

基于恒星辐射稳定性的全天空极光成像仪辐射定标方法

韩冰^{1**}, 李国君^{1,2***}, 胡泽骏^{2*}, 张义生^{3****}

¹西安电子科技大学工程学院, 陕西 西安 710071;

²中国极地研究中心, 自然资源部极地科学重点实验室, 上海 200136;

³北京应用气象研究所, 北京 100029

摘要 全天空极光成像仪是一种重要的地基极光观测设备,对全天空成像仪进行辐射参数定标能够获得全天空图像中极光结构在不同观测谱线上的真实激发强度,这对于空间物理过程的定量研究有着重要的意义。受到极区观测台站的条件限制,许多全天空极光成像仪无法在观测现场进行辐射参数定标。为此,提出一种基于恒星辐射稳定性对全天空成像仪进行辐射参数定标的方法,把恒星作为“虚拟标准光源”,利用全天空成像仪获取的星空图进行辐射定标,最终确定辐射强度-图像数值之间的辐射参数。利用更多的恒星亮度作为参考标准,以及电离层卫星探测到的极光沉降电子数据,结合 GLOW 模型计算的极光激发强度作为参考标准,对定标结果进行了两种不同方法的验证。结果显示,在恒星亮度验证中,恒星亮度偏差最大值为 12.22%,平均偏差为 4.624%;在卫星沉降粒子验证中,利用模型计算出的极光弧峰值强度与全天空观测获得极光弧峰值强度偏差最大值为 11.30%,平均偏差为 5.603%。两种验证结果相近,这表明本文所提定标方法是有效和可信的。

关键词 测量; 辐射定标; 全天空成像仪; 恒星辐射; GLOW 模型

中图分类号 P352.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0512004

Radiation Calibration of All-Sky Auroral Imager Based on Stellar Radiation Stability

Han Bing^{1**}, Li Guojun^{1,2***}, Hu Zejun^{2*}, Zhang Yisheng^{3****}

¹School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

²MNR Key Laboratory of Polar Science, Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China;

³Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China

Abstract The all-sky auroral imager is an important ground-based instrument for auroral observation and research. The real excitation intensity of auroras on different wavelengths can be obtained by calibrating the radiation parameter of all-sky imager, which is of great significance for quantitative study of space physics. Due to the conditions of polar observation stations, many all-sky auroral imagers cannot calibrate radiation parameters on the observation site. In this paper, a method to calibrate the radiation parameter of all-sky imager is presented which is based on stellar radiation stability. The stellar is regarded as the virtual standard light source, and the radiation parameter between radiation intensity and image value are finally determined by using the sky map obtained by the

收稿日期: 2020-09-11; 修回日期: 2020-10-12; 录用日期: 2020-11-02

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1407303, 2016YFC1400300)、国家自然科学基金(41874195, 41831072, 61572384, 61432014)、中国科学院空间科学先导专项(XDA15350202, XDA15052400)、“国际子午圈关键科学问题国际合作预先研究”(A131901W14)

* E-mail: huzejun@pric.org.cn; ** E-mail: bhan@xidian.edu.cn; *** E-mail: 1556176733@qq.com;

**** E-mail: zhangyisheng118@sina.com

all-sky imager. Using more stellar brightness and the precipitating electrons data of aurora detected by ionospheric satellite and the auroral excitation intensity calculated by GLOW model, the radiation parameter of all-sky auroral imager is verified by two different methods. The results show that in the verification of stellar brightness, the maximum deviation is 12.22%, and the average deviation is 4.624%; in the satellite precipitating particle verification, the maximum deviation of the auroral arc peak intensity calculated by the model and all-sky imager is 11.30%, and the average deviation is 5.603%. The two verification results are similar, which shows that the proposed method is effective and credible.

Key words measurement; radiation calibration; all-sky auroral imager; stellar radiation; GLOW model

OCIS codes 120.4820; 150.1488; 350.1260

1 引言

全天空成像仪是一种重要的地基空间环境光学观测设备,被广泛应用于大气气辉观测^[1-2]以及南北极地区的极光观测^[3-4]。由于采用了 180°视场的鱼眼镜头,所以全天空成像仪可以收集地面以上 180°视场内天空的光学影像信息。我国在北极黄河站(YRS)、南极中山站架设的极光光学观测系统中,有多台针对极光特定激发谱线(427.8, 557.7, 630.0 nm)进行观测的单波段全天空极光成像仪^[3-4],可以同时获得全天空范围内极光不同尺度的结构形态、存在时间、运动速度,以及不同波段的激发强度等重要的极光物理参数,而这些极光物理参数又与行星际磁场和太阳风、磁层边界层、极区电离层/热层等区域内的空间环境参数和动力学过程紧密联系^[3-13]。例如,根据全天空极光成像仪的“物-像”的光学几何对应关系,可以获得观测到的极光结构的实际空间尺度,而极光结构的实际空间尺度与粒子沉降中的波粒相互作用、粒子加速过程紧密相关^[12,14]。而利用单波段全天空极光成像仪的“辐射强度-图像数值”的辐射对应关系,可以获得观测到的极光结构在不同观测谱线上的实际激发强度,而根据极光在不同谱线的激发强度,可以获得极光沉降粒子的平均能量和能通量等关键物理信息^[14-17]。因此,精确获得全天空极光成像仪的“物-像”光学几何对应关系以及“辐射强度-图像数值”的辐射对应关系,对于定量研究相关的物理过程和机制是极其重要的。

全天空成像仪在出厂前,会通过实验室的定标实验来给出成像仪的“物-像”光学几何参数和“辐射强度-图像数值”的辐射参数。而在全天空成像仪长期使用过程中,由于仪器设备的维护和部件性能的老化等原因导致原有的光学性能、探测器增益和偏置会发生不同程度的变化^[18-19]。因此,为了保证观测数据质量,需要定期对全天空成像仪重新进行光学几何标定和辐射定标。

我们前期已经利用北极黄河站全天空极光成像

仪的星空观测,提出了一种基于星点空间位置推算成像仪“物-像”光学几何参数的标定方法^[20]。利用该方法,可以在不增加任何定标辅助设备的情况下,对野外观测台站的全天空成像仪进行快速有效的光学几何标定,但是该方法没有涉及全天空成像仪的辐射定标问题。

