

文章编号: 1007-4619(2007)06-0771-07

# 星载合成孔径雷达构像方程及其应用于轨道精化的研究

张永红, 张继贤, 刘明军, 林宗坚

(中国测绘科学研究院, 北京 100039)

**摘 要:** 星载合成孔径雷达构像方程是地理编码、立体测量、影像定位等几何处理的基础。本文首先讨论了构像方程的参数选择, 在充分考虑轨道物理模型及摄动力影响的基础上, 提出了一套改进的轨道模型参数。从距离方程及多普勒方程出发, 详细推导了包含轨道模型参数及成像处理参数的星载 SAR 构像方程。作为构像方程的一个具体应用, 本文研究了星载 SAR 影像的轨道精化问题。将构像方程线性化, 对每个地面控制点列出误差方程, 可以用类似于航空影像的空间后方交会的方式精确求解轨道模型参数。试验中从 1:5 万地形图上量取了 5 个地面控制点, 对一景 Radarsat SAR 影像进行了轨道精化。比较发现, 头文件提供的轨道与精化的轨道之间有约 2km 的位置差异, 用精化的轨道数据得到了高精度的几何校正结果。它间接地表明了轨道精化算法的正确可行。

**关键词:** 星载合成孔径雷达; 构像方程; 轨道模型参数; 轨道精化

**中图分类号:** TP702 **文献标识码:** A

## Imaging Model for Space-borne SAR and its Application in Orbit Refinement

ZHANG Yong-hong, ZHANG Ji-xian, LIU Ming-jun, LIN Zong-jian

(Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China)

**Abstract** Imaging model is the basis for most geometric processing of space-borne SAR imagery, including image rectification, radiogrammetry and image geolocation. This paper develops a parametric imaging model for SAR, which explicitly describes the relationship between the 3D cartographic coordinate of a ground target and the 2D image coordinate of the corresponding pixel. The parameters of imaging model consist of near range image starting time, Doppler parameters and orbit parameters. After quantitatively evaluating the influence of the Earth perturbations on satellite orbit, we present an improved satellite orbit model which uses less parameters and is able to fit the space orbit at nearly the same accuracy compared with classical model. As an application of the imaging model, an orbit refinement algorithm using ground control points (GCPs) is presented. For this purpose, the imaging model is rewritten to incorporate only 9 orbit parameters and then linearized through differentiating with respect to the orbit parameters. For each GCP, the image coordinates are expressed as the function of the orbit parameters and two error equations are formed. The orbit parameters can then be iteratively determined through solving a linear equation set consisting of the error equations from all GCPs under least square rule. The orbit refinement algorithm is tested on a RADARSAT SGF (SAR Georeferenced Fine resolution product) scene. 5 GCPs are identified from 1:50000 scale topographic maps to refine the orbit parameters coming with the SGF image. The accuracy of the refined orbit is demonstrated through geometric correction of the SGF image. While the SGF data is poorly corrected using the original orbit data, it is precisely corrected with refined orbit parameters.

**Key words:** space-borne SAR; imaging model; orbit parameters; orbit refinement

**收稿日期:** 2006-10-30; **修订日期:** 2007-02-07

**基金项目:** 国家 973 计划项目 (编号: 2006CB701303)

© 2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

**作者简介:** 张永红 (1973—), 男, 博士, 研究员。主要研究方向为合成孔径雷达影像的摄影测量及干涉处理、土地利用土地覆盖及其变化。已发表论文 30 余篇。

## 1 引 言

雷达遥感是空间遥感领域最重要的前沿技术之一<sup>[1]</sup>。星载合成孔径雷达 (SAR) 技术的应用研究自 1978 年发射的 Seasat 之后在世界范围内迅速展开。由于与光学影像完全不同的成像原理, SAR 影像的几何校正、定位、立体测量等几何问题比较难以解决。今天, 几何校正问题比以往任何时候都更加重要, 因为多传感器数据的融合、多格式 (矢量、栅格等) 数据的集成已是地理信息学中的一种趋势<sup>[2]</sup>。合成孔径雷达构像方程描述了地面物点和与之对应的像点坐标之间的函数关系, 是解决绝大多数几何处理问题的基础。

