

文章编号:1001-1595(2010)03-0264-07

## 用 RPC 替代星载 SAR 严密成像几何模型的试验与分析

张 过<sup>1,2</sup>, 费文波<sup>1</sup>, 李 贞<sup>1</sup>, 祝小勇<sup>2</sup>, 唐新明<sup>2</sup>

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. 中国测绘科学研究院, 北京 100039

### Analysis and Test of the Substitutability of the RPC Model for the Rigorous Sensor Model of Spaceborne SAR Imagery

ZHANG Guo<sup>1,2</sup>, FEI Wenbo<sup>1</sup>, LI Zhen<sup>1</sup>, ZHU Xiaoyong<sup>2</sup>, TANG Xinming<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China

Abstract: The imaging characteristics of push-broom scanner imagery are compared with radar imagery, and the applicability of fitting SAR rigorous geometric imaging by the RPC model are analyzed in theory. Then the basic approach and flows of calculating the RPC's coefficients are introduced. In the experimental verification part of this paper, spaceborne SAR images are used with different resolutions to calculate the RMS errors of the 3rd order RPC with unequal denominator for fitting the rigorous sensor models. The experimental results show that compared with the rigorous sensor model, the RPC model has no discernable loss of accuracy not only for the high resolution SAR imagery but also for the middle or low resolution SAR imagery, i. e., the RPC model can replace the rigorous sensor model for photogrammetric processing.

Key words: spaceborne SAR imagery; RPC model; substitutability

摘 要: 将推扫式光学卫星遥感影像与雷达影像的成像特点进行比照和分析, 从理论上阐述 RPC 模型拟合 SAR 严密几何成像的可行性。然后, 介绍求解 RPC 参数的基本方法和流程。在实验部分, 采用不同分辨率的 SAR 数据作为实验数据, 计算分母不同且为三阶的 RPC 模型拟合严密成像几何模型的残差。实验结果证明, 无论对高分辨 SAR 影像或是中低分辨率的 SAR 影像, RPC 模型拟合严密几何成像模型都达到了较高的精度, 可以取代严密成像几何模型进行摄影测量处理。

关键词: 星载 SAR; RPC 模型; 可替代性

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, 40523005, 40801178); 国家 863 计划重点项目(2007AA120203); 科技部国际合作项目(2006DFA71570); 地理空间信息工程国家测绘局重点实验室开放基金项目(A1721)

## 1 引 言

有理多项式(rational polynomial coefficient, RPC, 在有的文献中也简称为 RFMs)模型是一种卫星遥感影像的通用成像几何模型, 一般在充分利用卫星遥感影像附带的辅助参数基础上, 根据构建的卫星影像严密成像几何模型进行拟合而得到的广义传感器模型<sup>[1]</sup>。目前, 将 RPC 模型替代严密成像模型来进行摄影测量处理已被普遍接受<sup>[2-5]</sup>, 但是对于 RPC 模型应用于 SAR 影像的尝试却很少有报道<sup>[6]</sup>。

SAR 卫星的发射和数据应用已有多年的历史, 上世纪 90 年代进入民用阶段, 主要有欧空局的 ERS-1/2 和 Envisat(C 波段)、日本的 JERS 和 Alos(L 波段)、加拿大的 Radarsat-1/2、德国的

TerraSAR 和意大利的 COSMO-SkyMed。TerraSAR、Radarsat-2 和 COSMO-SkyMed 为 2007 年以后发射的高分辨率、多极化、多模式的雷达卫星。特别的是, Radarsat-2 作为成熟的商业卫星, 首次在 SAR 影像产品中, 提供 RPC 模型参数。

本文旨在从理论上证明和实验上验证 RPC 模型能用于不同分辨率的星载 SAR 影像处理, 也能达到与严密几何模型相同的精度。

## 2 SAR 影像独特的成像特征

SAR(synthetic aperture radar) 的成像为侧视成像, 其几何关系如图 1 所示, 其中,  $H$  为传感器高度,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为地面点  $A$ 、 $B$ 、 $C$  在影像上的对应点。

