

文章编号 1004-924X(2011)08-1794-07

应用地球椭球的三线阵立体测绘相机像移补偿

武星星*, 刘金国

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 分析了三线阵立体测绘相机成像原理, 针对三线阵立体测绘相机在对地成像过程中存在的前视、正视和后视相机像移速度和偏流角的差异, 推导了基于地球椭球的前视、正视和后视相机像移速度和偏流角计算公式。以某三线阵立体测绘相机为例, 选取 WGS84 地球椭球模型, 分析了前视相机和后视相机都以正视相机为准调整行周期和偏流角时, 像移速度匹配残差和偏流角残差对像质的影响。分析及实验结果表明, 以调制传递函数下降 5% 为约束, 当积分级数 > 2 时, 应分别调整前视、正视和后视相机的行周期; 按正视相机调整前视相机和后视相机的偏流角时, 积分级数应取 40 级以内。

关键词: 三线阵相机; 立体测绘; 像移补偿; 地球椭球; 调制传递函数

中图分类号: V447.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111908.1794

Image motion compensation of three-line stereo mapping camera using earth ellipsoid

WU Xing-xing*, LIU Jin-guo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: starglare@126.com

Abstract: The imaging principles of a three-line stereo mapping camera was analyzed. To overcome the differences of image motion speeds and drift angles of the forward-view camera, nadir-view camera and backward-view camera, the calculation formulas of image motion speeds and drift angles for forward-view, nadir-view and backward-view cameras based on an ellipsoid model were deduced. By taking a three-line stereo mapping for an example and using the WGS84 earth ellipsoid model, the influences of image motion speed matching remains and drift angle remains on the image quality of a three-line stereo mapping camera were analyzed when the forward-view and backward-view cameras both adjust the row transfer periods and drift angles same as the nadir-view camera. Results indicate that with 5% reduction of MTF as a constraint, if more than 2 TDI stages are used nadir-view camera, the forward-view and backward-view cameras should adjust their row transfer periods respectively; However, if drift angles of forward-view and backward-view cameras are adjusted according to nadir-view camera, TDI stages should be no more than 40.

收稿日期: 2010-11-16; 修订日期: 2010-12-31.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA121803)

Key words: three-line camera; stereo mapping; image motion compensation; earth ellipsoid; Modulation Transfer Function(MTF)

1 引言

空间立体测绘相机测制的地球或其他星球表面的各种比例尺的数字地图、数字高程图和数字正射影像图可为高技术精确制导武器和远程打击武器等提供现势性良好的地形和影像数据信息,在国土资源普查、救灾减灾、科学研究等领域也发挥着重要作用。传输型三线阵立体测绘相机具有在轨立体成像和从摄取影像出发重构外方位元素的特点,提供了利用影像本身构建空中三角网的可能性,可以建立比较严整的光束法空中三角测量模型,因而可以降低对卫星姿态稳定度的要求,是目前空间立体测绘相机的发展方向^[1-2]。

在空间相机摄影时,相机和地物的相对运动会产生像移,导致图像模糊、调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)下降,工作时必须进行实时计算并补偿。在三线阵立体测绘相机对地成像过程中,正视相机对星下点成像,前视相机和后视相机在沿轨方向分别向前和向后倾斜一定角度成像,即相当于前摆和后摆成像,而地球实际为椭球体,这些因素导致了前视相机、正视相机和后视相机像移速度和偏流角的差异。目前,已有人提出了基于圆地球模型的星下点成像空间相机像移计算模型,并得到了广泛应用^[3-6]。国内亦有多位学者对空间相机偏流角的控制及其对成像质量的影响进行了研究^[7-9]。杨居奎等还分析了偏流角对三线阵TDICCD测绘相机的影响,但在分析和计算中没有考虑地球椭球对三线阵相机偏流角的影响^[10]。

为了实现测绘目的,三线阵立体测绘相机对3个线阵CCD的平行性有比较高的要求,因此在摄影时不能分别调整前视相机、正视相机和后视相机的偏流角,而以正视相机为准调整前视相机和后视相机的偏流角。另外,为了便于摄影测量算法上的处理和简化相机控制器的设计,希望在同一摄影时刻前视相机、正视相机和后视相机采用相同的行周期。然而,以正视相机为准调整前视相机和后视相机的行周期和偏流角时,前视相

