

一种高分辨率光学卫星影像时变系统 误差建模补偿方法

范城城¹ 王 密^{1*} 赵薇薇⁴ 杨 博^{2,3} 金淑英¹ 潘 俊¹

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 武汉大学计算机学院, 湖北 武汉 430079

³ 武汉大学地球空间信息技术协同创新中心, 湖北 武汉 430079

⁴ 北京市遥感信息研究所, 北京 100192

摘要 针对当前影像几何定位时变系统误差难以补偿的问题, 提出一种基于傅里叶级数模型的时变系统误差地面补偿方法, 并采用几何定标场的数字正射影像图/数字高程模型数据进行精度验证。分析了 2014 年 12 月发射的遥感二十六号卫星的数据, 结果表明, 设计的时变系统误差地面补偿模型可以有效提高影像在无控点条件下的几何定位精度, 且补偿后的影像几何定位精度可以提高约 40%。

关键词 遥感; 高分辨率卫星; 时变系统误差补偿; 傅里叶模型; 几何定标场; 对地相机

中图分类号 P236 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.1228001

A Compensation Modeling Method for Time-Varying Systematic Error of High-Resolution Optical Satellite Image

Fan Chengcheng¹ Wang Mi¹ Zhao Weiwei⁴ Yang Bo^{2,3} Jin Shuying¹ Pan Jun¹

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

² Computer School, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

³ Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

⁴ Institute of Beijing Remote Sensing Information, Beijing 100192, China

Abstract According to current problem that the time-varying systematic error of image geometric positioning is difficult to be compensated, an algorithm based on Fourier series model is proposed to achieve the on ground compensation of time-varying systematic error. The digital orthophoto map/digital elevation model reference data of geometric calibration field is used for accuracy verification. The data of Yaogan-26 satellite launched in December 2014 is analyzed, the results show that, this designed on ground compensation model of time-varying systematic error can effectively improve the image geometric accuracy under no ground control points, and the image geometric positioning accuracy after compensation can be increased about 40%.

Key words remote sensing; high resolution satellite; time-varying systematic error compensation; Fourier model; geometric calibration field; earth observation camera

OCIS codes 280.4788; 200.4560; 200.3050

收稿日期: 2016-05-16; 收到修改稿日期: 2016-07-24

基金项目: 国家 973 计划 (2014CB744201, 2012CB719902, 2012CB719901)、国家自然科学基金 (41371430, 91438112, 91438203, 91438111, 40901209)

作者简介: 范城城 (1986—), 男, 博士研究生, 主要从事高分辨率光学影像几何处理方面的研究。

E-mail: ccfan@whu.edu.cn

导师简介: 王 密 (1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感卫星数据处理与应用方面的研究。

E-mail: Wangmi@whu.edu.cn (通信联系人)

1 引 言

高分辨率光学卫星影像无控制点条件下的几何定位精度主要取决于由全球定位系统(GPS)确定的轨道精度、各个载荷间时间同步精度、载荷间相对安装参数精度、对地观测相机内定标精度和基于星敏感器与陀螺组合定姿精度等因素。其中,由于星敏感器低频误差、空间热环境导致的安装结构变化以及不同星敏感器工作模式切换所导致的姿态基准变化是当前光学遥感影像高精度几何处理精度的限制瓶颈^[1-2]。

星敏感器作为一种高精度姿态敏感器,其测量精度对光学影像几何处理精度影响很大。例如一般光学遥感卫星的轨道高度为450~650 km,1"姿态误差引起的几何定位误差可以达到3~5 m。受冷热交变的空间热环境以及视场变化等因素影响,在轨卫星上的星敏感器会产生依轨道周期变化的周期性误差,即星敏感器低频误差,它是星敏感器测量误差的重要组成部分,并且很难通过一般的滤波方法消除,是产生影像时变系统误差的重要因素之一。同时,太阳照射角度的周期性变化,导致卫星整体结构受热不均匀,载荷间的相对安装参数也会产生周期性变化,同样会产生影像时变系统误差^[3]。高分辨率光学卫星一般配置三台星敏感器,由于卫星侦照不同地区影像时,存在不同姿态机动侧摆或者俯仰,经常出现只有单个或者两个星敏感器同时工作的情况,进一步导致卫星的姿态基准发生变化,严重影响高分辨率光学卫星影像的几何处理精度。针对卫星影像几何处理存在的时变系统误差,国内外学者已经开展了相关的研究工作。文献[4-8]主要对影响光学影像几何处理精度的误差源进行分析,研究不同误差类型对几何处理精度的影响程度以及解决方法,提出基于几何定标场对载荷安装误差以及相机内部畸变进行在轨标定。文献[9-16]针对星敏感器在轨应用过程中存在的各种误差源进行了分析,并提出将星敏感器低频误差参数扩充为状态,将卫星姿态运动学模型和低频误差数学模型相结合,设计扩维卡尔曼滤波对卫星姿态、陀螺漂移和星敏感器低频误差参数进行估计。综上所述,以上研究工作主要基于星敏感器自身观测信息进行低频误差标定,由于缺少绝对姿态参考,很难有效地对低频误差进行消除。同时,针对载荷间安装参数变化和不同星敏感器切换导致的基准变化对影像几何精度的影响与解决方法在现有文献中尚未见到。

