

无需初值的 RPC 模型参数求解算法研究

秦绪文^{1,2}, 田淑芳¹, 洪友堂¹, 张过³

(1. 中国地质大学(北京),北京 100083; 2. 中国地质调查局,北京 100011; 3 武汉大学,武汉 430072)

摘要: 针对国内外研究者求解 RPC (Rational Polynomial Camera) 模型参数的算法需要初值及迭代处理,且求解过程相当复杂的缺憾,提出基于全球 DEM 无需初值的 RPC 模型参数求解算法。利用 SPOT-5 卫星影像进行试验,获得该算法对线阵推扫式卫星遥感影像有意义的结论。对 SPOT-5 卫星影像在利用严格成像模型求解 RPC 模型参数时,进行了控制点格网大小及高程分层数对求解精度的影响试验,得出:对 SPOT-5 卫星影像,采用控制点的格网大小为 20 像素 × 20 像素、高程分层数为 3 时,可以达到精度和效率的平衡。

关键词: RPC 模型; 初值; 最小二乘

中图分类号: P 237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2005)04-0007-04

0 引言

传感器有多种类型,不同类型的传感器由于成像的几何特性不同,采用的传感器模型也不同。通常的传感器模型都是以共线条件方程为理论基础,建立严格的成像模型,此时须获取各种成像参数。对航空摄影来说,需获取内方位元素和外方位元素初值,对卫星影像,则要获取包括轨道参数和传感器平台的方位参数及焦距等。卫星遥感影像成像机理远比航空影像的复杂,随着新型传感器的涌出,现有的摄影测量软件在原有的基础上改进或建立新的模型将越来越困难,再加上供应商(尤其是高精度的卫星影像供应商)为了商业利益,往往对传感器成像参数保密,因此,引入一种独立于传感器平台的广义传感器模型,将变得很有意义。

RPC 模型是 Space Imaging 公司提供的一种广义的新型遥感卫星传感器成像模型,是一种能获得与严格成像模型近似一致精度的、形式简单的概括模型,其实质是有理函数模型(Rational Function Model)。

$$\begin{aligned}
 Num_L(P, L, H) &= a_1 + a_2L + a_3P + a_4H + a_5LP + a_6LH + a_7PH + a_8L^2 + a_9P^2 + a_{10}H^2 + a_{11}PLH + \\
 &\quad a_{12}L^3 + a_{13}LP^2 + a_{14}LH^2 + a_{15}L^2P + a_{16}P^3 + a_{17}PH^2 + a_{18}L^2H + a_{19}P^2H + a_{20}H^3 \\
 Den_L(P, L, H) &= b_1 + b_2L + b_3P + b_4H + b_5LP + b_6LH + b_7PH + b_8L^2 + b_9P^2 + b_{10}H^2 + b_{11}PLH + \\
 &\quad b_{12}L^3 + b_{13}LP^2 + b_{14}LH^2 + b_{15}L^2P + b_{16}P^3 + b_{17}PH^2 + b_{18}L^2H + b_{19}P^2H + b_{20}H^3
 \end{aligned}$$

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,但是,在国内外学者的研究中^[1~4],没有提及 RPC 参数求解中最低和最高高程获得问题,并且在求解 RPC 参数时,需要初值和迭代处理,求解过程相当复杂。针对上述问题,本文提出根据严格成像模型,顾及全球 DEM 无需初值的 RPC 模型参数求解方法,并利用 SPOT-5 数据进行了系统试验。

1 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标准化到 -1 和 1 之间。对于一个影像,定义如下比值多项式^[5]

$$\begin{cases} Y = Num_L(P, L, H) / Den_L(P, L, H) \\ X = Num_S(P, L, H) / Den_S(P, L, H) \end{cases} \quad (1)$$

式中,

$$\begin{aligned}
 Num_s(P, L, H) &= c_1 + c_2L + c_3P + c_4H + c_5LP + c_6LH + c_7PH + c_8L^2 + c_9P^2 + c_{10}H^2 + c_{11}PLH + \\
 &\quad c_{12}L^3 + c_{13}LP^2 + c_{14}LH^2 + c_{15}L^2P + c_{16}P^3 + c_{17}PH^2 + c_{18}L^2H + c_{19}P^2H + c_{20}H^3 \\
 Den_s(P, L, H) &= d_1 + d_2L + d_3P + d_4H + d_5LP + d_6LH + d_7PH + d_8L^2 + d_9P^2 + d_{10}H^2 + d_{11}PLH + \\
 &\quad d_{12}L^3 + d_{13}LP^2 + d_{14}LH^2 + d_{15}L^2P + d_{16}P^3 + d_{17}PH^2 + d_{18}L^2H + d_{19}P^2H + d_{20}H^3
 \end{aligned}$$

