DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2020.02.013

韦立登[1]　李永杰[2,3]　孙中昶[2,4]　高建[5]

机载毫米波 InSAR 测绘困难地区地形测图实践

摘要

干涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar,InSAR)已成为获取高精度数字正射影像图(Digital Orthophoto Map,DOM)和数字表面模型(Digital Surface Model,DSM)的关键技术之一,其不受天气状况的影响,可以全天时、全天候进行数据获取.机载双天线毫米波 InSAR 不受失相关的影响,具有小体积、高分辨率、机动灵活等特点,可以实现大尺度、高精度成像.本研究利用机载双天线毫米波 InSAR 通过干涉批处理、区域网平差、地理编码、图像拼接镶嵌等步骤生成了贵州施秉试验区(丘陵、山地)和四川邛崃试验区(高山地)高精度的 DOM 与 DSM,并利用地面控制点(GCPs,Ground Control Points)进行了精度验证,验证结果表明获取的 DSM 精度符合 1∶5 000 地形图绘制要求,表明了机载双天线毫米波 InSAR 具备生成不同地形的 DOM/DSM 的能力,为解决困难地区 DOM/DSM 数据缺失问题提供了新的技术手段.

关键词

机载毫米波 InSAR;区域网平差;高精度;数字表面模型;数字正射影像图

中图分类号 P225.7
文献标志码 A

收稿日期 2019-10-21
资助项目 海南省重点研发计划项目(ZDYF2019008)

作者简介

韦立登,男,博士,研究员,主要研究方向为干涉合成孔径雷达成像处理技术、运动补偿技术、自动配准技术、干涉处理技术等.koridge@163.com

孙中昶(通信作者),男,博士,副研究员,主要研究方向为城市遥感、微波遥感等.sunzc@aircas.ac.cn

1 北京无线电测量研究所,北京,100854
2 中国科学院空天信息创新研究院/数字地球重点实验室,北京,100094
3 中国地质大学 土地科学技术学院,北京,100083
4 海南省地球观测重点实验室,三亚,572029
5 南京邮电大学 地理与生物信息学院,南京,210003

0 引言

InSAR 可以全天时、全天候快速获取大面积高精度的地表三维信息,已经成为获取高精度数字表面模型(Digital Surface Model,DSM)的重要技术手段[1].机载双天线毫米波 InSAR 不受失相关因素影响,具有体积小、分辨率高、实时获取、机动灵活等特点,并且其波长短、穿透性弱,更加有助于 DSM 的获取.

获取 DSM 的手段主要包括外业测绘、卫星遥感、航空摄影测量、激光雷达、干涉合成孔径雷达等技术.传统的外业测绘耗时耗力,并不合适获取大范围的 DSM;激光雷达虽然可以获取高精度的 DSM,但是其技术门槛较高;通过卫星遥感、摄影测量等手段获取我国西南地区 DSM 时,常常受云、雾、雨等天气状况的影响,获取数据的质量和精度会受到很大程度的影响,造成部分地区 DSM 数据缺失;而 InSAR 可以克服这些天气状况的影响,可以全天时、全天候、大范围进行数据获取,在对地观测领域起着举足轻重的作用[2].

星载 InSAR 虽然覆盖区域较广,但是其卫星轨道相对固定,不能随意改变研究区域,而机载双天线毫米波 InSAR 可以机动灵活地选取研究区域,不受失相关因素的影响,并且毫米波可用频带宽,应用较小口径天线即可获取更窄的天线波束以及更高的天线增益,可以实现距离向和方位向的高分辨率成像.另外,机载毫米波 InSAR 系统使用毫米波,波长较短,相较于其他 InSAR 系统,机载毫米波系统的天线和微波器件也会相应减小,更加有利于实现雷达系统小型化,可以实现在无人机飞行平台上应用.机载毫米波 InSAR 使用 Ka 波段的电磁波,相比 C、S、X、Ku 等波段其波长短,图像细节更加清晰,同时其波长更加接近可见光,其雷达图像的效果要优于其他 InSAR 图像[3].

在国外一些发达国家,机载 InSAR 地形测绘技术已经很成熟,并且可以提供业务化运行的服务和产品.1951 年,美国 Goodyear 宇航中心 Carl Wiley 最先提出 InSAR 技术,并在 1969 年首次将该技术应用到金星表面的测量[4];1986 年,Zebker 和 Goldstein 采用机载 InSAR 数据得到了高程精度为 2~10 m 的旧金山大桥地区的三维地形图,证明了机载 InSAR 获取高精度地形信息的能力[5];20 世纪 90 年代初,采用 STAR-3i 系统通过 Lear 36 飞机对巴拿马运河及周围区域实施测图任务,获取的 DSM 精度为 3 m,格网间距为 10 m,雷达影像分辨率为 2.5 m[6];1998 年,德国机载 InSAR 系统 AeS-1 对巴西北部区域和委

内瑞拉南部进行区域测图,获取原始雷达影像分辨率为 0.5 m,DSM 高程精度达到 0.5 m[7];2000 年,美国"奋进号"航天飞机在佛罗里达州发射升空,历时 13 d 获取了北纬 60°到南纬 58°全球性的 DSM,并且可以免费获取[8];2003 年,Intermap 公司进行了 NextMap 美国计划,获得的数据产品包括精度为 1 m,格网间距为 5 m 的 DSM,雷达正射影像分辨率为 1.25 m[9].我国机载 SAR 研制和星载 SAR 同时起步,目前已经可以生产多种型号的机载 SAR 系统,同时也进行了大量的试验.2004 年,中国科学院电子学研究所成功研制了 X 波段机载双天线 InSAR 系统,并进行试验,在地势平坦地区取得了较好的效果[10];2011 年,在国家"863"计划的支持下,中国科学院电子学研究所研制出我国第一个机载毫米波三基线 InSAR 原理样机,并于 2011 年 5 月在运 12 飞机上进行了试验[11];2013 年,中国航天科工集团第二研究院二十三所也研制出了机载毫米波 SAR 原理样机,并进行了大量飞行试验[12].

本研究利用机载双天线毫米波 InSAR 系统通过干涉处理、区域网平差、地理编码、图像拼接镶嵌等步骤,生成了贵州省施秉县和四川省邛崃市 2 个试验区的 DOM(Digital Orthophoto Map,数字正射影像图)和 DSM,试验区地形涉及丘陵、山地、高山区等,对解决丘陵、山区等困难地区 DSM 绘制提供参考.通过控制点验证,生成的 DSM 满足 1∶5 000 地形图绘制要求,表明了机载毫米波 InSAR 具备生成不同地形条件下大比例尺 DOM/DSM 的能力.

