

引文格式: 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. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20210323.  
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. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20210323.

## 天绘二号双星 InSAR 成像与 DSM 生成技术

向建冰<sup>1,2,3</sup>, 吕孝雷<sup>1,2,3</sup>, 付希凯<sup>1,3</sup>, 薛飞扬<sup>1,2,3</sup>, 云 焱<sup>1,3</sup>, 叶 宇<sup>4</sup>, 何 可<sup>4</sup>

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100194; 2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049; 3. 中国科学院空天信息创新研究院空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190; 4. 中国资源卫星应用中心, 北京 100094

## Bistatic InSAR interferometry imaging and DSM generation for TH-2

XIANG Jianbing<sup>1,2,3</sup>, LÜ Xiaolei<sup>1,2,3</sup>, FU Xikai<sup>1,3</sup>, XUE Feiyang<sup>1,2,3</sup>, YUN Ye<sup>1,3</sup>, YE Yu<sup>4</sup>, HE Ke<sup>4</sup>

1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100194, China; 2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Technology in Geo-Spatial Information Processing and Application Systems, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China

**Abstract:** TH-2 is a bistatic synthetic aperture radar (SAR) satellite system in formation flight. Compared with traditional InSAR systems, it can eliminate decoherent sources such as time and atmosphere, besides, it can generate highly coherent SAR image pairs. This paper firstly describe the extended chirp scaling (ECS) imaging algorithm based on the hyperbolic equivalent method, and also introduces pre-filtering to deal with problems such as reduced coherence and interference phase errors caused by mixed baselines. Secondly, it introduces the interference processing method and the technical process of DSM reconstruction in the bistatic mode. Finally, an interference imaging experiment is performed using the original echo data of a certain mountainous experimental area, and the 3D reconstruction experiment is performed by using the generated SAR image pair, which analyzes the coherence of the image, the phase unwrapping results and the DSM reconstruction results. The experimental results verify that the interference imaging algorithm in this paper has good focusing effect and phase preservation capacity. At the same time, the interferometry and 3D reconstruction capabilities of the data are verified as well.

**Key words:** SAR interferometric imaging; InSAR process; DSM generation

**Foundation support:** Spaceborne Bistatic SAR Data Processing Program (No. E0H2080702)

**摘 要:** 天绘二号是编队飞行的双卫星合成孔径雷达系统, 相比于传统 InSAR 系统, 它能够消除时间和大气等去相干源, 产生高相干性的 SAR 图像对。本文首先阐述了基于双曲等效的双星干涉扩展线性调频变标(extended chirp scaling, ECS) 成像处理算法, 并引入预滤波处理混合基线带来的相干性降低和干涉相位误差等问题。然后介绍了双星模式下干涉处理方法和三维重建的技术流程。最后用天绘二号某试验场山地区域的原始回波数据进行了干涉成像试验, 并用生成的 SAR 图像对进行三维重建, 分析了图像的相干性, 相位解缠结果与 DSM 重建结果。试验结果验证了本文的干涉成像算法具有良好聚焦性和保相性, 同时验证了数据的干涉测量和三维重建能力。

**关键词:** 合成孔径雷达干涉成像; 干涉处理; DSM 生成

**中图分类号:** TN958 : P236

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1595(2022)12-2493-08

**基金项目:** 星载双基 SAR 数据处理项目(E0H2080702)

器,它不受天气条件限制,能够穿透雨雪雾,全天候、全天时获取数据,成为了高分辨率对地观测和全球资源管理不可或缺的手段之一,已广泛用于测绘、监测和水文学等领域<sup>[1]</sup>。星载合成孔径雷达干涉技术(InSAR)是对星载 SAR 图像进行干涉处理的一种技术,它可以生成数字地表模型图(DSM)、监测地形形变和实现三维重建,是全球大范围地形测绘最有效的观测技术之一。目前世界上能够用于 InSAR 处理的卫星主要有加拿大的 RADARSAT 系列,意大利的 COSMO-SkyMed 以及德国的 TerraSAR-X/TanDEM-X 系统<sup>[2]</sup>。文献[3—4]分别用 ERS-1/2 数据, TanDEM-X 系统的数据利用 InSAR 技术实现了地形提取。而目前国产的 SAR 影像主要来源于高分三号,但高分三号重访周期长且轨道误差较大,时间去相干和大气去相干严重<sup>[5-6]</sup>,大部分的高分数据不满足干涉测量条件,国内对于 InSAR 数据需求迫切。天绘二号是国内首个编队飞行的 X 波段合成孔径雷达卫星,相比于传统 InSAR 系统,编队飞行能够克服时间去相干和大气去相干等相干源,获得高精度的干涉对,对于提升我国遥感观测能力具有重大意义<sup>[7]</sup>。

卫星编队是指卫星在非常接近的轨道面上协同飞行,通过调整卫星飞行轨道的偏心率、近地点角和升交点赤经等,可以使双星具有 3 种灵活工作模式<sup>[8]</sup>,分别为跟飞模式、双站模式和双站交替模式,其中双站模式是其中一颗卫星作为脉冲发射卫星,两颗卫星同时接收回波信号,即一发双收模式。与传统重轨干涉相比,双站模式具有 0 s 基线的独特优势,能够消除时间去相干源和大气去相干源<sup>[9]</sup>,极大提高了有效干涉数据的质量和数量。

