

文章编号:1001-1595(2011)06-0756-06

卫星遥感影像有理函数模型优化方法

张永军¹, 王 蕾^{1,2}, 鲁一慧¹

1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079; 2. 四川测绘局 第三测绘工程院, 四川 成都 610500

Optimization of the Rational Function Model of Satellite Imagery

ZHANG Yongjun¹, WANG Lei^{1,2}, LU Yihui¹

1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. The Third Surveying and Mapping Institute of Sichuan Surveying and Mapping Bureau, Chengdu 610500, China

Abstract: To solve the problems of over-parameterization and low geo-referencing accuracy of rational function model (RFM), a novel method of parameter optimization based on scatter matrix and elimination transformation and a new method of remnant systematic error compensation without ground control points are proposed. The proposed parameter optimization method can resolve the ill-posed problem of RFM by rejecting all excess parameters. The systematic error compensation method introduces a new correction model with Fourier coefficients. Experimental results indicate that the performance of the proposed method with less parameters is equal to that of the conventional model with all of the 78 parameters. Moreover, the ill-posed problem is effectively eliminated and thus the stabilities of estimated parameters are improved. The systematic error compensation scheme significantly eliminates the remnant systematic error of RFM and improves the geo-referencing accuracy.

Key words: high-resolution satellite imagery; rational function model; scatter matrix; elimination transformation; ill-posed problem; remnant systematic error

摘 要: 针对高分辨率遥感影像有理函数模型 (RFM) 在实际应用中存在过度参数化和定位精度不高的问题, 提出基于离差阵和消去变换及残余系统误差补偿的高分辨率遥感影像 RFM 优化方法。试验结果表明, 经过参数筛选后的 RFM 参数均为无偏估计值, 拟合精度可以达到全部参数用于拟合时的精度, 而且模型病态性基本消除, 模型稳定性更高。残余系统误差补偿方法可以有效消除 RFM 拟合严格成像模型的残余误差, 达到与严格成像模型一致的对地定位精度。

关键词: 高分辨率卫星影像; 有理函数模型; 离差阵; 消去变换; 病态问题; 残余系统误差

中图分类号: P237

文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金 (41071233; 40671157)

1 前 言

随着航天测图技术的不断发展和广泛应用, 高分辨率卫星遥感影像的摄影测量处理理论和应用技术引起了国际摄影测量界的普遍关注^[1-2]。有理函数模型 (rational function model, RFM) 作为一种通用的传感器成像模型, 形式简单, 计算速度快, 更具一般性和保密性, 自 2000 年以来迅速成为研究热点^[3-10], 目前大部分高分辨率遥感卫星运营商均采用该模型作为传感器成像模型。然而 RFM 作为严格成像模型的拟合模型, 在理论研究和实际应用中凸现出许多亟待解决的问题: ① 模型参数求解存在病态问题^[11-12]; ② 高阶 RFM 因参数过多导致解不稳定^[13]; ③ 采用有理函数拟合严格成像模型时存在较为明显的残余误差^[8]。

针对 RFM 拟合严格成像模型存在过度参数

化的问题, 目前国内外主要从算法改进和模型构造两个方面进行研究, 例如采用岭估计等方法改善有理多项式系数 (rational polynomial coefficients, RPC) 求解过程中法方程的状态^[11]或略去 RFM 的三次项^[13]。但是, 岭估计等方法不能彻底解决过度参数化问题, 且用二次 RFM 拟合严格成像模型没有分析每个参数的显著性, 理论上不严密。

事实上, 利用 RFM“代替”严格成像模型进行对地定位时, 其系统误差可以分为严格成像模型本身存在的系统误差和利用 RFM 拟合严格模型的残余系统误差两类。目前提高 RFM 定位精度的方法都是利用地面控制点进一步优化 RFM 参数, 并未将严格成像模型本身存在的系统误差和由 RFM 模型局限性造成的残余系统误差区别处理。

