

基于有理多项式模型的高分四号卫星可见光通道面阵成像载荷在轨几何定标

皮英冬^{1,2}, 王密¹, 王思恒^{3*}, 赵会杰³, 赵亮³

¹武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

²武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079;

³中国空间技术研究院, 北京 100094

摘要 针对我国首颗静止轨道高分辨率光学遥感卫星高分四号(GF4)的可见光通道面阵成像载荷,基于成像模型中内外方位元素的相关特性,提出一种基于先验有理多项式(RPC)模型的在轨几何定标方法,以地面控制点的真实像点和基于RPC模型计算的虚拟像点为观测值,在初始的定标参数基础上重建精确的几何定标参数,实现卫星成像载荷系统性几何误差的补偿。本方法完全避免了传统在轨几何定标构建严格几何成像模型中复杂的辅助数据处理和多个成像坐标系统的转换,建模和解算均极为简单,且定标结果可直接应用于基于严格几何成像模型的地面处理系统。通过一组GF4卫星面阵载荷的真实影像数据实验验证了本方法的有效性和模型的合理性,结果表明:本方法可有效补偿成像模型中的系统几何误差,且得到定标结果与基于严格几何成像模型的传统定标方法几乎一致。

关键词 几何光学; 面阵载荷; 在轨几何定标; 有理多项式模型; 系统几何误差

中图分类号 P230

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221801

1 引言

高分四号(GF4)卫星是我国首颗静止轨道高分辨率光学遥感卫星^[1-2],通过姿态控制实现对我国及周边地区的监测,提供高时间分辨率、大幅宽的遥感数据,其光学成像系统由可见光和中红外光2个通道的面阵载荷组成,拥有共同的光学镜头,采用滤光片实现通道分离成像,其中可见光(PMS)载荷通过旋转滤光片对5个波段进行分时成像,同时获取50 m分辨率的可见光/多光谱影像^[3]。在轨几何定标是修正卫星影像成像模型中系统性几何误差,保障卫星影像几何质量的关键技术^[4-6]。当前,为了与卫星数据处理系统的严格几何成像模型契合,在轨几何定标通常也是基于严格几何成像模型进行处理的。例如在IKONOS卫星发射后,美国空间影像公司和国家航空航天局基于严格几何成像模型对其相机视场角、电荷耦合元件(CCD)阵列布置、镜头光学畸变以及相机安装矩阵等物理参数进行了严格定标^[7-8],在我国首颗民用三线阵立体测绘卫星ZY-3号发射后,文献[9-11]同样基于严格几何成像模型对其相机安装角和载荷光学畸变等系统误差参数进行定标,通过在地面处理系统中调用这些定标

结果,提高生产的影像产品的几何精度。在静止轨道发射GF4卫星后,中国资源卫星应用中心和武汉大学相关团队利用Landsat-7卫星的参考影像数据对其严格几何成像模型中的系统误差参数进行了严格的在轨几何定标,并将基于定标结果更新的相机文件布设在地面处理系统中来提高影像的几何精度^[3,12]。

然而,虽然在轨几何定标方法在摄影测量原理上只是简单的后方交会,但卫星成像系统是集成姿态、轨道、时间多类观测数据的复杂测量系统,其严格几何成像模型的构建涉及复杂的姿态、轨道、时间辅助数据和星历数据处理和多个坐标系统的转换,且每次进行定标任务时需要在日常业务化运行的数据处理系统中单独生产辅助数据,传统基于严格几何成像模型的在轨定标方法本身是复杂的,还导致需要很多费时、费力的工作来辅助定标任务,使得在轨几何定标成为一项专业且繁重的工作。针对传统基于严格几何成像模型的问题,本文提出一种简单的基于先验有理多项式(RPC)模型的在轨几何定标方法,只需利用当前的定标参数及基于该定标参数拟合的RPC,即可重新生成直接用于构建严格几何成像模型的定标参数,补偿成

收稿日期: 2022-10-09; 修回日期: 2022-12-02; 录用日期: 2022-12-12; 网络首发日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(42192583)、中国博士后科学基金(2022M722444)、中央高校基本科研业务费专项(2042022kf1002)、中国空间技术研究院CAST创新基金

通信作者: *rswangsiheng@163.com

像模型中的系统几何误差。本方法只需具有 RPC 的 L1B 级影像数据,无需姿态、轨道、时间辅助数据,且无需构建复杂的严格几何成像模型,具有处理简单方便的优点,同时又可得到与传统基于严格几何成像模型的定标方法几乎一致的定标结果和精度。

2 基于 RPC 的在轨几何定标原理

本方法在卫星当前定标参数和基于该定标参数生成的 RPC 模型进行在轨几何定标,其本质是利用当前 RPC 计算的定位残差对当前定标参数进行改正。如图 1 所示,对物方的任何一点 P ,其地理坐标为 (B, L, H) ,在影像上对应的真实点为 p ,其像点坐标为 (s, l) ,但由于卫星影像成像模型中存在几何误差,基于 RPC 参数计算的虚拟像点为 p' ,其像点坐标为 (s', l') 。真实的像点与计算的虚拟像点之间的差异为表征卫星影像成像模型几何误差的定位残差,而在轨几何定标的目的即计算一套新的定标参数消除影像上所有位置的系统性像方残差。

