

引用格式: 杨书成, 黄国满, 程春泉. 基于DEM的SAR影像几何定位参数校正方法[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(4): 580-587. [Yang S C, Huang G M, Cheng C Q. Correction method of SAR image geometric positioning parameters based on DEM[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(4): 580-587.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180386

基于DEM的SAR影像几何定位参数校正方法

杨书成, 黄国满, 程春泉

中国测绘科学研究院, 北京 100830

Correction Method of SAR Image Geometric Positioning Parameters based on DEM

YANG Shucheng*, HUANG Guoman, CHENG Chunquan

Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

Abstract: For geometric correction of SAR image without ground control point in large area, method of geometric positioning parameters correction based on DEM is proposed in this paper. The basis of this method is that the static error of geometric positioning parameters is stable in short time and certain area. Firstly, simulation SAR Image is generated based on DEM. Then, feature points are extracted on the Simulation SAR Image. Corresponding image point of these feature points on original SAR image are extracted by image matching between simulation Image and original SAR image. And the geographic coordinates of these feature points are got by indirect geolocation with DEM. The image points on original SAR image with geographic coordinates are used for reference points of geometric positioning parameters correction. And then, the correction model is established according to rigorous geometric imaging model of SAR image and correction values of geometric positioning parameters are solved with the reference points. Finally, geometric positioning parameters of other SAR images in certain area are corrected with the values, and geometric correction accuracy of SAR images in this area is improved. GF-3 SAR images were used in experiments. The correction values of geometric positioning parameters were obtained from one image. Geometric positioning parameters of other images in the same orbit and in different orbits were corrected. The geometric positioning accuracy before and after parameters correction was evaluated. Geometric positioning accuracy of the image in the same orbit improved from 66.0 m before parameters correction to 9.7 m after parameters correction, and that of the image in different orbit improved from 65.0m to 13.5 m. The results showed that geometric positioning accuracy can improved significantly by parameters correction using the method of this paper.

Key words: SAR image; geometric positioning; simulation; reference points of correction; parameters correction

***Corresponding author:** YANG Shucheng, E-mail: yangsc@casm.ac.cn

收稿日期: 2018-08-24; 修回日期: 2019-03-15.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0503004、2018YFF0215303); 中国测绘科学研究院基本科研业务费项目(7771808)。[**Foundation items:** The National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0503004, 2018YFF0215303; Chinese Academy of Surveying and Mapping Fundamental Research Project under Grant, No. 7771808.]

作者简介: 杨书成(1986-), 男, 江西万年人, 博士, 副研究员, 研究方向为SAR遥感数据处理及应用。E-mail: yangsc@casm.ac.cn

摘要:针对大范围无地面控制的SAR影像几何纠正,利用在一定时间和空间范围内SAR系统几何定位参数误差具有一定稳定性的特点,提出基于DEM的几何定位参数校正方法。该方法首先基于DEM进行影像模拟生成模拟SAR影像;然后在模拟SAR影像上提取特征点,针对特征点将模拟SAR影像和原始SAR影像进行匹配,得到特征点在原始SAR影像上的同名特征点,再结合DEM进行模拟影像间接定位获取特征点的地理坐标,以此作为几何定位参数校正的参考点;进而根据严密SAR几何构像模型构建几何定位参数校正模型,解算几何定位参数校正值;最后,利用几何参数校正值改正区域内其他SAR影像几何定位参数,提高区域内SAR影像几何定位精度。以高分三号影像进行试验,使用本文方法获取一景影像的几何定位参数校正值,对同一轨道内的和不同轨道的其他SAR影像进行参数校正,并对参数校正前后的几何定位精度进行评价。结果显示,同一轨道内的影像定位精度由66.0 m提高到9.7 m,不同轨道的影像定位精度由65.0 m提高到13.5 m,表明本文方法能够显著提高SAR影像几何定位精度。

关键词:SAR影像;几何定位;影像模拟;校正参考点;参数校正

1 引言

作为主动式的成像传感器,合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有全天时、全天候的成像能力并能穿透一些地物等工作特点,在地形测绘、自然资源调查与监测、灾害应急等领域有着广泛的应用^[1-2]。随着高分辨率、多极化、多波段SAR系统的出现^[3],星载、机载、无人机等平台的快速发展,特别是无人机SAR系统具有机动、灵活、低成本较等特征点在近两年飞速发展^[4]。SAR遥感技术将会在更多领域扮演更重要的角色,这也将对SAR数据处理提出更高的要求。

