

胡泽骏, 李国君, 韩冰, 黄德宏, 李斌. 2027. 基于梯度下降法和星图的全天空极光成像仪几何定标及验证[J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 58(1): 120-128. doi: [10.19975/j.dqyxx.2025-054](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2025-054).

Hu Z J, Li G J, Han B, Huang D H, Li B. 2027. Geometric calibration of all-sky auroral imager based on gradient descent method and the star maps[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 58(1): 120-128 (in Chinese). doi:[10.19975/j.dqyxx.2025-054](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2025-054).

基于梯度下降法和星图的全天空极光成像仪几何定标及验证

胡泽骏^{1,3,4*}, 李国君^{1,2}, 韩冰², 黄德宏^{1,4}, 李斌^{1,3}

1 中国极地研究中心 (中国极地研究所) 极区空间物理与天文研究所, 上海 200136

2 西安电子科技大学 工程学院, 西安 710071

3 中国极地研究中心 (中国极地研究所) 北极黄河地球系统国家野外科学观测研究站, 上海 200136

4 中国极地研究中心 (中国极地研究所) 南极中山雪冰和空间特殊环境与灾害国家野外科学观测研究站, 上海 200136

摘要: 全天空成像仪是一种重要的地基极光观测设备, 精确的“物-像”光学几何对应关系是获取极光结构尺度、实现全天空成像仪与卫星联合观测的基础. 本文提出一种基于梯度下降法和星图的全天空成像仪几何定标方法, 该方法通过确定星图中各星点在全天空图像中的坐标, 并利用梯度下降法确定天顶在全天空图像中的像素点位置、地理方位以及视野范围内成像半径和天顶角的关系. 在两个不同时刻的全天空图像中分别标出了 26 颗和 22 颗星点, 结合对应的星空图对定标结果进行了验证. 验证结果显示, 恒星方位角误差绝对值平均分别为 0.1547° 和 0.2062° , 天顶角误差绝对值平均分别为 0.1076° 和 0.1133° , 这表明本文提出的定标方法是准确而有效的.

关键词: 极光成像仪; 星图; 几何定标

doi: [10.19975/j.dqyxx.2025-054](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2025-054)

中图分类号: P353.6

文献标识码: A

Geometric calibration of all-sky auroral imager based on gradient descent method and the star maps

Hu Zejun^{1,3,4*}, Li Guojun^{1,2}, Han Bing², Huang Dehong^{1,4}, Li Bin^{1,3}

1 Center for Space Physics and Astronomy, Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China

2 School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

3 Arctic Yellow River Earth System National Observation and Research Station, Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China

4 Antarctic Zhongshan Ice and Space Environment National Observation and Research Station, Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China

Abstract: The all-sky imager is an important ground-based auroral observation equipment. Accurate optical geometric correspondence between "object-image" is the foundation for obtaining the structural scale of auroras and achieving joint observations between the all-sky imager and satellites. This paper proposes a geometric calibration method for all-sky imagers based on gradient descent and star maps. This method determines the coordinates of each star point in the star map within the all-sky image, and uses gradient descent to determine the pixel position of the zenith in the all-sky image, as well as the relationship between the imaging radius and zenith angle within the field of view. 26 and 22 star points were marked in all-sky images taken at two different times, respectively, and the calibration results were verified by comparing them with the corresponding star maps. The verification results

收稿日期: 2025-11-11; 录用日期: 2026-01-04

Received Date: 2025-11-11; Accepted Date: 2026-01-04

*通信作者: 胡泽骏 (1978-), 男, 研究员, 主要从事极光物理、极区空间物理/空间天气的研究. E-mail:

huzejun@pric.org.cn



showed that the absolute values of the stellar azimuth angle errors were 0.1547° and 0.2062° on average, and the absolute values of the zenith angle errors were 0.1076° and 0.1133° on average, respectively. This indicates that the calibration method proposed in this paper is accurate and effective.

