0254-6124/2020/40(1)-058–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

JIN Yunfei, WANG Yongmei, FU Jianguo, WANG Tianfang. On-orbit geometric calibration of ionospheric imager based on stellar (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2020, **40**(1): 58-64. DOI:10.11728/cjss2020.01.058

# 基于恒星的电离层成像仪在轨几何定标 *

金云飞[1,2] 王咏梅[1,2,3,4] 付建国[1,3,4] 王天放[1,3,4]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

4(中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室 北京 100190)

**摘 要** 三轴稳定的地球静止轨道卫星在轨运行期间温度会有周期性变化. 其上装载的远紫外电离层成像仪与卫星之间的热应力变化造成机械传递, 导致仪器指向与装星时的初始位置发生偏差. 恒星在惯性坐标系中的位置保持不变, 可以将其作为电离层成像仪在轨几何定标的定标源. 本文建立了基于恒星的电离层成像仪在轨几何定标模型, 通过拍摄所筛选恒星图像, 得出仪器在轨指向相对于初始值的偏离程度, 从而提高电离层成像仪的成像几何精度. 通过模拟试验, 验证了运用此技术进行在轨几何定标的可行性. 研究结果可为电离层成像仪常态化自动在轨几何定标奠定基础.

**关键词** 恒星, 远紫外, 成像, 几何定标, 电离层

**中图分类号** P 353

# On-orbit Geometric Calibration of Ionospheric Imager Based on Stellar

JIN Yunfei[1,2] WANG Yongmei[1,2,3,4] FU Jianguo[1,3,4] WANG Tianfang[1,3,4]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

3(*Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

4(*CAS Key Laboratory of Environmental Space Situation Awareness Technology, Beijing* 100190)

**Abstract** The surface temperature of the three-axis stabilized Geostationary Orbit (GEO) satellite will change periodically during orbital operation. The thermal stress changes of the far-ultraviolet ionospheric imager and the satellite cause mechanical transmission, which causes the instrument pointing to deviate from the initial position as it is installed on the satellite. Stellar position in the inertial coordinate system remains constant, which can be used as the calibration source for the on-orbit geometric calibration of the ionospheric imager. An on-orbit geometric calibration

* 中国科学院空间科学战略性先导科技专项资助 (XDA04050101)

2019-02-21 收到原稿, 2019-08-25 收到修定稿

E-mail: yunf_jin@163.com. 通信作者 王咏梅, E-mail: wym@nssc.ac.cn

model based on stellar is established. By taking images of the selected stellar, the deviation of the instrument on-orbit pointing from the initial value is obtained, and the imaging geometric accuracy of the ionospheric imager is improved. Finally, a simulation experiment is carried out to verify the feasibility of using this technique to perform on-orbit geometric calibration.

**Key words** Stellar, Far-ultraviolet, Imaging, Geometric calibration, Ionosphere

## 0 引言

电离层是人类空间活动最重要的区域之一, 其时空变化对卫星导航定位、地空无线电通信等电波信号传播有着重要影响, 对其状态和变化的监测预警是空间天气业务的重要组成部分. 计划搭载在地球静止轨道卫星上的电离层成像仪采用对地扫描和临边扫描的方式, 对中低纬地区进行连续全天候监测. 电离层成像仪工作波段为远紫外波段, 采用大口径反射式望远镜系统 + 滤光片 + 增强型面阵探测器的总体方案, 实现对 135.6 nm, $N_2$ $LBH_S$ (Lyman-Birge-Hopfield) (140~150 nm), $N_2$ $LBH_L$ (165~180 nm) 三个波段的分离探测. 对其探测数据进行反演, 可获得夜间电离层总含量 TEC 和峰值电子密度 $N_mF_2$、白天 $O/N_2$ 以及太阳极紫外通量 $Q_{EUV}$ 等参数 [1,2]. 另外, 通过分析 135.6 nm 观测数据, 还可获得电离层闪烁等现象的高时空分辨率演变特征, 为低纬电离层研究提供进一步的探测数据 [3−6].