SAR影像几何定位与纠正处理是SAR影像应用的基础,要实现高精度的SAR影像几何定位与纠正,需要分析SAR影像几何定位误差来源,并利用一定方法对误差进行校正^[5-6]。目前获取的SAR影像,自带的几何定位参数普遍存在一定的误差,通常的处理方法是利用定标点或者控制点对定位误差进行校正,从而满足应用需求^[7-8]。目前主要的定位误差校正方法主要有2种:①对传感器平台姿态参数、方位向时间、斜距等参数进行校正,提高定位精度^[5,9-10];②直接将定位误差规划为影像坐标误差,直接对影像坐标进行线性改正,消除定位误差^[5,11]。但是在大范围尤其是在地形复杂的测绘困难地区,控制点获取非常困难,特别是在快速的应急应用中无法实现。除了利用控制点进行误差校正以外,在一些地形纹理丰富的地区也可以利用DEM的地形信息结合SAR影像成像信息进行影像模拟,然后与SAR影像配准,消除定位误差,实现高精度的纠正^[12-14]。这一方法相对于常规几何纠正,处理效率较低,而且在地形纹理稀疏的区域不容易实现。

针对现有方法存在的问题,面向大范围应用,

本文提出一种基于DEM的SAR影像几何定位参数校正方法。该方法利用在一定时间和空间范围内SAR系统几何定位参数误差具有一定稳定性的特点,针对影像基于DEM进行SAR影像模拟,通过特征点提取和匹配获取几何定位参数校正参考点,获取一景SAR影像的几何定位参数校正值,以及校正区域内其他影像的几何定位参数,以提高整个区域内SAR影像整体的几何定位精度。

2 校正方法

2.1 总体思路

本文方法的总体技术流程如图1所示:首先,基于DEM进行影像模拟生成模拟SAR影像,同时建立模拟SAR影像和地理空间的坐标映射关系;然后,在模拟影像上均匀提取特征点,进而以特征点为参考点在原始SAR影像上匹配同名点,建立地面点-模拟影像特征点-原始影像同名点的映射关系,得到相关点的原始SAR影像坐标和地理坐标,作为几何定位参数校正参考点;最后,通过构建几何定位参数校正模型,利用参考点解算几何定位参数校正值,改正区域内其他SAR影像几何定位参数,从而提高SAR影像几何定位与纠正精度。综合SAR传感器和平台特性,该方法能够用于机载和星载以及无人机SAR数据的几何处理。

相比传统方法,本文方法具有以下优势:①常用的基于模拟SAR影像提高几何纠正精度的方法,是利用模拟影像和原始SAR影像的配准结果对模拟影像查找表进行精化,然后利用精化后的查找表进行几何纠正重采样,利用这一方法进行几何纠正处理时,每景影像都要进行影像模拟、影像自动匹配和查找表精化处理,这些计算都比较耗时。当处理某一区域内多景影像时,相比常规的直接几何纠

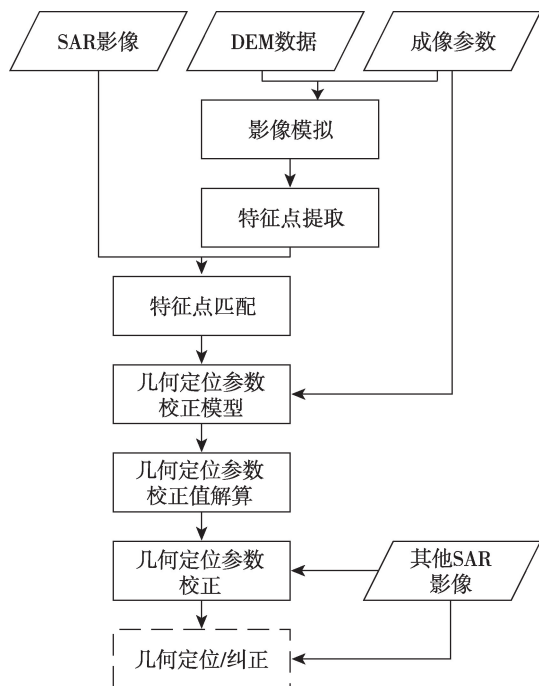


图1 基于DEM的SAR影像几何定位参数校正方法流程

Fig. 1 Correction method flow chart of SAR image geometric positioning parameters based on DEM

