

卫星遥感影像 RPC 参数求解算法研究

张 过^{1),2)} 李德仁¹⁾

¹⁾ (武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

²⁾ (辽宁工程技术大学地理空间信息技术与应用实验室, 阜新 123000)

摘 要 针对国内外在求解 RPC 模型参数算法上需要初值、迭代处理,且求解过程相当复杂的缺憾,提出了基于全球 DEM 的 RPC 模型参数求解算法,利用 SPOT-5、CBERS-2 以及 ERS 卫星影像进行实验,获得对卫星遥感影像几何处理有意义的结论,并对卫星影像在利用严格成像几何模型求解 RPC 模型参数时做了控制点格网大小及高程分层数对求解精度的影响实验,得出对卫星遥感影像,采用控制点的格网大小为 20×20 、高程分层为 3 可以达到精度和效率的平衡。

关键词 RPC 模型 严格成像模型 卫星遥感影像 精度

中图分类号: P236 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)12-2080-09

The Algorithm of Computation RPC Model's Parameters for Satellite Imagery

ZHANG Guo^{1),2)}, LI De-ren¹⁾

¹⁾ (LIESMARS of Wuhan University, Wuhan 430079)

²⁾ (The Geomatics and Applications Laboratory, Liaoning Technical University, Fuxing 123000)

Abstract The RPC model has recently raised considerable interest in the photogrammetry and remote sensing community. The RPC is a generalized sensor model that is capable of achieving high approximation accuracy. In this paper an algorithm of computation of parameters of RPC model without initial value is presented. Finally we test the algorithm on SPOT-5, CBERS-2, ERS imagery.

Keywords RPC model, rigorous sensor mode, satellite imagery, accuracy

1 引言

RPC (rational polynomial coefficient) 模型是一种广义的新型遥感卫星传感器成像模型,是一种能获得和卫星遥感影像严格成像模型近似一致精度的、形式简单的概括模型,在摄影测量工作站, RPC 模型将会取代复杂的严格成像模型,一些摄影测量专家建议将 RPC 模型作为影像几何关系转换的标准。在国内外学者的研究中^[1-4] 针对光学卫星遥感影像进行了大量试验,但还尚未有学者对光学和 SAR 影像进行全面的研究。另外,国内外所有文献没有涉及 RPC 参

数的求解中最低和最高高程获得的问题,并且求解 RPC 参数时需要初值,需要迭代处理,求解过程比较复杂,因此,本文对 SPOT-5、CBERS-2、ERS 等卫星遥感影像的进行了基于全球 DEM 的 RPC 模型参数求解实验,获得了一系列有意义的结论。

2 RPC 模型

RPC 模型将地面点大地坐标 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。为了增强参数求解的稳定性,将地面坐标和影像坐标正则化到 -1

基金项目:国家重点基础研究发展计划 973 项目(2006CB701302);国家自然科学基金项目(40601084,40523005)

收稿日期:2005-12-20;改回日期:2006-07-26

第一作者简介:张过(1976 ~),男,教师。2005 年于武汉大学获摄影测量与遥感专业工学博士学位。主要从事遥感影像处理的研究和教学工作。E-mail: guozhang@whu.edu.cn

和 1 之间。对于一个影像,定义如下比值多项式^[5]:

$$Y = \frac{Num_L(P, L, H)}{Den_L(P, L, H)} \quad (1)$$

$$X = \frac{Num_s(P, L, H)}{Den_s(P, L, H)}$$

式中,

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

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

$$Num_s(P, L, H) = c_1 + c_2L + c_3P + c_4H + c_5LP + c_6LH + c_7PH + c_8L^2 + c_9P^2 + c_{10}H^2 + c_{11}PLH + c_{12}L^3 + c_{13}LP^2 + c_{14}LH^2 + c_{15}L^2P + c_{16}P^3 + c_{17}PH^2 + c_{18}L^2H + c_{19}P^2H + c_{20}H^3$$

$$Den_s(P, L, H) = d_1 + d_2L + d_3P + d_4H + d_5LP + d_6LH + d_7PH + d_8L^2 + d_9P^2 + d_{10}H^2 + d_{11}PLH + d_{12}L^3 + d_{13}LP^2 + d_{14}LH^2 + d_{15}L^2P + d_{16}P^3 + d_{17}PH^2 + d_{18}L^2H + d_{19}P^2H + d_{20}H^3$$

