

DOI: 10.3969/j.issn.1672-2337.2019.03.002

# 星载 SAR 图像几何校正影响要素分析

范明虎<sup>1,2</sup>, 赵建辉<sup>1,2</sup>, 田军锋<sup>1,2</sup>, 左宪禹<sup>1,2</sup>, 李 宁<sup>1,2</sup>

(1. 河南省大数据分析与处理重点实验室, 河南开封 475004; 2. 河南大学计算机与信息工程学院, 河南开封 475004)

**摘要:** 几何校正是 SAR 图像应用的基础, 而影响校正效果的要素有多种。论文首先从 SAR 图像成像机理出发, 阐述了几何校正中定位模型的建立和解算过程, 主要分析了两类影响要素: 高程和卫星轨道插值方法。然后以一幅高分辨率 TerraSAR-X 图像的几何校正为基础, 对比分析了三种高程和两种轨道插值算法对定位精度的影响。实验结果表明, 只有距离向定位受这些因素的影响, 高程的分辨率和垂直精度对定位精度都有很大影响、四次多项式直接插值方法只能满足一般的几何校正需要, 更高精度的校正还需要其他辅助手段。

**关键词:** 合成孔径雷达; 定位模型; 几何校正; 定位精度; 高程; 轨道插值

中图分类号: TN958; P237 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2019)03-0246-05

## Analysis of the Main Factors Effecting Geometric Correction of Spaceborne SAR Image

FAN Minghu<sup>1,2</sup>, ZHAO Jianhui<sup>1,2</sup>, TIAN Junfeng<sup>1,2</sup>, ZUO Xianyu<sup>1,2</sup>, LI Ning<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Big Data Analysis and Processing of Henan Province, Kaifeng 475004, China;

2. School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China)

**Abstract:** Geometric correction is the basis of SAR image application and there are many factors effecting the correction. First, starting from the imaging mechanism of SAR image, this paper expatiates the establishing and solving process of location model of geometric correction, and focuses on the analysis of two main influencing factors: elevation and satellite orbit interpolation methods. Then, the comparative analysis of the effects of three kinds of elevation and two kinds of orbit interpolation algorithms on the location precision is done. The results indicate that only range location is influenced by these factors, the resolution and vertical accuracy of elevation have great influences on location accuracy. The direct quartic polynomial interpolation method can satisfy general geometric correction requirement. The higher precision correction needs other auxiliary means.

**Key words:** synthetic aperture radar(SAR); location model; geometric correction; location accuracy; elevation; orbit interpolation

## 0 引言

随着 SAR(Synthetic Aperture Radar)技术的发展, SAR 图像在军事和国民建设中都发挥着日益重要的作用。但是, 受地形的影响和斜视成像的原因, SAR 图像总是存在不同程度的几何畸变, 在应用之前需要作几何校正。目前, 在星载 SAR

图像的几何校正中广泛使用距离-多普勒(Range Doppler, RD)模型, 国内外的一些学者研究了该模型的近似解法<sup>[1-5]</sup>。

几何校正中可能的误差来源有卫星星历误差、系统成像参数误差、DEM(Digital Elevation Model)误差<sup>[6-7]</sup>, 以及定位方程的误差<sup>[8]</sup>和解算误差。星历数据和系统成像参数由卫星公司提供, 由 SAR 图像元数据直接给出, 其误差没有办法通

收稿日期: 2018-05-17; 修回日期: 2018-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61601437); 国家重点研发计划课题(No. 2017YFD0301105); 河南省科技厅计划项目(No. 172102110006,  
182102210242, 182102110065)

过算法进行弥补,需要其他数据(例如 DEM 或控制点)辅助修正<sup>[9-11]</sup>。因 DEM 产生的定位误差与 DEM 数据本身的精度和地形都有关,地形越平坦定位精度受其影响越小,反之越大。定位方程的解算中可能会产生较大误差的主要因素是卫星轨道的拟合和插值。