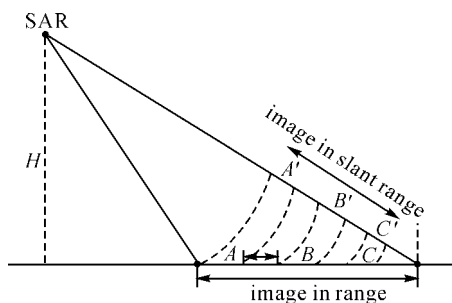


图 1 SAR 成像几何关系示意图<sup>[8]</sup>

Fig. 1 The geometry of a SAR image<sup>[8]</sup>

Curlander J C 在他的著作中讨论了由几何失真引起的影像定位误差<sup>[8]</sup>。经成像处理得到的 SAR 图像为一幅平面图,其纵向平行于卫星的飞行航线,即方位向;横向垂直于卫星的航线,即距离向。由于 SAR 为侧视成像,SAR 图像存在着特有的几何畸变,概括起来有:近距离压缩现象,以及地形起伏而产生的透视收缩、叠掩、阴影等。

图 2 展示了 SAR 侧视成像时斜距投影会造成图像的几何畸变,其中 A (B) 和 CD 区域表示斜距成像的透视收缩现象,DE 区域由于阴影而没有数据信息,叠掩导致 GF 区域在斜距成像面倒置为 GF。

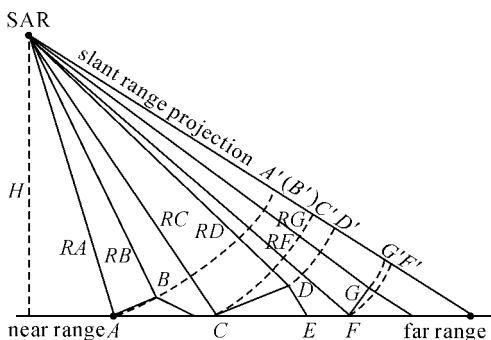


图 2 SAR 图像几何畸变示意图<sup>[8]</sup>

Fig. 2 Outline of the geometric distortion of a SAR image<sup>[8]</sup>

### 3 SAR 影像成像的 RPC 拟合分析

当前,RPC 模型能很好地拟合线阵推扫式光学卫星遥感影像的成像,在高分辨率光学影像的处理中得到了广泛的应用。C. Vincent Tao 等人曾在文献中指出利用通用模型的独立性,在处理不同的传感器数据时,摄影测量处理软件不需要改动,而仅仅需要修改通用模型的系数<sup>[9]</sup>。因此,对比 SAR 影像与线阵推扫式光学卫星遥感影像

的几何成像特性,本文将 RPC 模型用于对 SAR 影像成像的拟合并不是偶然的。

#### 3.1 雷达图像与光学摄影像片几何特性对比

在雷达测量中,由于地形起伏或高大建筑物等其他顶部的雷达回波先于底部被天线接受,故产生像点移位现象。类似于光学影像的立体观测法,视差原理也可以用在雷达测量中,即通过量测两幅影像的视差来计算相应地形的高程<sup>[10]</sup>。

如图 3 中,地面点 A 在某一基准面上的垂直投影点为 A<sub>0</sub>,其高差 AA<sub>0</sub> = h, A 与 A<sub>0</sub> 在像面上的构像为 a 和 a<sub>0</sub>,则 aa<sub>0</sub> = d<sub>y</sub> 即为高差 h 引起的像点移位。由图中几何关系可得

$$d_y = h \cos \theta / m_y \quad (1)$$

式中,θ 为视角;m<sub>y</sub> 为距离向图像比例尺分母。

而在线阵推扫式光学卫星遥感影像上,地形起伏引起的影像移位。由摄影测量学可知<sup>[12]</sup>

$$d_y = hr / H \quad (2)$$

式中,h 为地物目标点对基准面的高差;H 为摄站对基准面的高度(航高);r 为像底点至像点的辐射距离。

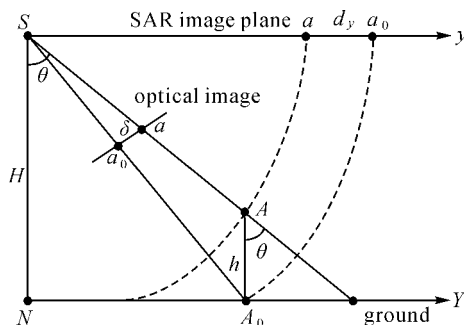


图 3 地形起伏引起的影像移位<sup>[11]</sup>

Fig. 3 The image point displacement due to topographic relief

比较式(1)和式(2)可知:在光学和 SAR 影像都存在由于高程引起的像点位移,只是引起像点位移的方向不同。光学影像中,位移总是在远离传感器的方向发生,光学传感器在天顶时,这种位移相对较小。在雷达图像上,位移是朝向传感器的,传感器在天顶时这种偏差会变得相当大。

