

线阵推扫光学卫星外方位元素自检校方法

蒋永华¹, 徐凯², 张过², 朱瑞飞^{3,4}

(1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079; 2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079;
3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 4. 长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130033)

摘要: 在深入分析线阵推扫光学卫星外方位元素误差对几何定位影响特性的基础上, 利用俯仰角、滚动角误差引起几何定位误差的方向特性, 提出了不依赖地面控制点的外方位元素自检校方法, 采用仿真数据验证了方法的正确性, 结果表明该方法能够补偿外方位元素误差, 有效提升无控几何定位精度。

关键词: 几何检校场; 外检校; 自检校; 几何定位精度
中图分类号: P237 **文献标志码:** A

A Method of Exterior Auto-Calibration for Linear CCD Array Pushbroom Optical Satellites

JIANG Yonghua¹, XU Kai², ZHANG Guo², ZHU Ruifei^{3,4}
(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 4. Chang Guang Satellite Technology Co. Ltd., Changchun 130033, China)

Abstract: An exterior auto-calibration method without relying on ground control points (GCPs) was proposed based on the analysis of the errors of exterior orientation elements affecting positioning accuracy. The character that the positioning error caused by pitch angle and roll angle is equal in value but opposite in sign is used as the foundation of the method. Moreover, the proposed method can be verified by the simulation data. Experimental results show that errors of exterior orientation elements can be compensated and geometric accuracy can be effectively improved without relying on GCPs.

Key words: permanent test fields; exterior calibration; self-

calibration; geometric positioning accuracy

利用地面控制点进行外检校是提升光学遥感卫星无控制几何定位精度的关键技术。由于卫星在轨运行过程中物理环境变化剧烈, 星上成像几何参数(如相机安装等)会随物理环境的变化而发生变化, 这使得单次检校获取的检校参数难以保障几何定位精度的时空一致性, 即不同时相、不同区域的影像无控制定位精度不一致^[1]。图 1 中, 利用 2012 年 2 月获取的资源三号正视相机外检校参数, 生产了 2012 年 1 月~2012 年 11 月间的 3 241 景正视影像, 统计了无控制定位精度变化趋势。从图中可以看到, 随着时间的推移, 无控制定位精度整体呈现下降趋势, 这是由于星上成像几何参数变化导致的。在当前国内硬件测量精度及平台稳定控制水平下, 短周期、常态化外检校是保障定位精度时空一致性的有效方法。然而由于国内固定可用的几何检校场较少^[2], 卫星对检校场区域的拍摄周期较长, 导致控制数据缺失, 而难以实现对光学遥感卫星的短周期常态化几何检校。

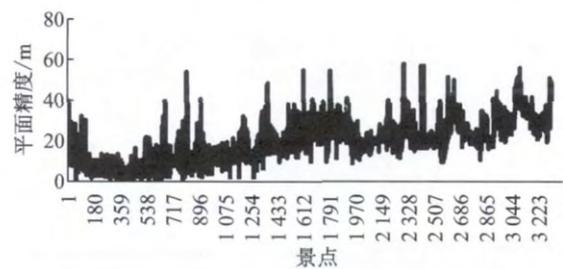


图 1 资源三号无控定位精度变化趋势
(2012 年 1 月~2012 年 11 月)^[1]

Fig. 1 Variation of Ziyuan3 positioning accuracy without GCPs (Jan. 2012~Nov. 2012)^[1]

收稿日期: 2015-11-14

基金项目: 中国博士后科学基金(2015M582276, 2014M562006); 测绘遥感信息工程国家重点实验室项目(15E02); 地理信息工程国家重点实验室开放基金(SKLGIE2015-Z-3-1); 测绘地理信息公益性行业科研专项(201512022); 国家自然科学基金(91538106, 41501503)

第一作者: 蒋永华(1987—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为星载卫星高精度几何处理。E-mail: Jiangyh@whu.edu.cn

通讯作者: 张过(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为高分时序分析。E-mail: guozhang@whu.edu.cn