在双星 SAR 中,目标的距离历程与收发卫星均有关,其距离历程表现为双根式,使得无法准确解析驻定相位点,难用表达式表示回波信号的频域形式,而经典成像算法(如  $\omega$ - $k$  算法、CS 算法、RD 算法)的导出均基于回波信号的二维频域表达式。近年来,很多学者对于双站模式下的成像算法做了相关研究,文献[10]提出了适用于任何构型双基 SAR 的时域成像方法,这种方法可以产生最佳的图像质量但同时带来了巨大的计算复杂性。与时域成像方法相比,频域成像算法能极大地提高处理效率,其中求解点目标的二维频谱是算法推导中重要的一步。文献[11—13]将平行构型的双基 SAR 斜距历程等效成单基 SAR 的形

式,进而可以运用传统的单基 SAR 成像方法,例如 Range-Doppler(RD)算法处理双基数据。文献[14]提出 Loffeld's bistatic formula (LBF)方法对收发相位历程在各自驻相点处二阶泰勒展开,得到任意构形下双基 SAR 点目标的二维近似频谱。文献[15—16]基于 LBF 方法并利用二维逆变标傅里叶变换(inverse scaled fast Fourier transform,ISFT)和 chirp scaling (CS)算法聚焦双基数据。此外,文献[17]采用级数反演法(method of series reversion,MSR)来求解任意构形双基地 SAR 点目标的二维频谱。其中单站等效法可近似解析双星 SAR 二维频谱,同时后续处理可沿用传统单基成像算法,具有高效便利的优势,适合实际工程中双星 SAR 条带模式成像。

本文针对天绘二号干涉成像处理及三维重建进行了研究和试验,首先介绍了基于双曲等效的双星干涉成像扩展线性调频变标(extended chirp scaling,ECS)算法,并引入预滤波处理混合基线带来的图像间相干性降低和干涉相位误差等问题。然后阐述了干涉处理方法,设计了用 InSAR 技术重建 DSM 的技术流程。最后用天绘二号原始数据进行了干涉成像试验和干涉处理,并对成像结果和干涉处理结果进行了分析,验证了成像算法的聚焦性和保相性,以及干涉处理和三维重建的能力。

## 1 双星 InSAR 干涉成像

天绘二号 SAR 工作模式为条带模式,这种模式可以覆盖较大的幅宽,有利于完成大范围测绘任务<sup>[9]</sup>。双站模式下的天绘二号的轨道构型与 TanDEM-X/TerraSAR-X 系统类似<sup>[7]</sup>,近似为一个螺旋式轨道,在一次成像时间内,两颗卫星可看作平移不变构型,即两颗卫星速度一致且基线保持不变。在双星成像算法中,双曲等效算法将单站等效算法扩展到了斜视情况并适用于平移不变构型<sup>[13]</sup>,可以便利地求解平移不变构型下双基 SAR 点目标的二维近似频谱。因此笔者将双曲等效法和 ECS 成像算法结合起来处理双星 SAR 数据。主辅星相对于目标的斜距历程可以表示为

$$\left. \begin{aligned} R_T(t) &= \sqrt{R_{T,c}^2 + V_T^2(t-t_c)^2 - 2R_{T,c}V_T \cos \varphi_{T,c}(t-t_c)} \\ R_R(t) &= \sqrt{R_{R,c}^2 + V_R^2(t-t_c)^2 - 2R_{R,c}V_R \cos \varphi_{R,c}(t-t_c)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $R_T(t)$  和  $R_R(t)$  分别表示主星和辅星相对目标的斜距历程;  $t_c$  为场景中心时刻;  $t$  为方位向时间;  $R_m$ 、 $V_m$ 、 $\varphi_m$  分别表示双曲等效后的斜距、速度和斜视角;  $R_{x,c}$ 、 $v_x$  和  $\varphi_{x,c}$  ( $x=T,R$ ) 分别表示主辅星相对于目标点的斜距、速度和斜视角。

$$v_m = \sqrt{\left(\frac{v_T \cos \varphi_{T,c} + v_R \cos \varphi_{R,c}}{2}\right)^2 + \left(\frac{v_T^2 \sin^2 \varphi_{T,c} + v_R^2 \sin^2 \varphi_{R,c}}{R_{T,c} + R_{R,c}}\right) R_m / 2} \quad (3)$$

$$\varphi_m = \arccos\left(\frac{v_T \cos \varphi_{T,c} + v_R \cos \varphi_{R,c}}{2v_m}\right) \quad (4)$$

将上述等效参数代入单站 ECS 成像算法中即可以实现辅星 ECS 聚焦成像,同时由于主星是自发自收,其成像方法可采用单星成像方法。

编队飞行的主辅星之间不可避免地存在沿航向基线和垂直航向基线,称之为混合基线。混合基线将引起主辅星回波数据间方位向多普勒谱偏移和距离波束谱偏移,导致主辅 SAR 图像间相干性降低和干涉相位误差等问题。