机和后视相机存在像移速度匹配残差和偏流角残差,影响成像的质量。因此,本文针对三线阵立体测绘相机的特殊需求,分析在不同积分级数下前视相机和后视相机都以正视相机为准调整行周期和偏流角时,像移速度匹配残差和偏流角残差对像质的影响,推导了基于地球椭球模型的前视相机、正视相机和后视相机像移速度和偏流角计算公式,为相机工作参数的选取提供了依据。

2 基于地球椭球的三线阵立体测绘相机像移计算方法

图1为空间相机星下点成像原理。由于太阳同步轨道卫星可以在相同的当地时间和光照条件下多次拍摄同一地区的云层和地面目标,因此空间相机通常采用太阳同步轨道。对于空间立体测绘相机,为了便于摄影测量,采用太阳同步圆轨道。空间相机从地面景物到光学遥感器的坐标变化中涉及7个坐标系,分别为地心惯性坐标系 $I(I_1, I_2, I_3)$ 、地球坐标系 $E(E_1, E_2, E_3)$ 、航天器轨道坐标系 $B(B_1, B_2, B_3)$ 、地理坐标系 $G(G_1, G_2, G_3)$ 、航天器坐标系 $S(S_1, S_2, S_3)$ 、遥感器坐标系 $C(C_1, C_2, C_3)$ 和像面坐标系 $P(P_1, P_2, P_3)$ 。本文定义地心惯性坐标系原点在地心, I_2 轴指向天顶, I_3 轴指向升交点, I_1 与 I_2 和 I_3 呈右手系,地球坐标系中 E_1, E_2 ,和 E_3 分别与WGS-84坐标

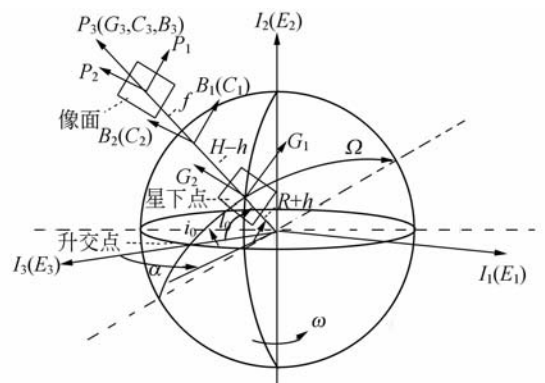


图1 空间相机星下点成像原理

Fig. 1 Substellar imaging principle of space camera

系的 x , y 和 z 轴重合。

假设 R 为相对于地心的地球平均半径, i_0 为轨道倾角, ω 为地球自转角速率, Ω 为航天器轨道运动相对于地心的角速率, γ_0 为星下点与升交点地心角, H 为航天器轨道高度, h 为地势高程, 则基于圆地球模型的空间相机星下点成像沿轨和垂轨的像移速度分别按公式(1)和公式(2)计算^[11]。由于空间立体测绘相机对航天器平台的指向精度和稳定度要求很高, 姿态对像移的影响很小, 因此在计算中忽略了姿态对沿轨和垂轨的像移速度的影响。

$$v_{\text{along}} = (\Omega - \omega \cos i_0) \cdot (R + h) \cdot \frac{f}{H - h}, \quad (1)$$

$$v_{\text{across}} = \omega \sin i_0 \cos \gamma_0 \cdot (R + h) \cdot \frac{f}{H - h}. \quad (2)$$

而地球实际为椭球体, 根据 WGS84 椭球模型, 地球模型椭球方程为

$$\frac{x^2 + y^2}{R_1^2} + \frac{z^2}{R_2^2} = 1, \quad (3)$$

其中 $R_1 = 6\,378\,138\text{ m}$, $R_2 = 6\,356\,752\text{ m}$ 。由于卫星轨道面轨道倾角为 i_0 , 轨道面和椭球体的交线为一个椭圆, 椭圆方程为

$$\frac{x^2}{R_1^2} + \frac{y^2}{R_3^2} = 1, \quad (4)$$

其中

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1 \sin i_0)^2 + (R_2 \cos i_0)^2}. \quad (5)$$