Keywords: auroral imager; star map; geometric calibration

0 引 言

全天空成像仪是一种重要的地基光学观测设备, 由于采用了 180° 视场角的鱼镜头, 能够同时对全天空范围内的观测目标进行成像, 因而被广泛应用于极光、气辉、天空亮度、云层以及气溶胶的观测中 (Kazantzidis et al., 2017; Sigernes et al., 2014; Tohsing et al., 2014; Voss and Zibordi, 1989; 王翠梅等, 2016; Xu et al., 2015). 在极光观测领域, 通过全天空极光图像能够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、运动速度以及不同谱线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和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 (Hu et al., 2009, 2010, 2012, 2013, 2014, 2017a, 2017b, 2017c; Qiu et al., 2013, 2016; Shi et al., 2014), 因此, 全天空成像仪对于研究磁层结构、反演沉降粒子特性以及空间动力学过程都是很重要的. 准确的“物-像”光学几何对应关系是确定全天空极光图像到地理、地磁坐标系投影变换以及实现全天空成像仪与卫星联合观测的基础; 同时, 根据全天空成像仪“物-像”光学几何对应关系, 能够获取极光结构的实际尺度大小, 而极光结构的尺度则与粒子沉降过程中的加速过程、波粒相互作用紧密相关 (Chaston et al., 2003; Qiu et al., 2016; 丘琪等, 2017). 因此, 对全天空成像仪进行几何定标, 获得精确的“物-像”光学几何对应关系, 对于研究相关的物理过程和机制是极其重要的. 在全天空成像仪的“物-像”光学几何对应关系中, 天顶在全天空图像中的像素点位置、全天空图像的方位信息和天顶角与成像半径的关系是最重要的三个参数.

目前, 对全天空成像仪进行几何定标最常用的方法是: 根据鱼镜头等距离投影的原理, 将图像中像素点到图像中心点的距离 r (单位: 像素) 与目标点相对于镜头的视角 θ 的关系表示为 $r = f \cdot \theta$ 形式的线性关系, 在实验室条件下, 通过旋转相机改变视角 θ , 拍摄多组图像, 确定 r 与 θ 的系数 (Huo and Lu, 2009; Kazantzidis et al., 2017). 然而, 这种

定标方法需要专门的定标设备, 且通常需要在专门的光学暗室中进行, 而在全天空成像仪的实际使用过程中, 由于成像固件 (CCD 等)、光路镜头更新、设备维修, 全天空成像仪的“物-像”关系均会发生变化, 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, 进行实验室重新定标是一件非常困难的事情; 此外, 这种方法不能确定全天空图像中天顶的像素点位置以及方位信息. 张会朋等 (2020) 利用星点实现了对全天空成像仪的几何定标, 确定了全天空图像中天顶的像素点位置、方位信息以及成像半径与天顶角的关系. 但是, 该方法利用三角测量定位法确定全天空图像中的天顶位置, 计算过程复杂; 利用单颗星点确定方位信息, 存在偶然误差; 拟合成像半径与天顶角的关系时所使用的星点数量较少, 难以保证较高的精度. 本文提出一种基于星点的全天空成像仪自动几何定标方法, 并且对定标结果进行了验证. 这种方法不仅能够对任意地点的全天空成像仪进行几何定标, 而且不需要手工计算, 从而能够实现对任意地点全天空成像仪的自动、快速、精确几何定标.

1 设备与数据

北极黄河站的地理坐标为 78.92°N 、 11.93°E , 位于斯瓦尔巴特 (Svalbard) 群岛新奥尔松 (Ny-Ålesund) 地区, 修正地磁纬度为 76.24°MLAT . 黄河站于 2003 年 12 月安装了 3 台全天空成像仪, 分别观测 427.8 nm、557.7 nm 和 630.0 nm 三个不同谱线的极光. 三台全天空成像仪的配置相同, 光学镜头采用 Nikon 公司视场角为 180° 的 ASI-2, CCD 相机采用 Hamamatsu 公司的 C4880-21-24A. 三台全天空成像仪通过一台公共的 GPS 接收机获得时间信号, 因而能够对三个不同谱线的极光进行同步观测. 常规模式下, 全天空成像仪的采样时间分辨率为 10 s, 其中曝光 7 s, 数据读取和存储 3 s (Hu et al., 2009). 全天空极光图像大小 512×512 像素, 图 1 为 557.7 nm 谱线的全天空极光图像样例. 全天空图像坐标系 X 轴水平向右, Y 轴垂直向下, 坐标原点 O 在图像的左上角, X 轴和 Y 轴的起始点均

