

文章编号: 1001-1595(2010)06-0554-07

基于影像模拟的星载 SAR 影像正射纠正

张 过^{1,2}, 墙 强¹, 祝小勇², 唐新明²

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079; 2. 国家测绘局 卫星测绘应用中心, 北京 100830

Ortho-rectification of Satellite-borne SAR Image Based on Image Simulation

ZHANG Guo^{1,2}, QIANG Qiang¹, ZHU Xiaoyong², TANG Xinming²

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. State Bureau of Surveying and Mapping, Satellite Mapping Applications Center, Beijing 100830, China

Abstract: SAR image ortho-rectification in the areas where it is difficult to select points, such as hilly and mountainous terrain, often adopts the method based on the image simulation. The traditional method used the RD model to do the simulation but it needed to establish different modules to do the simulation and ortho-rectification for different SAR images. This paper proposed the method using the RPC model substituting the RD model to simulate the SAR image in order to address the problem and did the ortho-rectification with the simulated image. Also, this paper improved the method of obtaining gray information from the simulated SAR image. TerraSAR X images acquired over Sichuan were used as test data. Through the comparison between the actual accuracy and the theoretical accuracy of the ortho-rectification image, the theory and method proposed in this paper were verified.

Key words: image simulation; ortho-rectification; RPC model; satellite-borne SAR

摘 要: 对山地和高山地等选点困难地区的星载 SAR 影像进行正射纠正时, 通常采用距离多普勒模型进行影像模拟纠正。但由于每类星载 SAR 影像辅助数据不同, 所建立的距离多普勒模型均不相同, 从而导致针对每类星载 SAR 影像需要采用不同的软件模块进行模拟和正射纠正。针对该缺点, 采用 RPC 模型代替距离多普勒模型并利用改进的模拟影像灰度确定方式进行星载 SAR 影像模拟, 在此基础上建立模拟影像和真实 SAR 影像之间关系进行正射纠正。采用四川某地区的 TerraSAR X 影像, 将正射纠正的实际精度和理论精度进行对比, 验证本文提出的理论和方法。

关键词: 影像模拟; 正射纠正; RPC 模型; 星载 SAR

中图分类号: P237 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40601084, 40801178); 国家 863 计划重点项目(2007AA120203, 2009AA12Z145)

1 引言

20 世纪 80 年代初期, 星载成像雷达(shuttle imaging radar)SIR-A/B 等获取了大量全球 SAR 数据, 国内外学者开始研究 SAR 影像正射纠正的理论和方法。随后 ERS-1(1991)、JERS SAR(1992)、Radarsat SAR(1995)、ERS-2 SAR(1995)、Envisat A SAR(2002) 等星载 SAR 卫星的相继发射, 为 SAR 影像几何问题的研究提供了数据的保证。21 世纪初, TerraSAR-X(2007)、Cosmo Sky-Med(2007)、Radarsat-2(2007) 三颗高分辨率星载 SAR 的发射, 更是将星载 SAR 影像几何问题的研究推进到了一个新的阶段。

国外一些著名的 SAR 研究机构, 包括 ASF、JPL、DLR 等都发展了实用的正射纠正方法^[1]。自 1996 年来, 国内一些学者袁孝康、周金萍、张永红、陈尔学等陆续介绍了星载 SAR 正射纠正的各

种方法^[1]。

从国内外研究文献来看, 星载 SAR 影像正射纠正方法可以归结为两类^[1]: ① 由摄影测量学界发展的基于雷达共线方程的方法; ② 由 SAR 领域专家提出的基于距离-多普勒(RD)定位模型的方法。

目前国内外多采用 RD 定位模型进行正射纠正处理^[2-4], 其方法主要分两类: ① 在星载 SAR 影像和相关地形图和正射影像上选取控制点, 优化距离多普勒模型参数进行正射纠正, 该方法适用于平原和丘陵地等选点较容易区域的 SAR 影像; ② 对山地和高山地等选点困难地区, 则利用对应区域的数字高程模型(DEM)和 RD 模型参数来模拟星载 SAR 影像, 通过真实 SAR 影像和模拟 SAR 影像的配准, 建立真实 SAR 影像像点跟地面点的对应关系, 从而进行正射纠正。