图 2 为三线阵立体测绘相机工作原理, 正视相机主要用于生成正射影像, 用前后一正前一正后组合来获取立体像对。如果采用两线阵相机, 完全依赖外方位元素观察值来恢复立体模型, 外方位元素观测值误差会被全部代入立体模型。三

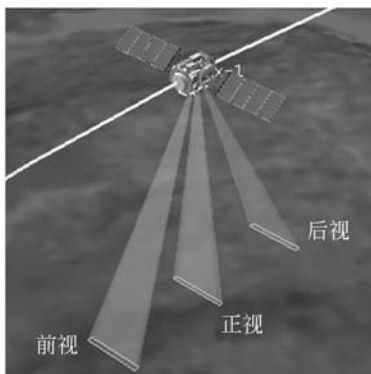


图 2 三线阵立体测绘相机工作原理

Fig. 2 Sketch of three-line stereo mapping camera

线阵相机在采样时刻获取的三线阵影像在几何上近似于相同参数的框幅像片上的 3 条影像, 提供了用影像本身构建空中三角航线的可能。基于地球椭球的三线阵相机像移计算原理如图 3 所示。

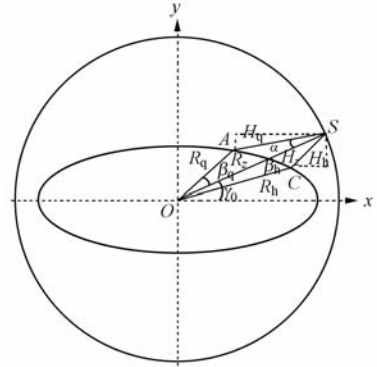


图 3 基于地球椭球的三线阵相机像移计算原理

Fig. 3 Image motion calculation of three-line camera based on ellipsoid model

在三线阵立体测绘相机中, 正视相机和后视相机的交会角与前视相机和正视相机交会角相等, 均为 α , 根据几何关系可得:

$$R_z = \frac{1}{\sqrt{(\frac{\sin \gamma_0}{R_3})^2 + (\frac{\cos \gamma_0}{R_1})^2}}, \quad (6)$$

$$H_z = R + H - R_z, \quad (7)$$

则正视相机沿轨和垂轨像移速度分别为

$$v_{\text{along}}^z = (\Omega - \omega \cos i_0) R_z \cdot \frac{f_z}{H_z}, \quad (8)$$

$$v_{\text{across}}^z = \omega \sin i_0 \cos \gamma_0 \cdot R_z \cdot \frac{f_z}{H_z}, \quad (9)$$

正视相机像移速度主向量值和偏流角分别为

$$v_z = \sqrt{v_{\text{along}}^z{}^2 + v_{\text{across}}^z{}^2}, \quad (10)$$

$$\delta_z = \arctan^{-1} \frac{v_{\text{across}}^z}{v_{\text{along}}^z}. \quad (11)$$

由于地物相对高度的变化相对于椭地球的长短轴的变化很小, 为了便于计算, 在式(8)和式(9)中不考虑地物相对高度变化的影响。在式(1)和式(2)中, 地势高程通过查表和插值得到, 由于受存储电子地图的存储器容量的限制, 地势高程精度较低。而基于地球椭球模型的像移计算方法中, 可以不使用电子地图而连续计算, 具有独到的优势。对于前视相机, R_q 可以通过解方程组(12)得到。

$$\begin{cases} \frac{(R+H) \cdot \sin \gamma_0 - y}{(R+H) \cdot \cos \gamma_0 - x} = \tan (\gamma_0 - \alpha) \\ x^2 + y^2 = R_q^2 \\ \frac{x^2}{R_1^2} + \frac{y^2}{R_3^2} = 1 \end{cases}, (12)$$

而前视相机距地物的距离

$$H_q = (R+H) \cdot \cos \alpha - \sqrt{(R+H)^2 \cdot \cos^2 \alpha - (R+H)^2 + R_q^2}, (13)$$

则前视相机沿轨和垂轨像移速度分别为

$$v_{\text{along}}^q = (\Omega - \omega \cos i_0) \cdot \cos(\alpha + \beta_q) \cdot R_q \cdot \frac{f_q}{H_q}, (14)$$

$$v_{\text{across}}^q = \omega \sin i_0 \cos(\gamma_0 + \beta_q) \cdot R_q \cdot \frac{f_q}{H_q}, (15)$$