本文结合参数显著性检验理论, 提出基于离差阵逐步回归的 RFM 参数筛选求解方法, 减少

RFM 拟合严格成像模型的参数个数,解决 RFM 过度参数化问题,同时提出一种无需地面控制点的 RFM 残余系统误差改正方法,提高无地面控制点情况下的对地定位精度。

2 基于离差阵的 RFM 参数逐步筛选求解

RFM 的一般形式如式(1)所示^[7]

$$\left. \begin{aligned} NumL(P,L,H) &= a_0 + a_1L + a_2P + a_3H + a_4LP + a_5LH + a_6PH + a_7L^2 + a_8P^2 + a_9H^2 + \\ & a_{10}PLH + a_{11}L^3 + a_{12}LP^2 + a_{13}LH^2 + a_{14}L^2P + a_{15}P^3 + a_{16}PH^2 + a_{17}L^2H + a_{18}P^2H + a_{19}H^3 \\ DenL(P,L,H) &= b_0 + b_1L + b_2P + b_3H + b_4LP + b_5LH + b_6PH + b_7L^2 + b_8P^2 + b_9H^2 + \\ & b_{10}PLH + b_{11}L^3 + b_{12}LP^2 + b_{13}LH^2 + b_{14}L^2P + b_{15}P^3 + b_{16}PH^2 + b_{17}L^2H + b_{18}P^2H + b_{19}H^3 \\ NumS(P,L,H) &= c_0 + c_1L + c_2P + c_3H + c_4LP + c_5LH + c_6PH + c_7L^2 + c_8P^2 + c_9H^2 + \\ & c_{10}PLH + c_{11}L^3 + c_{12}LP^2 + c_{13}LH^2 + c_{14}L^2P + c_{15}P^3 + c_{16}PH^2 + c_{17}L^2H + c_{18}P^2H + c_{19}H^3 \\ DenS(P,L,H) &= d_0 + d_1L + d_2P + d_3H + d_4LP + d_5LH + d_6PH + d_7L^2 + d_8P^2 + d_9H^2 + \\ & d_{10}PLH + d_{11}L^3 + d_{12}LP^2 + d_{13}LH^2 + d_{14}L^2P + d_{15}P^3 + d_{16}PH^2 + d_{17}L^2H + d_{18}P^2H + d_{19}H^3 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, (P, L, H) 表示正则化的地面坐标, (S_r, S_c) 表示正则化的影像坐标, $NumL(P, L, H)$ 、 $DenL(P, L, H)$ 、 $NumS(P, L, H)$ 及 $DenS(P, L, H)$ 分别为下列三阶多项式

式中, $a_0, \dots, b_{19}, c_0, \dots, d_{19}$ 为有理多项式系数,即 RFM 未知数,通常取 $b_0=1, d_0=1$ 。

设有 n 组观测数据,则上述模型可以用矩阵形式表达为^[7]

$$\begin{bmatrix} 1 & L_1 & \dots & H_1^3 & -S_{r1}L_1 & \dots & -S_{r1}H_1^3 \\ 1 & L_2 & \dots & H_2^3 & -S_{r2}L_2 & \dots & -S_{r2}H_2^3 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & L_n & \dots & H_n^3 & -S_{rn}L_n & \dots & -S_{rn}H_n^3 \end{bmatrix} [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_{18} \ a_{19} \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{18} \ b_{19}]^T - \begin{bmatrix} S_{r1} \\ \vdots \\ S_{rn} \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & L_1 & \dots & H_1^3 & -S_{c1}L_1 & \dots & -S_{c1}H_1^3 \\ 1 & L_2 & \dots & H_2^3 & -S_{c2}L_2 & \dots & -S_{c2}H_2^3 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & L_n & \dots & H_n^3 & -S_{cn}L_n & \dots & -S_{cn}H_n^3 \end{bmatrix} [c_0 \ c_1 \ \dots \ c_{18} \ c_{19} \ d_1 \ d_2 \ \dots \ d_{18} \ d_{19}]^T - \begin{bmatrix} S_{c1} \\ \vdots \\ S_{cn} \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

