

一种新的星载 SAR 图像定位方法的研究

李立钢^{①②③} 尤红建^① 彭海良^① 吴一戎^① 刘波^{②④} 周强^{①③}

^①(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室 北京 100080)

^②(中国科学院西安光学精密机械研究所 西安 710068)

^③(中国科学院研究生院 北京 100039)

^④(中国科学院空间中心 北京 100080)

摘要: 该文应用摄影测量理论, 将星载 SAR 图像近似看作一个画幅式投影传感器获取的等效影像, 从而对星载 SAR 共线方程进行改进, 提出了一种新的定位模型。文中选用一景北京地区 RadarSat 影像进行实验, 结果表明, 该模型表达简单, 解算稳定, 不需要已知轨道信息和成像参数且定位精度保持在像素级范围之内。

关键词: 星载 SAR; 定位; 画幅式

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1441-04

A New Method to Locate Satellite SAR Imagery

Li Li-gang^{①②③} You Hong-jian^① Peng Hai-liang^① Wu Yi-rong^① Liu Bo^{②④} Zhou Qiang^{①③}

^①(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

^③(Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

^④(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: In this paper, the satellite SAR imagery is regarded as an image which is acquired from the frame projection sensor approximately based on photogrammetry theory. The satellite SAR collinearity equation is revised and a new location model is proposed. As an example, the RadarSat Imagery is tested. Experiment result demonstrates the new model formulation is simple and the resolution is stable without any orbit ephemeris and imaging parameters, and also location accuracy reaches pixels.

Key words: Satellite SAR; Location; Frame projection

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种全天时、全天候的微波成像雷达,具有良好的分辨率,不仅可以详细、较准确地观测地形、地貌,获取地球表面的信息,还可以透过一定地表和自然植被收集其下的信息。合成孔径雷达已经成为对地观测的一种有效手段^[1]。星载合成孔径雷达,顾名思义,即将合成孔径雷达搭载在卫星上从而实现对地面的有效观测。近年来伴随着航天摄影测量和遥感技术发展,星载 SAR 获取的遥感影像极为丰富,如: RadarSat 影像, ENVISAT 影像等。

星载 SAR 影像在应用前,必须进行精确地理定位。传统的基于地面控制点的多项式定位模型回避了成像的几何过程,而直接对影像的变形本身进行数学模拟,适用于地面相对平坦的情况^[2];基于地面控制点的 R-D 校正模型^[3]考虑了 SAR 图像本身的成像特点,因而精度较高,但是模型形式相对复杂且定向参数容易出现线性相关性,导致实际应

用的不便。是否能够推出一种形式简单、求解稳定、用少的控制点即可达到较高精度的星载 SAR 图像定位方法成为人们研究的一个热点。本文提出一种新的星载 SAR 图像定位方法,应用摄影测量理论,将星载 SAR 图像看成一个画幅式中心投影传感器获取的等效图像,对星载 SAR 图像的共线方程模型进行了改进,从而得到一种形式简单、校正精度较高的定位方法。

2 星载 SAR 成像原理

星载合成孔径雷达(SAR)在飞行中,向垂直轨道方向的一侧或两侧发射微波,把从目标返回的后向散射波以图像的形式记录下来,并按照回波返回的时间顺序排列,构成一条距离扫描线,通过平台的前进,扫描面在地表面移动,实现方位向扫描,获得一系列扫描线,由若干条距离扫描线构成一幅 SAR 图像。星载 SAR 图像是地面目标的距离投影,一般可分为斜距图像和地距图像。斜距图像记录了天线至地面目标之间的斜距距离;而地距图像则反映了天线到地面目标

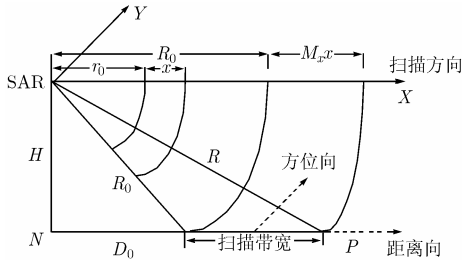


图 1 SAR 成像几何关系

之间的水平距离。图 1 示意了星载 SAR 图像的成像几何关系^[4]。图 1 中， H 为航高， R_0 为扫描延迟， r_0 为扫描延迟在图像上的投影， R 为地面点 P 到天线中心的斜距， x 为地面点 P 在斜距显示的 SAR 图像上的像点坐标， M_x 为距离向比例尺。