本文分析了 RD 定位模型的建立和几何校正中该模型的解算过程,探讨了影响定位精度的两个主要因素:高程、轨道的拟合与插值。目前能公开免费获取的高程数据并不少,但全球覆盖的不多,常见的有 ASTGTM2<sup>[12]</sup>、SRTM4.1<sup>[13]</sup> 和 GMTED2010<sup>[14]</sup>,标称分辨率为 30,90 和 250 m,从有关文献的比较来看,垂直精度依次升高。在我国东部平原,垂直精度也有类似的表现<sup>[15]</sup>。常用的卫星轨道拟合与插值方法是多项式直接法和拉格朗日法。本文以一景高分辨率 TerraSAR-X 图像的几何校正为基础,分析和验证了上述三种 DEM 和两种轨道插值算法对定位精度的影响。

## 1 R-D 定位模型的建立及其解算

精确的 SAR 图像定位必须充分考虑 SAR 图像的成像原理和成像几何,并以此为基础建立定位模型,而实际定位精度又与模型的初始化数据和解算方法密切相关。

### 1.1 定位模型的建立

SAR 图像的定位需要综合考虑成像原理和成像几何两方面的条件。

从成像原理上讲,SAR 图像是基于地物的多普勒雷达回波信号成像。SAR 对目标进行照射后,回波以目标为中心产生多普勒效应,可用等时延的同心圆和等多普勒频移的双曲线束来描述,如图 1 所示,图中 T 为地面目标。针对回波的这种特性,定位以多普勒中心频率为基准。当频移为零时,SAR 刚好正对成像目标,便于成像几何的解算。

从成像几何来讲,SAR 与地面目标、地心构成一个三角形。地理定位中常将地心放在一个地固坐标系的原点,如图 1 所示。图中 O 为地心,S 表示 SAR 的位置。这时候 S 点的状态矢量(包括空间矢量  $\mathbf{P}_{SO}$  和速度矢量  $\mathbf{V}$ )为已知条件,T 到 S 的

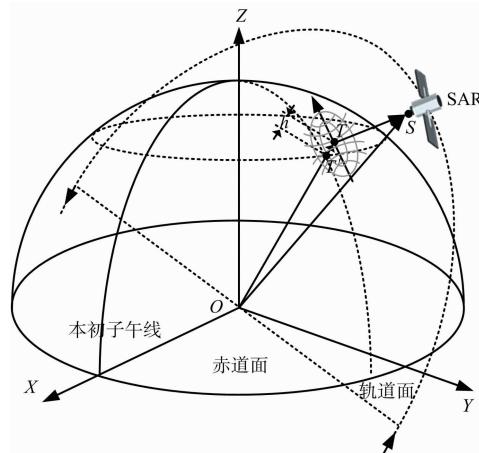


图 1 SAR 图像地理定位模型示意图

距离可根据回波时延计算得到,而 T 的位置可以用空间矢量  $\mathbf{P}_{TO}$  来描述。

有了上述条件,就能建立如下方程来表示在地固坐标系下上述矢量之间的关系。

$$f_d = -\frac{2}{\lambda |\mathbf{P}_{SO} - \mathbf{P}_{TO}|} (\mathbf{P}_{SO} - \mathbf{P}_{TO}) \mathbf{V} \quad (1)$$

式中,  $f_d$  表示多普勒频率,  $\lambda$  表示 SAR 的波长,  $|\mathbf{P}_{SO} - \mathbf{P}_{TO}|$  就是卫星到地面目标点 T 的距离。

此外,还需要地球椭球方程来描述地面目标 T 的空间坐标参考。

$$\frac{x_T^2 + y_T^2}{(r_a + h)^2} + \frac{z_T^2}{r_b^2} = 1 \quad (2)$$

式中,  $r_a, r_b$  分别表示地球椭球模型的长、短半轴长度,  $h$  表示地面高程。如图 1 所示,  $T'$  表示 T 点在参考椭球上的位置,  $h$  是二者之间的距离。

### 1.2 几何校正中定位模型的解算及其影响因素分析

定位模型解算的目标是 T 点的向量  $\mathbf{P}_{TO}$ ,基本条件为 SAR 图像的成像几何,约束条件为零多普勒频移。因此, T 点的定位过程可以描述为零多普勒条件下根据成像几何计算矢量  $\mathbf{P}_{TO}$  的过程。