对于全天空成像仪的辐射定标,通常是利用人造辐射源如黑体、积分球等对成像仪进行定标。人造辐射源具有出光均匀、光谱范围宽、动态范围大等优点^[21-23],但是这种方法对定标环境的要求比较高,需要在专门的光学暗室中进行。对于安装在野外观测站点(比如南北极地区)的全天空极光成像仪而言,在实验室重新定标是一件非常困难的事情。由于大部分恒星的辐射非常稳定,亮度较低,而且全天空成像仪的观测数据中存在着大量的星空观测数据,基于此,本文提出利用恒星的辐射稳定性对全天空成像仪的辐射参数进行定标的方法,并且对其定标准确性进行了评估。该方法的重大优势是可以对任意地点的全天空成像仪进行快速的辐射参数定标。

2 原理和方法

2.1 定标原理

北极黄河站位于(78.92°N, 11.93°E),修正磁纬为 76.24°。2003 年 12 月安装了三台单波段全天空极光成像仪,分别观测 427.8、557.7、630.0 nm 谱线的极光形态和强度特征^[3-4]。三台成像仪的常规采样时间分辨率为 10 s,其中曝光时间为 7 s,数据读取和存储时间为 3 s,所获得的全天空图像尺寸为 512 pixel×512 pixel。安装前,三台全天空成像仪在光学暗室利用标准光源进行了成像仪辐射参数的定标。

成像仪的感光探测器输出信号与成像仪的入瞳辐射强度之间通常是一个线性响应关系^[22]表示为

$$I = (N - N_{\text{dark}}) \times c, \quad (1)$$

式中: I 为探测目标的辐射亮度; N 为成像仪感光探测器输出信号的值; N_{dark} 为仪器暗电流产生的输出

信号值; c 为成像仪辐射系数。定标测试中, 标准光源 I 的亮度值已知, N 和 N_{dark} 的值通过成像仪的正常拍摄和暗场拍摄(关闭快门)方式获得, 由(1)式最终可以推算出成像仪的辐射系数 c 。光学暗室定标测得三台全天空极光成像仪, 在 7 s 曝光时间下的辐射系数 c 值分别为 $1.5280 \text{ Rayleigh} \cdot \text{count}^{-1} @ 427.8 \text{ nm}$ 、 $1.0909 \text{ Rayleigh} \cdot \text{count}^{-1} @ 557.7 \text{ nm}$ 和 $0.5159 \text{ Rayleigh} \cdot \text{count}^{-1} @ 630.0 \text{ nm}$ 。

成像仪在长期运行过程中, 由于器件的老化和观测环境变化等原因, 辐射系数 c 值会发生变化。因而, 需要每年对成像仪辐射系数进行重新定标, 获得新的辐射系数 c 值。然而北极黄河站由于不具备专业的光学暗室, 无法在现场重新定标辐射系数。

天文观测中恒星的辐射通量基本稳定, 以黄河站可观测到的“织女一”为例, 在十多年中的长期观测中, 其辐射通量波动小于 4.4% ^[24]。南北极地区的大气光学条件良好, 恒星辐射进入成像仪的强度可以认为是一个恒定值。因此, 本文选择特定恒星作为“虚拟标准光源”, 来对每年的成像仪辐射系数 c 进行重新定标。“虚拟标准光源”的亮度值 I_{star} , 可

以通过黄河站成像仪安装后的观测数据获得。本文选择北极黄河站 557.7 nm 波段全天空极光成像仪 2003 年 12 月观测数据中的星空图作为标准数据(成像仪刚安装后, 设备状态良好, 辐射系数 c 值为实验室定标值, 即 $1.0909 \text{ Rayleigh} \cdot \text{count}^{-1} @ 557.7 \text{ nm}$), 来获得特定恒星的辐射亮度的月平均值。利用恒星辐射稳定性, 把恒星作为“虚拟标准光源”对 2005 年 12 月的 557.7 nm 波段全天空极光成像仪的全天空图像数据中的辐射系数 c 值进行重新定标, 即重新计算辐射系数 c 值表示为

$$c_{\text{star}} = \frac{I_{\text{star}}}{N_{\text{star}}}, \quad (2)$$

式中: N_{star} 为恒星的成像仪探测器输出的信号值。

为了保证辐射定标的精度, 根据北极黄河站的星空图, 选用较为稳定且最大天顶角小于 65° 的天枢(Dubhe)、天船三(Mirfak)、五车二(Capella)、织女一(Vega)、北极二(Kochab)和开阳(Mizar)等六颗恒星(图 1)来作为“虚拟标准光源”。2003 年 12 月 22 日, 这些恒星在北极黄河站的观测信息如表 1 所示。

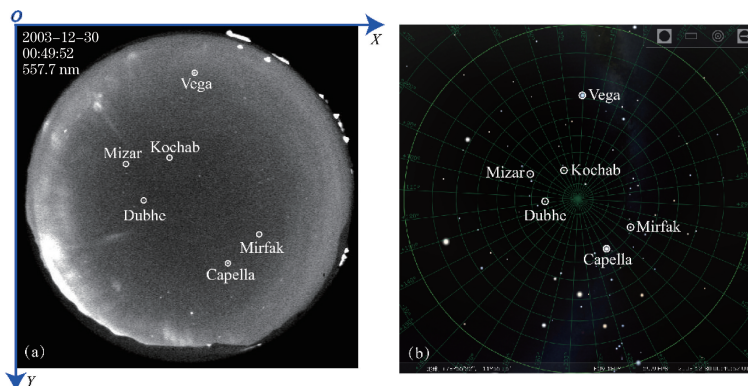


图 1 恒星分布图。(a)黄河站全天空图像;(b)Stellarium 界面中的星空图

Fig. 1 Distribution of stars. (a) All-sky image of YRS; (b) star map in Stellarium

表 1 2003 年 12 月 22 日恒星的天顶角日变化

Table 1 Diurnal variation of zenith angle of stars in December 22, 2003

Number	Star	Diurnal variation of zenith angle	
		Minimum zenith angle / ($^\circ$)	Maximum zenith angle / ($^\circ$)
1	Dubhe	17.19	39.35
2	Mirfak	29.05	51.20
3	Capella	32.92	55.07
4	Vega	40.14	62.29
5	Kochab	4.79	26.94
6	Mizar	24.02	46.17