针对垂直航向基线引起的距离波束谱偏移导致的主辅图像间相干性降低和干涉相位误差问题,本文采用距离预滤波技术滤除不重叠的距离波束谱,即根据反射率谱移动量,截取公共的距离波数谱,再对具有公共距离波数谱的信号进行距离压缩处理。垂直航向基线导致距离波数谱偏移的解释如下:SAR 天线接收的回波数据可以看作是地面反射率谱与信号谱的卷积,其表达式如下

$$S_T(\omega) = R\left(\omega + \omega_0 \frac{\sin(\theta_1 - \beta)}{\sin(\theta - \beta)}\right) e^{-j(2\omega_0/c)RT,c} W(\omega) \quad (5)$$

$$S_R(\omega) = R\left(\omega + \omega_0 \frac{\sin(\theta_2 - \beta)}{\sin(\theta - \beta)}\right) e^{-j(2\omega_0/c)RR,c} W(\omega) \quad (6)$$

式中,  $R(\omega)$  为地面反射率的傅里叶变换;  $\omega_0$  为雷达中心频率;  $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为两颗卫星的下视角;  $\theta = (\theta_1 + \theta_2) / 2$ ;  $\beta$  为地面坡度;  $W(\omega)$  为 SAR 系统发射和接收的带通滤波器,其带宽为  $B$ 。不同下视角之间的地面反射率谱的偏移量为

$$\Delta f = \frac{f_0 \Delta \theta}{2 \tan(\theta - \beta)} \quad (7)$$

式中,  $\Delta \theta$  为视角差;  $f_0$  为雷达载频。不重叠谱段(非相干谱段)相当于重叠谱段(相干谱段)的噪声,从而降低了相干性。因此必须切除不重叠谱段同时保留重合谱段。

针对沿航向基线引起的多普勒谱偏移导致的主辅图像间相干性降低和干涉相位误差问题,本

等效参数的计算如式(2)~式(4)所示的双曲等效方法完全等效了双星斜距历程的常数、线性和二次项,同时也补偿了部分三次及以上项<sup>[13]</sup>

$$R_m = (R_{T,c} + R_{R,c}) / 2 \quad (2)$$

文采用方位预滤波技术滤除不重叠的方位多普勒谱。具体实现方法如下:根据主辅卫星回波数据的多普勒谱中心频率和多普勒带宽确定出重叠的多普勒谱,并滤除非重叠部分的多普勒谱。

假定  $f_{dc_1}$  和  $f_{dc_2}$  分别为主辅星回波的多普勒中心频率且  $f_{dc_1} \geq f_{dc_2}$ ,主辅星回波的多普勒带宽都为  $B_d$ ,则重合谱段为  $[f_{dc_1} - \frac{B_d}{2}, f_{dc_2} + \frac{B_d}{2}]$ ,如图 1 所示。然后,从主辅星回波数据中截取出谱段  $[f_{dc_1} - \frac{B_d}{2}, f_{dc_2} + \frac{B_d}{2}]$  内的公共多普勒谱。在干涉成像处理时只对此公共多普勒谱进行方位压缩处理,从而提高了主辅星 SAR 图像之间的相干性,降低了干涉相位误差。加入预滤波后的干涉成像算法技术流程如图 2 所示,主星数据可用传统单站 ECS 算法实现聚焦成像,辅星数据经过双曲等效后用 ECS 成像算法即可实现聚焦成像。

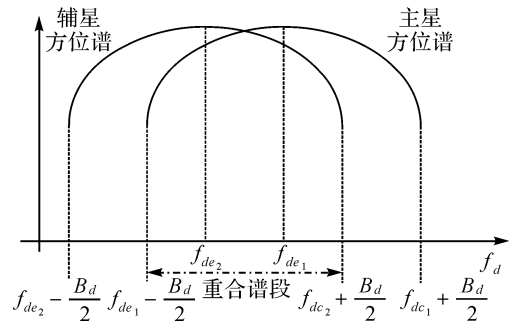


图 1 方位预滤波多普勒谱段

Fig.1 Diagram of azimuth pre-filtering Doppler spectrum

## 2 DSM 生成方法

InSAR 利用干涉相位信息,对同一区域的两幅 SAR 单视复图像进行干涉处理,生成 DSM 数据。InSAR 处理要求两幅 SAR 图像具有较好的相干性,数字地表模型图(DSM)为干涉处理结果之一<sup>[18-19]</sup>,它反映了图像区域的高度信息。双星模式下 InSAR 测量几何如图 3 所示,两卫星同时