正处理,效率较低;本文方法只选取其中一景影像进行影像模拟和自动匹配处理,解算几何定位参数校正值,对整个区域影像进行几何定位参数改正,然后可以对所有进行常规几何纠正处理,提高了几何处理精度的同时,使得处理效率和常规几何纠正相近。②在进行大范围多景SAR影像处理时,针对局部地形纹理稀疏地区,常用的基于模拟SAR影像提高几何纠正精度的方法,在模拟影像和原始SAR影像匹配时可能匹配失败,导致处理结果较差,而本文方法将在大区域内选择地形纹理较为丰富的影像作为参考影像,得到几何参数校正值,对地形纹理稀疏地区的影像进行参数校正,提高几何定位与纠正精度。

2.2 SAR几何定位模型

几何定位模型是影像几何处理的基础,SAR影像处理几何模型目前已经有多种。距离-多普勒(R-D)模型作为目前SAR几何处理主流的构像模型,是一种严密模型符合SAR成像机理,它依据SAR影像成像原理,描述了传感器和目标点在地理坐标系下的物理几何关系,能够结合传感器平台状态矢量信息实现无控制条件下的由像方到物方的直接定位和由物方到像方的间接定位^[5,15-16]。本文

的SAR影像模拟和几何定位参数校正模型构建都是基于R-D模型开展。R-D构像模型基本方程(包括距离条件方程和多普勒条件方程):

$$\sqrt{(X_s - X)^2 + (Y_s - Y)^2 + (Z_s - Z)^2} = R_0 + m_j \times j \quad (1)$$

$$V_x(X_s - X) + V_y(Y_s - Y) + V_z(Z_s - Z) = -f_d \times \lambda R / 2 \quad (2)$$

式中: (X_s, Y_s, Z_s) 和 (V_x, V_y, V_z) 分别为传感器的位置与速度; (i, j) 为影像点的行列号; (X, Y, Z) 为对应地面目标点的地理坐标; R_0 为初始斜距; R 为该点的斜距值; m_j 为距离向像元大小; f_d 为多普勒频移; λ 为雷达波长。SAR影像几何定位是根据模型方程,实现物方和像方坐标之间的解算^[17]。

2.3 SAR影像模拟

SAR影像模拟是利用SAR成像入射角信息和DEM的三维地形信息,基于一定的散射模型,模拟生成和地形相关的灰度影像^[14]。SAR影像模拟包括几何模拟和灰度模拟。几何模拟是根据几何定位模型,将已知DEM数据,通过定位计算投影到SAR影像坐标系下,同时生成地理坐标下影像坐标查找表。查找表与重采样后的DEM大小相同,以复数形式存储与地理坐标相对应的模拟SAR影像坐标。灰度模拟采用地面散射单元面积作为模拟影像像元值,考虑到地形起伏较大,将地面散射单元面积定义为从对角线将散射单元分为2个三角形的面积之和,如式(3)所示。

$$DN = S_{ABC} \cos \theta + S_{ADC} \cos \theta \quad (3)$$

式中: A, B, C, D 为采样DEM像元的4个角点; θ 为像元本地入射角。

在模拟处理中,辅助DEM分辨率一般远小于模拟SAR影像分辨率。在进行影像模拟前需对DEM进行过采样,为保证每个模拟影像像元在模拟过程中至少被赋值一次,重采样率 f 应满足:

$$\begin{cases} f \geq f_1 \times f_2 \\ f_1 = \sigma_r / \sigma_{rg} \\ f_2 = \sqrt{2} (\Delta S_{dem} / \Delta S_{out}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_r, σ_{rg} 分别为斜距分辨率单元和地距分辨率单元; ΔS_{dem} 为辅助DEM分辨率大小; ΔS_{out} 为模拟SAR影像分辨率大小。