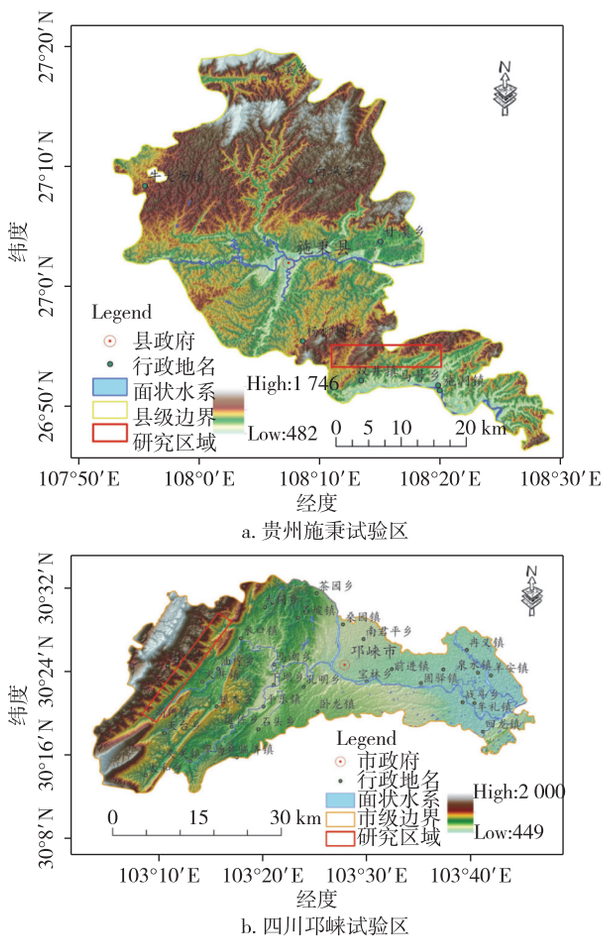
本研究提出:1)基于 GPU 并行处理技术,进行干涉批处理,同时利用最小平衡树的方法快速、精确地进行相位展开;2)基于 SIFT 算法全自动生成实验区内影像间的连接点,极大提高了效率和精度;3)通过敏感度分析,基于视向量正交分解算法构建三维重建模型,利用区域网平差方法对基线长度、基线倾角、相位偏移量 3 个参数进行了精确的定标.

1 试验区概况与载机参数

1.1 试验区概况

贵州施秉试验区(图 1a)坐落于贵州省东南部,位于黔东南州苗族侗族自治州西北部施秉县,经纬度范围为:108.184°~108.185°E,26.889°~26.919°N,试验区长 14.99 km,宽 3.35 km,海拔范围为 560~1 198 m.试验区地貌主要以高山和丘陵为主,同时也包含一些城镇、道路、农田、树林等地物,整体地势比较崎岖.

四川邛崃试验区(图 1b)坐落于四川省中部,位于邛崃市西部山区地带,经纬度范围为:103.140°~103.283°E,30.319°~30.493°N,试验区由西南至东北呈带状分布,长 21.27 km,宽 2.56 km,海拔范围为:603~1 344 m.实验区内主要以高山为主,同时也包含一些城镇和农田,整体地势非常崎岖,起伏非常明显.



a. 贵州施秉试验区

b. 四川邛崃试验区

图 1 试验区

Fig. 1 Test areas in Shibing of Guizhou (a) and Qionglai of Sichuan (b)

1.2 试验区数据

使用机载毫米波 InSAR 系统由西向东方向获取了贵州施秉试验区 3 个条带共 21 景机载数据,并且在试验区首末端布置了 26 个 GCPs(地面控制点)用于区域网平差与结果验证,其中 14 个用于区域网平差,12 个用于 DSM 和 DOM 结果验证.

使用机载毫米波 InSAR 系统由西南至东北方向获取了四川邛崃试验区 1 个条带共 13 景机载数据,

并且在试验区首末端布置了 25 个 GCPs,其中 12 个用于区域网平差,13 个用于 DSM 和 DOM 结果验证.

1.3 载机参数

采用机载双天线毫米波 InSAR 系统获取了 2 个试验区的机载数据,载机参数如表 1 所示.

表 1 载机参数

Table 1 Parameters of the platform

载机参数	贵州施秉实验区	四川邛崃试验区
波段	Ka	Ka
波长/m	0.008	0.008
频率/GHz	35	35
方位向行数	17 136	13 120
距离向列数	8 704	16 384
初始斜距/m	3 989	4 618
飞行航高/m	4 043.118	4 183.191
方位向分辨率/m	0.152	0.142
距离向分辨率/m	0.134	0.134

载机搭载高精度的航空定位测姿系统(POS AV610),完美地继承了全球导航卫星系统和惯性导航系统,POS AV610 在每秒钟内可以对航空传感器进行上百次的精确定位定向,能够精确地获取载机的三维坐标、姿态角、速度、加速度等实时载机信息,同时使用户在处理数据时无需地面参考信息,消除了繁琐耗时的航空摄影空三解算带来的麻烦,极大提高了数据获取的精度与效率.

2 地形三维重建原理

本研究基于视向量正交分解[13-14]进行了地形三维重建,将视向量从载机移动坐标系转换到地固坐标系,三维重建模型如图 2 所示.

图 2a 为 Madsen 引入建立的移动坐标系(Madsen Moving Coordinates,MMC),V 轴为平台速度矢量方向,W 轴为速度矢量与基线矢量的叉积,N 轴由 V 轴和 W 轴由右手法则共同决定,$\hat{\boldsymbol{v}},\hat{\boldsymbol{n}},\hat{\boldsymbol{w}}$ 分别为三轴的单位矢量.$\boldsymbol{b}$ 表示基线矢量,$\boldsymbol{b}_v$ 与 $\boldsymbol{b}_n$ 为 $\boldsymbol{b}$ 在顺轨和交轨方向的分量,$\boldsymbol{b}$ 与水平面的夹角为 θ_b,$\boldsymbol{b}_n$ 与水平面的夹角为 α.

移动坐标系中,单位视向量 $\hat{\boldsymbol{r}}$ 可由 $\hat{\boldsymbol{v}}$、$\hat{\boldsymbol{n}}$、$\hat{\boldsymbol{w}}$ 表示:

$$\hat{\boldsymbol{r}} = \mu\hat{\boldsymbol{v}} + \eta\hat{\boldsymbol{n}} + \xi\hat{\boldsymbol{w}}. \tag{1}$$

设 MMC 坐标系下单位视向量 $\hat{\boldsymbol{r}}$ 表示为

$$\hat{\boldsymbol{r}} = \begin{bmatrix}\mu\\ \eta\\ \xi\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\beta \\ \sin\theta_1 - \dfrac{b_v}{b_n}\sin\beta \\ -k_2\sqrt{\cos^2\beta - \left(\sin\theta_1 - \dfrac{b_v}{b_n}\sin\beta\right)^2} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