国内研究者普遍采用的 SAR 影像构像方程可以分为两大类。一类基于共线方程模型, 最先由 G. Konecny<sup>[3]</sup>在 1988 年国际摄影测量与遥感大会上提出。该模型用处理光学影像的方式处理雷达影像, 忽略了 SAR 距离成像的特点, 是一种近似模型。第二类是基于距离多普勒 (Range-Doppler) 方程的模型, 这是直接描述 SAR 成像的物理模型。F. Leber<sup>[4]</sup>1990 年提出的构像模型便属于此类。F. Leber 模型的不足之处是它建立在多普勒中心频率为零的条件上, 对于机载 SAR 影像适用, 在星载 SAR 情况下, 由于地球自转等因素的影响, 雷达波束与卫星轨道不垂直, 此时零多普勒条件不一定满足。I. Tannous 等<sup>[5]</sup>提出了包括轨道参数、传感器参数及成像处理参数的参数模型, 用以描述像点和物点之间的对应关系, 但他并未给出构像方程的表达式, 而且对轨道参数的处理过于复杂, 引入了不必要的变量。H. Rantakokko 等<sup>[6]</sup>给出了仅考虑斜距向量 (即距离方程) 的像点物点联系方程式, 而将零多普勒条件蕴含其中, 所得方程无法适应多普勒中心频率不为零的情况, 同时对轨道参数的处理也不够准确。

本文将推导一般意义上的星载 SAR 严密构像方程, 其突出的特点是采用了精心选择的飞行器轨道模型参数, 充分考虑了卫星轨道的物理模型、计算的简洁及描述的准确。作为构像方程的一个具体应用, 本文研究了在构像方程的基础上, 利用少量的地面控制点进行星载 SAR 空间轨道精化的算法及原理。

## 2 参数的选择

SAR 影像的几何变形源自于传感器状态的

稳定、平台的不稳定、信号传播的影响、地表高程和成像处理器引入的误差等 5 个方面<sup>[7]</sup>。传感器状态的不稳定主要指由于局部振荡器的漂移造成的时间确定误差, 以及激发器与脉冲发射机之间的电子延迟, 它与信号传播的影响类似, 都使斜距测量产生误差。信号传播的影响指大气层中的水汽和电离层扰动对微波传播的阻滞。成像处理器引入的误差主要指多普勒中心频率确定时的误差。

已知某点的像平面坐标  $P(i, j)$ , 其中横轴  $i$  为方位向坐标, 纵轴  $j$  为距离向坐标,  $P$  点的斜距  $R$  可以通过下式求得:

$$R = R_0 + \rho_r \times j \quad (1)$$

式中,  $R_0$  为影像的近端斜距,  $\rho_r$  为斜距像元间隔。

设影像的起始行的多普勒频率中心处的协调世界时 (UTC: Coordinated Universal Time) 为  $T_0$ ,  $P$  点的 UTC 时间为  $T$  则:

$$T = \frac{N}{\text{PRF}} \times i + T_0 \quad (2)$$

式中,  $N$  为方位向视数, 脉冲重复频率 PRF (Pulse Repetition Frequency) 是 SAR 系统的一个重要参数。

事实上  $\frac{N}{\text{PRF}}$  代表方位行上的时间分辨率, 方位向像元间隔  $\rho_a = \frac{N}{\text{PRF}} \times v$  其中  $v$  为飞行器的地面速度。

同时,  $P$  点的多普勒频率可以通过下式求得:

$$f_b = d_0 + d_1 \times (t - t_0) + d_2 \times (t - t_0)^2 + d_3 \times (t - t_0)^3 \quad (3)$$

式中,  $d_0, d_1, d_2, d_3$  和  $t_0$  的值由头文件 (Leader 文件或 Trealer 文件) 中的 DPPR (Data Processing Parameters Record) 提供;  $t_0$  称为多普勒中心频率的参考时间;  $t = \frac{2R}{c}$ , 称为当前快时间。

如果, SAR 影像都经过了多普勒中心频率归零处理, 此时:

$$d_0 = d_1 = d_2 = d_3 = 0 \quad (4)$$

斜距测量中的误差可以用  $R_0$  来补偿, 而且激发器与脉冲发射机之间的电子延迟以及大气层对雷达波传播的影响也可以用  $R_0$  来补偿; 多普勒频率确定中的误差可以用参数  $d_0, d_1, d_2$  和  $d_3$  来描述; 另外, 导致方位向的位置偏移及系统定时的不确定, 可通过  $T_0$  加以补偿, 因此选择这些量为构像方程的参数。

除此以外, 构像方程参数还必须包括描述卫星平台状态的位置与速度信息。卫星轨道通常用 6 个随时间变化的开普勒根数来描述<sup>[8]</sup>。考虑到一景影像只关系到轨道上的一小弧段, 在这种情况下, 选

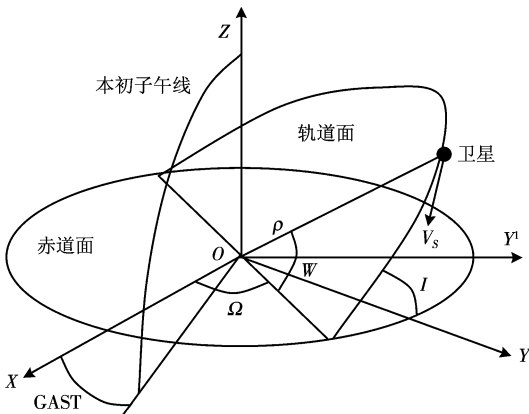
择如下 4 个参数就可以足够准确地描述这一段轨道<sup>[5]</sup>:

- $\rho$ : 地心与卫星之间的距离;
- $\Omega$ : 升交点赤经;
- $I$ : 轨道倾角;
- $W$ : 卫星辐角。

图 1 给出了 SAR 空间轨道及坐标系统的示意图。图中 X 轴在赤道面上, 指向春分点方向。在不考虑岁差和章动的情况下, 春分点固定不动。O-XYZ 构成的坐标系称为地心惯性坐标系 (GEI: Geocentric Equatorial Inertial), 这是不随地球旋转的空间固定系。O-X'Y'Z 构成与地球同步自转的地心固定坐标系 (GEF: Geocentric Equatorial Fixed)。两个坐标系之间的偏移角称为格林尼治视恒星时角 (GAST: Greenwich Apparent Sidereal Time)。这 4 个轨道参数与卫星状态向量之间的互算关系见参考文献 [5]。I Tannous<sup>[5]</sup>将它们分别展开至 1 阶和 3 阶。这将使后面的构像方程相当复杂。文献 [8] 指出, 摄动力的最大部分是地球非球形部分引起的摄动力, 相对量级为  $10^{-3}$ , 对轨道长半径、偏心率没有影响, 对升交点赤经、轨道面倾角和近地点辐角有微小的影响。因此, 本文将轨道参数展开成如下形式:

$$\begin{aligned}
 \rho(t) &= \rho_0 + \rho_1 \times t + \rho_2 \times t^2 \\
 I(t) &= I_0 + I_1 \times t \\
 W(t) &= W_0 + W_1 \times t \\
 \Omega(t) &= \Omega_0 + \Omega_1 \times t
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

式中,  $t = T - T_0 = \frac{N}{PRF} \times i$  表示以  $T_0$  为参考的相对时间, 这样, 轨道模型参数为  $\rho_0, \rho_1, \rho_2, I_0, I_1, W_0, W_1, \Omega_0$  和  $\Omega_1$ , 记时刻  $T_0$  的 GAST 角为  $\Theta$ , 所有这些参数组成一个 15 维的参数向量:



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net  
图 1 空间轨道与坐标系

Fig 1 Space orbit and coordinate system

$$\Sigma = (R_0, d_0, d_1, d_2, d_3, \Theta, \rho_0, \rho_1, \rho_2, I_0, I_1, W_0, W_1, \Omega_0, \Omega_1) \in R^{15}$$

上式即为构像方程的参数。

### 3 星载 SAR 影像的构像方程

SAR 的构像几何关系本质上是由距离方程和多普勒频率方程决定的, 如图 2 所示。与天线中心有不同距离的地面目标在一序列同心圆上, 而有多普勒频率的目标位于焦点在同一直线上的单只双曲线上。圆与单只双曲线有两个交点, 根据 SAR 左视还是右视可确定是其中哪一点。

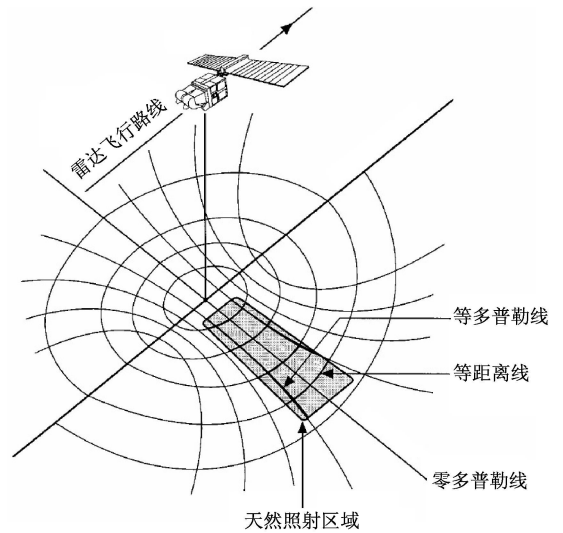


图 2 SAR 构像几何关系

Fig 2 SAR imaging geometry

将距离方程在 GEI 坐标系中表达出来:

$$R = | [R_s]_{GEI} - [R_t]_{GEI} | \tag{6}$$

式中,  $[R_s]_{GEI}$  和  $[R_t]_{GEI}$  分别表示卫星和地面目标在 GEI 中的位置向量:

$$[R_s]_{GEI} = \begin{bmatrix} \rho(\cos W \cos \Omega - \sin W \sin \Omega \cos I) \\ \rho(\cos W \sin \Omega + \sin W \cos \Omega \cos I) \\ \rho \sin W \sin I \end{bmatrix} \tag{7}$$