其中 f_q 为前视相机焦距, β_q 为 OS 和 OA 的夹角

$$\beta_q = \arccos \frac{R_q^2 + (R+H)^2 - H_q^2}{2(R+H)R_q}, (16)$$

前视相机像移速度主向量值和偏流角分别为

$$v_q = \sqrt{v_{\text{along}}^q{}^2 + v_{\text{across}}^q{}^2}, (17)$$

$$\delta_q = \arctan \frac{v_{\text{across}}^q}{v_{\text{along}}^q}, (18)$$

对于后视相机, R_h 通过解方程组(19)得到。

$$\begin{cases} \frac{(R+H) \cdot \sin \gamma_0 - y}{(R+H) \cdot \cos \gamma_0 - x} = \tan (\gamma_0 + \alpha) \\ x^2 + y^2 = R_h^2 \\ \frac{x^2}{R_1^2} + \frac{y^2}{R_3^2} = 1 \end{cases}, (19)$$

后视相机距地物的距离

$$H_h = (R+H) \cdot \cos \alpha - \sqrt{(R+H)^2 \cdot \cos^2 \alpha - (R+H)^2 + R_h^2}, (20)$$

则后视相机沿轨和垂轨像移速度分别为

$$v_{\text{along}}^h = (\Omega - \omega \cos i_0) \cdot \cos(\alpha + \beta_h) \cdot R_h \cdot \frac{f_h}{H_h}, (21)$$

$$v_{\text{across}}^h = \omega \sin i_0 \cos(\gamma_0 - \beta_h) \cdot R_h \cdot \frac{f_h}{H_h}, (22)$$

其中 f_h 为后视相机焦距, β_h 为 OC 和 OS 的夹角

$$\beta_h = \arccos \frac{R_h^2 + (R+H)^2 - H_h^2}{2(R+H)R_h}, (23)$$

后视相机像移速度主向量值和偏流角分别为

$$v_h = \sqrt{v_{\text{along}}^h{}^2 + v_{\text{across}}^h{}^2}, (24)$$

$$\delta_h = \arctan^{-1} \frac{v_{\text{across}}^h}{v_{\text{along}}^h}, (25)$$

图 4 为假设分别采用基于圆地球的像移计算模型

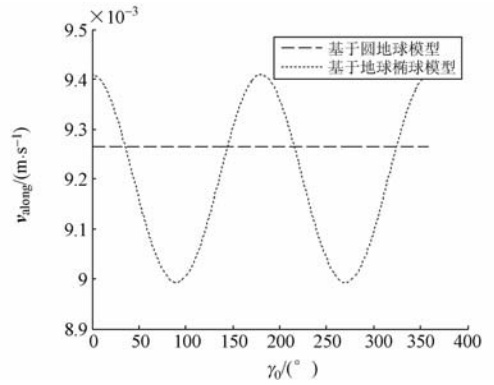


图 4 基于圆地球模型和地球椭球模型得到的正视相机沿轨像移速度比较

Fig. 4 Comparison of along-track image motion speeds obtained from sphere earth model and earth ellipsoid model

和基于地球椭球的像移计算模型得到的正视相机沿轨像移速度的变化曲线。从图 4 中可以看出,当采用基于圆地球的像移计算模型时,正视相机沿轨像移速度不随 γ_0 而变化,这显然与地球实质上为椭球体不符。而基于地球椭球的像移计算模型得到的正视相机沿轨像移速度随 γ_0 周期性变化,符合真实的情况,因此基于地球椭球的像移计算模型要更加精确。

3 前视、后视相机按正视相机调整行周期和偏流角对像质的影响

三线阵立体测绘相机在图像匹配、空中三角计算、光束法平差等处理过程的精度基础是由相机本身的精度保证的,因此对相机本身内方位元素的精度和稳定性要求很高^[12],其中包括对三线阵 CCD 的平行性要求。因此前视相机、正视相机和后视相机不能分别调整偏流角,而都以正视相机的偏流角为准进行调整。像移补偿的方法有电子式、机械式和光学式等^[13-14],传输型三线阵立体测绘相机通过调整 CCD 的行转移周期进行电子式的像移补偿。