国外利用外检校保障卫星无控制定位精度的技术已发展成熟.法国自 2002 年发射 SPOT5 以来,利用全球范围内的 21 个几何检校场对其进行常态化几何检校,最终无控制定位精度优于 50 m^[3-6];美国 GeoEye,WorldView1-2 系列卫星经过常态化几何检校,无控制定位精度在 10 m 以内^[7-9];这些成果的取得依赖于广泛分布的几何检校场.M Schneider 等人针对 ALOS 卫星建立了外方位元素误差变化模型,最终取得了 10~15 m 的无控制定位精度^[10].随着卫星敏捷成像能力的大幅提高,卫星对地面扫描成像的模式越来越多,这在轨外方位元素自检校提供了可能性.P Kubik 等人利用 Pleiades 卫星优秀的敏捷机动能力,采用 Auto-Reverse 模式下获取的影像实现了外方位元素自检校,但其未在文献中公开具体的方法原理及处理结果^[11].

本文在深入分析线阵推扫光学卫星外方位元素误差对几何定位影响特性的基础上,提出了不依赖地面控制点的外方位元素自检校方法,并采用仿真数据验证了方法的正确性.本文方法的提出为后续敏捷机动卫星的短周期常态化检校提供了技术基础,并为星上自主几何检校提供了可能性.

1 特定拍摄条件下的外方位元素自检校法

线阵推扫光学卫星单次曝光成像仅获取相机视场内的一行图像,而随着卫星与地面的相对运动,相机随卫星运动扫描地面不同区域最终形成二维图像.因此,线阵推扫卫星单行成像符合线中心投影原理,可依据经典共线方程建立几何定位模型^[12-13]

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS\ 84} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix}_{WGS\ 84} + \mathbf{R}_{J\ 2000,WGS\ 84} \mathbf{R}_{body,J\ 2000} \left\{ \begin{bmatrix} Dx \\ Dy \\ Dz \end{bmatrix} + m \mathbf{R}_{cam,body} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

式中: $[X\ Y\ Z]_{WGS\ 84}^T$ 为像点对应的 WGS 84 坐标系下的物方点坐标; $[X_s\ Y_s\ Z_s]_{WGS\ 84}^T$ 为成像时刻卫星在 WGS 84 系下的位置矢量; $\mathbf{R}_{J\ 2000,WGS\ 84}$ 为 J 2000 坐标系相对 WGS 84 坐标系的转换矩阵; $\mathbf{R}_{body,J\ 2000}$ 是由定姿设备测量处理得到的本体坐标系相对于 J 2000 坐标系的转换矩阵; $[Dx\ Dy\ Dz]^T$ 为 GPS 相位中心在本体坐标系中的偏移矢量; $[dx\ dy\ dz]^T$ 为相机坐标系相对本体坐标系的原点

偏移矢量; m 为成像比例; $\mathbf{R}_{cam,body}$ 是由相机在本体坐标系下的安装角确定的转换矩阵; x_0, y_0, f 分别为主点坐标、主距表示的内方位元素.

从式(1)中可以看到,影响无控制定位精度的外方位元素系统误差主要包括:①姿态、轨道测量误差;②设备安装误差,如 GPS 相位中心相对本体坐标原点的偏移、相机安装角度等.考虑偏移误差与轨道测量误差等效、安装角误差与姿态测量误差等效,以下仅分析姿轨测量误差对几何定位的影响特性.

1.1 轨道、姿态误差对几何定位影响特性分析

轨道位置误差可分解为沿轨误差、垂轨误差及径向误差($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$).根据线阵推扫成像特征,轨道沿轨位置误差、垂轨位置误差引起的几何定位误差为平移误差^[14-16],即

$$\Delta x = \Delta X / D_{gsd}, \Delta y = \Delta Y / D_{gsd} \quad (2)$$

式中: $\Delta x, \Delta y$ 分别为轨道沿轨位置误差、垂轨位置误差引起的沿轨向、垂轨向几何定位误差; D_{gsd} 为地面分辨率,忽略相机视场范围内的地球曲率变化,其跟成像角(俯仰角或侧摆角) η 的关系可简化为

$$D_{gsd} \approx \lambda_{ccd} H / f \cos^2 \eta \quad (3)$$

式中: λ_{ccd} 为 CCD 探元尺寸; H 为卫星高度; f 为主距.