#### 3.2 SAR 影像成像与推扫式光学卫星遥感影像成像模型形式对比

在推扫式光学卫星遥感影像中,RPC 模型的实质是地球表面一小范围的三维地形在二维影像平面上的中心投影关系<sup>[8]</sup>。线阵推扫式成像传感器是逐行以时序的方式获取二维影像。一般是先

在像面上形成一条线影像,然后卫星沿着预定的轨道向前推进,逐条扫描后形成一幅二维影像。影像上每一行像元在同一时刻成像且为中心投影,整个影像为多中心投影。星载雷达影像的成像方式,是卫星以一个脉冲重复间隔向地面发射电磁波,接收回波形成的影像,在多普勒中心频率归零后的影像中,影像上的一行就是相应地面三维地形的距离投影。

星载 SAR 影像与推扫式光学卫星遥感影像成像几何关系的最大区别是:光学影像每行是地面三维地形中心投影所得,SAR 影像每行是地面三维地形距离投影所得,二者由高程引起的像点位移方式不同。

由摄影测量学可知<sup>[12]</sup>,推扫式光学卫星遥感影像每行成像几何关系如下

$$x_i = -f \frac{a_1(X - X_{S_i}) + b_1(Y - Y_{S_i}) + c_1(Z - Z_{S_i})}{a_3(X - X_{S_i}) + b_3(Y - Y_{S_i}) + c_3(Z - Z_{S_i})} \quad (3)$$

其中,  $x_i$  为地面点对应在光学影像上某一行的像坐标。

由 F. Leberl 公式可知<sup>[10]</sup>,因雷达天线的瞬时位置到地面点之间的矢量长度与根据像坐标量测值应相等,则对于斜距显示的图像如下

$$x_i = \frac{\sqrt{(X - X_{S_i})^2 + (Y - Y_{S_i})^2 + (Z - Z_{S_i})^2} - R_0}{m} \quad (4)$$

其中,  $R_0$  为扫描延迟;  $x_i$  为地面点在斜距显示图像上距离向的像坐标;  $m$  为距离向图像比例分母。

分析式(3)、式(4)可知,类似于推扫式光学遥感影像成像的模型方式,SAR 影像每行的距离投影同样可以用简单多项式表示,则在推扫式光学遥感影像成像几何关系能用 RPC 模型表示的前提下,星载雷达影像的成像几何关系也可以用 RPC 模型表示。

### 3.3 SAR 严密成像几何模型

合成孔径雷达卫星定位原理是利用等距离线、等多普勒线在地球等高面上的交点确定影像像元位置。距离-多普勒法完全是从 SAR 成像几何的角度来探讨像点与物点之间的对应关系,就是 SAR 的严密成像几何模型。

因此 SAR 影像上任意点的三维空间坐标的确定需要求解三个方程式<sup>[8]</sup>。

#### 1. 描述地球形状模型

$$\frac{X^2 + Y^2}{A^2} + \frac{Z^2}{B^2} = 1 \quad (5)$$

式中,  $X、Y、Z$  为 SAR 影像上一点对应的在 WGS84 椭球下的三维坐标;  $A = a_e + h, B = b_e + h, h$  为该点的椭球高;  $a_e$  和  $b_e$  分别为地球椭球的长短半轴。

#### 2. SAR Doppler 方程

$$f_D = -\frac{2}{R}(R_S - R_T)(V_S - V_T) \quad (6)$$

其中,  $f_D$  为该点对应的多普勒中心频率;  $R_S$  和  $V_S$  分别为该点成像时刻的卫星的位置和速度矢量;  $R_T = (X \ Y \ Z)^T$  和  $V_T$  为该点的位置和速度矢量;  $\lambda$  为雷达波长;  $R$  为该点成像时刻卫星和地面点的距离。

#### 3. SAR 距离方程

$$R^2 = (X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2 + (Z - Z_s)^2 \quad (7)$$

以上式(5)~式(7)三个式子就组成了一个完备系统,其中,  $f_D、R$  以及卫星的位置矢量  $R_S$  和速度矢量  $V_S$  可以从 SAR 影像的辅助数据文件读取和计算,因此在已知影像坐标以及高程的情况下,可以求解与影像点对应的物点的三维坐标  $X、Y、Z$ 。