令式(2)和式(3)的系数矩阵为 X , 其元素为 $x_{i1}, \dots, x_{im} (i=1, 2, \dots, n), r_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为线性方程组的常数项, m 为未知数个数, n 为观测方程个数。分别对上述两式构造 $m+1$ 阶离差阵式(4), 采用消去变换法^[14] 求解未知参数的无偏估计并在计算中消去多余参数, 优化回归模型, 即可获得无偏的最优解算结果。下面以式(2)中参数 a_0 到 b_{19} 的计算为例进行分析说明。

令 $m+1$ 阶离差阵 $A^{(0)}$ 为

$$A^{(0)} = \begin{bmatrix} \tilde{X}^T \tilde{X} & \tilde{X}^T \tilde{r} \\ \tilde{r}^T \tilde{X} & \tilde{r}^T \tilde{r} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中

$$a_{ij}^{(0)} = \tilde{X}^T \tilde{X} = \sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(x_{ij} - \bar{x}_j) \quad (i, j = 1, \dots, m) \quad (5)$$

$$a_{i(m+1)}^{(0)} = \tilde{X}^T \tilde{r} = \sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(r_i - \bar{r})$$

$$(i = 1, \dots, m) \quad (6)$$

$$a_{(m+1)(m+1)}^{(0)} = \tilde{r}^T \tilde{r} = \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2 \quad (7)$$

式(5)、式(6)及式(7)中的 $\bar{x}_i, \bar{x}_j, \bar{r}$ 分别为对应列的平均值。

通过参数显著性检验判断参数项是否可以被选入模型, 计算各个自变量的偏回归平方和 $P_j^{(0)}$ ^[14]

$$P_j^{(0)} = (a_{j(m+1)}^{(0)})^2 / a_{jj}^{(0)} \quad (j = 1, \dots, m) \quad (8)$$

(1) 判断不在模型中的变量可否引入时, 设

$$P_{i1}^{(0)} = \max_{j=1, \dots, m} P_j^{(0)} \quad (9)$$

检验 $H_0: \beta_{i1} = 0$ (即变量 X_{i1} 对 r 的作用是否显著), 检验统计量为^[14]

$$F_1^{(0)} = \frac{P_{i1}^{(0)}}{Q(i1)/(n-2)} = \frac{P_{i1}^{(0)}(n-2)}{a_{m+1, m+1}^{(0)} - P_{i1}^{(0)}} \quad (10)$$

式中, $Q(i1)$ 表示在原有参数基础上选入 X_{i1} 时的残差平方和。给定显著性水平 α_1 , 记自由度为 $n-2$ 的 F 分布临界值为 $F_{in}(1, n-2)$, 若 $F_1^{(0)} >$

$F_{in}(1, n-2)$, 则引入变量 X_{i1} , 并对以该变量为主元的离差阵作消去变换, 否则停止筛选。

(2) 设 t 为已引入的变量个数, 判断已在模型中的变量可否剔除时, 设

$$P_{i0}^{(t)} = \min_{j=1, \dots, m} P_j^{(t)} \quad (11)$$

检验变量 X_{i0} 可否剔除的检验统计量为^[14]

$$F_2^{(t)} = \frac{P_{i0}^{(t)}}{Q(i1, \dots, it)/(n-t-1)} = \frac{P_{i0}^{(t)}(n-t-1)}{a_{m+1, m+1}^{(t)}} \quad (12)$$