三线阵相机要通过在采样时刻获取的三线阵影像构建空中三角航线,为了便于算法上的处理,希望在同一摄影时刻前视相机、正视相机和后视相机采用相同的行周期,这样也可以简化相机控

制器的设计。然而前视相机和后视相机都按正视相机调整行周期和偏流角时,存在像移速度匹配残差和偏流角残差,影响成像质量。本文以某空间立体测绘相机为例,地球模型选取 WGS84 椭球模型,采用前面提出的基于地球椭球的三线阵相机像移计算方法,分析前视、后视相机按正视相机调整行周期和偏流角对像质的影响。

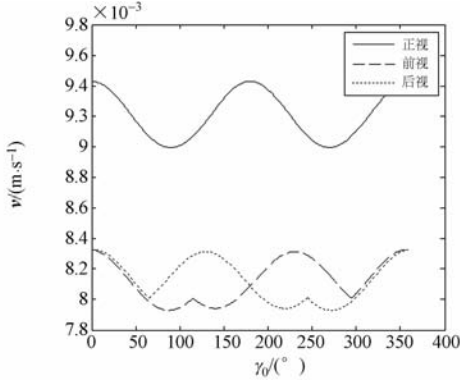


图 5 前视、正视和后视相机像移速度变化曲线

Fig. 5 Image motion velocity curves of forward-view, backward-view and nadir-view cameras

图 5 为前视、正视相机和后视相机像移速度随星下点与升交点地心角的变化曲线。从图 5 中可以看出,前视相机和后视相机的像移速度低于正视相机的像移速度,如果按正视相机调整行周期,存在较大的像移速度匹配残差,影响图像质量。像移匹配残差引起的沿轨传递函数由式(26)计算^[15-16]。

$$MTF_{mismatch} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} \frac{f}{f_N} \frac{N \Delta v}{v})}{\frac{\pi}{2} \frac{F}{F_N} \frac{N \Delta v}{v}}, \quad (26)$$

式中 f 为地物空间频率, f_N 为奈奎斯特(Nyquist)空间频率, $\Delta v/v$ 为像移速度匹配相对误差, N 为 TDI 级数。图 6 为采用 1 级 TDI 级数时,按式(26)计算得到的前视相机和后视相机在奈奎斯特频率下沿轨 MTF 下降 $MTF_{mismatch}$ 随星下点与升交点地心角 γ_0 的变化曲线。

从图 6 中可以看出,当采用 1 级积分级数时,在奈奎斯特频率下前视相机和后视相机沿轨方向传递函数最多下降 1.25%。前视相机和后视相机 $MTF_{mismatch}$ 的最小值 $MTF_{mismatch}^{min}$ 相同,只是取 $MTF_{mismatch}^{min}$ 时的 γ_0 不同。

图 7 为奈奎斯特频率下前视相机和后视相机

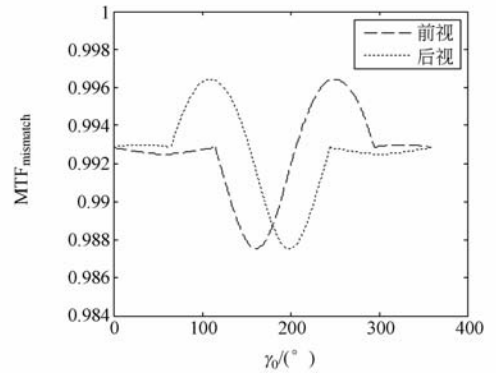


图 6 前视和后视相机的沿轨 MTF 下降曲线

Fig. 6 Along-track MTF descending curves of forward-view and backward-view cameras

$MTF_{mismatch}^{min}$ 随积分级数 N 的变化曲线。从图 7 中可以看出,随着积分级数 N 的增加,前视相机和后视相机 $MTF_{mismatch}^{min}$ 逐渐减小。