其中, b_1 和 d_1 通常为 1, (P, L, H) 为正则化的地面坐标, (X, Y) 为正则化的影像坐标,

$$P = \frac{Latitude - LAT_OFF}{LAT_SCALE}$$

$$L = \frac{Longitude - LONG_OFF}{LONG_SCALE} \quad (2)$$

$$H = \frac{Height - HEIGHT_OFF}{HEIGHT_SCALE}$$

$$X = \frac{Sample - SAMP_OFF}{SAMP_SCALE} \quad (3)$$

$$Y = \frac{Line - LINE_OFF}{LINE_SCALE}$$

这里, LAT_OFF 、 LAT_SCALE 、 $LONG_OFF$ 、

$LONG_SCALE$ 、 $HEIGHT_OFF$ 和 $HEIGHT_SCALE$ 为地面坐标的正则化参数。 $SAMP_OFF$ 、 $SAMP_SCALE$ 、 $LINE_OFF$ 和 $LINE_SCALE$ 为影像坐标的正则化参数。

RPC 模型有 9 种不同的形式,如表 1 所示。表 1 给出了在 9 种情况下待求解 RPC 参数的形式和需要的最少控制点。当 $Den_s(P, L, H) = Den_L(P, L, H) = 1$ 时, RPC 模型退化为一般的 3 维多项式模型,当 $Den_s(P, L, H) = Den_L(P, L, H)! = 1$ 并且在一阶多项式的情况下, RPC 模型退化为 DLT (direct linear transformation) 模型,因此 RPC 模型是一种广义的成像模型。

表 1 RPC 模型形式

Tab.1 Nine cases of the RPC model

形式	分母	待求解阶数	需要的 RPC 参数个数	需要的最小控制点数
1		1	14	7
2	$Den_s(P, L, H) \neq Den_L(P, L, H)$ (分母不相同)	2	38	19
3		3	78	39
4		1	11	6
5	$Den_s(P, L, H) = Den_L(P, L, H)! = 1$ (分母相同但不恒为 1)	2	29	15
6		3	59	30
7		1	8	4
8	$Den_s(P, L, H) = Den_L(P, L, H) = 1$ (分母相同且恒为 1)	2	20	10
9		3	40	20

3 线阵推扫式光学卫星遥感影像严格成像模型

由于卫星的轨道运动、相机的扫描运动和地球自转,遥感图像定位是空间几何和时序的结合^[6]。因此推扫式光学卫星影像的严格成像模型建立在图像坐标系和 CIS (the conventional inertial coordinate system) 坐标系之间,具体表达式为^[7]

$$\begin{bmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{bmatrix}_{CIS} = m \mathbf{R}_{CF} \mathbf{R}_{FB} \mathbf{R}_{BS} \begin{bmatrix} x_k \\ 0 \\ -c \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, c 为相机主距, m 为尺度因子; x_k, y_k 为像点 k 在图像坐标系下的坐标; X, Y, Z 为地面点 k 在 CIS 下的坐标; X_s, Y_s, Z_s 为地面点 k 成像时刻卫星在 CIS 下的坐标; $\mathbf{R}_{BS} = \mathbf{R}_1(\Psi_x) \mathbf{R}_2(-\Psi_y)$ 为传感器坐标系与本体坐标系之间坐标转换的旋转矩阵, Ψ_x 和

Ψ_s 为相机的侧摆角; $\mathbf{R}_{FB} = \mathbf{R}_1(-\omega)\mathbf{R}_2(\varphi)\mathbf{R}_3(\kappa)$ 为本体坐标系与轨道坐标系之间坐标转换的旋转矩阵, ω 、 φ 和 κ 为相机的 3 个姿态角; $\mathbf{R}_{CF} =$

$$\begin{bmatrix} (X_2)_x & (Y_2)_x & (Z_2)_x \\ (X_2)_y & (Y_2)_y & (Z_2)_y \\ (X_2)_z & (Y_2)_z & (Z_2)_z \end{bmatrix}$$

为轨道坐标系与空间固定

$$\text{惯性参考系之间坐标转换的旋转矩阵, } \mathbf{Z}_2 = \frac{\mathbf{P}(t)}{\|\mathbf{P}(t)\|}, \mathbf{X}_2 = \frac{\mathbf{V}(t)\mathbf{A}\mathbf{Z}_2}{\|\mathbf{V}(t)\mathbf{A}\mathbf{Z}_2\|}, \mathbf{Y}_2 = \mathbf{Z}_2\mathbf{A}\mathbf{X}_2, \mathbf{P}(t) = [X_s,$$

$Y_s, Z_s]^T, \mathbf{V}(t) = [V_{X_s}, V_{Y_s}, V_{Z_s}]^T, X_s, Y_s, Z_s$ 和 $V_{X_s}, V_{Y_s}, V_{Z_s}$ 为卫星质心在 CIS 坐标系中的位置和速度。

式(4)是利用卫星运动基本矢量、姿态和相机的侧视角所建立的单线阵推扫式传感器影像坐标与其地面点在 CIS 坐标系下的坐标关系式, 即线阵推扫式卫星遥感影像的严格成像模型。这里需要特别指出的是, 式中卫星的基本运动矢量、姿态和侧视角可以从影像的辅助参数文件读出。