式中, $Q(i1, \dots, it)$ 表示已选入 X_{i1}, \dots, X_{it} 时的残差平方和。给定显著性水平 α , 记自由度为 $n-t-1$ 的 F 分布临界值为 $F_{out}(1, n-t-1)$, 若 $F_2^{(t)} \leq F_{out}(1, n-t-1)$, 则剔除变量 X_{i0} , 并对以该变量为主元的离差阵作消去变换, 然后继续检验模型中的变量可否剔除; 否则考虑能否引入新变量。

假定筛选变量结束后, 引入方程的变量个数为 $h (h \leq m)$, 记为 $X_{i1}, \dots, X_{ih}, A^{(0)}$ 经过 h 次消去变换后转化为

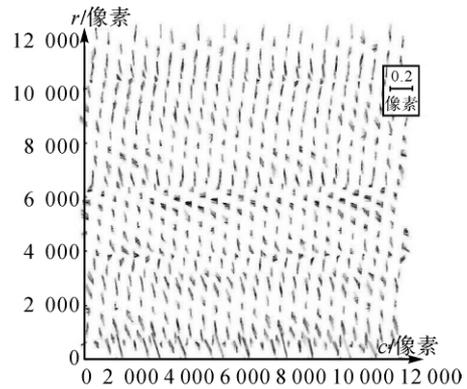
$$A^{(h)} = T_{ih} \dots T_{i1} A^{(0)} \quad (13)$$

由 $A^{(h)}$ 即可得到回归分析中的所有结果。

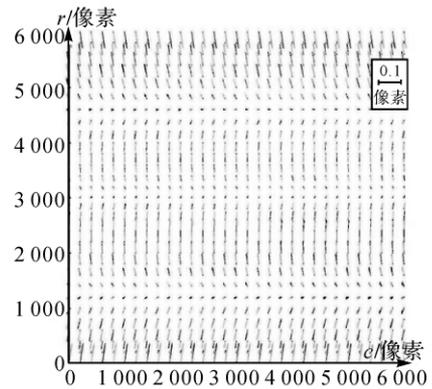
3 RFM 残余系统误差改正

研究表明, 利用卫星影像辅助文件提供的 RPC 参数, 无论是物方还是像方定位误差都具有很强的系统性, 并且误差主要随纬度或影像行(卫星运动前进方向)的变化而变化^[15]。许多利用 SPOT-5 和 IKONOS 卫星影像提供的 RPC 分析定位误差同样呈现相似的系统性。本文利用 SPOT-5 卫星参数和严格成像模型生成虚拟控制点格网并采用 RFM 拟合严格成像模型, 两组试验数据的像方坐标残余误差分布如图 1 所示。可以看出, 利用 RFM 拟合严格成像模型的残差呈现明显而有规律的系统性, 最大残差分别达到 0.1 和 0.05 像素, 且系统误差主要随影像行的变化而变化, 与已有研究成果的试验结论相似, 说明残余系统误差分布呈现普遍性。

本文提出的 RPC 残余系统误差补偿方法与摄影测量中系统误差处理的间接补偿法类似, 结合了自检校法和验后补偿法的优点, 不需要地面控制点, 不改变原有平差程序, 通过先验知识构造较为通用的残余系统误差补偿模型, 直接嵌入 RPC 逐步筛选求解的过程中, 利用 RPC 残差值求出残余系统误差模型参数, 从而提高定位精度。



(a) 试验数据1



(b) 试验数据2

图 1 利用 RFM 拟合严格成像模型后的像点残差分布
Fig. 1 Image point residues after RFM interpolation

利用残余误差主要随影像行变化而变化, 变化趋势呈现波状分布的先验知识, 通过试验, 在傅里叶系数和高次项系数中(其他方法在拟合时均出现不足)选用拟合效果较好的傅里叶系数构造残余系统误差模型式(14), 式中 ΔS_r 和 ΔS_c 即为残余系统误差改正模型。由于像点坐标 S_r 和 S_c 相互独立, 残差分布也不相同, 因此需要分别改正。

