

文章编号: 1007-4619 (2003) 02-0106-06

# 基于影像模拟的 SAR 几何校正准自动方法

张永红, 张继贤, 杨崇源

(中国测绘科学研究院, 北京 100039)

**摘 要:** 合成孔径雷达影像的几何校正是许多微波遥感应用中必须解决的问题, 当无法获得准确的轨道数据时, 这个问题变得非常困难。本文提出了利用合成孔径雷达模拟影像进行准确的几何校正的原理及方法, 并以 RADARSAT SAR 影像进行了实验。该方法利用不准确的轨道数据及数字高程模型生成模拟的 SAR 影像, 用影像匹配的方法自动获取模拟影像与真实影像之间同名点的坐标差值, 而这个差值信息正好提供了对不准确轨道数据的控制。本方法无须地面控制点, 并基本上可以自动进行, 是解决目前 SAR 几何校正问题的有效方法。

**关键词:** 合成孔径雷达; 几何校正; 影像模拟; 影像匹配

**中图分类号:** TP751.1/TP722.6 **文献标识码:** A

## 1 引 言

SAR 几何校正的方法主要有基于 F. Leberl 模型的校正方法、基于 G. Konecny 的共线方程模型的校正方法以及基于距离-多普勒方程解算的方法, 前两种方法都有其不足, 对此的评述见参考文献[1], 第三种方法为近年来国际上所普遍采用<sup>[1-3]</sup>。但是试图通过解算距离-多普勒方程直接进行准确的几何校正时常常遇到困难, 因为经常有这样的情况发生: 既无法获得准确的轨道状态向量信息同时又没有额外的地面控制点可以利用, 准确的轨道状态信息对于多普勒方程的解算至关重要, 无法获取时可以通过地面控制点加以弥补, 若二者均不可得, 则几何校正难以进行。为解决这一问题, 本文提出了利用 SAR 模拟影像进行几何校正的准自动化方法。

基于 SAR 模拟影像进行几何校正的原理是这样的: 首先利用传感器参数(波长、视角、极化方式)和已知的平台轨道参数(位置和速度)模拟 SAR 的构像几何, 对地面(DEM)成像, 形成 SAR 模拟影像。假如所用数字高程模型足够精确的话, SAR 模拟影像同真实影像相比, 其在几何方面的差异主要在于

模拟影像的空间轨道是人为构建的。因此, 模拟影像与真实影像之间的几何差异就提供了对原本不精确的轨道数据进行改正的控制信息。同时由于模拟影像与真实影像的同名点之间的坐标差值基本上可以通过影像匹配自动获取, 因此, 整个几何校正的过程可以准自动地进行。

## 2 SAR 影像模拟

SAR 影像的模拟方法可分为三类<sup>[4]</sup>:

(1) 系统相干模拟方法。该方法模拟 SAR 系统接受的原始信号, 然后对这些信号进行方位向和距离向的聚焦处理, 最后生成模拟 SAR 影像。这种方法文献[5]曾有讨论。

(2) 非相干影像模拟方法。该方法以 DEM 和传感器飞行轨道为输入参数, 基于距离方程和多普勒方程建立几何构像模型, 建立辐射模型。这是目前采用最多的方法。

(3) 基于 SAR 影像的模拟。该方法以一种构型的 SAR 影像为基础, 模拟另一种构型的 SAR 影像。文献[6]用这种技术利用 AIRSAR 数据模拟了同一地区的 ERS-1 和 JERS-1 数据。

收稿日期: 2001-10-12; 修订日期: 2001-12-30

基金项目: 国家测绘局测绘科技发展基金项目(批准号: 98019 及 2001-02-02)。

**作者简介:** 张永红(1973—), 男, 副研究员, 分别于 1994 年和 1997 年获武汉大学数学学士学位及中国科学院地质与地球物理研究所地球物理硕士学位, 并于 2001 年 6 月获武汉测绘科技大学摄影测量与遥感专业博士学位。主要从事合成孔径雷达图像处理及应用方面的研究工作, 已发表论文 12 篇。