相机几何成像误差分为内部误差和外部误差. 内部误差主要包括感光面误差、镜头畸变和焦距误差等, 外部误差主要包括轨道量测误差、姿态量测误差和相机安装误差等 [7]. 由于轨道特点, 在轨运行期间, 地球静止轨道卫星南面和北面板上的温度具有年周期的变化规律, 而东、西、对地、背地面上的温度在一天之内有较大幅度变化 [8]. 电离层成像仪与卫星之间采用刚性连接的方式, 热环境的变化会引起安装角变化, 该热变形误差具有一定的统计规律. 因此, 与低轨卫星不同的是, 静止轨道卫星的热变形三轴安装误差具有显著的大幅度波动, 是影响电离层成像仪观测图像定位精度的最主要误差源 [7−9]. 因此, 通过观测恒星计算电离层成像仪自身的光轴指向, 实现在轨几何定标可减少上述误差对电离层成像仪定位精度造成的影响.

传统的光学遥感仪器通常采用基于地面几何定标场进行在轨几何定标 [10−12]. 但电离层成像仪的工作波段是真空紫外波段, 无法获取地面信息. 本文提出一种基于恒星的在轨几何定标方法. 由于恒星位置在惯性坐标系中固定不变, Kim 等 [13] 利用恒星对 IKONOS 卫星上的光学相机进行在轨几何定标, 而 O 型和 B 型光谱恒星在远紫外波段具有较强且稳定的辐射, 因此可以将其作为定标源进行在轨几何定标. 本文通过构建在轨几何定标模型, 根据电离层成像仪拍摄的恒星图像, 获得仪器与卫星之间安装角的偏离程度, 提高电离层成像仪成像几何精度.

## 1 定标模型

电离层成像仪的理想成像模型是小孔成像模型 [14−17], 如图 1 所示. 来自恒星 $A$ 的平行光经过光学系统散布在感光面上, 利用能量中心法确定星像的中心位置 [18]. 以感光面主点 $O_P$ 为原点, $x_p$, $y_p$ 沿感光面的正交基准, 在感光面上建立平面直角坐标系 $O_p x_p y_p$. 星像 $A'$ 的中心位置 $(x_A, y_A)$ 表达式为

$$\begin{cases} x_A = \dfrac{\sum x_{ij} R_{ij}}{\sum R_{ij}}, \\ y_A = \dfrac{\sum y_{ij} R_{ij}}{\sum R_{ij}}. \end{cases} \tag{1}$$

其中: $R_{ij}$ 为感光面像元 $(i,j)$ 敏感的辐射强度; $x_{ij}$, $y_{ij}$ 为感光面像元 $(i,j)$ 沿 $x_p$ 轴和 $y_p$ 轴的坐标. 以相机光心 $O_C$ 为原点, $z_C$ 轴沿光轴向外, $x_C$, $y_C$ 轴与 $x_p$, $y_p$ 轴平行, 建立相机本体坐标系 $O_C x_C y_C z_C$. 光学系统的焦距为 $f$, 可以求得恒星 $A$ 在相机本体坐标系下的星光方向矢量为

$$\boldsymbol{A}_C = \frac{1}{\sqrt{x_A^2 + y_A^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -x_A \\ -y_A \\ f \end{bmatrix}. \tag{2}$$

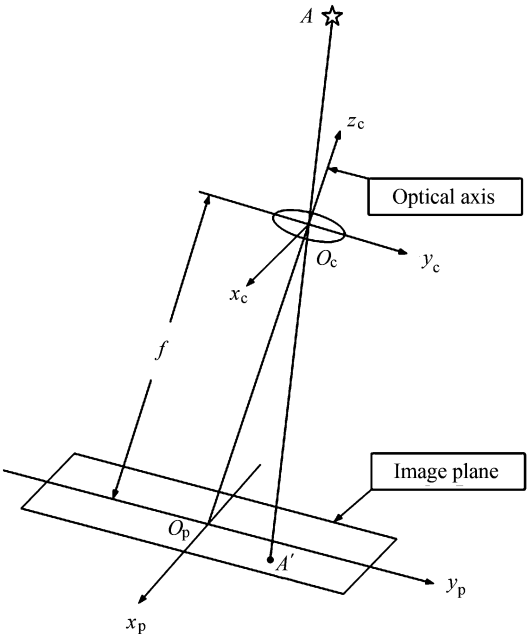



图 1 电离层成像仪的理想成像模型

Fig. 1 Ideal model of the Ionospheric Imager

恒星 $A$ 在地心惯性坐标系 J 2000 下的位置可从星表中查询得到, 赤经为 $A_{\rm ra}$, 赤纬为 $A_{\rm dec}$, 则其方向矢量为

$$\boldsymbol{A}_{\rm J\,2000}=\begin{bmatrix}\cos A_{\rm dec}\cos A_{\rm ra}\\ \cos A_{\rm dec}\sin A_{\rm ra}\\ \sin A_{\rm dec}\end{bmatrix}. \tag{3}$$

