测量内符合精度方面优于Sentinel-1A。实验结果表明,LT-1卫星用于地形和形变干涉测量任务时,在时空分辨率及测量精度中均占据较大优势,为LT-1星座的推广奠定了基础。

关键词:陆地探测一号;InSAR;地形干涉测量;形变干涉测量;精度验证

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-12-21

DOI:10.13203/j.whugis20240424 **文章编号**:1671-8860(2025)11-2187-11

Accuracy Verification and Analysis of the Interferometry of Lutan-1 Satellite: A Case Study of Datong

ZHANG Shuangcheng[1] *WANG Jie*[1] *LI Tao*[2] *ZHU Wu*[1] *NIU Yufen*[3] *ZHONG Chuhan*[4]
WANG Minghui[1] *ZHANG Chenglong*[1] *LI Zhenhong*[1,5,6]

1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2 Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China
3 School of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China
4 Sinopec Petroleum Engineering Design Co. Ltd, Dongying 257026, China
5 State Key Laboratory of Loess Science, Xi'an 710054, China
6 Key Laboratory of Western China's Mineral Resource and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China

Abstract: **Objectives**: Lutan-1 (LT-1) satellite is the first synthetic aperture radar (SAR) constellation in

基金项目:国家自然科学基金(42474028,42074041)。

第一作者:张双成,博士,教授,研究方向为GNSS遥感、GNSS与InSAR灾害监测等。shuanacheng369@chd.edu.cn

通信作者:王杰,硕士。2394834585@qq.com

China with interferometric applications as its core mission. The constellation consists of two A and B satellites equipped with L-band SAR payloads, with all-day, all-weather, multi-polarization imaging capability, which can be applied to geology, land, earthquake, disaster reduction, mapping and forestry, etc. The A and B satellites are operated in formation configuration, and the fly-around mode is suitable for terrain interferometry, while the follow-fly mode is suitable for deformation interferometry. The fly-around mode is suitable for terrain interferometry; the follow-fly mode is suitable for deformation interferometry. Taking Datong City, Shanxi Province, as the study area, we verify and analyze the topographic measurement accuracy and surface deformation measurement accuracy of LT-1 constellation by combining the data of the two different formation modes of the constellation. We aim to provide an important reference for the operational application of, LT-1 constellation. **Methods:** In the verification of LT-1 topographic survey accuracy, we first produced digital elevation model (DEM) in the study area using LT-1 data, then used ICESat-2 elevation control points as reference data and Copernicus DEM products as control data, and combined the multiple error evaluation indexes and optical remote sensing imagery we established to compare the DEM quality of LT-1 and Copernicus. In the verification of LT-1 deformation interferometry accuracy, we adopt the temporary coherent point (TCP)-InSAR technique to invert the deformation information of Sentinel-1A images and LT-1 images covering the same time period in the study area, and then compare and evaluate the internal and external conformal accuracies, respectively. **Results:** The accuracy of LT-1 DEM produced by LT-1 data in the fly-around mode is similar to that of Copernicus, and some evaluation indexes are even better than those of Copernicus DEM. Also, LT-1 DEM have higher spatial resolution, which can show more detailed landscape and terrain features. Meanwhile, LT-1 DEM has higher spatial resolution and can show more detailed geomorphological features. In addition, LT-1 DEM can be further optimized. The deformation field inverted by LT-1 data in the fly-by mode is similar to that of Sentinel-1A in terms of spatial distribution and value, and the correlation coefficient between LT-1 and Sentinel-1A is as high as 0.91. Moreover, LT-1 data are better than Sentinel-1A in terms of image coherence, the number of monitoring points, and the accuracy of deformation measurement. **Conclusions:** We have verified and analyzed the accuracy of LT-1 data for terrain interferometry and surface deformation interferometry in different formation operation modes, and the results show that LT-1 satellites have great advantages in spatial and temporal resolution and measurement accuracy when used in interferometry missions, and the potential of LT-1 constellation for applications in other geoscience fields is also worth exploring further.

Key words: Lutan-1; InSAR; topographic interferometry; deformation interferometry; accuracy validation

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)技术具有全天候、全天时、大面积、高精度等优势,在地图测绘[1-3]及地球动力学研究[4-6]等领域中被广泛应用。由于常见的C、X波段SAR(synthetic aperture radar)卫星受重访周期、干涉相干性以及空间分辨率等方面的限制,目前高时空分辨率、长波长、大幅宽、短周期的SAR卫星研发仍然是当前国内外研究的热点。国外TanDEM-L[7]、NISAR[8]、ALOS-4[9]等星载SAR卫星系统均将L波段作为主要成像波段,使卫星具有宽覆盖和高分辨成像能力,在保证大覆盖范围的前提下尽可能实现短重访周期。L波段SAR卫星影像能够显著提高干涉相位的相干性[10],提高了植被密集地区的干涉测量精度。此外,L波段影像还可以提供较大的干涉相位梯度[11],提高了形变测量梯度。

中国陆地探测一号(Lutan-1,LT-1)卫星项目于2016年正式立项,先后经过指标设计、系统优化、卫星研制等系列研究,LT-1星座A、B星分别于2022-01-26和2022-02-27成功发射,经过长达一年多的在轨测试,于2023年5月完成在轨测试任务总结[12]。该星座由2颗搭载相同型号的L波段多极化SAR载荷组成[13],设计寿命8年,轨道高度约607 km,共有六种成像模式,空间分辨率为3~30 m,可实现双星绕飞地形测量、双星跟飞联合差分干涉测量及单星重轨差分干涉测量3种模式。LT-1星座运行第一阶段,双星以可变基线绕飞运行,以获取高精度、高分辨率的全球DEM(digital elevation model)产品;第二阶段,双星在轨道面内以180°间隔分布,服务于地质、测绘、减灾等领域。

张宇等[14]分析了北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)与GPS(global positioning system)在LT-1星座精密基线解算中的贡献,表明采用GPS/BDS数据联合解算会进一步提高基线结果精度,从而实现LT-1卫星高精度精密轨道和基线解算。刘斌等[13]以中国甘肃省舟曲县泄流坡滑坡为研究对象,结合LT-1卫星在轨测试期间的成像数据,通过差分InSAR、时序InSAR方法提取了不同条件下泄流坡滑坡的形变时间序列,并以地面角反射器与全球导航卫星系统同步观测为参考,验证了LT-1卫星地表大变形的探测能力和时序InSAR测量精度。李永生等[15]以中国四川省泸定地震、中国甘肃省积石山地震、土耳其地震等为例,阐述了LT-1在同震形变监测、地震次生灾害应急评估以及活动断裂解译和活动断层遥感探查的实际应用,验证了LT-1卫星在监测精度及时空分辨率上的巨大优势。李涛等[16]构建了LT-1形变产品体系,并从多角度展开LT-1产品内容的特性分析及探讨,表明LT-1可为多方位应用需求提供持续化监测数据与服务。目前研究主要集中于LT-1的精密定轨及形变监测应用场景中,对LT-1卫星地形干涉测量精度及形变干涉测量精度定量分析验证的研究较少。因此,为充分挖掘与定量分析LT-1卫星的干涉测量能力,本文基于LT-1星座在绕飞模式与跟飞模式下的测试数据,分别对其地形测量与形变测量能力进行验证分析,为后续LT-1卫星开展业务化应用提供参考与支撑。