在利用 RD 模型进行 SAR 影像模拟的纠正

处理中, Giorgio Franceschetti 提出基于 DEM 构建的地面模型并通过电磁散射计算获取模拟 SAR 图像^[56]; M. Gelautz 等人研究了山地 SAR 图像的模拟^[7], 并用 ERS-1、X-SAR 和 JERS-1 等卫星影像进行了模拟试验; 张永红等阐述了基于影像模拟的正射纠正方法的思想, 并以 Radarsat-1 作为试验数据生成了精度为 35 m 的纠正影像^[2]; 陈尔学同样介绍了基于影像模拟的正射纠正方法的思想, 并以 ERS-2 作为试验, 定位精度优于一个像素^[1]。

但是, 由于每类星载 SAR 影像辅助数据不同, 建立的 RD 模型均不相同, 从而导致针对每类星载 SAR 影像需要开发不同的模块; 此外, 在利用 RD 模型进行 SAR 影像模拟中, 用到的 RD 模型正变换或反变换, 均是一个迭代的过程, 模拟的速度比较慢, 最终影响了基于 SAR 影像模拟纠正方法的应用。

不同星载 SAR 卫星具有不同的产品模式, 但是各个产品模式的内涵一致, 可以分为: 原始信号数据(RAW)、单视斜距复影像产品(SLC)、地距产品(MGD)、系统正射纠正产品(GEC 产品)、精纠正产品(EGEC)、正射纠正产品(DOM)。针对 SLC 和 MGD 产品, 文献[10]中用 RPC 模型替代星载 SAR 的 RD 模型, 并用 ERS-1 数据进行了试验验证, 试验结果表明 RPC 模型替代 RD 模型精度优于 5% 像素; 针对 GEC 产品, 文献[9]建立了 GEC 产品的严密成像几何模型, 验证了 RPC 模型替代 GEC 严密成像几何模型的可行性, 并利用广州区域的 Terrasar-X-GEC 产品进行了正射纠正, 纠正精度满足 1: 10 000 的地形图精度。

本文用 RPC 模型代替距离多普勒模型并利用改进的模拟影像灰度确定方式进行星载 SAR 影像模拟, 在此基础上建立模拟影像和真实 SAR 影像之间关系进行正射纠正。

2 基于 RPC 模型的 SAR 影像模拟

RPC(rational polynomial coefficients) 模型是一种通用成像几何模型, 它具有良好的内插特性和连续性并独立于传感器和平台^[8]。RPC 模型将地面点大地坐标 $D(D_{lat}, D_{lon}, D_{hei})$ 与其对应的像点坐标 $d(l, s)$ 用比值多项式关联起来。为增强参数求解的稳定性, 将地面坐标和影像坐标标准化到 -1 和 1 之间。对于一个遥感影像, 定义如下比值多项式^[11]:

$$Y = \frac{N_L(P, L, H)}{D_L(P, L, H)}, \quad X = \frac{N_S(P, L, H)}{D_S(P, L, H)}$$

式中, $N_L(P, L, H)$ 、 $D_L(P, L, H)$ 、 $N_S(P, L, H)$ 、 $D_S(P, L, H)$ 为 P, L, H 的三次多项式。 (P, L, H) 为正则化的地面坐标; (X, Y) 为正则化的影像坐标。

对于 DEM 上的任意点, 利用 RPC 模型求解出对应的影像坐标, 并确定该像点对应的灰度值, 生成模拟影像。模拟过程以 DEM 以及覆盖 DEM 区域的真实 SAR 影像的元数据作为输入数据, 模拟 SAR 影像作为输出数据, 流程示意图如图 1 所示。