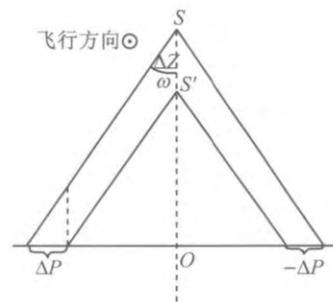


图 2 轨道径向误差对几何定位精度的影响

Fig. 2 Positioning error caused by orbit radial errors

图 2 为轨道径向位置误差在垂轨向对几何定位的影响.假设成像光线与 SO 夹角为 ω ,其由卫星侧摆角及探元视场角决定,令 $\omega = \gamma_{roll} + \Psi$,其中 γ_{roll} 为卫星侧摆角, Ψ 为探元视场角,则

$$\Delta y \approx \frac{\Delta Z \cdot \tan(\gamma_{roll} + \Psi)}{D_{gsd}} \quad (4)$$

考虑国内在轨光学卫星视场角均较小,可将 $\tan(\gamma_{roll} + \Psi)$ 近似为

$$\tan(\gamma_{roll} + \Psi) = \tan \gamma_{roll} + \frac{1}{\cos^2 \gamma_{roll}} \Psi \quad (5)$$

则结合式(3)和(5),式(4)可转化为

$$\Delta y = \Delta Z (f / \lambda_{ccd} H) \sin \gamma_{roll} \cos \gamma_{roll} + \Delta Z (f / \lambda_{ccd} H) \Psi \quad (6)$$

由图 2 可知,轨道径向位置误差在沿轨向引起的几何定位误差也如式(6)所示,仅需将侧摆角 γ_{roll} 替换成俯仰角 γ_{pitch} 即可。

由式(6),在卫星稳态成像条件下,短时段内的成像侧摆角 γ_{roll} 变化很小,因此轨道径向误差引起的几何定位误差包含平移分量 $\Delta Z(f/\lambda_{ccd}H) \cdot \sin \gamma_{roll} \cos \gamma_{roll}$ 和比例分量 $\Delta Z(f/\lambda_{ccd}H)\Psi$,而比例分量与探元视场角 Ψ 成正比。以资源三号正视相机为例,其主距 f 为 1.7 m,探元大小为 0.007 mm,全视场为 6° ,即最大探元视场角为 3° ,国内当前轨道测量精度普遍优于 10 m,卫星最大侧摆能力为 32° ,则按式(6)计算可得轨道径向误差引起的最大比例分量约为 0.25 m,小于 0.2 个星下点正视 GSD。而实际上,由于国内目前卫星平台搭载双频 GPS 测量设备并结合地面精密定轨处理,轨道精度可以达到数米甚至厘米量级,引起的比例分量较 0.2 个 GSD 更小,从而该比例分量可以忽略。因此,对于国内在轨高分光学卫星而言,径向误差引起的几何定位误差主要表现为平移误差。

姿态角误差分为滚动角误差、俯仰角误差及偏航角误差。图 3 为滚动角误差对几何定位的影响。 SO 为真实光线, SO' 为带误差光线, $\Delta\omega$ 为滚动角误差, Ψ 为成像探元的视场角,图中红线部分即为滚动角误差引起的垂轨向像点偏移。则由图中几何关系,滚动角引起的垂轨像点偏移为