(P, L, H) 为标准化的地面坐标; (X, Y) 为标准化的影像坐标, 其标准化原理如下

$$\begin{cases}
 P = (Latitude - LAT_OFF)/(LAT_SCALE) \\
 L = (Longitude - LONG_OFF)/(LONG_SCALE) \\
 H = (Height - HEIGHT_OFF)/(HEIGHT_SCALE)
 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases}
 X = (Sample - SAMP_OFF)/(SAMP_SCALE) \\
 Y = (Line - LINE_OFF)/(LINE_SCALE)
 \end{cases} \quad (3)$$

式中, LAT_OFF 、 LAT_SCALE 、 $LONG_OFF$ 、 $LONG_SCALE$ 、 $HEIGHT_OFF$ 和 $HEIGHT_SCALE$ 为地面坐标的标准化参数; $SAMP_OFF$ 、 $SAMP_SCALE$ 、 $LINE_OFF$ 和 $LINE_SCALE$ 为影像坐标的标准化参数, 这些参数与 RPC 模型 4 个多项式的 80 个系数须进行求解, 其中 b_1 和 d_1 通常为 1。

RPC 模型有 9 种不同的形式, 如表 1 所示。

表 1 RPC 模型形式

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

表 1 给出了 9 种情况下待求解 RPC 模型参数的形式和需要的最少控制点数。当 RPC 模型分母相同且恒为 1 ($Den_s(P, L, H) = Den_L(P, L, H) = 1$) 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 ($Den_s(P, L, H) = Den_L(P, L, H) \neq 1$), 且在一阶多项式的情况下, RPC 模型退化为 DLT 模型。因此, RPC 模型是一种广义的成像模型。

2 无需初值的 RPC 参数求解算法

将公式(1)变形为

$$\begin{cases}
 F_X = Num_s(P, L, H) - X Den_s(P, L, H) = 0 \\
 F_Y = Num_L(P, L, H) - Y Den_L(P, L, H) = 0
 \end{cases} \quad (4)$$

则误差方程为

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\mathbf{X} - \mathbf{l}, \text{权 } \mathbf{W} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 \text{式中, } \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial F_X}{\partial a_i} & \frac{\partial F_X}{\partial b_j} & \frac{\partial F_X}{\partial c_i} & \frac{\partial F_X}{\partial d_j} \\ \frac{\partial F_Y}{\partial a_i} & \frac{\partial F_Y}{\partial b_j} & \frac{\partial F_Y}{\partial c_i} & \frac{\partial F_Y}{\partial d_j} \end{bmatrix}, (i=1, 20; \\
 j=2, 20); \mathbf{l} &= \begin{bmatrix} -F_X^0 \\ -F_Y^0 \end{bmatrix}; \mathbf{X} = [a_i \ b_j \ c_i \ d_j]^T.
 \end{aligned}$$

根据最小二乘平差原理, 可以求解

$$\mathbf{X} = (\mathbf{B}^T \mathbf{W} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{W} \mathbf{l} \quad (6)$$

经过变形的 RPC 模型, 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。

3 RPC 模型参数求解试验及分析

为了验证本文提出的 RPC 参数求解方法的正确性和有效性, 对 SPOT-5 卫星遥感影像进行了求解 RPC 模型参数试验, 并对其精度进行分析。试验采用的数据为北京城区 (大小为 60 km × 60 km) SPOT-5 卫星影像, 影像地面分辨率为 10 m。

RPC 模型参数的求解有与地形无关和相关两种方式。在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, 该方式需要给出一定数目的控制点^[4]。

本文利用严格成像模型^[6]和美国地质调查局提供的全球 1 km 分辨率 DEM 建立控制点, 求解 RPC 模型参数。该方法不需要详细的地面控制信息, 仅需要该影像覆盖地区的最大和最小高程, 因而, 属于与地形无关的方法。本文采用与文献[1]相同的求解流程 (就是由严格成像模型的正变换), 计算影像的 4 个角点对应的地面范围。但是, 覆盖地区的最

大高程和最小高程是根据美国地质调查局提供的全球1 km分辨率DEM(Global 30 - arc - second Digital Elevation Model)计算获得,并进行高程分层。

3.1 9种形式RPC求解精度对比

为比较不同形式RPC模型的精度,对9种形式的RPC模型分别利用控制点求解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模型精度测试列表2,该组试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。

表2 SPOT-5 9种RPC模型形式精度

(单位:像素)

分母情况	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
相同但不恒等 ¹	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
相同且恒等 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

从表2可以得出如下结论:分母相同且恒为1的RPC模型精度最低;分母不相同比分母相同但不恒为1的RPC模型精度要高。三阶模型精度比二阶模型精度高;一阶模型精度最差。

另外,从表2中还可以看出,采用三阶模型及分母不同的二阶模型时,检查点和控制点的平面中误差均在0.04个像素以内,三阶模型控制点和检查点的平面残差误差最大为0.035像素,分母不相同的二阶模型检查点最大平面残差为0.087像素,精度

较高,达到了亚像素精度。因此,对于SPOT-5卫星,本文采用了分母不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试验。