由于雷达侧向扫描平台恒垂直于遥感平台运动的速度矢量，则有零多普勒条件方程：

$$V_x(X_P - X_S) + V_y(Y_P - Y_S) + V_z(Z_P - Z_S) = 0 \quad (1)$$

式(1)中 (X_P, Y_P, Z_P) 为地面点的坐标； (X_S, Y_S, Z_S) 为瞬时天线中心的坐标； (V_x, V_y, V_z) 则表示了平台的瞬时速度向量。

此外，由 SAR 成像关系，设斜距为 R ，即有斜距方程：

$$R = M_x(r_0 + x) = \sqrt{(X_P - X_S)^2 + (Y_P - Y_S)^2 + (Z_P - Z_S)^2} \quad (2)$$

式(1)和式(2)构成了用距离和多普勒条件表示的 SAR 图像的成像方程式。

3 新的定位方法

基于传统的摄影测量共线方程原理，SAR 图像可以看作是一个多中心投影的传感器获取的等效影像，目标点、表像点和天线中心位于同一条直线上^[4]，如图 2 所示。

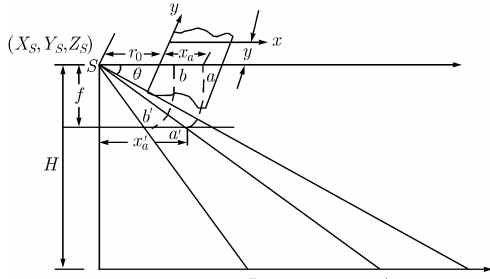


图 2 星载 SAR 多中心投影示意图

设目标点 A 的地面坐标为 (X_A, Y_A, Z_A) ，目标点 A 在斜距 SAR 图像上的像点为 a ，像点坐标为 (x_a, y_a) ， $(X_{S_i}, Y_{S_i}, Z_{S_i})$ 是像点 a 所对应的第 i 条扫描线的天线中心地面坐标； f 为等效焦距； r_0 为影像上的扫描延迟； θ 为对应目标 A 的俯角； a' 是 A 点在等效的地距影像上的像点，相应的像点坐标为 (x'_a, y'_a) ，则 x_a 和 x'_a 之间关系可表示为

$$x'_a = \sqrt{(r_0 + x_a)^2 \cos \theta} \quad (3)$$

这时，天线中心 S_i ，像点 a' 和地面点 A 严格满足共线关系，即有 SAR 图像的共线方程式：

$$\left. \begin{aligned} x'_a &= \sqrt{(r_0 + x_a)^2 \cos \theta} \\ &= -f \frac{a_1(X_A - X_{S_i}) + b_1(Y_A - Y_{S_i}) + c_1(Z_A - Z_{S_i})}{a_3(X_A - X_{S_i}) + b_3(Y_A - Y_{S_i}) + c_3(Z_A - Z_{S_i})} \\ y'_a &= y_a = 0 \\ &= -f \frac{a_2(X_A - X_{S_i}) + b_2(Y_A - Y_{S_i}) + c_2(Z_A - Z_{S_i})}{a_3(X_A - X_{S_i}) + b_3(Y_A - Y_{S_i}) + c_3(Z_A - Z_{S_i})} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)中， $a_i, b_i, c_i (i = 1, 2, 3)$ 是像点 a 对应的扫描线的姿态参数 $\varphi_a, \omega_a, \kappa_a$ 构成的方向余弦。

事实上，对于图幅不大的星载 SAR 图像，可以将其从多中心投影的传感器获取的等效影像近似理解为画幅式中心投影传感器获取的等效影像；同时，鉴于卫星飞行平稳，离成像区域比较远，一般达到几百公里到上千公里，于是得出如下合理假设。