2.2 全天空图像中的恒星位置

恒星相对于太阳系在不断运动, 恒星的运动速度按照矢量分解, 可以得到视向速度和切向速度^[25]。视向速度是指恒星沿观察者视线方向运动的速度; 切向速度又称为恒星的自行, 是单位时间内恒星在天球切面内走过的距离对观测者所张成的角度, 单位是角秒/年。恒星的自行都很小(例如织女一为 410.1 毫角秒/年), 因此恒星在不同日期的相同时刻全天空成像仪中位置几乎是不变的。由于地球的自转, 天空中的恒星都围绕着天轴(地球自转轴的延伸)自东向西运动, 24 h 运转一周, 称之为“周日视运动”^[26]。

图 2(a)显示“织女一”在北极黄河站全天空图像中的“周日视运动”轨迹。图中的虚线为“织女一”的 24 h 视运动轨迹,小圆圈内的点为不同时刻下“织女一”在全天空图像中的位置,并标出了对应的世界时(UT)以及在天空中的天顶角。由于在天顶角小于 60°的范围内,其对应的空间距离与天顶角之间近似为线性关系^[20],因此“织女一”在 24 h 内,其轨迹在全天空图像中近似为一个圆。

假设恒星在全天空图像中的轨迹是一个以 C

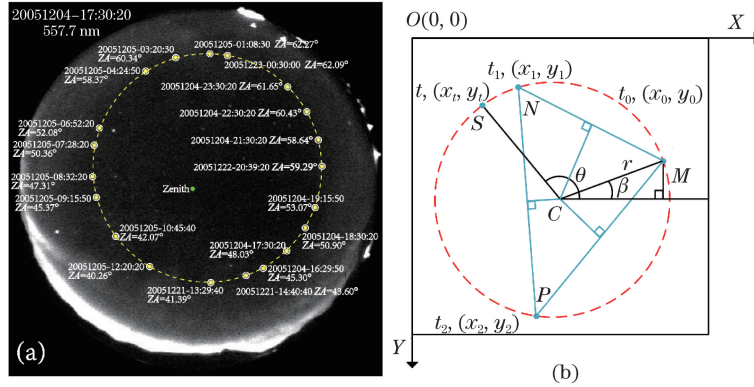


图 2 恒星的视运动轨迹及其坐标计算原理。(a)“织女一”的 24 h 视运动轨迹;(b)全天空图像中的恒星坐标计算原理图
Fig. 2 Visual motion track of stars and diagram of calculating stellar coordinates. (a) 24 h visual motion track of Vega; (b) diagram of calculating stellar coordinate in all-sky image

$$\begin{cases} x_c = \frac{(x_0^2 + y_0^2)(y_1 - y_2) + (x_1^2 + y_1^2)(y_2 - y_0) + (x_2^2 + y_2^2)(y_0 - y_1)}{2(x_1 - x_2)} \\ y_c = \frac{(x_0 - x_2)}{(y_2 - y_0)}x_c + \frac{y_2^2 - y_0^2 + x_2^2 - x_0^2}{2(y_2 - y_0)} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: r 为圆 C 的半径,单位为 pixel; θ 为 t 时刻星点与 X 轴正方向的夹角; β 为 t_0 时刻恒星与圆心 C 连线与 X 轴正方向的夹角。

$$r = \sqrt{(x_0 - x_c)^2 + (y_0 - y_c)^2}, \quad (5)$$

$$\theta = \frac{360^\circ}{24 \times 60 \times 60} \times (t - t_0) + \beta, \quad (6)$$

$$\beta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y_c - y_0}{x_0 - x_c}\right), & x_c \leq x_0 \\ \arctan\left(\frac{y_c - y_0}{x_0 - x_c}\right) + 180^\circ, & x_c > x_0 \end{cases}. \quad (7)$$

由于恒星在全天空图像中的轨迹并不是一个真正的圆,并且恒星在全天空图像中是跨像元成像(大于 1 pixel),(3)式得到的 t 时刻恒星坐标与实际恒星坐标稍有偏差。例如,“织女一”的实际坐标与圆心 C 的距离相差 155~160 pixel,存在 5 pixel 的误差,表 1 中的其他恒星与圆心 C 的距离误差小于

点为中心, r 为半径的圆,如图 2(b)所示,则对于任意时刻 t ,恒星在全天空图像坐标系下的坐标为

$$\begin{cases} x_t = x_c + r \cdot \cos \theta \\ y_t = y_c - r \cdot \sin \theta \end{cases}, \quad (3)$$

式中: x_c 和 y_c 分别为圆心 C 的横坐标和纵坐标。可以利用任意三个时刻 t_0, t_1 和 t_2 恒星在全天空图像中的位置坐标 $M(x_0, y_0), N(x_1, y_1)$ 和 $P(x_2, y_2)$ 计算获得,即

5 pixel。所以,本文以坐标 (x_t, y_t) 为中心,在其周围 11 pixel×11 pixel 的范围内寻找亮度值最大的像素,将该像素作为恒星的实际位置,则恒星在全天空图像中的实际坐标满足以下要求

$$\begin{cases} x_t - 5 \leq x_m \leq x_t + 5 \\ y_t - 5 \leq y_m \leq y_t + 5 \\ x_t - 5 \leq x \leq x_t + 5, \\ y_t - 5 \leq y \leq y_t + 5 \\ I(x_m, y_m) \geq I(x, y) \end{cases}, \quad (8)$$

式中: (x_m, y_m) 为恒星在 t 时刻的实际位置坐标; $I(x_m, y_m)$ 和 $I(x, y)$ 分别为全天空图像中坐标 (x_m, y_m) 和 (x, y) 处像素对应的目标亮度值。

利用上述方法,本文对 2003 年 12 月和 2005 年 12 月的全天空成像仪星空图中的天枢、天船三、北极二、织女一、五车二和开阳进行跟踪检测,筛选所得的恒星星点数量统计如表 2 所示。

表 2 2003 年和 2005 年检测到的恒星星点数量

Table 2 Number of star spots detected in 2003 and 2005

Year	Star					
	Dubhe	Mirfak	Capella	Vega	Kochab	Mizar
2003	2488	2316	700	371	2449	2093
2005	2441	1343	482	923	4315	2106