3.2 格网大小对RPC求解精度的影响

该组试验是在控制点格网大小为10×10、20×20、30×30、40×40、50×50及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,高程分层数为10的条件下获得的,评价格网大小对RPC参数求解精度的影响,结果如表3所示。

表3 格网大小对SPOT-5影像求解RPC模型参数精度的影响

(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
10×10	-0.043	0.017	0.098	0.036	0.102	0.040	-0.039	0.017	0.094	0.035	0.099	0.039
20×20	-0.050	0.014	-0.066	0.026	0.076	0.029	-0.047	0.014	0.064	0.026	0.076	0.029
30×30	-0.051	0.013	-0.062	0.024	0.075	0.028	-0.050	0.014	-0.062	0.025	0.073	0.028
40×40	-0.051	0.013	-0.061	0.024	0.074	0.027	-0.050	0.013	-0.061	0.024	0.074	0.028
50×50	-0.050	0.013	0.062	0.024	0.074	0.027	-0.050	0.013	0.062	0.024	0.074	0.027
60×60	-0.048	0.012	0.065	0.024	0.074	0.027	-0.048	0.012	0.064	0.024	0.074	0.027

从表3可以看出,随着格网变小和每层控制点数量的增加,检查点平面和控制点平面中误差均有变小的趋势,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成像模型的精度。

为了追求速度和精度的平衡,本文以后的SPOT-5试验控制格网采用20×20大小。

3.3 高程分层数对RPC求解精度的影响

该组试验是在控制点格网大小为20×20,高程分2~9层,检查点格网大小为40×40,高程分层数目为控制高程分层的倍数条件下获得的,以评价高程分层数对RPC参数求解精度的影响,如表4所示。

表 4 高程分层数对 SPOT - 5 影像求解 RPC 模型参数精度的影响

(单位:像素)

高程分层/层	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	-0.383	0.181	0.162	0.061	0.387	0.190	-0.046	0.015	0.078	0.029	0.083	0.032
3	-0.049	0.014	0.072	0.027	0.078	0.031	-0.046	0.015	0.069	0.027	0.078	0.031
4	-0.050	0.014	0.068	0.026	0.077	0.030	-0.046	0.014	0.067	0.026	0.077	0.030
5	-0.050	0.014	-0.066	0.026	0.076	0.029	-0.047	0.014	0.064	0.026	0.076	0.029
6	-0.050	0.014	-0.065	0.025	0.075	0.029	-0.047	0.014	0.063	0.026	0.075	0.029
7	-0.050	0.014	-0.064	0.025	0.075	0.029	-0.047	0.014	0.062	0.025	0.074	0.029

从表 4 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,当高程分层数 ≥ 3 时, RPC 模型的精度逐渐接近严格成像模型的精度。

4 结论

从以上试验结果可以得出,分母相同且不恒为 1 的 RPC 模型比分母相同且恒为 1 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。

以上结论与文献 [3] 中利用迭代算法对 SPOT 影像求解的 RPC 参数结论一致,但是,本文提出的算法无需提供初值,无需迭代,具有求解简单,精度不降低等优点,并在全球 DEM 的基础上解决了 RPC 参数求解中最低和最高高程获得问题。

对于 SPOT - 5 影像,阶数为 3 并且分母不同的

RPC 模型可以取代严格成像模型进行摄影测量处理,并且在利用严格成像模型求解 RPC 模型参数时,采用 20×20 控制点格网、高程分层数 3 等数据,可以达到精度和效率的平衡。

参考文献

- [1] Dial G. IKONOS Satellite Mapping Accuracy [A]. Proceedings of ASPRS [C]. Washington DC, 2000 (on cdrom).
- [2] Grodecki J. KONOS stereo feature extraction - RPC approach [A]. Proceedings of ASPRS, Conference [C]. St. Louis 2001 (on cdrom).
- [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] 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 [EB/OL]. Case, <http://www.opengis.org/public/abstract/99-107.pdf>, 1999.
- [6] 张 过. 缺少控制点的卫星遥感影像精纠正 [D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [7] Dial G, GRODECKI J. Block Adjustment With Rational Polynomial Camera Models [A]. Proceedings of ACSM - ASPRS Annual Conference [C]. Washington DC, 2002 (on cdrom).

THE ALGORITHM FOR PARAMETERS OF RPC MODEL WITHOUT INITIAL VALUE

QIN Xu - wen^{1,2}, TIAN Shu - fang¹, HONG You - tang¹, ZHANG Guo³

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. China Geological Survey, Beijing 100011, China; 3. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The RPC model has recently aroused considerable interest in the community of photogrammetry and remote sensing. The RPC is a generalized sensor model capable of achieving high approximation accuracy. Unfortunately, the computation of the parameters of RPC model is subject to the initial value of the parameter in all the literature available. In this paper, an algorithm for parameters of RPC model without initial value is presented. The

(下转第 15 页)