本文提出了一种基于傅里叶级数模型对影像几何处理存在的时变系统误差进行地面建模与补偿的方法,并以2015年7月发射的遥感卫星二十六号真实在轨数据为例,利用高精度几何定标场数据对提出的算法进行了验证与评价。

2 基于傅里叶级数模型的时变系统误差补偿方法

为有效消除或削弱时空低频误差对无控制点条件下影像几何定位精度影响,提出一种基于光学遥感卫星影像时变系统误差地面建模补偿方法,具体处理流程包括:1)基于星敏感器间光轴夹角变化对时变系统误差进行分析与检测;2)基于多星敏感器间相对标定实现内部基准高精度统一;3)基于几何定标场实现对

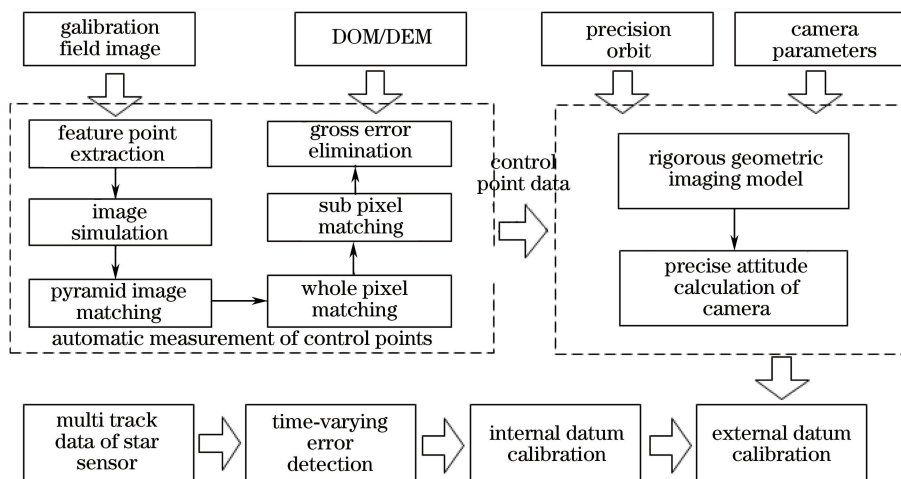


图1 光学遥感卫星影像时变系统误差地面建模补偿流程图

Fig. 1 Flow chart of modeling the time-varying systematic error compensation of optical remote sensing satellite image

地相机精密姿态反演;4) 外部基准绝对标定。图 1 为光学遥感卫星影像时变系统误差地面建模补偿流程。

2.1 多星传感器内部相对基准标定

高分辨率光学卫星一般配置三台星传感器,基于双星传感器光轴矢量可以确定卫星绝对姿态信息。将三台星传感器分别标识为 A、B、C,两两星传感器组合定姿可得到三个不同基准的绝对姿态。受到卫星整体结构热变形和星传感器低频误差影响,三个不同基准之间的转换参数不是恒定值,而是一个时变系统误差,需要建模标定。基于整圈的三个星传感器原始观测数据,进行两两组合定姿得到整圈的三个不同基准的卫星虚拟本体到 J2000 坐标系的绝对姿态四元数。三个基准坐标系分别定义为 AB、AC、BC 虚拟本体坐标系。以 AB 与 BC 两种组合模式为例,将 AB 组合模式下得到的绝对姿态与 BC 组合模式进行时标对齐,进一步解算 AB 与 BC 两种基准之间的转换参数。假设某时刻 t_k 的 AB 与 BC 组合模式的绝对姿态四元数为 $\mathbf{q}_t^{AB} = [q_{0AB} \ q_{1AB} \ q_{2AB} \ q_{3AB}]^T$, $\mathbf{q}_t^{BC} = [q_{0BC} \ q_{1BC} \ q_{2BC} \ q_{3BC}]^T$, 得到时刻 t_k 的本体到 J2000 坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R}_{AB}^I 、 \mathbf{R}_{BC}^I 表达式如下:

$$\mathbf{R}_{AB}^I = \begin{bmatrix} q_{1AB}^2 - q_{2AB}^2 - q_{3AB}^2 + q_{0AB}^2 & 2(q_{1AB}q_{2AB} - q_{3AB}q_{0AB}) & 2(q_{1AB}q_{3AB} + q_{2AB}q_{0AB}) \\ 2(q_{1AB}q_{2AB} + q_{3AB}q_{0AB}) & -q_{1AB}^2 + q_{2AB}^2 - q_{3AB}^2 + q_{0AB}^2 & 2(q_{2AB}q_{3AB} - q_{1AB}q_{0AB}) \\ 2(q_{1AB}q_{3AB} - q_{2AB}q_{0AB}) & 2(q_{2AB}q_{3AB} + q_{1AB}q_{0AB}) & -q_{1AB}^2 - q_{2AB}^2 + q_{3AB}^2 + q_{0AB}^2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_{BC}^I = \begin{bmatrix} q_{1BC}^2 - q_{2BC}^2 - q_{3BC}^2 + q_{0BC}^2 & 2(q_{1BC}q_{2BC} - q_{3BC}q_{0BC}) & 2(q_{1BC}q_{3BC} + q_{2BC}q_{0BC}) \\ 2(q_{1BC}q_{2BC} + q_{3BC}q_{0BC}) & -q_{1BC}^2 + q_{2BC}^2 - q_{3BC}^2 + q_{0BC}^2 & 2(q_{2BC}q_{3BC} - q_{1BC}q_{0BC}) \\ 2(q_{1BC}q_{3BC} - q_{2BC}q_{0BC}) & 2(q_{2BC}q_{3BC} + q_{1BC}q_{0BC}) & -q_{1BC}^2 - q_{2BC}^2 + q_{3BC}^2 + q_{0BC}^2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

进一步得到 AB 基准到 BC 基准的转换矩阵 $\mathbf{R}_{AB}^{BC} = (\mathbf{R}_{BC}^I)^T \mathbf{R}_{AB}^I$ 以及欧拉角转换参数 $\Delta_{AB}^{BC} = [\Delta_{\psi,k} \ \Delta_{\varphi,k} \ \Delta_{\theta,k}]^T$, 按此对整圈数据进行处理,可以得到时变系统误差变化序列。

考虑到时变系统误差可视为周期信号,其信号周期近似等于轨道周期,采用傅里叶级数模型对该时变系统误差进行建模,可以实现 AB 基准与 BC 基准的高精度统一。 Δ_{AB}^{BC} 的三个分量可以采用傅里叶函数形式进行建模,得到时变系统误差补偿模型为^[17-19]

$$\begin{cases} \Delta_{\psi,k} = \sum_{j=1}^M [a_{\psi j} \cos(j\omega_0 k\tau) + b_{\psi j} \sin(j\omega_0 k\tau)] \\ \Delta_{\varphi,k} = \sum_{j=1}^M [a_{\varphi j} \cos(j\omega_0 k\tau) + b_{\varphi j} \sin(j\omega_0 k\tau)], \\ \Delta_{\theta,k} = \sum_{j=1}^M [a_{\theta j} \cos(j\omega_0 k\tau) + b_{\theta j} \sin(j\omega_0 k\tau)] \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, 表示角频率, T 表示卫星轨道周期, k 表示时间步长个数, τ 表示时间步长, M 为正常数, $a_{\psi j}$, $b_{\psi j}$, $a_{\varphi j}$, $b_{\varphi j}$, $a_{\theta j}$, $b_{\theta j}$ 表示未知的时变系统误差系数。基于整圈的时变系统误差观测数据以及(3)式所示时变系统误差补偿模型,构建观测方程:

$$\begin{cases} \mathbf{Z} = \Phi \mathbf{X} + \mathbf{V} \\ \Phi = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^M [\cos(j\omega_0 k\tau)] & \sum_{j=1}^M [\cos(j\omega_0 k\tau)] & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sum_{j=1}^M [\cos(j\omega_0 k\tau)] & \sum_{j=1}^M [\cos(j\omega_0 k\tau)] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sum_{j=1}^M [\cos(j\omega_0 k\tau)] & \sum_{j=1}^M [\cos(j\omega_0 k\tau)] \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (4)$$

式中 \mathbf{Z} 表示时变系统误差观测值序列, Φ 表示傅里叶级数模型观测矩阵, \mathbf{X} 表示傅里叶级数模型的时变系统误差系数 $\{a_{\psi j}, b_{\psi j}, a_{\varphi j}, b_{\varphi j}, a_{\theta j}, b_{\theta j}\}$, \mathbf{V} 表示模型残差,根据最小二乘原理得到时变系统误差模型系数的最优估计值:

$$\hat{\mathbf{X}} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \mathbf{Z}. \quad (5)$$

基于以上步骤可以实现时变系统误差模型构建,实现 AB 与 BC 两个姿态基准的高精度统一。同理可以对 AC 基准进行统一,最终实现整体内部姿态基准的统一,消除星敏感器低频误差、整星结构变形以及星敏感器工作模式切换导致的时变系统误差影响。