1　研究区域与数据

1.1　研究区域

大同市位于山西省北部,地处山西台背斜与阴山隆起的交接部位,主要地貌包括山地、丘陵及平川,整体地形呈现西北高、东南低的特点。大同市作为中国最大的煤炭能源基地之一,境内含煤面积约632 km^2,累计煤炭探明储量高达376亿t,地下资源开采所引发的地面沉降和地裂缝对城市建筑物及基础设施产生严重危害[17]。本文以大同市为研究区域,基于绕飞和跟飞两种模式的LT-1影像,开展地形、形变干涉测量试验,并进行精度验证与分析(图1)。

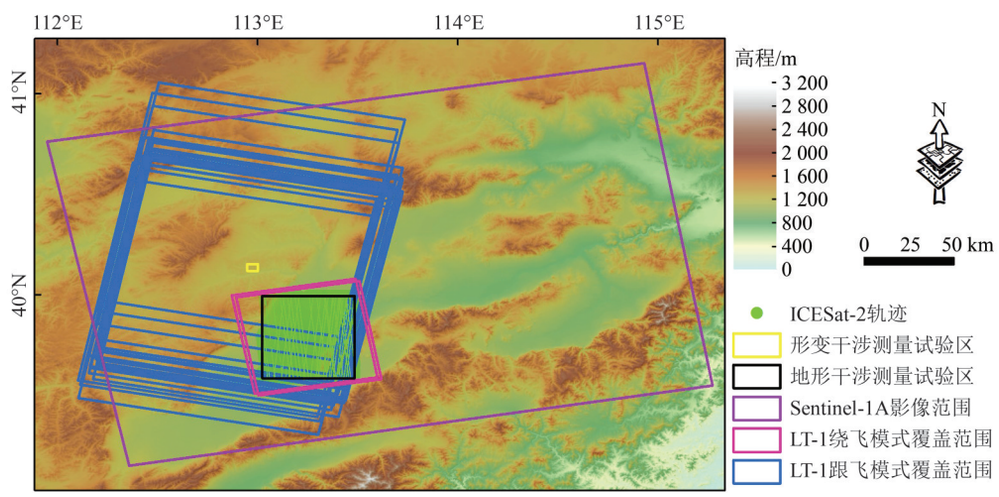


图1　数据覆盖范围及试验区空间分布

Fig. 1　Image Coverage and Spatial Distribution of the Study Area

1.2　数据来源

本文综合使用了多源对地观测数据,主要包括LT-1双星绕飞影像、LT-1双星跟飞影像、ICESat-2 ATL08数据、Sentinel-1A影像及Copernicus DEM数据。图2了展示本文所使用的各类数据时间分布。各类数据的采集时间、用途等信息见表1。

首先,本文利用LT-1双星绕飞影像开展地形干涉测量试验,然后从ICESat-2 ATL08产品中提取出高质量控制点,以Copernicus DEM产品(目前全球公开DEM产品中表现最佳)作为对照[18-20],对LT-1 DEM进行精度验证与分析(图3)。然后,利用TCP(temporary coherent point)-InSAR技术分别对Sentinel-1A与LT-1影像进行地表形变干涉测量试验,获取研究区域的垂直向地表形变速率和累积形变量,并对二者的形变测量精度进行对比分析。

2　研究方法

2.1　InSAR技术用于LT-1数据地形干涉测量

LT-1运行第一阶段,双星以0.7~7.0 km

的可变基线绕飞,同时对地面成像,形成干涉测量系统,实现空间、时间和相位三同步[21],从而无时间去相关效应,极大保障了InSAR测高的精度。利用InSAR技术测高的本质是三角测量,利用地面被观测点与各SAR天线之间的传播路径相位差对该点的高程进行求解。本文首先利用GAMMA软件平台对LT-1 SAR影像进行预处理,采用的多视比为6∶7,以此提高SAR影像的信噪比。最后通过去平地效应、自适应滤波、相位解缠及地理编码等步骤,最终生成研究区域内10 m分辨率的LT-1 DEM产品。

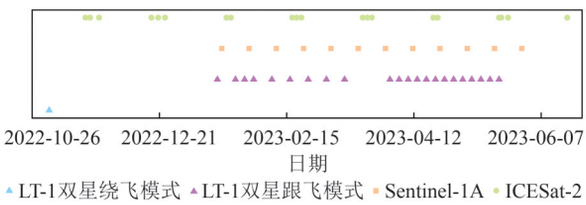


图2 本文所使用的各类数据时间分布

Fig. 2 Time Distribution of the Various Types of Data Used in This Paper

表1 本文所使用的各类数据详情表

Table 1 Detailed Table of the Various Types of Data Used in This Paper

数据名称	生产日期	用途	备注
LT-1双星绕飞	2022-11-02	地形干涉测量试验	升轨、HH极化、L波段
LT-1双星跟飞	2023-01-16、2023-01-24、2023-01-28、2023-02-01、2023-02-09、2023-02-17、2023-02-25、2023-03-05、2023-03-13、2023-04-02、2023-04-06、2023-04-10、2023-04-14、2023-04-18、2023-04-22、2023-04-26、2023-04-30、2023-05-04、2023-05-08、2023-05-12、2023-05-16、2023-05-20	形变干涉测量试验	降轨、HH极化、L波段
ICESat-2 ATL08	2022-11-19、2022-11-21、2022-11-25、2022-12-18、2022-12-21、2022-12-24、2023-01-20、2023-01-22、2023-02-18、2023-02-20、2023-02-22、2023-03-21、2023-03-23、2023-03-25、2023-04-21、2023-04-23、2023-05-20、2023-05-21、2023-05-24、2023-06-19	验证LT-1 DEM产品精度	
Sentinel-1A	2023-01-18、2023-01-30、2023-02-11、2023-02-23、2023-03-07、2023-03-19、2023-03-31、2023-04-12、2023-04-24、2023-05-06、2023-05-18, 2023-05-30	形变干涉测量;LT-1形变结果对比	升轨、VV极化、C波段
Copernicus DEM	2023-12	InSAR工作流输入数据	2010—2015年TanDEM-X处理所得
Sentinel-1A精轨数据 LT-1精轨数据	与SAR影像日期对应	消除轨道误差	