$$\left. \begin{aligned} S_r + \Delta S_r &= \frac{NumL(P, L, H)}{DenL(P, L, H)} \\ S_c + \Delta S_c &= \frac{NumS(P, L, H)}{DenS(P, L, H)} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \Delta S_r &= p_{r0} + p_{r1} \cos(r_n \omega_r) + q_{r1} \sin(r_n \omega_r) + \\ & p_{r2} \cos(2r_n \omega_r) + q_{r2} \sin(2r_n \omega_r) + \\ & p_{r3} \cos(3r_n \omega_r) + q_{r3} \sin(3r_n \omega_r) + \\ & p_{r4} \cos(4r_n \omega_r) + q_{r4} \sin(4r_n \omega_r) + \\ & p_{r5} \cos(5r_n \omega_r) + q_{r5} \sin(5r_n \omega_r) \\ \Delta S_c &= p_{c0} + p_{c1} \cos(r_n \omega_c) + q_{c1} \sin(r_n \omega_c) + \\ & p_{c2} \cos(2r_n \omega_c) + q_{c2} \sin(2r_n \omega_c) + \\ & p_{c3} \cos(3r_n \omega_c) + q_{c3} \sin(3r_n \omega_c) + \\ & p_{c4} \cos(4r_n \omega_c) + q_{c4} \sin(4r_n \omega_c) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中, $p_{r0}, p_{r1}, \dots, q_{r5}, \omega_r$ 为像点坐标 S_r 方向(卫

星轨道运行方向)残余系统误差改正模型系数, $p_{c0}, p_{c1}, \dots, q_{c4}, \omega_c$ 为像点坐标 S_c 方向残余系统误差改正模型系数。由于 S_r 方向系统误差比 S_c 方向系统误差分布复杂,其改正模型也比 S_c 方向多一对傅里叶系数项。

4 试验结果与分析

本文方法理论上适用于所有高分辨率卫星影像,但由于其他商业卫星影像的严格成像模型未知,因此利用已知严格成像模型的 SPOT-5 数据进行试验验证,下面采用其中两组数据进行说明。

试验数据 1:该数据由基于共线方程的严格成像模型生成,影像大小为 $12\,000 \times 12\,000$ 像素。控制点和检查点格网均为 5 层,交叉分布。最小高程 $200.000\,000\text{ m}$,最大高程 $2\,200.000\,000\text{ m}$,地面点坐标精确到小数点后 6 位。

试验数据 2:影像大小为 $6\,000 \times 6\,000$ 像素,像点坐标按 200×200 像素均匀分布。控制点和检查点格网均为 11 层,交叉分布。最小高程 $-0.000\,003\text{ m}$,最大高程 $8\,999.993\,091\text{ m}$,地面点坐标精确到小数点后 6 位。

地面点采用大地坐标系 (L, B, H) ,单位分别为 $(^\circ), (^\circ), \text{m}$ 。

4.1 RFM 参数逐步筛选求解

利用本文提出的逐步参数筛选方法求解的 RPC 参数与利用传统的岭估计方法求解的 RPC 参数序号对比如表 1 所示。本文方法将原模型的 78 个 RPC 参数经过显著性检验,分别筛选减少为 29 和 32 个参数。此外,筛选法求解的 RPC 未知数中误差比岭估计法求解的未知数中误差要小,精度更高。

表 1 参数逐步筛选后保留的 RPC 未知参数

Tab. 1 Remained RPC unknowns with the proposed approach

统计项		参数筛选后保留的 RPC 参数编号														
试验数据 1	c 方向	分子	1	2	3	4	5	8	9	12						
		分母	1	4	5	9	13									
	r 方向	分子	1	2	3	4	5	7	9	10	13					
		分母	1	2	5	8	12	13	15							
试验数据 2	c 方向	分子	1	2	3	4	5	8	9	10	15	16				
		分母	1	2												
	r 方向	分子	1	2	3	4	5	8	9	10	12	15				
		分母	1	4	5	6	7	9	10	13	15	16				