几何校正采用间接定位方法,定位方程的解算步骤如下:

- 1) 定位模型线性化,求误差方程。

由于式(1)和式(2)并非线性方程,不能直接用于平差计算,可以对它们进行泰勒级数展开,取一次项组成误差方程,但这种方法计算量较大。更简单的方法是用牛顿迭代法直接逼近多普勒中心频率,其迭代公式如下:

$$\Delta f_d = |f_d(t_i + \Delta t_i) - f_{dc}| \quad (3)$$

$$\Delta t_i = \frac{f_d(t_i) - f_{dc}}{f_d(t_{i-1} + \Delta t_{i-1}) - f_d(t_{i-1})} \Delta t_{i-1} \quad (4)$$

式中,  $f_{dc}$  为 SAR 多普勒中心频率, 新一代 SAR 图像(如 TerraSAR-X 图像)已经作了归零化处理, 无须计算。式(4)中,  $\Delta t$  的初值可以由经验值直接给定, 可大可小(如 10 ms), 对收敛速度并无影响。

对于老一代 SAR 图像  $f_{dc}$  可用式(5)进行计算:

$$f_{dc} = d_0 + d_1(t-t_0) + d_2(t-t_0)^2 + d_3(t-t_0)^3 \quad (5)$$

式中, 变量  $t$  为当前快时间, 参数  $t_0, d_0, d_1, d_2, d_3$  由 SAR 图像元数据直接给出。

上述迭代公式在实际应用中收敛速度快, 定位效率高。

2) 根据误差方程的解算需要获取初始化参数。

所有的初始化参数都可以从 SAR 图像元数据中直接提取。几何校正中需要从元数据中提取的主要信息有 3 大类, 包括图像信息、时间信息和卫星星历信息。图像信息包括 SAR 图像的成像类型、行数、列数、行序、列序等, 时间信息主要是方位向起止时间和距离向起止时间, 卫星星历信息主要是距离矢量、速度矢量和时间向量。此外, 还需要其他一些辅助信息, 如坐标参考。

3) 逐像元求解空间坐标。

有了初始化参数之后就可以开始计算每个像元的空间坐标了。因为多普勒频率  $f_d$  主要受时间的影响, 所以计算的基本方法是以时间  $t$  为自变量, 求解  $t$  时刻的  $f_d$  与多普勒中心频率  $f_{dc}$  之间的差值。在迭代中不断调整  $t$ , 使差值减小。当差值小于某个阈值时, 就可以认为该时刻的空间坐标达到要求的定位精度。

几何校正的基本流程如图 2 所示。

图 2 中虚线框内为几何校正的关键步骤——间接定位。迭代的初始坐标对应的矢量  $\mathbf{P}_T$  由待定位像元的地理坐标计算出来, 时间  $t$  的初值可在成像时间范围任意选定。对于每一时刻  $t$ , 通过轨道插值计算出相应距离矢量  $\mathbf{P}_S$  和速度矢量  $\mathbf{V}_S$ 。有了  $\mathbf{P}_T, \mathbf{P}_S, \mathbf{V}_S$ , 就可以根据式(1)计算出  $f_d$ 。如果  $f_d$  与  $f_{dc}$  的差值小于阈值就结束迭代, 否则根据相差一个  $\Delta t$  的两个  $f_d$  的差值计算  $t$  的改正数, 修正  $t$  后继续迭代。迭代结束后的  $\mathbf{P}_T$  就是所求