本文讨论的主要是第二种影像模拟方法。

SAR影像的模拟包括几何模拟及灰度(后向散射)模拟两个方面。几何模拟指对DEM的格网单元,按照SAR影像的构像几何,将它映射到SAR影像平面中。SAR的构像几何关系主要由以下距离方程和多普勒方程确定:

$$R = | \mathbf{R}_S - \mathbf{R}_T | \quad (1)$$

$$f_D = -\frac{2}{\lambda R} (\mathbf{R}_S - \mathbf{R}_T) \cdot (\mathbf{V}_S - \mathbf{V}_T) \quad (2)$$

上式中 $R$ 表示雷达天线距地面像元的斜距长度, $f_D$ 为多普勒中心频率, $\mathbf{R}_T$ 为地面像元在地心惯性系中的位置向量,其速度向量为 $\mathbf{V}_T = \dot{\omega}_e \times \mathbf{R}_T$ ,其中 $\dot{\omega}_e$ 为地球自转角速度向量, $\mathbf{R}_S$ 和 $\mathbf{V}_S$ 为雷达载机在地心惯性系中的位置和速度向量。

几何模拟的解算过程与地理编码过程类似,利用已知的几个离散点上的平台状态信息建立平台轨道的空间模型,对数字高程模型(DEM)中的每一像元,根据多普勒频率方程(2)可以算出此点被成像的时间。解算思路是:多普勒频率一方面由SAR PROCESSOR的有关参数确定(这些参数可以在头文件中找到),另一方面,由(2)式算得,而(2)式每一个变量都是由时间惟一确定,二者联立,即可解算成像时间。由此时间,一方面可以确定此像元的斜距长度,即距离向坐标;另一方面,可以确定此时刻与雷达开始摄影时刻的时间差,即方位向坐标,具体过程请参考文献[1]。在模拟影像的几何位置确定后,需要在此点上赋灰度值,这是灰度模拟所要解决的问题。

所有的后向散射模拟算法可以分成两大类:基于一定物理模型的模拟和基于半经验公式的模拟。前者根据表面的粗糙程度(一般以表面高程标准差及相关长度作为表征粗糙度的指标),以某一特定的物理散射模型作为对地面后向散射的模拟,但是需要知道表面介电常数等信息(与地面覆盖有关)。自然界中岩石矿物的相对介电常数的变化很大,对介电常数的研究吸引着国内外众多研究者的兴趣。文献[7]详细介绍了五种不同表面粗糙度下的散射模型,显然,如果要定量研究地面的微波后向散射特性,这种模拟非常有价值。国内,郭华东教授领导的研究小组曾精确测定了涉及到三大岩类、七大岩性的197块岩石标本的相对介电常数[郭华东等,2000]。基于半经验公式的模拟与地面覆盖无关,计算简单,非常适合于本文这种关注模拟影像的几何特征基于辐射特征的应用。同时由于我们无法获取

有关地面介电常数的信息,对岩石的介电常数的测定需要专门的仪器(如同轴探头终端等)与电路模型,因此本文采用半经验的后向散射模型。

本文采用的半经验后向散射模型如下:

$$\sigma = \frac{0.0133 \cos I}{[\sin I + 0.1 \cos I]^3} \quad (3)$$

上式中 $I$ 为局部入射角, $\sigma$ 为后向散射系数。

这是D.O. Muhleman[1964]在研究金星和月球的后向散射时提出的一个后向散射模型,它被认为可以足够准确地产生一个充分反映表面地形特点的SAR模拟影像。

### 3 基于影像模拟的SAR几何校正

#### 3.1 模拟影像与真实影像的匹配

因为模拟影像的灰度充分反映了表面地形的特点,本文采用了基于面积的影像匹配方法,匹配测度为归一化的相关系数。在匹配过程中,当靶区与搜索窗口区的归一化相关系数超过某一阈值(本文试验设为0.88)时,认为匹配成功。

