引文格式:朱泽尧,赵双明,张文,等.宏图一号分布式车轮编队InSAR卫星高程反演方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1619-1630.DOI:10.13203/j.whugis20240501

Citation:ZHU Zeyao,ZHAO Shuangming,ZHANG Wen,et al.Elevation Inversion Method for HT-1 Distributed Cartwheel InSAR Satellite System[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(8):1619-1630.DOI:10.13203/j.whugis20240501

宏图一号分布式车轮编队InSAR卫星高程反演方法

朱泽尧[1] 赵双明[1] 张 文[1] 孟令奎[1] 罗 志[1] 李林宜[1] 路聚锋[2]

1 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

2 航天宏图信息技术股份有限公司,北京,100195

摘 要:宏图一号(Hongtu-1,HT-1)卫星系统是全球首个采用四星车轮式编队构型的多星分布式干涉雷达卫星系统。与传统合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)干涉测量(interferometric SAR,InSAR)系统不同,HT-1具备卫星单航过多基线干涉测量能力,能够同时得到多组不同基线长度的高相干性SAR像对。针对HT-1数据特点,提出一种利用多基线相位解缠的高精度InSAR高程反演方法。首先建立等效相位中心简化辅星成像模型,利用单基SAR几何生成不同基线像对干涉图;然后对去平干涉图进行多基线解缠,恢复绝对地形相位;最后将相位转换为目标场景高程。选取中国河南某地区作为研究区域,对该地区真实地形进行仿真实验,结果表明,干涉车轮多基线系统具有复杂陡峭场景的高程反演能力,非叠掩区域高程均方根误差小于2 m;通过与高分7号和ICESat-2数据获取的实验区地表高程进行对比分析,验证了该方法的有效性和可靠性。

关键词:宏图一号SAR;车轮星座;InSAR;多基线相位解缠;高程反演

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-12-30

DOI:10.13203/j.whugis20240501 **文章编号**:1671-8860(2025)08-1619-12

Elevation Inversion Method for HT-1 Distributed Cartwheel InSAR Satellite System

ZHU Zeyao[1] *ZHAO Shuangming*[1] *ZHANG Wen*[1] *MENG Lingkui*[1] *LUO Zhi*[1]
LI Linyi[1] *LU Jufeng*[2]

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Piesat Information Technology Co. Ltd, Beijing 100195, China

Abstract: **Objectives**: The Hongtu-1 (HT-1) synthetic aperture radar (SAR) satellite system, the world's first multi-satellite distributed interferometric radar system, utilizes a four-satellite wheel formation to enable single-pass, multi-baseline interferometry. This system provides distinct advantages over traditional interferometric SAR (InSAR) systems by enabling the simultaneous acquisition of high-coherence SAR image pairs with varying baseline lengths. Most existing related research is based on simplified simulation data, overlooking practical challenges in real data processing. **Methods**: A method for high-precision InSAR elevation inversion based on multi-baseline phase unwrapping is proposed, tailored to HT-1's unique data characteristics. The approach involves constructing an equivalent phase center model for auxiliary satellites, generating interferograms from single-pass SAR geometry, and performing multi-baseline unwrapping on the flattened interferograms to recover the absolute terrain phase. The final phase data is converted into elevation measurements for the target area. **Results**: Simulation experiments using real terrain data from Henan Province, China, validate the method's effectiveness for elevation inversion in complex and

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB3900603)。

第一作者:朱泽尧,博士生,研究方向为InSAR数据处理及形变监测。rszyzhu@whu.edu.cn

通信作者:赵双明,教授。smzhao@whu.edu.cn

steep terrains. The root mean square error (RMSE) in non-overlapping regions is under 2 meters. A 5 m resolution digital elevation model (DEM) of the experimental area was obtained by inverting the actual single-track HT-1 SAR data. In the overlapping area, the elevation RMSE between HT-1 DEM and GF-7 DEM is under 14 m. Additionally, the elevation profile of HT-1 DEM closely aligns with the trend observed in ICESat-2 laser altimetry data. **Conclusions**: The HT-1 system's wheel constellation and multi-baseline interferometry capabilities exhibit substantial potential for high-accuracy topographic mapping.
Key words: HT-1 SAR; wheel constellation; InSAR; multi-baseline phase unwrapping; elevation inversion

数字高程模型(digital elevation model,DEM)被广泛应用于地形地貌测绘、工程设计、数值建模、视域和可见性计算,以及其他多维空间分析[1-5]。大范围DEM的生成主要依赖于光学影像立体匹配、激光雷达(light detection and ranging,LiDAR)和星载合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)3种主流技术[6-8]。利用高分辨率航空或卫星影像的立体匹配获取DEM,适用于大范围地形建模,但在云覆盖和植被密集的地区易受遮挡影响。LiDAR方法以主动遥感方式获取高精度点云数据,能够穿透植被获取裸地高程,在森林、山地等复杂地形中具有显著优势。然而,LiDAR DEM的生产涉及地物分类、地表点提取和噪声去除等复杂的点云处理步骤。环境因素如云层、降雨以及大气透过率的变化也会对LiDAR数据获取造成影响,尤其在植被极其密集的区域,可能出现地面点回波不足,进而引发高程信息缺失与测量误差问题。

自20世纪70年代起,星载侧视雷达系统逐步用于高度信息提取,星载InSAR方法在多云、多雾等复杂天气条件下获取DEM具有明显优势[9]。传统星载InSAR系统主要分为单天线重复轨道系统和单轨道双天线系统两大类[10-11]。前者利用单颗SAR卫星在不同轨道周期获取影像进行干涉测量,典型代表包括SEASAT(美国,1978年)、ERS-1/2(欧洲,1995年)、RADARSAT-1(加拿大,1995年)、EnviSat(欧洲,2002年)、ALOS(日本,2006年)、Sentinel-1(欧洲,2014年)、Gaofen-3(中国,2016年)等[12-15],但受到重访周期和大气条件影响,干涉相干性较低。后者在单颗卫星上安装双天线,实现单次航过干涉测量,代表性任务为2000年的航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission,SRTM),完成了近全球30 m分辨率DEM生产,测高精度主要受限于天线间距[16]。

随着星载InSAR技术的发展,星载分布式InSAR系统已成为对地观测领域的前沿研究方向。该系统通过多颗SAR卫星编队协同工作,有效规避时间去相关问题,从而实现高分辨率成像和高精度测高。2010年由德国宇航局发射的TanDEM-X与2007年发射的TerraSAR-X卫星组成了首个星载分布式双基SAR系统[17]。中国首个近距离编队卫星系统天绘二号于2019年发射,其采用异轨编队和一发双收模式[18];此外,2022年发射的陆探一号01组A、B星已完成双星"绕飞"双基地形干涉测量等任务[19]。在数据处理方面,星载分布式InSAR系统的流程和传统InSAR系统类似,包括SAR影像配准、干涉图生成、相位解缠和相位转高等步骤[20-21]。现有研究主要聚焦于回波数据聚焦成像、干涉基线定标和影像配准等方面[18,22-23]。双基星载SAR系统在单次航过中仅生成单基线干涉图,其基线设计需要综合考虑基线长度对高程模糊度和几何去相关的影响。

1998年,法国空间局提出了干涉车轮分布式卫星编队概念。该方案利用对3颗小卫星被动接收在轨大卫星SAR(例如ALOS、EnviSat卫星等)的SAR回波信号并联合进行干涉测量,但在研发过程中遭遇了时空同步与运动补偿等技术难题[24]。宏图一号(Hongtu-1,HT-1)卫星系统为全球首个采用车轮编队的多星分布式干涉雷达卫星系统,其目标是两年内完成全球陆地测绘任务,为测绘、地震监测、水利等行业提供高精度InSAR测量数据[25]。目前,国内外对车轮分布式卫星系统的研究较少,多数工作主要基于简化的仿真数据(忽略如地表形变、噪声、大气效应等因素影响),难以全面反映实际应用中的挑战[26-28]。因此,基于HT-1 SAR数据处理方法的研究具有重要意义。

本文提出了一种基于HT-1数据的InSAR卫星高程反演整体技术流程。首先利用等效相位中心的方法,将辅星双基成像模型简化为自发自收模型;然后根据单基InSAR几何构建HT-1 SAR数据多基线解缠方法;最后利用仿真实验验证HT-1系统多基线干涉能力,并利用HT-1 SAR真实数据生成实验区域DEM。本文通过与