## 4 求解 RPC 模型的流程和基本方法

### 4.1 RPC 模型

RPC 模型是将地面点大地坐标  $D(Latitude, Longitude, Height)$  与其对应的像点坐标  $d(Line, Sample)$  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<sup>[13]</sup>

$$\left. \begin{aligned} Y &= \frac{Num_L(P, L, H)}{Den_L(P, L, H)} \\ X &= \frac{Num_S(P, L, H)}{Den_S(P, L, H)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中,

$$Num_L(P, L, H) = a_1 + a_2L + a_3P + a_4H + a_5LP + a_6LH + a_7PH + a_8L^2 + a_9P^2 + a_{10}H^2 + a_{11}PLH + a_{12}L^3 + a_{13}LP^2 + a_{14}LH^2 + a_{15}L^2P + a_{16}P^3 + a_{17}PH^2 + a_{18}L^2H + a_{19}P^2H + a_{20}H^3$$

$$Den_L(P, L, H) = b_1 + b_2L + b_3P + b_4H + b_5LP + b_6LH + b_7PH + b_8L^2 + b_9P^2 + b_{10}H^2 + b_{11}PLH + b_{12}L^3 + b_{13}LP^2 + b_{14}LH^2 + b_{15}L^2P + b_{16}P^3 + b_{17}PH^2 + b_{18}L^2H + b_{19}P^2H + b_{20}H^3$$

$$Num_S(P, L, H) = c_1 + c_2L + c_3P + c_4H + c_5LP +$$

$$\begin{aligned}
 & c_6 L H + c_7 P H + c_8 L^2 + c_9 P^2 + c_{10} H^2 + \\
 & c_{11} P L H + c_{12} L^3 + c_{13} L P^2 + c_{14} L H^2 + \\
 & c_{15} L^2 P + c_{16} P^3 + c_{17} P H^2 + c_{18} L^2 H + \\
 & c_{19} P^2 H + c_{20} H^3 \\
 \text{Den}_s ( P, L, H) &= d_1 + d_2 L + d_3 P + d_4 H + \\
 & d_5 L P + d_6 L H + d_7 P H + d_8 L^2 + d_9 P^2 + \\
 & d_{10} H^2 + d_{11} P L H + d_{12} L^3 + d_{13} L P^2 + \\
 & d_{14} L H^2 + d_{15} L^2 P + d_{16} P^3 + d_{17} P H^2 + \\
 & d_{18} L^2 H + d_{19} P^2 H + d_{20} H^3
 \end{aligned}$$

这里,  $a_i, b_i, c_i, d_i$  为 RPC 模型系数, 其中  $b_1 = 1, d_1 = 1; (P, L, H)$  为标准化的地面坐标,  $(X, Y)$  为标准化的影像坐标, 其标准化公式如下

$$\left. \begin{aligned}
 P &= \frac{D_{\text{lat}} - D_{\text{lat\_off}}}{D_{\text{lat\_scale}}} \\
 L &= \frac{D_{\text{lon}} - D_{\text{lon\_off}}}{D_{\text{lon\_scale}}} \\
 H &= \frac{D_{\text{hei}} - D_{\text{hei\_off}}}{D_{\text{hei\_scale}}} \\
 X &= \frac{S - S_{\text{off}}}{S_{\text{scale}}} \\
 Y &= \frac{l - l_{\text{off}}}{l_{\text{scale}}}
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中,  $S_{\text{off}}$  和  $l_{\text{off}}$  为影像像素坐标的偏移值,  $S_{\text{scale}}$  和  $l_{\text{scale}}$  为影像像素坐标的比例值; 同样地,  $D_{\text{lat\_off}}$ 、 $D_{\text{lon\_off}}$  和  $D_{\text{hei\_off}}$  是地面坐标的偏移值,  $D_{\text{lat\_scale}}$ 、 $D_{\text{lon\_scale}}$  和  $D_{\text{hei\_scale}}$  是地面坐标的比例值。RPC 模型有 9 种不同的形式, 如表 1 所示。

表 1 RPC 模型形式

Tab. 1 Nine cases of the RPC model

分母	待求解 RPC 阶数	模型参数个数	需要的最小控制点数目
$\text{Den}_s ( P, L, H)$	1	14	7
$\text{Den}_L ( P, L, H)$	2	38	19
$\text{Den}_s ( P, L, H) =$ $\text{Den}_L ( P, L, H) \quad 1$	3	78	39
$\text{Den}_s ( P, L, H) =$ $\text{Den}_L ( P, L, H) \quad 1$	1	11	6
	2	29	15
	3	59	30
$\text{Den}_s ( P, L, H) =$ $\text{Den}_L ( P, L, H) \quad 1$	1	8	4
	2	20	10
	3	40	20