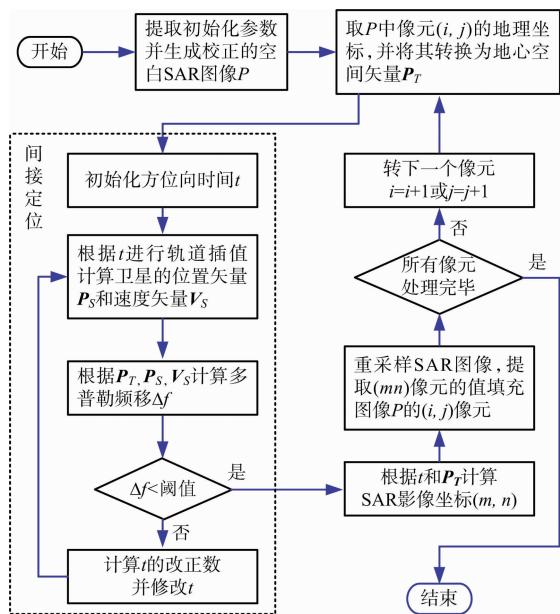


图 2 SAR 图像几何校正流程

像元的空间矢量。

4) 提取像元值, 生成最终的校正图像。

根据迭代结束时的  $t$  和  $\mathbf{P}_T$  反解出原 SAR 图像的像元坐标, 然后重采样获取像元值填充待校正 SAR 图像完成校正过程。

从整个校正过程来看, 对定位精度有直接影响的是高程的精度、轨道的精度和轨道插值的精度。但在几何校正中, 轨道的数据作为输入数据是以状态向量的形式由 SAR 图像直接给出的, 定位模型本身无法对其进行修正。

对整个校正精度有影响的还有坐标变换和图像重采样, 前者是地理坐标、空间坐标和像元坐标三者之间的转换, 相对误差很小, 后者常用的方法有最邻近、双线性和三次卷积法, 第 3 种方法已经能够保证足够高的精度。

## 2 几何校正实验及其分析

本文使用了一幅 SSC 类型的 TerraSAR-X 高分辨率图像作为实验对象, 原图及校正结果如图 3 所示。图像的成像模式为滑动聚束, 成像时间为 2015 年 6 月 17 日, 方位向分辨率为 1.1 m, 距离向分辨率为 0.6 m, 图像大小为 6 143 行 11 100 列。图像对应的地区为平原, 元数据给出的全景图像平均高程为 56.775 m。

实验中我们从图像中选取了 13 个点(图 3 中

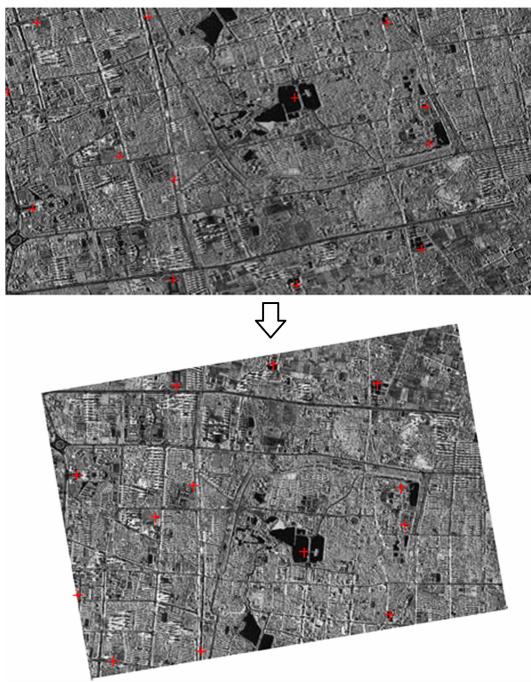


图3 实验用的 SAR 图像

用红色十字标出),采用手持 GPS(水平精度 2 cm)测量了各点的精确位置。实验利用前述 RD 定位模型对影像进行了几何校正,并以此为基础分析和比较了 3 种 DEM、不同参数的多项式直接插值算法和拉格朗日插值算法对定位精度的影响。

### 1) 基于 3 种 DEM 的定位实验及分析

对于高程来说,分辨率越高越好,最好是不低于 SAR 图像的分辨率,这样才能保证每个像元对应的高程精度。因为定位中各像元的高程多是通过重采样获得,采样点距离被采样点越近准确率越高,反之越低。显然,地形起伏越大,这种影响越显著,反之影响越小。