为了得到恒星 $A$ 在相机本体坐标系下星光方向矢量 $\boldsymbol{A}_{\rm C}$ 与在地心惯性坐标系 J 2000 下方向矢量 $\boldsymbol{A}_{\rm J\,2000}$ 之间的转换关系, 需建立卫星本体坐标系 (S 系)、仪器本体坐标系 (M 系) 以及相机本体坐标系 (C 系). 卫星本体坐标系原点位于卫星质心, 三个坐标轴 $x_{\rm S}$, $y_{\rm S}$, $z_{\rm S}$ 固定在卫星本体上. 将卫星本体坐标系旋转安装角即可得到仪器本体坐标系, 将仪器本体坐标系旋转相机扫描角即可得到相机本体坐标系, 如图 2 所示. 恒星 $A$ 在相机本体坐标系下的星光方向矢量可通过两条路径得到. 其中一条路径为式 (2), 另一条路径可表示为

$$\boldsymbol{A}_{\rm C}=\boldsymbol{T}^{\rm C}_{\rm M}\boldsymbol{T}^{\rm M}_{\rm S}\boldsymbol{T}^{\rm S}_{\rm J\,2000}\boldsymbol{A}_{\rm J\,2000}. \tag{4}$$

其中: $\boldsymbol{T}^{\rm C}_{\rm M}$ 为仪器本体坐标系到相机本体坐标系的旋转矩阵, 由相机扫描角决定, 称为相机扫描矩阵; $\boldsymbol{T}^{\rm M}_{\rm S}$ 为卫星本体坐标系到仪器本体坐标系的旋转矩阵, 由仪器安装角决定, 称为仪器安装矩阵; $\boldsymbol{T}^{\rm S}_{\rm J\,2000}$ 为地心

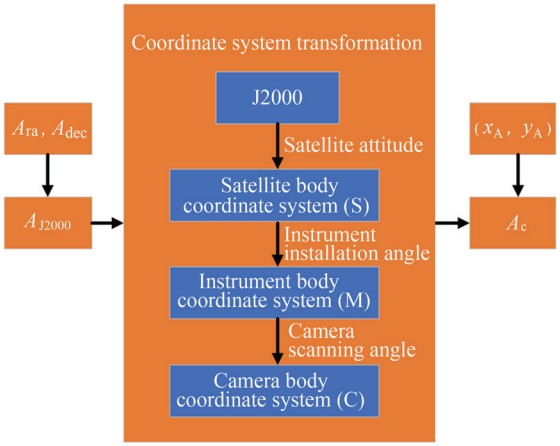



图 2 恒星 $A$ 方向矢量在各坐标系之间的转换

Fig. 2 Conversion of stellar $A$ direction vectors among the coordinate systems

惯性坐标系 J 2000 到卫星本体坐标系的旋转矩阵, 由姿态控制系统输出的四元数决定 [19], 称为卫星姿态矩阵, 可表示为

$$\boldsymbol{T}^{\rm S}_{\rm J\,2000}=\begin{bmatrix}\alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3\\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3\\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3\end{bmatrix}. \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
\alpha_1&=q_1^2-q_2^2-q_3^2+q_4^2,\\
\alpha_2&=2(q_1q_2+q_3q_4),\\
\alpha_3&=2(q_1q_3-q_2q_4),\\
\beta_1&=2(q_1q_2-q_3q_4),\\
\beta_2&=-q_1^2+q_2^2-q_3^2+q_4^2,\\
\beta_3&=2(q_2q_3+q_1q_4),\\
\gamma_1&=2(q_1q_3+q_2q_4),\\
\gamma_2&=2(q_2q_3-q_1q_4),\\
\gamma_3&=-q_1^2-q_2^2+q_3^2+q_4^2.
\end{aligned}$$

相机扫描角和仪器安装角在卫星发射前均经过严格的测试确认. 但在入轨后, 受温度等环境因素的影响, 仪器安装角发生较大的变化, 真实的安装矩阵为

$$\boldsymbol{T}^{\rm M}_{\rm S}=\boldsymbol{X}\bar{\boldsymbol{T}}^{\rm M}_{\rm S}. \tag{6}$$