假设 1 星载 SAR 图像是框幅式中心投影传感器获取的等效影像，即对一幅星载 SAR 图像而言，天线中心位置对应的地面坐标及其姿态参数是一个常数。

假设 2 星载 SAR 图像对应的天线俯角变化非常小，可理解为一个常数。

基于以上假设，我们对式(4)进行改化，即得到星载 SAR 图像的斜距图像坐标与地面坐标的对应关系：

$$\left. \begin{aligned} x_a &= -\frac{f}{\sqrt{\cos \theta}} \frac{a_1(X_A - X_S) + b_1(Y_A - Y_S) + c_1(Z_A - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)} - r_0 \\ y_a &= -f \frac{a_2(X_A - X_S) + b_2(Y_A - Y_S) + c_2(Z_A - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将上式合并同类项，即可得到下式：

$$\left. \begin{aligned} x_a &= \frac{L_1 X_A + L_2 Y_A + L_3 Z_A + L_4}{L_9 X_A + L_{10} Y_A + L_{11} Z_A + 1} \\ y_a &= \frac{L_5 X_A + L_6 Y_A + L_7 Z_A + L_8}{L_9 X_A + L_{10} Y_A + L_{11} Z_A + 1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} L_1 &= a_1(-f/\sqrt{\cos \theta} - r_0)/(-a_3 X_S - b_3 Y_S - c_3 Z_S) \\ L_2 &= b_1(-f/\sqrt{\cos \theta} - r_0)/(-a_3 X_S - b_3 Y_S - c_3 Z_S) \\ L_3 &= c_1(-f/\sqrt{\cos \theta} - r_0)/(-a_3 X_S - b_3 Y_S - c_3 Z_S) \\ L_4 &= (f/\sqrt{\cos \theta} + r_0)(a_1 X_S + b_1 Y_S + c_1 Z_S)/(-a_3 X_S - b_3 Y_S - c_3 Z_S) \\ L_5 &= -a_2 f/(-a_3 X_S - b_3 Y_S - c_3 Z_S) \\ L_6 &= -b_2 f/(-a_3 X_S - b_3 Y_S - c_3 Z_S) \\ L_7 &= -c_2 f/(-a_3 X_S - b_3 Y_S - c_3 Z_S) \\ L_8 &= (a_2 f X_S + b_2 f Y_S + c_2 f Z_S)/(-a_3 X_S - b_3 Y_S - c_3 Z_S) \\ L_9 &= a_3/(-a_3 X_S - b_3 Y_S - c_3 Z_S) \\ L_{10} &= b_3/(-a_3 X_S - b_3 Y_S - c_3 Z_S) \\ L_{11} &= c_3/(-a_3 X_S - b_3 Y_S - c_3 Z_S) \end{aligned}$$

式(6)给出了新的星载 SAR 图像的定位模型，从该模型

的表达形式上可以看出,未知参数 $L_i(i = 1 \sim 11)$ 的求解只需要6个控制点,同时新的定位方法也不需要知道待定位SAR图像的轨道信息及成像参数,从而大大简化了星载SAR图像的定位。

4 实验结果及分析

基于以上理论,本文选用一幅北京地区的RaderSat斜距影像进行实验。影像大小为 7555×11378 , 图像分辨率为10m; 控制点采自1:50000地形图上且均匀分布,固定12个检查点以检验比较不同定位模型不同控制点数的定位精度。实验中选用了常用的一般三次多项式模型(3rd Polynomial Model), 距离-多普勒模型(R-D Model)及本文提出的新模型,表1示意了3种校正模型不同控制点数的定位精度;图3给出了3种校正模型的检查点定位精度变化曲线。

从表1和图3可以看出,一般三次多项式模型在地形平坦地区能取得较好的定位精度;距离-多普勒模型定位精度变化平稳,用较少的控制点即可得到较高的定位精度,但在校正过程中需要已知成像参数;本文提出的定位模型,虽然在控制点较少时定位误差较大,但其表达形式简单,且在校