2.4 校正参考点提取

由于SAR影像几何定位参数存在误差,模拟SAR影像与真实SAR影像之间存在一定偏移,而通过影像匹配能够获取相应像点的偏移值,这样结合

模拟影像到DEM的定位解算,就能够建立DEM上地面点-模拟影像点-原始SAR影像点之间的映射关系,从而提取几何定位参数校正参考点。

校正参考点提取过程为:①将模拟SAR影像按照一定的间距划分成若干网格,在每个网格中利用特征提取算子进行特征点提取。本文采用Harris算子提取影像特征点,在每个网格中提取兴趣值最大的点作为特征点;然后以特征点作为参考点,将模拟影像与原始SAR影像进行匹配。本文采用金字塔相关匹配方法,得到原始SAR影像上同名特征点^[18-19]。②将模拟影像特征点与DEM数据进行结合,进行直接定位解算,获取特征点相应的地理坐标。最终得到一定数量影像坐标和地理坐标都已知的SAR影像点,作为几何定位参数校正参考点。

2.5 几何定位参数校正

几何定位参数校正就是将具有一定稳定性的几何成像参数作为平差参数,根据几何构像模型建立校正平差模型,利用校正参考点解算参数校正值,然后利用校正值校正其他影像的几何定位参数^[20-21]。通过对R-D模型进行分析,几何定位精度误差可以归化到几个主要的几何成像参数,包括初始斜距 R_0 、距离向像元分辨率 m_j 、起始成像时间 t_0 、方位向时间分辨率 m_t 。几何定位参数校正值解算处理是首先根据几何定位模型建立观测方程(式(5))。

$$\begin{cases} F_1 = \sqrt{(X_s - X)^2 + (Y_s - Y)^2 + (Z_s - Z)^2} - (R_0 + m_j \cdot j) \\ F_2 = -\frac{2}{\lambda R} V_x (X_s - X) + V_y (Y_s - Y) + V_z (Z_s - Z) - f_d \end{cases} \quad (5)$$

由观测方程,利用若干个校正参考点,能够对模型参数进行非线性最小二乘估计,将初始斜距 R_0 、距离向像元分辨率 m_j 、起始成像时间 t_0 、方位向时间分辨率 m_t 作为未知观测值,对观测值求导进行线性化得到误差方程(式(6))。

$$\begin{cases} V_1 = \frac{\partial F_1}{\partial R_0} \Delta R_0 + \frac{\partial F_1}{\partial m_j} \Delta m_j + \frac{\partial F_1}{\partial t_0} \Delta t_0 + \frac{\partial F_1}{\partial m_t} \Delta m_t + (F_1)^0 - F_1 \\ V_2 = \frac{\partial F_2}{\partial R_0} \Delta R_0 + \frac{\partial F_2}{\partial m_j} \Delta m_j + \frac{\partial F_2}{\partial t_0} \Delta t_0 + \frac{\partial F_2}{\partial m_t} \Delta m_t + (F_2)^0 - F_2 \end{cases} \quad (6)$$

观测值真值 $F_1 = F_2 = 0$,将误差方程写成矩阵:

$$V = Bx - L \quad (7)$$

$$\text{其中, } V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial R_0} & \frac{\partial F_1}{\partial m_j} & \frac{\partial F_1}{\partial t_0} & \frac{\partial F_1}{\partial m_t} \\ \frac{\partial F_2}{\partial R_0} & \frac{\partial F_2}{\partial m_j} & \frac{\partial F_2}{\partial t_0} & \frac{\partial F_2}{\partial m_t} \end{bmatrix},$$

$$x = [\Delta R_0 \ \Delta m_j \ \Delta t_0 \ \Delta m_t]^T, L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(F_1)^0 \\ -(F_2)^0 \end{bmatrix}.$$

结合传感器速度矢量 (V_x, V_y, V_z) ,矩阵中系数值由模型方程对各定标参数求偏导数得到。

从影像参数文件中获取几何定位参数初值,建立法方程 $B^T Bx - B^T L = 0$,求解法方程,解算未知数改正数 $x = (B^T B)^{-1} B^T L$ 从而得到几何定位参数的校正值 (dR, dm_j, dt_0, dm_t) 。

3 试验分析

本文采用贵州地区3景GF-3数据进行试验验证,数据成像模式为精细条带模式,数据分辨率为5 m,极化方式为HH极化,影像覆盖面积50 km×50 km。3景影像都为升轨数据,成像轨道高度754 km。3景影像范围如图2所示,其中S1、S2获取时间为9月4日,属于同一轨道,成像初始斜距都为965 981 m,距离向采样像元大小2.25 m,方位向采样像元大小2.86 m,S1影像宽高16 222像元×21 602像元,S2影像宽高16 501像元×21 601像元;S3与S1、S2在不同轨道,获取时间为8月30号,成像初始斜距都为1 060 376 m,距离向采样像元大小2.25 m,方位向采样像元大小3.16 m,影像宽高17 117像元×19 453像元。