地面目标在 GEF 坐标系中的位置向量为:

$$[R_t]_{GEF} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+h) \cos \phi \cos \lambda \\ (N+h) \cos \phi \sin \lambda \\ [N(1-e^2) \sin \phi] \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中,  $\phi, \lambda$  和  $h$  分别表示地面目标的经度、纬度和高程。

GEI 坐标系绕 Z 轴按右手法则旋转当前时刻的 GAST 角即成为 GEF 坐标系, 因此:

$$[R_t]_{GEI} = R_Z(\Theta_t) [R_t]_{GEF} \tag{9}$$

式中,  $\Theta_t = \Theta + \frac{\pi}{43200} t$  为时刻  $T$  的 GAST 角;  $R_z(\Theta_t)$  是绕  $Z$  轴按右手法则旋转的旋转矩阵。将式 (7)、式 (9) 代入式 (6), 整理得:

$$\begin{aligned} (R_0 + \rho_r \times j)^2 = & \rho^2 + X^2 + Y^2 + Z^2 - 2\rho[X(\cos W \cos(\Omega - \Theta_t) - \\ & \sin W \cos I \sin(\Omega - \Theta_t))] - \\ & 2\rho[Y(\cos W \sin(\Omega - \Theta_t) + \sin W \cos I \cos(\Omega - \\ & \Theta_t)) + Z \sin W \sin I] \end{aligned} \quad (10)$$

将多普勒方程写在 GEF 系统中: (因为在 GEF 中  $V_T = 0$ )

$$[R_s - R_T]_{GEF} \cdot [V_s]_{GEF} = -\frac{f_b}{2} \lambda_{\text{wave}} R \quad (11)$$

为了与经度区别, 将雷达波长记为  $\lambda_{\text{wave}}$

$$[R_s]_{GEF} = R_z(-\Theta_t) [R_s]_{GEI} \quad (12)$$

$$[V_s]_{GEF} = R_z(-\Theta_t) [V_s]_{GEI}$$

在 GEI 系统中的卫星速度向量:

$$[V_s]_{GEI} = \frac{d[R_s]_{GEI}}{dt} \quad (13)$$

将式 (12) 代入式 (11) 并整理得到:

$$\begin{aligned} \rho^2 - \rho[X(\cos W \cos(\Omega - \Theta_t) - \sin W \cos I \sin(\Omega - \Theta_t))] - \\ \rho[Y(\cos W \sin(\Omega - \Theta_t) + \sin W \cos I \cos(\Omega - \Theta_t))] + Z \sin W \sin I - \\ \rho W_1[X(-\sin W \cos(\Omega - \Theta_t) - \cos W \cos I \sin(\Omega - \Theta_t))] - \\ \rho W_1[Y(-\sin W \sin(\Omega - \Theta_t) + \cos W \cos I \cos(\Omega - \Theta_t))] - \\ \rho \Omega_1[-X(\cos W \sin(\Omega - \Theta_t) + \sin W \cos I \cos(\Omega - \Theta_t))] - \\ \rho \Omega_1[Y(\cos W \cos(\Omega - \Theta_t) - \sin W \cos I \sin(\Omega - \Theta_t))] - \\ \rho I_1 \sin W \sin I [X \sin(\Omega - \Theta_t) - Y \cos(\Omega - \Theta_t)] - \\ \rho Z(W_1 \cos W \sin I + I_1 \sin W \cos I) + \frac{f_b(R)}{2} \lambda_{\text{wave}} R = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

式 (14) 及式 (10) 组成了 SAR 构像方程。

#### 4 基于构像方程的轨道精化原理及算法

平台的位置与速度向量 (合称状态向量) 等轨道数据, 对于 SAR 影像犹如相机的外方位元素之于光学影像。轨道状态向量不仅影响到 SAR 影像几何校正和立体测图的精度, 而且对 SAR 干涉测量精度也有重要影响<sup>[9]</sup>。而目前国内所能获得的 SAR 数据, 大都没有准确的卫星轨道信息。如果在前面推导的构像方程中仅考虑轨道模型参数, 那么利用一定数量的地面控制点, 可以用类似于航片的空间后方交会的方法精化局部轨道参数。