其中, $\bar{\boldsymbol{T}}^{\rm M}_{\rm S}$ 为仪器安装矩阵的初始值, 由地面测试确定, $\boldsymbol{X}$ 为安装角偏离矩阵. 设真实仪器本体坐标系三个坐标轴偏离初始值的偏离角分别为 $\phi_x,\phi_y,\phi_z$ [20], 由于偏离角均为小角, 则有

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}1 & \phi_z & -\phi_y\\ -\phi_z & 1 & \phi_x\\ \phi_y & -\phi_x & 1\end{bmatrix}. \tag{7}$$

其中, $\phi_x$, $\phi_y$, $\phi_z$ 的单位为弧度. 当产生小角的旋转方向与坐标轴指向相同时, 该小角取正, 否则取负.

由此, 通过式 (1)~(7), 可以构建电离层成像仪在轨几何定标模型, 有

$$\frac{1}{\sqrt{x_A^2+y_A^2+f^2}}\begin{bmatrix}-x_A\\ -y_A\\ f\end{bmatrix}=\boldsymbol{T}_{\mathrm{M}}^{\mathrm{C}}\boldsymbol{X}\bar{\boldsymbol{T}}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{M}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{J\,2000}}^{\mathrm{S}}\begin{bmatrix}\cos A_{\mathrm{dec}}\cos A_{\mathrm{ra}}\\ \cos A_{\mathrm{dec}}\sin A_{\mathrm{ra}}\\ \sin A_{\mathrm{dec}}\end{bmatrix}. \tag{8}$$

## 2 定标方案

电离层成像仪扫描方式包括天底扫描、临边扫描与定标凝视. 在 STK (System Tool Kit) 软件中创建地球同步轨道卫星对象, 星下点设为 105°E; 然后在卫星上创建传感器对象, 仪器对象瞬时视场设置为 12°×1.8°, 如图 3 所示. 图 3 中 1, 2, 3 分别对应传感器观测角为 0°, 7.5° 和 10.8° 时的视场位置. 仪器通过电机进行东西向扫描, 使仪器在这三种工作模式之间进行切换. 经过一个恒星日 (23:56:4.1) 后, 电离层成像仪光轴指向横扫天球一圈.

定标恒星的筛选标准为: (1) 根据电离层成像仪的瞬时视场范围, 恒星赤纬在 −6°~6° 内; (2) 恒星远紫外波段辐射足够强, 以保证该恒星能被电离层成像仪捕捉到. 首先利用 STK 中 HIP (Hipparcos catalogue) 星表数据库搜索满足位置要求的恒星, 再从 IUE 探测器 (International Ultraviolet Explorer) 观测数据库中查找上述恒星的远紫外光谱辐射, 筛选满足强度阈值的恒星. 根据以上原则, 初步筛选了 22 颗满足要求的恒星. 每颗恒星经过一个恒星日都会出现一次 (假设相机只进行单边临边扫描), 恒星在瞬时视场内的运动时间约为 430 s. 图 4 为 STK 模拟的一天当中定标恒星在电离层成像仪瞬时视场内出现