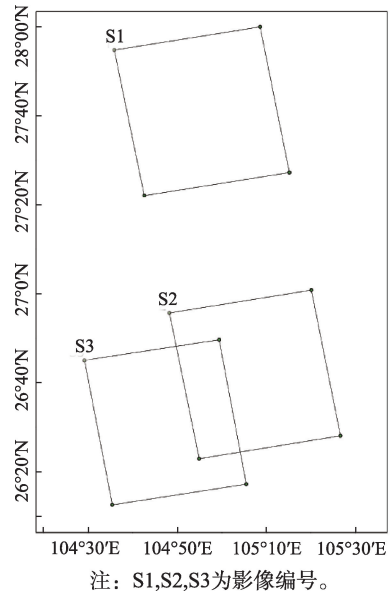


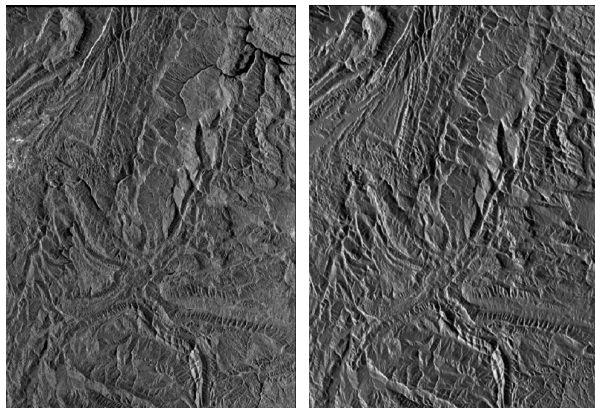
图2 试验数据范围

Fig. 2 The coverage area of experiment data

试验以S2影像作为几何定位参数校正的主影像,利用本文方法获取S2影像几何参数校正参考

点,解算S2影像几何定位参数校正值,然后利用S2影像的几何定位参数校正值改正S1和S3影像的几何定位参数。试验采用SRTM DEM数据,分辨率90 m。为了对参数校正前后的几何定位精度进行评价,从光学影像结合DEM数据获取一定数量的检查点,对S1和S3影像几何定位精度进行评价。

首先基于DEM数据生成S2影像的模拟影像(图3),S2影像宽度16 222像元,高度21 602,距离向像元分辨率2.24443,方位向像元分辨率2.862770,影像模拟处理时DEM过采样率3.0 m。然后,在得到模拟影像后在模拟影像上以一定的网格密度提取Harris特征点,并这对每个特征点进行相关匹配,在原始SAR影像获取对应的同名点,对所有同名点进行多项式拟合剔除粗差点,以获取有效点的原始影像坐标和地理坐标。



(a) S2原始影像

(b) S2模拟影像

图3 S2原始SAR影像和模拟SAR影像

Fig. 3 Original SAR image and simulation SAR image of S2

本次试验共提取特征点402个,剔除粗差点之后得到有效校正参考点267个,其分布如图4所示。粗差点剔除采用一次多项式对匹配同名点进行拟合,统计拟合后残差中误差,然后剔除残差大于3倍中误差的匹配点,重新拟合统计残差中误差,如此进行迭代,直到前后两次残差中误差变化小于1%的中误差值,停止迭代。

根据几何定位参数校正模型,利用校正参考点解算得到S2影像几何定位参数校正值, $dR = -36.02$ m, $dm_j = -0.00031$ m, $dt_0 = 0.0049$ s, $dm_i = 2.5e-008$ s。然后利用S2影像几何定位参数对S1和S3影像的几何定位参数分别进行校正,利用检查点对S1和S3影像参数校正前后的几何定位精度进行评价,S1和S3影像及检查点分布如图5所示。