4 SAR 严格成像模型

SAR 影像上任意点的 3 维空间坐标的确定需要求解 3 个方程式^[8]:

(1) 描述地球形状的模型

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

式中, X, Y, Z 为 SAR 影像上一点对应的在 WGS84 椭球下的 3 维坐标, $A = a_e + h, B = b_e + h, h$ 为该点的椭球高, $a_e = 6378\ 137.0$ 和 $b_e = 6356\ 752.3$ 分别为地球椭球的长短半轴。

(2) SAR Doppler 方程

$$f_D = -\frac{2}{\lambda R}(\mathbf{R}_s - \mathbf{R}_T) \cdot (\mathbf{V}_s - \mathbf{V}_T) \quad (6)$$

式中, f_D 为该点对应的多普勒中心频率, \mathbf{R}_s 和 \mathbf{V}_s 分别为该点的位置和速度矢量, $\mathbf{R}_T = (X \ Y \ Z)^T$ 和 \mathbf{V}_T 为该点的位置和速度矢量, λ 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)~(7)就组成了一个完备系统, 其中, f_D 、 λ 、 R 以及卫星的位置矢量 \mathbf{R}_s 和速度矢量 \mathbf{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, 可以求解影像点对

应为物点的 3 维坐标 X, Y, Z 。

5 RPC 模型参数求解

5.1 RPC 模型参数求解算法

将式(1)变形为

$$F_x = \text{Num}_x(P, L, H) - X\text{Den}_x(P, L, H) = 0 \quad (8)$$

$$F_y = \text{Num}_y(P, L, H) - Y\text{Den}_y(P, L, H) = 0$$

则误差方程为

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\mathbf{x} - \mathbf{l} \quad (9)$$

式中,

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial a_i} & \frac{\partial F_x}{\partial b_j} & \frac{\partial F_x}{\partial c_i} & \frac{\partial F_x}{\partial d_j} \\ \frac{\partial F_y}{\partial a_i} & \frac{\partial F_y}{\partial b_j} & \frac{\partial F_y}{\partial c_i} & \frac{\partial F_y}{\partial d_j} \end{bmatrix}$$

$$(i = 1, \dots, 20; j = 2, \dots, 20)$$

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} -F_x^0 \\ -F_y^0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = [a_i \ b_j \ c_i \ d_j]^T$$

根据最小二乘法原理, 可以求解:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{B}^T\mathbf{B})^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{l} \quad (10)$$

经过变形的 RPC 模型形式, 平差的误差方程为线性模型, 因此在求解 RPC 参数过程中不需要初值, 无需进行迭代处理。

5.2 最小二乘法求解 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。在卫星遥感影像严格成像模型已知的情况下, 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^[4]。

本文中研究是利用严格成像模型和美国地质调查局提供的全球 1km 分辨率 DEM 建立控制点来求解 RPC 参数, 该方法求解 RPC 参数不需要详细的地面控制信息而仅仅需要该影像覆盖地区的最大高程和最小高程, 因而属于与地形无关的方法。利用最小二乘法求解 RPC 模型参数的流程如图 1 所示。

5.2.1 建立空间格网

由严格成像模型的正变换^[7,9], 计算影像的 4 个角点对应的地面范围; 根据美国地质调查局提供的全球 1km 分辨率 DEM(global 30-arc-second digital elevation model), 计算该地区的最大最小椭球高。在高程方向以一定的间隔分层, 在平面上, 以一定的

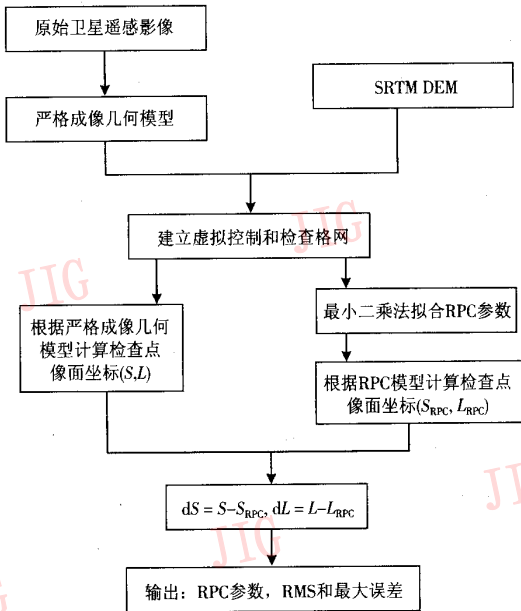


图 1 利用最小二乘法求解 RPC 模型参数的流程
Fig. 1 The chat of RPC

格网大小建立地面规则格网(如平面分为 15×15 格网,就是将该影像对应影像范围分成 15×15 的格子,共有 16×16 个格网点),生成控制点地面坐标,最后利用严格成像模型的反变换^[7,9],计算控制点的影像坐标。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 2,如图 2 所示。