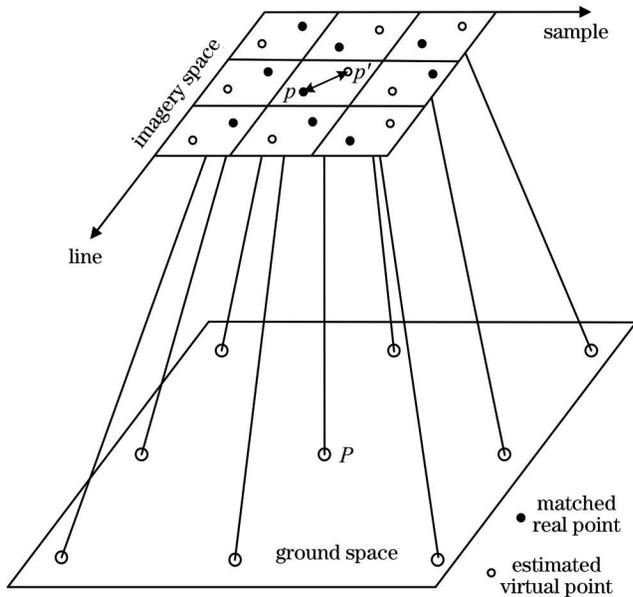


图 1 基于 RPC 的在轨几何定标原理示意图

Fig. 1 Principle of on-orbit geometric calibration based on RPC

由于 RPC 模型是严格几何成像模型的高精度拟合,基于当前的定标参数 v_{gc}^{ori} 构建的严格几何成像模型在虚拟像点 (s', l') 处与地面的交点仍为 P ,而在轨几何定标计算一套新的定标参数 v_{gc}^{new} 使得基于该参数构建的严格几何成像模型在真实像点 (s, l) 处与地面的交点为 P 。由于内外方位元素是完全相关的^[3],影像实际外方位元素误差完全可由改变内方位元素替代,即在定标中认为影像的姿轨外方位元素是不变的,而姿轨外方位元素不变时严格几何成像模型的物方是相同的。因此,在轨几何定标可等价于计算一套新的定标参数 v_{gc}^{new} 使得其在真实像点 (s, l) 处计算的像方矢量

V_x, V_y 与当前的定标参数 v_{gc}^{ori} 在虚拟像点 (s', l') 处计算的像方矢量相同,具体如下:

$$\begin{cases} V_x(v_{gc}^{ori}, s', l') = V_x(v_{gc}^{new}, s, l) \\ V_y(v_{gc}^{ori}, s', l') = V_y(v_{gc}^{new}, s, l) \end{cases} \quad (1)$$

3 在轨几何定标及精度评价方法

根据上述几何定标原理,提出的在轨几何定标方法流程,如图 2 所示。首先,仍需从影像覆盖区域的高精度 digital ortho map (DOM) 和 digital surface model (DSM) 数据匹配一定数量均匀分布的控制点;然后,利用当前 RPC 参数计算控制点对应的虚拟像点,再基于当前定标参数,利用虚拟像点和真实像点构建在轨几何定标模型;最后,采用最小二乘优化方法整体解算定标参数,进而补偿成像载荷的系统几何误差。

3.1 几何定标模型构建

在轨几何定标的本质是检校卫星影像成像模型中的系统几何误差,因此这里构建的几何定标模型应较好地拟合 GF4 卫星 PMS 载荷成像模型中的各类系统几何误差。PMS 载荷的系统几何误差参数主要可分为外部系统误差参数和内部系统误差参数两类,其中内部系统误差参数主要包括相机的主点、主距、探元尺寸以及光学畸变参数等众多内方位元素参数,而外部系统误差参数主要包括姿态、轨道和相机安装误差,通常可基于参数的相关性,广义地归纳为卫星本体与和相机之间的安装角^[12-13]。在传统的基于严格几何成像模型的定标中,通常采用分步解算的方法在内定标和外定标中分别计算内外定标参数,由于内外系统误差参数之间的相关性,此时计算的内外定标参数并不能完全等价于内外系统误差参数,但二者在成像模型中同时使用可整体补偿成像模型中的系统几何误差。RPC 模型是一个拟合模型,无法像严格几何成像模型那样根据内外系统误差参数的物理意义在定标处理将其区分开来,再者两类参数间的相关性使得外部系统误差完全可以利用内参数进行补偿,因此这里直接建立广义的内定标模型,整体补偿成像模型中的内外系统误差参数。此外,本方法的新颖之处在于基于 RPC 模型即可精确检校出用于地面处理系统严格几何成像模型使用的定标参数,因此,采用的定标模型应与处理系统当前的模型相同。

根据上述分析,这里建立的内定标模型仍是用于地面处理系统中严格几何成像模型处理的,而相机严格物理模型是基于光学相机成像机理构建的,各类参数具有明确的物理意义,但某些参数之间存在着强相关性,如主距和探元尺寸,在定标中直接解算这些物理参数势必会造成解算的不稳定^[12,14-15]。在实际处理中,通常采用广义的拟合模型来克服内参数耦合的问题,如图 3 所示,在相机坐标系 $o-xyz$ 中,通过主距归一化将每个 CCD 探元像方矢量 V_{image} 的确定转换为计算 2