照射同一区域,去除了时间去相干性和大气去相干等去相干源,产生的图像能对直接用于干涉处理。

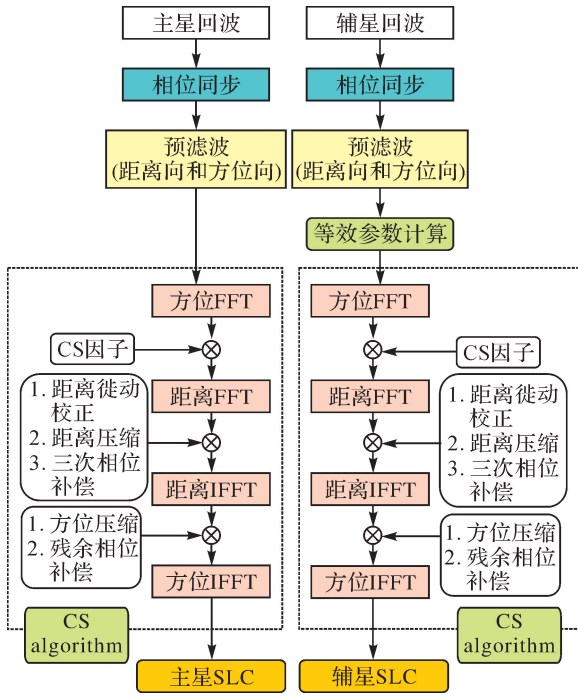


图2 干涉成像算法流程

Fig.2 The flowchart interferometry imaging algorithm

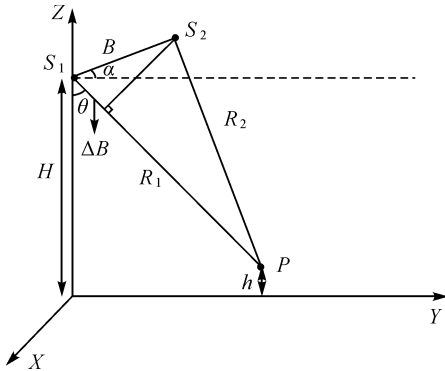


图3 InSAR 测量几何

Fig.3 The geometry of InSAR

图3中P点为A星、B星照射的同一目标点,P点的高程为h, $S_1$ 、 $S_2$ 分别表示A星和B星在照射P点时的位置, $R_1$ 、 $R_2$ 分别表示A星和B星到P点的斜距,B表示A星和B星之间的基线矢量, $\Delta B$ 表示平行基线, $\alpha$ 表示B与水平方向的夹角, $\theta$ 为A星照射点的下视角,根据图2所示的几何关系可以把P点的高程表示为

$$h = H - R_1 \cdot$$

$$\cos \left[ 90^\circ + \alpha - \arccos \left( -\frac{\Delta B}{B} + \frac{B}{2R_1} - \frac{\Delta B^2}{2R_1^2} \right) \right] \quad (8)$$

由于干涉测量需要同一地区的两幅相干性很高的SAR图像,同时干涉相位不能直接从复图像中得到,实现DSM生成需要通过复图像配准、干涉图生成、干涉相位滤波、相位解缠、基线估计及DSM重建等步骤。因此本文设计了如图4所示的干涉处理流程来完成DSM生成。

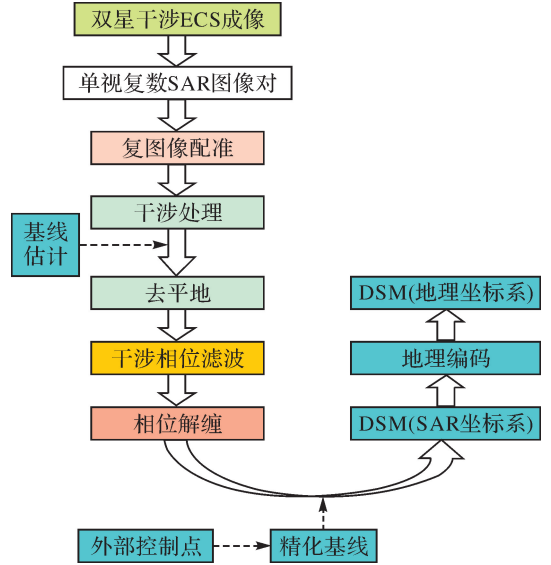


图4 DSM生成流程

Fig.4 The flowchart of DSM generation

复数图像配准是干涉处理第1步,包括两幅单视复图像之间的偏移值多项式计算和复影像重采样<sup>[20-22]</sup>,两幅影像配准精度要优于0.1像元,然后对配准好的复图像进行干涉处理,得到干涉条纹图。配准后干涉所形成的相位条纹密度一般较大,不利于后续相位滤波和解缠处理,通过基线估计计算条纹频率来去除平地相位得到去平地后的干涉条纹图。为了抑制干涉相位图中的噪声,提高相位解缠的效率和精度,本文采用自适应滤波对相位进行降噪处理<sup>[23-24]</sup>。在得到解缠相位图后,通过外部控制点精化基线重建DSM,其中基线是干涉处理中的一个重要参数,基线的长度和指向直接影响着图像的相干性、测高灵敏度等,它也是影响DSM重建的精度的重要误差源之一<sup>[25-27]</sup>,在干涉处理中先通过轨道法和快速傅里叶变换法估计基线来去除平地相位<sup>[28-30]</sup>,后续通过引入外部控制点精化基线。

其中基于轨道法的基线估计是从基线的空间几何关系出发,利用已知的卫星轨道状态矢量来获得基线分量的一类方法,得到的基线只能是真实基线的一个近似解。基于快速傅里叶变换法的