表 2 是两组数据的 RFM 求解模型设计矩阵条件数对比,可以看出采用岭估计解算 RPC 时,设计矩阵条件数比原线性矩阵条件数有所减小,一定程度上改善了模型病态性。利用本文提出的参数筛选方法剔除不显著的 RPC 参数项后,新模型的设计矩阵条件数非常小,基本克服了原模型求解 RPC 时存在的病态性问题。

表 2 设计矩阵条件数

Tab. 2 Condition index of the designed matrix

比较项	试验数据 1		试验数据 2	
	c 方向	r 方向	c 方向	r 方向
原始线性方程设计矩阵条件数	4.30E+11	8.07E+11	4.16E+12	1.70E+11
岭估计设计矩阵条件数	68 899 163	66 657 478	92 781 219	92 617 117
剔除不显著参数后设计矩阵条件数	39	216	2 071	132

RFM 拟合精度直接关系到高分辨率卫星遥感影像处理和数字测图的效果,为了验证利用筛选后的 RFM 参数是否能达到全部 78 个参数的拟合效果,表 3 列出两组试验数据分别利用岭估计法和逐步筛选参数法求解的 RPC 参数模型的拟合精度。可以看出,利用约 30 个 RPC 参数的模型拟合精度与岭估计的 78 个 RPC 参数模型拟合精度几乎一致,说明本文方法的正确性和有效性。第一组试验数据的 RPC 拟合精度较差主要由不同的高程分层数引起,已有大量文献讨论该问题,本文不再赘述。

4.2 RFM 残余系统误差改正

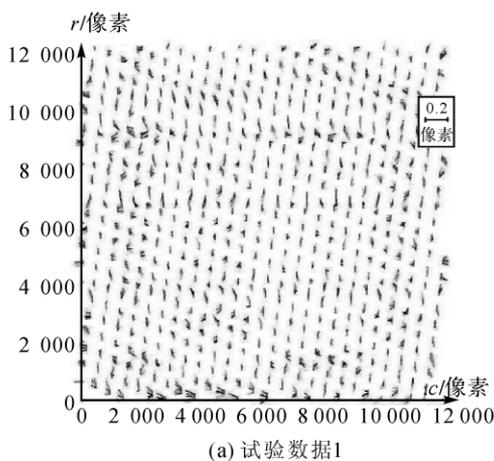
利用基于离差阵的参数逐步筛选法求解 RFM 后,两组试验数据的像点残差如图 1 所示;采用本文提出的残余系统误差改正方法进一步拟合后的像点残差如图 2 所示。可以看出,采用 RFM 拟合严格成像模型时,像点残差大小分布呈现明显的系统性,主要随 S_r 方向(卫星运动前进方向)变化,最大残差达到 0.1 和 0.05 像素量级,本文提出的残余系统误差改正方法能够明显提高原模型的拟合精度,可以基本消除像点残差的系统性,最大残差仅为 0.05、0.005 像素量级,其拟合精度统计如表 4 所示。可以看出经过残余系统误差改正后,RFM 定位精度显著提高,完全可以替代严格成像模型进行卫星遥感影像的对地定位处理。

表 3 不同 RPC 求解方法的拟合精度

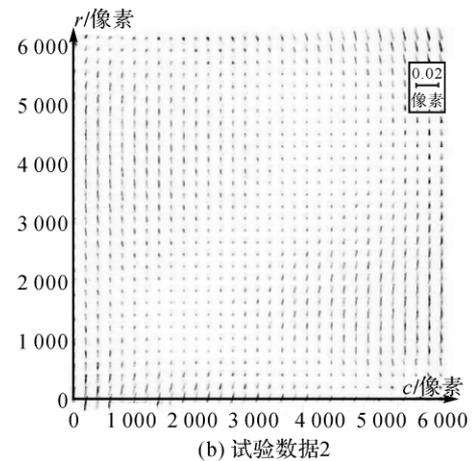
Tab. 3 Precision of RPC using different methods