2.2 ICESat-2高程控制点提取

ICESat-2卫星是全球首颗对地观测激光测高卫星,搭载了目前全球精度最高的测距系统,能够获得米级全球地表高程信息[22]。其官方公布的数据产品共有21种,ATL08产品提供了20 m段内的有效信号光子、植被冠层高度及地面高程分类信息。通过添加条件约束[23-24],最终从ATL08产品中所提取的地面高程控制点垂直精度可达亚米级。

2.3 TCP-InSAR技术用于形变干涉测量

TCP-InSAR技术结合了永久散射体干涉测量(persistent scatterer interferometry, PSI)与小基线集技术(small baseline subset, SBAS)技术,对临时相干点进行分析[25]。该方法首先分析点目标在配准过程中偏移量的标准差,当该值小于给定阈值时,这个点目标被识别为TCP。假设有$N+1$张影像需要进行配准,选取第i张影像作为参考影像,则配准过程中对于影像中某个点目标p而言,会产生N个偏移值,记为:

$$O_p=[o_{p,1},o_{p,2},\cdots,o_{p,N}] \tag{1}$$

式中,O_p的标准差小于0.1时,点目标p被识别为TCP,利用这些TCP对SAR影像进行配准。TCP在第n张干涉图中的形变可以表示为:

$$\Delta d^n_{x,y}=d(t_{M_{n+1}},x,y)-d(t_{S_{n+1}},x,y)=\sum_{k=1}^{C_n-1}(t_k-t_{k-1})v_k \tag{2}$$

式中,(x,y)表示像素坐标;$d(t_{M_{n+1}},x,y)$、$d(t_{S_{n+1}},x,y)$分别表示主、从影像到像素(x,y)的斜距;C_n表示在给定的时间、空间基线内从影像与主影像所构成的干涉图数量;v_k表示平均形变速率;t_k表示某个时刻;t_{k-1}表示上一时刻。地表

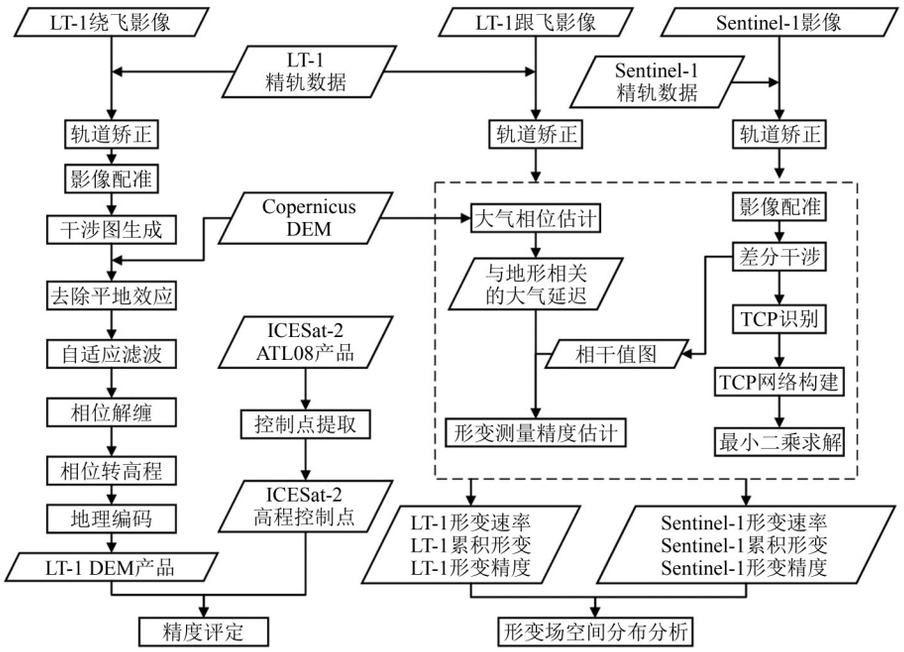


图 3　研究总体技术路线图

Fig. 3　Overall Technology Roadmap

形变相位则可表示为:

$$\begin{cases}\varphi^{n}_{\mathrm{def},x,y}=-\dfrac{4\pi}{\lambda}\displaystyle\sum_{k=1}^{C_v-1}(t_k-t_{k-1})vk=\beta_n V\\ \beta_n=-\dfrac{4\pi}{\lambda}T\end{cases}\tag{3}$$

式中,λ为波长;V为监测周期内平均速度;T为监测时间。将V转化为垂直沉降速率:

$$V_v=V\cdot\cos\theta\tag{4}$$

式中,V_v表示垂直向沉降速率;θ表示雷达波入射角。总体而言,TCP-InSAR技术利用了点目标偏移量的标准差来增加所选点的密度,在小尺度区域、影像数量较少的情况下仍可以获取高精度形变信息[26],因此本文选用该技术同时对LT-1与Sentinel-1A数据进行处理,并对形变监测结果进行对比分析。

2.4　精度验证

2.4.1　地形干涉测量精度验证

为评估LT-1 DEM产品的精度,本文使用ICESat-2 ATL08产品所提取的高程控制点作为参考数据,首先建立了误差栅格(error raster,ER)和均方根误差(root mean square error,RMSE)等精度评定指标,然后分别计算高程控制点与LT-1 DEM及Copernicus DEM产品之间的精度评价指标,最后对两种DEM产品之间的各项指标进行对比。需要注意的是,Copernicus DEM产品是以EGM2008为基准,而ICESat-2及InSAR系统生产的DEM则是以WGS-84为基准,因此进行精度评定之前必须使用EGM2008地球重力场模型[27]对数据产品进行高程异常改正,使其高程系统一致。

ER的生成主要包括以下步骤:(1)对控制点进行栅格化,使其分辨率与对应的DEM产品保持一致,并将控制点未覆盖像素的高程值设置为Nodata;(2)利用相关性对控制点栅格与DEM产品进行配准;(3)生成误差栅格,即:

$$\begin{cases}\mathrm{ER}_{i,j}=\mathrm{CPR}_{i,j}-\mathrm{DEM}_{i,j}\\ \mathrm{CPR}_{i,j}\neq\mathrm{Nodata}\\ i=1,2,\cdots,x;j=1,2,\cdots,y\end{cases}\tag{5}$$