2.3 全天空图像中的恒星亮度

作为“虚拟标准光源”，准确、有效地提取全天空图像中恒星的亮度值是非常关键的。由于存在天光背景，全天空图像中位于 (x_m, y_m) 处的恒星的实际亮度 I_{star} 应为

$$I_{star} = I(x_m, y_m) - I_{bg}, \quad (9)$$

式中： I_{bg} 为恒星周围的天光背景亮度值。天光背景的计算方法如下。

1) 确定恒星邻域。设定坐标为 (x_m, y_m) 处恒星的邻域大小为 $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ ，如图 3 所示。像素 (x_m, y_m) 为恒星中心，虚线框为恒星边界，第 $x_m - 2, x_m + 3$ 列和第 $y_m - 2, y_m + 3$ 行为背景。

$$\begin{cases} x_m - 3 \leq x \leq x_m + 3 \\ y_m - 3 \leq y \leq y_m + 3. \\ x, y \in N_+ \end{cases} \quad (10)$$

	x_m-3	x_m-2	x_m-1	x_m	x_m+1	x_m+2	x_m+3
y_m-3	57	73	69	75	70	71	73
y_m-2	60	56	56	75	63	72	93
y_m-1	64	77	88	82	71	59	81
y_m	57	61	99	188	148	86	76
y_m+1	67	93	103	170	157	77	71
y_m+2	74	81	67	77	80	75	67
y_m+3	85	85	75	67	64	76	79

图 3 恒星邻域

Fig. 3 Stellar neighborhood

2) 确定恒星边界。因为恒星在全天空图像中是跨像素成像，需要在恒星邻域中把恒星边界确定出来。对恒星邻域内恒星中心所在的行进行后向差分，即

$$V_p = [I_{(x_m-2, y_m)}, I_{(x_m-1, y_m)}, I_{(x_m, y_m)}, I_{(x_m+1, y_m)}, I_{(x_m+2, y_m)}, I_{(x_m+3, y_m)}], \quad (11)$$

$$V_f = [I_{(x_m-3, y_m)}, I_{(x_m-2, y_m)}, I_{(x_m-1, y_m)}, I_{(x_m, y_m)}, I_{(x_m+1, y_m)}, I_{(x_m+2, y_m)}], \quad (12)$$

$$\nabla V = V_p - V_f, \quad (13)$$

式中： $I_{(x_m, y_m)}$ 为恒星邻域中第 x_m 列第 y_m 行的亮

度值。差分后向量中的最大值和最小值点对应的下标，分别作为恒星的左右边界，即

$$b_l = \operatorname{argmax}_j [\nabla V(j)], \quad (14)$$

$$b_r = \operatorname{argmin}_j [\nabla V(j)], \quad (15)$$

式中： b_l 和 b_r 分别为恒星左右边界所在的列序号。类似地，对恒星邻域内恒星中心所在的列进行后向差分，找到差分后的向量中的最大值和最小值点，分别作为恒星的上下边界。在图 3 中，得到的恒星边界如虚线框所示，即第 $y_m, y_m + 1$ 行为恒星的上下边界，第 $x_m, x_m + 1$ 列为恒星的左右边界。

3) 获取天光背景。将恒星邻域内与恒星左右边界间隔一列的列向量、与恒星上下边界间隔一行的行向量作为背景，即图 3 中第 $x_m - 2, x_m + 3$ 列和第 $y_m - 2, y_m + 3$ 行。计算背景的背景亮度均值作为背景亮度值，公式为

$$I_{bg} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} I(x_i, y_i), \quad (16)$$

式中： $I(x_i, y_i)$ 为坐标 (x_i, y_i) 处的背景亮度值。

3 全天空成像仪的辐射定标

由于全天空成像仪不同天顶角的亮度修正系数不同^[27]，因此，本文在获取的 2003 年和 2005 年的恒星星点数据比较集(表 2)中，选出同一恒星相同坐标区域的恒星星点来进行辐射定标。

1) 确定恒星数据对

在 2003 年 12 月的全天空图像中，当某一恒星多次出现在相同坐标处时，将多次提取得到的恒星亮度取均值为

$$\bar{I}_{star}^{(x_i, y_i)} = \frac{\sum_{j=1}^n I_{starj}^{(x_i, y_i)}}{q_{2003}^{(x_i, y_i)}}, \quad (17)$$

式中： $I_{starj}^{(x_i, y_i)}$ 为 2003 年 12 月恒星第 j 次出现在坐标 (x_i, y_i) 处时的亮度值； $q_{2003}^{(x_i, y_i)}$ 为 2003 年 12 月该恒星出现在坐标 (x_i, y_i) 处的总次数； $\bar{I}_{star}^{(x_i, y_i)}$ 为该恒星在坐标 (x_i, y_i) 处的亮度均值。

在 2005 年 12 月的全天空图像中，当某一恒星多次出现在相同坐标处时，将多次提取得到的探测器输出信号值(已经去除了探测器的暗电流信号值以及天光背景的信号值)取均值，即

$$\bar{N}_{star}^{(x_i, y_i)} = \frac{\sum_{j=1}^m N_{starj}^{(x_i, y_i)}}{q_{2005}^{(x_i, y_i)}}, \quad (18)$$

式中： $N_{starj}^{(x_i, y_i)}$ 为 2005 年 12 月该恒星第 j 次出现在

坐标 (x_i, y_i) 处时对应的探测器输出信号值; $q_{2005}^{(x_i, y_i)}$ 为 2005 年 12 月该恒星出现在坐标 (x_i, y_i) 处的总次数; $\bar{N}_{star}^{(x_i, y_i)}$ 为该恒星在坐标 (x_i, y_i) 处的探测器输出信号值均值。

同一恒星在不同位置坐标 (x_i, y_i) 下的信息可以用数据对 $(\bar{N}_{star}^{(x_i, y_i)}, \bar{I}_{star}^{(x_i, y_i)})$ 表示 $(i=1, \dots, M)$, 则同一恒星的全部数据对表示为

$$\begin{pmatrix} (\bar{N}_{star}^{(x_1, y_1)}, \bar{I}_{star}^{(x_1, y_1)}) \\ (\bar{N}_{star}^{(x_2, y_2)}, \bar{I}_{star}^{(x_2, y_2)}) \\ \vdots \\ (\bar{N}_{star}^{(x_i, y_i)}, \bar{I}_{star}^{(x_i, y_i)}) \\ \vdots \\ (\bar{N}_{star}^{(x_M, y_M)}, \bar{I}_{star}^{(x_M, y_M)}) \end{pmatrix}, \quad (19)$$