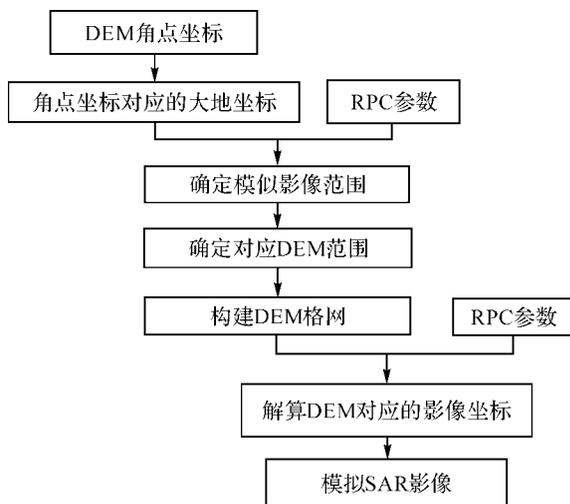


图 1 基于 RPC 模型的 SAR 影像模拟流程图

Fig. 1 Flow chart of SAR image simulation based on RPC model

具体流程如下:

1. 确定模拟影像的范围。提取 DEM 四个角点坐标并转换为 WGS-84 坐标系下的大地坐标, 利用 RPC 模型反变换^[11]解算各角点在真实 SAR 影像空间的像素坐标, 并结合真实 SAR 影像的大小, 确定模拟影像的大小。
2. 确定模拟影像对应的 DEM 的范围。对于步骤 1 中确定的模拟影像的 4 个角点, 利用 RPC 模型正变换^[11]投影到平均高程面, 获得 SAR 对应的 DEM 的精确范围。
3. DEM 内插。由于 DEM 的分辨率和真实 SAR 影像的分辨率不一致, 采用双线性内插方法对 DEM 进行内插, 获得和真实 SAR 影像分辨率一致的内插 DEM。
4. 模拟影像坐标解算。利用 RPC 模型求解内插 DEM 上任意一点的三维坐标对应的 SAR

影像的像素坐标。

5. 确定模拟影像灰度。对于 SAR 模拟影像像素灰度值的确定, Wivell 提出用 $k \cdot \sqrt{\sigma}$ 来表示, 其中 k 为常数, $\sqrt{\sigma}$ 为雷达散射截面^[12]; Small 采用 $\sqrt{\sigma}$ 表示模拟影像的灰度值^[13]; Guindon 提出用 k 来确定模拟影像的灰度值^[14]。但利用 RD 模型或 RPC 模型求解的模拟影像的像素坐标可能为非整数, 本文在 Guindon 确定模拟影像灰度值理论的基础上, 参考双线性内插的思想, 提出基于面积贡献大小的灰度确定方法。假设 DEM 分辨单元对应的模拟影像坐标为 (x, y) (如图 2 所示), 其中, (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 、 (x_4, y_4) 分别为模拟影像上 (x, y) 对应的邻域的像点坐标。对于模拟影像上的任意一点, 实际代表了一块地面区域, 因此对于像点 (x, y) , 其灰度来源于 4 个部分, 即为 4 个相邻像点的贡献值之和, 表现在图 2 中就是以 (x, y) 为中心的区域与其他 4 个相邻像点对应区域的面积。因此, (x, y) 像素对应的 4 个邻域的像点灰度用相交区域的大小表示。 (x, y) 对于 (x_1, y_1) 贡献值表现为图中灰色区域的大小, 即为 $(1-x+x_1) \cdot (1-y+y_1)$, 因此像素 (x_1, y_1) 的灰度为 $(1-x+x_1) \cdot (1-y+y_1)$ 。由于透视收缩、叠掩等现象的存在, 星载 SAR 影像上部分信息叠在一起形成局部较亮的区域, 在模拟影像上这些位置的像素灰度值为各地面点对该像素的贡献值之和。