光学高分 7 号(Gaofen-7,GF-7)DEM 和 ICESat-2(ice,cloud,and land elevation satellite-2)激光点云数据进行比对分析,指出制约高程反演精度的潜在因素。研究结果可以为 HT-1 后续全球大范围 DEM 的制作和应用提供参考。

1　HT-1 分布式车轮编队 SAR 系统

HT-1 于 2023-03-30 从太原卫星发射中心成功发射,由 4 颗 X 波段 SAR 卫星组成,采用车轮式编队设计。其中,一颗被指定为主卫星,用于发射和接收雷达回波;其余 3 颗为编队辅卫星,仅被动接收雷达回波。主卫星标识为 HT-1 A,辅卫星分别为 HT-1 B、HT-1 C 和 HT-1 D。车轮编队是一种独特的卫星星座构型,每颗卫星轨道偏心率略有不同,确保在任一固定时刻,主卫星始终位于编队中心,3 颗辅卫星以 120°间隔均匀分布在主卫星周围,如图 1 所示。4 颗卫星在 528 km 高度的太阳同步轨道上运行,回访周期为 15 d,倾角为 97.552°。

在 HT-1 卫星车轮编队构型建立后,经过姿轨调整和地面系统优化,具备在多种工作模式下执行单星成像及 4 星干涉测量任务的能力。HT-1 的工作模式如表 1 所示,其中条带成像模式(strip-map,SM)、聚束模式(spotlight,SL1)、滑动聚束模式(slide spotlight,SL2)和逐行扫描地形观测模式(terrain observation by progressive scan,TOPS)均由主卫星 HT-1 A 独立完成信号的发射与接收。本文所采用的 SAR 数据来自 HT-1 的干涉测量模式(interferometric,IM)。在该模式下,4 星同步接收主星发射的雷达回波,主辅影像对的时间基线近似为零,可有效抑制大气扰动、时间去相关及轨道误差对干涉相位的干扰,从而提高地形反演精度。

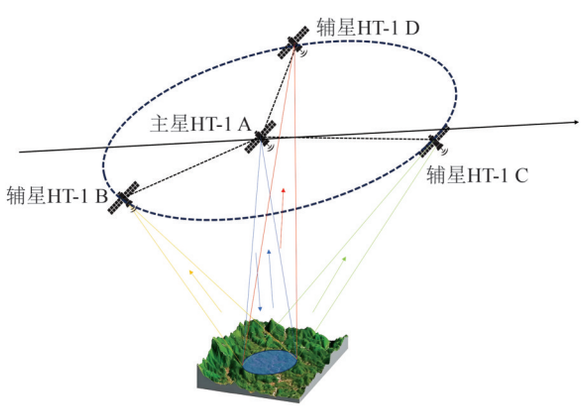


图 1　HT-1 车轮星座编队示意图

Fig. 1　Schematic Diagram of the HT-1 Wheel Constellation Formation

表 1　HT-1 系统工作模式和卫星参数[25]

Table 1　HT-1 System Operating Modes and Satellite Parameters[25]

工作模式	雷达波段	波长/m	极化方式	分辨率/m	幅宽
SM	X 波段	0.032	HH	3	20～30 km(距离向)
SL1				0.5	5 km ×5 km(方位向×距离向)
SL2				1	10 km×20 km(方位向×距离向)
IM				3	20～30 km(距离向)
TOPS				5	50 km(距离向)

2　HT-1 多星 InSAR 高程反演方法

经典 InSAR 卫星高程反演流程包括:(1)获取同一区域的两景 SAR 影像并生成干涉图,以提取相位信息;(2)估算干涉基线,以确定主辅星间的空间几何关系;(3)去除平地相位和大气误差,提取地形相位;(4)通过相位解缠获取绝对相位;(5)结合基线长度与轨道参数,将解缠相位转换为高程信息,经过地理编码等步骤生成 DEM[29]。在对上述流程进行分析的基础上,本文构建了 HT-1 SAR 系统 DEM 反演方法,如图 2 所示,其中 SLC(single look complex)表示单视复数影像。

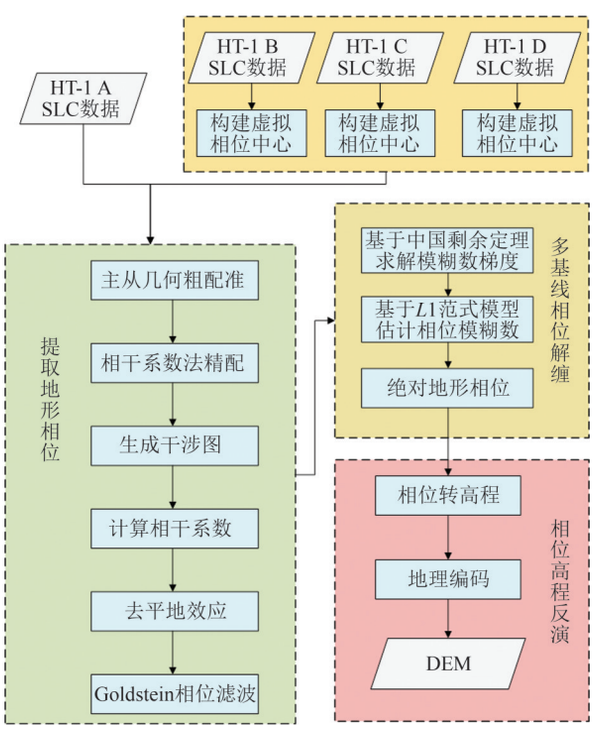


图 2　HT-1 SAR 系统 DEM 反演流程图

Fig. 2　Flowchart of DEM Inversion for HT-1 SAR System

2.1　HT-1 辅卫星等效相位中心处理

HT-1 在绕飞构型时,主星 HT-1 A 和辅星 HT-

1B/C/D分别执行单基、双基工作模式,如图3所示。主星成像采用与传统SAR相同的距离-多普勒模型,用于确定卫星和地面点位置关系,公式如下:

$$\begin{cases} |p_t - p_m(t_1)| = R_1 \\ \dfrac{2v_m(t_l)\left(p_t - p_m(t_1)\right)}{\lambda|p_t - p_m(t_1)|} = f_{dm} \end{cases} \tag{1}$$

式中,p_m和v_m分别表示主卫星在地面点p_t成像时刻t_1的位置和速度矢量;λ为雷达波长;f_{dm}表示主星多普勒中心频率,d代表多普勒中心,m代表主影像。在一发双收模式下,受主辅星间位置与速度差异影响,辅星成像模型相较主星更为复杂,其定位模型可表述为:

$$\begin{cases} \left|p_t - p_m(t_2)\right| + \left|p_t - p_s(t_2)\right| = R_1 + R_2 \\ \dfrac{v_m(t_2)\left(p_t - p_m(t_2)\right)}{\lambda\left|p_t - p_m(t_2)\right|} + \dfrac{v_s(t_2)\left(p_t - p_s(t_2)\right)}{\lambda\left|p_t - p_s(t_2)\right|} = f_{ds} \end{cases} \tag{2}$$

其中,p_s、v_s表示辅卫星在同一地面点成像时刻t_2的位置和速度矢量;f_{ds}表示辅星多普勒中心频率,s代表辅影像。一方面,式(1)和式(2)无法解析求解地面点坐标;另一方面,引入主星$p_m(t_2)$后,空间基线需额外考虑沿轨方向分量[30]。为简化模型,本文通过构建辅星等效相位中心,将双基模型转换为自发自收模式,便于采用传统的单基InSAR几何进行影像粗配准、基线定标、去平地效应、辅星地理编码等步骤。常规等效相位中心仅改变辅雷达成像模型,将其天线相位中心等效至主辅天线相位中心连线的中点处,计算公式如下:

$$\begin{cases} |p_t - p_{se}(t_2)| = R_2 \\ p_{se}(t_2) = \left(p_m(t_2) + p_s(t_2)\right)/2 \end{cases} \tag{3}$$