$$\Delta y = (f/\lambda_{ccd} \cos \Psi) \Delta \omega \quad (7)$$

由式(7)可知,滚动角引起的像点偏移与探元视场角有关;同样以资源三号正视相机为例,取其滚动

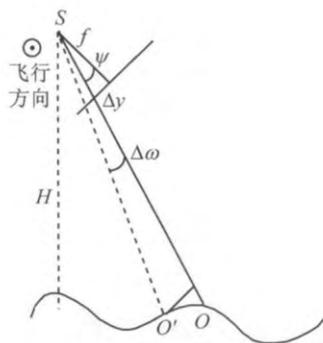


图 3 滚动角误差对几何定位的影响
Fig. 3 Positioning error caused by roll angle error

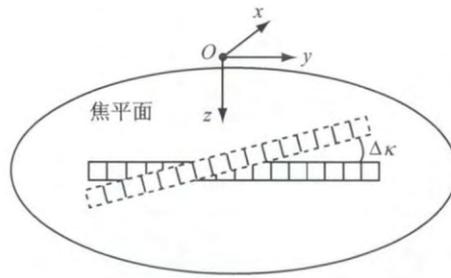


图 4 偏航角误差对几何定位的影响
Fig. 4 Positioning error caused by yaw angle error

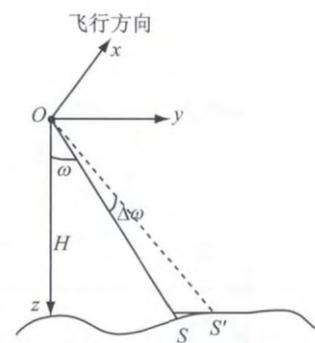


图 5 轨道坐标空间滚动角误差对几何定位的影响
Fig. 5 Positioning error caused by orbit angle error

角误差为 $5''$ (姿态测量精度),全视场内由滚动角误差引起的像点偏移最大差异不超过 0.02 个像素。因此,在小视场角条件下可以将滚动角引起的像点偏移当成平移误差。而由于俯仰角误差对几何定位的影响机理与滚动角误差一致,其引起的沿轨向像点偏移也可以看成是平移误差^[17-18]。

图 4 所示,偏航角误差对几何定位的影响等同于 CCD 线阵的旋转

$$\Delta x = x(1 - \cos \Delta \kappa), \Delta y = x \sin \Delta \kappa \quad (8)$$

式中: x 为影像列; $\Delta \kappa$ 为偏航角误差。

由上述分析可知,在目前高分光学卫星窄视场条件下,外方位线角元素存在等效性关系,即轨道误差引起的几何定位误差可等效为姿态俯仰角误差、滚动角误差^[19]。因此,外方位元素自检校模型可仅考虑补偿姿态系统误差。

1.2 外方位元素自检校方法

式(7)在像方描述姿态滚动误差引起的像点偏移,从式中可以看出,由滚动角误差引起的像点偏移具有方向性,在像面上偏移方向仅由滚动角误差的正负决定。该描述方式下的姿态误差定义于像方空间,难以通过平台姿态控制改变其正负取值。而在轨道空间,情况则有所不同。

图 5 以滚动角误差为例, OS 为真实成像光线, OS' 为带误差成像光线, ω 为垂轨向成像角(包含成像侧摆角、探元视场角等), $\Delta\omega$ 为滚动角误差, H 为卫星高度。则可得垂轨向定位误差 ΔY 为

$$\Delta Y = H[\tan \omega - \tan(\omega + \Delta \omega)] \quad (9)$$

考虑 $\Delta\omega$ 通常为小角度,式(9)可做如下近似:

$$\Delta Y \approx -H(1/\cos^2 \omega) \Delta \omega \quad (10)$$

式(10)表明,在轨道坐标空间下,滚动角误差引起的定位误差方向仍然由 $\Delta\omega$ 的正负确定。然而, $\Delta\omega$

的正负取值定义于轨道坐标系,如图 6 所示,当卫星整体平台做偏航 180° 旋转时,则相当于 $\Delta\omega$ 符号取反。根据式(10),滚动角误差引起的几何定位误差大小保持不变而方向相反。图 7 中,采用文献^[20]中的

仿真系统模拟偏航角分别为 0° 和 180° 时, $5''$ 的滚动角误差引起的垂轨向几何定位误差, 其中 X 轴为影像列, Y 轴为影像行, Z 轴为垂轨向定位误差. 可以看到, 在偏航角旋转 180° 后, 滚动角误差引起的几何定位误差大小相近, 但方向却相反.