2.2 星敏感器与对地相机间外部绝对基准标定

受整星结构周期性变化影响,星敏感器与对地相机之间的安装关系也会产生周期性变化,需要进行外部绝对基准的在轨标定。基于已有的全球几何定标场数字正射影像图(DOM)/数字高程模型(DEM)基础参考数据以及侦照的全色影像,采用控制点自动测量方法与严密几何成像模型反演卫星本体相对与 J2000 坐标系的姿态参数。具体处理方法如下:

1) 采用基于探元指向角模型的严密几何成像模型,具体形式为^[20-22]

$$\begin{cases} \tan[\psi_x(s)] \\ \tan[\psi_y(s)] \\ 1 \end{cases} = \lambda R_{body}^{cam} \left\{ R_{J2000}^{body} R_{wgs}^{J2000} \begin{bmatrix} X_g - X_{gps} \\ Y_g - Y_{gps} \\ Z_g - Z_{gps} \end{bmatrix}_{wgs} - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}_{body} \right\}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} \psi_x(s) = ax_0 + ax_1 \times s + ax_2 \times s^2 + ax_3 \times s^3 \\ \psi_y(s) = ay_0 + ay_1 \times s + ay_2 \times s^2 + ay_3 \times s^3 \end{cases}$$

式中 (X_g, Y_g, Z_g) 表示地物点的物方坐标, $[\psi_x(s), \psi_y(s)]$ 表示探元号 s 的指向角大小, $(X_{gps}, Y_{gps}, Z_{gps})$ 与 (B_x, B_y, B_z) 分别表示对地相机摄影中心的物方坐标与 GPS 偏心误差, λ 表示比例系数; $R_{wgs}^{J2000}, R_{J2000}^{body}, R_{body}^{cam}$ 分别表示由 WGS84 坐标系到 J2000 坐标系旋转矩阵、由 J2000 坐标系到卫星本体坐标系旋转矩阵以及由卫星本体坐标系到相机测量坐标系的旋转矩阵。

2) 对(6)式进一步推导得到:

$$\lambda^{-1} (R_{body}^{cam})^{-1} \begin{cases} \tan[\psi_x(s)] \\ \tan[\psi_y(s)] \\ 1 \end{cases} = R_{J2000}^{body} R_{wgs}^{J2000} \begin{bmatrix} X_g - X_{gps} \\ Y_g - Y_{gps} \\ Z_g - Z_{gps} \end{bmatrix}_{wgs} - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}_{body}. \quad (7)$$

3) 采用的轨道数据为事后精密定轨数据,精度为厘米级。相机内定标参数采用事后地面定标得到的探元指向角模型参数。由(7)式可知,对于线阵推扫相机,当每个扫描行匹配得到的非共线控制点观测矢量个数大于等于 2 时,即可解算出该扫描行在某时刻的姿态参数。

为保证解算的姿态参数精度可靠性,理论上要求匹配的控制点数量较多,且在每个扫描行上均匀分布。基于上述算法反演的姿态精度主要依赖于 GPS 轨道精度、定标场 DEM/DOM 参考数据精度以及每个扫描行控制点数量与分布情况。

将上述方法反演得到的姿态数据与 2.1 小节得到的基准统一姿态数据进行时刻对齐,采用与 2.1 小节相同方法解算出时变系统误差变化序列,并构建傅里叶级数补偿模型得到时变系统误差模型的补偿参数,最终实现星敏感器与对地相机间外部绝对基准在轨标定,消除整星结构周期性变化所产生的时变系统误差。

3 实验与分析

以 2014 年 12 月发射的遥感二十六号卫星为例,对基于傅里叶级数模型的时变系统误差地面补偿方法进行分析与验证。该卫星采用太阳同步轨道,轨道高度为 490 km,为扩大对地观测相机可视范围,卫星具有侧摆机动能力,最大侧摆角为 $\pm 45^\circ$ 。相机分系统由全色相机和多光谱相机组成,其中全色相机的星下点地面像元分辨率为 0.5 m,多光谱相机为 2.0 m。实验所采用的数据为该卫星在轨测试期间下传的数据。

1) 基于星敏感器观测数据的时变系统误差检测与分析

高分辨率卫星在推扫成像过程中,受空间热环境等因素影响,星敏感器自身会存在热漂移误差,且不同星敏感器之间的安装关系也会发生周期性变化,因此可以基于不同星敏感器之间的光轴夹角变化对时变系统误差进行分析检测。图 2~4 分别表示 A 与 B 星敏感器、A 与 C 星敏感器以及 B 与 C 星敏感器的光轴夹角误差随时间的变化规律,其中,Epoch 表示观测历元个数。通过分析可以得到,每个星敏感器之间的光轴夹角误差随着轨道周期呈周期性变化,其中 A 与 B 星敏感器光轴夹角误差变化范围为 $\pm 20''$,A 与 C 为 $\pm 50''$,B 与 C 为 $\pm 50''$ 。