式中,$p_{se}(t_2)$表示成像时刻t_2的等效相位中心;R_2表示等效相位中心后的目标斜距。

2.2 单基InSAR高程反演原理

经过SAR数据配准后,通过主从相位共轭相乘即可获得干涉相位。理论上卫星干涉相位主要由多个分量组成,包括参考椭球面相位ϕ_{ref}、地形相位ϕ_{topo}、地表形变相位ϕ_{def}、大气相位ϕ_{atm}和其他噪声相位ϕ_{noi}。HT-1 SAR数据为一发多收模式下获取,该模式下SAR影像对的时间基线几乎为零,能够最大限度地克服大气、时间去相关和轨道对干涉相位的影响。噪声相位ϕ_{noi}来源于轨道误差、系统热噪声等,可以通过相位滤波的方法予以抑制。因此,可以将去噪后的主辅干涉相位简化为参考椭球面相位、地形相位和噪声相位3部分,具体如下:

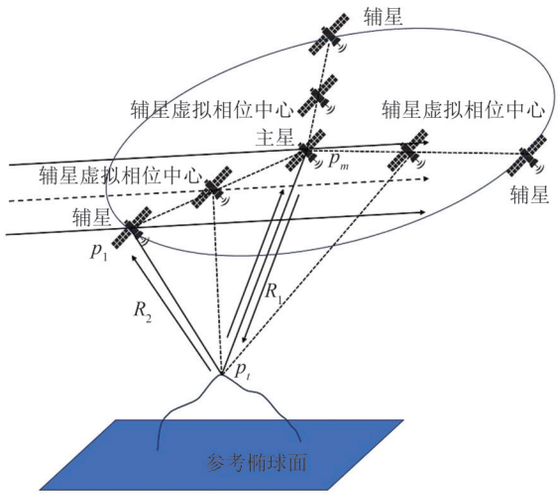


图3 HT-1车轮主辅卫星工作原理及等效相位中心处理

Fig. 3 Working Principle of HT-1 Wheel Main and Auxiliary Satellites and the Equivalent Phase Center Processing

$$\begin{aligned} \phi = \phi_{\text{ref}} + \phi_{\text{topo}} + (\phi_{\text{def}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noi}}), \\ \phi_{\text{def}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noi}} \approx 0 \end{aligned} \tag{4}$$

式中,ϕ_{ref}是由参考椭球面(即大地高为零)引起的相位,是InSAR初始干涉相位中的主要分量;ϕ_{topo}是由目标大地高h引起的相位分量。

InSAR干涉几何模型如图4所示。其中,O代表地球球心,主卫星雷达入射角θ对地面点P进行侧视成像,斜距为R_1,M为主卫星天线相位中心,H为飞行高度,h为待求解的地表高程;辅卫星雷达天线相位中心位于S,接收主星回波对P侧视成像,斜距为R_2。主辅天线间的空间距离记为空间基线B,α表示基线B和水平方向的夹角。B可以分解为平行于主卫星雷达斜距MP的平行基线$B_{/\!/}$和垂直于雷达斜距向SP的垂直基线$B_{\perp}$,计算如下:

$$\begin{cases} B_{/\!/} = B\sin(\theta - \alpha) \\ B_{\perp} = B\cos(\theta - \alpha) \end{cases} \tag{5}$$

P_0是P点在参考椭球面的等斜距投影点,即$r_1 = R_1$,主卫星雷达至P_0的侧视角为θ_0。需要指出的是,地面高程h会引起实际侧视角的变化,记作$\Delta\theta$,即$\theta = \theta_0 + \Delta\theta$。参考椭球面相位和地形相位可以表示为:

$$\begin{cases} \phi = \phi_{\text{ref}} + \phi_{\text{topo}} = -\dfrac{2\pi}{\lambda}(R_1 - R_2) \\ \phi_{\text{ref}} = -\dfrac{2\pi}{\lambda}B_{/\!/} = -\dfrac{2\pi}{\lambda}B\sin(\theta_0 - \alpha) \\ \phi_{\text{topo}} = -\dfrac{2\pi}{\lambda}B_{\perp}\Delta\theta = -\dfrac{4\pi}{\lambda}\cdot\dfrac{h}{R_1\sin\theta_0} \end{cases} \tag{6}$$

地表目标大地高h根据下式计算得到:

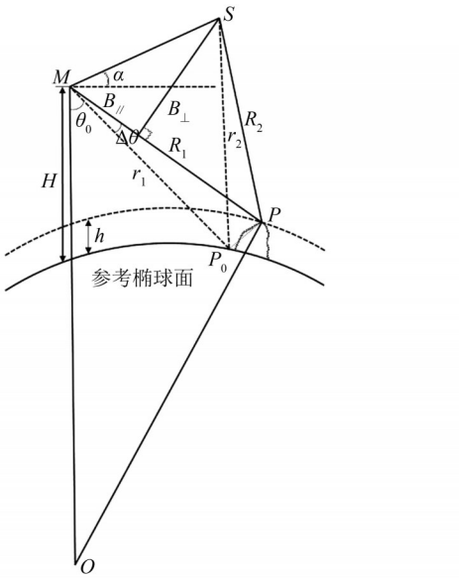


图 4　InSAR干涉相位几何模型

Fig. 4　InSAR Interferometric Phase Geometry Model

$$h=-\frac{\lambda}{2\pi}\cdot\frac{R_1\sin\theta_0 h}{B\cos(\theta_0-\alpha)} \tag{7}$$

2.3　多基线相位解缠

不同于单基线相位解缠方法,多基线方法利用多幅不同基线长度的干涉图联合解缠,通过扩大相位模糊数克服相位连续性假设限制。目前常见的多基线解缠算法有基于极大似然估计的方法和基于中国剩余定理的方法。前者受到计算效率的限制,后者则容易受到相位噪声的干扰,导致解缠失败。为此,文献[31]提出了InSAR测高场景下的两阶段多基线解缠算法(two-stage programming approach,TSPA)。该算法第一阶段通过模糊数梯度估计,利用垂直基线的多样性克服解缠病态性;第二阶段基于单基线模型完成解缠。本节以TSPA算法为基础,针对HT-1 4星分布式车轮编队的数据特点,设计HT-1数据干涉相位解缠算法。

影像配准和干涉处理后,对于任意像元s,其缠绕相位$\varphi(s)$和真实绝对相位$\psi(s)$的关系如下:

$$\varphi(s)=\psi(s)-2k(s)\pi \tag{8}$$

式中,$k(s)$表示像元s的相位模糊数。常规单基线相位解缠(phase unwrapping,PU)方法基于相位连续性假设,相邻像元之间的相位差较小,可利用缠绕相位梯度估算绝对相位梯度;通过路径积分方法恢复整个区域的绝对相位,获得唯一的解缠结果,如下所示:

$$\Delta\psi(s,s-1)=\begin{cases}\varphi(s)-\varphi(s-1), \left|\varphi(s)-\varphi(s-1)\right|\leqslant\pi\\ \varphi(s)-\varphi(s-1)-2\pi, \varphi(s)-\varphi(s-1)>\pi\\ \varphi(s)-\varphi(s-1)+2\pi, \varphi(s)-\varphi(s-1)<-\pi\end{cases} \tag{9}$$

式中,$\Delta\psi(s,s-1)$表示估计得到的像元s与其在距离向或方位向相邻像元$s-1$之间的绝对相位差。相位连续性假设适用于干涉条纹变化平缓区域,在地形起伏剧烈导致的相位不连续区域,式(9)难以满足。此时,单基线PU转化为一个最优化问题,即通过最小化解缠相位梯度与相位估计梯度的差异恢复绝对相位,广义数学模型如下:

$$\begin{cases}\min\sum f\left(t(s,s-1)\right)\\ \text{s.t. } \psi(s)-\psi(s-1)-\Delta\psi(s,s-1)=t(s,s-1)\end{cases} \tag{10}$$