像素

数据	统计项目	岭估计方法		参数筛选方法		
		控制点	检查点	控制点	检查点	
试验数据 1	c 方向	最大残差	-0.098 076	-0.088 593	-0.095 385	-0.087 638
		最小残差	0.000 011	0.000 020	-0.000 006	-0.000 022
		均方差	0.026 913	0.027 480	0.027 206	0.027 560
	r 方向	最大残差	-0.151 241	-0.162 753	-0.149 566	-0.156 334
		最小残差	0.000 024	0.000 006	-0.000 014	0.000 104
		均方差	0.039 013	0.043 961	0.039 150	0.043 602
试验数据 2	c 方向	最大残差	0.015 014	-0.015 230	0.015 618	0.015 383
		最小残差	0.000 001	-0.000 004	-0.000 000	-0.000 001
		均方差	0.007 809	0.007 782	0.007 804	0.007 773
	r 方向	最大残差	-0.055 896	-0.055 894	-0.057 062	-0.057 058
		最小残差	-0.000 001	0.000 002	0.000 000	0.000 002
		均方差	0.024 589	0.024 401	0.024 596	0.024 411



(a) 试验数据1



(b) 试验数据2

图 2 残余系统误差改正后的像点坐标残差分布

Fig. 2 Image point residues after correction of remnant systematic errors

表 4 残余系统误差改正前后的拟合精度对比

Tab. 4 Precision comparison between precision before and after remnant systematic error correction

像素

数据	统计项目	残余系统误差改正前		残余系统误差改正后		
		控制点	检查点	控制点	检查点	
试验数据 1	c 方向	最大残差	-0.095 385	-0.087 638	-0.072 08	-0.064 344
		最小残差	-0.000 006	-0.000 022	-0.000 012	0.000 011
		中误差	0.027 206	0.027 560	0.017 424	0.018 096
	r 方向	最大残差	-0.149 566	-0.156 334	0.053 406	0.053 987
		最小残差	-0.000 014	0.000 104	0.000 000	-0.000 012
		中误差	0.039 150	0.043 602	0.015 295	0.016 827
试验数据 2	c 方向	最大残差	0.015 618	0.015 383	-0.002 864	-0.002 559
		最小残差	-0.000 000	-0.000 001	0.000 000	-0.000 000
		中误差	0.007 804	0.007 773	0.000 44	0.000 434
	r 方向	最大残差	-0.057 062	-0.057 058	0.005 903	0.005 275
		最小残差	0.000 000	0.000 002	0.000 000	-0.000 000
		中误差	0.024 596	0.024 411	0.000 959	0.000 955

5 结 论

本文提出基于离差阵和消去变换的 RFM 未

知参数逐步筛选求解方法,用最少最合理的参数项拟合卫星遥感影像的严格成像模型,克服过度参数化导致的系统病态性,并提出一种 RFM 残

余系统误差的补偿方法。

试验结果表明,利用分母不相同的三阶 RFM 拟合严格成像模型,参数间的复共线性导致模型系统病态,参数解不稳定。本文提出的逐步筛选参数求解方法可以解决 RFM 拟合严格成像模型的过度参数化问题。该方法优化了数学模型,可以获得最小二乘无偏估计结果,且模型稳定性比岭估计方法高。该方法的参数个数虽然减少一半以上,但拟合精度与原 78 个参数模型的拟合精度一致。

RFM 拟合严格成像模型时存在主要随卫星轨道运行方向变化的残余系统误差,利用本文提出的残余系统误差补偿方法可以有效消除该残余误差,拟合精度大大提高。

在实际应用中,基于离差阵的 RFM 参数逐步筛选方法和 RFM 残余系统误差的改正方法可以独立或结合使用,例如拟合 RFM 时可以采用逐步筛选法进行解算,当残余系统误差较大时再采用残余系统误差补偿方法提高拟合精度。