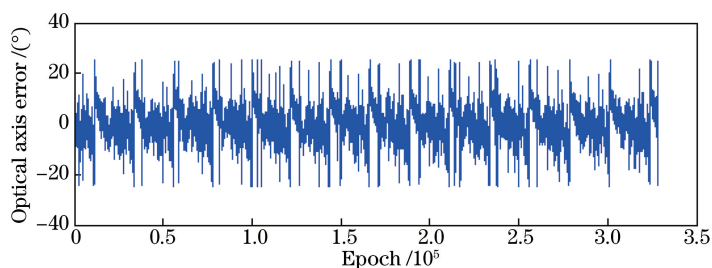


图 2 多轨道圈 A 与 B 星传感器光轴夹角误差随时间变化统计图

Fig. 2 Statistics chart of multi-turn track's A and B star sensor optical axis angle error versus time

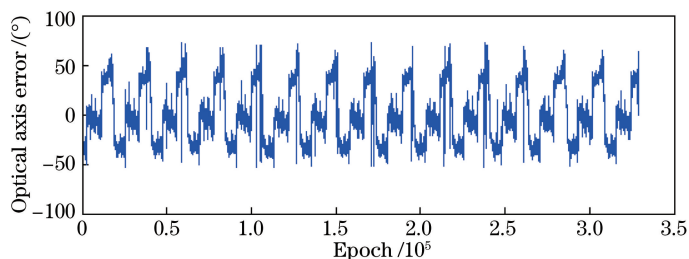


图 3 多轨道圈 A 与 C 星传感器光轴夹角误差随时间变化统计图

Fig. 3 Statistics chart of multi-turn track's A and C star sensor optical axis angle error versus time

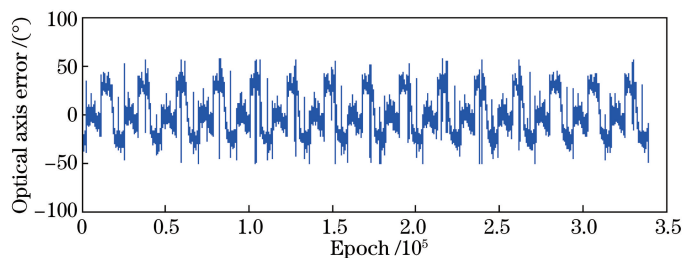


图 4 多轨道圈 B 与 C 星传感器光轴夹角误差随时间变化统计图

Fig. 4 Statistics chart of multi-turn track's B and C star sensor optical axis angle error versus time

两个星传感器的光轴矢量叉乘即可以确定一个虚拟坐标系相对于 J2000 坐标系的姿态参数,因此当星传感器间光轴夹角发生变化时必然导致虚拟基准发生变化,从而对光学卫星影像几何精度产生影响。由图 2~4 的分析结果可知,空间热环境确实对整星结构产生一定程度的变形,同时任意两个星传感器确定的虚拟基准一直在发生周期性变化,需要进行在轨标定建模,实现内部基准高精度统一。

2) 内部相对基准标定结果分析

为有效消除时变系统误差对光学遥感卫星影像几何精度的影响,首先对星传感器确定的姿态基准进行高精度统一,然后实现绝对姿态基准的统一。图 5(a)~(c)分别表示 A 与 B 星传感器组合定姿确定的虚拟基准与 BC 基准之间的转化参数在偏航、滚动以及俯仰三个方向随时间的变化规律。由分析得到,偏航、滚动以及俯仰三个方向随轨道周期呈现周期性变化,同时偏航角的变化范围为 $-10'' \sim 5''$,滚动角的变化范围为 $-5'' \sim 15''$,俯仰角的变化范围为 $-5'' \sim 10''$ 。

高分辨率光学卫星在实施影像侦照时,需要提前做姿态机动,该过程中星传感器遇到太阳时会自动关闭,因此经常会出现只有两个星传感器或者单个星传感器工作的情况。星传感器工作模式的切换必然导致内部虚拟基准的变化,同时图 5(a)~(c)的统计结果也说明,不同星传感器确定的虚拟基准之间确实存在差异,需要进行内部基准的统一。进一步采用傅里叶级数模型对 AB 与 BC 两个虚拟基准之间的转换参数进行拟合,由图 5(a)~(c)分析可知,傅里叶模型的拟合结果与观测结果基本吻合,对其他模式下出现的各种虚拟基准之间转换参数也可采用同样的原理进行模型化。