对于HT-1在单次航过获取的SAR数据,可通过主辅影像配准生成3幅干涉图。具体的,以HT-1 A数据为主影像,分别与HT-1 B/C/D数据进行配准和干涉处理。设去平后的干涉图分别为$\varphi_{A/B}$、$\varphi_{A/C}$、$\varphi_{A/D}$,其对应的垂直基线分别为$B_{A/B}$、$B_{A/C}$、$B_{A/D}$。由于HT-1系统具有极短的时间基线,可以认为3幅干涉图间地表未发生形变,同一位置像元s在3幅干涉图中对应的相同地表高程$h_{A/B}(s)=h_{A/C}(s)=h_{A/D}(s)$。依据式(7)可得,不同基线条件下的相邻像对$(s,s-1)$干涉相位满足如下关系:

$$\begin{cases}\dfrac{\varphi_{A/B}(s)+k_{A/B}(s)\cdot2\pi}{B_{A/B}}=\dfrac{\varphi_{A/C}(s)+k_{A/C}(s)\cdot2\pi}{B_{A/C}}\\ \dfrac{\varphi_{A/B}(s)+k_{A/B}(s)\cdot2\pi}{B_{A/B}}=\dfrac{\varphi_{A/D}(s)+k_{A/D}(s)\cdot2\pi}{B_{A/D}}\\ \dfrac{\varphi_{A/C}(s)+k_{A/C}(s)\cdot2\pi}{B_{A/C}}=\dfrac{\varphi_{A/D}(s)+k_{A/D}(s)\cdot2\pi}{B_{A/D}}\end{cases} \tag{11}$$

相邻像元$(s,s-1)$相减并展开可得:

$$\begin{cases}B_{A/C}\cdot\left(\Delta\varphi_{A/B}(s,s-1)+2\pi\cdot\Delta k_{A/B}(s,s-1)\right)=B_{A/B}\cdot\left(\Delta\varphi_{A/C}(s,s-1)+2\pi\cdot\Delta k_{A/C}(s,s-1)\right)\\ B_{A/D}\cdot\left(\Delta\varphi_{A/B}(s,s-1)+2\pi\cdot\Delta k_{A/B}(s,s-1)\right)=B_{A/B}\cdot\left(\Delta\varphi_{A/D}(s,s-1)+2\pi\cdot\Delta k_{A/D}(s,s-1)\right),\\ B_{A/C}\cdot\left(\Delta\varphi_{A/D}(s,s-1)+2\pi\cdot\Delta k_{A/D}(s,s-1)\right)=B_{A/D}\cdot\left(\Delta\varphi_{A/C}(s,s-1)+2\pi\cdot\Delta k_{A/C}(s,s-1)\right)\end{cases}$$

$$\text{s.t. }\begin{cases}\Delta k_i(s,s-1)=k_i(s)-k_i(s-1)\\ \Delta\varphi_i(s,s-1)=\varphi_i(s)-\varphi_i(s-1)\end{cases}, i\in\{A/B,A/C,A/D\} \tag{12}$$

式中,$\Delta k(s,s-1)$表示像元s的绝对相位模糊数梯度。与单基线解缠模型$\Delta k(s,s-1)=\pm 1 \text{ or } 0$的假设不同,式(12)允许$\Delta k(s,s-1)\in\mathbf{Z}$,并通过最优化下式求解:

$$\begin{aligned}&\arg\min\left|R\left(\Delta_i(s,s-1),\Delta_j(s,s-1)\right)\right|,\\&\text{s.t. } R\left(\Delta_i(s,s-1),\Delta_j(s,s-1)\right)=B_j\cdot\left(\Delta\varphi_i(s,s-1)+2\pi\cdot\Delta k_i(s,s-1)\right)-\\&\qquad B_i\cdot\left(\Delta\varphi_j(s,s-1)+2\pi\cdot\Delta k_j(s,s-1)\right),i,j\in\{\text{A/B},\text{A/C},\text{A/D}\},i\neq j\end{aligned}\tag{13}$$

式(13)通过暴力求解法进行优化,具体而言,通过外部DEM和非线性混合整数规划准则确定$\Delta k(s,s-1)$的搜索窗口$[\min_{i,j}(s),\max_{i,j}(s)]$。搜索窗口的尺寸满足如下条件[32]:

$$\begin{cases}\left(\max_i(s)-\min_i(s)+1\right)\leqslant\dfrac{B_l}{B_s}-1\\\text{s.t. } i,j\in\{\text{A/B},\text{A/C},\text{A/D}\},i\neq j\end{cases}\tag{14}$$

式中,$B_l=\max(|B_i|,|B_j|)$,$B_s=\min(|B_i|,|B_j|)$。在搜索窗口内,遍历所有相位模糊数梯度组合$\Delta k_i(s,s-1)$,将使得式(13)最小的组合作为模糊数梯度的最优解。

在第二阶段,使用式(10)所示的解缠模型求解相位模糊数。使用基于$L1$范数优化模型作为式(10)中的目标函数,即对于单张干涉图i,有:

$$\begin{cases}\min\limits_i\sum w_i(s,s-1)\cdot|t_i(s,s-1)|\\\text{s.t. } t(s,s-1)=k_i(s)-k_i(s-1)-\\\qquad\Delta k_i(s,s-1),k_i(s)\in\mathbf{Z}\end{cases}\tag{15}$$

式中,$w_i(s,s-1)$是权重系数,利用相干系数替代。引入变量$t_1'(s,s-1)$,将式(15)所表示的非线性最小化问题转换为如下的线性最小化问题:

$$\begin{cases}\min\limits_i\sum w_i(s,s-1)\cdot t_i'(s,s-1)\\\text{s.t. } -t_i'(s,s-1)\leqslant k_i(s)-k_i(s-1)-\\\Delta k_i(s,s-1)\leqslant t_i'(s,s-1),k_i(s)\in\mathbf{Z}\end{cases}\tag{16}$$

此时,式(16)表示的线性最小化问题可以通过最小费用流方法求解[33]。得到相位模糊数$k(s)$后,利用式(8)即可恢复绝对地形相位φ,进一步通过式(7)反演高程。与单基线方法相比,本方法避免了复杂地形中因相位连续性假设不成立而导致的解缠失败问题。

3 实验及分析

3.1 研究区域及实验数据

本文选取2023年12月中国河南某区域HT-1 SAR影像进行实验,数据覆盖范围如图5所示,成像参数见表2。该区域位于卫星轨道飞行方向左侧,最高海拔约为1 000 m,地势由北部山区和南部平原组成,地貌和地物特征较为复杂,山区地表覆盖以植被为主,水体主要是黄河支流,平原地区存在农田、低矮楼房等不同地物。这些特征为评估不同地形和地物条件下HT-1 DEM的质量提供了较理想的场景。图6展示了HT-1主辅卫星在实验区域的后向散射强度影像。

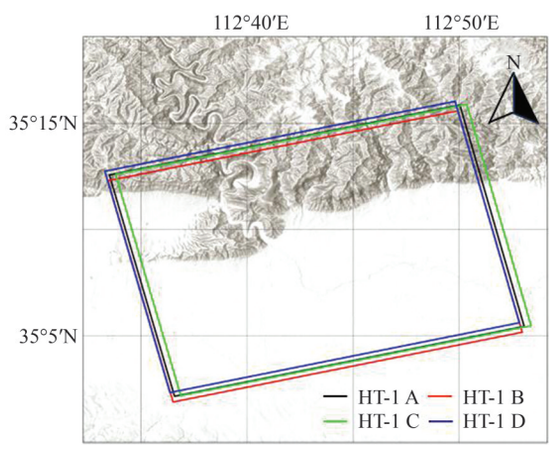


图5 本文研究区域及HT-1数据覆盖范围

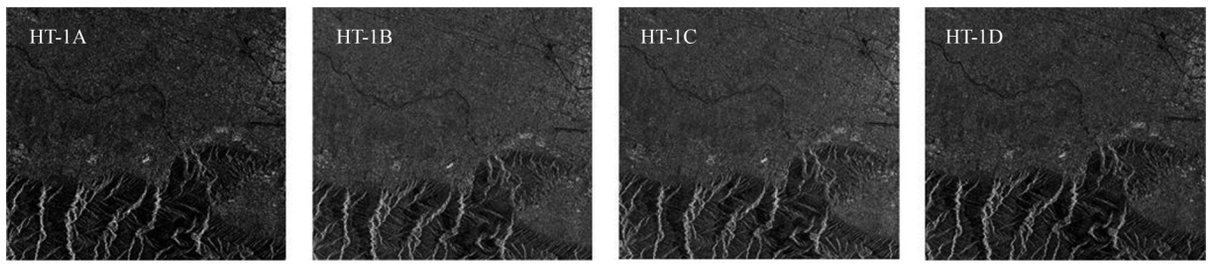
Fig. 5 The Study Area and HT-1 Data Coverage Area