匹配中以SAR模拟影像为目标影像,原始影像为对应的输入影像。为了提高匹配的效率,并提高匹配成功率,作者采用了与传统多级匹配正好相反的匹配策略,将每级匹配中,匹配成功的候选点数与候选点总数的比率定义为匹配成功率,原始的SAR影像与模拟影像称为0级影像,首先在0级影像中匹配,如果匹配成功率大于50%,以此时的匹配结果作为最终结果;否则,生成金字塔结构的1级影像,在1级影像中匹配,如此重复,直至在 $N$ 级影像中匹配成功率大于50%,然后将 $N$ 级影像的匹配结果向上传递,作为 $N-1$ 级影像开始匹配的初值,这个过程重复进行,直至重新回到0级影像中,然后将0级影像中的匹配结果作为最终结果。

#### 3.2 基于影像模拟的几何校正策略

在影像匹配获取的同名点的基础上,将模拟影像与原始影像同名点之差表示为模拟影像行列坐标的线性函数,这个函数反映了所用的轨道数据与真实的轨道数据之间的差异。将它引入地理编码的解算步骤中,可大大提高几何校正的精度。

基于影像模拟的几何校正实施步骤如下:

- 利用已有的轨道参数和传感器及成像处理

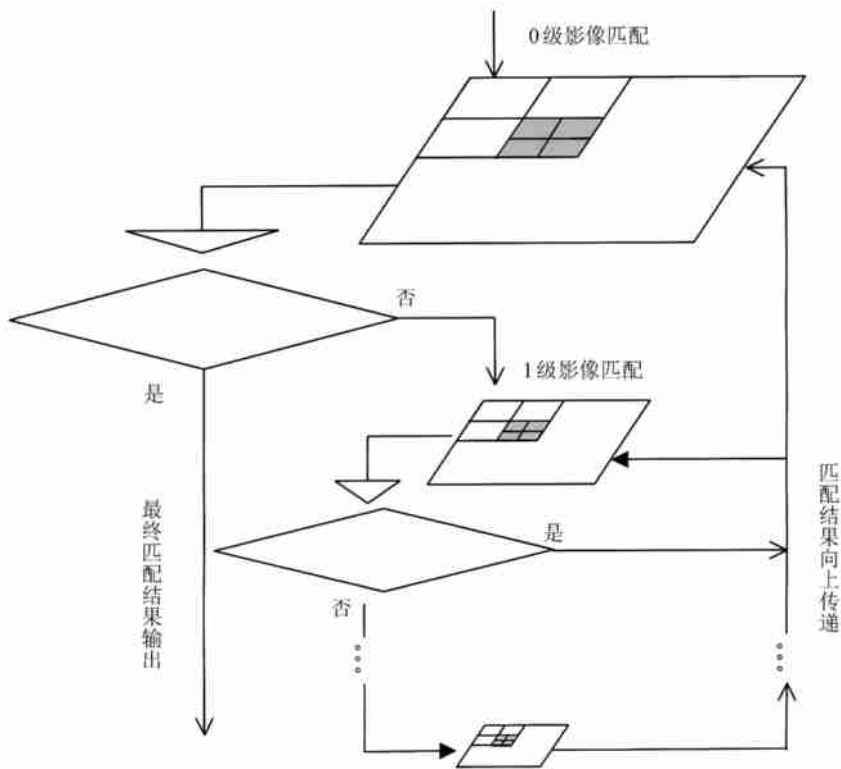


图 1 本文采用的分层匹配策略

Fig. 1 The hierarchical image matching strategy used in the paper

- 结合构像方程及 DEM 生成模拟影像。
- 以模拟影像为参考影像(像点坐标为  $i_r, j_r$ ), 原始影像为输入影像(像点坐标为  $i_s, j_s$ ) 进行影像匹配获取同名点。
- 计算同名点上的坐标差:
 
$$\Delta i = i_s - i_r, \Delta j = j_s - j_r. \quad (4)$$
- 在最小二乘原则下求解线性回归式:
 
$$\begin{aligned} \Delta i &= a_0 + a_1 \times i_r + a_2 \times j_r; \\ \Delta j &= b_0 + b_1 \times i_r + b_2 \times j_r \end{aligned} \quad (5)$$
- 对于 DEM 中的点  $(\phi, \lambda, h)$ , 利用前面介绍的地理编码算法, 求得对应的像平面坐标  $(i, j)$ 。
- 以  $(i, j)$  代入(5)式, 所得  $\Delta i, \Delta j$  为轨道参数不准确所致的几何校正偏差。
- 以  $i + \Delta i, j + \Delta j$  作为点  $(\phi, \lambda, h)$  对应的像点输出。