3) 外部绝对基准标定结果分析

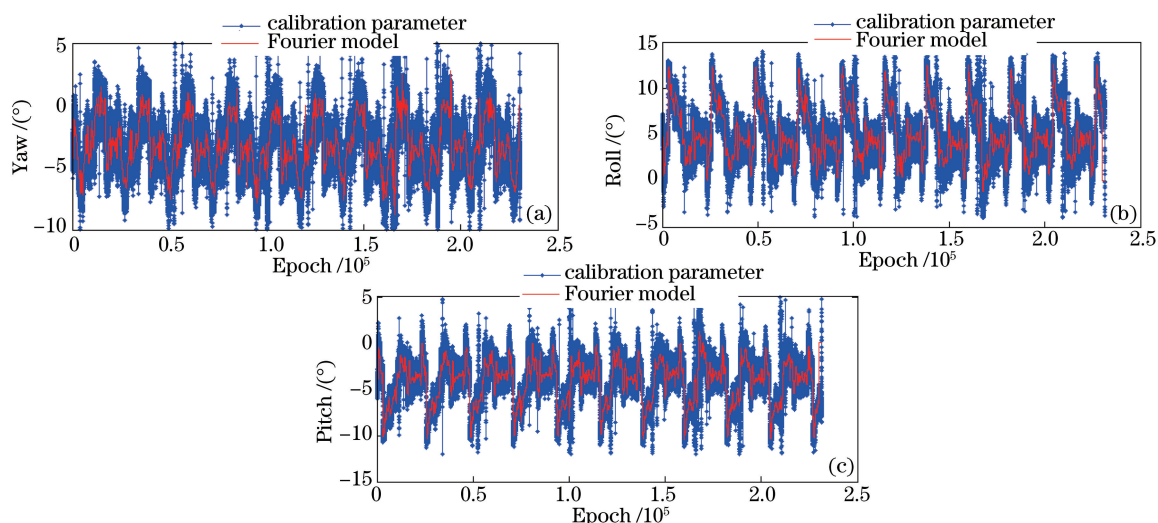


图 5 AB 基准与 BC 基准之间转换参数的在轨标定与傅里叶建模结果对比图。(a) 偏航;(b) 滚动;(c) 俯仰
Fig. 5 Comparison chart of orbit calibration and Fourier modeling results of transformation parameters between AB and BC datum. (a) Yaw; (b) roll; (c) pitch

空间热环境同样也对星敏感器与对地观测相机的转换关系产生影响。基于该卫星在轨测试阶段大量侦察的定标场影像以及定标场 DOM/DEM 数据,根据 2.2 节的方法反演得到了多轨对地相机确定的虚拟坐标系在 J2000 坐标系下的姿态数据。同时,基于 2.1 节的方法可以得到内部姿态基准统一的姿态参数,根据两套姿态基准下的姿态参数即可解算转换参数变化序列。图 6(a)~(c)对内部基准与对地相机基准之间转换参数变化规律进行了分析统计。研究表明,两个基准之间的转换参数随着轨道周期同样存在周期性变化,且偏航方向的变化范围为 $0'' \sim 15''$,滚动方向的变化范围为 $-20'' \sim 10''$,俯仰方向的变化范围为 $10'' \sim 40''$ 。

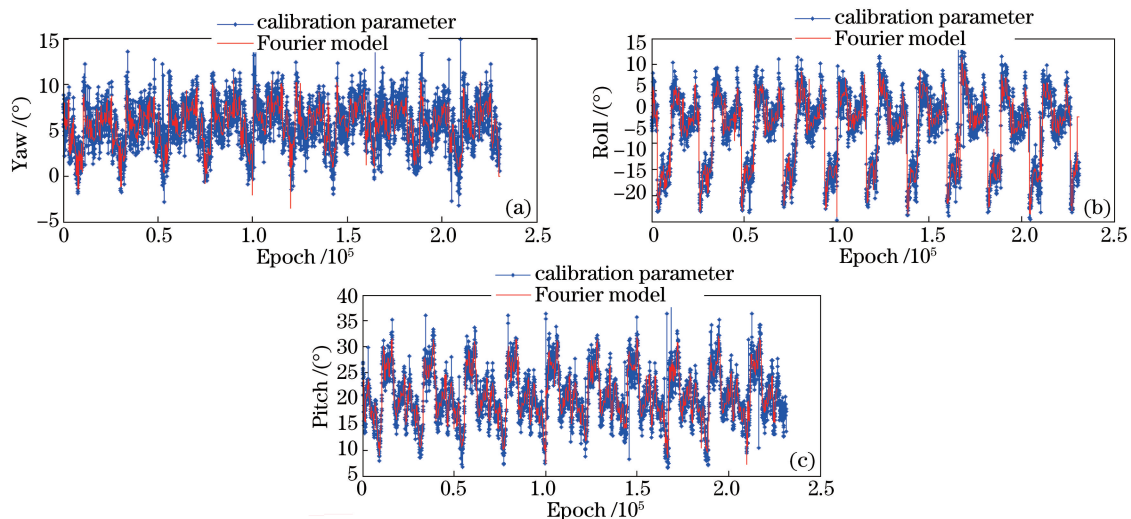


图 6 内部基准与对地相机基准之间转换参数的在轨标定与傅里叶建模结果对比图。(a) 偏航;(b) 滚动;(c) 俯仰
Fig. 6 Comparison chart of orbit calibration and Fourier modeling results of transformation parameters between internal and earth observation camera datum. (a) Yaw; (b) roll; (c) pitch