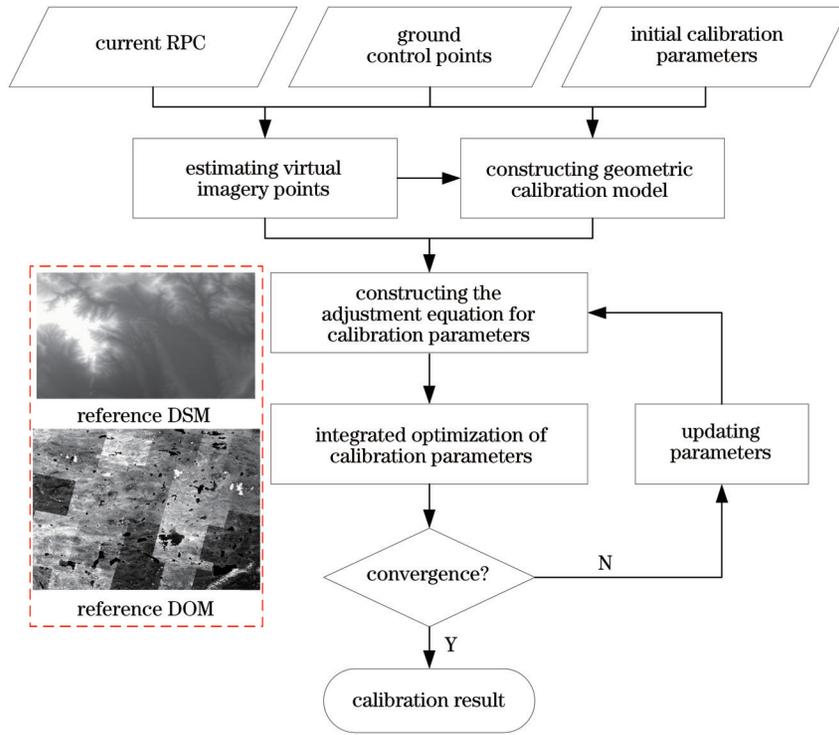


图 2 基于 RPC 的在轨几何定标方法流程

Fig. 2 Flow of on-orbit geometric calibration based on RPC

个方向的指向角 (φ_x, φ_y) 。然后,基于相机的严格物理模型的形式,采用多项式来拟合焦平面上每个探元的指向角,由于 PMS 载荷长焦距、窄视场、面阵成像的设计特点,高阶畸变在所有误差中所占的比例有限,采用

2 个二元三次多项式足以准确描述成像视场中每个探元的光线指向:

$$V_{\text{image}} = (x, y, z)^T \Rightarrow [\tan(\varphi_x), \tan(\varphi_y), 1]^T, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \tan[\varphi_x(s, l)] = a_0 + a_1s + a_2l + a_3sl + a_4s^2 + a_5l^2 + a_6s^2l + a_7sl^2 + a_8s^3 + a_9l^3 \\ \tan[\varphi_y(s, l)] = b_0 + b_1s + b_2l + b_3sl + b_4s^2 + b_5l^2 + b_6s^2l + b_7sl^2 + b_8s^3 + b_9l^3 \end{cases}, \quad (3)$$

式中: (s, l) 为探元号; $(a_i, b_i) (i = 0, 1, \dots, 9)$ 为探元指向角模型的系数。

3.2 定标参数解算

假设一个真实控制点的物方坐标为 (B, L, H) , 像方真实坐标为 (s, l) , 则需利用 RPC 参数和每个控制点

物方坐标 (B, L, H) , 采用 RPC 反算得到其对应的虚拟像点坐标 (s', l') , 然后基于当前定标参数 $v_{\text{gc}}^{\text{ori}} = (c_i, d_i) (i = 0, 1, \dots, 9)$ 和待解算定标参数 $v_{\text{gc}}^{\text{new}} = (a_i, b_i) (i = 0, 1, \dots, 9)$, 根据式(1)建立用于定标参数解算的平差方程, 具体如下:

$$\begin{cases} V_x(v_{\text{gc}}^{\text{new}}, s, l) = a_0 + a_1s + a_2l + a_3sl + a_4s^2 + a_5l^2 + a_6s^2l + a_7sl^2 + a_8s^3 + a_9l^3 \\ V_y(v_{\text{gc}}^{\text{new}}, s, l) = b_0 + b_1s + b_2l + b_3sl + b_4s^2 + b_5l^2 + b_6s^2l + b_7sl^2 + b_8s^3 + b_9l^3 \\ V_x(v_{\text{gc}}^{\text{ori}}, s', l') = c_0 + c_1s' + c_2l' + c_3s'l' + c_4s'^2 + c_5l'^2 + c_6s'l'^2 + c_7s'l'^2 + c_8s'^3 + c_9l'^3 \\ V_y(v_{\text{gc}}^{\text{ori}}, s', l') = d_0 + d_1s' + d_2l' + d_3s'l' + d_4s'^2 + d_5l'^2 + d_6s'l'^2 + d_7s'l'^2 + d_8s'^3 + d_9l'^3 \end{cases}, \quad (4)$$

其中, 当前定标参数 $v_{\text{gc}}^{\text{ori}} = (c_i, d_i) (i = 0, 1, \dots, 9)$ 和虚拟像点坐标 (s', l') 均已知且在迭代优化过程中不变, 因此可直接将虚拟像点坐标构建的方程视为常数, 记为 $\bar{V}_x = V_x(v_{\text{gc}}^{\text{ori}}, s', l')$, $\bar{V}_y = V_y(v_{\text{gc}}^{\text{ori}}, s', l')$, 进而建立用于定标参数解算的平差方程:

$$\begin{cases} G_x = V_x(v_{\text{gc}}^{\text{new}}, s, l) - \bar{V}_x \\ G_y = V_y(v_{\text{gc}}^{\text{new}}, s, l) - \bar{V}_y \end{cases} \quad (5)$$

采用最小二乘法解算定标参数, 对第 j 对真实像点和虚拟像点构建的平差方法进行线性化, 得到误差方程如下:

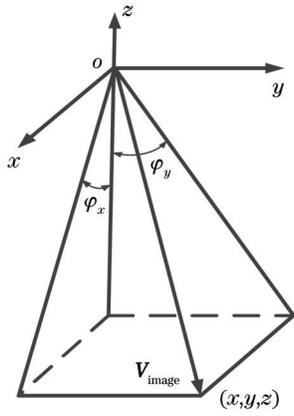


图 3 每个探元的指向角

Fig. 3 Viewing-angle of the CCD detector

$$V_j = A_j x - L_j P_j, \quad (6)$$

式 中 :

$$A_j = \begin{bmatrix} \frac{\partial G_x}{\partial a_i} & \frac{\partial G_x}{\partial b_i} \\ \frac{\partial G_y}{\partial a_i} & \frac{\partial G_y}{\partial b_i} \end{bmatrix} (i = 0, 1, \dots, 9);$$

$$L_j = \begin{bmatrix} -(G_x) \\ -(G_y) \end{bmatrix}, ((G_x), (G_y)) \text{ 是基于定标参数当前值根}$$