加密控制格网和层,建立独立检查点。然后利用控制点坐标用式(11)~式(13)计算影像坐标和地面坐标的正则化参数,由式(2)和式(3)将控制点

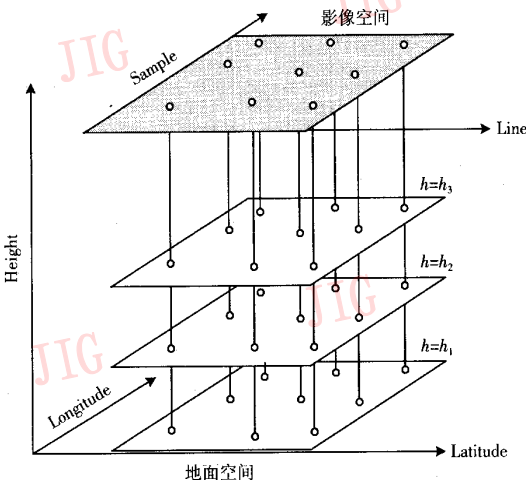


图 2 空间格网例图
Fig. 2 RPC generation

和检查点坐标正则化^[11]。

$$\begin{cases} LAT_OFF = \frac{\sum Latitude}{n} \\ LONG_OFF = \frac{\sum Longitude}{n} \\ HEIGHT_OFF = \frac{\sum Height}{n} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} LINE_OFF = \frac{\sum Line}{n} \\ SAMP_OFF = \frac{\sum Sample}{n} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} LAT_SCALE = \max(|Latitude_{max} - LAT_OFF|, |Latitude_{min} - LAT_OFF|) \\ LONG_SCALE = \max(|Longitude_{max} - LONG_OFF|, |Longitude_{min} - LONG_OFF|) \\ HEIGHT_SCALE = \max(|Height_{max} - HEIGHT_OFF|, |Height_{min} - HEIGHT_OFF|) \\ LINE_SCALE = \max(|Line_{max} - LINE_OFF|, |Line_{min} - LINE_OFF|) \\ SAMP_SCALE = \max(|Sample_{max} - SAMP_OFF|, |Sample_{min} - SAMP_OFF|) \end{cases} \quad (13)$$

5.2.2 RPC 模型参数求解

采用本文提出的算法,利用正则化的控制点来估计 RPC 参数 (a_i, b_j, c_i, d_j) 。

5.2.3 精度检查

用求解的 RPC 参数来计算检查点对应的影像坐标,通过由严格成像模型计算的检查点影像坐标的差值来评定求解 RPC 参数的精度。

6 RPC 模型参数求解实验及分析

为了验证本文提出 RPC 参数求解方法的正确性和有效性,对光学卫星 SPOT-5、CBERS-2 以及雷达卫星 ERS 等的卫星遥感影像求解了 RPC 模型参数,并对其精度进行了分析。

对北京地区一景 SPOT-5 影像利用卫星系统参数构建的严格成像模型实施了 RPC 参数求解实验。该景影像标称地面分辨率为 10m,用 3 个多光谱波段和 1 个红外波段对 $60\text{km} \times 60\text{km}$ 的城区扫描形成,地势较为平坦。

南阳 CBERS2 影像标称地面分辨率为 3m,每景覆盖地面 30km × 30km 的区域,地区地势较为平坦。

SAR 影像为我国北京地区的 ERS-1 数据,1997 年 10 月 18 日成像,有效影像高度为 26 454 行,每行有 4 900 像素,该景影像的中心经纬度为 117.7° 和 39.1°,雷达波长为 0.056 666m。

6.1 9 种形式 RPC 模型参数求解精度对比

为比较不同形式的 RPC 模型的精度,对 9 种形式的 RPC 模型分别利用第 2 节和第 3 节阐述的卫星遥感影像的严格成像生成虚拟的地面控制点求解 RPC 参数,用求解的 RPC 参数计算检查点的影像坐标并与利用严格成像模型计算的影像坐标相比较,

获得 RPC 模型参数的精度。对 9 种不同形式的 RPC 模型精度测试结果如表 2 ~ 表 4,该组实验是在控制点格网大小为 15 × 15,高程分 5 层;检查点的格网大小为 30 × 30,高程分 10 层的条件下获得的。从表 2 ~ 表 4 可以得出如下结论:分母相同且恒为 1 的 RPC 模型精度最低,分母不相同的 RPC 模型比分母相同但不恒为 1 的 RPC 模型精度要高;三阶模型的精度比二阶模型的精度高,一阶模型的精度最差。

另外,从表 2 ~ 表 4 中还可以看出 $Den_s(P, L, H) \neq Den_l(P, L, H)$ 时的三阶模型,检查点和控制点的平面中误差均在 0.06 个像素以内,三阶模型控制