为有效消除内部基准与对地相机基准之间转换参数周期性变化对影像几何精度产生的影响,同样基于傅里叶级数模型对时序变化转换参数进行拟合,拟合结果与观测结果基本一致。表 1 与表 2 分别统计了时变系统误差补偿前后全色影像几何精度变化情况。统计结果表明,时变系统误差补偿前,全色影像无控制点条件下的几何定位精度约为 70 m,补偿后的定位精度约为 40 m,整体结果提高了约 40%,证明所提出的时变系统误差地面补偿方法可以有效改善高分辨率光学影像的几何定位精度。目前根据多个轨道圈的观测数据,仅对轨道周期范围的时变系统误差进行了分析建模,但不同季节因素引起的大周期时变系统误差需要根

据多年的观测数据进行分析建模,进一步在该模型上进行优化。目前受到数据源等各方面条件的限制,只能对轨道周期范围内的时变系统误差进行分析建模。另外,遥感二十六号光学卫星影像时变系统误差中存在模型化与非模型化误差,通过傅里叶模型仅对其中的模型化误差进行建模与补偿,尚存在约 60% 的非模型化误差,后续的工作将进一步对非模型化误差进行分析。

表 1 未加入时变系统误差补偿模型的全色影像的几何精度统计

Table 1 Statistics geometric accuracy of panchromatic image without time-varying systematic error compensation model

Time	Side swing /($^{\circ}$)	Place	Positioning accuracy /m	Mean offset /m		RMS of offset /m	
				dx	dy	m dx	m dy
2015-05-30T11:24	3.929	Songshan	86.196	84.557	11.167	85.428	11.476
2015-07-13T13:41	16.882	Anyang	3.746	0.756	0.868	2.565	2.729
2015-07-17T13:35	3.944	Taiyuan	138.892	-84.591	-106.691	86.319	108.812
2015-07-21T13:29	-9.810	Yili	73.528	-52.280	-49.580	53.362	50.585
2015-07-24T13:48	30.355	Dongying	15.190	-13.099	2.722	14.361	4.950
2015-08-13T13:39	10.530	Sanya	81.509	-55.203	-58.084	56.161	59.073
2015-08-17T13:38	8.341	Lijiang	41.880	-31.777	-25.431	32.671	26.202
2015-08-18T13:14	-38.493	Beijing	84.676	-48.798	66.629	50.034	68.313
2015-08-21T13:37	5.779	Lasha	47.052	-42.016	18.855	42.871	19.389
	RMS		74.649	53.139	50.320	54.131	51.403

表 2 加入时变系统误差补偿模型的全色影像的几何精度统计

Table 2 Statistics geometric accuracy of panchromatic image with time-varying systematic error compensation model

Time	Side swing /($^{\circ}$)	Place	Positioning accuracy /m	Mean offset /m		RMS of offset /m	
				dx	dy	m dx	m dy
2015-05-30T11:24	3.929	Songshan	58.311	57.475	-5.288	58.020	5.816
2015-07-13T13:41	16.882	Anyang	3.819	0.898	1.015	2.461	2.920
2015-07-17T13:35	3.944	Taiyuan	17.843	12.285	11.963	12.877	12.352
2015-07-21T13:29	-9.810	Yili	29.222	-0.925	28.500	1.869	29.162
2015-07-24T13:48	30.355	Dongying	24.833	9.036	21.611	9.770	22.831
2015-08-13T13:39	10.530	Sanya	34.051	-26.199	-20.625	26.768	21.046
2015-08-17T13:38	8.341	Lijiang	27.374	11.264	23.869	11.765	24.716
2015-08-18T13:14	-38.493	Beijing	77.244	-48.979	57.537	50.062	58.825
2015-08-21T13:37	5.779	Lasha	40.414	-3.254	39.077	4.631	40.148
	RMS		40.431	27.407	28.448	27.927	29.235

4 结 论

针对当前高分辨率遥感卫星影像存在时变系统误差且难以补偿的问题,提出了一种基于傅里叶级数模型的地面补偿方法,且利用 2014 年 12 月发射的遥感卫星二十六号真实在轨原始数据进行算法验证。研究表明,该卫星不同星敏感器组合确定的姿态基准之间存在时变系统误差,卫星内部基准与对地相机基准之间同样也存在时变系统误差。先标定内部基准后标定外部基准的地面补偿方法可以有效提高高分辨率光学影像几何定位精度。

参 考 文 献

- 1 Tang Xinming, Xie Junfeng. Summary of high-resolution remote sensing satellite mapping key technology research[C]. 2011 China Satellite Conference Proceedings. Beijing: China Institute of Communications, 2011: 182-191.
唐新明, 谢俊峰. 高分辨率遥感卫星测绘关键技术研究综述[C]. 2011 中国卫星应用大会会议文集. 北京: 中国通信学会, 2011: 182-191.
- 2 Li Deren, Zhang Guo, Jiang Yonghua, *et al.* Research on image geometric precision of domestic optical satellites[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(1): 1-9.
李德仁, 张 过, 蒋永华, 等. 国产光学卫星影像几何精度研究[J]. 航天器工程, 2016, 25(1): 1-9.