基线估计主要利用干涉图中蕴含的信息如干涉条纹、干涉相位差等来估算基线分量。在轨道信息不完整或者精度较差的情况下,采用基于快速傅里叶变换的基线估计方式可以很好克服这个影响。相位与基线的关系满足

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda}(B_{\parallel} \sin \theta - B_{\perp} \cos \theta) \quad (9)$$

代入卫星高度  $H = R_1 \cos \theta$  得

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \left( B_{\parallel} \frac{\sqrt{R_1^2 - H^2}}{R_1} - B_{\perp} \frac{H}{R_1} \right) \quad (10)$$

则有

$$\frac{d\phi}{dR_1} = -\frac{4\pi H}{\lambda R_1^2} \left( B_{\parallel} \frac{H}{\sqrt{R_1^2 - H^2}} + B_{\perp} \right) \quad (11)$$

令

$$\left. \begin{aligned} k &= \frac{d\phi}{dR_1} \\ f(r) &= -\frac{4\pi H}{\lambda r^2} \\ g(r) &= -\frac{H}{\sqrt{R_1^2 - H^2}} \end{aligned} \right\}$$

则有

$$\begin{bmatrix} f(r_{\min}) \cdot g(r_{\min}) & f(r_{\min}) \\ f(r_{\max}) \cdot g(r_{\max}) & f(r_{\max}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{\parallel} \\ B_{\perp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\min} \\ k_{\max} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中,  $r_{\min}$  和  $r_{\max}$  对应边缘像元的斜距;  $k_{\min}$  和  $k_{\max}$  分别是干涉条纹相对应的函数谱,可从如下解缠相位的傅里叶变换中得

$$\psi(k) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} e^{j(\phi(r) - kr)} dr$$

求解式(12)即可求得两个基线分量。此时求得的基线是真实基线的一个近似值,其精度足够支撑参考相位去除、相干性估计以及干涉图滤波,然而对于将解缠绕干涉相位转换至地面高程而言仍然不够精确。因此本文利用地面高精度控制点信息通过最小二乘拟合来进行基线精估计。

基线精估计是基于解缠相位、对应地面高度、基线之间的关系建立起来的方程,通过解这个方程可以求解出基线信息。对于地面点  $T_i$  的干涉相位观测值为

$$\phi_1 + \phi_c = -\frac{4\pi}{\lambda}(r_{si} - r_{mi})$$

式中,  $\phi_i$  为  $T_i$  的解缠相位;  $\phi_c$  为常数相位;  $r_{mi}$  和  $r_{si}$  分别为地面点  $T_i$  至主影像和辅影像的斜距。斜距关系为

$$r_{si}^2 = r_{mi}^2 + B^2 - 2(r_{mix} B_x + r_{miy} B_y)$$

式中,  $B_x$ 、 $B_y$ 、 $r_{mix}$  和  $r_{miy}$  分别为基线距  $r_{mi}$  的  $x$ 、 $y$

分量,则有

$$\left. \begin{aligned} r_{mix} &= r_{mi} \sin \theta_i \\ r_{miy} &= r_{mi} \cos \theta_i \\ \cos \theta_i &= \frac{r_{mi}^2 + H^2 - h_i^2 + 2r_g(H - h_i)}{2r_{mi}(H + r_g)} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

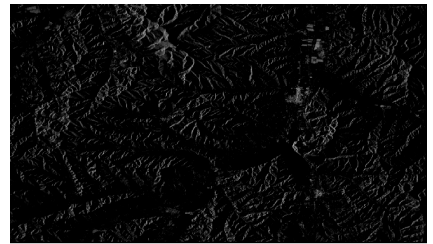
式中,  $\theta_i$  为地面点  $T_i$  的视角;  $H$  为雷达高度;  $h_i$  为地面点高度;  $r_g$  为地球半径。由于参数  $B_x$ 、 $B_y$ 、 $H$  和  $\phi_c$  的变化率很小且呈线性。当已知至少 7 个地面控制点时,可以解出未知参数  $B_{x_0}$ 、 $B_{x_1}$ 、 $B_{y_0}$ 、 $B_{y_1}$ 、 $H_0$ 、 $H_1$  和  $\phi_c$ 。地面外部控制点的精度对最终的结果有一定的影响,并且控制点的数量也会有一定的影响,通过合适地选择控制点,能够精确地算出基线信息,而且该基线结果还能消除由于初始基线不准确引起的 DSM 相对偏移和倾斜。

在生成 DSM 时,由于双星编队下辅星成像几何与主星自发自收的情况不同,需要结合干涉相位方程、斜距方程和多普勒方程求解三维定位,此处可采用双基等效相位中心法或联合主图像信息的等效相位中心法<sup>[31]</sup>。

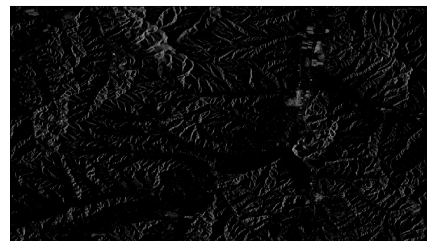
### 3 试验结果与分析

#### 3.1 成像试验

本文所选试验区为某试验场山地区域, A 星和 B 星工作模式为双站模式,其中 B 星为主星, A 星为辅星,两星均用同一波位观测。对原始回波解压缩后用基于双曲等效的双星干涉 ECS 成像算法处理,图 5 为该地区的成像结果。