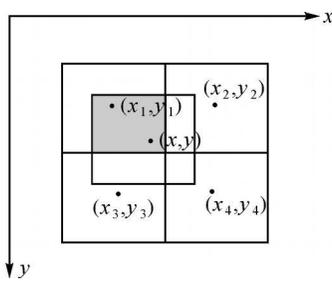


图 2 SAR 模拟影像灰度确定示意图

Fig. 2 Sketch map of gray ascertainment in SAR simulated image

3 基于影像模拟的星载 SAR 影像正射纠正

星载 SAR 影像的模拟过程建立了 DEM 坐标空间与模拟影像坐标空间的映射关系, 即

$$(X_m, Y_m, H_T)_{DEM} \leftarrow (sample, line)_{SIMU} \quad (1)$$

其中, $(X_m, Y_m, H_T)_{DEM}$ 表示 DEM 坐标系下的直

角坐标以及高程; $(sample, line)_{SIMU}$ 表示影像坐标空间中的模拟影像坐标。

根据文献[15], 脉冲重复频率 (PRF) 误差与飞行器时钟漂移产生方位向的线性定位误差; 信号传输时延误差与斜距误差产生距离向的线性定位误差; 平台星历误差分为沿轨误差、垂轨误差以及径向误差, 沿轨误差引起方位向的线性定位误差, 垂轨误差引起距离向的线性定位误差, 径向误差实际上是传感器的高度误差, 它在方位向与距离向引起的误差也都可近似地认为是线性误差。因此模拟影像与真实 SAR 影像之间只存在线性变形, 可以采用低阶多项式来消除。本文采用仿射变换来描述模拟影像与真实 SAR 影像之间的几何关系

$$\left. \begin{aligned} x &= a_0 + a_1 sample + a_2 line \\ y &= b_0 + b_1 sample + b_2 line \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ 为仿射变换参数; x, y 为真实 SAR 影像坐标, $sample, line$ 为模拟影像坐标。

根据式 (1)、式 (2) 建立起了 DEM 与真实 SAR 影像之间的几何关系 (如图 3 所示), 根据该流程进行逆运算, 采用间接纠正方式, 即利用双线性内插获得正射影像的灰度值, 从而获得正射纠正后的影像。

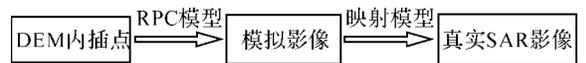


图 3 DEM 与真实 SAR 影像映射流程

Fig. 3 Flow chart from DEM to SAR image

4 试验

4.1 试验数据简介

本文选取四川地区 TerraSAR-X-GEC 影像作为试验数据, 试验区域为山地和高山地, 影像中心经纬度为 31.99°N、104.47°E, 轨道方向为升轨右视, 雷达入射角为 26.44°, 成像模式为 STRIP-MAP, 分辨率为 1.25 m, 极化方式为 HH。

该地区的地面控制数据采用 1 : 50 000 的 DEM, 格网间距为 25 m, 高程精度约为 5 m, 检查数据采用 1 : 50 000 的数字栅格地图 (digital raster graphic, DRG), 平面精度为约 25 m。