式中: M 为该恒星数据对的数量。6 颗恒星数据对的散点图如图 4 所示。

2) 确定辐射系数

计算该恒星所有数据对中 2003 年 12 月的亮度均值 \bar{I}_{star} 和 2005 年 12 月的探测器输出信号值均值

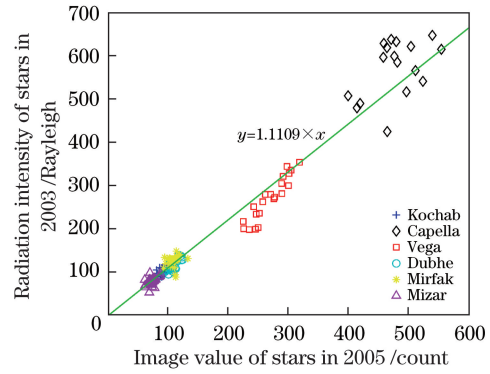


图 4 六颗恒星的数据对散点图

Fig. 4 Scatter plot of six stars data

\bar{N}_{star} 表示为

$$\bar{I}_{star} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{I}_{star}^{(x_i, y_i)}}{n}, \quad (20)$$

$$\bar{N}_{star} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{N}_{star}^{(x_i, y_i)}}{n}. \quad (21)$$

计算得到各恒星数据对中的亮度均值和探测器输出信号值均值如表 3 所示。

表 3 各恒星 2003 年的亮度均值和 2005 年的探测器输出信号值均值

Table 3 Average radiation intensity of each star in 2003 and average detector output signal value in 2005

Item	Star					
	Dubhe	Mirfak	Capella	Vega	Kochab	Mizar
$\bar{I}_{star} / \text{Rayleigh}$	114.2120	127.3730	572.8550	271.2808	103.0210	79.1181
$\bar{N}_{star} / \text{count}$	106.5359	108.9025	477.2203	269.1365	91.7054	72.4376
$c / (\text{Rayleigh} \cdot \text{count}^{-1})$	1.0721	1.1696	1.2004	1.0080	1.1234	1.0922

根据 2.1 节中的(2)式, 分别计算各恒星作为“虚拟标准光源”的辐射系数 c , 如表 3 所示, 将 6 颗恒星得到的辐射系数取均值, 最终得到 2005 年 12 月全天空成像仪的辐射系数 c 为

$$c = 1.1109 \text{ Rayleigh} \cdot \text{count}^{-1}. \quad (22)$$

根据新的辐射系数 c , 图 4 中的直线即为恒星的探测器输出信号与恒星亮度的对应关系。

4 定标结果验证

4.1 恒星亮度验证

选取 2003 年 12 月 22 日 23:07:51—23:30:21

UT 和 2005 年 11 月 25 日 00:55:00—01:19:10 UT 期间的奎宿九 (Mirach)、天大将军一 (Almach)、天璇 (Merak)、摇光 (Alkaid)、五车五 (Elnath) 共 5 颗恒星对定标得到的辐射系数进行验证。2003 年观测时段的星点数量为 135 颗, 2005 年观测时段的星点数量为 145 颗。以各恒星在 2003 年的亮度均值为恒星亮度的标准值, 则 2005 年的各恒星亮度均值以及 2005 年亮度相对于 2003 年的偏差如表 4 所示。除了 Alkaid, 其他 4 颗恒星的亮度偏差绝对值不大于 6%, 5 颗恒星的亮度平均偏差为 4.624%。

表 4 2003 年和 2005 年恒星亮度差异

Table 4 Differences of stellar radiation intensity in 2003 and 2005

Star	Zenith angle / (°)		Average radiation intensity / Rayleigh		Difference / %
	Minimum	Maximum	2003	2005	
Mirach	51.71	52.87	81.27	81.21	-0.07
Almach	42.69	43.80	88.23	88.52	0.33
Merak	31.37	32.54	66.46	69.56	4.67
Elnath	50.43	50.69	109.27	115.65	5.83
Alkaid	45.68	46.64	72.31	81.15	12.22

4.2 全天空成像仪与 DMSP 卫星的联合观测验证

4.2.1 验证原理

DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) 系列卫星是美国的国防气象卫星, 运行轨道为太阳同步轨道, 轨道高度约为 830 km, 轨道周期约为 101 min。卫星携带的 SSJ (Special Sensor for Precipitation Particles) 探测器用于测量 30 eV ~ 30 keV 的沉降电子和离子^[24]。GLOW (Global airglow model) 模型能够计算 100 km 高度上热层和电离层的光学激发特性, 例如根据极区沉降电子的通量和平均能量, 可以计算出极光各谱线的激发特征^[28-34]。

为了对重新定标后的全天空成像仪的辐射值的准确性进行验证, 并评估定标方法的有效性, 我们选择 2005 年 12 月期间 DMSP F16 卫星穿越北极黄河站全天空视野中的极光弧时的沉降粒子数据, 将全天空图像中根据定标结果计算得到的 557.7 nm 极光激发强度与利用 GLOW 模型推算出极光弧在 557.7 nm 谱线上的激发强度进行对比验证。

4.2.2 验证事例

选取一些具有代表性的事例对本文方法进行验证。2005 年 12 月 2 日 11:03:33—11:07:34 UT, DMSP F-16 卫星穿越黄河站全天空视野。图 5(a) 为 11:04:10 UT 和 11:06:30 UT 时刻的 557.7 nm 全天空极光图像, 图中点线对应 DMSP 卫星轨迹转换至 150 km 的极光发光高度后在全天空图像中的投影^[20], 轨迹上标注了卫星在对应位置处的 UT 时间。DMSP 卫星大约在 11:06:10—11:07:30 UT 时段内, 穿越了极光弧的粒子沉降区。图 5(b) 为卫星电子能谱图, 横轴对应卫星运动的时间 (单位: UT), 时间分辨率为 1 s, 纵轴为电子能量。图 5(c) 是图 5(a) 中的卫星轨迹在全天空图像中对应的探

测器输出信号值 (单位: count) 组成的 Keogram, 横坐标对应卫星运动的时间, 纵坐标对应不同时刻的全天空图像。图中点划线为卫星轨迹。图 5(d) 为卫星观测到的沉降电子能通量 [JE, 单位: $\text{erg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr})^{-1}$]; 图 5(e) 为卫星观测到的沉降电子平均能量 (EAVE, 单位: eV); 图 5(f) 为沿卫星轨迹的 557.7 nm 极光激发强度 (单位: Rayleigh), 其中实线为全天空成像仪获得的极光激发强度, 虚线为 GLOW 模型计算结果。