(a) A 星(辅星)成像幅度

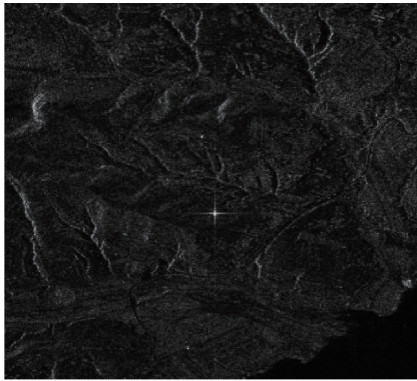


(b) B 星(主星)成像幅度

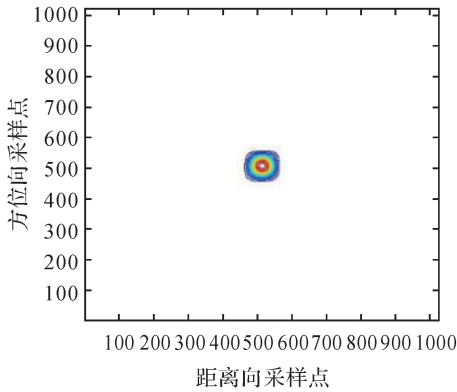
图 5 跟飞模式下双星成像幅度

Fig. 5 Amplitude figure of two satellites imaging in follow-flight mode

在 A 星成像幅度图的红色矩形框圈出的区域中找到一个角反射器,如图 6(a)所示,对它插值 128 倍,结果如图 6(b)所示,可见辅星聚焦质量很好。



(a) 红色框内区域



(b) 目标插值后

图 6 角反射器成像结果

Fig.6 Imaging result of corner reflector

### 3.2 干涉处理与 DSM 生成

选取 3.1 节中的双星模式下的复数 SAR 图像对进行干涉处理,干涉处理技术流程如图 4 所示。首先需要对复数 SAR 图像对进行裁剪和配准,配准后距离向配准精度为 0.051 像元,方位向为 0.02 像元,满足干涉处理要求。相干性是影响地形提取的重要因素,图 7 是截取区域配准后的相干性图,图中红色区域为相干系很好的区域,绿色和蓝色区域表示相干性较差区域,可以看出 SAR 图像对整体相干性非常好,双星模式下的双星 SAR 图像具有很好的相干性。

图 8 显示了干涉处理结果,其中图 8(a)是干涉条纹图,对其进行去平地处理,得到如图 8(b)所示的地形高程变化引起的相位变化。数据所对应的基线为 556.628 1 m。然后,用最小费用流法(MCF)对滤波后的去平地后相位进行相缠,得到如图 8(c)所示的解缠相位图。在求解三维定位后,采

用精化后的基线生成数字高程图,并转换到地图投影坐标系下得到图 9 中地理编码后的 RAWDSM。

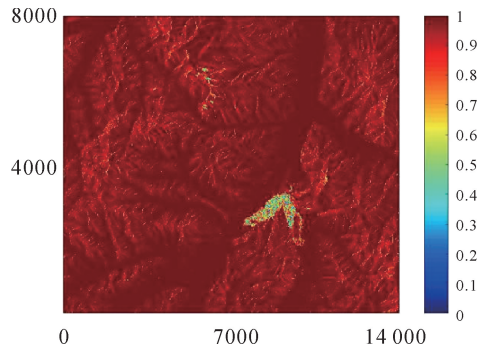
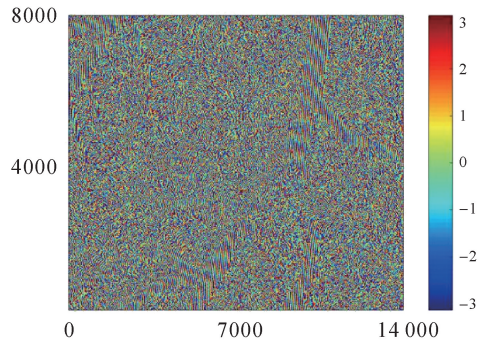
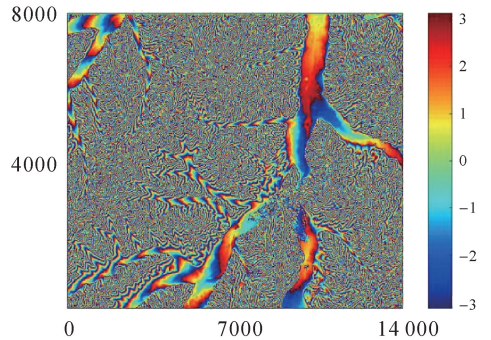