4.2 试验方法和结果分析

基于 RPC 模型的 SAR 影像模拟的正射纠正方法的基本流程为: 模拟影像生成、模拟影像与真实影像映射关系的构建和 SAR 影像正射纠正。

4.2.1 SAR 影像模拟

利用本文提出的 RPC 模型代替 RD 模型进行影像模拟的方法, 对试验数据进行影像模拟的试验。图 4 为原始 SAR 影像与模拟影像及对应的局部图。

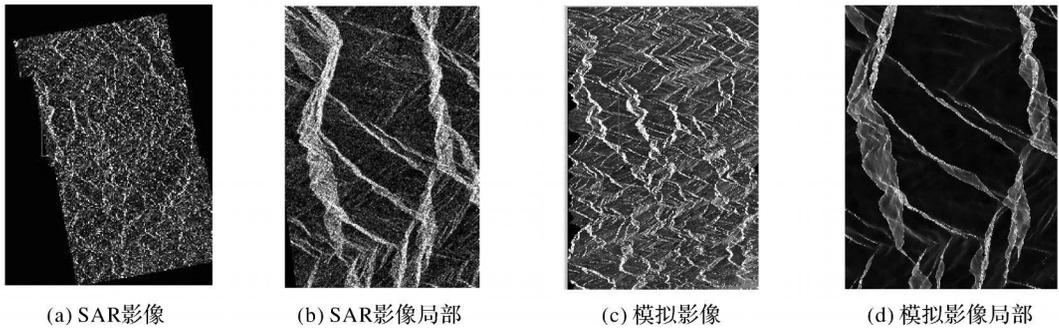


图 4 真实 SAR 影像及其局部

Fig. 4 The SAR image and local SAR image

的局部图。

从图 4 可以看出模拟影像与真实 SAR 影像具有相同的几何特征, 二者在视觉上一致, 地形脉络一致。

4.2.2 影像定向试验

采用人工辅助的半自动选点模式, 对数据选取了 8 组同名像点。试验中, 采用最小二乘方法利用其中 4 个同名点求解模拟 SAR 影像与真实 SAR 影像间的映射关系; 另外 4 个同名点用作检查点, 检查精度统计如表 1 所示。数据中控制点

平面精度为 0.6215 像素, 检查点平面精度为 1.8526 像素。

数据映射关系为

$$\left. \begin{aligned} x &= 26.4326 + 0.9981 \text{sample} + 0.0002 \text{line} \\ y &= -112.9711 - 0.0020 \text{sample} + 1.0008 \text{line} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

表 1 定向精度统计结果

Tab. 1 Statistical results in directional accuracy

/ 像素

点位类型	模拟影像		真实 SAR 影像		残差		
	sample	line	x	y	M_x	M_y	M_{xy}
控制点	22 294.665	49 122.219	22 317.500	49 000.500	- 0.4065	0.5056	0.6488
控制点	13 159.000	12 666.000	13 166.000	12 538.000	- 0.3720	0.4626	0.5936
控制点	20 829.000	13 479.000	20 816.000	13 336.000	0.3887	- 0.4834	0.6203
控制点	15 039.893	49 869.949	15 049.000	49 767.000	0.3898	- 0.4848	0.6221
检查点	11 653.000	34 344.000	11 658.000	34 235.500	0.6500	0.3548	0.7405
检查点	18 594.653	35 431.282	18 601.173	35 309.849	0.0001	0.0001	0.0001
检查点	13 472.427	20 545.467	13 480.000	20 425.000	- 2.4681	- 2.0130	3.1851
检查点	21 679.634	20 488.684	21 672.000	20 347.000	- 0.4903	1.6718	1.7422
	控制点中误差				0.3894	0.4844	0.6215
	检查点中误差				1.2995	1.3204	1.8526

注: 中误差的计算采用公式: $RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_r - P_s)^2 / N}$, 其中 N 为选取点的个数; P_r 为真实 SAR 影像坐标; P_s 为模拟影像坐标。

综合表 1, 利用 1: 50 000 的 DEM 对 Terra SAR-X-GEC 山区影像进行定向, 控制点精度优于 1 个像素, 检查点精度优于 2 个像素。

4.2.3 正射纠正

根据建立的 DEM 和真实 SAR 影像之间的映射关系, 采用间接纠正的方式对 Terra SAR-X-GEC 影像进行正射纠正, 正射纠正结果如图 5

所示。

通过图 5 可以看到, 由于透视收缩的原因, 真实 SAR 影像上的部分区域产生了重叠现象 (图 5 (d))。经正射纠正后, 这部分透视收缩区域被“拉开”(图 5 (b))。但是由于本文只针对单片进行正射纠正, 并不能对叠掩和阴影区域进行补偿, 因此, 经纠正的影像上有一些拉花的区域。