表 1 给出在 9 种情况下待求解 RPC 模型参数的形式、参数个数和需要的最少控制点。当 RPC 模型分母相同且恒为 1 时, RPC 模型退化为一般的三维多项式模型, 当 RPC 模型分母相同但不恒为 1, 且在一阶多项式的情况下, RPC 模型退化为 DL T 模型, 因此 RPC 模型是一种广义的成像几何模型。

## 4.2 RPC 模型参数求解方法

为了用 RPC 去拟合严密几何成像模型, 将方程 (8) 变形为<sup>[13]</sup>

$$\left. \begin{aligned}
 F_x &= \text{Num}_s ( P, L, H) - X \text{Den}_s ( P, L, H) = 0 \\
 F_y &= \text{Num}_L ( P, L, H) - Y \text{Den}_L ( P, L, H) = 0
 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

则误差方程为

$$V = Bx - 1, W \quad (12)$$

其中,

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial a_i} & \frac{\partial F_x}{\partial b_j} & \frac{\partial F_x}{\partial c_i} & \frac{\partial F_x}{\partial d_j} \\ \frac{\partial F_y}{\partial a_i} & \frac{\partial F_y}{\partial b_j} & \frac{\partial F_y}{\partial c_i} & \frac{\partial F_y}{\partial d_j} \end{bmatrix}, \quad (i=1, 20, j=2, 20);$$

$$1 = \begin{bmatrix} -F_x^0 \\ -F_y^0 \end{bmatrix}; \quad x = [a_i \quad b_j \quad c_i \quad d_j]^T; \quad W \text{ 为权矩阵,}$$

在 RPC 参数求解中, 一般为单位权矩阵, 在形成法方程的时候省略。

根据最小二乘平差原理, 可将误差方程变换为法方程

$$(B^T W B) x = B^T W 1 \quad (13)$$

王新洲教授提出谱修正迭代法求解法方程的方法, 不论法方程呈良态、病态或秩亏, 其解算程序均不需加任何变化。当法方程呈良态时, 经几次迭代就可收敛到精确解<sup>[14]</sup>。

基于王新洲的方法, 解方程 (13), 将上面式子两边同时加上  $x$

$$(B^T W B + E) x = B^T W 1 + x \quad (14)$$

得到

$$x^{(k)} = (B^T W B + E)^{-1} (B^T W 1 + x^{(k-1)}) \quad (15)$$

由王新洲的理论可知,  $x$  的估计值无偏<sup>[15]</sup>。

## 4.3 解求 RPC 模型参数的流程

RPC 模型参数求解有与地形无关和与地形相关两种求解方式。在严密成像几何模型已知的情况下, 采用与地形无关的求解方式, 否则采用与地形相关的求解方式, 该方式需要给定一定数目的控制点<sup>[15]</sup>。

利用最小二乘平差原理, 用严密成像几何模型所生成的地面空间格网点来求解 RPC 模型参数。在高程方向以一定的间隔分层, 在平面上以一定的格网大小, 使用严密成像模型来建立影像规则格网。影像面中的高程最大值和最小值可根据美国地质调查局 (USGS) 提供的 DEM 获取。该方法包括以下步骤<sup>[1-2, 9]</sup>。

### 4.3.1 建立空间格网

该算法的基本思想为: 建立一个三维的物方

空间格网来拟合严密成像几何模型,并由格网点坐标来解算 RPC 参数,物方点空间坐标所对应的影像被用来建立这个三维格网。

首先以一定的格网大小  $m \times n$ (例如,  $10 \times 10$ ) 建立影像规则格网,各网点在影像上均匀分布。然后,建立一个三维的物方格网,格网覆盖了三维地形表面的空间范围。估算该地区的最大最小椭圆高来确定高程分层,分层以一定间隔均匀分布。为了防止设计矩阵状态恶化,一般高程方向分层的层数超过 3。最后,通过严密成像几何模型,可计算对应影像像点的物方格网点坐标。物方空间格网见图 4。