- 3 Jin Tao, Li Zhen, Li Ting, *et al.* System design and analysis for improving geometric accuracy of high-resolution optical remote sensing satellite image[J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(8): 1159-1165.
金涛, 李贞, 李婷, 等. 提高光学遥感卫星图像几何精度总体设计分析[J]. *宇航学报*, 2013, 34(8): 1159-1165.
- 4 Yuan Xiuxiao, Yu Xiang. Calibration of angular systematic errors for high resolution satellite imagery [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3): 385-392.
袁修孝, 余翔. 高分辨率卫星遥感影像姿态角系统误差检校[J]. *测绘学报*, 2012, 41(3): 385-392.
- 5 Bouillon A, Bernard M, Gigord P, *et al.* SPOT 5 HRS geometric performances: Using block adjustment as a key issue to improve quality of DEM generation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2006, 60(3): 134-146.
- 6 Digital Globe Proprietary. Woldview-2 overview [EB/OL] [2016-04-01]. <http://content.satimagingcorp.com.s3.amazonaws.com/static/satellite-sensor-specification/WorldView-2-PDF-Download.pdf>.
- 7 Boulder Co. Pleiades constellation capability overview[EB/OL]. [2016-04-01]. http://calval.cr.usgs.gov/JACIE_files/JACIE11/Presentations/WedPM/235_Stussi_JACIE_11.135.pdf.
- 8 Wang Dabao, Wang Zhongguo, Tang Haitao, *et al.* GPS based orbit determination algorithm with high precision and low computational complexity for LEO remote sensing satellites[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2014, (2): 54-61.
汪大宝, 王中果, 汤海涛, 等. 低轨遥感卫星星载 GPS 精密快速定轨算法[J]. *中国空间科学技术*, 2014, (2): 54-61.
- 9 Sun Ting, Xing Fei, You Zheng. Optical system error analysis of high accuracy star trackers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0323003.
孙婷, 邢飞, 尤政. 高精度星敏传感器光学系统误差分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0323003.
- 10 Lü Zhenduo, Lei Yongjun. Satellite attitude measurement and determination[M]. Beijing: The Press of National Defence Industry, 2013.
吕振铎, 雷拥军. 卫星姿态测量与确定[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- 11 Liu Haibo, Huang Shuihua, Tan Jichun, *et al.* Thermo-optic effects on accuracy performance of star tracker[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(7): 1835-1839.
刘海波, 黄水花, 谭吉春, 等. 热-光效应对星敏传感器测量准确度的影响[J]. *光子学报*, 2009, 38(7): 1835-1839.
- 12 Wang J Q, Xiong K, Zhou H Y. Low-frequency periodic error identification and compensation for star tracker attitude measurement[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2012, (25): 615-621.
- 13 Xiong Kai, Zong Hong, Tang Liang. On star sensor low frequency error in-orbit calibration method [J]. *Aerospace Control and Application*, 2014, 40(3): 8-13.
熊凯, 宗红, 汤亮. 星敏传感器低频误差在轨校准方法研究[J]. *空间控制技术与应用*, 2014, 40(3): 8-13.
- 14 Lam Q, Woodruff C, Ashton S, *et al.* Noise estimation for star tracker calibration and enhanced precision attitude determination[C]. *Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion*, 2002.
- 15 Morariu V I, Camps O I. Modeling correspondences for multi-camera tracking using nonlinear manifold learning and target dynamics[C]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2006: 545-552.
- 16 Sun Yahui. Error analysis and calibration in star sensor application[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
孙亚辉. 星敏传感器应用中的误差分析与校正[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- 17 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.
- 18 Yang Bo. Research on on-orbit geometric calibration theories and methods for optical linear pushbroom satellite imagery [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
杨博. 光学线阵推扫式卫星影像在轨几何定标理论与方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- 19 Grodecki J, Dial G. Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(1): 59-68.
- 20 Jacobsen, K. Geometry of satellite images-calibration and mathematical models[D]. Hannover: University of Hannover, 2007.
- 21 Toutin T. Review article: Geometric processing of remote sensing images: Models, algorithms and methods [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(10): 1893-1924.
- 22 Tao V, Hu Y. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001, 67(12): 1347-1357.