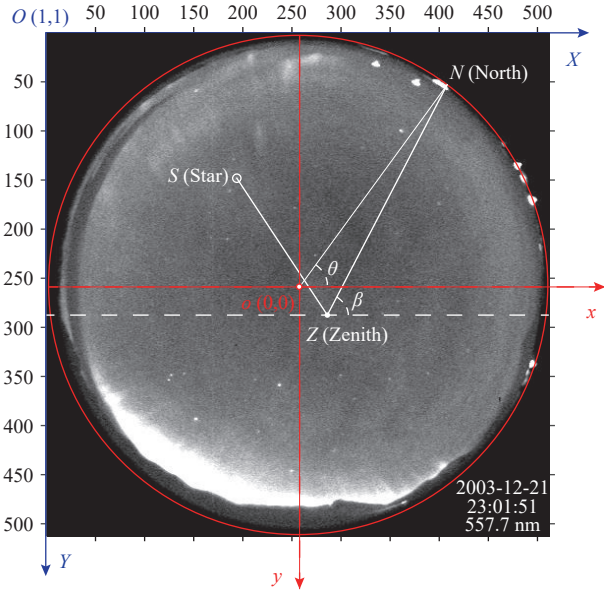


图1 天顶定位与方位确定原理示意图 (黄河站极光全天空图像, 拍摄日期: 2003 年 12 月 21 日, 拍摄时间: 23:01:51 UT, 拍摄谱线: 557.7 nm)

Fig. 1 Zenith positioning and azimuth determination principle (Aurora all-sky image from Yellow River Station, Date: December 21, 2003, Time: 23:01:51 UT, Wavelength: 557.7 nm)

为 1. 本文以黄河站 557.7 nm 谱线的全天空图像数据为例对本方法的实现过程进行阐述, 并对结论的有效性和准确性进行验证 (因为恒星的光谱通常是连续的, 在其他可见光极光谱线上仍然能看到对应的恒星星图, 所以本方法也适用于其他可见光谱线的全天空极光成像仪的几何标定)。

2 定标原理与方法

2.1 梯度下降法

梯度下降法是 1874 年由法国数学家 Cauchy 提出来的, 又称为最速下降法. 梯度下降法的基本思想是: 从当前点出发, 取函数值下降最快的方向为搜索方向, 以一定的步长对自变量进行更新, 寻找函数的极小值 (Boyd and Vandenberghe, 2004)。

设目标函数 $f: R^n \rightarrow R^1$ 一阶连续可微, $\mathbf{d}$ 为单位向量, λ 为一正值标量, 将函数 $f(\mathbf{x}^{(k)} + \lambda \mathbf{d})$ 在 $\mathbf{x}^{(k)}$ 处进行泰勒展开:

$$f(\mathbf{x}^{(k)} + \lambda \mathbf{d}) = f(\mathbf{x}^{(k)}) + \lambda \nabla f(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{d} + o(\lambda \mathbf{d}) \quad (1)$$

计算函数 f 在 $\mathbf{x}^{(k)}$ 处的变化率:

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{f(\mathbf{x}^{(k)} + \lambda \mathbf{d}) - f(\mathbf{x}^{(k)})}{\lambda} = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{\lambda \nabla f(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{d} + o(\lambda \mathbf{d})}{\lambda} \quad (2)$$

忽略高阶无穷小:

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{f(\mathbf{x}^{(k)} + \lambda \mathbf{d}) - f(\mathbf{x}^{(k)})}{\lambda} = \nabla f(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{d} \quad (3)$$