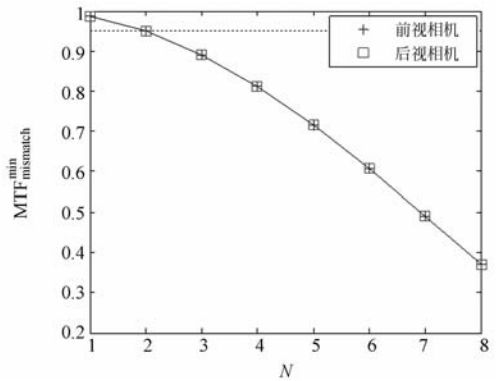


图 7 前视和后视相机的沿轨 MTF 下降随积分级数变化曲线

Fig. 7 Along-track MTF descending curves of forward-view and backward-view cameras with changes of TDI stages

图 8 为前视、正视相机和后视相机偏流角 δ 随星下点与升交点地心角 γ_0 的变化曲线。偏流角残差造成垂轨方向的传递函数下降由式(27)计算。

$$MTF_{piancan} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} \frac{f}{f_N} N \tan \theta)}{\frac{\pi}{2} \frac{f}{f_N} N \tan \theta}, \quad (27)$$

式中 θ 为偏流角调整残差, N 为 TDI 级数。

图 9 为奈奎斯特频率下前视相机和后视相机垂轨 MTF 下降最小值 $MTF_{piancan}^{min}$ 随积分级数 N 的变化曲线。通常认为调制传递函数下降 5%

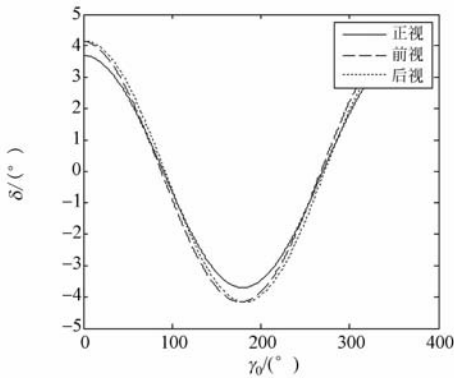


图 8 前视、正视和后视相机偏流角变化曲线

Fig. 8 Drift angle curves of forward-view, backward-view and nadir-view cameras

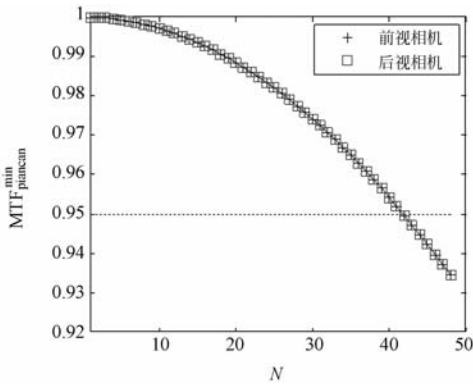


图 9 前视和后视相机垂轨 MTF 下降随积分级数变化曲线

Fig. 9 Across-track MTF descending curves of forward-view and backward-view cameras with changes of TDI stages

对成像质量无本质影响,可以作为像移补偿残差的计算约束。从图 6 和图 8 可以看出,以正视相机为准调整前视相机和后视相机行周期,当积分级数 > 2 时, $MTF_{mismatch}^{min} < 0.95$ 。以正视相机为准调整前视相机和后视相机偏流角,当积分级数 > 40 时, $MTF_{piancan}^{min} < 0.95$ 。因此当积分级数 > 2 级时,应分别调整前视相机和后视相机的行周期。如果前视相机和后视相机按正视相机调整偏流角,为保证成像质量积分级数应取 40 以内。在该空间立体测绘相机的在轨测试实验中,按该结果设置相机的工作参数,各相机成像效果良好。

4 结 论

本文在分析三线阵立体测绘相机成像原理的基础上,推导了基于地球椭球的前视相机、正视相机和后视相机像移速度和偏流角计算公式,并以某三线阵立体测绘相机为例,选取 WGS84 地球椭球模型,分析了前视相机和后视相机都以正视相机为准调整行周期和偏流角时,像移速度匹配残差和偏流角残差对像质的影响。分析及在轨测试实验结果表明,以调制传递函数下降 5% 为约束,当积分级数 > 2 级时应分别调整前视、正视和后视相机的行周期。按正视相机调整前视相机和后视相机的偏流角时,积分级数应取 40 级以内。

参考文献:

[1] 王任享. 我国无地面控制点卫星摄影测量综述[J]. 海洋测绘, 2008, 28(5): 1-8.
WANG R X. Mapping satellite without control point in china[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2008, 28(5): 1-8. (in Chinese)

[2] TAKEO T, MASANOBU S, JUNICHI T. Validation of precise digital surface model generated by PRISM onboard ALOS[J]. *SPIE*, 2009, 7474: 74740H1-12.