在 11:06:24—11:07:12 UT, 卫星电子能谱中有两个明显的电子沉降结构, 如图 5(b) 所示, 存在两个电子能通量峰, 如图 5(d) 所示, 而卫星轨迹对应穿过两个极光强度增量区, 如图 5(c) 所示。GLOW 模型推算出这两个电子沉降峰值区域的 557.7 nm 极光激发强度峰值分别为 2429.4 Rayleigh 和 1918.4 Rayleigh, 而经过定标后从全天空图像数据中获得的 557.7 nm 极光激发强度峰值分别是 2410.5 Rayleigh 和 1827.6 Rayleigh。以 GLOW 模型结果为参考标准, 则定标后全天空成像仪的极光辐射强度的相对偏差分别为 -0.78% 和 -4.73%。

图 6 是 2005 年 12 月 19 日 10:49:50—10:52:20 UT 期间, DMSP F16 卫星穿越黄河站上空的事件。这次穿越得到的沉降电子通量峰值区域和极光激发强度增量区都具有单峰结构, 并且在空间上具有很好的对应性。卫星电子探测数据结合 GLOW 模型计算得到的电子沉降峰值区域的 557.7 nm 极光激发强度峰值为 866.3 Rayleigh, 而对应的全天空图像数据中获得的 557.7 nm 极光激发强度峰值为 964.2 Rayleigh, 相对偏差为 11.30%。

综合以上两个事例, 3 个极光弧峰值强度的全天空观测与模型计算的平均偏差为 5.603%, 与恒星亮度验证的平均偏差 4.624% 非常接近。

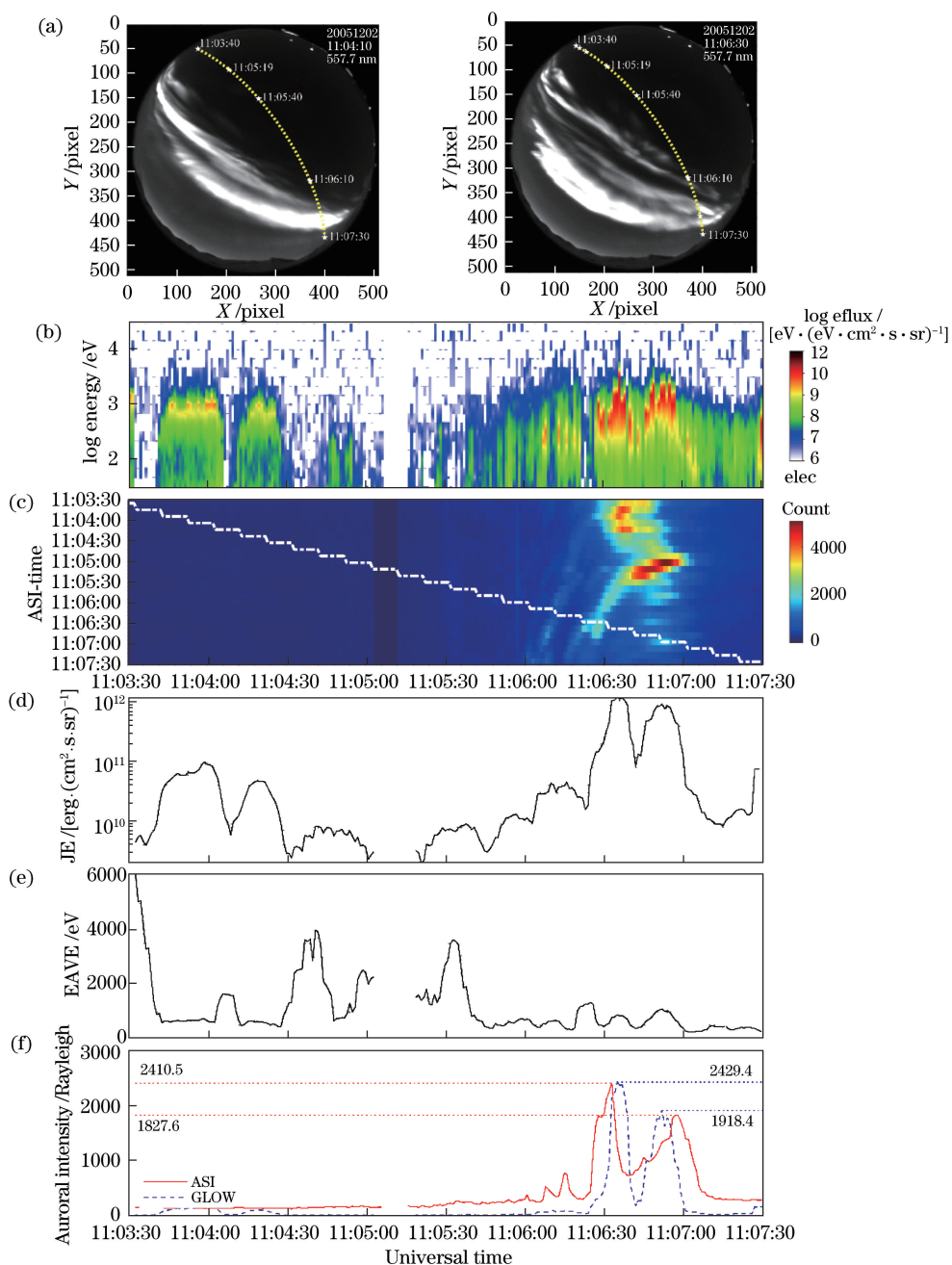


图 5 2005 年 12 月 2 日 11:03:33—11:07:34 UT DMSP F16 卫星穿越黄河站全天空成像仪视场事件。(a) DMSP 卫星在全天空图像中的轨迹投影;(b)电子能谱图;(c) Keogram;(d)沉降电子能通量;(e)沉降电子平均能量;(f)极光激发强度

Fig. 5 An event of DMSP F-16 satellite crossing all-sky field of view from 11:03:33 UT to 11:07:34 UT on December 2, 2005. (a) Trajectory of DMSP satellite projected onto all-sky images; (b) electron spectroscopy; (c) Keogram; (d) energy flux of precipitating electrons; (e) average energy of precipitating electrons; (f) auroral emission intensity

5 结 论

本文提出一种基于恒星辐射稳定性对全天空成像仪进行“辐射强度-图像数值”的辐射参数定标的方法。该方法把全天空视野中的恒星作为“虚拟标准光源”,可以快速对任意场地的全天空成像仪进行