据式(4)计算的平差方程当前值; x 为待解算定标参数改正数; P_j 为该对观测值的权。

根据最小二乘平差原理^[16-17], 采用逐点法化建立方程, 进而得到定标参数改正数 x 的解为

$$x = W^{-1} M, \quad (7)$$

式中: $W = \sum_{j=1}^k A_j^T P_j A_j$; $M = \sum_{j=1}^k A_j^T P_j L_j$, k 为控制点数量。

最小二乘平差解算是一个迭代的过程, 需根据解算的改正数不断更新当前的定标参数, 并将其作为下一次解算的输入, 当两次平差解算的结果小于限差时, 迭代优化结束。

3.3 几何定标精度验证

定标后影像的内部几何精度是表征成像载荷在轨几何定标效果的关键指标, 可用于说明对成像载荷主距误差、光学畸变等高阶系统几何误差的补偿效果。针对提出的在轨几何定标方法, 为了评价该指标, 首先基于定标解算的相机成像参数重新拟合单景影像的 RPC, 然后基于重新生成的 RPC 进行精度评价。

但对处于地球同步轨道的 GF4 卫星, 从卫星发射

初期的几何定标和精度测试^[3]到几年来持续不断的在轨跟踪测试, 均表明该卫星影像外方位元素稳定性较差, 尤其偏航方向角元素误差的变化相较于低轨道卫星异常显著, 导致影像内部容易出现旋转误差。因此, 在通过验证影像内部几何精度、评价几何定标效果时, 需要排除外方位元素时变误差的不利影响。鉴于这部分误差带来的影响主要为单景影像的平移和旋转误差, 因此, 通过在检查点像方坐标上附加一个旋转和平移变换来消除这部分误差的影响, 进而得到误差改正后的像点残差 ($\Delta s, \Delta l$):

$$\begin{bmatrix} \Delta s \\ \Delta l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ds \\ dl \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} s' \\ l' \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: (s, l) 为检查点原始像点坐标; (s', l') 为基于检查点物方坐标和 RPC 计算的像点坐标; (ds, dl) 、 θ 分别为平移和旋转变换参数。

令式(8)中 $\Delta s = \Delta l = 0$, 利用检查点构建平差方程, 采用最小二乘平差方法计算变换参数, 再将计算的变换参数代入式(8)中便可得到改正了旋转和平移误差后的像点残差, 通过统计该残差便可得到影像的内部几何精度, 进而评价定标方法对 PMS 载荷系统几何误差的补偿效果。

4 分析与讨论

4.1 实验数据介绍

考虑到 GF4 卫星影像成像参数显著的时变特性, 为了尽量控制其成像参数在轨可能发生的变化对定标结果精度评价带来的不利影响, 利用拍摄于 2021 年 1 月 9 日一天内的多景影像进行在轨几何定标及精度验证。由于 PMS 影像第一波段为全色波段, 与其他波段相比具有更加丰富的纹理信息, 因此利用其全色波段影像进行 PMS 载荷的标定, 采用的参考数据由 Landsat 卫星生产的相应区域 15 m 分辨率 DOM 和日本的 ALOS 卫星生产的 30 m 分辨率的 AW3D30 DSM, 其中 DOM 数据的平面精度优于 20 m, DSM 数据的高程精度优于 10 m^[18], 完全可用于 PMS 影像的在轨几何定标。为了获取用于定标解算和精度验证的控制点观测值, 采用基于 SIFT 算子的稳健匹配算法^[19], 从上述影像及其参考影像上自动匹配了一定数量、且均匀分布的高精度地面控制点, 所采用的定标和精度验证影像的基本信息, 如表 1 所示。

表 1 GF4 卫星 PMS 传感器定标实验影像信息

Table 1 Image information of GF4 satellite PMS sensor calibration experiment

Image No.	Control point number	Imaging time	Position of image center	Spatial resolution / m	Image size / (pixel × pixel)
PMS 1	134	14:09:52	88.5° E, 32.5° N	66.2	10240 × 10240
PMS 2	142	14:11:31	92.8° E, 31.4° N	63.4	
PMS 3	139	14:13:09	96.6° E, 31.3° N	60.1	
PMS 4	215	13:02:39	88.9° E, 27.3° N	62.2	

所有影像均提供了基于当前定标参数生成的 RPC 文件,用对定标参数解算和精度对比验证,图 4 列出覆盖我国中部的 PMS 1 定标景影像,以及该影像上控制点及参考影像。

4.2 在轨几何定标结果对比分析

为了说明本方法的正确性和对不同影像的普适性,对上述 4 景均利用本方法进行几何定标,以当前的指向角模型定标参数为初值,分别利用各自影像的控制点构建平差方程,并基于本方法进行参数解算,所有的解算在迭代 4 次后收敛到最佳状态。此外,为了对比验证本方法的有效性,还采用文献[12]中基于严格几何成像模型的传统在轨定标方法对上述 4 景影像分别进行了几何定标,为了保证本方法和传统方法参数解算的一致性,在基于严格几何成像模型进行定标时

同样未解算外定标参数,而是基于二者之间完全相关的特性^[12],将外方位元素误差视为内方位元素误差的一部分,通过整体的定标进行补偿。由于本文定标模型中参数多达 20 个,这里不直接列出定标结果,而是通过对比验证本方法计算的定标参数确定的指向角,与传统方法计算的定标参数确定的指向角之间的差异,进而表明本方法的有效性和合理性。