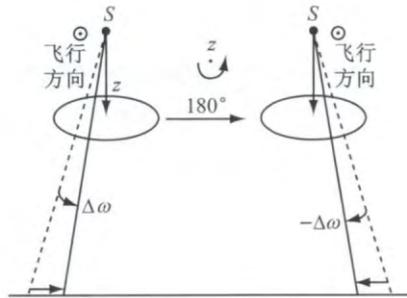


图 6 轨道空间下姿态误差引起的几何定位误差
Fig. 6 Positioning error caused by attitude error in orbit space

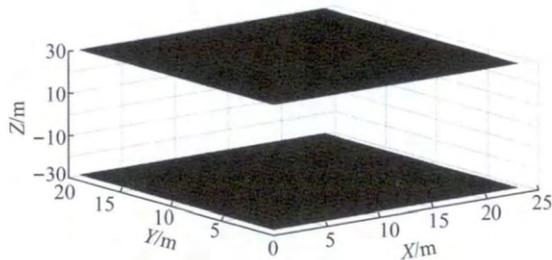


图 7 偏航旋转 180° 滚动角误差引起的几何定位误差对比
Fig. 7 Comparison of positioning error between 0-degree yaw angle and 180-degree yaw angle

根据姿态误差在轨道空间的这一特性, 利用敏捷卫星快速机动在短时间内两次扫描同一区域, 保持两次扫描的卫星侧摆、俯仰角相近而偏航角相差 180° , 则可根据两次影像几何定位误差大小相近、方向相反的特点实现外方位元素自检校.

假设从两张影像上获取同名点对 (x_1, y_1) 和 (x_r, y_r) , 基于式(1)几何定位模型分别求取两点的物方坐标 (X_1, Y_1, Z_1) 和 (X_r, Y_r, Z_r)

$$\begin{aligned} (X_1, Y_1, Z_1) &= f(x_1, y_1, h_1) \\ (X_r, Y_r, Z_r) &= f(x_r, y_r, h_r) \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中, 为降低高程投影差的影响, 几何定位利用全球 SRTM-DEM 数据获取高程.

根据上述姿态误差分析特性可知

$$\begin{aligned} (X_1, Y_1, Z_1) &= (X_1, Y_1, Z_1)_{\text{true}} + (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) \\ (X_r, Y_r, Z_r) &= (X_r, Y_r, Z_r)_{\text{true}} - (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $(X_1, Y_1, Z_1)_{\text{true}}$ 和 $(X_r, Y_r, Z_r)_{\text{true}}$ 分别为 (x_1, y_1) 和 (x_r, y_r) 的地面坐标真值, 且由于 (x_1, y_1) 和 (x_r, y_r) 为同名点, 则 $(X_1, Y_1, Z_1)_{\text{true}} = (X_r, Y_r, Z_r)_{\text{true}}$.

因此, 同名点对 (x_1, y_1) 和 (x_r, y_r) 的真实地面坐标(忽略高程影响)为

$$(X_1, Y_1, Z_1)_{\text{true}} = \left(\frac{X_1 + X_r}{2}, \frac{Y_1 + Y_r}{2}, \frac{Z_1 + Z_r}{2} \right) \quad (13)$$

将轨道位置误差等效为姿态角误差, 直接采用偏置矩阵进行统一补偿, 修正真实光线指向与带误差光线指向间的偏差. 根据式(11)~(13)获取的检校控制点求解式(14)中的偏置矩阵 R_u , 补偿外方位元素误差^[21-24].

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{WGS 84}} = \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix}_{\text{WGS 84}} + mR_{J 2000, \text{WGS 84}} R_{\text{body}, J 2000} R_u R_{\text{cam}, \text{body}} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix} \quad (14)$$

2 实验验证及分析

2.1 实验数据

由于国产在轨卫星敏捷成像能力不足, 无法利用真实卫星数据对外方位元素自检校方法进行验证. 本实验中采用文献[20]中的仿真系统, 模拟卫星偏航 180° 的敏捷拍摄过程, 基于模拟影像进行方法验证. 仿真系统中的输入参数如下: ①轨道参数——轨道高度 505.984 km, 轨道倾角 97.421° , 近地点幅角 90° ; 重力场阶数为 5 阶, 阻力系数为 0, 面质比为 0, 大气密度为 0; 轨道测量采样频率为 1 Hz; 模拟的卫星成像区域中心点北纬 34.64918056° , 东经 113.47087778° , 成像侧摆 0° ; ②姿态参数——卫星采用星敏陀螺定姿, 初始成像角为滚动 10° , 俯仰 0° , 偏航 $0^\circ(180^\circ)$, 不考虑姿态稳定度影响(即认为卫星平台足够稳定), 姿态测量采样频率为 4 Hz; 姿态测量误差为 $0''$; ③相机参数——相机主距为 1.7 m, 探元大小为 $7 \mu\text{m}$, 线阵含 24 576 个探元; 相机安装矩阵为单位阵, 但相机滚动、俯仰、偏航三个轴向的安装角误差均为 $10''$.