## 4 实 验

实验 SAR 数据为广东某地的 RADARSAT SCF 影像, 来自于中科院卫星地面站, 轨道号为 13082, 模式为 S2, 象元大小为  $12.5\text{m} \times 12.5\text{m}$ , 为地距影像, 覆盖范围为东经  $113.6^\circ - 115^\circ$ , 北纬  $22.8^\circ -$

$23.7^\circ$ 。它没有提供象 ERS-1 SAR 那样准确的轨道数据, 只提供了绕地球一周的 15 个点上的在地心惯性坐标系中的卫星状态向量(包括位置和速度), 两点之间相隔 8 分钟。所用 DEM 系 1:50000 地形图数字化生成, 格网间距为 25m。首先利用 15 个数据点中的第 6 和第 7 点状态向量内插了影像起始行、中间行、结束行上的状态向量, 并依此建立了 SAR 构像几何, 生成的模拟影像如图 2 所示, 图 3 是对应部分的原始影像, 从中可以看到二者在视觉上非常一致, 地形脉络几乎完全一样。叠掩(Layover)和阴影现象被真实准确地模拟出来。

利用内插的状态向量信息与 1:50000 DEM 对 SAR 影像进行了几何校正, 所得结果如图 4 所示, 可以看到, 校正后像元的相对位置发生严重的畸变, 仅仅在平坦的地区依稀可以看见原始影像的风貌, 在山区则完全扭曲, 根本无法使用。这正是不准确的轨道数据所致。

也许是因为内插得到的卫星状态向量离真实值差别太大, 模拟影像与真实影像在 Y 方向(方位向)有一个显著的平移量, 粗略估计为 40 个像元。在补偿了这个平移量后, 运用上述匹配策略, 首先在模拟影像上提取了 221 个候选点, 然后共进行了两级匹

配,最终找到了 132 对匹配成功的点,对每对匹配点,按(4)式计算同名点的坐标差,并考虑 40 个像元的方位向平移,最终得到如(5)式的方程如下:

$$\begin{aligned} \Delta_i &= 44.7182 + 0.00036 \times i_r + 0.000953 \times j_r \\ \Delta_j &= 3.10723 + 0.00123 \times i_r - 0.000003 \times j_r \end{aligned} \quad (6)$$

将上式描述的轨道数据不准确所致的几何校正偏差加以补偿后,得到新的校正结果如图 5 所示,为了进行比较,将 DEM 生成的炫晕图显示如 6,可以看到 Layover 和 Foreshortening 等局部几何畸变都被很好地校正过来,这是用普通的多项式校正方法根本无法作到的。为了定量地评价校正精度,以该区作过正射校正的 SPOT 影像(像元大小为 10m)为基准,选取了 22 对检核点,结果统计如表 1 所示:

表 1 几何校正精度统计结果

Table 1 The error statistics of geometric rectification /m

水平方 向最大 误差	垂直方 向最大 误差	水平方向误 差均方差 (RMSE <sub>x</sub> )	垂直方向误 差均方差 (RMSE <sub>y</sub> )	总的误差 均方差 (RMSE)
42.4	41.5	28.1	22.3	35.8

在目标影像上选择了一系列候选点,这些点位于山峰或其它具有良好可辨性的地方。本文采用 Forstner 算子提取这些候选点。该算子是 Forstner 1987<sup>[10]</sup>年提出来的,已成为摄影测量界著名的定位算子,它具有定位精确,速度快的优点<sup>[11]</sup>。Forstner 算子不仅能定位点类型的特征(包括角点和交叉点),而且也能定位边类型的特征。