将大小为 10240 pixel×10240 pixel 的影像划分为 50 pixel×50 pixel 的均匀格网,然后分别基于本方法的定标参数以及基于严格几何成像模型的定标参数,在每个格网的中心点处计算两套指向角,进而计算两套参数在每个点处的指向角残差,并统计所有残差的均值、均方差(RMS)和无符号最值,如表 2 所示,其中 line 表示影像列方向,samp 表示影像行方向。

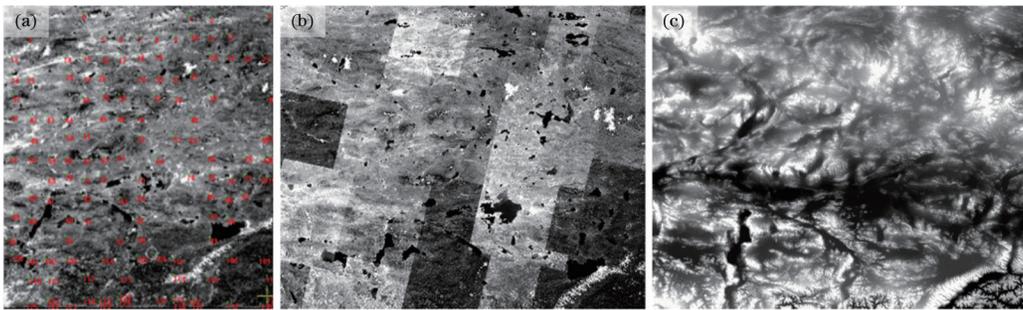


图 4 定标景影像及参考数据。(a)定标景影像;(b)参考 DOM;(c)参考 DSM

Fig. 4 Calibration image and reference images. (a) Calibration image; (b) reference DOM; (c) reference DSM

表 2 定标结果指向角相对残差统计

Table 2 Statistics of relative residuals of viewing angle determined by calibration results

Image No.	Mean /pixel		RMS /pixel		Unsigned maximum /pixel	
	line	samp	line	samp	line	samp
PMS 1	-4.6×10^{-5}	-5.9×10^{-4}	3.6×10^{-4}	2.0×10^{-3}	1.3×10^{-3}	5.7×10^{-3}
PMS 2	-4.3×10^{-5}	4.2×10^{-4}	5.6×10^{-4}	2.2×10^{-3}	2.3×10^{-3}	1.0×10^{-2}
PMS 3	-4.3×10^{-4}	4.6×10^{-4}	1.5×10^{-3}	2.7×10^{-3}	4.5×10^{-3}	1.2×10^{-2}
PMS 4	1.2×10^{-4}	5.7×10^{-4}	1.6×10^{-3}	2.2×10^{-3}	6.1×10^{-3}	9.4×10^{-3}

由表 2 可知,对 4 景影像而言,采用本方法和基于严格几何成像模型的传统定标方法计算的探元指向角几乎相同,二者之间的最大差异也仅为 0.01 pixel,表明本方法可达到与传统几何定标方法几乎一致的定标结果和定标精度,但本方法显然更加简单,更适用于在轨高频次定标处理,具有传统方法无可比拟的优势。

4.3 在轨几何定标精度验证与分析

采用 2 种方式验证本文定标方法的有效性,首先对比验证定标景影像在定标前后的几何精度,然后基于独立于定标景影像的其他影像验证定标前后影像的几何精度,进而说明本方法的合理性和有效性。采用 PMS 1 影像为定标景影像,利用其影像上的控制点进行在轨几何定标,然后基于定标结果,采用独立于地形的高精度拟合方法重新拟合 RPC 参数^[20],并进行几何精度验证,分别验证初始模型参数、初始模型参数经过

旋转和平移低阶误差改正、严格几何成像模型定标后以及提出的 RPC 模型定标后 4 种情况下的影像几何定位精度,得到统计的均值、RMS 和均方根误差(RMSE)如表 3 所示。

此外,将定标景影像上控制点作为检查点,基于当前相机参数生成的 RPC 和利用本文定标结果重新拟合的 RPC,利用本文的精度评价方法分别计算检查点的像方绝对几何定位残差和改正平移、旋转误差后的影像内部几何定位残差,并绘制所有检查点残差在影像上的分布情况,如图 5 所示。结合图 5、表 3 可知,在定标前影像初始成像模型中存在较大的几何定位误差,且该误差主要表现为单景影像的旋转误差,由外方位元素中偏航方向的角元素误差引起。而影像内部存在较明显的由影像中心到边缘逐渐增大的放射性几何误差,虽然该误差在行列 2 个方向的误差

表 3 定标前后影像几何精度统计情况

Table 3 Statistics of image geometric accuracy before and after calibration

unit: pixel

Processing stage	Accuracies in line direction			Accuracies in sample direction		
	Mean	RMS	RMSE	Mean	RMS	RMSE
Initial RPC imaging model	2.52	9.90	9.57	-1.83	9.03	8.84
After correcting the low-order error	0	1.54	1.54	0	1.85	1.85
Calibration based on physical imaging model	0	0.62	0.62	0	0.63	0.63
Calibration based on RPC imaging model	0	0.62	0.62	0	0.63	0.63

统计值仅为 1.54 和 1.85,但从图 5 中可以看出,在影像边缘却误差高达 3~4 pixel,严重影响后影像续配准融合等处理的精度,在几何定标中是不容忽视的。而在轨几何定标后,定标景影像的绝对几何定位精度和内部几何精度均得到了显著的提高,影像本身的系