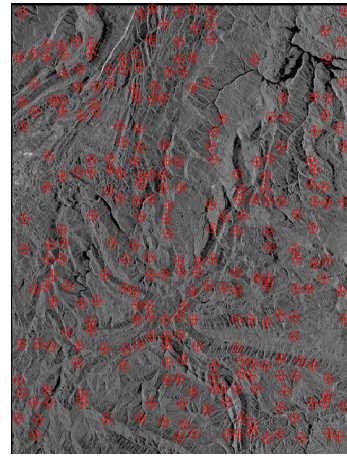
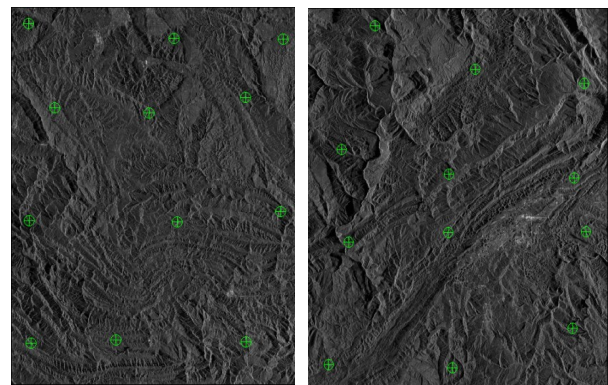


图4 S2影像上参数校正参考点分布

Fig. 4 Reference points of parameters correction on S2 image



(a) S1影像及检查点分布

(b) S3影像及检查点分布

图5 S1影像和S3影像及检查点分布

Fig. 5 S1 image, S3 image and their check points

定位精度评价方法是根据检查点影像坐标 (x, y) 结合已知地面高程 H_i ,进行直接定位解算,得到解算的影像高斯平面坐标 (X', Y') ,再和已知的平面坐标 (X, Y) 相减,得到定位误差 $DX = X' - X$, $DY = Y' - Y$,最后统计所有检查点定位误差的中误差作为影像定位精度。

首先对同一轨道的S1影像进行处理,参数校正前后S1影像定位误差如表1所示。

然后对不同轨道的S3影像进行处理,由于S3影像在方位向和距离向的采样频率和S2影像不一致,导致方位向和距离向像元分辨率不一致,所以只对S3影像初始斜距和方位向起始时间进行改正,参数校正前后S3影像定位误差如表2所示。

由S2影像参数校正值可见,距离的主要误差来至于初始斜距,S2影像入射角为 42° , -36.02 m的斜距误差近似于54.0 m的地距误差,距离向分辨率误

表1 S1影像参数校正后前几何定位误差

Tab. 1 Geolocation error of S1 image before and after parameters correction

点号	参数校正前		参数校正后	
	东方向 误差/m	北方向 误差/m	东方向 误差/m	北方向 误差/m
1	59.8	-26.6	-3.3	-3.0
2	72.6	-13.9	11.1	9.9
3	67.0	-7.9	6.4	16.1
4	57.2	-24.5	-3.6	-0.5
5	60.5	-32.0	-2.3	-8.3
6	60.0	-16.5	-1.7	7.3
7	56.3	-21.4	-4.2	2.6
8	57.5	-32.9	-5.6	-9.2
9	70.4	-20.1	8.8	3.7
10	67.4	-31.1	4.2	-7.4
11	53.9	-18.1	-8.2	5.7
12	53.5	-22.4	-7.3	1.67
中误差	61.7	23.5	6.2	7.5

表2 S3影像参数校正后前几何定位误差

Tab. 2 Geolocation error of S3 image before and after parameters correction

点号	参数校正前		参数校正后	
	东方向 误差/m	北方向 误差/m	东方向 误差/m	北方向 误差/m
1	70.6	-3.7	15.3	14.9
2	61.5	-8.3	6.8	10.4
3	69.0	-3.7	14.8	15.1
4	62.4	-8.3	6.9	10.3
5	55.5	-25.2	0.6	-6.4
6	55.6	-12.3	1.4	6.4
7	55.5	-25.2	0.6	-6.4
8	61.3	-11.3	7.2	7.4
9	65.5	-26.8	10.1	-8.1
10	61.6	-30.3	7.4	-11.5
11	66.6	-33.0	11.1	-14.3
12	52.5	-25.7	-2.2	-6.9
中误差	61.7	20.6	8.6	10.4

差在影像内导致定位误差不超过 10.0 m; 方位向主要误差来自起始成像时间改正, 0.0049 s 时间误差对应方位向地面距离为 10.0 m, 而方位向时间分辨率改正对应的地面距离相对较小, 在影像内最大 1.0 m 左右。