表 2 SPOT-5 9 种 RPC 模型形式精度

Tab. 2 The accuracy of nine cases using SPOT-5 imagery

单位:像素

分母	阶数	检查点残差						控制点残差					
		Y		X		平面		Y		X		平面	
		最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差
不同	1	-3.110	0.807	-0.543	0.235	3.127	0.840	-3.110	0.852	-0.543	0.248	3.127	0.887
	2	0.042	0.021	0.077	0.029	0.087	0.036	0.040	0.021	0.077	0.028	0.087	0.035
	3	-0.048	0.015	0.075	0.028	0.079	0.031	-0.048	0.015	0.074	0.028	0.078	0.031
相同	1	-3.741	1.083	-5.576	1.461	6.177	1.819	-3.741	1.151	-5.576	1.547	6.177	1.928
	2	-0.089	0.028	-0.084	0.031	0.102	0.042	-0.089	0.029	-0.083	0.033	0.102	0.044
	3	0.039	0.018	-0.080	0.028	0.080	0.034	0.039	0.018	-0.080	0.029	0.080	0.034
恒等 1	1	4.595	1.418	-2.582	0.680	5.270	1.573	4.595	1.508	-2.582	0.722	5.270	1.672
	2	-0.097	0.028	0.109	0.036	0.111	0.045	-0.097	0.028	0.109	0.038	0.111	0.048
	3	0.038	0.020	0.077	0.029	0.084	0.035	-0.038	0.020	0.077	0.028	0.084	0.035

表 3 CBERS-2 9 种 RPC 模型形式精度

Tab. 3 The accuracy of nine cases using CBERS-2 imagery

单位:像素

分母	阶数	检查点残差						控制点残差					
		Y		X		平面		Y		X		平面	
		最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差
不同	1	-3.095	0.745	-20.774	6.340	21.003	6.384	-3.095	0.792	-20.774	6.787	21.003	6.833
	2	1.586	0.503	-0.091	0.033	1.586	0.504	1.586	0.538	-0.090	0.033	1.586	0.539
	3	0.058	0.016	-0.084	0.034	0.087	0.038	0.058	0.016	-0.079	0.034	0.082	0.037
相同	1	-6.605	1.853	-26.409	6.540	27.223	6.797	-6.605	1.966	-26.409	7.000	27.223	7.270
	2	-10.660	2.472	6.059	2.781	11.921	3.721	-10.660	2.688	6.059	2.979	11.921	4.013
	3	0.076	0.017	-0.100	0.036	0.105	0.040	0.076	0.018	-0.099	0.036	0.101	0.040
恒等 1	1	-12.453	3.501	25.631	6.895	27.235	7.733	-12.453	3.715	25.631	7.369	27.235	8.252
	2	1.546	0.509	19.159	6.259	19.221	6.280	1.546	0.545	19.159	6.703	19.221	6.725
	3	-0.059	0.016	-0.132	0.043	0.134	0.046	-0.059	0.016	-0.132	0.045	0.134	0.047

表 4 ERS-1 9 种 RPC 模型形式精度

Tab. 4 The accuracy of nine cases using ERS-1 imagery

单位:像素

分母 阶数	检查点残差						控制点残差						
	Y		X		平面		Y		X		平面		
	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	
不同	1	-39.646	12.745	-102.155	32.876	109.578	35.260	-39.646	13.643	-102.155	34.697	109.578	37.283
	2	0.532	0.148	0.196	0.056	0.533	0.158	0.532	0.158	0.196	0.055	0.533	0.168
	3	0.061	0.024	-0.181	0.053	0.183	0.058	0.057	0.023	-0.181	0.052	0.183	0.057
相同	1	161.494	71.890	-647.885	221.428	667.709	232.806	161.494	75.845	-647.885	234.934	667.709	246.874
	2	-0.487	0.122	3.450	0.757	3.460	0.767	-0.487	0.130	3.446	0.812	3.456	0.822
	3	-0.058	0.021	0.208	0.054	0.211	0.058	-0.058	0.020	0.208	0.054	0.211	0.058
恒等 1	1	382.951	151.236	-98.414	33.233	395.250	154.845	382.951	159.624	-98.414	35.105	395.250	163.439
	2	-12.144	3.278	-0.292	0.067	12.147	3.279	-12.144	3.520	-0.292	0.073	12.147	3.520
	3	-0.122	0.045	0.184	0.053	0.216	0.070	-0.122	0.047	0.184	0.052	0.216	0.071

点和检查点的平面残差误差最大为 0.183 像素。因此对于 SPOT-5、CBERS-2 和 ERS 卫星,本文采用了分母不相同的三阶模型进行后续格网大小及高程分层对求解精度的影响实验。