式中$\mathrm{ER}_{i,j}$表示误差栅格;$\mathrm{DEM}_{i,j}$表示数字高程模型产品;$\mathrm{CPR}_{i,j}$表示控制点栅格(control point raster,CPR)化后的产品;x、y分别表示DEM产品的行、列总数;i、j分别表示第i行、第j列。此外,本文还计算了不同DEM产品与ICESat-2高程控制点之间的RMSE:

$$E_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(C_i-R_i)^2}\tag{6}$$

式中,n表示控制点的数量;i表示第i个控制点;C_i表示控制点的高程值;R_i表示DEM产品的高程值。

2.4.2　形变干涉测量精度验证

本文利用TCP-InSAR技术进行形变干涉测量时,所得到的残差相位中不可避免会存在残余形变相位或大气延迟相位,不能够直接采用2δ来进行精度评定。因此本文借鉴WEGMULLER等[28]所采用的方法,使用残差相位的标准差进行形变测量内符合精度评定。

研究区域相同时间跨度内,累计有12景Sen-

tinel-1A影像,为LT-1形变测量外符合精度评定提供了数据支撑。本文对LT-1与Sentinel-1A数据进行解算时,采取相同的数据处理策略,包括相位解缠参考点、滤波窗口等,并将视线向形变投影到垂直向,以Sentinel-1A的形变测量结果作为参考,对LT-1的形变测量结果进行精度评定。

3 结果与讨论

3.1 LT-1 DEM与Copernicus DEM质量对比

为比较LT-1 DEM产品与Copernicus DEM产品的质量,本文对两种产品进行视觉对比。首先利用ArcMap软件分别生成LT-1 DEM产品与Copernicus DEM产品对应的山体阴影模型,并将DEM产品叠加在山体阴影之上(图4(a)、4(c)),以表明LT-1数据在DEM提取过程中的可靠性。同时,根据LT-1、Copernicus DEM产品与控制点之间的误差栅格(图4(b)、4(d),底图为各DEM产品对应的山体阴影)。可以观察到:在平原地区,LT-1与Copernicus DEM产品同ICESat-2控制点之间误差的绝对值大多小于5 m,但当地形环境变复杂时(图4右下角),两个DEM产品同控制点间误差的绝对值显著增大,该结论同ZHANG等[29]一致。这种现象主要原因由于SAR的侧视成像,在地形复杂的山区极易形成雷达阴影、叠掩等影像畸变,从而降低相位信息的可靠性[30],为相位解缠引入误差。

本文还分别选取了研究区内的平原、山地及丘陵3处典型区域,利用山体阴影结合光学影像,对LT-1 DEM与Copernicus DEM产品的局部细节进行对比分析(图5)。在数据处理过程中,为提高信噪比,对LT-1数据进行了多视,因此最终LT-1 DEM产品的空间分辨率为10 m。同30 m空间分辨率的Copernicus DEM相比,LT-1 DEM所展示的地形纹理特征更加细致。结合光学影像进行对比,在平原地区(图5(a)),Copernicus DEM产品的山体阴影未表现出明显纹理特征,但在LT-1 DEM中,能够明显观察到道路对应的起伏特征;在山地地区(图5(b)),Copernicus DEM产品能够展现出较为明显的地形起伏特征,但由于分辨率的限制,部分地形细节仍存在模糊现象,而LT-1 DEM产品的高分辨率优势恰好可以对其进行弥补;在丘陵地区(图5(c)),LT-1 DEM产品能够展现更多的地形纹理,但此时也会有较多的随机噪声。总体而言,LT-1 DEM所展现的地形细节比Copernicus DEM产品更加丰富,但同时由于本文试验中

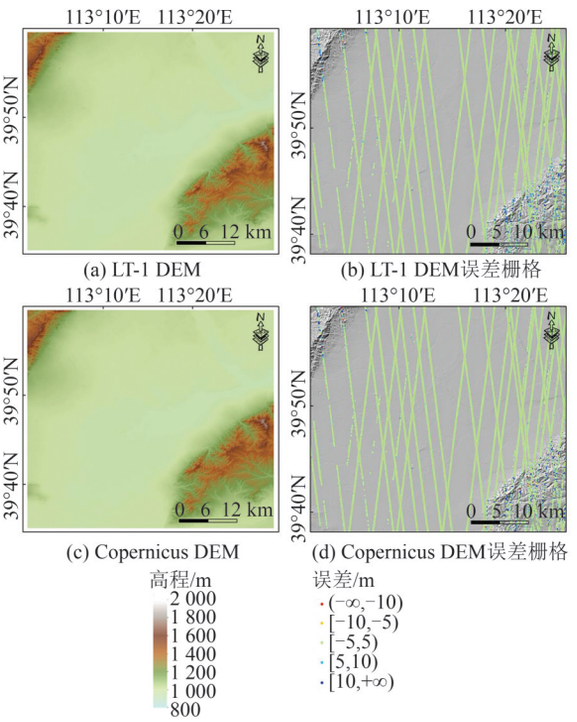


图4 LT-1与Copernicus DEM产品渲染结果及其对应的误差栅格

Fig. 4 LT-1 and Copernicus DEM Product Renderings and Corresponding Error Rasters

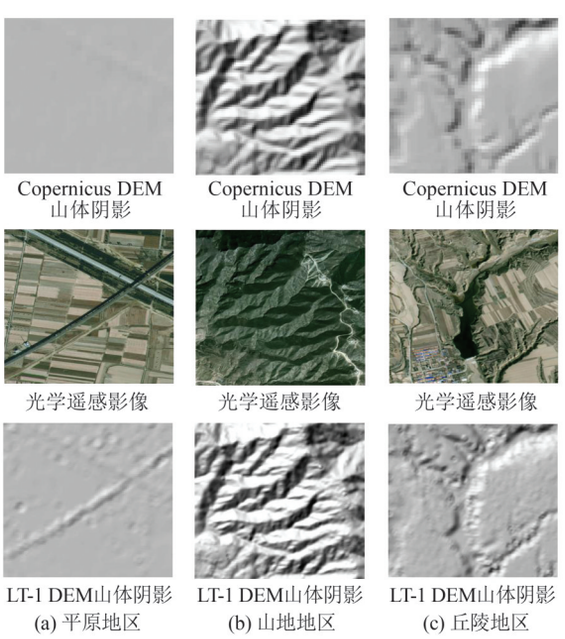


图5 不同地形下LT-1与Copernicus DEM产品山体阴影细节特写对比

Fig. 5 Comparison of Mountain Shadow Details Between LT-1 and Copernicus DEM in Different Terrains