统性几何误差得到了较好的补偿,检查点的像方绝对和相对残差的大小均趋于一致,且具有较好的随机性。此外,本方法与基于严格几何成像模型的传统定标方法得到的精度验证结果一致,均表明本方法是有效、合理的。

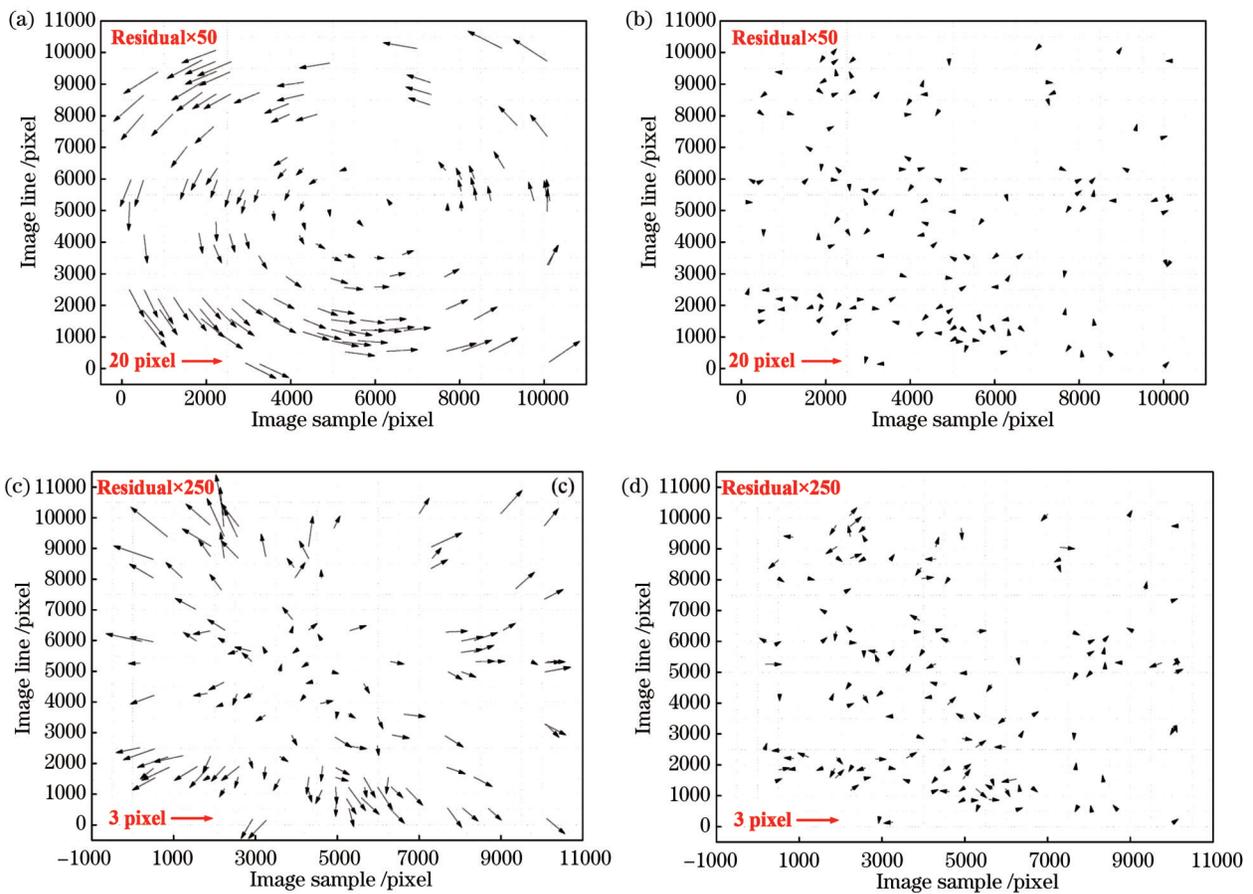


图 5 定标前后影像几何精度情况。(a)定标前影像检查点绝对定位残差分布;(b)定标后影像检查点绝对定位残差分布;(c)定标前影像内部检查点相对定位残差分布;(d)定标后影像内部检查点相对定位残差分布

Fig 5 Image geometric accuracy before and after calibration. (a) Distribution of the absolute positioning residuals before calibration; (b) distribution of the absolute positioning residuals after calibration; (c) distribution of the relative positioning residuals before calibration; (d) distribution of the relative positioning residuals after calibration

进一步地,利用另外三景独立影像验证基于 PMS 1 影像解算几何定标结果的有效性,基于定标结果重新拟合三景影像的 RPC 参数,进而对比验证几何定标前、严格模型几何定标和 RPC 模型定标 3 种情形下的影像内部几何精度,得到的精度统计结果如表 4 所示。

可以发现,在轨几何定标前后,单景影像的内部几何精度均由定标前的 2 个方向 1.5 pixel 提高到了 0.8 pixel 左右,且本方法定标结果的精度与基于严格几何成像模型的定标结果一致,说明提出的定标方法是有效、合理的。此外,可以发现精度验证景与定标景影像初始的内部几何精度与定标后的内部几何精度均

表 4 定标前后影像内部几何精度验证

Table 4 Internal geometric accuracy of images before and after geometric calibration

unit: pixel

Accuracy verification image	Before calibration				Calibration based on physical imaging model				Calibration based on RPC imaging model			
	Mean		RMS		Mean		RMS		Mean		RMS	
	samp	line	samp	line	samp	line	samp	line	samp	line	samp	line
PMS 2	0	0	1.52	1.80	0	0	0.67	0.64	0	0	0.67	0.64
PMS 3	0	0	1.43	1.83	0	0	0.73	0.70	0	0	0.73	0.70
PMS 4	0	0	1.62	1.75	0	0	0.81	0.82	0	0	0.81	0.82