6.2 格网大小对 RPC 模型参数求解精度的影响

为评价格网大小对 RPC 参数求解精度的影响,在控制点的格网大小分别为 10 × 10, 20 × 20, 30 × 30, 40 × 40, 50 × 50, 60 × 60, 高程分 5 层,检查点格网大小为控制点格网大小的 2 倍,高程分层数目为

10 的条件下,开展了 RPC 参数求解精度实验,结果如表 5 ~ 表 7 所示。

从表 5 ~ 表 7 中可以看出,随着格网变小,每层控制点数目的增加,检查点平和控制点平面中误差均有变小的趋势,如图 3 ~ 图 5 所示。随着控制点格网变密(格网 ≥ 20 × 20 时),RPC 模型的精度逐渐接近严格模型的精度。

为了追求速度和精度的平衡,本文以后求解 RPC 实验中控制格网采用 20 × 20 大小。

表 5 格网大小对 SPOT-5 求解 RPC 模型参数精度的影响

Tab. 5 The accuracy obtained with different grid sizes using SPOT-5 imagery

单位:像素

格网大小	检查点残差						控制点残差					
	Y		X		平面		Y		X		平面	
	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差
10	-0.045	0.020	0.093	0.037	0.102	0.042	0.044	0.020	0.090	0.036	0.093	0.042
20	0.038	0.018	-0.077	0.026	0.077	0.032	0.037	0.018	-0.073	0.027	0.073	0.032
30	0.036	0.017	0.081	0.025	0.081	0.031	0.035	0.017	0.081	0.026	0.081	0.031
40	-0.036	0.017	0.091	0.025	0.091	0.030	-0.036	0.017	0.091	0.026	0.091	0.031
50	-0.036	0.017	0.097	0.025	0.097	0.030	-0.036	0.017	0.097	0.026	0.097	0.031
60	-0.035	0.017	0.101	0.025	0.101	0.030	-0.035	0.017	0.101	0.025	0.101	0.031

6.3 高程分层数对 RPC 模型参数求解精度的影响

该组实验是在控制点的格网大小为 20 × 20,高程分 2、3、4、5、6、7、8、9 层,检查点的格网大小为 40 × 40,高程分层数目为控制高程分层的倍数的条件下获得的,以评价高程分层数对 RPC 参数求解精

度的影响,如表 8 ~ 表 10 所示。

从表 8 ~ 表 10 中可以看出,随着高程分层数目的增加,检查点和控制点平面中误差有变小趋势,如图 6 ~ 图 8 所示。随着高程分层数目的增加(高程分层数 ≥ 3 时),RPC 模型的精度逐渐接近严格模型

表 6 格网大小对 CBERS-2 求解 RPC 参数精度的影响

Tab. 6 The accuracy obtained with different grid sizes using CBERS-2 imagery

单位:像素

格网大小	检查点残差						控制点残差					
	Y		X		平面		Y		X		平面	
	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差
10	-0.104	0.033	-0.132	0.055	0.144	0.065	-0.104	0.033	-0.132	0.054	0.144	0.064
20	0.066	0.012	-0.086	0.029	0.100	0.032	0.066	0.012	0.083	0.030	0.100	0.032
30	0.058	0.008	0.098	0.024	0.112	0.025	0.058	0.009	0.098	0.025	0.112	0.026
40	0.051	0.007	0.099	0.021	0.112	0.022	0.051	0.007	0.099	0.022	0.112	0.023
50	0.047	0.006	0.095	0.019	0.106	0.020	0.047	0.006	0.095	0.020	0.106	0.021
60	0.044	0.005	0.089	0.017	0.099	0.018	0.043	0.006	0.089	0.018	0.099	0.018

表 7 格网大小对 ERS-1 求解 RPC 模型参数精度的影响

Tab. 7 The accuracy obtained with different grid sizes using ERS-1 imagery

单位:像素

格网大小	检查点残差						控制点残差					
	Y		X		平面		Y		X		平面	
	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差
10	0.078	0.031	-0.234	0.072	0.237	0.079	0.076	0.030	-0.234	0.072	0.237	0.078
20	-0.028	0.010	-0.081	0.020	0.081	0.023	-0.027	0.010	-0.081	0.020	0.081	0.023
30	-0.018	0.005	-0.040	0.009	0.041	0.011	-0.018	0.005	-0.040	0.009	0.041	0.011
40	-0.013	0.003	-0.024	0.005	0.025	0.006	-0.012	0.003	-0.024	0.005	0.025	0.006
50	-0.009	0.002	-0.016	0.004	0.016	0.004	-0.009	0.002	-0.016	0.004	0.016	0.004
60	-0.007	0.002	-0.011	0.002	0.012	0.003	-0.007	0.002	-0.011	0.002	0.012	0.003