LT-1 DEM产品是直接使用InSAR技术生产的,未进行后续滤波、人工编辑等精细化处理,因此其中不可避免地存在随机斑点。

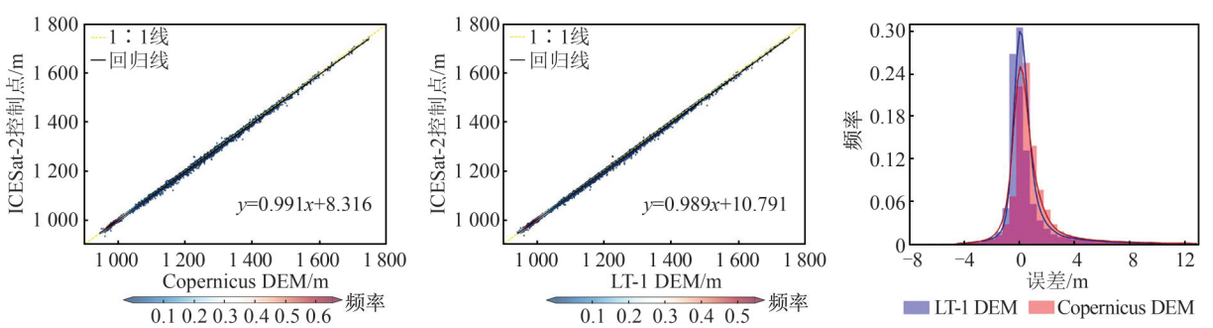
本文还分别计算了LT-1及Copernicus DEM产品同ICESat-2控制点之间的各种精度评价指标(表2)。LT-1、Copernicus DEM产品同ICESat-2控制点间的RMSE分别为2.85 m和2.67 m。此外,LT-1及Copernicus DEM产品的平均绝对误差(mean absolute error,MAE)、误差25%分位数及75%分位数非常接近,而且LT-1 DEM产品的误差最值明显优于Copernicus DEM产品。

本文对两种DEM产品与控制点进行了回归分析(图6)。从图6中可观察到,Copernicus DEM产品的增益系数0.991略高于LT-1 DEM产品的增益系数0.989,表明Copernicus DEM产品的高程值更接近于ICESat-2控制点的高程值。此外Copernicus DEM产品的偏置系数8.316略低于LT-1 DEM产品的偏置系数10.791,表明Copernicus DEM产品的系统误差略低于LT-1 DEM产品。LT-1 DEM产品误差较多地集中分布在0附近,Copernicus DEM产品误差分布较为离散(图6(c)),因此从误差分布的角度而言,LT-1 DEM产品的质量优于Copernicus DEM产品。同时,LT-1 DEM的负误差较多,Copernicus DEM的正误差较多,这种现象主要是由于SAR系统波长所引起的。LT-1星座所搭载的SAR载荷采用的是L波段,而Copernicus DEM产品的主要数据源是TerraSAR-X/TanDEM-X,其搭载的SAR载荷采用的是X波段。不同波段的微波对地表物体(如植被)的穿透性不同[31],因此利用InSAR技术生产DEM时,穿透性较弱的波段会对地面高程产生一定高估。

表2　LT-1与Copernicus DEM的各项误差评价指标

Table 2　Indicators for Evaluating the Errors in LT-1 and Copernicus DEM

数据名称	RMSE/m	最小误差/m	误差25%分位数/m	误差75%分位数/m	最大误差/m	MAE/m
LT-1 DEM	2.85	−30.74	−0.16	0.77	31.32	1.07
Copernicus DEM	2.67	−32.89	−0.16	1.08	42.32	1.19



(a) Copernicus DEM与ICESat-2高程控制之间的散点密度图　(b) LT-1 DEM产品与ICESat-2高程控制之间的散点密度图　(c) LT-1及Copernicus DEM产品高程误差分布

图6　Copernicus与LT-1 DEM产品同ICESat-2控制点间的散点密度图及误差分布直方图

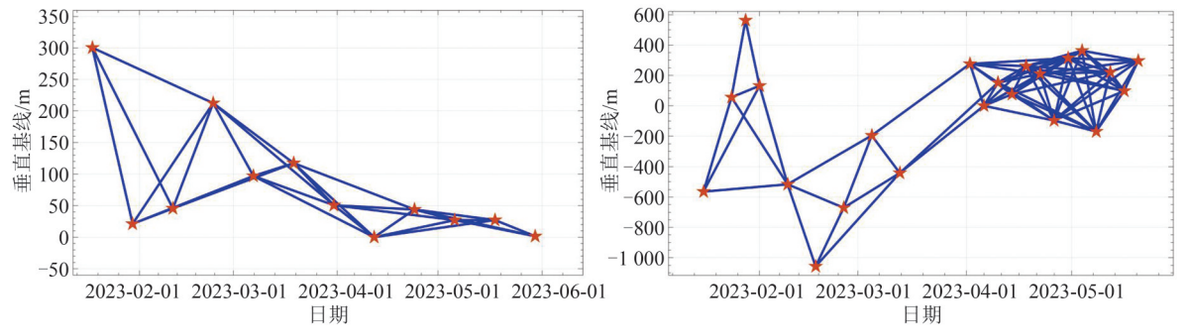
Fig. 6　Scatter Density and Histograms of Error Distribution Between Copernicus and LT-1 DEM with ICESat-2 Control Points

3.2　LT-1形变测量精度评定与分析

首先对相同时段内的Sentinel-1A与LT-1数据进行预处理,为保证影像的相干性,将时间基线阈值设为36 d,Sentinel-1A与LT-1数据所生成的时空基线图见图7。Sentinel-1目前只有A星正常在轨运行,重访周期为12 d,而LT-1则是A、B双星以绕飞的编队模式运行,该模式下的重访周期可以缩短至4 d。因此在相同时间基线阈值的约束下,LT-1星座所产生的干涉像对组合显著多于Sentinel-1A卫星。

利用TCP-InSAR技术对Sentinel-1A及LT-1数据分别进行处理,最终得到的研究区域形变速率分别见图8。Sentinel-1A数据所反演的最大沉降速率为100.1 mm/a,而LT-1数据所反演的最大沉降速率为352.5 mm/a,这一现象体现了LT-1数据在大梯度形变监测中的优势。对于形变缓慢的区域而言,LT-1与Sentinel-1A数据所反演的地表形变速率相关系数可达0.91。同时,根据LT-1与Sentinel-1A数据重叠区形变速率的散点密度图(图8(c)),LT-1数据所监测的地面沉降速率与Sentinel-1A数据所监测地地面沉降速率之间的RMSE为22.3 mm,二者整体相差很小。