正过程中不许要知道任何轨道信息和成像参数,定位精度收敛快,因而在实际中有一定的应用价值。新的定位模型与其它两种模型的综合比较如表2所示。

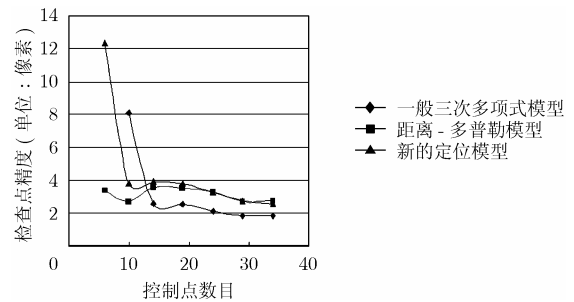


图3 校正模型的检查点定位精度变化曲线

5 结束语

本文基于摄影测量的共线方程理论,将星载SAR图像在有限范围内看成画幅式投影传感器获取的等效影像,从而提出一种新的星载SAR图像定位模型。该模型解算简单,求解稳定,不需要知道卫星轨道信息和成像参数且定位精度较高,因而可以作为SAR图像的一种有效定位模型在实际中应用。

表1 RadarSat 影像的定位精度(单位:像素)

定位模型	控制点数目	控制点 X 轴中误差	控制点 Y 轴中误差	检查点数目	检查点 X 轴中误差	检查点 Y 轴中误差
一般三次多项式	10	0.00	0.00	12	8.85	7.32
	14	0.72	0.83		2.75	2.33
	19	0.89	1.29		1.85	3.13
	24	0.83	1.44		1.82	2.42
	29	1.01	1.54		1.88	1.73
	34	1.08	1.50		1.78	1.86
距离-多普勒模型	6	0.64	1.71	12	4.67	2.05
	10	1.60	2.51		2.69	2.65
	14	1.74	2.54		3.85	3.23
	19	2.02	2.64		3.73	3.25
	24	2.12	2.48		3.56	2.89
	29	2.34	2.39		2.45	2.93
本文的定位模型	34	2.31	2.33	12	2.40	3.09
	6	1.01	2.24		14.2	10.5
	10	1.52	2.75		2.19	5.33
	14	1.47	2.76		2.12	5.67
	19	1.71	2.96		1.88	5.68
	24	1.73	3.25		1.79	4.67
	29	1.63	3.89	1.97	3.47	
	34	1.72	3.99	1.91	3.15	

表 2 星载 SAR 图像定位模型综合比较

模型	对轨道和传感器 参数要求	算法复杂性 (影像像素个数为 N)	必须的控制 点数目	精度及其性能
一般三次 多项式	无	(18 次加法+40 次 乘法) $\times N$	10	平坦地区精度较高, 解算复杂, 计算量大
距离-多普 勒模型	近地点斜距、雷达波长、斜距分辨率、多普勒平 移参数, 一般都已知或在成像中获取	迭代求解	6	精度较高, 考虑了雷达成像的机理, 但定 向参数可能存在强相关性
本文定位 模型	无	(9 次加法+11 次 乘法) $\times N$	6	精度较高, 解算简单、求解稳定, 不需要 知道卫星轨道信息和成像参数

参 考 文 献

- [1] 魏钟铨著. 合成孔径雷达卫星. 北京: 科学出版社, 2001: 252-253.
- [2] 张永生, 巩丹超等著. 高分辨率遥感卫星应用-成像模型、处理算法及应用技术. 北京: 科学出版社, 2004 年 5 月: 30-31.
- [3] 尤红建, 丁赤飏, 吴一戎. 基于 GCP/DEM 的星载 SAR 图像几何精确校正研究. 电子与信息学报, 2004, 26(增刊): 283-288.
- You Hong-jian, Ding Chi-biao, and Wu Yi-rong. Rectifying space-borne SAR image precisely based on GCP/DEM. *Journal of electronics & information technology*, 2004, 26(Suppl): 283-288.
- [4] 汤国安, 张友顺, 刘咏梅等著. 遥感数字图像处理. 北京: 科学出版社, 2004 年 3 月: 98-100.
- 李立钢: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为遥感图像处理.
- 尤红建: 男 1969 年生, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为遥感图像处理、GPS 应用.
- 彭海良: 男, 1939 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为雷达系统和信号处理、干涉合成孔径雷达系统设计和研究.
- 吴一戎: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为信号与信息处理.
- 刘 波: 男, 1957 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为图像处理、动目标跟踪.
- 周 强: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为遥感图像处理.