

# 无地面控制点的星载 SAR 影像直接对地定位研究

杨 杰<sup>1</sup> 潘 斌<sup>2</sup> 李德仁<sup>1</sup> 钟永正<sup>3</sup>

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(3 北京中软资源信息科技服务公司, 北京市海淀区学院南路 55 号, 100081)

**摘 要:** 针对星载合成孔径雷达(SAR)对地面目标的定位问题, 分析了在无地面控制点的情况下, 利用距离多普勒(RD)模型和地球模型进行对地定位的理论与方法, 给出了在无地面控制点(GCP)而有数字高程模型的情况下利用 RD 模型进行对地定位的求解方法。用天津地区 ERS-1 数据进行实验, 其结果与当地地形图进行比较, 精度在 50 m 以内, 表明该文提出的方法是正确、可行的。

**关键词:** 合成孔径雷达; 距离多普勒(RD)模型; 数字高程模型

**中图法分类号:** P237.3

通常情况下, 对没有控制点的境外目标实施对地定位是难以达到的, 而采用基于星载 SAR 状态矢量的直接对地定位方法可以满足这一要求。对境内一些无控制点的区域, 在精度允许的条件下, 也可采用直接对地定位的方法。

在 SAR 中, 直接利用真实天线的方向信息很困难, 因为只有通过信号处理(成像)才能形成方向束高度锐化的合成孔径波束, 从而得到高分辨率影像。因此, 与普通雷达比较, SAR 对目标的对地定位方法有许多不同之处。与光学影像相比, 首先, 在 SAR 影像上由高程引起的几何位置误差要大得多, 如在相同观测角的情况下, 高程引起的 SAR 几何位置误差约是 SPOT 卫星影像的 4~5 倍; 而在同等条件下的 Landsat 和 SPOT 影像的误差主要由系统误差引起<sup>[1,2]</sup>。这些几何畸变将引起与地形相关的对地入射角和压缩距离的变化, 从而引起 SAR 影像的辐射变化。其次, 对于 SAR 来说, 地球自转、曲率、卫星姿态校正与光学遥感影像也截然不同, SAR 通过距离 Doppler 分辨率公式的方式成像, 雷达所收集到的信号来自天线照射区域的无数个目标, 而且一个目标会被照射很多次, 这使得 SAR 必须经过一个成像处理的中间过程才能得到影像。地球自转、曲率、卫

星姿态变化引起回波信号在频率上出现偏移, 可以用 Doppler 方程确定波束中心, 这比用天线指向参数确定波束中心精确得多<sup>[3]</sup>。因此, 利用 Doppler 方程, 不需卫星姿态参数就可以正确成像。此外, 利用 Doppler 方程、雷达距离方程和地球模型还可以校正地球自转、曲率、卫星姿态变化引起的影像几何变形。

SAR 影像的像素对地定位方法通常有两种。一种方法是在 SAR 影像中找出一些位置已经确定的参考点, 然后推导影像像元相对于这些点的位置, 从而实现 SAR 影像的像素对地定位; 另外一种是无地面控制点的 SAR 影像像素对地定位方法<sup>[8,9]</sup>, 该方法实现了用于海洋冰面运动的监测, 精度可达到 200 m, 但该模型没有任何实用的求解方法。由此可见, 对于 SAR 卫星, 实现无控制或少量控制的 SAR 影像精纠正和定位都必须从 SAR 的成像几何特性着手。

目前, 国内对 SAR 影像的几何纠正, 一部分采用控制点, 依靠多项式纠正的方法对 SAR 影像进行了几何纠正和自动镶嵌<sup>[4]</sup>; 另外一部分在对星载 SAR 影像的几何纠正中, 考虑了地面高程对 SAR 几何纠正的影响<sup>[5,6]</sup>, 但没解决 DEM 数据如何和 SAR 影像的配准问题。总体而言, 以往研

收稿日期: 2005-11-16。

项目来源: 国家 973 计划资助项目(2003CB415205); 测绘遥感信息工程国家重点实验室开放研究基金资助项目(904151695); “龙计划”资助项目。

究大多停留在依靠控制点进行几何纠正的基础上,并没有按照 SAR 的实际构像几何关系来建立构像模型,进行几何纠正。

### 1 SAR 影像的对地定位构像模型

目前,国内外常用的雷达图像构像数学模型主要有 Leberl 公式(R-D 模型)与 Konecny 平距公式。前者从严格的 SAR 成像原理来构建,理论上是完全成立的;后者是对 SAR 成像模型近似等效为中心投影模型来处理,并不是严格的构像模型。下面主要对第一种构像模型进行分析实验。

#### 1.1 地球模型方程

地球模型方程为:

$$\frac{x_i^2 + y_i^2}{(R_e + h)^2} + \frac{z_i^2}{R_p^2} = 1 \quad (1)$$

式中,  $x_i, y_i, z_i$  分别为目标在  $x, y, z$  轴分量的位置;  $R_e$  为地球在赤道的半径;  $R_p$  为地球的极半径;  $f$  为扁平化因子;  $h$  为相对于所假定模型的目标高程。