辐射参数定标。利用该方法对黄河站 2005 年的全天空成像仪进行了辐射定标,并通过恒星亮度以及全天空成像仪和 DMSP F16 卫星联合观测事件中获得的沉降粒子数据对定标结果进行了验证。恒星亮度验证中,5 颗恒星亮度 2003 年和 2005 年的偏差最大值为 12.22%,平均偏差为 4.624%。卫星沉

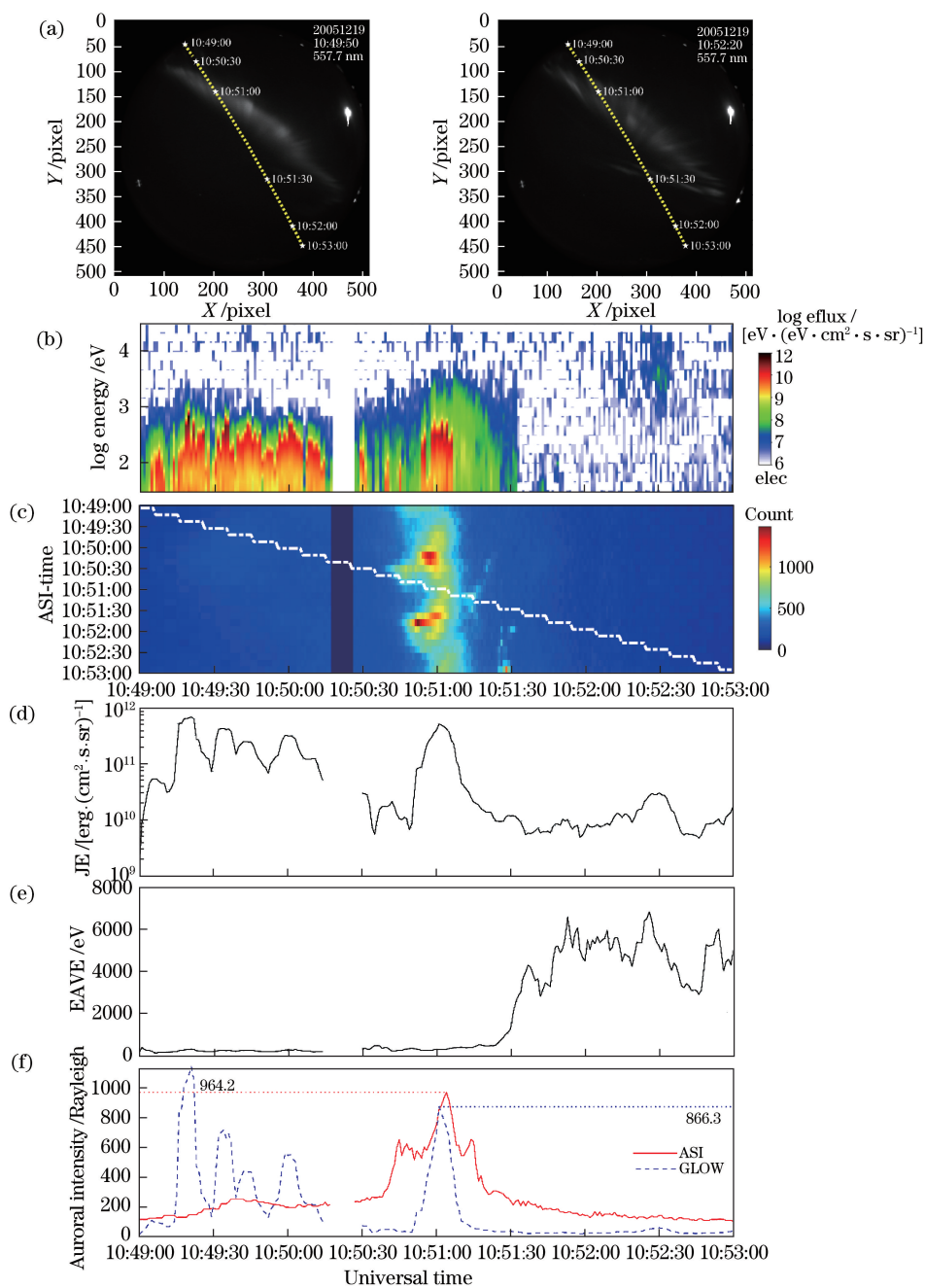


图 6 2005 年 12 月 19 日 10:49:50—10:52:20 UT DMSP F16 卫星穿越黄河站全天空成像仪视场事件。(a) DMSP 卫星在全天空图像中的轨迹投影;(b)电子能谱图;(c) Keogram;(d)沉降电子能通量;(e)沉降电子平均能量;(f)极光激发强度

Fig. 6 An event of DMSP F-16 satellite crossing all-sky field of view from 10:49:50 UT to 10:52:20 UT on December 19, 2005. (a) Trajectory of DMSP satellite projected onto all-sky images; (b) electron spectroscopy; (c) Keogram; (d) energy flux of precipitating electrons; (e) average energy of precipitating electrons; (f) auroral emission intensity

降粒子验证中,利用 GLOW 模型计算出的 3 个极光弧峰值强度与全天空观测获得的极光弧峰值强度的偏差最大值为 11.30%,平均偏差为 5.603%。两种不同验证方法获得的平均偏差结果相近,证明了本文所提定标方法的有效性,所得到的定标结果是可信的。该方法可以推广到具有全天空成像仪的各

类极光和气辉观测台站,用于全天空成像仪辐射系数的快速再定标。

参 考 文 献

[1] Xu J Y, Li Q Z, Yue J, et al. Concentric gravity waves over Northern China observed by an airglow imager network and satellites[J]. Journal of Geophysical