图 7 相干性示意

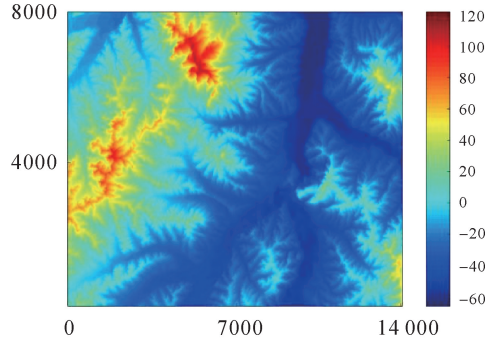
Fig.7 Coherence illustration



(a) 干涉条纹



(b) 去平地相位



(c) 解缠相位

图 8 干涉条纹与解缠相位

Fig.8 Interference fringes and unwrapped phase

图 9(a)为利用试验场山地区域 SAR 图像数

据进行干涉处理和 DSM 重建后得到的该地区的数字高程图,图 9(b)为同一地区的 SRTM DSM,可以看到,本文处理生成的 DEM 与 SRTM 的 DSM 相比,整体地形轮廓与变化趋势及细节几乎一致,验证了成像算法的保相性和数据的干涉测量以及三维重建能力。

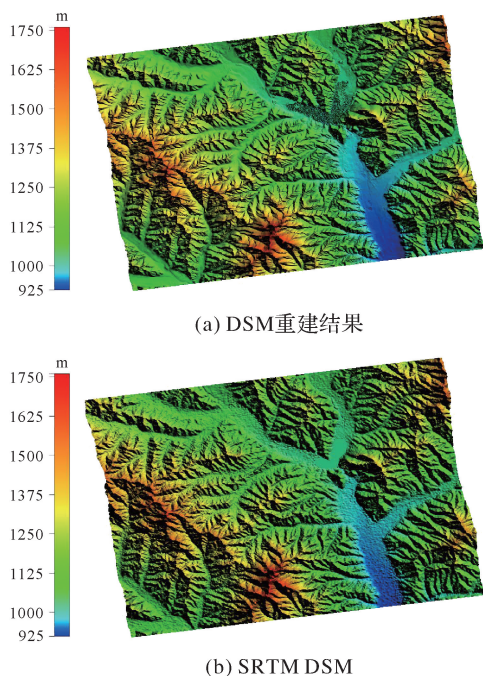


图 9 数字地表模型图(DSM)

Fig.9 Digital surface model (DSM)

## 4 总 结

本文对双星模式下的 InSAR 干涉成像和三维重建进行了研究和试验。首先介绍了基于双曲等效的双星干涉 ECS 成像算法,然后阐述了 DSM 重建原理与技术流程。本文选取了天绘二号双星模式下的某试验场附近区域数据进行了成像试验和 DSM 重建试验,成像试验结果验证了干涉成像算法的良好聚焦性,配准后的数据的相干性图反映了双星模式下的天绘二号数据的高相干性,最后干涉处理与 DSM 重建结果验证了干涉成像算法的保相性和天绘二号的良好 InSAR 能力。

## 参考文献:

[1] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 162-167.  
WEI Zhongquan. Synthetic aperture radar satellite[M]. Beijing: Science Press, 2001: 162-167.

[2] 陈筠力, 李威. 国外 SAR 卫星最新进展与趋势展望[J]. 上海航天, 2016, 33(6): 1-19.

CHEN Junli, LI Wei. Recent advances and trends of SAR satellites in foreign countries[J]. Aerospace Shanghai, 2016, 33(6): 1-19.

[3] LIU Lin, JIANG Liming, WANG Hansheng. Extraction of glacier surface elevation and velocity in high Asia with ERS-1/2 Tandem SAR data: application to Puruogangri ice field, Tibetan Plateau[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, Germany: IEEE, 2012: 4442-4445.

[4] 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.

[5] 余博, 李如仁, 陈振伟, 等. 基于高分三号数据的干涉测量研究[J]. 测绘工程, 2019, 28(4): 19-23, 28.  
YU Bo, LI Ruren, CHEN Zhenwei, et al. Experimental research on interferometry based on GF-3 SAR data[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2019, 28(4): 19-23, 28.

[6] LU H, SUO Z, LI Z, et al. InSAR baseline estimation for Gaofen-3 real-time DEM generation[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(7): E2152.

[7] 楼良盛, 刘志铭, 张昊, 等. 天绘二号卫星工程设计与实现[J]. 测绘学报, 2020, 49(10): 1252-1264. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20200175.  
LOU Liangsheng, LIU Zhiming, ZHANG Hao, et al. TH-2 satellite engineering design and implementation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(10): 1252-1264. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20200175.

[8] KRIEGER G, MOREIRA A, FIEDLER H, et al. TanDEM-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3317-3341.

[9] MARTONE M, BRÄUTIGAM B, RIZZOLI P, et al. Coherence evaluation of TanDEM-X interferometric data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 73: 21-29.

[10] YARMAN C E, YAZICI B, CHENEY M. Bistatic synthetic aperture radar imaging for arbitrary flight trajectories[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(1): 84-93.

[11] BAMLER R, BOERNER E. On the use of numerically computed transfer functions for processing of data from bistatic SARs and high squint orbital SARs[C]//Proceedings of 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Seoul, Korea; IEEE, 2005: 1051-1055.