#### 1.2 SAR Doppler 方程

点目标的回波数据在频率上出现偏移,偏移量正比于卫星与目标间相对速度,由 Doppler 方程给出:

$$f_D = \frac{2}{\lambda R} (V_s - V_t) \cdot (R_s - R_t) \quad (2)$$

式中,  $f_D$  为 Doppler 频率;  $\lambda$  为雷达波长;  $V_s$  及  $V_t$  为卫星与目标的速度矢量;  $R_s$  及  $R_t$  分别为卫星和目标的位置向量。其中目标速度可以根据目标位置利用地球自转角速度  $\omega_e$  算出:

$$V_t = \omega_e \times R_t \quad (3)$$

需要指出的是,用 Doppler 方程而不采用雷达天线的指向确定波段中心具有更高精度。使用天线指向确定雷达波束与地表截面时,必然受波束发射过程中天线的姿态影响,其精度依赖于天线姿态控制精度。例如对 Seasat 而言,姿态精度为  $\pm 0.5^\circ$ ,使用这一方法引起的对地定位误差高达 4 km。相反,这里的姿态信息隐含于 Doppler 频移中。

#### 1.3 SAR 距离方程

传感器到 SAR 影像中第  $i$  行第  $j$  列的像素之间的斜距为:

$$R_{ij} = \left[ (R_s - R_t) (R_s + R_t) \right]^{1/2} \quad (4)$$

同时,传感器到地面像素之间的斜距  $R_{i,j}$  可以由测量雷达回波信号的时间延迟  $\tau$  确定:

$$R_{i,j} = \frac{c\tau}{2} \quad (5)$$

其中,  $c$  为电磁波传播速度。联立求解方程式(2)~式(5),可得第  $i$  行第  $j$  列像素的地面位置。

图 1 给出了星载 SAR 在地心坐标系中像素对地定位的原理,图中的 SAR 等多普勒线是多普勒中心频率方程式(2)与地球模型方程(1)在地面的交线,它与给定点斜距方程式(5)的交点为该目标的位置。

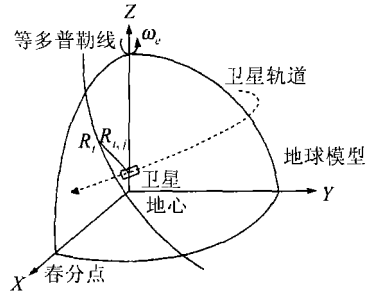


图 1 点目标定位坐标系

Fig. 1 Geocentric Coordinate System for Pixel Location

分析可知,对对地定位而言,  $R_s, V_t$  是未知数,称为 SAR 图像的外部定向参数,如果有地面控制点,则可反算出来;如果没有控制点,则可以通过卫星轨道数据直接求解。

## 2 无控制点的 SAR 对地定位实现及结果

显然,式(1)、式(2)、式(4)构成的是非线性函数,不能直接用于平差计算。为此,要推导出其一次项近似式,一般线性化是将非线性函数按泰勒级数展开来实现。

#### 2.1 无控制点及 DEM 的实现步骤

1) 根据 ERS-1 的星历数据提供的该景范围内的 5 个点的卫星位置矢量(地心坐标系)、第一点的时间和两点之间的时间间隔,按下式拟合出时间与位置的三次曲线。对应时刻  $V_s$  可由此内插求得,  $R_s$  可通过头文件中的回波时延得到:

$$\begin{cases} X_s = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 \\ Y_s = b_1 + b_2 t + b_3 t^2 \\ Z_s = c_1 + c_2 t + c_3 t^2 \end{cases} \quad (6)$$

2) 根据 ERS 数据提供的该景成像的第一行和最后一行的成像时间,通过这些参数,得到每行成像的时间间隔。

3) 读取图像的像点坐标,得到该行的成像时间,进而得到每一成像行的卫星轨道位置和速度矢量。

4) 根据式(1)、式(2)、式(4)求得 SAR 影像中指定点的初始坐标  $(X, Y, Z)$ 。

5) 读出  $h$  值(初始  $h$  来源于 USGS 提供的  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  格网的全球 DEM, 转化为地心坐标系坐标), 得到地面点坐标的改正数。将改正数加上  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ , 循环迭代, 直到小于给定限差为止。最后得到地面点地心坐标系坐标。

6) 将求得的地面点坐标转换为地心坐标, 然后再转换到北京 54 坐标系下。

在有地面 DEM 的情况下, 仅需对 4) 进行修

改, 反复迭代, 直到求得的高程误差和给定的 DEM 误差小于给定阈值, 停止迭代。

### 2.2 实验结果

表 1 为天津市 1997 年 10 月 18 日 ERS-1 数据实验结果(卫星轨道精度为  $10\text{ m}$ , 检验点来自于  $1 \diamond 5$  万的地形图, 坐标系采用北京 54 坐标系)。