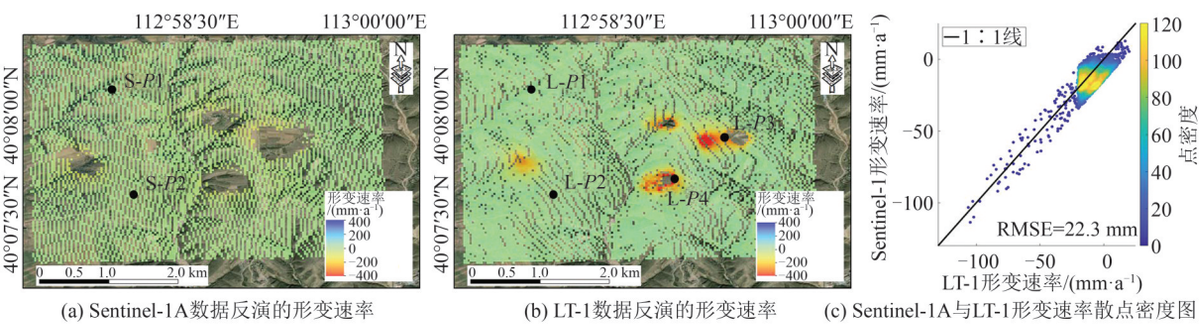
为对不同数据源所反演的形变时间序列进行分析,本文在Sentinel-1A与LT-1重叠区域选取两个监测点,它们在Sentinel-1A中对应S-*P*1、S-*P*2(图8(a)),在LT-1中对应L-*P*1、L-*P*2(图8(b))。然后在仅有LT-1数据覆盖的区域选取两个监测点L-*P*3、L-*P*4(图8(b)),并绘制其形变时间序列。从图9中可以观察到,S-*P*1与L-*P*1、S-*P*2与



(a) Sentinel-1A影像时空基线图 (b) LT-1影像时空基线图

图7 相同时段内Sentinel-1A与LT-1数据用于TCP-InSAR形变反演的时空基线图

Fig. 7 Spatial and Temporal Baseline Plots of Sentinel-1A and LT-1 Data Used for TCP-InSAR Deformation Inversion During the Same Period



(a) Sentinel-1A数据反演的形变速率 (b) LT-1数据反演的形变速率 (c) Sentinel-1A与LT-1形变速率散点密度图

图8 Sentinel-1A与LT-1数据所反演的形变速率及二者间的散点密度图

Fig. 8 Deformation Rates Derived from Sentinel-1A and LT-1 Data and Their Scatter Density Map

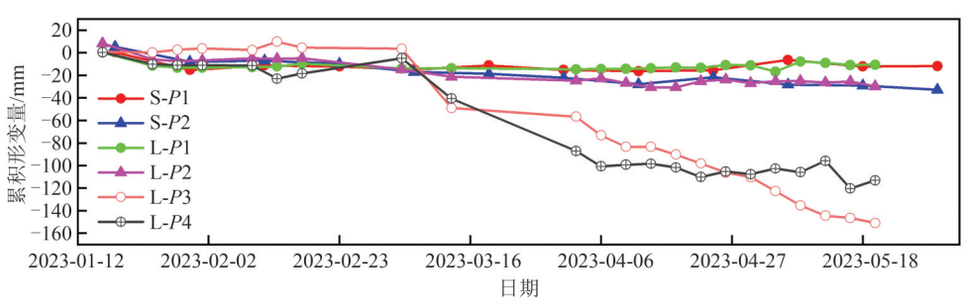


图9 Sentinel-1A与LT-1数据在不同监测点处的形变时间序列

Fig. 9 Deformation Time Series of Sentinel-1A and LT-1 Data at Different Monitoring Points

L-*P*2的形变时间序列从趋势与数量上均具有较高的相似性,在监测时段内,S-*P*1、L-*P*1点的累积沉降量分别为11.8 mm、11.6 mm;S-*P*2、L-*P*2点的累积沉降量分别为32.9 mm、29.9 mm。该现象表明了LT-1数据在形变监测应用中的可靠性。而L-*P*3、L-*P*4两点则仅在LT-1数据中表现出沉降趋势,且沉降量显著高于L-*P*1、L-*P*2两点,该现象表明了LT-1在大尺度形变监测中的有效性。此外,从图8中可直观看出,LT-1的有效形变监测点比Sentinel-1A更密集。在LT-1数据的监测结果中,能够明显地观察到4个沉降漏斗,而在Sentinel-1A数据的监测结果中,这4个沉降漏斗对应的区域并无有效监测点。造成这一现象的原因主要归结于SAR系统所采取的波段,由于Sentinel-1A卫星的波段及分辨率的限制,其归一化形变速率差[12]小于LT-1卫星,因此LT-1卫星在探测地表大形变中的优势十分明显。

利用相位残差所计算的LT-1及Sentinel-1A形变速率内符合精度如图10所示。其中,Sentinel-1A数据的形变监测量最低精度约为16.2 mm/a,而LT-1数据的形变测量最低精度约为26.4 mm/a,精度最值方面,Sentinel-1A数据优于LT-1数据。然而在形变速率缓慢的地区,LT-1数据的形变监测精度与Sentinel-1A相近,LT-1数据形变监测精度较差的监测区域主要分布在形变速率较大或地形较为复杂的地区。其原因主要在于:(1)形变速率较大时,产

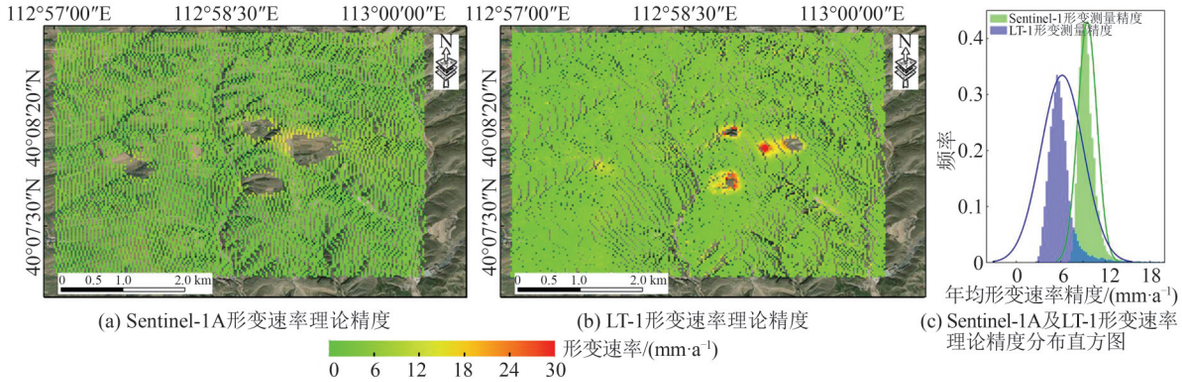


图 10　Sentinel-1A 及 LT-1 数据反演的形变速率理论精度及其分布图

Fig. 10　Theoretical Accuracy of Deformation Velocity Rates and Their Distribution for Sentinel-1A and LT-1 Data Inversion