实验使用的 DEM 数据有 ASTGTM2, SRTM4.1 和 GMTED2010,它们的分辨率与实验用的 SAR 图像相差很大。但是,考虑到实验图像中的地形较平坦,它们也具有一定的适用性。3 种 DEM 在该图像区域的平均高程分别为 55.335, 55.669 和 55.416 m, 略小于图像元数据给出的值,理论上对定位精度有 1~2 个像元的影响。表 1 给出了采用这 3 种高程数据的定位实验结果。

从 SAR 图像成像的几何原理来看,对定位精度影响最大的应该是 DEM 的垂直精度。垂直精度越高,定位精度就越高,反之越低。而分辨率对重采样的精度影响大,从而间接影响垂直精度。

图 1 的定位结果符合这一预期。

表 1 方位向和距离向定位残差统计表 单位:像元

	ASTGTM2		SRTM41		GMTED2010	
	方位向	距离向	方位向	距离向	方位向	距离向
1	-3.077	-9.218	-3.079	-7.233	-3.08	-6.172
2	-7.328	-0.364	-7.326	-2.031	-7.327	-1.584
3	-3.247	-1.242	-3.243	-4.478	-3.245	-3.32
4	-1.887	-18.771	-1.89	-16.175	-1.893	-12.785
5	-4.706	-3.587	-4.707	-2.213	-4.705	-3.83
6	-1.083	-2.202	-1.078	-6.873	-1.076	-9.095
7	-1.788	-9.242	-1.793	-3.958	-1.79	-7.358
8	0.179	-8.107	0.186	-14.563	0.182	-11.179
9	-5.457	-14.151	-5.468	-3.3	-5.468	-3.958
10	8.993	-1.903	8.991	0.508	8.994	-2.206
11	0.348	-6.893	0.344	-3.195	0.346	-4.894
12	-1.089	-2.805	-1.084	-7.861	-1.081	-10.322
13	0.634	-7.397	0.633	-6.713	0.635	-8.728
RMSE	4.078	8.421	4.079	7.577	4.079	7.436

从残差的均方根误差 RMSE 来看,定位精度达到了预期目标。方位向定位精度大致为 4 个像元(约 5.5 m),距离向定位精度大致为 8 个像元(约 5 m),这个结果符合所用图像的高分辨率与地形较平坦这两个特点。

方位向和距离向的定位精度受 DEM 精度的影响差异也符合 SAR 图像的成像原理。方位向定位精度主要受时间影响,所以定位结果几乎不受 DEM 分辨率和精度的影响。而距离向定位精度受成像几何的影响大,因此受 DEM 的精度影响大。3 种 DEM 中,GMTED2010 垂直精度最高、SRTM4.1 次之、ASTGTM2 最差,表 1 的定位结果与这些差异一致。但是,因为地区较平坦和 GMTED2010 分辨率低的缘故,这种优势并不明显。

此外,从定位的整体结果来看,无论是方位向还是距离向,多数为负值。但是,理论上这些值的正负应该是随机的,这表明定位存在一定的系统误差。进一步的精度提升需要其他辅助手段,例如使用角反射器测定精确的地面控制点。

### 2) 基于不同的轨道插值方法的定位实验及分析

对于轨道插值来说,常用的有多项式直接法和拉格朗日法。前者还有幂次的区别,幂次越高,精度越高,但计算速度会随之降低。显然,只要精

度能够满足应用需要,没有必要过度追求高幂次。

从理论上讲,轨道插值的精度对图像的方位向和距离向都有影响。但是,实验表明不同插值法之间在方位向和距离向的差异小。本文采用了平面定位精度来比较它们的影响,测试了多项式直接法和拉格朗日法,前者又测试了二、三、四次幂的情况,各种方法的定位残差如表 2 所示。