输入参数(2)中初始成像偏航角分别为 0° 和 180° , 卫星偏航角前后相差 180° 对同一区域两次拍摄, 获取的模拟影像如图 8 所示.

2.2 自检校结果及分析

在 0° 和 180° 图像的四角点区域选取四个同名点, 依据式(11)~(13)得到检校用控制点, 并按最小二乘法求解式(14)中的三个偏置角, 结果见表 1.

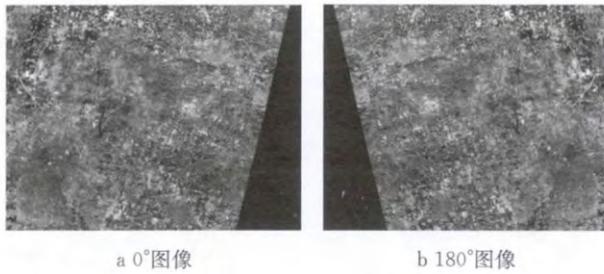


图 8 模拟影像

Fig. 8 Analog images

表 1 自检校与常规检校偏置角对比

Tab. 1 Comparison of offset matrix between self-calibration and normal calibration

影像	俯仰角/(°)	滚动角/(°)	偏航角/(°)
0°图像, 自检校	-9.94	-11.30	0.81
180°图像, 自检校	-9.94	-11.30	-0.81
控制点检校	-10.00	-10.00	-10.00

表 1 中控制点检校代表利用仿真系统输出的无误差控制点检校,它可以精确恢复相机安装角误差;而利用自检校方法仅能较为准确地恢复俯仰角、滚动角的安装角误差,无法恢复偏航角的安装角误差.

由图 9 可知,在偏航 180°成像过程中,相机偏航角的安装角误差在轨道空间下引起的几何定位误差并未反向,无法通过对 0°影像和 180°影像的物方坐标求平均来消除偏航角安装角误差的影响.因此,自检校过程仅能探测并消除俯仰角、滚动角误差,而无法探测到偏航角误差.然而,偏航角误差对几何定位的影响等同于线阵 CCD 旋转误差,由于国产卫星定姿精度可以达到 5"左右量级,偏航角对无控制定位精度影响小,所以不会限制自检校方法的实用性.

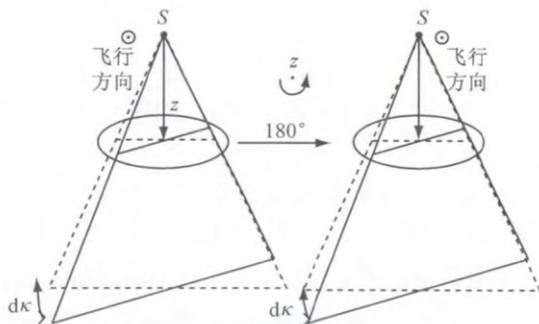


图 9 自检校中偏航角影响示意图

Fig. 9 Effects of yaw angle error in self-calibration

利用仿真系统输出的无误差控制点作为检查点,比较自检校偏置矩阵求解前后的模型定位精度,结果如表 2 所示.表中,A 代表自检校偏置矩阵求解前的模型定位精度,B 代表自检校偏置矩阵求解后的模型定位精度.可见,求解偏置矩阵后的几何定位精度提升明显,从 12 个像素左右提升到 2 个像素以

内.但由于自检校方法无法消除偏航角误差的影响,因此求解偏置矩阵后的定位模型仍然受到偏航角误差影响,定位精度约为 1.5 像素.图 10 和图 11 分别为 0°图像和 180°图像自检校后的定位残差,可以看到存在较为明显的旋转误差,符合偏航角误差对几何定位的影响特性.