要使 f 在 $\mathbf{x}^{(k)}$ 处下降得最快, 则 $\nabla f(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{d}$ 应该为负值且绝对值最大. 又因为:

$$|\nabla f(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{d}| = |\nabla f(\mathbf{x}^{(k)})| \cdot |\mathbf{d}| \cdot |\cos \theta| \quad (4)$$

其中, $\nabla f(\mathbf{x}^{(k)})$ 为函数 f 在 $\mathbf{x}^{(k)}$ 处的梯度, $\mathbf{d}$ 为搜索方向, θ 为 $\nabla f(\mathbf{x}^{(k)})$ 和 $\mathbf{d}$ 的夹角. 所以当:

$$\cos \theta = -1 \quad (5)$$

函数 f 在 $\mathbf{x}^{(k)}$ 处的函数值下降得最快, 此时, $\mathbf{d}$ 为梯度的负方向. 即, 对于一阶连续的目标函数 f , 目标函数的函数值下降最快的方向为梯度的负方向.

利用梯度下降法求解目标函数 f 的极小值的具体步骤为:

(1) 选取初始点 $\mathbf{x}^{(k)}$, 给定足够大的迭代停止次数 K , 初始化当前迭代次数 $k=0$;

(2) 计算 f 在 $\mathbf{x}^{(k)}$ 处的梯度 $\nabla f(\mathbf{x}^{(k)})$, 若 $k=K$, 则停止算法, 输出 $\mathbf{x}^{(k)}$, 对应的 $f(\mathbf{x}^{(k)})$ 即为极小值; 否则, 令 $\mathbf{d}^{(k)} = -\nabla f(\mathbf{x}^{(k)})$;

(3) 以 λ 为步长, 更新 $\mathbf{x}^{(k)}$, $\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \lambda \cdot \mathbf{d}^{(k)}$, $k = k + 1$, 返回步骤 (2)。

2.2 天顶和方位定标原理

如图 1 所示, 在全天空图像中建立坐标系 xoy , 坐标原点 o 在全天空图像的正中心处, x 轴水平向右, y 轴垂直向下. 圆 O 与全天空图像的边沿相切, 圆心在坐标原点 o 处, 半径为 255.5 像素, 方程为:

$$x^2 + y^2 = 255.5^2 \quad (6)$$

设全天空图像中天顶的像素点位置为 $Z(x_z, y_z)$, 由天顶指向正北方向的射线与圆 O 相交于点 N , 射线 oN 与 x 正向夹角为 θ , 则 N 点的坐标为 $(255.5 \cos \theta, -255.5 \sin \theta)$.

设在全天空图像中存在 m 个星点, 坐标分别为 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_m, y_m)\}$, 方位角分别为 $\{Az_1, Az_2, \dots, Az_i, \dots, Az_m\}$. 对于第 i 个星点, 计算角 $\angle S_i Z N$ 的大小:

$$\angle S_i Z N = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{ZN} \cdot \mathbf{ZS}_i}{|\mathbf{ZN}| \cdot |\mathbf{ZS}_i|} \right) \quad (7)$$

构建误差项 $error_i$:

$$error_i = \begin{cases} \angle S_i Z N - Az_i & , Az_i \leq 180^\circ \\ \angle S_i Z N - (360^\circ - Az_i) & , Az_i > 180^\circ \end{cases} \quad (8)$$

全部星点的误差函数 $error$ 为:

$$\text{error} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \text{error}_i^2 \quad (9)$$

误差函数一阶连续可微, 求解误差函数关于参数 x_Z 、 y_Z 和 θ 的导数, 分别为 error'_{x_Z} 、 error'_{y_Z} 和 error'_{θ} . 为求得误差函数的极小值, 沿梯度的反方向更新各参数:

$$x_Z^{(k+1)} = x_Z^{(k)} - \lambda_1 \cdot \text{error}'_{x_Z^{(k)}} \quad (10)$$

$$y_Z^{(k+1)} = y_Z^{(k)} - \lambda_1 \cdot \text{error}'_{y_Z^{(k)}} \quad (11)$$

$$\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} - \lambda_2 \cdot \text{error}'_{\theta^{(k)}} \quad (12)$$

其中, k 为当前迭代次数, λ_1 为 x_Z 和 y_Z 的更新步长, λ_2 为 θ 的更新步长.