表 2 平面定位残差统计表 m

	二次多项式		三次多项式		四次多项式		拉格朗日	
	dx	dy	dx	dy	dx	dy	dx	dy
1	3.716	39.538	-4.619	3.502	-4.619	3.502	-4.500	3.511
2	7.978	42.570	-0.294	6.524	-0.366	6.553	-0.310	6.569
3	5.685	39.226	-2.705	3.165	-2.517	3.370	-2.591	3.332
4	7.807	40.476	-1.452	4.429	-0.683	4.230	-0.820	4.328
5	0.022	41.153	-9.563	4.196	-8.674	4.028	-9.005	4.158
6	4.016	37.793	-5.171	1.938	-4.433	1.778	-4.538	1.739
7	6.334	37.323	-2.947	2.162	-2.174	1.979	-2.440	2.018
8	-1.022	37.621	-10.456	1.591	-9.643	1.419	-9.926	1.531
9	7.148	41.606	-1.655	5.196	-1.693	5.202	-1.444	5.109
10	7.467	28.763	-1.308	-7.616	-0.678	-7.960	-0.976	-7.811
11	6.190	35.696	-2.530	0.222	-2.530	0.222	-2.222	0.081
12	3.566	38.804	-5.731	1.971	-4.918	1.799	-5.187	1.851
13	4.041	35.526	-5.225	0.397	-4.529	0.210	-4.670	0.242
RMSE	5.563	38.313	5.099	3.943	4.602	3.957	4.728	3.948

定位结果大致符合预期,幂次越低,误差越大。从残差的均方根误差 RMSE 来看,只有二次多项式插值法出现了较大误差,不适合用在定位中。三次、四次多项式直接法和拉格朗日法均取得了较好的结果。但是,三次多项式直接法在  $x$  方向上的精度还有提升空间。拉格朗日法的精度高,只有四次多项式直接法与之接近。事实上,实验还进一步测试了五次和六次多项式直接法(表 2 中未列出),但  $x$  和  $y$  方向上精度都不再继续提升,而是围绕某个值上下波动,显然精度无法再继续提升。

从整体来看,四次多项式和拉格朗日插值法都适合用在 SAR 图像的高精度定位中。但前者的计算效率比后者高得多,更适合用在工程中。

此外,与方位向误差和距离向误差类似,三、四次多项式和拉格朗日法的  $x$  向偏差均为负值,  $y$  向几乎均为正值,同样表明定位存在一定的系统误差。

### 3 结束语

在基于 RD 模型的几何校正中,影响校正精度的因素有很多,本文着重研究了高程和轨道拟合与插值方法对定位精度的影响。从实验的结果来看,高程的垂直精度和分辨率对定位精度都有重要影响。在平原地区,影响定位精度的主要因素是垂直精度。这与同行们的研究结果一致,而分辨率则对起伏较大的地形定位精度影响大。显然,对于 ASTGTM2, SRTM4.1 和 GMTED2010 这 3 种高程来讲,实际应用中选择哪一种取决于地形和精度的要求,平坦的地区 GMTED2010 就足够了,而地形起伏较大的地区,可根据实测结果选择 ASTGTM2 或 SRTM4.1。卫星轨道的插值中,四次多项式直接法已经能够满足快速高精度定位的需要。进一步的精度提升还需要其他辅助手段,比如使用类似角反射器的工具测定精确的地面控制点,以此对定位结果进行整体修正。

此外,论文中的方法还在 Radarsat-2 图像和 COSMO-SkyMed 图像的几何校正中进行了验证,也取得了良好的效果。相对来说,Radarsat-2 图像的轨道精度最低,卫星状态矢量也只提供了 5 个,使用 RD 模型进行定位时残差并不稳定,即使用元数据中给出的控制点也一样,不过官方提供了一种有理多项式模型来弥补这一缺陷。实际应用中使用 RD 模型高精度定位还需要其他数据对轨道进行修正。而 TerraSAR-X 和 COSMO-SkyMed 的轨道精度都能满足直接使用 RD 模型高精度定位的要求,而且提供了更多的卫星状态向量,前者提供了 12 个,后者提供了 15 个。

### 参考文献:

- [1] CURLANDER J C. Location of Spaceborne SAR Imagery [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1982, GE-20(3):359-364.
- [2] SCHREIER G, KOSMANN D, ROTH A. Design Aspects and Implementation of a System for Geocoding Satellite SAR-Images [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1990, 45(1):1-16.
- [3] 周金萍,唐伶俐,李传荣. 星载 SAR 图像的两种实用化 R-D 定位模型及其精度比较 [J]. 遥感学报, 2001, 5(3):191-197.

(下转第 256 页)