表 2 自检校偏置矩阵求解前后定位精度对比

Tab. 2 Comparison of positioning accuracy of offset matrix before and after self-calibration

区域	沿轨/像素			垂轨/像素			
	最大	最小	均方差	最大	最小	均方差	
0°影像	A	12.39	11.06	11.67	11.21	11.15	11.17
	B	0.64	0	0.33	1.56	1.50	1.53
180°影像	A	12.23	11.31	11.82	11.34	10.89	11.13
	B	0.68	0	0.35	1.82	1.37	1.57

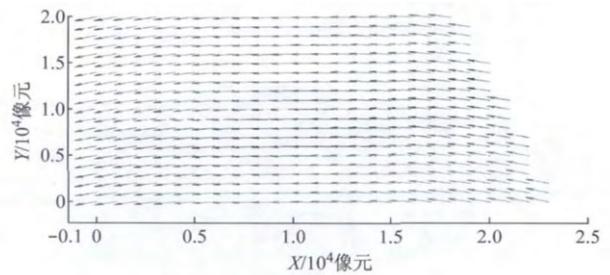


图 10 0°图像定位残差图

Fig. 10 Residual error of 0° image positioning

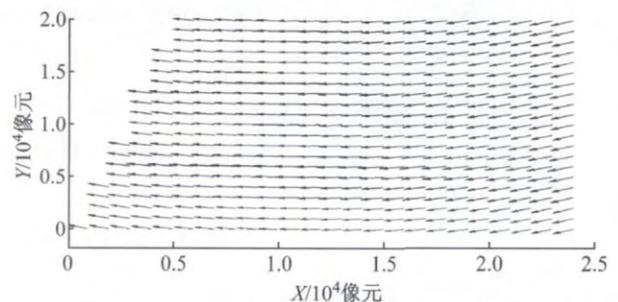


图 11 180°图像定位残差图

Fig. 11 Residual error of 180° image positioning

实验结果验证了自检校方法的正确性;同时,考虑偏航角误差对几何定位的影响,采取小侧摆条件下偏航 180°拍摄同一区域的方案,自检校精度可进一步保证.

3 结论

本文在深入分析线阵推扫光学卫星外方位元素误差对几何定位影响特性的基础上,提出了基于偏航 180°重复观测的外方位元素自检校方法,利用俯仰角、滚动角误差引起的几何定位误差的方向特性,在无需地面控制点条件下消除了俯仰角、滚动角系

统误差,有效提升了无控制定位精度.该方法能够很好地摆脱短周期、常态化外检校对控制数据的严重依赖,对保障卫星定位精度的时空一致性具有较大意义.目前,国外 Pleiades 卫星已经能够满足本文方法对敏捷机动能力的要求;而国内后续敏捷卫星平台也正在根据该方法进行姿态机动能力的指标论证,笔者相信该方法能够为后续我国敏捷卫星的短周期常态化检校提供技术基础,并为星上自主几何检校提供可能性.

参考文献:

- [1] ZHANG Guo, JIANG Yonghua, LI Deren, *et al.* In-orbit geometric calibration and validation of ZY-3 linear array sensors [J]. *The Photogrammetric Record*, 2014, 29(145): 68.
- [2] JIANG Yonghua, ZHANG Guo, LI Deren, *et al.* Improvement and assessment of the geometric accuracy of chinese high-resolution optical satellites[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 16(5):1.
- [3] Valorge C. 40 years of experience with SPOT in-flight Calibration [R]. Gulfport: International Workshop on Radiometric and Geometric Calibration, 2003.
- [4] Breton E, Bouillon A, Gachet R, *et al.* Pre-flight and in-flight geometric calibration of SPOT5 HRG and HRS images[C]// *Processing of ISPRS Comm. Denver: ISPRS, 2002: 20-25.*
- [5] Bouillon A. SPOT5 HRG and HRS first in-flight geometric quality results [C] // *Proceedings of 9th International Symposium on Remote Sensing. Toulouse: ISPRS, 2003: 303-305.*
- [6] Toutin T. Generation of DSMs from SPOT-5 in-track HRS and across-track HRG stereo data using spatio-triangulation and autocalibration [J]. *Journal of photogrammetry & Remote Sensing*, 2006, 60(3): 170.
- [7] Aguilar M A, Aguilar F J, Fernandez I, *et al.* Geopositioning accuracy assessment of GeoEye-1 panchromatic and multispectral imagery[J]. *Photogrammetry Engineering & Remote Sensing*, 2012, 78(3):247.
- [8] Staben G W, Pfitzner K, Bartilo R, *et al.* Calibration of WorldView-2 satellite imagery to reflectance data using an empirical line method[C]//*Proceeding of the 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Sydney: ISPRS, 2011:573-585.*
- [9] Aguilar M A, Saldana M D M, Aguilar F J. Assessing geometric accuracy of the orthorectification process from GeoEye-1 and WorldView-2 panchromatic images [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21(1): 427.
- [10] Schneider M, Lehner, Müller R, *et al.* Stereo evaluation of ALOS/PRISM data on ESAAO TestSites-First DLR results[C] // *The International Archive of Photogrammetry. Beijing: Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008: 723-729.*
- [11] Kubik P, Lebegue L, Fourest S, *et al.* First in-flight results of pleiades 1A innovative methods for optical calibration [R]. Melbourne: ISPRS, 2012.
- [12] 唐新明,张过,祝小勇,等. 资源三号测绘卫星三线阵成像几何模型构建与精度初步验证[J]. *测绘学报*, 2012, 41(2): 191. TANG Xinming, ZHANG Guo, ZHU Xiaoyong, *et al.* Triple linear-array imaging geometry model of ZY-3 surveying satellite and its validation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(2): 191.
- [13] Poli D. Review of developments in geometric modelling for high resolution satellite pushbroom sensors [J]. *The Photogrammetric Record*, 2012, 27(137): 58.
- [14] Hanley H B, Yamakawa T, Fraser C S. Sensor orientation for high-resolution satellite imagery [R]. Albuquerque: ISPRS, 2002.
- [15] Radhadevi P V, Rupert M, Pablo D, *et al.* In-flight geometric calibration and orientation of ALOS/PRISM imagery with a generic sensor model [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2011, 77(5), 531.
- [16] Leprince S, Musé P, Avouac J. In-flight CCD distortion calibration for pushbroom satellites based on subpixel correlation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(9):2675.
- [17] JIANG Yonghua, ZHANG Guo, LI Deren, *et al.* Systematic error compensation based on a rational function model for ZY1-02C[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(7):3985.
- [18] Radhadevi P V, Solanki S S. In-flight geometric calibration of different cameras of IRS-P6 using a physical sensor model[J]. *The Photogrammetric Record*, 2008, 23(121): 69.
- [19] Takagi M, Shimoda H. *Handbook of image analysis* [M]. Tokyo: Tokyo Press, 2004.
- [20] 唐新明,张过,黄文超,等. 低轨卫星平面和立体精度预估方法:中国, CN103868531A[P]. 2014-06-18. TANG Xinming, ZHANG Guo, HUANG Wenchao, *et al.* A method of evaluation low orbit plane and stereo accuracy: China, CN103868531A[P]. 2014-06-18.
- [21] 徐建艳,侯明辉,于晋,等. 利用偏移矩阵提供 CBERS 图像预处理几何定位精度的方法研究[J]. *航天返回与遥感*, 2004, 25(4): 25. XU Jianyan, HOU Minghui, YU Jin, *et al.* Study of CBERS CCD camera bias matrix calculation and its application [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2004, 25(4): 25.
- [22] 蒋永华. 国产星载光学高精度几何检校研究[D]. 武汉:武汉大学, 2012. JIANG Yonghua. *Research on high accuracy geometric calibration of homemade space-borne optical remote sensors* [D]. Wuhan: Wuhan University, 2012.
- [23] 蒋永华,张过,唐新明,等. 资源三号测绘卫星三线阵影像高精度几何检校[J]. *测绘学报*, 2013, 42(1): 523. JIANG Yonghua, ZHANG Guo, TANG Xinming, *et al.* High accuracy geometric calibration of ZY-3 three-line image [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(1): 523.
- [24] 蒋永华,张过,唐新明,等. 资源三号测绘卫星多光谱影像高精度谱段配准[J]. *测绘学报*, 2013, 42(6): 884. JIANG Yonghua, ZHANG Guo, TANG Xinming, *et al.* Research on the high accuracy band-to-band registration method of ZY-3 multispectral image [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(6): 884.