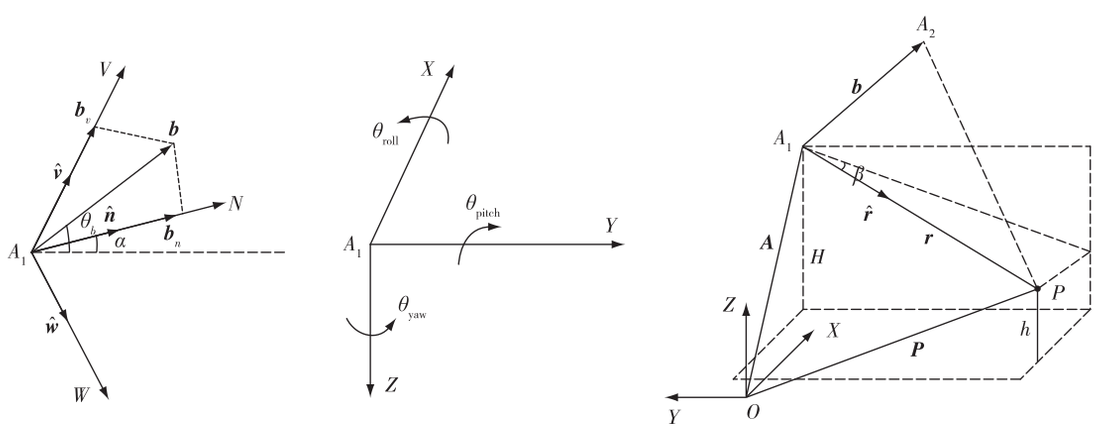
其中,β 为斜视角,表示为

$$\sin\beta = \lambda f/2v. \tag{3}$$

θ_1 定义为回波到达方向角:

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{b^2}{2rb_n} + k_1k_2\frac{\lambda\varphi}{2Q\pi b_n} - \frac{\lambda^2\varphi^2}{8Q^2\pi^2 rb_n}\right), \tag{4}$$

Q 为雷达工作模式,$Q=1$ 时为标准模式,$Q=2$ 时为乒乓模式;$k_1=1$ 时表示右侧视方式,$k_1=-1$ 时表示左侧视方式;$k_2=-1$ 时表示主天线位于左侧,$k_2=1$ 时表示主天线位于右侧.



a. 移动坐标系 b. 平台坐标系 c. 三维重建模型

图 2 机载 InSAR 三维重建模型

Fig. 2 Three-dimensional reconstruction model of airborne InSAR

图 2b 为平台坐标系,原点为载机 POS 相位中心,X 轴指向载机机头方向,Z 轴为过原点垂直向下方向,Y 轴垂直于 X 轴、Z 轴构成的平面,指向飞行方向右侧.载机在飞行过程中的姿态通过横滚角 θ_{roll}、俯仰角 θ_{pitch}、偏航角 θ_{yaw} 来表示.旋转矩阵表示为

$$\boldsymbol{R}_{\text{roll}}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\theta_{\text{roll}} & -\sin\theta_{\text{roll}}\\ 0 & \sin\theta_{\text{roll}} & \cos\theta_{\text{roll}}\end{bmatrix}, \tag{5}$$

$$\boldsymbol{R}_{\text{pitch}}=\begin{bmatrix}\cos\theta_{\text{pitch}} & 0 & -\sin\theta_{\text{pitch}}\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\theta_{\text{pitch}} & 0 & \cos\theta_{\text{pitch}}\end{bmatrix}, \tag{6}$$

$$\boldsymbol{R}_{\text{yaw}}=\begin{bmatrix}\cos\theta_{\text{yaw}} & -\sin\theta_{\text{yaw}} & 0\\ \sin\theta_{\text{yaw}} & \cos\theta_{\text{yaw}} & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}. \tag{7}$$

图 2c 为机载 InSAR 三维重建模型,A_1 和 A_2 分别表示载机主副天线相位中心的位置,H 为主天线相位中心的高度.$\boldsymbol{b}$ 表示基线矢量,由主天线指向副天线.P 为地物点,高程为 h,主天线相位中心到地物点 P 的矢量为 $\boldsymbol{r}_1$,矢量长度为 r,此方向上的单位矢量设为 $\hat{\boldsymbol{r}}$.O-XYZ 为航迹坐标系,X 轴指向理想航机方向,Z 轴指向正上方向,Y 轴垂直于 X、Z 轴构成的平面,并且指向左侧方向.$\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{P}$ 分别为 O 到主天线相位中心和地物点的矢量.由移动坐标系到 O-XYZ 坐标系的旋转矩阵为

$$\boldsymbol{\Gamma}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & k_2\cos\theta_{b_n} & k_1k_2\sin\theta_{b_n}\\ 0 & -k_1k_2\sin\theta_{b_n} & k_2\cos\theta_{b_n}\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & k_2\sqrt{1-\dfrac{b^2}{b_n^2}\sin^2\theta_b} & \dfrac{k_1k_2b}{b_n}\sin\theta_b\\ 0 & -\dfrac{k_1k_2b}{b_n}\sin\theta_b & k_2\sqrt{1-\dfrac{b^2}{b_n^2}\sin^2\theta_b}\end{bmatrix}. \tag{8}$$

由式(1)—(8)可得,矢量 $\boldsymbol{P}$ 表示为

$$\boldsymbol{P}=\boldsymbol{A}+\boldsymbol{r}=\boldsymbol{A}+r\boldsymbol{R}_{\text{yaw}}\boldsymbol{R}_{\text{pitch}}\boldsymbol{R}_{\text{roll}}\boldsymbol{\Gamma}\hat{\boldsymbol{r}}_{\text{vnw}}, \tag{9}$$

式(9)为理想航迹坐标系下地物点位置的三维表达.

在正侧视的条件下,雷达波束中心面即为零多普勒面,此时 $\beta=0$.假设主天线位于载机左侧,并且右侧视情况下,地形高程表示为

$$h=H-r(\cos\theta_p\cos(\alpha-\theta_r)\cos\theta_1+\cos\theta_p\sin(\alpha-\theta_r)\sin\theta_1), \tag{10}$$

其中,θ_1 为回波角,定义为

$$\theta_1=\sin^{-1}\left(\frac{b}{2r}-\frac{\lambda\phi}{2\pi b}-\frac{\lambda^2\phi^2}{8\pi^2rb}\right). \tag{11}$$

3 数据处理流程

根据机载 InSAR 获取的 SLC 数据,采用自主开发的机载 InSAR 数据处理软件 AirborneInSARMap,使用高性能的 GPU 并行技术,通过粗配准、精配准、干涉处理、相位滤波、相位解缠等干涉批处理步骤,批量、快速地获取测区内每景影像对应的解缠相位数据.基于尺度不变特征变换(Scale-Invariant Feature Transform,SIFT)算法,自动选取测区内影像间的连接点,建立影像之间的约束关系,使用最小二乘方法,通过区域网平差干涉定标方法来校正所有影像的干涉参数(基线长度、基线倾角、相位偏移量)、求解连接点的三维坐标、求解影像的三维坐标.由设置的 DOM/DSM 像元大小,通过 cubic convolution 三次卷积插值方法对求得的平面坐标以及高程值进行插值处理,生成每景影像对应的 DOM/DSM.通过拼接镶嵌对所有影像进行拼接处理后,根据国家标准比例尺进行影像输出.