对比同轨影像 S1 定位参数校正前后的平面定位精度, 参数校正前定位精度东方向中误差 61.7 m, 北方向中误差 23.5 m, 点位平面中误差 66.0 m, 可以看到利用原始定位参数进行影像定位存在较大误差, 定位的主要误差在斜距方向, 方位向定位误差相对较小; 参数校正后定位精度东方向中误差 6.2 m, 北方向中误差 7.5 m, 点位平面中误差 9.7 m, 影像定位精度得到显著提高, 由 66.0 m 提高到 9.7 m, 提高近一个数量级。

对比不同轨道影像 S3 定位参数校正前后的平面定位精度, 参数校正前定位精度东方向中误差 61.7 m, 北方向中误差 20.6, 点位平面中误差 65.0 m, 定位精度和 S1 影像相近, 而且在两个方向上的分布基本一致; 参数校正后定位精度东方向中误差 8.6 m, 北方向中误差 10.4 m, 点位平面中误差 13.5 m, 影像定位精度得到显著提高, 定位精度由 65.0 m 提高到 13.5 m, 校正后定位精度略低于 S1 影像。

综合上述实验结果, 在一定时间和空间范围内, 同一成像来源相同模式的 SAR 影像几何定位参数误差具有一定的一致性。利用本文方法解求其中一景影像的几何定位参数校正值校正其他影像的几何定位参数, 能够显著提高整个区域内的影像几何定位精度。对于相同轨道和不同轨道校正后定位精度, 可推断同一轨道影像间几何定位参数误差近似程度大于不同轨道影像间近似程度。

4 结论

SAR 系统作为能够全天时、全天候工作的遥感传感器, 已在各行业中得到广泛应用, 随着国产机载、星载和无人机 SAR 的快速发展, 迫切需要对 SAR 几何定位技术进行深入研究, 实现国产 SAR 的高精度几何定位处理, 进一步推进国产 SAR 实用化。针对大范围无控制的条件下的 SAR 影像几何定位与纠正, 本文提供一种基于 DEM 的几何定位参数校正方法, 使用高分三号 SAR 影像数据验证了方法是有效可行的。本文的方法主要用于一定时间和空间范围内获取的同源同模式 SAR 数据, 针对星载 SAR 数据, 对于同轨的数据, 能够有较好的效果, 对于不同轨道, 在较短时间内相邻轨道或者较近距离的轨道也能获得不错的结果; 当数据获取时间和范围距离校正参考影像越远, 定位参数误差变化越大, 定位精度改善效果将会下降。针对机载

SAR和无人机SAR数据,在一个架次内定位参数误差会相对稳定,本文方法也同样适用。

近年,中国机载和无人机SAR发展迅速,无人机SAR系统作为新兴的遥感观测系统,兼具无人机平台和SAR传感器的优点,在常态化的自然资源调查监测与应急灾害响应中具有极大应用前景,本文方法能够在无控制条件下有效提高大范围多景无人机SAR数据几何处理精度,具有很大应用潜力,后续将使用相应的数据进行更为深入的研究和探索。

参考文献(References):