(1) 指定窗口大小,窗口大小根据所需的候选点数变化。

(2) 利用差分算子提取粗选点,比较该像素与

其上下左右四个方向的邻元的灰度差,如果有两个以上的差值幅度在指定阈值之上,认为该像元通过了粗选。

(3) 对粗选点(c, r),在以它为中心的 3×3 窗口内,计算协方差矩阵 N 及兴趣值 q:

$$N = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} N_{11} &= (g_{c-1, r-1} - g_{c, r})^2 + (g_{c+1, r+1} - g_{c, r})^2 \\ N_{12} &= N_{21} = (g_{c, r} - g_{c-1, r-1})(g_{c-1, r} - g_{c, r-1}) \\ &\quad + (g_{c+1, r+1} - g_{c, r})(g_{c, r+1} - g_{c+1, r}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} N_{22} &= (g_{c-1, r} - g_{c, r-1})^2 + (g_{c, r+1} - g_{c+1, r})^2 \\ q &= \frac{4(N_{11}N_{22} - N_{12}N_{21})}{(N_{11} + N_{22})^2} \end{aligned} \quad (9)$$

(4) 给定阈值 T<sub>q</sub>,对所有的粗选点(c, r),确定其权值 w:

$$w_{c, r} = \begin{cases} 0 & (q_{c, r} \leq T_q) \\ \frac{(N_{11}N_{22} - N_{12}N_{21})}{N_{11} + N_{22}} & (q_{c, r} > T_q) \end{cases} \quad (10)$$

(6) 窗口中权值最大者为候选点。

从表 1 可见,总的校正精度在 DEM 的一个像元左右,对于山地起伏区的 SAR 几何校正,这已是相当不错的校正结果。值得注意的是,本文介绍的几何校正方法完全不需要地面控制点,而且,除了在进行模拟影像与真实影像的匹配中,当二者具有非常显著的位移需要人工提供粗略的匹配初值外,本方法可以自动地进行,这对于大规模的处理具有重要意义。目前,我们购买的星载 SAR 数据,很少附有非常准确的轨道数据,本文提出的方法可以成功地解决这类数据的几何校正问题。