[3] 颜昌翔, 王家骥. 航相机像移补偿计算的坐标变换方法[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 203-207.
YAN C X, WANG J Q. Method of coordination

transformation for IM & IMC calculation in aerospace camera system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 203-207. (in Chinese)

[4] 孔德柱, 刘金国, 吕世良, 等. 空间相机像移速度计算方法及 DSP 实现[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1935-1941.
KONG D Z, LIU J G, LV S L, et al.. Calculation method for image motion speed of space camera and DSP-based implementation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1935-1941. (in Chinese)

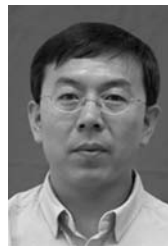
[5] 于涛, 徐抒岩, 韩诚山, 等. 空间相机偏流角的间歇式实时调整[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1908-1914.
YU T, XU S Y, HAN C S, et al.. Batch type real

- time adjustment for drift angle of space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1908-1914. (in Chinese)
- [6] 李仕, 张葆, 孙辉. 航空成像像移补偿的并行计算[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1):225-231.
LI S, ZHANG B, SUN H. Parallel restoration for motion blurred aerial image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):225-231. (in Chinese)
- [7] 李友一. 空间相机中的偏流角控制[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(4):402-406.
LI Y Y. Study of the drift angle control in a space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(4):402-406. (in Chinese)
- [8] 樊起, 李英才, 易红伟. 偏流角对 TDICCD 相机像质的影响分析[J]. *光电工程*, 2007, 34(9):70-73.
FAN C, LI Y C, YI H W. Influence analysis of drift angle on image quality of TDICCD camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(9):70-73. (in Chinese)
- [9] 杨秀彬, 贺小军, 张刘, 等. 偏流角误差对 TDI CCD 相机成像的影响与仿真[J]. *光电工程*, 2008, 35(11):45-56.
YANG X B, HE X J, ZHANG L. Effect and Simulation of the Deviant Angle Error on TDI CCD Cameras Image [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(11):45-56. (in Chinese)
- [10] 杨居奎, 许敬旺. 偏流对三线阵 TDICCD 测绘相机的影响分析[J]. *航天返回与遥感*, 2006, 27(4):27-32.
YANG J K, XU J W. The effect of the drift on three-line TDICCD mapping camera [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2006, 27(4):27-32. (in Chinese)
- [11] 王家骥, 于平, 颜昌祥, 等. 航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型[J]. *光学学报*, 2004, 24(12):1585-1589.
WANG J Q, YU P, YAN C X, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12):1585-1589. (in Chinese)
- [12] 胡莘, 曹喜滨. 三线阵立体测绘卫星的测绘精度分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, 40(5):695-699.
HU X, CAO X B. Analysis on precision of stereo mapping microsatellite using three-line array CCD images[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, 40(5):695-699. (in Chinese)
- [13] EDWARD D, PETER C, ANDREAS R. SOFIA image motion compensation [J]. *SPIE*, 2010, 7735:77355X-1-10.
- [14] HU J, CAO X T, WANG D, *et al.*. Dynamic closed-loop test for real-time drift angle adjustment of space camera on the earth [J]. *SPIE*, 2010, 7656:76560Z-1-7.
- [15] WONG H S, YAO Y L, SCHLIG E S. TDI Charge-coupled devices; design and applications [J]. *Journal of Research and Development*, 1992, 36(1):83-105.
- [16] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所出版社, 2003.
WANG J Q. *Optical Apparatus Principal Design* [M]. Changchun: Publishing House of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2003.

作者简介:



武星星(1980—),男,河南洛阳人,博士,副研究员,2001年、2004年、2007年分别于吉林大学获得学士、硕士和博士学位,主要从事空间遥感成像技术、智能控制等方面的研究。E-mail: star-glare@126.com



刘金国(1968—),男,吉林蛟河人,研究员,主要从事空间遥感与图像处理方面的研究。E-mail: liujg@ciomp.ac.cn