生的形变相位梯度较大,从而导致该像素相位信息可靠性降低,在相位解缠时引入误差;(2)本文利用相位残差来估计形变测量的精度,对于地形较为复杂的地区,残余地形相位及大气延迟相位往往难以精确去除,进行内符合精度评定时,这些相位成分被视为噪声,降低了形变测量的精度。Sentinel-1A 及 LT-1 的形变测量误差的分布统计结果见图 10(c)。整体而言,无论 Sentinel-1A 数据还是 LT-1 数据均对该区域的形变速率产生了高估,但就误差分布而言,LT-1 数据对研究区域内的形变速率高估均值约为 6 mm/a,低于 Sentinel-1A 数据约 10 mm/a 的形变速率高估,这从一定程度上体现了 LT-1 数据在形变监测应用之中的稳定性与准确性。

形变测量的精度与影像相干性呈正相关[32],因此本文绘制了不同时间基线下两类数据影像的相干值图(图 11),以此分析其对形变测量精度的影响。由于 LT-1 星座双星绕飞,其最短重访周期可缩短至 4 d,而 Sentinel-1A 的重访周期则为 12 d,因此从时间基线长度这一角度而言,LT-1 的影像具有更高的相干性。此外,LT-1 采用 L 波段作为主要工作波段,在相近的时间基线条件下,能够保持更高的相干性(图 11(a)、(e))。因此时间基线约束为 36 d 的情况下,LT-1 数据的整体相干性优于 Sentinel-1A,这也解释了 LT-1 数据的形变监测精度优于 Sentinel-1A 数据的形变监测精度的原因。

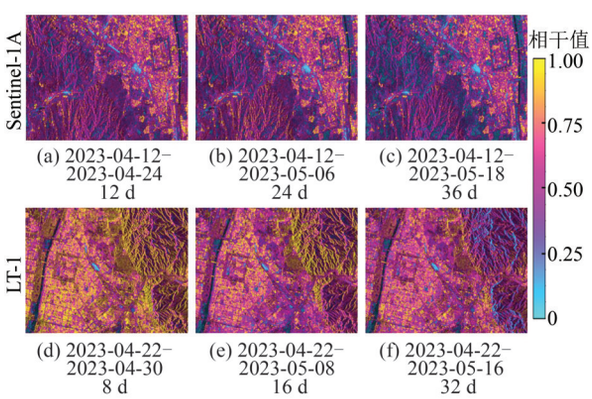


图 11　不同时间基线下 Sentinel-1A 及 LT-1 影像的相干值图

Fig. 11　Coherence Maps of Sentinel-1A and LT-1 Images Under Different Temporal Baselines

4　总结与展望

为充分挖掘 LT-1 星座在干涉测量中的应用潜力,本文从地形测量及形变测量两个角度分别对 LT-1 星座的干涉测量能力进行评估。结果显示,直接使用 InSAR 技术所生产的 LT-1 DEM 产品与 Copernicus DEM 产品垂直精度相近,且 LT-1 DEM 产品的部分精度评价指标优于 Copernicus DEM,同时,LT-1 星座高空间分辨率的优势为 LT-1 DEM 产品提供了更多的地形纹理细节,展现了 LT-1 星座在精细化地形干涉测量中的应用潜力。以大同市矿区为例,利用跟飞模式下的 LT-1 数据反演了该区域的形变速率及累积形变量,并以同时期的 Sentinel-1A 影像所反演的形变速率及累积形变量进行对照,评估了 LT-1 数据所反演的形变产品的内、外符合精度。结果显示,LT-1 所反演的形变产品与 Sentinel-1A 所反演的形变产品相关系数高达 0.91。此外相比于 Sentinel-1A 的形变产品,LT-1 的形变产品具有更高的内符合精度与更加密集的有效监测点,体现了 LT-1 星座在精准化形变干涉测量中的应用潜力。

本文实结果证明了 LT-1 星座在干涉测量方面所展现出的巨大潜力。LT-1 星座高空间分辨率的优势为地形测量提供了更精细的地表细节,尤其是在复杂地形和城市区域的高精度 DEM 生产方面具有明显的优势。随着更多数据的积累和算法的优化,LT-1 星座有望在全球范围内实现更大区域的精细化地形测绘,尤其是在高

山、森林和复杂地质环境下的应用,将进一步提升地形产品的准确性与可靠性。此外,LT-1星座在形变监测方面的表现同样令人瞩目。未来,随着观测能力的提升、数据处理技术的进步以及LT-1多时相数据的积累,LT-1星座能够提供更精准的时间序列分析,为地面形变的长期监测提供有力支撑。这对于大规模基础设施建设、地下资源勘探、城市化进程中的地面沉降监测等领域具有重要意义。综上所述,LT-1星座在地形测量和形变监测领域的应用前景广阔,未来将在环境监测、资源管理、灾害预警等多个领域发挥重要作用。随着技术的不断进步,LT-1星座将为全球范围内的高精度遥感监测提供更加可靠的支持,助力地球科学研究和可持续发展目标的实现。

致谢:感谢自然资源部国土卫星遥感应用中心提供LT-1及其精轨数据,NASA提供ICESat-2数据,ESA提供Copernicus DEM产品、Sentinel-1A及其精轨数据。

参 考 文 献

[1] DONG Y T, ZHANG L, BALZ T, et al. Radar-Grammetric DSM Generation in Mountainous Areas Through Adaptive-Window Least Squares Matching Constrained by Enhanced Epipolar Geometry[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 137: 61-72.

[2] NICO G, LEVA D, FORTUNY-GUASCH J, et al. Generation of Digital Terrain Models with a Ground-Based SAR System[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(1): 45-49.

[3] 朱建军, 付海强, 汪长城. InSAR林下地形测绘方法与研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2030-2038.
ZHU Jianjun, FU Haiqiang, WANG Changcheng. Methods and Research Progress of Underlying Topography Estimation over Forest Areas by InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2030-2038.

[4] MENG L S, YAN C, LÜ S N, et al. Synthetic Aperture Radar for Geosciences[J]. *Reviews of Geophysics*, 2024, 62(3): e2023RG000821.