此时, 参数向量变为:  $\Sigma = (\rho_0, \rho_1, \rho_2, I, I_1, W_0, W_1, \Omega_0, \Omega_1) \in \mathbf{R}$ , 并记

$$\Sigma_1 = \rho_0, \Sigma_2 = \rho_1, \dots, \Sigma_9 = \Omega_1.$$

定义:

$$\begin{aligned} A &= \cos W \cos(\Omega - \Theta_t) - \sin W \sin(\Omega - \Theta_t) \cos I \\ B &= \cos W \sin(\Omega - \Theta_t) + \sin W \cos(\Omega - \Theta_t) \cos I \\ M &= -\sin W \cos(\Omega - \Theta_t) - \cos W \sin(\Omega - \Theta_t) \cos I \\ N &= -\sin W \sin(\Omega - \Theta_t) + \cos W \cos(\Omega - \Theta_t) \cos I \end{aligned} \quad (15)$$

则构像方程 (10) 和 (14) 有如下简洁的形式:

$$\begin{aligned} R^2 = \rho^2 + X^2 + Y^2 + Z^2 - 2\rho[AX + BY + Z \sin W \sin I] \\ \rho^2 - \rho[AX + BY + Z \sin W \sin I] - \rho W_1 [MX + NY + Z \cos W \sin I] - \\ \rho \Omega_1 (-BX + AY) - \rho I_1 \sin W \sin I [X \sin(\Omega - \Theta_t) - Y \cos(\Omega - \Theta_t)] - \\ \rho Z I_1 \sin W \cos I + \frac{f_b(R)}{2} \lambda_{\text{wave}} R = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

它们可写为如下的隐函数方程:

$$F_1(R, t, X, Y, Z, \Sigma) = 0; F_2(R, t, X, Y, Z, \Sigma) = 0 \quad (18)$$

将控制点的影像坐标 ( $i, j$ ) 通过下式转化为  $(R, t)$ :

$$R = R_0 + \rho_r \times j, t = \frac{N}{\text{PRF}} \times i \quad (19)$$

以  $(R, t)$  为观察值, 列出误差方程式如下:

$$\begin{aligned} v_R = (R) - R + \frac{\partial R}{\partial \rho_0} \Delta \rho_0 + \frac{\partial R}{\partial \rho_1} \Delta \rho_1 + \frac{\partial R}{\partial \rho_2} \Delta \rho_2 + \frac{\partial R}{\partial I} \Delta I + \frac{\partial R}{\partial I_1} \Delta I_1 \\ + \frac{\partial R}{\partial W_0} \Delta W_0 + \frac{\partial R}{\partial W_1} \Delta W_1 + \frac{\partial R}{\partial \Omega_0} \Delta \Omega_0 + \frac{\partial R}{\partial \Omega_1} \Delta \Omega_1 \\ v_t = (t) - t + \frac{\partial t}{\partial \rho_0} \Delta \rho_0 + \frac{\partial t}{\partial \rho_1} \Delta \rho_1 + \frac{\partial t}{\partial \rho_2} \Delta \rho_2 + \frac{\partial t}{\partial I} \Delta I + \frac{\partial t}{\partial I_1} \Delta I_1 \\ + \frac{\partial t}{\partial W_0} \Delta W_0 + \frac{\partial t}{\partial W_1} \Delta W_1 + \frac{\partial t}{\partial \Omega_0} \Delta \Omega_0 + \frac{\partial t}{\partial \Omega_1} \Delta \Omega_1 \end{aligned} \quad (20)$$

上述误差方程式中的各偏微分, 通过下式求解:

$$\frac{\partial t}{\partial \Sigma_k} = \frac{\frac{\partial(F_1, F_2)}{\partial(\Sigma_k, R)}}{\frac{\partial(F_1, F_2)}{\partial(t, R)}}, \frac{\partial R}{\partial \Sigma_k} = \frac{\frac{\partial(F_1, F_2)}{\partial(\Sigma_k, t)}}{\frac{\partial(F_1, F_2)}{\partial(t, R)}} \quad (22)$$

由于共有 9 个轨道参数变量, 因此有 5 个地面控制点即可解算。对每一个控制点, 按式 (20) 和 (21) 列出误差方程组成如下的矩阵方程式:

$$V = BX - L, P = I \quad (23)$$

式中,  $X = [\Delta \rho_0, \Delta \rho_1, \Delta \rho_2, \Delta I, \Delta I_1, \Delta W_0, \Delta W_1, \Delta \Omega_0, \Delta \Omega_1]^T$

其他符号对每一个像点为:

$$\begin{aligned} V_i &= [v_R, v_t]^T \\ L_i &= [R - (R), t - (t)]^T \\ B_i &= \begin{bmatrix} \frac{\partial R}{\partial \rho_0} & \frac{\partial R}{\partial \rho_1} & \frac{\partial R}{\partial \rho_2} & \frac{\partial R}{\partial I} & \frac{\partial R}{\partial W_0} & \frac{\partial R}{\partial W_1} & \frac{\partial R}{\partial \Omega_0} \\ \frac{\partial t}{\partial \rho_0} & \frac{\partial t}{\partial \rho_1} & \frac{\partial t}{\partial \rho_2} & \frac{\partial t}{\partial I} & \frac{\partial t}{\partial W_0} & \frac{\partial t}{\partial W_1} & \frac{\partial t}{\partial \Omega_0} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