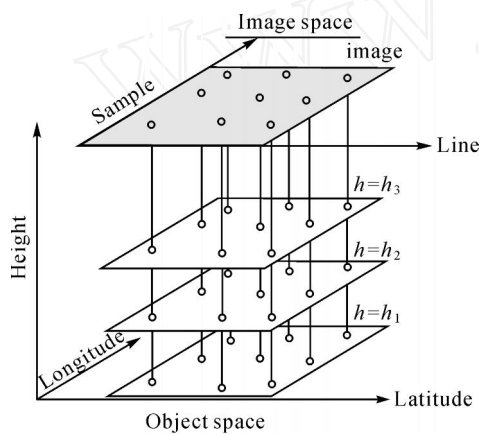


图 4 RPC 的生成<sup>[2]</sup>

Fig. 4 RPC generation<sup>[2]</sup>

### 4.3.2 RPC 模型的拟合

利用控制点来求解 RRC 模型的参数 ( $a_i, b_j, c_i, d_j$ )。

### 4.3.3 精度检查

加密控制格网和层,建立独立检查点。利用生成的控制点坐标根据式(16)、式(17)计算影像坐标和地面坐标的标准化参数,然后根据式(9)、式(10)将控制点和检查点坐标标准化<sup>[15]</sup>。

$$\left. \begin{aligned} LAT\_OFF &= \frac{Latitude}{n} \\ LONG\_OFF &= \frac{Longitude}{n} \\ HEIGHT\_OFF &= \frac{Height}{n} \\ LINE\_OFF &= \frac{Line}{n} \\ SAMP\_OFF &= \frac{Sample}{n} \end{aligned} \right\} (16)$$

$$\left. \begin{aligned} LAT\_SCALE &= \max(|Latitude_{max} - LAT\_OFF| |Latitude_{min} - LAT\_OFF|) \\ LONG\_SCALE &= \max(|Longitude_{max} - LONG\_OFF| |Longitude_{min} - LONG\_OFF|) \\ HEIGHT\_SCALE &= \max(|Height_{max} - HEIGHT\_OFF| |Height_{min} - HEIGHT\_OFF|) \\ LINE\_SCALE &= \max(|Line_{max} - LINE\_OFF| |Line_{min} - LINE\_OFF|) \\ SAMP\_SCALE &= \max(|Sample_{max} - SAMP\_OFF| |Sample_{min} - SAMP\_OFF|) \end{aligned} \right\} (17)$$

用求解的 RPC 模型参数来计算检查点对应的影像坐标,通过由严密成像几何模型计算的检查点影像坐标的差值来评定求解 RPC 模型参数的像方精度。

## 5 RPC 模型参数求解实验和结论

为了验证 RPC 能普遍使用于 SAR 影像中,本文先对目前国外的高分辨率 SAR 影像 TerraSAR、Radarsat-2、COSMO-SkyMed 数据根据严密成像几何模型求解 RPC 参数,又对中低分辨率的 SAR 影像 ERS、JERS、ASAR 几种卫星遥感影像进行了同样的实验。基于 Tao 等人关于 RPC 模型的总结<sup>[9]</sup>:三阶的分母不相同的 RPC 模型的精度最高,故本文只对这一种模型进行实验。

### 5.1 对高分辨率 SAR 影像的实验

#### 5.1.1 实验一:TerraSAR

##### 5.1.1.1 实验数据简介

实验采用武汉地区的 TerraSAR SSC 类型数据,极化方式 HH,降轨右视,成像模式 SM,2008-10-07 成像,有效影像高度为 6 052 行,每行有 11 264 像素,影像中心经纬度为 114.456° 和 30.396 6°,雷达波长为 0.031 066 6 m。

##### 5.1.1.2 实验结果

该组实验是在控制点格网大小为  $29 \times 42$ ,高程分 15 层,检查点的格网大小为  $28 \times 41$ ,高程分 14 层的条件下获得的,结果见表 2。

表 2 利用 TerraSAR 影像求解 RPC 模型参数精度  
Tab.2 RMS (MAX) errors of RPC with TerraSAR data / pixel

点 类型	Y		X		平面精度	
	max	RMS	max	RMS	max	RMS
检查点	- 0.000 03	0.000 01	0.000 54	0.000 30	0.000 54	0.000 30
控制点	- 0.000 03	0.000 01	- 0.000 46	0.000 29	0.000 46	0.000 29

5.1.2 实验二:Radarsat-2

5.1.2.1 实验数据简介

实验采用河北地区的 Radarsat-2 数据,2008-06-24 成像,有效影像高度为 11 263 行,每行有 9 264 像素,影像中心经纬度为 116.069 945 63 和 39.820 247 11°,雷达波长为 0.056 m。