- [1] 黄国满,张继贤,赵争,等.机载干涉SAR测绘制图应用系统研究[J].测绘学报,2008,37(3):277-279. [Huang G M, Zhang J X, Zhao Z, et al. Research on airborne SAR interferometry mapping system[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008,37(3):277-279.]
- [2] Zhang J, Yang S, Zhao Z, et al. SAR mapping technology and its application in difficulty terrain area[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2010:3608-3611.
- [3] 黄国满,机载多波段多极化干涉SAR测图系统-CASMSAR[J].测绘科学,2014,39(8):111-115. [Huang G M. An airborne interferometric SAR mapping system with multi-band and multi-polarization-CASMSAR[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014,39(8):111-115.]
- [4] 廖小罕,周成虎,苏奋振,等.无人机遥感众创时代[J].地球信息科学学报,2016,18(11):1439-1447. [Liao X H, Zhou C H, Su F Z, et al. The mass innovation era of UAV remote sensing[J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(11):1439-1447.]
- [5] 陈尔学.星载合成孔径雷达影像正射校正方法研究[D].北京:中国林业科学研究院,2004. [Chen E X. Study on Ortho-rectification methodology of space-borne synthetic aperture radar imagery[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2004.]
- [6] 陆静,郭克成,陆洪涛.星载SAR图像距离-多普勒定位精度分析[J].雷达科学与技术,2009,7(2):102-106. [Lu J, Guo K, Lu H. Analysis of R-D location precision in spaceborne SAR image[J]. Radar Science and Technology, 2009,7(2):102-106.]
- [7] 岳昔娟.稀少(无)控制条件下机载SAR高精度定位技术研究[D].武汉:武汉大学,2009. [Yue X J. High-precision geolocation of airborne SAR data with few(none)ground control points[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009.]
- [8] 程春泉,黄国满,杨杰. POS与DEM辅助机载SAR多普勒参数估计[J].测绘学报,2015,44(5):510-517. [Cheng C Q, Huang G M, Yang J. Doppler centroid estimation for airborne SAR supported by POS and DEM[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015,44(5):510-517.]
- [9] 袁修孝,吴颖丹.缺少控制点的星载SAR遥感影像对地目标定位[J].武汉大学学报·信息科学版,2010,35(1):88-91. [Yuan X X, Wu Y D. Object location of space-borne SAR imagery under lacking ground control points[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010,35(1):88-91.]
- [10] 宋占军,张继贤,黄国满,等.基于斜距测量误差改正的机载SAR间接定位方法研究[J].遥感信息,2011(4):23-27. [Song Z J, Zhang J X, Huang G M, et al. Research on airborne SAR indirect geocoding method based on correction of slant range measurement error[J]. Remote Sensing Information, 2011(4):23-27.]
- [11] 魏钜杰,张继贤,赵争,等.稀少控制下TerraSAR-X影像高精度直接定位方法[J].测绘科学,2011,36(1):58-60. [Wei J J, Zhang J X, Zhao Z, et al. High-precisely direct geo-location method for TerraSAR-X image with sparse GCPs[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011,36(1):58-60.]
- [12] 尤红建,丁赤飏,吴一戎.基于DEM的星载SAR图像模拟以及用于图像精校正[J].中国空间科学技术,2006,26(1):65-71. [You H J, Ding C B, Wu Y R. Space-borne SAR image simulation and its application in geo-rectification [J]. Chinese Space Science and Technology, 2006,26(1):65-71.]
- [13] 张红敏,靳国旺,徐青,等.机载SAR图像与仿真SAR图像的匹配策略[J].测绘科学技术学报,2013,30(2):144-148. [Zhang H M, Jin G W, Xu Q, et al. Matching strategy of airborne SAR image and simulated SAR image[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2013,30(2):144-148.]
- [14] 张红敏,靳国旺,徐青,等.基于DEM和图像仿真的单幅SAR图像无控制定位[J].测绘科学技术学报,2013,30(3):274-278. [Zhang H, Jin G, Xu Q, et al. Positioning with single SAR image based on DEM without ground control point[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2013,30(3):274-278.]
- [15] Curlander J C. Location of spaceborne SAR imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1982,20(3):359-364.
- [16] Curlander J C, Kwo k R, Pang S S. A post-processing system for automated rectification and registration of spaceborne SAR imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 1987,8(4):621-638.
- [17] 杨杰,潘斌,李德仁,等.无地面控制点的星载SAR影像直接对地定位研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2006,31(2):144-147. [Yang J, Pan B, Li D R, et al. Location of

- spaceborne SAR imagery without reference points[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006,31(2):144-147.]
- [18] 王亚超,杨书成,赵争,等.自适应窗口的SAR立体影像匹配方法[J].测绘科学,2017,42(2):135-139. [Wang Y C, Yang S C, Zhao Z, et al. A stereo SAR matching algorithm with adaptive window[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017,42(2):135-139.]
- [19] 李文涛,黄国满,杨书成,等.一种模拟纠正影像的SAR立体影像匹配方法[J].测绘科学,2017,42(10):19-25. [Li W, Huang G, Yang S, et al. SAR stereo image matching method based on simulation correction image[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017,42(10):19-25.]
- [20] 刘佳音,尤红建,洪文.用于星载SAR图像几何校正的稀疏控制点修轨方法[J].武汉大学学报·信息科学版, 2013,38(3):262-265. [Liu J Y, You H J, Hong W. Modified orbit algorithm with sparse ground control points for georectification of space-borne SAR image[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(3):262-265.]
- [21] 周晓,曾琪明,焦健,等.星载SAR传感器外场定标实验研究——以TerraSAR-X卫星为例[J].遥感技术与应用,2014,29(5):711-718. [Zhou X, Zeng Q M, Jiao J, et al. Research on space-borne SAR field calibration Experiment: A case study of TerraSAR-X field calibration[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014,29(5):711-718.]