利用机载 InSAR 生成 DSM 数据处理流程如图 3 所示.

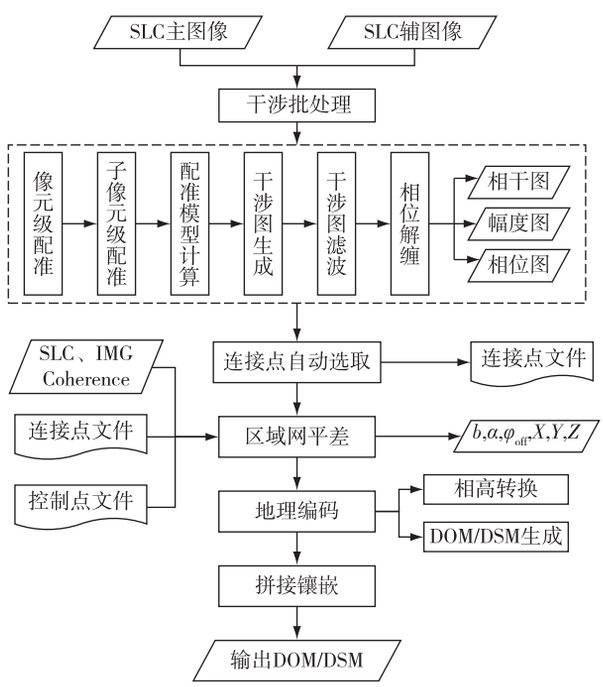


图 3 机载 InSAR 生成 DOM/DSM 数据处理流程

Fig. 3 Processing flow chart of DOM/DSM generated by airborne InSAR

3.1 干涉处理

干涉处理是生成 DSM 过程中的第一步,主要包括复图像配准、预滤波、干涉图生成、去平地效应、干涉图滤波、相位解缠等步骤,本研究在处理过程中省略了预滤波与去平地效应这两部分.

3.1.1 复图像配准与干涉图生成

在生成 DSM 的整个过程中,主、辅图像配准是最基础、最关键的一步,其核心思想在于确定两幅图像之间匹配位置的相对偏移量.SAR 影像配准不精确,将导致较大的干涉相位误差.配准精度达到 1/10 像素才对干涉条纹图的质量没有明显影响[15].常用匹配测度主要有 3 种:基于复数值的相似性测度、基于相位值的相似性测度和基于强度值的相似性测度[16].本研究利用基于 FFT 的复相关精确配准获取同名点的精确偏移量,对匹配数据进行多项式拟合后计算主辅图像对的坐标转换关系,最后对辅图像进行重采样完成配准[17].配准后将主图像的复数值与辅图像的复数值进行共轭相乘后得到干涉图.

3.1.2 干涉图滤波

由于 SAR 固有的斑点噪声、雷达系统热噪声、雷达阴影、配准误差等存在使得干涉图存在很多相位噪声,表现为相位不连续、周期性不明显、相位条纹图不明显,给后续解缠造成很大影响[18-19].常用的滤波方法包括空间域滤波、频率域滤波、时频分析滤波,本研究利用 Goldstein 滤波[20]对干涉相位进行滤波,选取相互重叠的相位块在频率域采用平滑滤波器处理后,采用滤波参数对其功率谱进行处理.

3.1.3 相位解缠

经干涉处理得到的干涉图相位为相位主值,其值域在[0,2π]或[-π,π].为了获取精确的地形高程信息,需要得到干涉图对应的绝对干涉相位值.相位解缠采用一定的数学方法或者计算方法对干涉图进行处理,得到各干涉相位之间相差的整周期数,从而获取连续变化的干涉相位的过程[21-22].本研究提出了一种基于最小平衡树(Minimum Balanced Trees, MBTs)的易于并行实现的快速、精确的解缠方法,利用高性能的 GPU 并行技术,构建最小平衡树/林和推算解缠优先顺序图进行相位解缠[22-23].

3.2 区域网平差

获取 DSM 过程中,从 POS 中得到的系统参数会存在误差,这些参数误差会通过相高转换、地理编码等步骤传递到 DSM 中,影响 DSM 的精度,所以需要对这些参数进行定标处理.传统的干涉参数定标方法基于 GCPs 对系统参数进行定标处理.假设对基线长度、基线倾角、相位偏移量进行定标,每景影像至少需要 3 个 GCPs,适合小范围并且易于布设控制点的区域.对于大范围、多条带或者不易布设控制点的区域(高山、丘陵、沼泽等),传统的干涉参数定标的方法就不适用了.

因此本研究基于视向量正交分解算法构建三维重建模型,利用少量控制点和影像间的连接点,建立影像之间的约束关系,进行区域网平差处理[24-26],校正干涉参数与连接点坐标.

3.2.1 连接点选取

基于 SIFT 算法[27-28]自动、快速选取测区内影像间的连接点.同一条带内,满足相干系数大于 0.9,误差小于 0.5 个像素的要求;条带间,满足误差小于 3 个像素,同时可以通过人工复检对误差大于 1 个像素的连接点进行剔除.

3.2.2 敏感度分析

由式(10)可得,影响 DSM 高程精度的系统参数有主天线相位中心高度 H、斜距 r、基线长度 b、基线倾角 α、绝对干涉相位 φ、横滚角 θ_{roll}、俯仰角 θ_{pitch} 等.设这些参数的误差分别为 $\mathrm{d}h,\mathrm{d}H,\mathrm{d}r,\mathrm{d}b,\mathrm{d}\alpha,\mathrm{d}\varphi,\mathrm{d}\theta_{\text{roll}},\mathrm{d}\theta_{\text{pitch}}$,假设系统参数之间相互不影响,由协方差传播定律可以得:

$$\sigma_h^2=\left(\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}H}\right)^2\sigma_H^2+\left(\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}r}\right)^2\sigma_r^2+\left(\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}b}\right)^2\sigma_b^2+\left(\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}\alpha}\right)^2\sigma_\alpha^2+\left(\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}\varphi}\right)^2\sigma_\varphi^2+\left(\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}\theta_{\text{roll}}}\right)^2\sigma_{\theta_{\text{roll}}}^2+\left(\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}\theta_{\text{pitch}}}\right)^2\sigma_{\text{pitch}}^2,\tag{12}$$