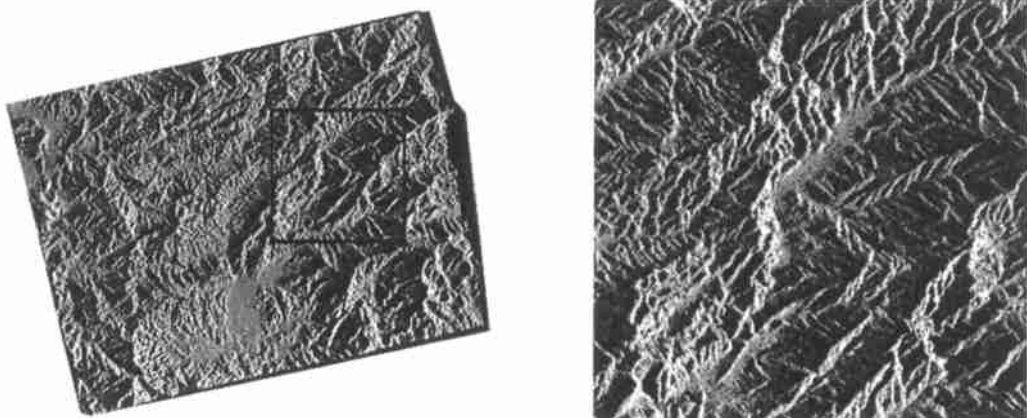


图 2 模拟 SAR 影像及其局部

Fig. 2 Simulated SAR image

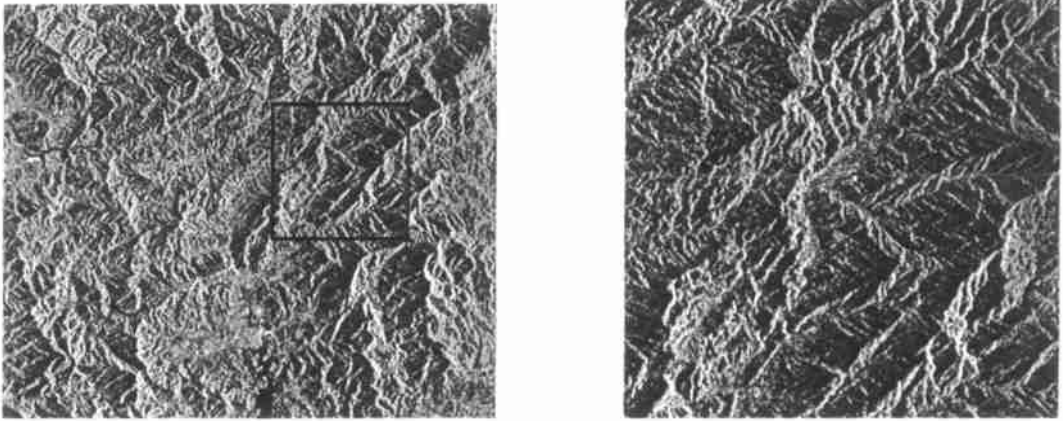


图 3 真实 SAR 影像及其局部  
Fig.3 Real SAR image

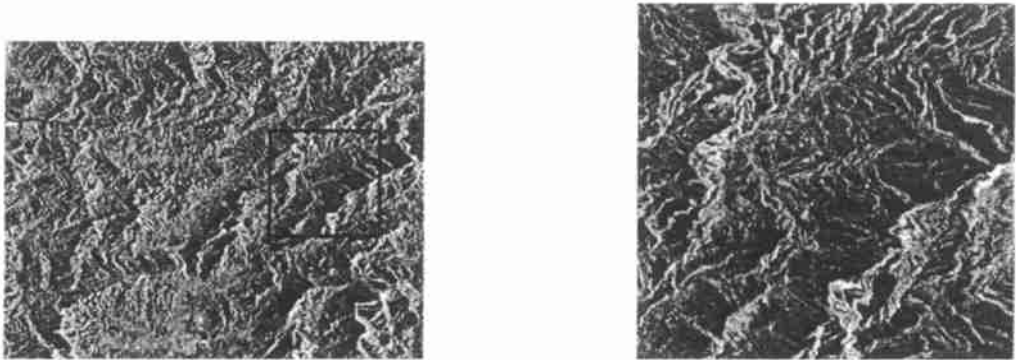


图 4 直接几何校正的 SAR 影像及其局部  
Fig.4 Rectified SAR image using the state vectors in the leader file

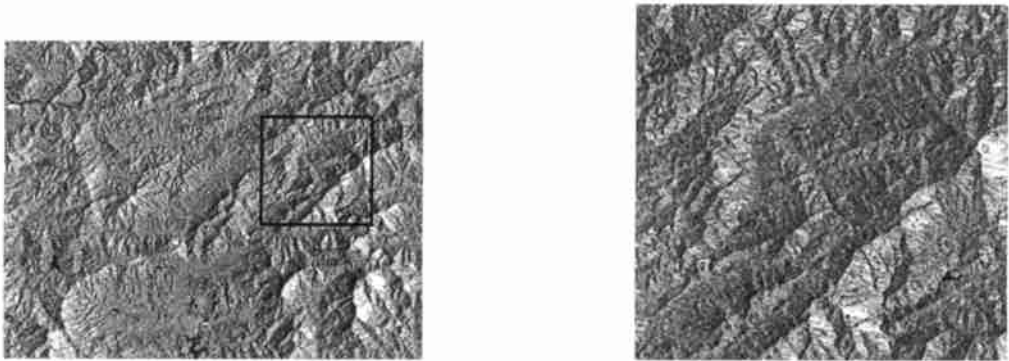


图 5 利用模拟影像进行几何校正的 SAR 影像及其局部  
Fig.5 Rectified SAR image using SAR simulation image as a control