为了避免迭代计算的不收敛, 要求所选控制点

绝不能位于同一直线上(如同一行或同一列),控制点应尽可能均匀分布。

解算流程如图 3 所示。

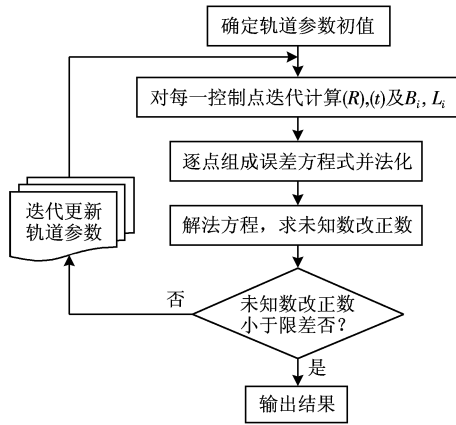


图 3 利用地面控制点进行轨道精化的解算流程

Fig 3 Processing flowchart of SAR orbit refinement using GCPs

### 5 试验及分析

因为无法知道真实的 SAR 空间轨道, 直接对轨道数据进行精度检查几乎是不可能的, 一个简单实用的做法是考查 SAR 影像几何校正(地理编码)的

精度。在有非常准确的 DEM 可用的情况下, 如果轨道数据也非常准确, 可以按文献 [10] 提供的方法直接进行几何校正。如果轨道数据不够准确, 可以选择利用 SAR 模拟影像进行几何校正<sup>[11]</sup>。本文将按照上节的算法, 利用地面控制点进行轨道参数精化, 然后利用精化后的轨道数据和已有 DEM 对 SAR 影像进行几何校正。实验中选用广东某地的 Radarsat SGF SAR 影像为实验雷达数据(像元大小为 12.5m), 同时还用到该地的 1:5 万 DEM, 校正过的 TM 影像和 1:5 万地形图。DEM 的高程精度优于 10m, 相对于所用的 SAR 影像来说, 精度足够。

Radarsat SAR 影像头文件提供了整条轨道上 15 个点处的卫星状态向量(位置和速度), 两点之间相隔 8m, 其中与影像相隔最近, 用与影像获取时间相隔最近的第 6 和第 7 点的值内插了影像起始行、中间行、结束行上的状态向量(表 1), 并用它们和 1:5 万 DEM 对 SAR 影像进行了几何校正, 所得结果如图 4 所示, 可以看见, 校正后像元的相对位置发生严重的畸变。这是由于使用了不准确的轨道数据进行校正的结果。

在 1:5 万地形图和 SGF SAR 影像上选取了 5 对同名点作为控制点(见表 2)。

取 9 个轨道模型参数的初值如下(根据头文件

表 1 由头文件提供的数据内插得到的三点状态向量

Table 1 State vectors of start line center line and end line derived by interpolation

	GEI中位置向量 /m			GEI中速度向量 /(m/s)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
起始行	5016578.97	-4293791.02	2791550.69	1394.33	-2781.99	-6770.67
中间行	5027648.48	-4316044.83	2737004.27	1350.64	-2744.52	-6794.77
结束行	5038367.85	-4337991.46	2682259.31	1306.85	-2706.85	-6818.39

表 2 用于轨道参数精化的地面控制点

Table 2 The GCPs Used for Orbit Refinement

控制点号	影像坐标 /pixel		地面测量坐标 /m		
	列号	行号	X	Y	Z
1	1394.375	4467.75	205043.9	2584411.6	25
2	445.625	3375.25	196190.5	2598943.5	16
3	524	3346.8	197215.88	2599016	30
4	626	4136	195963.5	2589384.4	216
5	611.8	3024	199158.8	2602667.8	30