- Research: Atmospheres, 2015, 120(21): 11058-11078.
- [2] Wang C M, Li Q Z, Xu J Y, et al. Gravity wave characteristics from multi-stations observation with OH all-sky airglow imagers over mid-latitude regions of China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(5): 1566-1577.
王翠梅, 李钦增, 徐寄遥, 等. 基于多台站 OH 全天空空气辉成像仪观测的中国中纬地区重力波传播特性 [J]. 地球物理学报, 2016, 59(5): 1566-1577.
- [3] Hu Z J, Yang H, Huang D, et al. Synoptic distribution of dayside aurora: multiple-wavelength all-sky observation at Yellow River Station in Ny-Ålesund, Svalbard [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2009, 71(8/9): 794-804.
- [4] Hu Z J, He F, Liu J J, et al. Multi-wavelength and multi-scale aurora observations at the Chinese Zhongshan Station in Antarctica [J]. Polar Science, 2017, 14: 1-8.
- [5] Hu Z J, Yang H, Liang J, et al. The 4-emission-core structure of dayside aurora oval observed by all-sky imager at 557.7 nm in Ny-Ålesund, Svalbard [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2010, 72(7/8): 638-642.
- [6] Hu Z J, Yang H G, Han D S, et al. Dayside auroral emissions controlled by IMF: a survey for dayside auroral excitation at 557.7 and 630.0 nm in Ny-Ålesund, Svalbard [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2012, 117(A2): A02201-A02214.
- [7] Hu Z J, Yang H G, Hu H Q, et al. The hemispheric conjugate observation of postnoon "bright spots"/auroral spirals [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2013, 118(4): 1428-1434.
- [8] Hu Z J, Ebihara Y, Yang H G, et al. Hemispheric asymmetry of the structure of dayside auroral oval [J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(24): 8696-8703.
- [9] Hu Z J, Yang Q J, Liang J M, et al. Variation and modeling of ultraviolet auroral oval boundaries associated with interplanetary and geomagnetic parameters [J]. Space Weather, 2017, 15(4): 606-622.
- [10] Hu Z J, Yang H G, Ebihara Y, et al. Surveys of 557.7/630.0 nm dayside auroral emissions in Ny-Ålesund, Svalbard, and south pole station [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2017: 143-154.
- [11] Qiu Q, Yang H G, Lu Q M, et al. Widths of dayside auroral arcs observed at the Chinese Yellow River Station [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2013, 102: 222-227.
- [12] Qiu Q, Yang H G, Lu Q M, et al. Orientation variation of dayside auroral arc alignments obtained from all-sky observation at Yellow River station, Svalbard [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2016, 142: 20-24.
- [13] Shi R, Hu Z J, Ni B B, et al. Modulation of the dayside diffuse auroral intensity by the solar wind dynamic pressure [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2014, 119(12): 10092-10099.
- [14] Qiu Q, Yang H G, Lu Q M, et al. Correlation between emission intensities in dayside auroral arcs and precipitating electron spectra [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(2): 489-498.
丘琪, 杨惠根, 陆全明, 等. 日侧极光弧的发光强度与沉降电子能谱的相关关系 [J]. 地球物理学报, 2017, 60(2): 489-498.
- [15] Xing Z Y, Yang H G, Wu Z S, et al. A parameter model of auroral emissions and particle precipitation near magnetic noon [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(7): 2163-2170.
邢赞扬, 杨惠根, 吴振森, 等. 磁正午附近极光强度与沉降粒子能量关系的参数模型 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2163-2170.
- [16] Kaeppler S R, Hampton D L, Nicolls M J, et al. An investigation comparing ground-based techniques that quantify auroral electron flux and conductance [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2015, 120(10): 9038-9056.
- [17] Rees M H, Luckey D. Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions 1. Model computations [J]. Journal of Geophysical Research, 1974, 79(34): 5181-5186.
- [18] Xu H Y, Zhang L M, Huang W X, et al. On-board absolute radiometric calibration and validation based on solar diffuser of HY-1C SCS [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0928002.
许和鱼, 张黎明, 黄文薪, 等. 基于 HY-1C SCS 太阳漫反射板的星上绝对辐射定标与验证 [J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0928002.
- [19] He X W, Han Q, Feng X H, et al. Calibration accuracy evaluation of visible and near-infrared bands of FY-3B MERIS [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1828001.
何兴伟, 韩琦, 冯小虎, 等. FY-3B 卫星 MERIS 可见光近红外波段定标精度评估 [J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1828001.
- [20] Zhang H P, Hu Z J, Hu Y G, et al. Calibration and verification of all-sky auroral image parameters by star maps [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(2): 401-411.
张会朋, 胡泽骏, 胡耀垓, 等. 基于星点的全天空极

- 光图像参数标定及其验证[J]. 地球物理学报, 2020, 63(2): 401-411.
- [21] Xu H Y, Zhang L M, Li X, et al. A relative radiometric calibration method based on solar diffuser research for a linear array CCD detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0628002.
许和鱼, 张黎明, 李鑫, 等. 基于太阳漫反射板线阵 CCD 相对辐射定标方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0628002.
- [22] Zhang W Y. Research on camera on-orbit radial calibration and ground verification methods based on infrared catalog extrapolation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2017: 1-8.
张婉莹. 基于红外星表外推的相机在轨辐射定标及地面验证方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2017: 1-8.
- [23] Li M F, Hu Y D, Cui S S, et al. Design and testing of a portable multichannel reference light source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 2001003.
李孟凡, 胡亚东, 崔珊珊, 等. 便携式多通道辐射参考光源的设计与测试[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2001003.
- [24] Megessier C. Accuracy of the astrophysical absolute flux calibrations: visible and near-infrared [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1995, 296(3): 771-778.
- [25] Inglis S J. Planets, Stars, and Galaxies[M]. Li Z S, Li Z W, He X T, et al, Transl. Beijing: Science Press, 1979: 258-259.
英格利斯 S J. 行星 恒星 星系[M]. 李致森, 李宗伟, 何香涛, 等, 译. 北京: 科学出版社, 1979: 258-259.
- [26] Liu X F. Fundamental astronomy [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 11-11.
刘学富. 基础天文学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 11-11.
- [27] Yang H G, Liu R Y, Natsuo S. Intensity correction in all-sky auroral image projection transform [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(8): 700-703.
- [28] Meng C I. Simultaneous observations of low-energy electron precipitation and optical auroral arcs in the evening sector by the DMSP 32 satellite[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1976, 81(16): 2771-2785.
- [29] Bailey S M, Barth C A, Solomon S C. A model of nitric oxide in the lower thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, 107(A8): 1205-1216.
- [30] Nagy A F, Banks P M. Photoelectron fluxes in the ionosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(31): 6260-6270.
- [31] Solomon S C, Hays P B, Abreu V J. The auroral 6300 Å emission: observations and modeling [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1988, 93(A9): 9867-9882.
- [32] Solomon S C, Abreu V J. The 630 nm dayglow[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1989, 94(A6): 6817-6824.
- [33] Solomon S C. Auroral particle transport using Monte Carlo and hybrid methods[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, 106(A1): 107-116.
- [34] Solomon S C, Bailey S M, Woods T N. Effect of solar soft X-rays on the lower ionosphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(11): 2149-2152.