[5] 葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 等. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 949-956.
GE Daqing, DAI Keren, GUO Zhaocheng, et al. Early Identification of Serious Geological Hazards with Integrated Remote Sensing Technologies: Thoughts and Recommendations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 949-956.

[6] 李振洪, 宋闯, 余琛, 等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用:挑战与对策[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 967-979.
LI Zhenhong, SONG Chuang, YU Chen, et al. Application of Satellite Radar Remote Sensing to Landslide Detection and Monitoring: Challenges and Solutions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 967-979.

[7] MOREIRA A, BACHMANN M, BALZER W, et al. TanDEM-L: Project Status and Main Findings of the Phase Bl Study[C]//IGARSS 2018—2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018.

[8] DAS A, KUMAR R, ROSEN P. NISAR Mission Overview and Updates on ISRO Science Plan[C]//2021 IEEE International India Geoscience and Remote Sensing Symposium (InGARSS), Ahmedabad, India, 2021.

[9] MOTOHKA T, KANKAKU Y, MIURA S, et al. Overview of ALOS-2 and ALOS-4 L-Band SAR[C]//2021 IEEE Radar Conference (RadarConf21), Atlanta, GA, USA, 2021.

[10] JI Y F, ZHANG Y S, ZHANG Q L, et al. Comments on "the Influence of Equatorial Scintillation on L-Band SAR Image Quality and Phase"[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(9): 7300-7301.

[11] LIANG C R, FIELDING E J, LIU Z, et al. An Analysis of the Potentials of L-Band SAR Satellites for Measuring Azimuth Motion[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 315: 114426.

[12] 刘斌, 张丽, 葛大庆, 等. 陆地探测一号卫星滑坡大变形InSAR监测应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1753-1762.
LIU Bin, ZHANG Li, GE Daqing, et al. Application of InSAR Monitoring Large Deformation of Landslides Using Lutan-1 Constellation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1753-1762.

[13] LIU K Y, WANG R, ZHANG H, et al. Lutan-1: An Innovative L-Band Spaceborne SAR Mission[C]//EUSAR 2022—14th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Leipzig, Germany, 2022.

[14] 张宇, 赵齐乐, 蒋科材, 等. 基于BDS-3的陆地探测一号星间基线高精度解算方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1763-1769.
ZHANG Yu, ZHAO Qile, JIANG Kecai, et al. High-Precision Inter-Satellite Baseline Determina-

tion Method for Lutan-1Based on BDS-3[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1763-1769.

[15] 李永生, 李强, 焦其松, 等. 陆地探测一号SAR卫星星座在地震行业的应用与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1741-1752.
LI Yongsheng, LI Qiang, JIAO Qisong, et al. Application of Lutan-1 SAR Satellite Constellation to Earthquake Industry and Its Prospect[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1741-1752.

[16] 李涛, 唐新明, 李世金, 等. L波段差分干涉SAR卫星基础形变产品分类[J]. 测绘学报, 2023, 52(5): 769-779.
LI Tao, TANG Xinming, LI Shijin, et al. Classification of Basic Deformation Products of L-Band Differential Interfero-Metric SAR Satellite[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(5): 769-779.

[17] HU L R, TANG X M, TOMÁS R, et al. Monitoring Surface Deformation Dynamics in the Mining Subsidence Area Using LT-1 InSAR Interferometry: A Case Study of Datong, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 131: 103936.

[18] JAIN A O, THAKER T, CHAURASIA A, et al. Vertical Accuracy Evaluation of SRTM-GL1, GDEM-V2, AW3D30 and CartoDEM-$V_{3.1}$ of 30-m Resolution with Dual Frequency GNSS for Lower Tapi Basin India[J]. *Geocarto International*, 2018, 33(11): 1237-1256.

[19] COURTY L G, SORIANO-MONZALVO J C, PEDROZO-ACUÑA A. Evaluation of Open-Access Global Digital Elevation Models (AW3D30, SRTM, and ASTER) for Flood Modelling Purposes [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2019, 12 (S1): e12550.

[20] LI H, ZHAO J Y, YAN B Q, et al. Global DEMs Vary from One to Another: An Evaluation of Newly Released Copernicus, NASA and AW3D30 DEM on Selected Terrains of China Using ICESat-2 Altimetry Data [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2022, 15(1): 1149-1168.

[21] 楼良盛, 刘志铭, 张昊, 等. 天绘二号卫星关键技术[J]. 测绘学报, 2022, 51(12): 2403-2416.
LOU Liangsheng, LIU Zhiming, ZHANG Hao, et al. Key Technologies of TH-2 Satellite System[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51 (12): 2403-2416.

[22] MARKUS T, NEUMANN T, MARTINO A, et al. The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science Requirements, Concept, and Implementation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 260-273.

[23] 王密, 韦钰, 杨博, 等. ICESat-2/ATLAS全球高程控制点提取与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(2): 184-192.
WANG Mi, WEI Yu, YANG Bo, et al. Extraction and Analysis of Global Elevation Control Points from ICESat-2/ATLAS Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(2): 184-192

[24] LI B B, XIE H, LIU S J, et al. A High-Quality Global Elevation Control Point Dataset from ICESat-2 Altimeter Data[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2024, 17(1): 2361724.

[25] ZHANG L, LU Z, DING X L, et al. Mapping Ground Surface Deformation Using Temporarily Coherent Point SAR Interferometry: Application to Los Angeles Basin[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 117: 429-439.

[26] LI S W, XU W B, LI Z W. Review of the SBAS InSAR Time-Series Algorithms, Applications, and Challenges[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2022, 13(2): 114-126.

[27] PAVLIS N K, HOLMES S A, KENYON S C, et al. The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117 (B4): 2011JB008916.

[28] WEGMULLER U, WALTER D, SPRECKELS V, et al. Nonuniform Ground Motion Monitoring with TerraSAR-X Persistent Scatterer Interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 48(2): 895-904.

[29] ZHANG S C, WANG J, FENG Z J, et al. Verification of the Accuracy of Sentinel-1 for DEM Extraction Error Analysis Under Complex Terrain Conditions [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 133: 104157.

[30] MADSEN S N, ZEBKER H A, MARTIN J. Topographic Mapping Using Radar Interferometry: Processing Techniques[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1): 246-256.

[31] WU C J, YANG X W, YU Y H, et al. Assessment of Underlying Topography and Forest Height Inversion Based on TomoSAR Methods[J]. *Geospatial Information Science*, 2024, 27(2): 311-326.

[32] HRYSIEWICZ A, WILLIAMSON J, EVANS C D, et al. Estimation and Validation of InSAR-Derived Surface Displacements at Temperate Raised Peatlands [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 311: 114232.