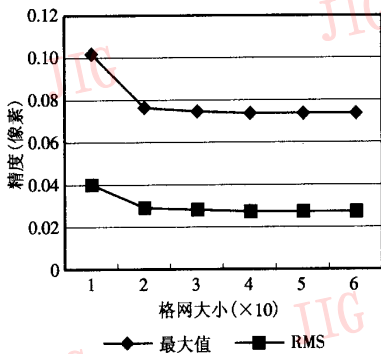


图 3 SPOT-5 检查点平面精度随格网大小变化趋势

Fig. 3 The accuracy of check points with the grid number on SPOT-5 imagery

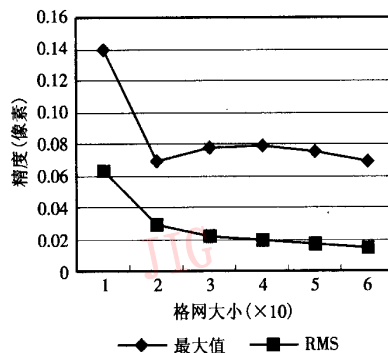


图 4 CBERS-2 检查点平面精度随格网大小变化趋势

Fig. 4 The accuracy of check points with the grid number on CBERS-2 imagery

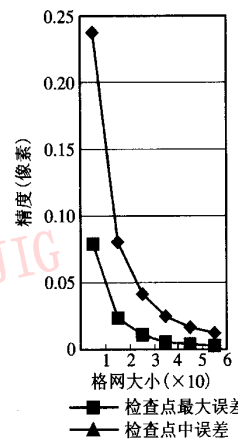


图 5 ERS-1 检查点平面精度随格网大小变化趋势

Fig. 5 The accuracy of check points with the grid number on ERS-1 imagery

表 8 高程分层对 SPOT-5 求解 RPC 模型参数精度的影响

Tab. 8 The accuracy with different height layers using SPOT-5 imagery

单位:像素

高程分层数	检查点残差						控制点残差					
	Y		X		平面		Y		X		平面	
	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差
2	0.341	0.180	0.237	0.069	0.393	0.193	0.039	0.018	0.080	0.030	0.086	0.035
3	0.039	0.018	-0.078	0.028	0.079	0.033	0.038	0.018	-0.074	0.028	0.078	0.033
4	0.038	0.018	-0.077	0.027	0.078	0.032	0.037	0.018	-0.073	0.027	0.073	0.033
5	0.038	0.018	-0.077	0.026	0.077	0.032	0.037	0.018	-0.073	0.027	0.073	0.032
6	0.037	0.018	-0.076	0.026	0.076	0.031	0.036	0.018	-0.072	0.027	0.072	0.032
7	0.037	0.018	-0.075	0.026	0.076	0.031	0.036	0.018	-0.072	0.027	0.072	0.032

表 9 高程分层对 CBERS-2 求解 RPC 模型参数精度的影响

Tab. 9 The accuracy using different height layers using CBERS-2 imagery

单位:像素

高程分层数	检查点残差						控制点残差					
	Y		X		平面		Y		X		平面	
	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差
2	-1.253	0.676	0.239	0.085	1.261	0.681	-0.103	0.033	-0.118	0.053	0.138	0.062
3	0.088	0.025	-0.110	0.044	0.118	0.051	0.088	0.025	-0.105	0.044	0.112	0.050
4	0.081	0.020	-0.105	0.039	0.110	0.044	0.081	0.021	-0.102	0.039	0.105	0.044
5	0.076	0.017	-0.100	0.036	0.105	0.040	0.076	0.018	-0.099	0.036	0.101	0.040
6	0.071	0.015	-0.097	0.034	0.101	0.037	0.071	0.016	-0.097	0.034	0.098	0.038
7	0.069	0.014	-0.095	0.032	0.097	0.035	0.069	0.015	-0.095	0.033	0.096	0.036

表 10 高程分层对 ERS-1 求解 RPC 模型参数精度的影响

Tab. 10 The accuracy using different height layers using ERS-1 imagery

单位:像素

高程分层数	检查点残差						控制点残差					
	Y		X		平面		Y		X		平面	
	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差
2	0.814	0.477	-0.145	0.044	0.814	0.479	-0.058	0.019	-0.145	0.042	0.146	0.046
3	-0.042	0.015	-0.115	0.031	0.115	0.035	-0.040	0.014	-0.115	0.031	0.115	0.034
4	-0.033	0.012	-0.095	0.025	0.095	0.027	-0.033	0.012	-0.095	0.024	0.095	0.027
5	-0.028	0.010	-0.081	0.020	0.081	0.023	-0.027	0.010	-0.081	0.020	0.081	0.023
6	-0.024	0.009	-0.071	0.017	0.071	0.019	-0.024	0.009	-0.071	0.017	0.071	0.019
7	0.022	0.008	-0.063	0.015	0.063	0.017	-0.021	0.008	-0.063	0.015	0.063	0.017