[12] BAMLER R, MEYER F, LIEBHART W. Processing of bistatic SAR data from quasi-stationary configurations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3350-3358.

[13] QIU Xiaolan, HU Donghui, DING Chibiao. Focusing bistatic images use RDA based on hyperbolic approximating[C]//Pro-

- ceedings of 2006 CIE International Conference on Radar. Shanghai, China; IEEE, 2006: 1-4.
- [14] LOFFELD O, NIES H, PETERS V, et al. Models and useful relations for bistatic SAR processing[C]//Proceedings of 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS). Toulouse, France; IEEE, 2003: 1442-1445.
- [15] NATROSHVILI K, LOFFELD O, NIES H, et al. Focusing of general bistatic SAR configuration data with 2D inverse scaled FFT[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(10): 2718-2727.
- [16] WANG R, LOFFELD O, NIES H, et al. Chirp-scaling algorithm for bistatic SAR data in the constant-offset configuration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(3): 952-964.
- [17] NEO Y L, WONG F, CUMMING I G. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1): 93-96.
- [18] FERRAIUOLO G, MEGLIO F, PASCAZIO V, et al. DEM reconstruction accuracy in multichannel SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(1): 191-201.
- [19] 张勤, 黄观文, 杨成生. 地质灾害监测预警中的精密空间对地观测技术[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1300-1307. DOI:10.11947/j.AGCS.2017.20170453.  
ZHANG Qin, HUANG Guanwen, YANG Chengsheng. Precision space observation technique for geological hazard monitoring and early warning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1300-1307. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170453.
- [20] 张登荣, 俞乐. 一种高精度的干涉雷达复数影像配准方法[J]. 遥感学报, 2007, 11(4): 563-567.  
ZHANG Dengrong, YU Le. A high-precision co-registration method for InSAR image processing[J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(4): 563-567.
- [21] ABDELFAHATTAH R, NICOLAS J M. InSAR image co-registration using the Fourier-Mellin transform[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(13): 2865-2876.
- [22] 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. DOI:10.11947/j.AGCS.2017.20170350.  
ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717-1733. DOI:10.11947/j.AGCS.2017.20170350.
- [23] TROUVÉ E, CARAMMA M, MAÏTRE H. Fringe detection in noisy complex interferograms[J]. Applied Optics, 1996, 35(20): 3799-3806.
- [24] SHANKER A P, ZEBKER H. Edgelist phase unwrapping algorithm for time series InSAR analysis[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(3): 605-612.
- [25] 孙造宇, 梁甸农, 张永胜. 星载 InSAR 系统 DEM 重建及其误差分析[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1336-1340.  
SUN Zaoyu, LIANG Diannong, ZHANG Yongsheng. Method and error analysis of DEM reconstruction for spaceborne InSAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(6): 1336-1340.
- [26] LIAO Mingsheng, WANG Teng, LU Lijun, et al. Reconstruction of DEMs from ERS-1/2 tandem data in mountainous area facilitated by SRTM data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(7): 2325-2335.
- [27] TANG Xinming, LI Tao, GAO Xiaoming, et al. Research on key technologies of precise InSAR surveying and mapping applications using automatic SAR imaging [J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2019, 2(2): 27-37.
- [28] ZHAO Hongli, FAN Jinghui, GUO Xiaofang. A method for InSAR baseline refinement and its application[C]//Proceedings of 2010 IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing. Qingdao, China; 2010, IEEE: 161-164.
- [29] 徐华平, 朱玲凤, 刘向华, 等. 一种基于干涉条纹频率的星载 InSAR 基线估计新方法[J]. 电子学报, 2011, 39(9): 2212-2217.  
XU Huaping, ZHU Lingfeng, LIU Xianghua, et al. A novel baseline estimation approach of spaceborne InSAR based on interferometric fringe frequency[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(9): 2212-2217.
- [30] 朱建军, 杨泽发, 李志伟. InSAR 矿区地表三维形变监测与预计研究进展[J]. 测绘学报, 2019, 48(2): 135-144. DOI:10.11947/j.AGCS.2019.20180188.  
ZHU Jianjun, YANG Zefa, LI Zhiwei. Recent progress in retrieving and predicting mining-induced 3D displacements using InSAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(2): 135-144. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180188.
- [31] 刘艳阳, 李真芳, 杨娟娟, 等. 分布式卫星 InSAR 目标定位近似闭式解[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(4): 87-93.  
LIU Yanyang, LI Zhenfang, YANG Juanjuan, et al. Quasi-closed-form solution for distributed satellites InSAR geolocation[J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(4): 87-93.

(责任编辑:张艳玲)

收稿日期: 2021-06-08

修回日期: 2022-10-25

第一作者简介: 向建冰(1995—),男,博士生,研究方向为星载 SAR 成像, InSAR 处理, 雷达动目标检测。

First author: XIANG Jianbing(1995—), male, PhD candidate, majors in spaceborne SAR imaging, InSAR processing, radar maneuvering target detection.

E-mail: xiangjianbing17@mails.ucas.edu.cn

通信作者: 吕孝雷

Corresponding author: LÜ Xiaolei

E-mail: academism2017@sina.com