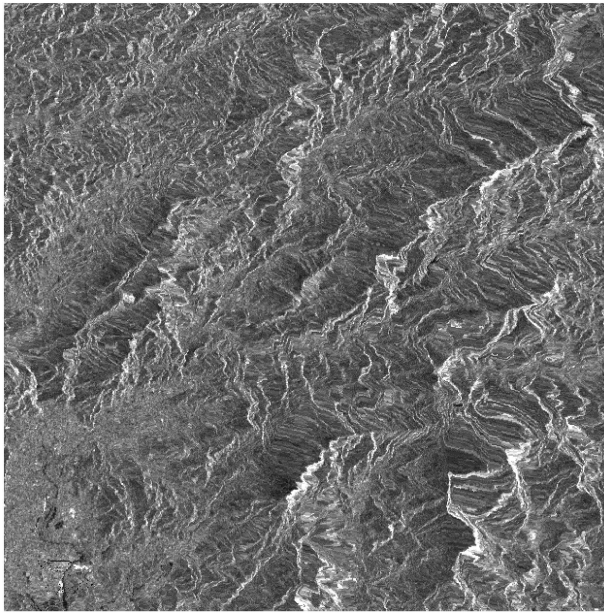


图 4 直接应用头文件提供的轨道数据进行几何校正的结果  
Fig 4 Radarsat SAR rectified with orbit data provided in the head file

提供的 6, 7, 8 点的数据拟合得到):

$$\begin{aligned} \rho_0 &= 7168020 \\ W_0 &= 2.501 \\ I_1 &= 1.7204 \\ \Omega_0 &= 2.37 \\ \rho_1 &= \rho_2 = W_1 = I_1 = \Omega_1 = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

用前面介绍的算法, 经过 8 次迭代计算后, 得到各参数的收敛值, 组成如下的展开式:

$$\begin{aligned} \rho(t) &= 7166649.695355 + 10.918404t - 0.002154t^2 \\ W(t) &= 2.49824 + 0.001t \\ I(t) &= 1.7204976 - 2.433 \times 10^{-6}t \\ \Omega(t) &= 2.36985 + 1.044 \times 10^{-6}t \end{aligned} \quad (26)$$

这就是利用 5 个地面控制点精化后的轨道参数。

用 (26) 式重新计算原始影像的起始行、中间行、结束行的状态向量, 所得结果见表 3。它与内插得到的状态向量的差值见表 4 可见位置向量存在着约 2km 的差异, 而速度向量相差小得多, 不过几 m/s。

表 3 用控制点精化轨道参数后得到的三点状态向量

Table 3 State vectors of start line center line and end line calculated from refined orbit parameters

	GEI 中位置向量 /m			GEI 中速度向量 /(m/s)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
起始行	5016264.79	-4293371.29	2792693.23	1400.2	-2787.7	-6775.2
中间行	5027341.01	-4315622.85	2738150.52	1356.48	-2750.24	-6799.3
结束行	5038067.11	-4337575.27	2683409.19	1312.69	-2712.57	-6822.94

表 4 表 1 与表 3 的差值

Table 4 Difference between table 1 and 3

	GEI 中位置向量 /m			GEI 中速度向量 /(m/s)		
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
起始行	-314.18	419.73	1142.54	5.87	-5.71	-4.53
中间行	-307.47	421.98	1146.25	5.84	-5.72	-4.53
结束行	-300.74	416.19	1149.88	5.84	-5.72	-4.55

用精确重建的状态向量重新纠正 SAR 影像, 输出像元大小为 25m, 所得结果如图 5。为了检查所得结果的精度, 以经过正射校正的 TM 影像 (图 6) 为参考, 在 TM 影像和重新校正的 SAR 影像中选取了 35 对同名点用作检查点, 经统计计算, 二者之间的平面位置均方误差约为 25m (0.8 个像元)。这间接表明, 重建的轨道数据比较准确。

## 6 结论

本文系统推导了星载合成孔径雷达影像的构像方程。构像方程的参数包括两部分, 一部分为 SAR 成像处理参数, 一部分为轨道模型参数。在分析摄动力对卫星轨道影响的基础上, 提出了一种改进的 SAR 轨道参数模型。该模型兼顾了卫星轨道的物理模型与计算的简洁。在此基础上, 具体推导了构像方程。作为推导的构像方程的一个应用, 本文提出了利用地面控制点进行 SAR 空间轨道局部重建的原理及算法。类似于航空影像的单像空间后方交会, 在构像方程中仅考虑轨道模型参数, 利用隐函数求导法则完成对构像方程的线性化处理, 以控制点的影像坐标为观测值, 对应的大地坐标为已知值, 模型参数的改正数为未知数列出误差方程, 则轨道模型参数可以通过迭代精确确定。最后以对 Radarsat SAR