其中:

$$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}H}=1,\tag{13}$$

$$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}r}=-\cos\theta+l\left(\frac{\lambda^2\varphi^2}{8\pi^2rb^2}-\frac{b}{2r}\right),\tag{14}$$

$$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}b}=rl\left(\frac{1}{2r}+\frac{\lambda\varphi}{2\pi b^2}+\frac{\lambda^2\varphi^2}{8\pi^2rb^2}\right),\tag{15}$$

$$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}\alpha}=rl\sqrt{\cos^2\beta-\sin^2\theta_1},\tag{16}$$

$$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}\varphi}=rl\left(-\frac{\lambda}{2\pi b}-\frac{\lambda^2\varphi}{4\pi^2rb}\right),\tag{17}$$

$$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}\theta_{\text{roll}}}=-rl\sqrt{\cos^2\beta-\sin^2\theta_1},\tag{18}$$

$$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}\theta_{\text{pitch}}}=r[\sin\theta_{\text{pitch}}\cos(\alpha-\theta_{\text{roll}})\sqrt{\cos^2\beta-\sin^2\theta_1}-\sin\theta_{\text{pitch}}\sin(\alpha-\theta_{\text{roll}})\sin\theta_1],\tag{19}$$

其中系数 l 为

$$l = \cos\theta_{\text{pitch}}\left(\frac{\cos(\alpha-\theta_{\text{roll}})\sin\theta_1+\sin(\alpha-\theta_{\text{roll}})\cos\theta_1}{\cos\theta_1}\right). \tag{20}$$

为了分析各个参数与地面点高程之间的敏感度,设横滚角为 0.023°,俯仰角为 0.649°,偏航角为 2.254°,视角范围为 20°~70°,平台高度为4 043.116 m,地面点参考高程为 900 m,敏感度分析结果如图 4 所示.

如图 4 所示,随着视角的增加,基线长度、基线倾角、横滚角敏感度值为 10^3 级,远大于其他参数.由于载机搭载高精度的 POS AV610,可以精确地计算载机的相位中心高度 H、斜距 r.同时俯仰角误差对 DSM 高程影响很小,可以忽略不计.横滚角可以通过校正基线倾角以消除它对高程的影响.同时由于系统噪声影响,解缠相位与真实相位之间存在常数差,即相位偏移量,必须对其进行精确定标处理.因此需要对每个干涉像对的基线长度、基线倾角、相位偏移量进行区域网平差定标处理.

3.2.3 区域网平差

区域网平差流程如图 5 所示.

平差处理过程中认为地面控制点(角反射器)三

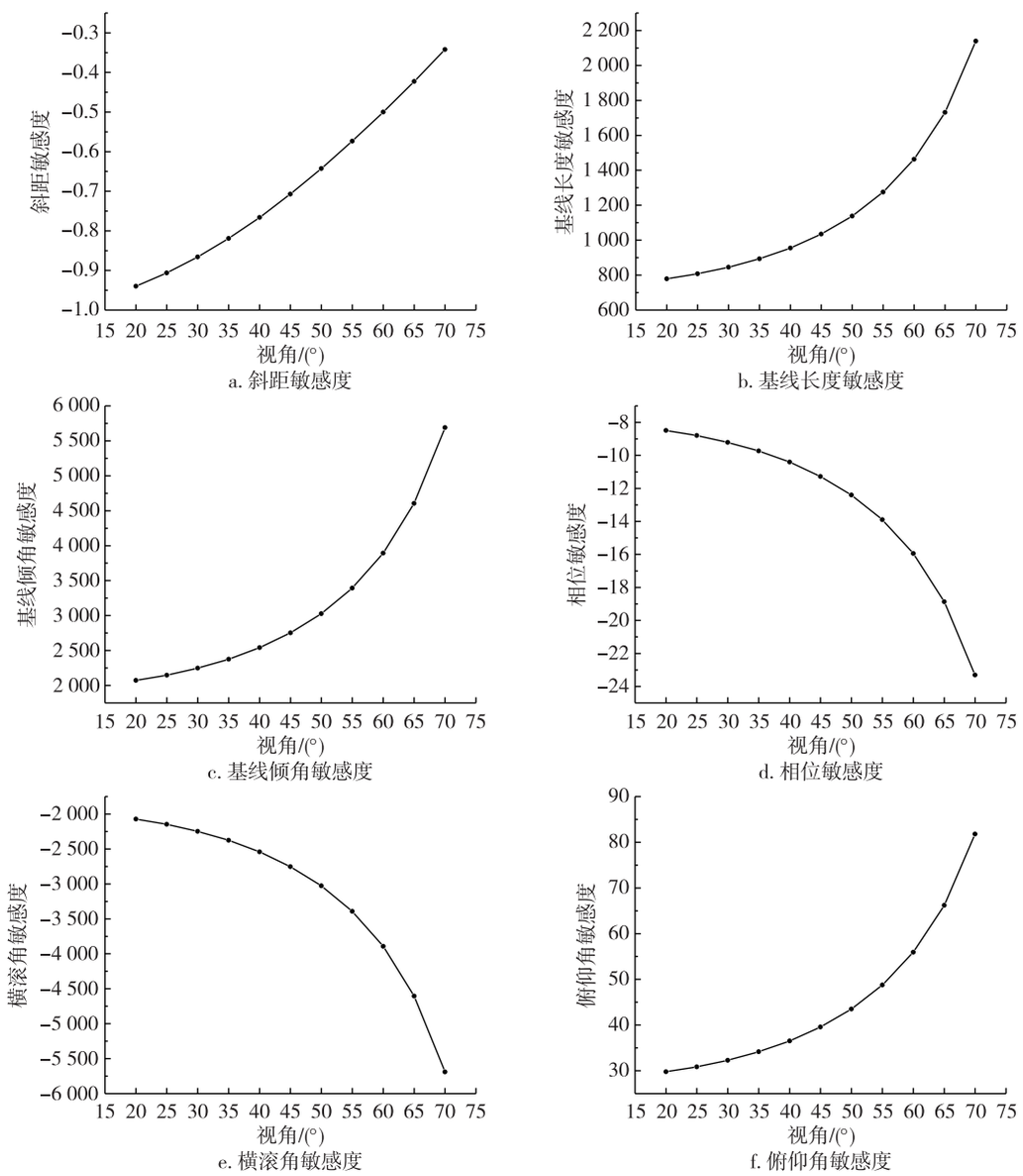


图 4 干涉参数敏感度分析

Fig. 4 Sensitivity analysis of interferometric parameters,(a) slant distance,(b) baseline length,(c) baseline inclination,(d) phase,(e) rolling angle,and (f) pitch angle

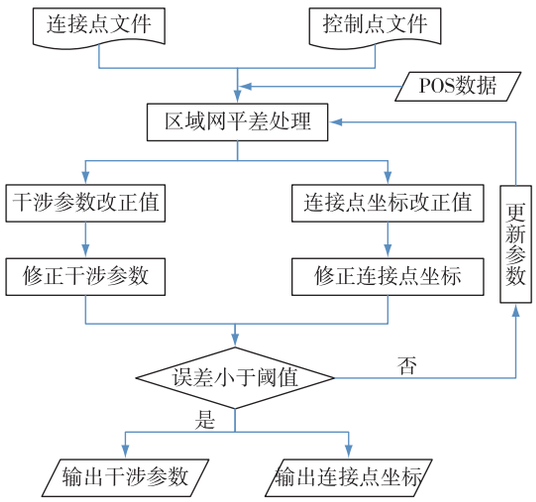


图 5　区域网平差流程图

Fig. 5　Flow chart of block adjustment

维坐标精确,无需进行校正,对于地面控制点,设

$$F_{\mathrm{GCP}(i,j)}(b,\alpha,\varphi)=[0;0;0]. \tag{12}$$

对于连接点,其三维坐标为平差前给定的初值,需要对其三维坐标进行校正,设

$$F_{\mathrm{TP}(i,k)}(b,\alpha,\varphi,X,Y,Z)=[0;0;0], \tag{13}$$

其中, $\mathrm{GCP}(i,j)$ 表示第 i 个干涉像对上第 j 个控制点,$\mathrm{TP}(i,k)$ 表示第 i 个干涉像对上第 k 个连接点.