经过配准和去平处理后得到的干涉图和对应的相干系数如图7所示。为了抑制噪声,干涉图进行了方位向和距离向5×5的多视处理(处理后空间分辨率约为5 m),并采用Goldstein滤波器

表2 实验使用的2023年12月HT-1 SAR影像数据参数

Table 2 Parameters of the HT-1 SAR Image Data Used in the Experiment in December 2023

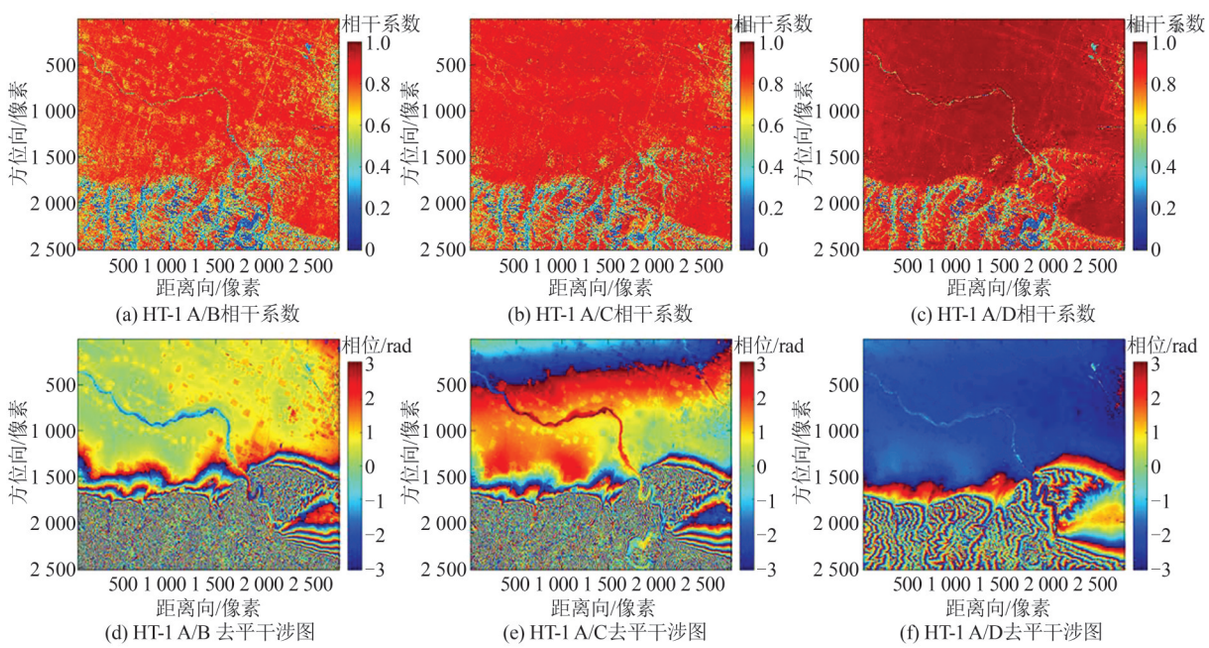
影像参数	成像时间	轨道编号	平均轨道高度/m	侧视方向	实际幅宽/m	斜距向像素间隔/m	方位向像素间隔/m	入射角/(°)	影像尺寸/像素
HT-1 A	2023-12-12	3 898	540 483.458	左	24 647.778 30	0.749 481	1.484 4	25.762 20	14 880×13 386
HT-1 B					24 647.889 72		1.484 5	25.762 15	
HT-1 C					24 647.918 93		1.484 3	25.762 12	
HT-1 D					24 647.797 63		1.484 5	25.762 25	



(a) HT-1 A　(b) HT-1 B　(c) HT-1 C　(d) HT-1 D

图 6　HT-1 强度影像

Fig. 6　HT-1 Intensity Image Data



(a) HT-1 A/B相干系数　(b) HT-1 A/C相干系数　(c) HT-1 A/D相干系数

(d) HT-1 A/B 去平干涉图　(e) HT-1 A/C去平干涉图　(f) HT-1 A/D去平干涉图

图 7　不同像对的相干系数和去平干涉相位

Fig. 7　Coherence Coefficients and Flattened Interferometric Phases of Different Image Pairs

进行降噪。从整体上看,去平干涉图大部分区域的条纹清晰且连续,干涉质量较好,干涉条纹分布和地形起伏呈现一致性。在水体和高山区域,干涉条纹出现少量破碎现象,噪声有所增加。表 3 列出了根据配准结果和轨道信息计算得到的主辅卫星基线参数和高程敏感度(即一个干涉条纹所表示的高程差)。可以看出,A/B、A/C、A/D 像对的垂直基线逐渐递减,其中 A/D 像对的干涉图质量优于 A/B、A/C 像对干涉图。HT-1 A/B 干涉相位对高程变化最为敏感,在地形高低起伏较大的区域,干涉条纹密集,相位解缠难度大。

表 3　HT-1 InSAR 干涉影像基线参数/m

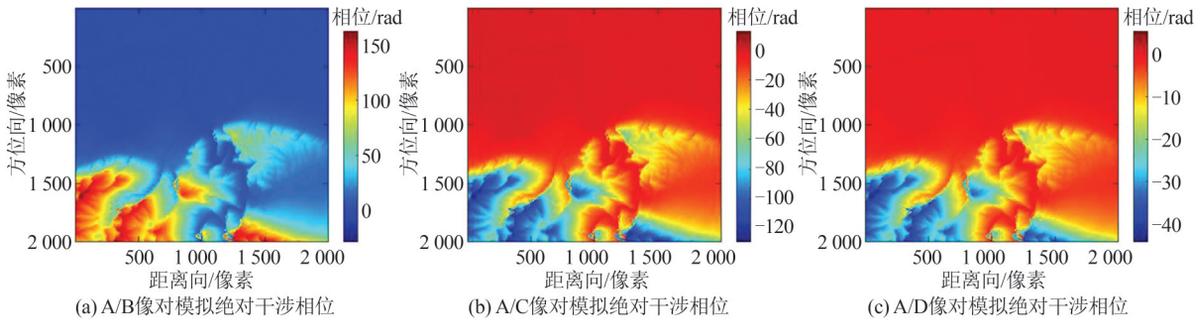
Table 3　HT-1 InSAR Interferometric Image Baseline Parameters/m

干涉像对	平行基线 $B_{/\!/}$	垂直基线 $B_{\perp}$	基线长度 B	高程模糊度
HT-1 A/B	194.120	−199.769	278.550	34.070
HT-1 A/C	−401.129	155.072	430.060	43.960
HT-1 A/D	210.067	57.261	217.732	119.010

3.2　HT-1 仿真数据解缠结果

将实验区域部分 90 m 分辨率的 SRTM DEM 数据作为真实地表高程信息,根据得到的 HT-1 卫星轨道参数模拟不同像对的干涉相位,如图 8 所示。采用本文提出的解缠模型和最小费用流方法,对缠绕处理后的仿真相位进行多基线(multi-baseline,MB)解缠和单基线(single-baseline,SB)解缠,解缠结果如图 9 所示。结果表明,误差主要分布在影像下部地形陡峭的山区,且 MB 方法的整体效果优于 SB 方法,SB 方法在红框标记处出现了明显的相位跳变。