经过 K 次迭代后, 误差函数关于 $x_Z^{(K)}$ 、 $y_Z^{(K)}$ 和 $\theta^{(K)}$ 的导数均为 0, 误差函数取得极小值. 此时, 全天空图像中天顶的坐标为 $Z(x_Z^{(K)}, y_Z^{(K)})$, N 的坐标为 $(255.5 \cos \theta^{(K)}, -255.5 \sin \theta^{(K)})$, ZN 与 $y = y_Z^{(K)}$ 正方向

的夹角 β 为:

$$\beta = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{y_Z^{(K)} + 255.5 \sin \theta^{(K)}}{255.5 \cos \theta^{(K)} - x_Z^{(K)}} \right), & 255.5 \cos \theta^{(K)} \geq x_Z^{(K)} \\ \tan^{-1} \left(\frac{y_Z^{(K)} + 255.5 \sin \theta^{(K)}}{255.5 \cos \theta^{(K)} - x_Z^{(K)}} \right) + 180^\circ, & 255.5 \cos \theta^{(K)} < x_Z^{(K)} \end{cases} \quad (13)$$

因为全天空图像中的天顶位置和正北方位都具有唯一性, 因此误差函数的极小值即为最小值, 上述过程求得的参数即为最优参数.

2.3 天顶和方位定标实现

(1) 选择多张星点清晰的全天空图像 (如图 2a 所示). 全天空成像仪会因为故障进行维修, 这可能会导致成像仪的“物-像”关系发生变化. 所以进行定标图像选择时, 必须保证在此期间内全天空成像仪的“物-像”光学几何关系没有发生变化.

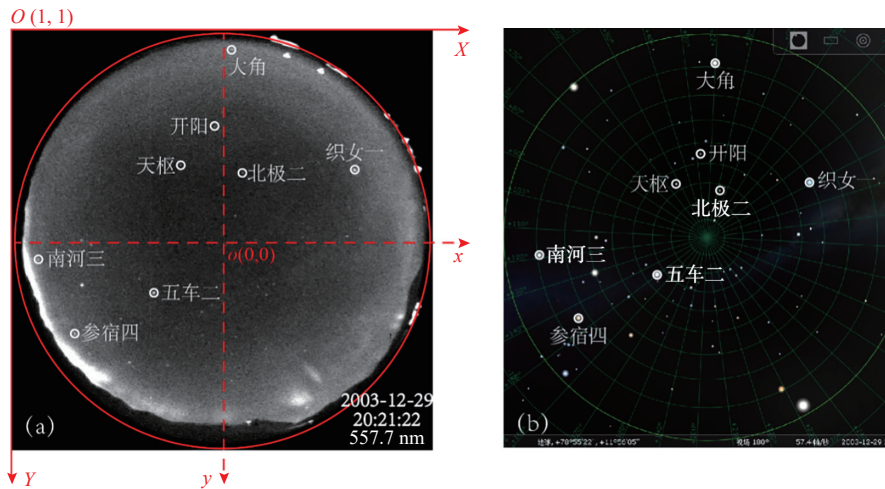


图 2 (a) 全天空图像中的星点分布; (b) Stellarium 中相应时间的星图

Fig. 2 (a) Stellar stars point distribution in all-sky image; (b) The corresponding star chart for that time in Stellarium

(2) 标出全天空图像中的星点, 并确定星点在 xoy 坐标系下的坐标. 全天空图像坐标系 XOY 下的星点 $S_i(X_i, Y_i)$ 在 xoy 下的坐标为:

$$\begin{cases} x_i = X_i - 256.5 \\ y_i = Y_i - 256.5 \end{cases} \quad (14)$$

(3) 采用星空软件 Stellarium (Zotti et al., 2021) 确定对应全天空图像时间 (2003-12-29 20:21:22 UT) 与地点 (78.92°N, 11.93°E) 的星图, 如图 2b 所示. 本文对 2003 年 12 月 21 日到 29 日的北极二、开阳、天枢、织女一、五车二、南河三、参宿四、大角以及木星进行了标记, 共获得

129 颗星点, 部分星点对应的全天空图像获取时间以及图像中星点的像素点坐标、方位角和高度角等信息如表 1 所示.