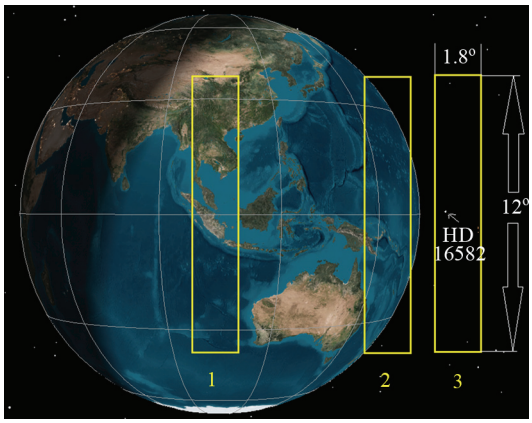



图 3 电离层成像仪扫描结果

Fig. 3 Ionospheric imager scanning schematic

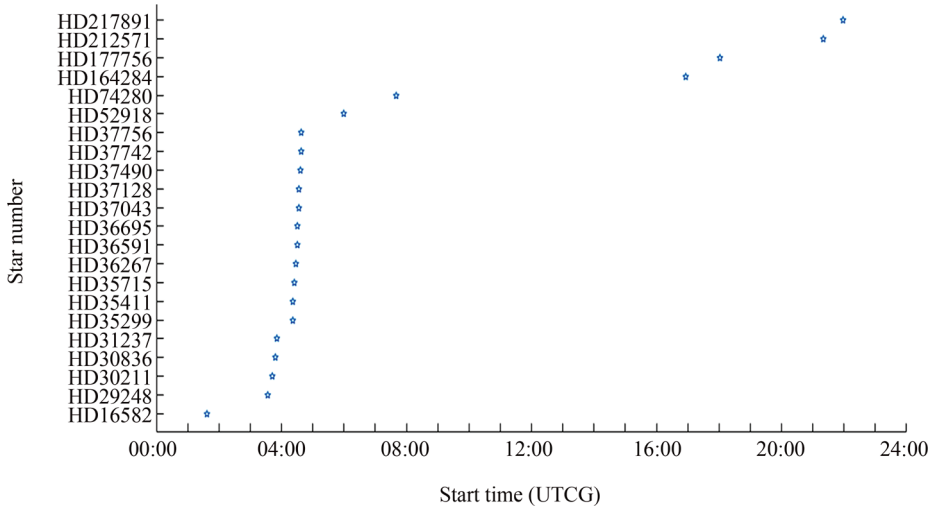



图 4 定标恒星在瞬时视场内出现的时间及顺序 (纵坐标为恒星编号)

Fig. 4 Time and sequence of calibration stars appearing in the instantaneous field of view (The ordinate is the star number)

的时间及顺序 [21]. 根据卫星轨道及相机视场方向计算出恒星出现在瞬时视场内的时间. 根据此时间调整相机工作模式, 确保定标恒星出现时电离层成像仪处于定标凝视工作模式.

处于定标模式时, 根据电离层成像仪拍摄的恒星图像, 通过式 (1) 可得其在感光面上的坐标值, 然后从星表中查询得到对应恒星在惯性坐标系 J 2000 下的位置. 由式 (8) 可知, 若想求得仪器偏离矩阵的唯一解, 必须在同一时刻观测到至少三颗恒星, 可通过

$$[\,A_{\rm C}(t)\quad B_{\rm C}(t)\quad C_{\rm C}(t)\,]=\boldsymbol{T}_{\rm M}^{\rm C}(t)\boldsymbol{X}(t)\bar{\boldsymbol{T}}_{\rm S}^{\rm M}\boldsymbol{T}_{\rm J\,2000}^{\rm S}(t)\,[\,\boldsymbol{A}_{\rm J\,2000}\quad\boldsymbol{B}_{\rm J\,2000}\quad\boldsymbol{C}_{\rm J\,2000}\,] \tag{9}$$

计算得到 $t$ 时刻的仪器偏离矩阵 $\boldsymbol{X}(t)$. 其中: $A_{\rm C}(t)$, $B_{\rm C}(t)$, $C_{\rm C}(t)$ 分别为 $t$ 时刻恒星 $A$, $B$, $C$ 在感光面上的坐标, 其表达见式 (1); $\boldsymbol{A}_{\rm J\,2000}$, $\boldsymbol{B}_{\rm J\,2000}$, $\boldsymbol{C}_{\rm J\,2000}$ 分别为恒星 $A$, $B$, $C$ 在 J 2000 坐标系下的方向矢量, 其表达式见式 (2); $\boldsymbol{T}_{\rm J\,2000}^{\rm S}(t)$ 为 $t$ 时刻的卫星姿态矩阵; $\boldsymbol{T}_{\rm M}^{\rm C}(t)$ 为 $t$ 时刻的相机扫描矩阵; $\bar{\boldsymbol{T}}_{\rm S}^{\rm M}$ 为地面测试的仪器安装矩阵初始值.

根据式 (9) 所得偏离矩阵, $t$ 时刻仪器真实安装矩阵为

$$\boldsymbol{T}_{\rm S}^{\rm M}(t)=\boldsymbol{X}(t)\bar{\boldsymbol{T}}_{\rm S}^{\rm M}. \tag{10}$$

仪器安装角在相机扫描周期内的变化不大, 因此可将定标扫描时得到的真实安装矩阵 $\boldsymbol{T}_{\rm S}^{\rm M}(t)$ 作为相邻临边和天底扫描期间的仪器安装矩阵, 由此计算得到相机探测电离层信号时对应的经纬度信息.