存在一定的差异,其原因是由于GF4卫星特殊的成像环境和几何特性造成的,GF4卫星在轨道高度达36000 km的地球静止轨道运行,所处的空间环境恶劣,星上相关器件的测量精度所受热变形等外界影响因素复杂,影像几何精度的稳定性较差^[3,21],但从影像内部几何精度可知,本方法对改善PMS影像成像模型中系统几何误差是有效的。

综合分析以上实验结论可知,提出的基于RPC模型的在轨几何定标方法可有效补偿成像模型中的系统几何误差,得到与传统基于严格几何成像模型几乎一致的定标结果,而且得到的定标结果可直接用于构建精确的严格几何成像模型。

5 结 论

针对GF4卫星PMS面阵载荷提出了一种简单实用的在轨几何定标方法,该方法无需基于姿轨时辅助数据建立严格几何成像模型,只需利用当前的定标参数和基于该参数拟合的RPC即可得到适用于地面处理系统严格几何成像模型的定标结果。与传统方法相比,本方法无需进行复杂的辅助数据处理和成像模型中各种坐标系统的转换,处理过程异常简单,极其适用于需要高频在轨定标的GF4卫星。通过一组实验验证了本方法的有效性,并与传统基于严格几何成像模型的方法进行了比较,实验结果表明,本方法可以得到与传统定标方法几乎一致的定标结果,可有效补偿面阵卫星影像成像模型中的系统几何误差。

然而,由于实验数据与实验条件的限制,只针对单景影像的静态几何定标提出了相应的检校方法,并进行了验证,在模型中无法解决GF4卫星影像显著的时变几何定位误差,后续将在本研究的基础上,重点针对GF4卫星影像几何定位精度的时变规律进行分析,希望构建可描述时变误差的数学模型,改善国产静止轨道光学遥感卫星影像的几何精度。

参 考 文 献

[1] 刘心燕,孙林,杨以坤,等.高分四号卫星数据云和云阴影检测算法[J].光学学报,2019,39(1):0128001.
Liu X Y, Sun L, Yang Y K, et al. Cloud and cloud shadow detection algorithm for Gaofen-4 satellite data[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0128001.

[2] 皮英冬,杨博,李欣.基于有理多项式模型的GF4卫星区域影

像平差处理方法及精度验证[J].测绘学报,2016,45(12):1448-1454,1494.

Pi Y D, Yang B, Li X. Block-adjustment and accuracy validation for GF₄ patch-images based on RFM[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(12): 1448-1454, 1494.

[3] 王密,程宇峰,常学立,等.高分四号静止轨道卫星高精度在轨几何定标[J].测绘学报,2017,46(1):53-61.
Wang M, Cheng Y F, Chang X L, et al. High accuracy on-orbit geometric calibration of geostationary satellite GF₄[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(1): 53-61.

[4] 武红宇,白杨,王灵丽,等.吉林一号宽幅01星宽幅相机在轨几何定标及精度验证[J].光学精密工程,2021,29(8):1769-1781.
Wu H Y, Bai Y, Wang L L, et al. On-orbit geometric calibration and accuracy verification of Jilin1-KF01A WF camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(8): 1769-1781.

[5] 杨博,王密.资源一号02C卫星全色相机在轨几何定标方法[J].遥感学报,2013,17(5):1175-1190.
Yang B, Wang M. On-orbit geometric calibration method of ZY-1 02C panchromatic camera[J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(5): 1175-1190.

[6] 孟伟灿,朱述龙,曹闻,等.线阵推扫式相机高精度在轨几何标定[J].武汉大学学报·信息科学版,2015,40(10):1392-1399,1413.
Meng W C, Zhu S L, Cao W, et al. High accuracy on-orbit geometric calibration of linear push-broom cameras[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(10): 1392-1399, 1413.

[7] Grodecki J, Dial G. IKONOS geometric accuracy validation [EB/OL]. [2022-09-08]. <https://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/part1/paper/00043.pdf>.

[8] Dial G, Grodecki J. IKONOS stereo accuracy without ground control[EB/OL]. [2022-09-08]. <https://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/part1/paper/00042.pdf>.

[9] Chen Y F, Xie Z, Qiu Z G, et al. Calibration and validation of ZY-3 optical sensors[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(8): 4616-4626.

[10] Zhang G, Yong-hua J, Li D, et al. In-orbit geometric calibration and validation of ZY-3 linear array sensors[J]. The Photogrammetric Record, 2014, 29(145): 68-88.

[11] Wang M, Yang B, Hu F, et al. On-orbit geometric calibration model and its applications for high-resolution optical satellite imagery[J]. Remote Sensing, 2014, 6(5): 4391-4408.

[12] Wang M, Cheng Y, Chang X, et al. On-orbit geometric calibration and geometric quality assessment for the high-resolution geostationary optical satellite GaoFen4[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 125: 63-77.

[13] Pi Y D, Li X, Yang B. Global iterative geometric calibration of a linear optical satellite based on sparse GCPs[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(1): 436-446.