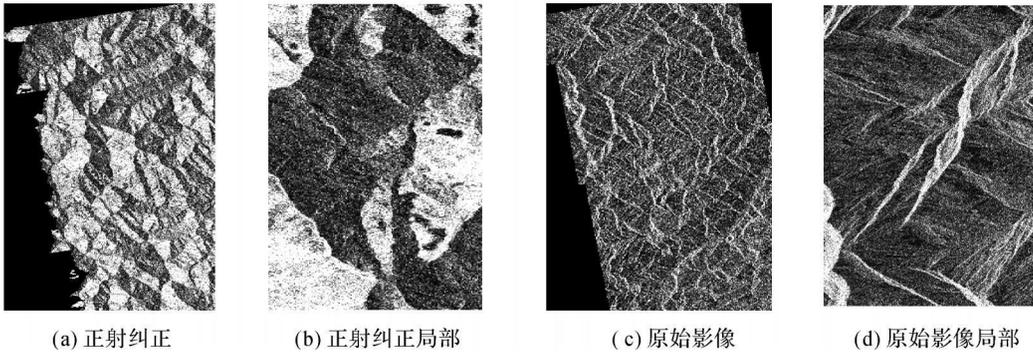


图5 纠正影像及其局部

Fig. 5 The whole and local rectificative image

4.2.4 正射纠正精度检查

针对星载 SAR 影像的正射纠正精度评价采用粗检查^[2]和精检查两种方式。

粗检查利用 DEM 坡度图和正射纠正后的星载 SAR 影像进行叠合分析,判断 DEM 坡度图和纠正后的 SAR 影像是否出现明显的旋转。图 6 是整个区域的 SAR 正射影像和对应 DEM 区域的坡度图。

对比 DEM 坡度图和纠正后的 SAR 影像,二者的地形走势一致,初步验证了纠正结果基本正确。

精检查是分别在正射纠正影像和 1:5 万 DRG 上选取 8 个同名点,统计结果如表 2,残差图如图 7 所示。

综合图 7 与表 2,平面最大残差为 7.412 5 m,平面精度为 6.370 2 m,残差分布具有随机性。

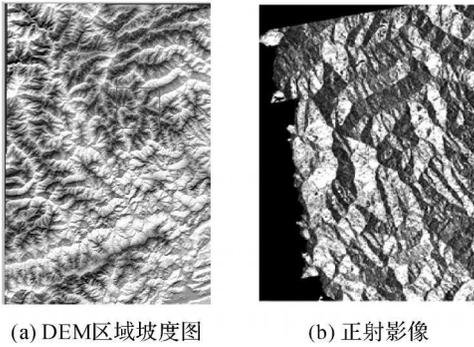


图6 DEM 坡度图与纠正 SAR 影像

Fig. 6 Gradient map of DEM and SAR rectificative image

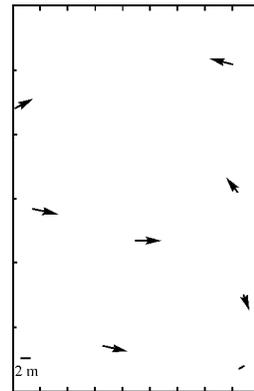


图7 点位残差图

Fig. 7 Residual error map

表2 正射纠正精度表
Tab. 2 The ortho rectification accuracy table

纠正影像		1: 5 万 DRG		残差		
X	Y	X	Y	ΔX	ΔY	平面
448 006. 193 0	3 560 938. 300 5	448 012. 202 3	3 560 935. 002 5	- 6. 009 3	3. 298 0	6. 854 8
432 159. 400 0	3 554 017. 028 6	432 163. 703 2	3 554 012. 120 0	4. 222 8	4. 908 6	6. 475 0
448 795. 200 0	3 524 920. 932 5	448 796. 400 2	3 524 927. 010 0	1. 176 7	- 6. 077 5	6. 190 3
448 377. 700 0	3 541 040. 662 6	448 375. 410 2	3 541 035. 102 0	- 2. 254 5	5. 560 6	6. 000 3
440 973. 100 0	3 533 451. 228 2	440 980. 301 0	3 533 451. 005 0	7. 172 9	0. 223 2	7. 176 3
433 455. 700 0	3 538 369. 974 3	433 462. 410 2	3 538 373. 050 2	6. 744 2	- 3. 075 9	7. 412 5
448 851. 300 0	3 513 923. 530 0	448 849. 332 1	3 513 925. 003 2	- 1. 950 6	- 1. 473 2	2. 444 5
438 614. 400 0	3 517 010. 428 3	438 620. 892 3	3 517 013. 010 2	6. 504 4	- 2. 581 9	6. 998 1
中误差				5. 043 0	3. 891 9	6. 370 2