## 3 恒星筛选的光强阈值

星光通过仪器后的输出计数值为

$$\frac{C}{t}=F(\Delta\lambda)A\eta. \tag{11}$$

其中: $C/t$ 的单位为 $\rm s^{-1}$; $F(\Delta\lambda)$ 为恒星光照度, 单位为 $\rm cm^{-2}{\cdot}s^{-1}{\cdot}\text{Å}^{-1}$; $A$ 为仪器入瞳面积, 单位 $\rm cm^2$; $\eta$ 为仪器效率, 其值与仪器光学效率和探测器量子效率有关.

根据地球静止轨道特性, 恒星在瞬时视场内移动的角速度为 $0.0042(^\circ){\cdot}\rm s^{-1}$. 若电离层成像仪相机的空间分辨率为 0.08°, 使恒星观测位置处于像元级精度的曝光时间应小于 19 s. 考虑到噪声的影响, 星光通过电离层成像仪后的计数值应大于 100. 根据电离层成像仪的入瞳面积 $A=9.6\,\rm cm^2$ 和 135.6 nm 处的仪器效率 $\eta=0.013$, 利用式 (11) 可得筛选出的恒星在 135.6 nm 处的光照度必须大于阈值 $42\,\rm cm^{-2}{\cdot}s^{-1}$. 若所选恒星光照度小于该阈值, 则需延长曝光时间才能测得, 所拍摄的恒星图像将占用多个像元. 另外, 若仪器与卫星之间相对安装角变化幅度小于 0.08°, 则应提高相机的空间分辨率至满足精度要求, 并相应提高恒星筛选的光强阈值.

## 4 试验

为验证定标技术的可行性, 进行了模拟试验分析. 图 5 中黄色坐标系为卫星本体坐标系 $O_{\rm S}x_{\rm S}y_{\rm S}z_{\rm S}$ 地球静止轨道卫星采用三轴稳定姿态控制系统, $z_{\rm S}$ 轴指向天底方向, $y_{\rm S}$ 轴指向垂直于赤道面朝向南边. 若初始仪器安装矩阵为单位矩阵, 在不考虑安装角变化的情况下, 仪器本体坐标系 $O_{\rm M}x_{\rm M}y_{\rm M}z_{\rm M}$ 与卫星本体坐标系重合, 仪器本体坐标系 $z_{\rm M}$ 轴也指向地心. 如图 5 所示, 在时刻 $t$ 为 2018 年 2 月 3 日 02:29:29 时, 电离层成像仪瞬时视场内出现了 HD 星表 (Henry Draper Catalogue) 中编号为 HD37128, HD37490, HD37742 的三颗紫外星, 其在 J 2000 惯性坐标系下的赤经、赤纬及各自的方向矢量 $\boldsymbol{A}_{\rm J\,2000}$, $\boldsymbol{B}_{\rm J\,2000}$, $\boldsymbol{C}_{\rm J\,2000}$ 列于表 1. 根据 STK 模拟结果, 此时卫星姿态四元数列于表 2, 则由式 (5) 可得卫星姿态矩阵 $\boldsymbol{T}_{\rm J\,2000}^{\rm S}$.

图 5 中紫色坐标系即为理想成像模型中的相机本体坐标系. 处于定标模式时, 相机的扫描角 $\omega$ 为

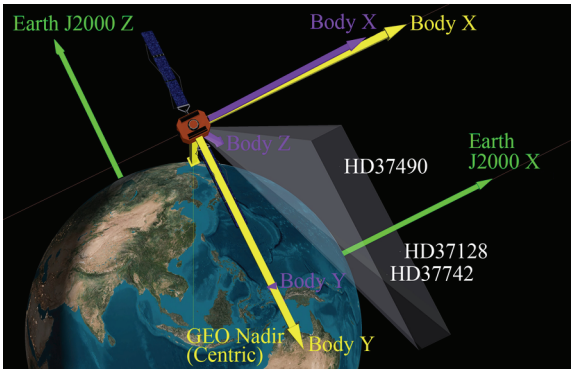



图 5 本体坐标系

Fig. 5 Body coordinate system

**表 1　瞬时视场内观测到的恒星**

**Table 1　Stars observed in the instantaneous field of view**

| 序号 | HD | 赤经/(°) | 赤纬/(°) | 方向矢量 |
|---|---|---|---|---|
| $A$ | 37 128 | 84.0534 | −1.2019 | $[0.1036\ 0.9944\ -0.0210]^{\mathrm{T}}$ |
| $B$ | 37 490 | 84.7964 | 4.1215 | $[0.0905\ 0.9933\ 0.0719]^{\mathrm{T}}$ |
| $C$ | 37 742 | 85.1897 | −1.9426 | $[0.0838\ 0.9959\ -0.0339]^{\mathrm{T}}$ |