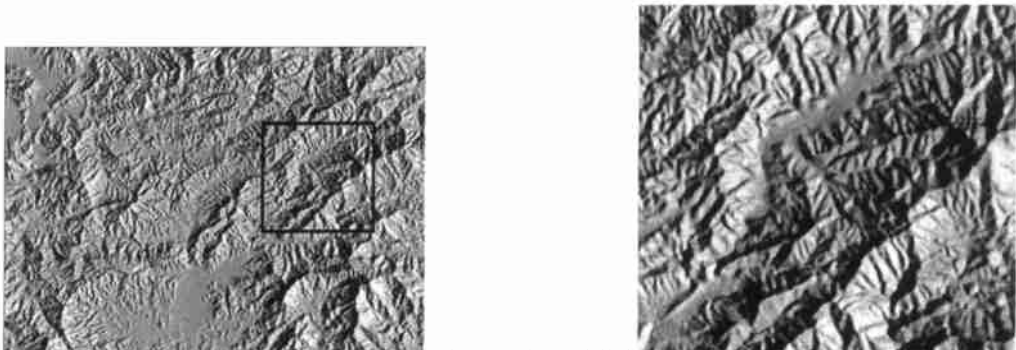


图 6 DEM 晕图及其局部  
Fig.6 Shaded Digital Elevation Model

## 参考文献 (References)

- [1] Zhang Yonghong, Zhang Jixian, Lin Zongjian. SAR image rectification [J]. *ACTA GEODAETIC et CARTOGRAPHIC SINICA*, 2002, **31**(2):134—138. [张永红, 张继贤, 林宗坚. SAR 影像几何校正. 测绘学报[J], 2002, **31**(2):134—138.]
- [2] Johnsen H, Lauknes L, Gneriussen 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.
- [3] 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.
- [4] 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**(1):17—38.
- [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] Kimura H, Kodaria N. 1993. Simulation and comparison of JERS-1 and ERS-1 SAR images [C]. Proc. IGARSS '93. 1993, **4**:1774—1776.
- [7] Yelizavetin I V, Paillou P. S-Band Radar Imagery in Studies of Earth Terrain Features [J]. *Mapping Sciences and Remote Sensing*. 1998, **35**(2):93—115.
- [8] Guo Huadong *et al.* Radar for Earth Observation: Theory and Applications [M]. Beijing: Science Press, 2000. [郭华东等著. 雷达对地观测理论与应用. 科学出版社, 2000.]
- [9] Muhleman D. O. Radar Scattering from Venus and Moon. *Astronomic Journal* [J]. 1964, **24**, 34—40.
- [10] Forstner W, Gulch E. A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners, and Centres of Circular Features [C]. Proc. of Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, Switzerland, 1987, 281—305.
- [11] Zhang Zunxun, Zhang Jianqing. Digital Photogrammetry [M]. Wuhan: The Publication of Wuhan Technology Univ. of Surveying and Mapping, 1996. [张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996.]

## A Quasi-automatic Rectification Method of SAR Image Based on Image Simulation

ZHANG Yong-hong, ZHANG Ji-xian, YANG Chong-yuan

(Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039)

**Abstract:** SAR image usually becomes very difficult when precise orbit data of SAR platform is not available. A SAR rectification method based on image simulation is proposed in this paper. The simulated SAR image is generated by means of Digital Elevation Model (DEM) and the known orbit data, then image matching is performed between the simulated and the real SAR image to identify some pairs of corresponding points. The position differences of these corresponding points are caused by the imprecision of the orbit data, and can be used to correct the rectification residuals. In this paper, the common SAR image simulation algorithms are introduced briefly, and then the algorithm used to match real to the simulated image is presented, as well as the SAR rectification method based on simulated image. At last, an experiment on the proposed rectification method is made, in which a RADARSAR SGF image is rectified precisely by means of simulated SAR image. Moreover, except the image matching stage, all the procedures of this rectification can be done automatically, which is significant to the large-volume SAR image processing.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar; geometric rectification; image simulation; image matching