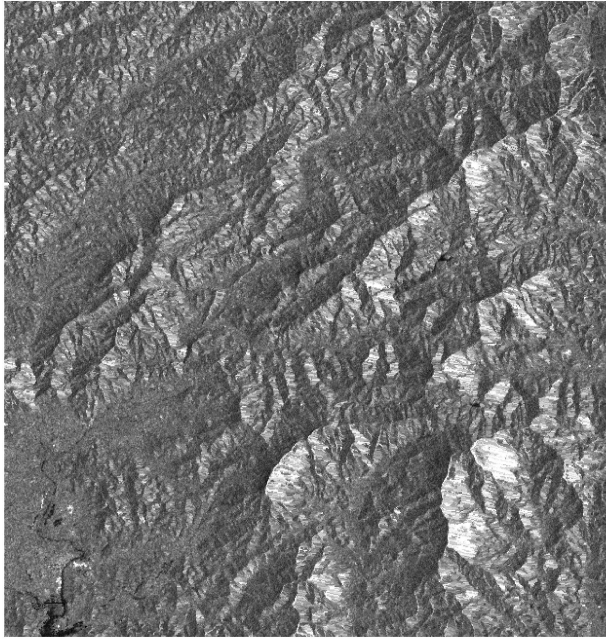


图 5 应用重建的轨道数据进行的几何校正结果

Fig 5 Radarsat SAR rectified with refined orbit data

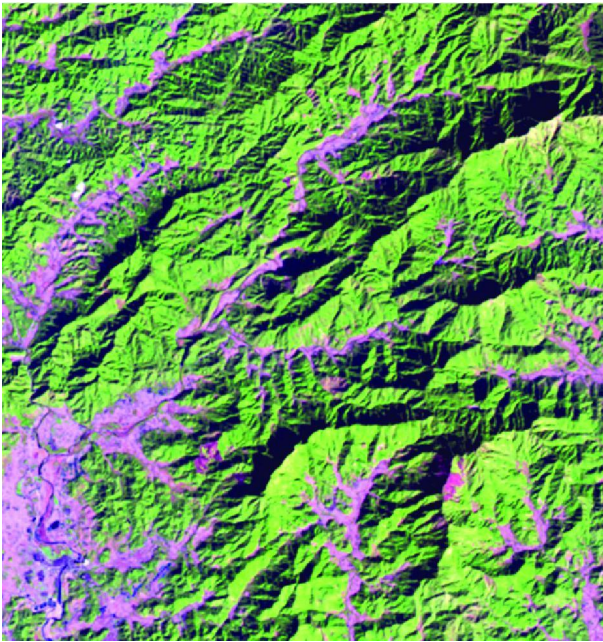


图 6 用作参考的 TM 校正影像

Fig 6 Reference TM image

影像几何校正的试验,验证了提出的轨道精化算法的可行性与正确性。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Chen S P, Tong Q X, Guo H D. Research on the Mechanism of Remote Sensing Information [ M ]. Beijing: Sciences Press, 1998. [陈述彭,童庆禧,郭华东. 遥感信息机理研究 [ M ]. 北京:科学出版社, 1998. ]
- [ 2 ] Toutin T. Geometric Processing of Remote Sensing Images: Models, Algorithms and Methods [ J ]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(10): 1893–1924.
- [ 3 ] Konecny G, Schuhr W. Reliability of Radar Image Data [ A ]. 16<sup>th</sup> ISPRS Congress [ C ]. Kyoto, 1988.
- [ 4 ] Leberl F. Radargrammetric Image Processing [ M ]. Norwood, MA: Artech House, 1990.
- [ 5 ] Tannous I, Pikeon B. Parametric Modeling of Spaceborne SAR Image Geometry Application: SEASAT/SPOT Image Registration [ J ]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1994, 60(6): 755–766.
- [ 6 ] Rantakokko H, Rosenholm D. Rectification of Slant Range Imagery through a Direct to Ground Relationship [ J ]. Photogrammetric Record, 1999, 16(94): 685–694.
- [ 7 ] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic Aperture Radar System and Signal Processing [ M ]. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [ 8 ] Zebker H A, Werner C L, Rosen P A, et al. Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(4): 823–836.
- [ 9 ] Zhang S X. Exterior Trajectory Surveying and Satellite Orbit Surveying [ M ]. Beijing: Publishing House of Defense Industry, 1992. [张守信. 外弹道测量与卫星轨道测量 [ M ]. 北京:国防工业出版社, 1992. ]
- [ 10 ] Zhang Y H, Lin Z J, Zhang J X. SAR Image Rectification [ J ]. Acta Geodetic et Cartographica Sinica, 2002, 31(2): 134–138. [张永红, 林宗坚, 张继贤. SAR影像几何校正 [ J ]. 测绘学报, 2002, 31(2): 134–138. ]
- [ 11 ] Zhang Y H, Zhang J X, Yang C Y. A Quasi-automatic Rectification Method of SAR Image Based on Image Simulation [ J ]. Journal of Remote Sensing of China, 2003, 17(2): 106–111. [张永红, 张继贤, 杨崇源. 基于影像模拟的 SAR几何校正准自动方法 [ J ]. 遥感学报, 2003, 17(2): 106–111. ]