依据本文提出的方法, 选取试验区域内另一景影像中心经纬度为 32.39° 、 104.31° ; 轨道方向为升轨右视, 雷达入射角为 23.84° , 成像模式为 STRIPMAP, 分辨率为 1.25 m , 极化方式为 HH 的 TerraSAR-X-GEC 影像作为试验数据进行试验并按本文的精度检验方法进行检验, 生成的正射影像平面最大残差为 7.6004 m , 平面精度为 6.0290 m , 残差分布亦具有随机性。

4.2.5 误差分析

影响星载 SAR 影像正射纠正精度的因素^[15]主要有: 传感器误差、平台星历误差、斜距误差以及地形起伏引起的误差。传感器误差包括: PRF 误差、信号传输误差和飞行器时钟漂移。平台星历误差可以分为沿轨误差、垂轨误差和径向误差。其中平台星历误差和地形引起的误差是误差的主要来源, 在正射纠正中可以消除^[14]。对于传感器误差与平台星历误差, 通过模拟影像与真实 SAR 影像之间的低阶多项式关系消除^[1]。对于地形引起的误差, 在正射纠正的采样过程中消除, 但是本文的试验采用 $1:50\,000$ 的 DEM 做控制来消除卫星系统和地形起伏引起的误差, 因此控制资料本身的误差引起的正射纠正误差是星载 SAR 正射纠正的理论误差的主项。

因此, 对于本文正射纠正的星载 SAR 影像, 其误差主要来源于低精度的 DEM 的高程误差和定向误差, 其中低精度 DEM 高程误差引起的纠正误差是主要误差源。如图 8 所示。

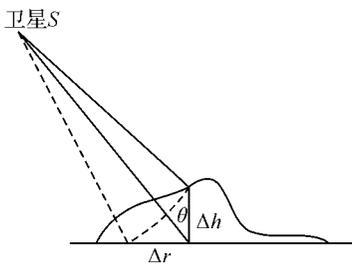


图 8 高程误差引起的定位误差^[16]

Fig. 8 The error of orientation by error of height

地面高程误差 Δh 引起的定位误差为

$$\Delta r = \frac{\Delta h}{\cos \theta} \quad (5)$$

其中, Δh 为地表高程误差; θ 为雷达入射角; Δr 为由于高程误差在斜距离方向引起的误差, 即定位误差。式(5)说明高程误差引起的定位误差与雷达入射角 θ 相关^[16]。本文采用 $1:50\,000$ 的 DEM 的高程精度估计为 5 m , 数据 5332 和 5335 的

雷达入射角分别为 26.44° 和 23.84° , 根据式(5)计算高程误差引起的定位误差分别为 5.58 m 和 5.24 m 。试验得到的正射纠正影像的精度为 7 m , 考虑到高程误差引起的 5 m 定位误差以及定向时的 2 个像素的误差, 证明实际纠正精度是合理的。

5 结 论

提出采用 RPC 模型进行星载 SAR 影像模拟并进行正射纠正的理论和方法, 利用四川某地区的 TerraSAR-X-GEC 影像进行验证, 得到如下结论:

1. 提出基于 RPC 模型星载 SAR 影像模拟进行正射纠正方法是可行的。
2. 提出的基于面积贡献大小的星载 SAR 模拟影像灰度确定方法有效地解决了在像点坐标为非整数时的灰度确定问题, 利用该灰度确定方法制作的模拟影像与原始 SAR 影像具有相似的几何特征。
3. 采用 $1:50\,000$ DEM 进行 TerraSAR-X 模拟纠正, 利用 $1:50\,000$ DRG 进行检查, 纠正精度为 7 m , 而该数据的理论精度为 5.5 m , 因此本文采用 RPC 模型进行星载 SAR 影像的模拟纠正的结果合理。
4. 由于本文针对单片正射纠正, 并不能对叠掩和阴影进行补偿, 因此生成的正射影像上会存在“拉花”现象。