因式(12)、(13)为非线性方程,根据泰勒公式对其线性化得:

$$V=\boldsymbol{A}\Delta x_1+\boldsymbol{B}\Delta x_2-L, \tag{14}$$

式(14)中,$\boldsymbol{A}$ 为干涉参数系数矩阵,$\boldsymbol{B}$ 为控制点和连接点的系数矩阵,Δx_1 为系统干涉参数的改正值,Δx_2 为连接点三维坐标的改正值,L 为常数项.

对于 i 个干涉像对上第 j 个控制点:

$$\begin{bmatrix}V_{\mathrm{GCP}_x(i,j)}\\V_{\mathrm{GCP}_y(i,j)}\\V_{\mathrm{GCP}_z(i,j)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial F_{\mathrm{GCP}_x(i,j)}}{\partial b} & \dfrac{\partial F_{\mathrm{GCP}_x(i,j)}}{\partial \alpha} & \dfrac{\partial F_{\mathrm{GCP}_x(i,j)}}{\partial \phi}\\ \dfrac{\partial F_{\mathrm{GCP}_y(i,j)}}{\partial b} & \dfrac{\partial F_{\mathrm{GCP}_y(i,j)}}{\partial \alpha} & \dfrac{\partial F_{\mathrm{GCP}_y(i,j)}}{\partial \phi}\\ \dfrac{\partial F_{\mathrm{GCP}_z(i,j)}}{\partial b} & \dfrac{\partial F_{\mathrm{GCP}_z(i,j)}}{\partial \alpha} & \dfrac{\partial F_{\mathrm{GCP}_z(i,j)}}{\partial \phi}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta b\\\Delta\alpha\\\Delta\varphi\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}L_{\mathrm{GCP}_x}\\L_{\mathrm{GCP}_y}\\L_{\mathrm{GCP}_z}\end{bmatrix}. \tag{15}$$

对于 i 个干涉像对上第 k 个连接点:

$$\begin{bmatrix}V_{\mathrm{TP}_x(i,k)}\\V_{\mathrm{TP}_y(i,k)}\\V_{\mathrm{TP}_z(i,k)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial F_{\mathrm{TP}_x(i,k)}}{\partial b} & \dfrac{\partial F_{\mathrm{TP}_x(i,k)}}{\partial \alpha} & \dfrac{\partial F_{\mathrm{TP}_x(i,k)}}{\partial \phi}\\ \dfrac{\partial F_{\mathrm{TP}_y(i,k)}}{\partial b} & \dfrac{\partial F_{\mathrm{TP}_y(i,k)}}{\partial \alpha} & \dfrac{\partial F_{\mathrm{TP}_y(i,k)}}{\partial \phi}\\ \dfrac{\partial F_{\mathrm{TP}_z(i,k)}}{\partial b} & \dfrac{\partial F_{\mathrm{TP}_z(i,k)}}{\partial \alpha} & \dfrac{\partial F_{\mathrm{TP}_z(i,k)}}{\partial \phi}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta b\\\Delta\alpha\\\Delta\phi\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}L_{\mathrm{TP}_x(i,k)}\\L_{\mathrm{TP}_y(i,k)}\\L_{\mathrm{TP}_z(i,k)}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\Delta X_{\mathrm{TP}(i,k)}\\\Delta Y_{\mathrm{TP}(i,k)}\\\Delta Z_{\mathrm{TP}(i,k)}\end{bmatrix}. \tag{16}$$

基于最小二乘原理,求解方程时先消去未知数较多的连接点三维坐标的改正数,求解系统干涉参数的改正量,再消去系统干涉参数改正量,求解连接点的坐标,采用迭代以及逐步趋近的方法求解模型参数.

本研究利用少量控制点和大量连接点对贵州施秉试验区、四川邛崃试验区进行区域网平差处理,求解得到了每个区域中每景影像对应的系统干涉参数与连接点三维坐标.

3.3　地理编码与拼接镶嵌

根据区域网平差与相高转换得到的每景影像对应的三维坐标,根据 DOM/DSM 所需分辨率(本研究设置为 0.5 m),去除影像周边 50 像素的边缘值,根据相干阈值(本研究设置为 0.6),采取 re_ts6p 插值方式对 DOM/DSM 进行插值计算,得到分辨率为 0.5 m 的 DOM 和格网间距为 0.5 m 的 DSM.

对测区内所有的 DOM/DSM 进行拼接镶嵌处理,对于拼接后的 DOM/DSM 存在拼接缝的情况要进行去缝处理;对于拼接后 DOM 在拼接处两侧颜色不均匀的情况要根据直方图匹配的方法进行匀色.

4　试验结果和分析

4.1　试验结果

本研究利用自主研发的机载 InSAR 数据处理软件 AirborneInSARMap,基于干涉处理、区域网平差、地理编码、拼接镶嵌等流程快速、精确地生成了贵州施秉试验区和四川邛崃试验区 0.5 m 分辨率的 DOM 以及格网间距为 0.5 m 的 DSM,分别如图 6、图 7 所示.

4.2　精度验证

为了验证生成 DSM 的精度,本研究分别利用 12、13 个地面控制点(角反射器)对生成的 DSM 的 X,Y 以及 H 3 个方向进行验证,2 个试验区验证结果

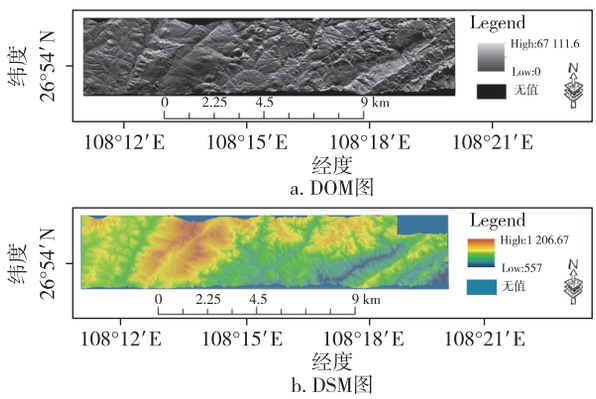


图 6 贵州施秉试验区 DOM/DSM 图

Fig. 6 DOM/DSM of Shibing experimental area in Guizhou

如图 8 所示.