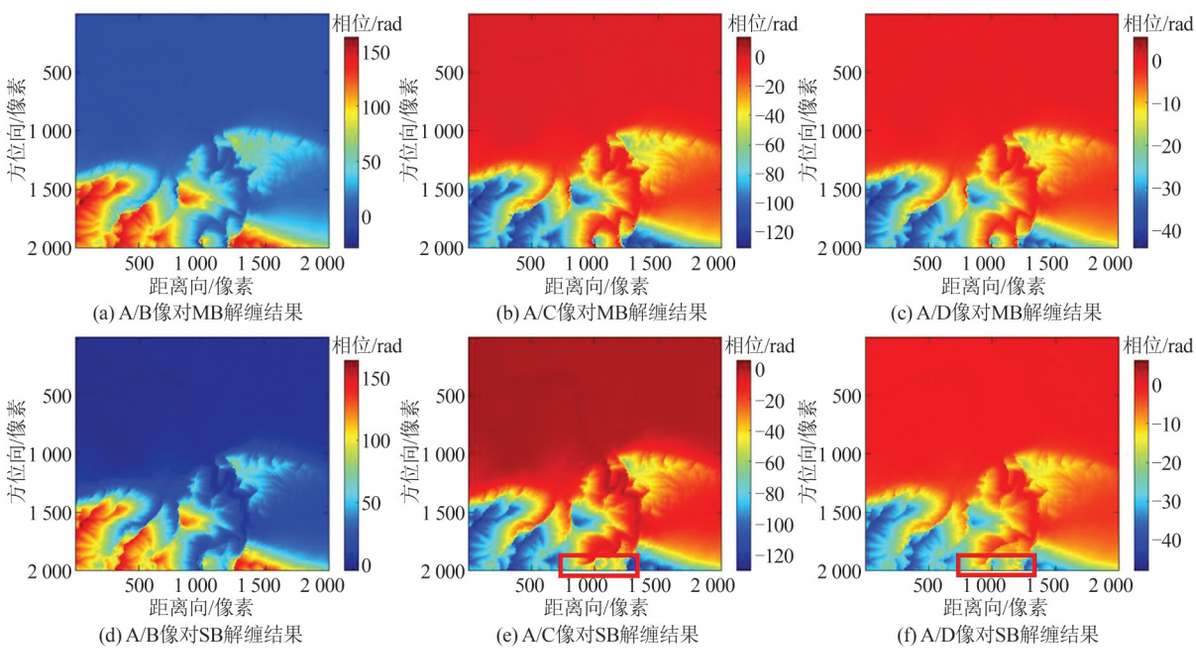
SB 和 MB 两种方法解缠结果与仿真数据的差值如图 10 所示,两种方法的误差极值相近,SB 方法的误差分布范围较大,MB 方法的误差主要集中在面向卫星的山坡区域,解缠结果混淆了山



(a) A/B像对模拟绝对干涉相位 (b) A/C像对模拟绝对干涉相位 (c) A/D像对模拟绝对干涉相位

图8 SRTM高程数据模拟干涉相位

Fig. 8 Simulate Interferometric Phase Based on SRTM Elevation Data



(a) A/B像对MB解缠结果 (b) A/C像对MB解缠结果 (c) A/D像对MB解缠结果

(d) A/B像对SB解缠结果 (e) A/C像对SB解缠结果 (f) A/D像对SB解缠结果

注:红框标出了SB解缠结果中明显的相位跳变区域。

图9 仿真数据解缠结果

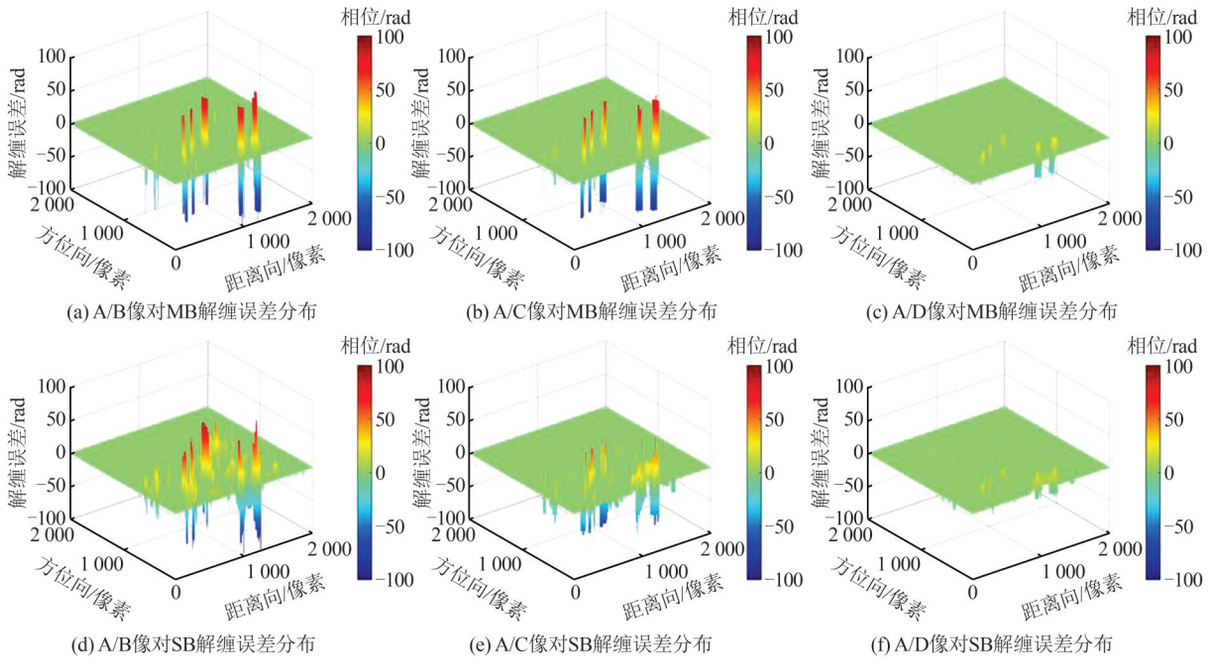
Fig. 9 Unwrapping Result of Simulation Data

顶和山底的地形相位。由于SAR是一种距离成像系统,当入射角较小时,斜坡高点回波信号会比底部回波信号更早接收,导致斜坡顶部和底部在影像上重叠,该现象被称为叠掩。如图11所示,根据轨道的入射角和SRTM DEM高程数据对实验区域叠掩现象进行了预测。可以看出,MB方法解缠误差分布和叠掩区域高度重合。在剔除叠掩区域后,解缠结果的均方根误差(root mean square error,RMSE)显著减少,各干涉像对MB方法的解缠结果RMSE均优于SB方法。结合高程模糊度,多基线测高结果精度优于2 m,具体数据见表4。实验结果表明,HT-1多基线InSAR系统相较于单基线InSAR系统,对地形陡峭区域反演DEM能力更强。

3.3 实验区域DEM生成结果

本文使用光学影像立体匹配和LiDAR方法获取的部分实验区域高程信息作为对照数据,以验证HT-1 DEM精度。如图12所示,光学影像选取了2022年1月的GF-7立体卫星影像,通过立体测图方法获取DEM,空间分辨率为4 m,理论高程精度优于1 m;LiDAR数据来源于ICESat-2获取的点云数据,高程精度小于0.1 m。为减少季节差异带来的地表变化,GF-7影像和ICESat-2数据的获取时间与HT-1 SAR成像时间相近。

基于单轨HT-1 SAR数据反演得到的DEM结果如图13所示,空间分辨率为5 m,能够清晰反映地表的起伏变化。需要说明的是,本文剔除了HT-1 DEM结果中因叠掩效应和大面积水域导致的误差区域,并利用周围像素高程和SRTM DEM数据对空洞进行了插值。通过GF-7影像立体匹配获取的DEM结果如图14所示,与HT-1 DEM重叠部分主要集中在地形起伏较大的山



(a) A/B像对MB解缠误差分布　(b) A/C像对MB解缠误差分布　(c) A/D像对MB解缠误差分布

(d) A/B像对SB解缠误差分布　(e) A/C像对SB解缠误差分布　(f) A/D像对SB解缠误差分布

图 10　仿真数据的解缠结果和真实数据差值

Fig. 10　Unwrapping Results of Simulation Data and the Difference with Real Data

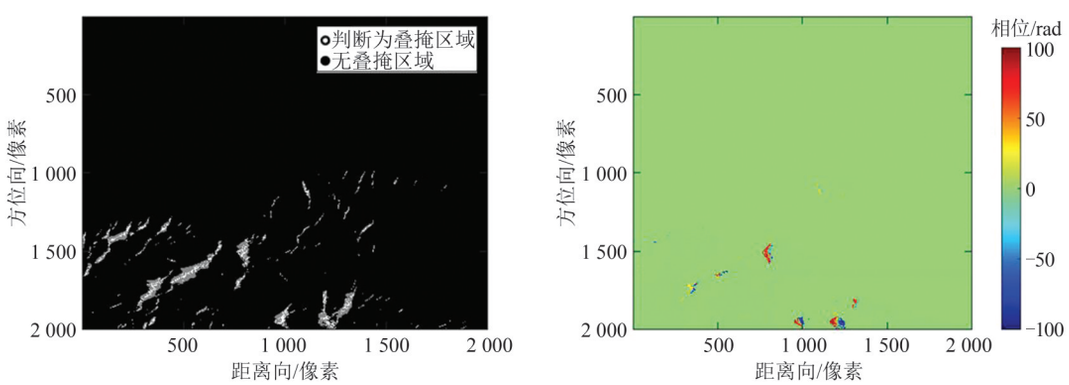


图 11　根据入射角预测的叠掩区域和 A/B 像对 MB 解缠结果误差分布

Fig. 11　Error Distribution of Overlapping Region Predicted Based on Incident Angle and MB Unwrapping Results of A/B Image Pair