**表 2　卫星姿态四元数**

**Table 2　Satellite attitude quaternion**

| 时刻 | $q_2$ | $q_2$ | $q_2$ | $q_4$ |
|---|---|---|---|---|
| 2018-02-03 02:29:29.000 | −0.706 290 | −0.032 494 | 0.033 720 | 0.706 372 |

**表 3　三颗恒星在感光面上的坐标**

**Table 3　Coordinates of the three stars on the image plane**

| 时刻 | $A$ | $B$ | $C$ |
|---|---|---|---|
| 2018-02-03 02:29:29.000 | $(-0.6483, -1.5002)$ | $(0.2971, 5.1971)$ | $(0.7781, -2.4342)$ |

10.8°, 将仪器本体坐标系绕 $y_{\mathrm{M}}$ 轴旋转 $\omega$ 角即可得到相机本体坐标系 $O_{\mathrm{C}}x_{\mathrm{C}}y_{\mathrm{C}}z_{\mathrm{C}}$, 则相机扫描矩阵为

$$\boldsymbol{T}_{\mathrm{M}}^{\mathrm{C}} = \begin{bmatrix} \cos\omega & 0 & -\sin\omega \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\omega & 0 & \cos\omega \end{bmatrix}. \tag{12}$$

电离层成像仪焦距为 72 mm. 若仪器安装矩阵为单位矩阵, 即卫星本体坐标系与仪器本体坐标系重合, 则根据式 (9) 可以得出 $t$ 时刻 $A$, $B$, $C$ 三颗恒星的星像在相机感光面上的坐标 (见表 3). 若实测出来的三颗恒星坐标与表 3 中存在较大偏差, 则说明仪器与卫星之间的相对安装位置发生了变化. 根据实测出来的坐标, 利用式 (9) 即可计算出此时的仪器偏离矩阵 $\boldsymbol{X}$.

## 5　结语

介绍了一种基于恒星的紫外成像仪在轨几何定标方法. 构建了在轨几何定标模型, 通过拍摄恒星图像, 解算得到仪器与卫星之间安装角相对于初始值的偏离程度, 使成像仪对电离层探测目标观测时的经纬度更加准确. 根据仪器与卫星之间相对角度的变化幅度, 按精度要求确定相机空间分辨率, 相应地选择恒星筛选的光强阈值. 分析总结了星光成像所占用的像元个数与相机空间分辨率、曝光时间、恒星光强之间的关系. 借助 STK 对此定标算法进行试验, 验证了此方法的可行性. 接下来将对符合要求的恒星进行全面筛选, 选择空间分布合理的定标恒星, 制作电离层成像仪定标恒星出现时间表, 为最终实现常态化自动在轨几何定标奠定基础.

## 参考文献

[1] JIANG Fang, MAO Tian, LI Xiaoyin, *et al.* The research on $N_{\mathrm{m}}F_2$ and TEC derived from nighttime OI 135.6 nm emission measurement [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2014, **57**(11): 3679-3687 (江芳, 毛田, 李小银, 等. 利用 OI 135.6 nm 夜气辉辐射探测电离层峰值电子密度及电子总含量的研究 [J]. 地球物理学报, 2014, **57**(11): 3679-3687)

[2] STRICKLAND D J, EVANS J S, PAXTON L J. Satellite remote sensing of thermospheric $\mathrm{O/N_2}$ and solar EUV: I. Theory [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 1995, **100**(A7): 12217-12226

[3] KAMALABADI F, COMBERIATE J M, TAYLOR M J, *et al.* Estimation of electron densities in the lower thermosphere from GUVI 135.6 nm tomographic inver-

sions in support of SpreadFEx [J]. *Ann. Geophys.*, 2009, **27**(6): 2439-2448

[4] WANG Xixi, FANG Hanxian, NIU Jun. Analysis of ionospheric irregularities in F layer based on COSMIC data [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2016, **59**(2): 419-425 (王栖溪, 方涵先, 牛俊. 基于 COSMIC 资料分析电离层 F 层不规则体结构 [J]. 地球物理学报, 2016, **59**(2): 419-425)