由图 8 可得,贵州施秉试验区 3 个方向的平均值分别为 0.588、-0.534 和 0.340 m,RMSE 分别为 1.490、0.938 和 1.433 m;四川邛崃试验区 3 个方向的平均值分别为-0.049、0.075 和-0.304 m,RMSE 分别为 1.410、2.156 和 1.846 m.2 个试验区的平面定位误差和高程中误差均满足 1∶5 000 地形图制图要求[29].

5 结论

本研究利用自主研发的机载 InSAR 数据处理软件 AirborneInSARMap 生成了贵州施秉试验区(丘陵、山地)和四川邛崃试验区(高山地)高精度的 DOM 与 DSM,并利用控制点进行了精度验证与分析,得出以下结论:

1)通过对 2 个实验区精度验证,高程中误差可以满足 1∶5 000 地形图制图精度要求,表明机载双天线毫米波 InSAR 具备生成不同地形条件的 DOM/DSM 的能力,为困难区域 DOM/DSM 获取提供了新的技术手段.

2)基于 GPU 并行处理技术,利用最小平衡树解

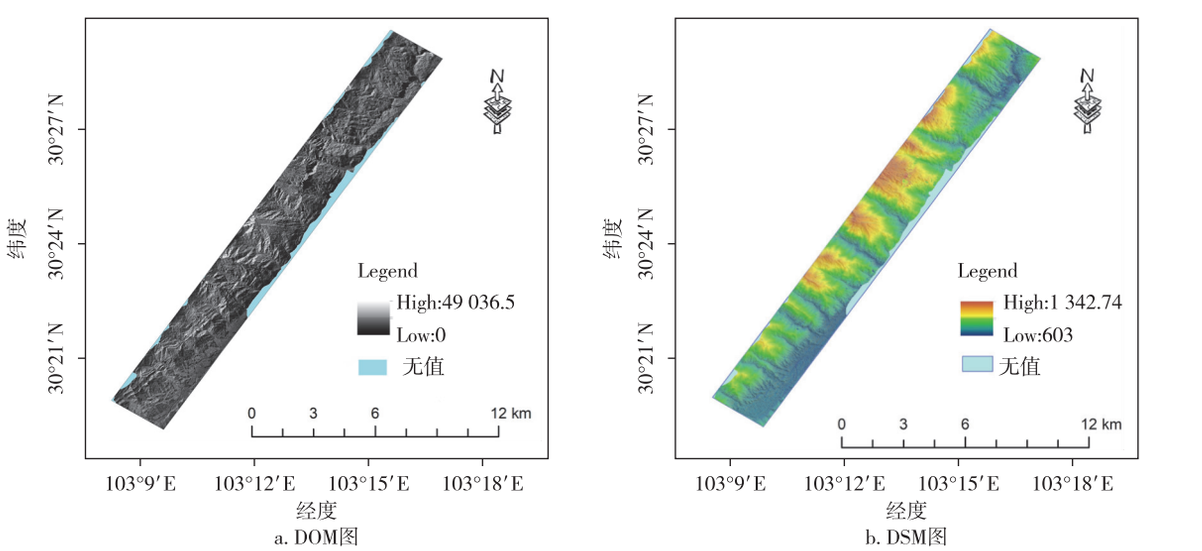


图 7 四川邛崃试验区 DOM/DSM 图

Fig. 7 DOM/DSM of Qionglai experimental area in Sichuan

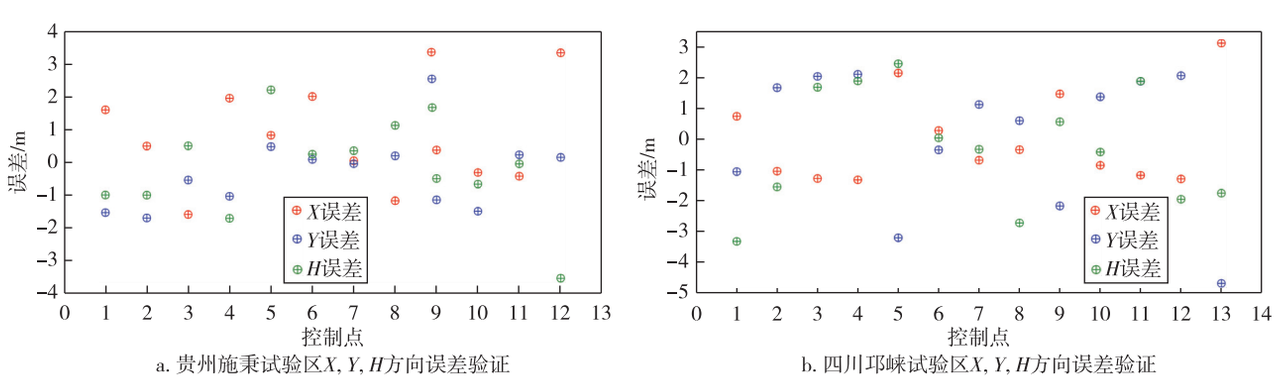


图 8 两个试验区 X,Y,H 方向误差验证

Fig. 8 Error verification at X, Y, and H directions in Shibing (a) and Qionglai(b)

缠方法进行相位展开,极大提高了解缠的效率.

3)基于视向量正交分解算法,利用 SIFT 算法自动选取测区内的连接点以及测区内少量控制点,通过区域网平差对各干涉像对的基线长度、基线倾角和相位偏移量进行了定标,提高了 DOM/DSM 的精度.

本研究在数据处理过程中也存在一些不足:由于山区地带存在大量阴影及叠掩,会导致解缠效果不理想,最终影响生成 DSM 的精度;对于由阴影与叠掩导致的黑洞问题,可以采用插值和对飞处理将 DSM 补全.

参考文献

References

[1] Sun Z C,Guo H D,Li X W,et al.DEM generation and error analysis using the first Chinese airborne dual-antenna interferometric SAR data[J].International Journal of Remote Sensing,2011,32(23):8485-8504

[2] 孙中昶,郭华东,李新武.机载双天线 InSAR 数据生成高精度 DEM 的误差分析[J].高技术通讯,2012,22(2):171-179
SUN Zhongchang, GUO Huadong, LI Xinwu. Error analysis of high-precision DEM generated from airborne dual-antenna interferometric SAR data[J].Chinese High Technology Letters,2012,22(2):171-179

[3] 张琦,张雷,郭俊栋,等.基于无人飞行平台的小型 Ka 波段合成孔径雷达系统研制[J].地球信息科学学报,2019,21(4):524-531
ZHANG Qi, ZHANG Lei, GUO Jundong, et al. Development of Ka-band miniature synthetic aperture radar based on UAV[J].Journal of Geo-Information Science,2019,21(4):524-531