5.1.2.2 实验结果

该组实验是在控制点格网大小为 56 ×46,高程分 15 层,检查点的格网大小为 55 ×45,高程分 14 层的条件下获得的,结果见表 3。

表 3 利用 Radarsat-2 影像求解 RPC 模型参数精度  
Tab.3 RMS (MAX) errors of RPC with Radarsat-2 data / 10<sup>-5</sup> pixel

点类型	Y		X		平面精度	
	max	RMS	max	RMS	max	RMS
检查点	- 3.329	0.674	- 0.165	0.046	3.333	0.676
控制点	- 4.613	0.739	- 0.219	0.049	4.619	0.741

5.1.3 实验三: COSMO-SkyMed

5.1.3.1 实验数据简介

实验采用我国天津地区的 COSMO 数据,2008-04-09 成像,有效影像高度为 18 960 行,每行有 19 366 像素,影像中心经纬度为 117.22 和 39.130 7°,雷达波长为 0.031 228 4 m。

5.1.3.2 实验结果

该组实验是在控制点格网大小为 49 ×50,高程分 15 层,检查点的格网大小为 48 ×49 像元,高程分 14 层的条件下获得的,结果见表 4。

表 4 利用 COSMO 影像求解 RPC 模型参数精度  
Tab.4 RMS (MAX) errors of RPC with COSMO-SkyMed data / (10<sup>-4</sup> pixel)

点 类型	Y		X		平面精度	
	max	RMS	max	RMS	max	RMS
检查点	- 0.019 50	0.005 08	0.069 79	0.024 03	0.070 09	0.024 56
控制点	1.890 90	0.403 06	- 6.770 27	2.159 85	6.772 41	2.197 13

实验一、实验二和实验三的结果表明:对于 TerraSAR 影像,求解的 RPC 参数检查点像方平面

最大误差为 0.000 54 像素,平面精度为 0.000 30 像素;对于 Radarsat-2 影像,求解的 RPC 参数检查点像方平面最大误差为 3.333 ×10<sup>-5</sup> 像素,平面精度为 6.76 ×10<sup>-6</sup> 像素;对于 COSMO-SkyMed 影像,求解的 RPC 参数检查点像方平面最大误差为 7.009 ×10<sup>-6</sup> 像素,平面精度为 2.456 ×10<sup>-6</sup> 像素。

这说明,对于高分辨率 SAR 影像,RPC 拟合严密成像几何模型的精度可达到了很高的精度,可以替代严密几何成像模型进行几何处理。

5.2 对 中 低 分 辨 率 SAR 影 像 的 实 验

5.2.1 实验四: ERS

5.2.1.1 实验数据简介

实验采用的 ERS 影像为我国北京地区的 ERS-1 数据,1997-10-18 成像,有效影像高度为 26 454 行,每行有 4 900 像素,影像中心经纬度为 117.7 和 39.1°,雷达波长为 0.056 666 m。

5.2.1.2 实验结果

该组实验是在控制点格网大小为 40 ×40,高程分 9 层,检查点的格网大小为 80 ×80,高程分 18 层的条件下获得的,结果见表 5。

表 5 利用 ERS 影像求解 RPC 模型参数精度  
Tab.5 RMS (MAX) errors of RPC with ERS data / pixel

点 类型	Y		X		平面精度	
	max	RMS	max	RMS	max	RMS
检查点	- 0.008 38	0.002 14	- 0.020 46	0.005 50	0.021 95	0.005 90
控制点	- 0.008 38	0.002 22	- 0.020 46	0.005 53	0.021 95	0.005 96

5.2.2 实验五: ASAR

5.2.2.1 实验数据简介

实验采用的 SAR 影像为我国河北地区的 ASAR 数据,2004-09-17 成像,有效影像高度为 28 751 行,每行有 5 170 像素,影像中心经纬度为 114.231 和 36.787 3°,雷达波长为 0.056 235 6 m。

5.2.2.2 实验结果

该组实验是在控制点格网大小为 40 ×40,高程分 9 层,检查点的格网大小为 80 ×80,高程分 18 层的条件下获得的,结果见表 6。

表 6 利用 ASAR 影像求解 RPC 模型参数精度  
Tab.6 RMS (MAX) errors of RPC with ASAR data / pixel