表 1 天津地区实验结果  
Tab.1 Test Result for Tianjin

控制点号	$x$ 坐标/m	$y$ 坐标/m	计算的 $x$ 坐标/m	计算的 $y$ 坐标/m	$x$ 坐标偏差/m	$y$ 坐标偏差/m
1	20 617 456	4 350 855	20 617 444.00	4 350 857.10	- 12.00	2.10
2	20 615 176	4 353 249	20 615 162.35	4 353 246.79	- 13.65	- 2.21
3	20 616 760	4 353 141	20 616 780.15	4 353 153.02	20.15	12.02
4	20 612 652	4 358 505	20 612 648.87	4 358 531.16	- 3.13	26.16
5	20 610 024	4 360 641	20 610 020.78	4 360 644.51	- 4.22	3.51
6	20 610 259	4 334 387	20 610 240.63	4 334 407.82	- 18.37	20.82
7	20 609 479	4 332 791	20 609 489.09	4 332 759.14	10.09	- 31.86
8	20 611 183	4 330 703	20 611 144.26	4 330 730.41	- 38.74	27.41
9	20 615 212	4 353 297	20 615 184.89	4 353 262.56	27.11	34.44
10	20 610 331	4 336 916	20 610 286.18	4 336 918.23	43.84	- 2.23
11	20 610 088	4 340 397	20 610 041.76	434 021.68	46.24	- 24.68
12	20 612 962	4 342 707	20 612 916.34	4 342 747.63	24.26	- 40.63
		最小误差(绝对值)			3.13	2.10
		最大误差(绝对值)			46.24	40.63
		中误差			28.48	23.58

### 3 结 论

本文采用天津市 ERS-1 数据进行实验, 证明利用星载 SAR 数据进行直接对地定位的方法是可行的。在有 DEM 支持下的直接对地定位方法的精度高于无 DEM 的对地定位方法<sup>[7]</sup>, 对地定位精度中误差在  $30\text{ m}$  以内, 优于采用近似中心投影的对地定位方法精度。新的遥感卫星的轨道站对地定位精度显著提高, 已经从  $\text{km}$  级提高到  $10\text{ m}$  以内, 而且还有进一步提高的趋势。由于 SAR 图像特殊的构像原理, 轨道站定位精度的提高对于 SAR 图像对地定位最为有利, 将会进一步提高其对地定位精度。

### 参 考 文 献

[1] 郭华东. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000

[2] 魏钟铨, 王长耀, 王建宇, 等. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001

[3] Koch K R. Parameter Estimation and Hypothesis

Testing in Linear Models [M]. Berlin: Springer Verlag, 1999

[4] 金素明. SAR 图像自动镶嵌系统[D]: [学位论文]. 北京: 中国林业科学院, 2001

[5] 方勇, 常本义. 雷达摄影测量系统实时循环程序设计原理与实现[J]. 测绘通报, 2001(9): 10-12

[6] 刘玉贤. 利用 DEM 进行星载 SAR 影像的几何精纠正[J]. 测绘科技动态, 1994(3): 14-17

[7] 杨杰. 星载 SAR 定位和从星载 SAR 影像提取地面高程信息的研究[D]: [学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2004

[8] Curlander J C. Location of Spaceborne SAR Imagery[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1982, 20(3): 359-364

[9] Curlander J C, Kwok 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

第一作者简介: 杨杰, 博士。现从事数字摄影测量与计算机视觉研究。

E-mail: yangjie@lmars.whu.edu.cn

## Location of Spaceborne SAR Imagery Without Reference Points

YANG Jie<sup>1</sup> PAN Bin<sup>2</sup> LI Deren<sup>1</sup> ZHONG Yongzheng<sup>3</sup>

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 China Soft Resource Corporation, 55 South Xueyuan Road, Haidian District, Beijing 100081, China)

**Abstract:** A method is developed to determine the location of a pixel in a SAR image in this paper. This technique utilizes the spacecraft ephemeris data and the characteristics of the SAR data collection system to produce an estimate of the latitude and longitude of an arbitrary pixel. This approach has an advantage over previous techniques in that it requires no reference points and is independent of spacecraft attitude knowledge or control. Test is conducted using ERS1 SAR imagery, comparing predicted feature location with the location as determined by high precision area maps. Results indicate an accuracy of 50 m is attainable with this method.

**Key words:** synthetic aperture radar; range doppler model; digital elevation model

---

**About the first author:** YANG Jie, Ph. D. He is mainly engaged in digital photogrammetry and computer vision.

E mail: yangjie@lmars.whu.edu.cn

### 武汉大学测绘学院召开《工程测量学》新书 新闻发布暨课程建设研讨会

近日,武汉大学测绘学院召开了《工程测量学》新书新闻发布暨课程建设研讨会。《工程测量学》由武汉大学测绘学院张正禄教授主编,解放军信息工程大学、同济大学、西南交通大学、中南大学、河海大学和山东科技大学等6所大学的教授参编。该书反映了工程测量学科的全貌和最新发展,于2005年10月由武汉大学出版社出版。

参加这次研讨会的代表共计80余人,来自全国20多所高校和近20家生产单位。与会代表围绕该课程的精品课程建设和教学改革进行了学术交流和讨论,并倡议成立工程测量学课程教学督导组。