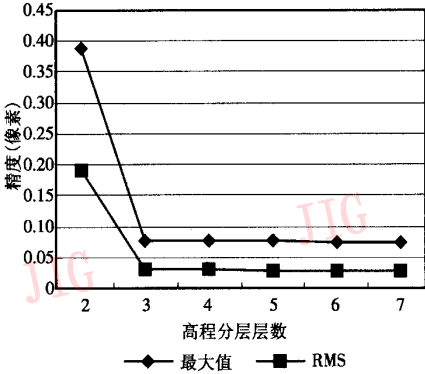


图 6 SPOT-5 检查点平面精度随高程分层层数变化趋势

Fig. 6 The accuracy of check points with the height layer on SPOT-5 imagery

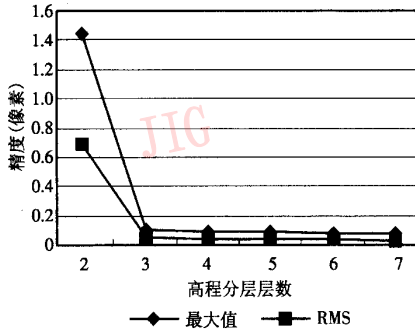


图 7 CBERS-2 检查点平面精度随高程分层层数变化趋势

Fig. 7 The accuracy of check points with the height layer on CBERS-2 imagery

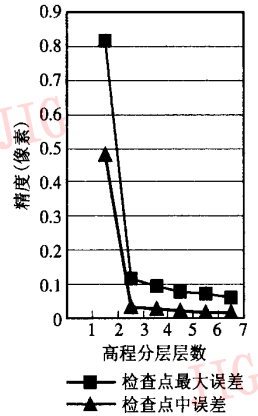


图 8 ERS-1 检查点平面精度随高程分层层数变化趋势

Fig. 8 The accuracy of check points with the height layer on ERS-1 imagery

的精度。

7 结论

从以上实验结果可以得出本文算法可以求解卫星遥感影像的 RPC 模型参数,且无需提供初值,无需迭代,具有求解简单,精度不降低等优点,同时在全球 DEM 的基础上解决了 RPC 参数求解中最低最高高程获得的问题。对于 SPOT-5、资源二号以及 ERS 影像,阶数为 3 并且分母不同的 RPC 模型可以取代严格模型进行摄影测量处理,并且在利用严格模型求解 RPC 模型参数时,采用控制点的格网大小为 20×20 、高程分层为 3 可以达到精度和效率的平衡。

研究结果表明,卫星遥感影像的成像几何可以用 RPC 参数进行拟合,也可以采用和光学影像一样进行摄影测量处理,可以简化卫星遥感影像几何处理的难度。在拟合时有分母的 RPC 模型比没有分母的 RPC 模型精度要高,分母不相同的 RPC 模型比分母相同的 RPC 模型精度要高。三阶模型的精度比二阶模型的精度高,一阶模型的精度最差;格网大小影响 RPC 参数求解的精度,随格网加密,精度随之升高。高程分层一样影响 RPC 参数求解的精度,随着高程分层数的增加,精度随之升高。

参考文献 (References)

1 Dial G. IKONOS Satellite Mapping Accuracy [EB/OL]. <http://www.gis.usu.edu/docs/protected/procs/asprs/asprs2000/pdf/files/papers/185.pdf>,2007-9-21.

2 Grodecki J. IKONOS stereo feature extraction-RPC approach [EB/OL]. http://www.geoeye.com/whitepapers_pdfs/2005/IKONOS%20Geometric%20Calibrations%20-%20ASPRS%202005%20_final.pdf,2007-9-21.

3 Tao C V, Hu Y. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2001, 67(12): 1347 ~ 1357.

4 Gong Dan-chao, Zhang Yong-sheng. 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.]

5 OGC (OpenGIS Consortium). The OpenGIS Abstract Specification, 1999, -Topic 7: The Earth Imagery Case [EB/OL]. 1999-3-31 <http://www.opengis.org/public/abstract/99-107.pdf>. 2007-9-21.

6 Zhang Ren-wei. The Dynamics of the Satellite Orbit and Attitude [M]. Beijing: Bei Hang University Press, 1997. [章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1997.]

7 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.]

8 Bert Kampes. Delft Object-oriented Radar Interferometric Software User's manual and technical documentation [EB/OL]. <http://enterprise.geo.tudelft.nl/doris/>,2007-9-21.

9 Dial G, Grodecki J. Block Adjustment With Rational Polynomial Camera Models [EB/OL]. http://www.geoeye.com/whitepapers_pdfs/2002/Block%20Adjustment%20with%20RPCs-ASPRS%202002.pdf,2007-9-21.