[4] Rogers A E E,Ingalls R P.Venus:mapping the surface reflectivity by radar interferometry[J].Science,1969,165(3895):797-799

[5] Zebker H A,Goldstein R M.Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations[J].Journal of Geophysical Research Atmospheres,1986,91(B5):4993-4999

[6] 牛瑞,袁军.国外机载 InSAR 系统发展现状及应用分析[J].测绘科学与工程,2011(3):70-74
NIU Rui, YUAN Jun. Development and application analysis of airborne InSAR system abroad[J].Geomatic Science and Engineering,2011(3):70-74

[7] Nuri A L N.Mapping of large areas in tropical countries by using high resolution airborne interferometric radar [C]//ISPRS,2000

[8] 王聪.编队干涉 SAR 对地测绘任务规划方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014
WANG Cong.Research on the scheduling method of the formation flying InSAR mapping mission[D].Harbin:Harbin Institute of Technology,2014

[9] Mercer B.DEMs created from airborne IFSAR:an update [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing,2004,35(part B)

[10] Xiang M S,Wu Y R,Li S E,et al.Introduction on an experimental airborne InSAR system[C]//Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,2005,7:4809-4812

[11] Li D J,Liu B,Pan Z H,et al.Airborne MMW InSAR interferometry with cross-track three-baseline antennas[C]//9th European Conference on Synthetic Aperture Radar,2012:301-303

[12] 师君,马龙,韦顺军,等.基于导航数据的 Ka 波段 InSAR 成像处理与分析[J].雷达学报,2014,3(1):19-27
SHI Jun,MA Long,WEI Shunjun,et al.Ka-band InSAR imaging and analysis based on IMU data[J].Journal of Radars,2014,3(1):19-27

[13] 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

[14] Li Y W,Xiang M S,Lü X L,et al.Joint interferometric calibration based on block adjustment for an airborne dual-antenna InSAR system[J].International Journal of Remote Sensing,2014,35(17):6444-6468

[15] 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

[16] 马凯,王仁礼,杨庆庆,等.机载 InSAR 图像配准算法比较研究[J].地理信息世界,2016,23(4):50-53
MA Kai,WANG Renli,YANG Qingqing,et al.The comparison of co-registration algorithms of airborne InSAR image[J].Geomatics World,2016,23(4):50-53

[17] 孙中昶,郭华东,焦孟梅,等.机载双天线 InSAR 复图像自动配准研究[J].国土资源遥感,2010,22(1):24-29
SUN Zhongchang,GUO Huadong,JIAO Mengmei,et al.The automatic registration of airborne dual-antenna interferometric SAR complex images[J].Remote Sensing for Land & Resources,2010,22(1):24-29

[18] 张斌,胡庆荣,韦立登,等.改进的形态学干涉图滤波方法[J].系统工程与电子技术,2018,40(10):2230-2236
ZHANG Bin,HU Qingrong,WEI Lideng,et al.Improved morphological filtering algorithm of interferograms[J].Systems Engineering and Electronics,2018,40(10):2230-2236

[19] Ambrosino R,Baselice F,Ferraioli G,et al.Extended Kalman filter for multichannel InSAR height reconstruction [J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2017,55(10):5854-5863

[20] Goldstein R M,Werner C L.Radar interferogram filtering for geophysical applications[J].Geophysical Research Letters,1998,25(21):4035-4038

[21] Goldstein R M,Zebker H A,Werner C L.Satellite radar interferometry:two-dimensional phase unwrapping[J].Radio Science,1988,23(4):713-720

[22] Gao J,Sun Z C.Phase unwrapping method based on parallel local minimum reliability dual expanding for large-scale data[J].Journal of Applied Remote Sensing,2019,13(3):038506
[23] Jian G.Reliability-map-guided phase unwrapping method [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2016,13(5):716-720
[24] 张薇,向茂生,吴一戎.基于三维重建模型的机载双天线干涉SAR外定标方法及实现[J].遥感技术与应用,2009,24(1):82-87
ZHANG Wei,XIANG Maosheng,WU Yirong.Realization of outside calibration method based on the sensitivity equation for dual-antenna airborne interferometric SAR [J].Remote Sensing Technology and Application,2009,24(1):82-87
[25] Jin G W,Xiong X,Xu Q,et al.Baseline estimation algorithm with block adjustment for multi-pass dual-antenna insar[J].ISPRS-International Archives of the Photogrammetry,Remote Sensing and Spatial Information Sciences,2016,XLI-B7:39-45
[26] Yue X J,Han C M,Dou C Y,et al.Research on block adjustment of airborne InSAR images[J].IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2014,17:012199
[27] Lowe D G.Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J].International Journal of Computer Vision,2004,60(2):91-110
[28] Schwind P,Suri S,Reinartz P,et al.Applicability of the SIFT operator to geometric SAR image registration[J].International Journal of Remote Sensing,2010,31(8):1959-1980
[29] 孙晓云,王晓东,苗小利.INSAR干涉处理获得DSM的产品质量分析[J].矿山测量,2015(4):72-75
SUN Xiaoyun, WANG Xiaodong, MIAO Xiaoli. Product quality analysis of DSM obtained by INSAR interference processing[J].Mine Surveying,2015(4):72-75

On topographic surveying in tough areas using airborne millimeter-wave InSAR

WEI Lideng[1] LI Yongjie[2,3] SUN Zhongchang[2,4] GAO Jian[5]
1 Beijing Institute of Radio Measurement,Beijing 100854
2 Key Laboratory of Digital Earth Science,Aerospace Information Research Institute,Chinese Academy of Sciences,Beijing 100094
3 School of Land Science and Technology,China University of Geosciences,Beijing 100083
4 Hainan Provincial Key Laboratory of Earth Observation,Sanya 572029
5 School of Geographic and Biologic Information,Nanjing University of Posts and Telecommunications,Nanjing 210003

Abstract Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) has become one of the key technologies to obtain high-precision Digital Orthophoto Map (DOM) and Digital Surface Model (DSM).It is not affected by weather conditions and can acquire data in all day and weather conditions. Airborne dual-antenna millimeter-wave InSAR is independent of loss-of-correlation which has the characteristics of small size,high resolution,high flexibility,etc.And it can obtain large-scale and high-precision images.This paper uses airborne dual-antenna millimeter-wave InSAR to acquire high-precision DOM and DSM in Shibing experimental area of Guizhou (mountainous) and Qionglai experimental area of Sichuan (alpine) through interference processing,block adjustment,geocoding,and image mosaic. Besides,the ground control points (GCPs) are used to verify the accuracy.The results show that the accuracy of DSM obtained meets the requirement of 1:5000 terrain mapping.It has been proven that the airborne dual-antenna millimeter-wave InSAR has the ability to generate DOM/DSM with different terrains,which provides a new technical means for solving the lack of DOM/DSM data in tough areas.

Key words airborne millimeter-wave InSAR; block adjustment; high precision; digital surface model (DSM); digital orthophoto map (DOM)