参考文献:

- [1] CHEN Erxue. Study on Orthorectification Methodology of Spaceborne Synthetic Aperture Radar Imagery [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2004: 11-12. (陈尔学. 星载合成孔径雷达影像正射纠正方法研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2004: 11-12.)
- [2] ZHANG Yonghong, ZHANG Jixian, LIN Zongjian. Geometric Rectification of SAR Images[J]. Acta Geodaetica et Cartographica, 2002, 31(2): 134-138. (张永红, 张继贤, 林宗坚. SAR 影像几何纠正[J]. 测绘学报, 2002, 31(2): 134-138.)
- [3] JOHNSEN H, LAUKNES L, GUNERUSSEN T. Geocoding of Fast-delivery ERS-1 SAR Image Mode Product Using DEM Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(11): 1957-1968.
- [4] 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.

- [5] FRANCESCHETTI G, MIGLIACCIO M, RICCIO D, et al. SARAS: a Synthetic Aperture Radar Raw Signal Simulator[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(1): 110-123.
- [6] FRANCESCHETTI G, MIGLIACCIO M, RICCIO D. SAR Raw Signal Simulation of Actual Groundsites Described in Terms of Sparse Input Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(6): 1160-1168.
- [7] GELAUTZ M, FRICK H, RAGGAM J, et al. SAR Image Simulation and Analysis of Alpine Terrain[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998 (53): 17-38.
- [8] ZHANG Yongsheng, GONG Danchao, LIU Jun, et al. The Application of High Resolution Satellite: the Imaging Model, Processing Algorithm & Application Technology [M]. Beijing: Science Press, 2004: 30-49. (张永生, 巩丹超, 刘军, 等. 高分辨率遥感卫星应用: 成像模型、处理算法及应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 30-49.)
- [9] ZHANG Guo, ZHU Yanmin, FEI Wenbo, et al. Study of High Resolution SAR-GEC Image Rigorous Geometrical Model and Its Application[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2009, (5): 12-15. (张过, 祝彦敏, 费文波, 等. 高分辨率 SAR-GEC 影像严密成像几何模型及其应用研究[J]. 测绘通报, 2009, (5): 12-15.)
- [10] ZHANG Guo, LI Deren. The Algorithm of Computation RPC Model's Parameters for Satellite Imagery[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(12): 2080-2088. (张过, 李德仁. 卫星遥感影像 RPC 求解算法研究[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(12): 2080-2088.)
- [11] ZHANG Guo. Rectification for High Resolution Remote Sensing Image under Lack of Ground Control Points[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (张过. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像几何纠正[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.)
- [12] WIVELL C E, STEINWAND D R, KELLY G G, et al. Evaluation of Terrain Models for the Geocoding and Terrain Correction of Synthetic Aperture Radar (SAR) Images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(6): 1137-1144.
- [13] SMALL D, HOLECZ F, MEIER E, et al. Absolute Radiometric Correction in Rugged Terrain: a Plea for Integrated Radar Brightness [C] // Proceedings of IGARSS'98. Seattle: IEEE, 1998: 330-332.
- [14] GUINDON B, ADAIR M. Analytic Formulation of Spaceborne SAR Image Geocoding and "Value added" Products Generation Procedures Using Digital Elevation Data[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1992, 18(1): 2-12.
- [15] CURLANDER J C, McDONOUGH R N. Synthetic Aperture Radar: System and Signal Processing[M]. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [16] ZHU Xiaoyong. Geometric Rectification of Spaceborne SAR Image Based on RPC Model[D]. Wuhan: Wuhan University, 2008. (祝小勇. 基于 RPC 的星载 SAR 影像几何纠正[D]. 武汉: 武汉大学, 2008.)

(责任编辑: 雷秀丽)

收稿日期: 2009-07-24

修回日期: 2010-04-21

第一作者简介: 张过(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事航天摄影测量的理论与应用研究。

First author: ZHANG Guo(1976—), male, PhD, associate professor, majors in theory and application research of spaceborne photogrammetry.

E-mail: guozhang@whu.edu.cn