参考文献:

- [1] WANG J, DI K, LI R. Evaluation and Improvement of Geopositioning Accuracy of IKONOS Stereo Imagery[J]. ASCE Journal of Surveying Engineering, 2005, 131(2): 35-42.
- [2] ZHANG Yongjun, ZHANG Yong. Direct Geo-referencing of SPOT 5 HRS Imagery without (or with a Few) Ground Control Point[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 31(11): 941-944. (张永军, 张勇. SPOT 5 HRS 立体影像无(稀少)控制绝对定位技术研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 31(11): 941-944.)
- [3] GRODECKI J. IKONOS Stereo Feature Extraction-RPC Approach[C]//Proceedings of the ASPRS Annual Conference. St Louis: [s. n.], 2001: 23-27.
- [4] TAO C V, HU Y. A Comprehensive Study on the Rational Function Model for Photogrammetric Processing [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67(12): 1347-1357.
- [5] TAO C V, HU Y. 3-D Reconstruction Algorithms with the Rational Function Model and Their Applications for IKONOS Stereo Imagery[C]//Proceedings of Joint ISPRS Workshop on High Resolution Mapping from Space. Hannover: [s. n.], 2001.
- [6] FRASER C S, HANLEY H B. Bias Compensation in Rational Functions for IKONOS Satellite Imagery [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2003, 69(1): 53-57.
- [7] GRODECKI J, DIAL G. Block Adjustment of High-resolution Satellite Images Described by Rational Functions[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2003, 69(1): 59-68.
- [8] FRASER C S, HANLEY H B. Bias-compensated RPCs for Sensor Orientation of High-resolution Satellite Imagery[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(8): 909-915.
- [9] FRASER C S, DIAL G, GRODECKI J. Sensor Orientation via RPCs [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60(3): 182-194.
- [10] TONG X H, LIU S J, WENG Q H. Bias-corrected Rational Polynomial Coefficients for High Accuracy Geopositioning of QuickBird Stereo Imagery [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(2): 218-226.
- [11] YUAN Xiuxiao, LIN Xianyong. A Method for Solving Rational Polynomial Coefficients Based on Ridge Estimation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(11): 1130-1133. (袁修孝, 林先勇. 基于岭估计的有理多项式参数求解方法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(11): 1130-1133.)
- [12] GUI Qingming, YAO Shaowen, GU Yongwei, et al. A New Method to Diagnose Multicollinearity Based on Condition Index and Variance Decomposition Proportion [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(3): 210-214. (归庆明, 姚邵文, 顾勇为, 等. 诊断复共线性的条件指标一方差分解比法[J]. 测绘学报, 2006, 35(3): 210-214.)
- [13] ZHAO Liping, LIU Fengde, LI Jian, et al. Research on Reducing Term of Higher Order in RFM Model [J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(4): 14-17. (赵利平, 刘凤德, 李健, 等. 减少有理函数模型中高次项的初步研究[J]. 测绘科学, 2007, 32(4): 14-17.)
- [14] GAO Huixuan. Application of Multiple Statistical Analyses[M]. Beijing: Press of Peking University, 2005. (高惠璇. 应用多元统计分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.)
- [15] TONG Xiaohua, LIU Shijie, YE Qin. Accuracy Analysis and Improvement of QuickBird Stereo Positioning Based on Rational Function Model[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(4): 555-559. (童小华, 刘世杰, 叶勤. 基于有理函数模型的 QuickBird 立体定位精度分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(4): 555-559.)

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2010-07-09

修回日期: 2011-04-27

第一作者简介: 张永军(1975—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为数字摄影测量与遥感、计算机视觉等。

First author: ZHANG Yongjun (1975—), male, PhD, professor, PhD supervisor, majors in digital photogrammetry and remote sensing, computer vision.

E-mail: zhangyj@whu.edu.cn