点 类型	Y		X		平面精度	
	max	RMS	max	RMS	max	RMS
检查点	- 0.011 26	0.002 69	- 0.022 08	0.005 93	0.024 44	0.006 52
控制点	- 0.011 26	0.002 80	- 0.022 08	0.005 98	0.024 44	0.006 60

实验四和实验五的结果表明:对于 ERS 影像,求解的 RPC 参数检查点像方平面最大误差为 0.021 95 像素,平面精度为 0.005 90 像素;对于 ASAR 影像,求解的 RPC 参数检查点像方平面最大误差为 0.024 44 像素,平面精度为 0.006 52 像素。即对于中低分辨率 SAR 卫星,RPC 拟合严密成像几何模型的精度都达到了 5% 的像素以内,可以取代严密成像几何模型进行摄影测量处理。

## 6 结束语

本文分别从理论和实验两个方面,验证了 RPC 模型对 SAR 的严密成像模型的可替代性。文中对比了推扫式卫星影像与 SAR 影像成像的几何特征,从而从理论上证明了用 RPC 模型拟合 SAR 影像成像的可行性。最后,论文采用不同分辨率的 SAR 影像数据作为实验数据,计算分母不同且为三阶的 RPC 模型拟合严密成像几何模型的残差。多组试验结果表明:对不同分辨率的 SAR 系统,RPC 模型能达到较高的拟合精度,可用于 SAR 影像的摄影测量处理。

## 参考文献:

- [1] DIAL G, GRODECKI J. Block Adjustment with Rational Polynomial Camera Models [C/CD] Proceedings of ACSM/ASPRS Annual Conference. Washington: [s. n.], 2002.
- [2] GRODECKI J. IKONOS Stereo Feature Extraction-RPC Approach[C/CD] Proceedings of ASPRS Conference. St. Louis:[s. n.], 2001.
- [3] CHEN Liangchien, TEO Teeann, LIU Chienliang. The Geometrical Comparisons of RSM and RFM for FORMOSA T-2 Satellite Images[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2006, 72(5): 573-579.
- [4] FRASER C S, HANLEY H T. Bias Compensation in Rational Functions for IKONOS Satellite Imagery [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2003, 69(1): 53-57.
- [5] FRASER C S, HANLEY H T. Bias-compensated RPCs for Sensor Orientation of High-resolution Satellite Imagery[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(8): 909-915.
- [6] TOUTIN T. Review Paper: Geometric Processing of Remote Sensing Images: Models, Algorithms and Methods[EB/OL]. 2004 [2007-01-01]. http://www.ccrs.nrcan.gc.ca.
- [7] MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd. RADARSAT-2 Product Format Definition[EB/OL]. Richmond: MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd. 2008-03-14 [2008-05-11]. http://www.radarsat2.info/product/new\_prod\_ov.asp.
- [8] CURLANDER J C, MCDONOUGH R N. Synthetic Aperture Radar: System and Signal Processing [M]. [S. l.]: John Wiley & Sons, 1999.
- [9] TAO C V, HU Yong. A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2001, 67(12): 1347-1357.
- [10] TOUTIN T. State-of-the-art of Elevation Extraction from Satellite SAR Data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2000, 55: 13-33.
- [11] XIAO Guochao, ZHU Caiying. Radargrammetry [M]. Beijing: Earthquake Press, 2001: 39-46. (肖国超, 朱彩英. 雷达摄影测量 [M]. 北京: 地震出版社, 2001: 39-46.)
- [12] JIN Weixian, ZHANG Pengtao. Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 1996. (金为铣, 张鹏涛. 摄影测量学 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1996.)
- [13] 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.)
- [14] WANG Xinzhou, LIU Dingyou, ZHANG Qianqiang, et al. The Iteration by Correcting Characteristic Value and Its Application in Surveying Data Processing[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2001, 15(2): 3-6. (王新洲, 刘丁酉, 张前勇, 等. 谱修正迭代法及其在测量数据处理中的应用[J]. 黑龙江工程学院学报, 2001, 15(2): 3-6.)
- [15] GONG Danchao, ZHANG Yongsheng. The Solving and Application of Rational Function Model [J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2003, 20(1): 39-42. (巩丹超, 张永生. 有理函数模型的解算与应用[J]. 测绘学院学报, 2003, 20(1): 39-42.)

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2009-03-30

修回日期: 2009-07-13

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

First author: ZHANG Guo (1976—), PhD, associate professor, majors in spaceborne photogrammetry.

E-mail: guozhang@whu.edu.cn