[14] Yang B, Pi Y D, Li X, et al. Integrated geometric self-

- calibration of stereo cameras onboard the ZiYuan-3 satellite[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 162: 173-183.
- [15] 皮英冬, 谢宝蓉, 杨博, 等. 利用稀少控制点的线阵推扫式光学卫星在轨几何定标方法[J]. 测绘学报, 2019, 48(2): 216-225. Pi Y D, Xie B R, Yang B, et al. On-orbit geometric calibration of linear push-broom optical satellite only using sparse GCPs[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(2): 216-225.
- [16] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1997. Zhang Z X, Zhang J Q. Digital photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 1997.
- [17] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 3版. 武汉: 武汉大学出版社, 2014. Survey adjustment discipline group, School of Surveying and mapping, Wuhan University. Error theory and foundation of surveying adjustment[M]. 3rd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2014.
- [18] 袁小棋, 李国元, 高小明, 等. AW3D 30 m DSM 数据质量分析及部分典型区域精度验证[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(4): 98-101, 105. Yuan X Q, Li G Y, Gao X M, et al. Evaluation of AW3D 30 m DSM data elevation quality and precision validation of typical region[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, 41(4): 98-101, 105.
- [19] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [20] Tao C, Hu Y. A Comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67(12): 1347-1357.
- [21] 韩杰, 陶醉, 李慧娜, 等. GF-4 卫星影像几何定位精度分析[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(3): 104-110. Han J, Tao Z, Li H N, et al. Geo-positioning accuracy analysis of GF-4 satellite imagery[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2019, 31(3): 104-110.

On-Orbit Geometric Calibration of Panchromatic Planar Array Sensor on GF4 Satellite Based on the Rational Polynomial Coefficient Model

Pi Yingdong^{1,2}, Wang Mi¹, Wang Siheng^{3*}, Zhao Huijie³, Zhao Liang³

¹State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;

²School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, Hubei, China;

³China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

Abstract

Objective Gaofen4 (GF4) is China's first high-resolution geostationary optical satellite equipped with planar array, which is employed for remote sensing monitoring of China and its surrounding areas. The panchromatic planar array sensor on this satellite collects images with a complementary metal oxide semiconductor (CMOS) of 10240×10240 detectors. It can perform time-sharing imaging on five spectral bands through rotating filters and simultaneously obtain panchromatic and multi-spectral images with a spatial resolution of 50 m. Essential in data processing of GF4, on-orbit geometric calibration should be performed to correct the systematic geometric errors in its imaging models and ensure the geometric quality of its images. At present, on-orbit geometric calibration is also usually performed based on such an imaging model to fit the rigorous geometric imaging model adopted in the processing system of remote sensing satellites. However, although the on-orbit geometric calibration is only a simple resection in photogrammetry, the satellite is a complex imaging and measuring system integrating attitude, orbit, and time observations. The building of its rigorous imaging model involves complex processing for auxiliary data such as attitude, orbit and time and ephemeris data, as well as transformations among multiple coordinate systems. Additionally, each calibration task requires separate production of these auxiliary data in the daily operational data processing system. Therefore, the geometric calibration based on the rigorous imaging model is not only complicated in modeling but also time-consuming and laborious. Thus, this paper proposes an on-orbit geometric calibration based on the unified rational polynomial coefficient (RPC) model for the panchromatic planar array sensor on the GF4 satellite.

Methods This paper proposes a simple on-orbit geometric calibration method based on a priori RPC model, in which the calibration is performed on the current calibration parameters and the RPC generates based on these calibration parameters. The essence is to employ the geo-positioning residual determined by the current RPC to correct the current calibration parameters. Firstly, it is still necessary to match a certain number of evenly distributed ground control points (GCPs) from the high-precision digital ortho map (DOM) and digital surface model (DSM) in the image coverage area. Secondly, the virtual image points corresponding to the GCPs are obtained by back projection of the RPC. Thirdly, based on the current calibration parameters, the on-orbit geometric calibration model is built with the virtual and real image points of GCPs.

Finally, the adjustment model of the calibration parameters is built, and the least square optimization is adopted to solve the calibration parameters together to compensate for the systematic geometric errors in the planar array sensor. The sensor calibration accuracy is verified based on correcting low order errors. This method only utilizes L1B image data with an RPC instead of needing attitude, orbit, and time auxiliary data and building a complex rigorous imaging model. It has the advantages of simple and convenient processing and can obtain almost the same accuracy as traditional calibration methods.

Results and Discussions The viewing angle of the detectors determined by this method is almost the same as that from the calibration based on the rigorous imaging model, and the maximum difference between them is only 0.01 pixels (Table 2). For the calibration image, the initial imaging model of the image has a large geo-positioning error before calibration, and there is an obvious radioactive geometric error gradually increasing from the image center to the edge. The mean square errors of comprehensive geometric residuals in the row and column directions are 1.54 and 1.85 (Table 3), but up to 3-4 pixels at the image edge (Fig. 5), which seriously affects the performance in subsequent image registration and fusion. After the proposed calibration, the absolute geo-positioning accuracy and internal geometric accuracy of the image have been significantly improved. The absolute and relative residuals of the checkpoints tend to be the same, and the direction has good randomness (Fig. 5). For the verification image, the proposed calibration has improved the internal geometric accuracy of the single image from about 1.5 pixels to about 0.8 pixels in both directions. The calibration accuracy of this method is consistent with that of calibration based on the rigorous imaging model (Table 4), which directly shows that the proposed calibration method is effective and reasonable.

Conclusions This paper proposes a simple and practical on-orbit geometric calibration method for the panchromatic planar array sensor on the GF4 satellite. Different from traditional methods, this method does not need to build a complex rigorous imaging model based on multiple auxiliary data. The current calibration parameters and the corresponding generated RPC are enough to estimate the accurate calibration parameters, and such parameters can be directly adopted in the ground processing system. Compared with traditional methods, this method does not need complex auxiliary data processing and transformations among various coordinate systems, and its approach and modeling are both simple. Therefore, it is extremely suitable for satellites such as GF4 that need high-frequency on-orbit calibration. The effectiveness of this method is verified through a group of experiments and compared with traditional methods based on a rigorous imaging model. Experimental results show that this method can obtain calibration results that are almost consistent with traditional methods, and can effectively compensate the systematic geometric errors in the imaging model of a planar array satellite sensor.

Key words geometric optics; planar array sensor; on-orbit geometric calibration; rational polynomial coefficient model; systematic geometric error