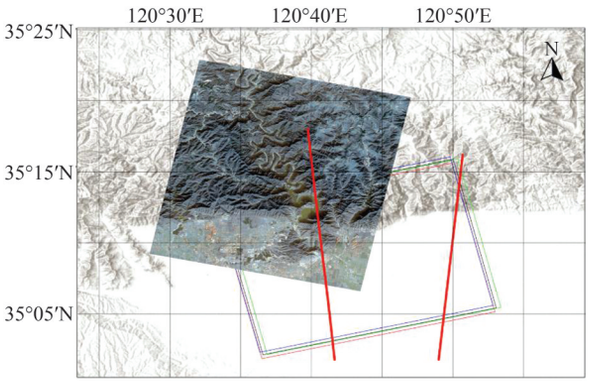
表 4　解缠结果 RMSE

Table 4　RMSE of Different Unwrapping Results

统计项	A/B 像对		A/C 像对		A/D 像对	
	SB 方法	MB 方法	SB 方法	MB 方法	SB 方法	MB 方法
未剔除叠掩 RMSE/rad	5.028 6	4.514 6	3.760 4	3.690 6	1.320 2	1.181 7
剔除叠掩 RMSE/rad	2.733 4	0.284 8	1.960 1	0.161 3	0.753 1	0.058 8
高程误差/m	14.821 6	1.521 8	13.713 7	1.128 5	14.264 5	1.113 7

区,最大高程落差超过 1 000 m。该区域的主要地物类型包括水体、林地以及少部分平原地区的低矮建筑和裸地。两种方法获取的高程结果的 RMSE 小于 14 m,相对于地形的起伏变化而言,总体误差较小。一方面,SAR 信号能够穿透植被冠层,而 GF-7 影像受到地物遮挡,无法准确获取林下地表高程,GF-7 DEM 整体高于 HT-1 DEM。另一方面,大面积的叠掩和水体区域虽然未参与精度验证,但在解缠过程中对应相位参与了相位模糊数梯度的计算,导致解缠结果存在误差。

HT-1 DEM 的高程剖面和 ICESat-2 激光测距数据的对比结果如图 15 所示。结果显示,HT-1 DEM 高程剖面与 ICESat-2 激光测距数据的高程变化趋势高度一致。在平坦地区和缓坡区域,二



注:左红线为ICESat-2升轨数据,右红线为ICESat-2降轨数据。

图12 GF-7光学影像数据和ICESat-2激光测高数据

Fig. 12 GF-7 Optical Image Data and ICESat-2 LiDAR Altimetry Data

者的高程误差范围控制在3 m以内,证明HT-1 DEM能够有效反映地形特征,并具有较高的高程反演精度。在陡峭坡面和山区,由于ICESat-2采样点的稀疏性及部分区域HT-1 DEM通过插值拟合获得,局部高程结果存在偏差。尽管如此,整体趋势仍保持一致。通过本次对比分析,验证了HT-1 DEM数据与ICESat-2激光测距数据之间的良好一致性,所提出的高程反演方法具备在实际应用中的可靠性。

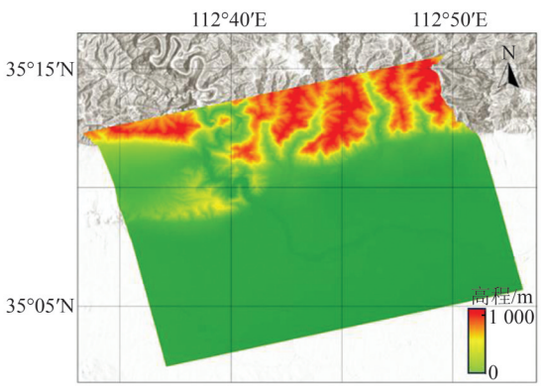
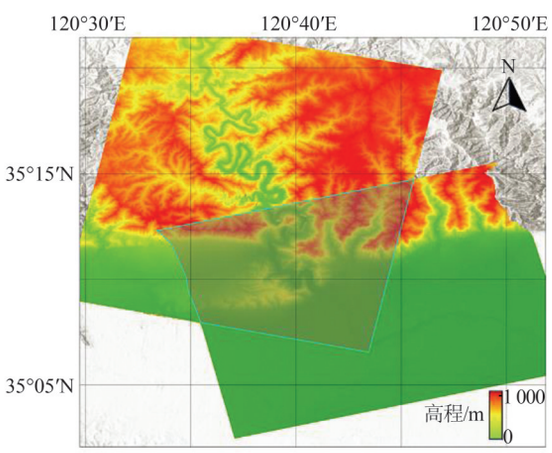
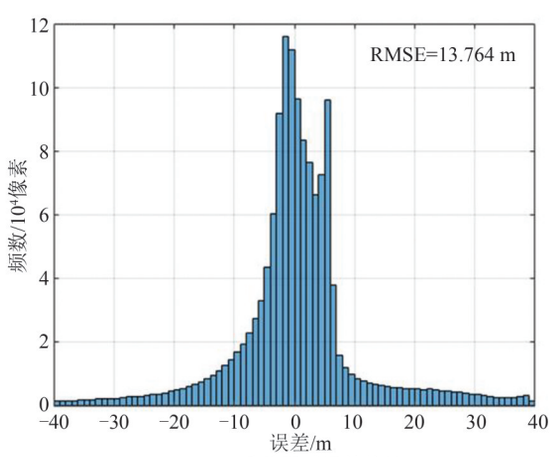


图13 实验区域HT-1 DEM反演结果

Fig. 13 HT-1 DEM Inversion Result for the Experimental Area



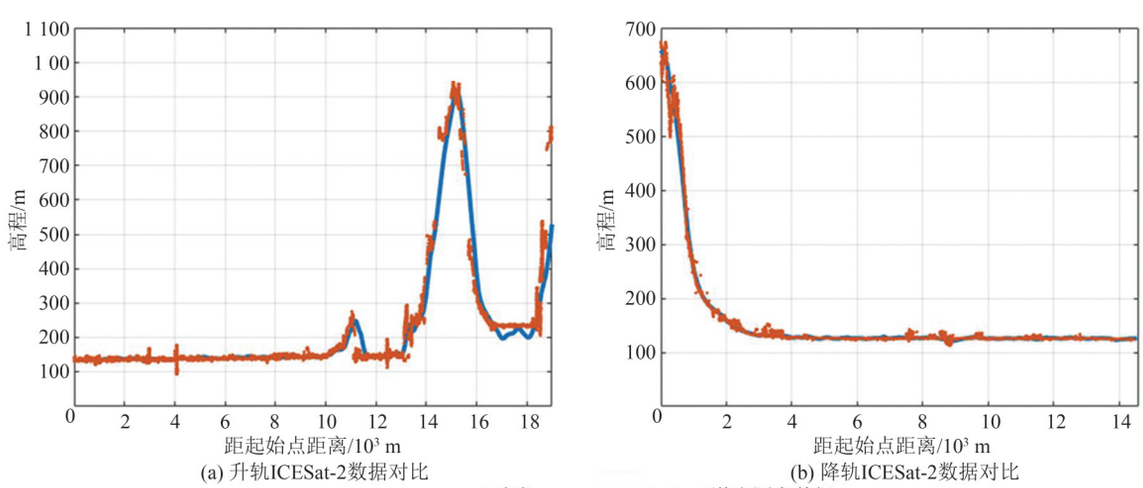
(a) GF-7 DEM和HT-1 DEM重叠区域



(b) 重叠区域误差统计

图14 HT-1 DEM和GF-7 DEM对比

Fig. 14 Comparison of HT-1 DEM and GF-7 DEM



(a) 升轨ICESat-2数据对比

(b) 降轨ICESat-2数据对比

图15 HT-1 DEM剖面与ICESat-2激光剖面高程对比

Fig. 15 Comparison of HT-1 DEM Profile and ICESat-2 LiDAR Data

4　结　语

本文针对HT-1分布式车轮编队SAR数据,设计并实现了从数据配准、多基线相位解缠到高程反演的完整数据处理流程,提出了一种分布式多基线星载SAR系统高精度地形高程反演的技术框架,并针对复杂地形环境的高程反演进行了实验。结论如下:

1)多基线方法对仿真干涉数据非叠掩区域的解缠RMSE分别为1.52 rad(A/B像对)、1.13 rad(A/C像对)、1.11 rad(A/D像对),高程反演精度优于2 m。在复杂陡峭场景下,HT-1多基线系统的测高能力优于传统的单基线InSAR系统。

2)利用单轨HT-1 SAR数据反演得到实验区域5 m分辨率的DEM,并选取了GF-7影像立体匹配生成的DEM和ICESat-2激光雷达点云数据作为对照高程信息。HT-1 DEM和GF-7 DEM重叠区域的高程RMSE小于14 m,高程剖面与ICESat-2激光测高数据的变化趋势高度一致。

实验表明,HT-1多基线干涉系统具有良好的测高性能,同时也验证了本文所提高程反演方法的有效性和可靠性,具有重要的理论意义及工程应用价值。需要指出的是,叠掩效应仍是制约单轨HT-1数据在陡峭地形区域实现高精度DEM重建的关键因素,后续工作将开展多轨道数据融合方法研究。

致谢:感谢航天宏图信息技术股份有限公司提供宏图一号卫星观测数据。

参考文献

[1] ANEES M T, ABDULLAH K, NAWAWI M N M, et al. Numerical Modeling Techniques for Flood Analysis [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, 124: 478-486.

[2] BALASUBRAMANIAN A. Digital Elevation Model (DEM) in GIS [D]. Mysore : University of Mysore, 2017.

[3] GILLINGS M, WHEATLEY D. GIS-Based Visibility Analysis [M]. London: Archaeological Spatial Analysis, 2020: 313-332.

[4] HOQUE M A, PHINN S, ROELFSEMA C, et al. Tropical Cyclone Disaster Management Using Remote Sensing and Spatial Analysis: A Review [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2017, 22: 345-354.

[5] THOMAS I A, JORDAN P, SHINE O, et al. Defining Optimal DEM Resolutions and Point Densities for Modelling Hydrologically Sensitive Areas in Agricultural Catchments Dominated by Microtopography[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 54: 38-52.

[6] ZHU X X, REN Z K, NIE S, et al. DEM Generation from GF-7 Satellite Stereo Imagery Assisted by Space-Borne LiDAR and Its Application to Active Tectonics[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(6): 1480.

[7] ZHANG W T, ZHU W, TIAN X D, et al. Improved DEM Reconstruction Method Based on Multibaseline InSAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 19: 4011505.

[8] VASSILAKI D I, STAMOS A A. TanDEM-X DEM: Comparative Performance Review Employing LiDAR Data and DSMS[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 160: 33-50.

[9] GONZÁLEZ C, BRÄUTIGAM B. Relative Height Accuracy Estimation Method for InSAR-Based DEMs[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(11): 5352-5360.

[10] LI F K, GOLDSTEIN R M. Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(1): 88-97.

[11] GABRIEL A K, GOLDSTEIN R M. Crossed Orbit Interferometry: Theory and Experimental Results from SIR-B [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, 9(5): 857-872.

[12] CROSETTO M. Calibration and Validation of SAR Interferometry for DEM Generation [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2002, 57(3): 213-227.

[13] 黄震,赵双明,常青. 国产高分三号卫星干涉测量试验[J]. 测绘地理信息,2021,46(4):7-11.
HUANG Zhen, ZHAO Shuangming, CHANG Qing. Interferometric Test Using Domestic GF-3 Satellite [J]. *Journal of Geomatics*, 2021, 46(4): 7-11.

[14] POTIN P, ROSICH B, MIRANDA N, et al. Sentinel-1 Mission Status[J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 100: 1297-1304.

[15] ROSENQVIST A, SHIMADA M, ITO N, et al. ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global-Scale Monitoring of the Environment [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3307-3316.

[16] YANG L P, MENG X M, ZHANG X Q. SRTM DEM and Its Application Advances[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(14): 3875-3896.

[17] ROSSI C, FRITZ T, EINEDER M, et al. Towards an Urban Dem Generation with Satellite SAR Interferometry[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, XXXIX-B7: 73-78.

[18] 向建冰,吕孝雷,付希凯,等. 天绘二号双星InSAR成像与DSM生成技术[J]. 测绘学报,2022,51(12):2493-2500.
XIANG Jianbing, LÜ Xiaolei, FU Xikai, et al. Bistatic InSAR Interferometry Imaging and DSM Generation for TH-2[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(12): 2493-2500.

[19] 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.

[20] RIZZOLI P, MARTONE M, GONZALEZ C, et al. Generation and Performance Assessment of the Global TanDEM-X Digital Elevation Model[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 132: 119-139.

[21] 蒋厚军,廖明生,张路,等. 高分辨率雷达卫星COSMO-SkyMed干涉测量生成DEM的实验研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2011,36(9):1055-1058.
JIANG Houjun, LIAO Mingsheng, ZHANG Lu, et al. High Resolution SAR Interferometric DEM Reconstruction with COSMO-SkyMed TanDEM Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(9): 1055-1058.

[22] 孙亚飞,江利明,柳林,等. TanDEM-X双站InSAR地形提取及精度评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2016,41(1):100-105.
SUN Yafei, JIANG Liming, LIU Lin, et al. Generating and Evaluating Digital Terrain Model with TanDEM-X Bistatic SAR Interferometry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 100-105.

[23] 王文昕,杨德芳,李龙,等. 类尺度不变特征变换的陆探一号卫星影像初配准算法:以积石山地震为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):377-390.
WANG Wenxin, YANG Defang, LI Long, et al. Image Initial Registration Algorithm for Lutan-1 Satellite Based on Scale-Invariant Feature Transform-Like Algorithm—A Case Study of the Jishishan Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(2): 377-390.

[24] MASSONNET D. Capabilities and Limitations of the Interferometric Cartwheel[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(3): 506-520.

[25] MOU J W, WANG Y, FU X K, et al. Initial Results of Geometric Calibration of Interferometric Cartwheel SAR HT-1[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece, 2024.

[26] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Multibaseline InSAR DEM Reconstruction: The Wavelet Approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(2): 705-715.

[27] YU H W, XING M D, YUAN Z H. Baseline Design for Multibaseline InSAR System: A Review[J]. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, 2021, 2(1): 17-24.

[28] LIU S J, TANG H C, FENG Y J, et al. A Comparative Study of DEM Reconstruction Using the Single-Baseline and Multibaseline InSAR Techniques[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 8512-8521.

[29] FATTAHI H, AMELUNG F. DEM Error Correction in InSAR Time Series[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(7): 4249-4259.

[30] 陈刚,钱方明,刘志铭,等. 天绘二号卫星双基成像几何模型改正算法[J]. 测绘学报,2022,51(12):2417-2424.
CHEN Gang, QIAN Fangming, LIU Zhiming, et al. Algorithm to Changing Bistatic Imaging Geometric Model for TH-2 Satellite[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(12): 2417-2424.

[31] YU H W, LAN Y. Robust Two-Dimensional Phase Unwrapping for Multibaseline SAR Interferograms: A Two-Stage Programming Approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(9): 5217-5225.

[32] YU H W, LEE H, CAO N, et al. Optimal Baseline Design for Multibaseline InSAR Phase Unwrapping[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(8): 5738-5750.

[33] CHEN C W, ZEBKER H A. Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms: Statistical Segmentation and Generalized Network Models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8): 1709-1719.