[5] PARK S H, ENGLAND S L, IMMEL T J, *et al.* A method for determining the drift velocity of plasma depletions in the equatorial ionosphere using Far-ultraviolet spacecraft observations [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2007, **112**(A11314). DOI: 10.1029/2007JA012327

[6] SHI Hao, ZHANG Donghe, HAO Yongqiang, *et al.* Modeling study of the effect of ionospheric scintillation at low latitudes in China [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2014, **57**(3): 691-702 (侍颢, 张东和, 郝永强, 等. 中国低纬度地区电离层闪烁效应模式化研究 [J]. 地球物理学报, 2014, **57**(3): 691-702)

[7] WANG Mi, CHENG Yufeng, CHANG Xueli, *et al.* High accuracy on-orbit geometric calibration of geostationary satellite GF4 [J]. *Acta Geod. Cartog. Sin.*, 2017, **46**(1): 53-61 (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)

[8] GUO Yongfu. Research on the temperature of satellite on geostationary orbit [J]. *Spacecraft Eng.*, 2011, **20**(1): 76-81 (郭永富. 静止轨道卫星在轨温度参数变化规律研究 [J]. 航天器工程, 2011, **20**(1): 76-81)

[9] ZHANG Yue, WANG Chao, SU Yun, *et al.* Thermal control scheme for ultrahigh resolution imaging system on geosynchronous orbit [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2014, **43**(9): 3116-3121 (张月, 王超, 苏云, 等. 地球静止轨道甚高分辨率成像系统热控方案 [J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(9): 3116-3121)

[10] STERCKX S, BENHADJ I, DUHOUX G, *et al.* The PROBA-V mission:image processing and calibration [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 2014, **35**(7): 2565-2588

[11] LI Deren, WANG Mi. On-orbit geometric calibration and accuracy assessment of ZY-3 [J]. *Spacecraft Recovery Remote Sens.*, 2012, **33**(3): 1-6 (李德仁, 王密. "资源三号" 卫星在轨几何定标及精度评估 [J]. 航天返回与遥感, 2012, **33**(3): 1-6)

[12] LI Jing, WANG Rong, ZHU Leiming, *et al.* In-flight geometric calibration for mapping Satellite-1 surveying and mapping camera [J]. *J. Remote Sens.*, 2012, **16**(s1): 35-39 (李晶, 王蓉, 朱雷鸣, 等. "天绘一号" 卫星测绘相机在轨几何定标 [J]. 遥感学报, 2012, **16**(s1): 35-39)

[13] KIM H, KIM E, CHUNG D W, *et al.* Geometric calibration using stellar sources in earth observation satellite [J]. *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.*, 2009, **52**(176): 104-107

[14] LIN P D, SUNG C K. Comparing two new camera calibration methods with traditional pinhole calibrations [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 3012-3022. DOI:10.1364/OE.15.003012

[15] HONG Y, REN G, LIU E. Non-iterative method for camera calibration [J]. *Opt. Express*, 2015, **23**(18): 23992. DOI:10.1364/OE.23.023992

[16] LIEBE C C. Accuracy performance of star Trackers-A tutorial [J]. *IEEE Trans. Aero. Electr. Sys.*, 2002, **38**(2): 587-599

[17] CHENG Yufeng, RUN Yi, WANG Mi. On-orbit calibration approach for optical navigation sensor in deep space exploration [J]. *J. Deep Space Explor.*, 2016, **3**(3): 228-236 (程宇峰, 润一, 王密. 深空探测光学导航敏感器在轨几何定标方法 [J]. 深空探测学报, 2016, **3**(3): 228-236)

[18] ZHANG Renwei. Satellite Orbit Attitude Dynamics and Control [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1998: 207-208 (章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998: 207-208)

[19] RADHADEVI P V, MÜLLER R. In-flight geometric calibration and orientation of ALOS/ PRISM imagery with a generic sensor model [J]. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 2011, **77**(5): 531-538

[20] QIN Yongyuan. Inertial Navigation [M]. Beijing: Science Press, 2006: 5-8 (秦永元. 惯性导航 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 5-8)

[21] ZHANG Hui, HAO Yongjie. Simulation for view field of star sensor based on STK [J]. *Comput. Simulat.*, 2011, **28**(7): 83-86 (张辉, 郝永杰. 基于 STK 的卫星星敏感器视场仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2011, **28**(7): 83-86)