(4) 利用梯度下降法确定全天空图像中的天顶和方位. 本文中最大迭代次数设置为 100. 误差函数值与迭代次数的曲线图如图 3 所示, 得到全天空图像中的天顶的像素点位置与地理方位信息如图 4 所示, 其中天顶 Z 在全天空图像坐标系 XOY 下的坐标为 (258.8622, 256.6155), 由天顶指向正北方向的射线与 $y = 256.6155$ 的夹角为 67.2342° . 初始设置的天顶位置为图像中心, 和实际天顶位置很

表 1 部分星点的信息

Table 1 Information on stellar stars

恒星	日期	时间(UT)	坐标		坐标		方位角Az/(°)	高度角Alt/(°)
			X	Y	x	y		
北极二	2003-12-21	18:39:51	307	189	50.5	-67.5	347.3986	63.4961
	2003-12-22	21:40:21	270	174	13.5	-82.5	15.3283	63.7049
开阳	2003-12-21	22:25:51	206	137	-50.5	-119.5	46.4397	48.0271
	2003-12-22	10:20:51	332	318	75.5	61.5	252.3676	59.7259
天枢	2003-12-22	07:53:12	318	302	61.5	45.5	255.5847	66.4779
	2003-12-22	23:00:01	184	210	-72.5	-46.5	81.1094	62.0372
五车二	2003-12-21	22:25:51	218	351	-38.5	94.5	178.9986	57.0821
	2003-12-22	21:44:21	198	341	-58.5	84.5	166.9950	56.8616
织女一	2003-12-21	19:09:51	428	242	171.5	-14.5	297.6014	34.2880
	2003-12-22	22:00:51	391	127	134.5	-129.5	336.9996	28.6984
南河三	2003-12-21	22:46:21	79	381	-177.5	124.5	147.7001	14.6419
	2003-12-29	20:32:22	35	290	-221.5	33.5	121.6719	11.1574
参宿四	2003-12-22	18:31:51	33	245	-223.5	-11.5	110.2239	11.4061
	2003-12-29	20:32:22	84	380	-172.5	123.5	147.8023	16.8577
大角	2003-12-22	19:06:41	38	280	-218.5	23.5	355.7643	8.1111
	2003-12-29	20:21:22	267	25	10.5	-231.5	20.2045	8.7899
木星	2003-12-22	23:28:21	29	219	-227.5	-37.5	103.7603	8.3187

接近, 所以误差函数在迭代数次后就能快速地收敛到最小值 (如图 3 所示)。

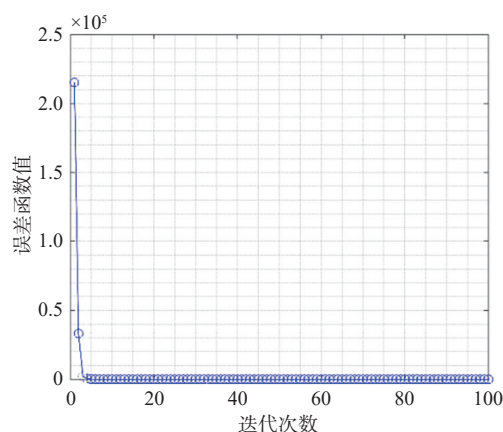


图 3 误差函数值随迭代次数的变化曲线

Fig. 3 The curve of the error function value versus the number of iterations

2.4 天顶角与成像半径拟合关系

星点天顶角与成像半径的散点图如图 5a 所示, 从图中可以看出, 天顶角与成像半径近似成线性关系, 但是并不是严格的直线. 分别做了一次函数到四次函数的拟合试验, 以像素半径与天顶角的拟合为例, 天顶角的 RMSE (均方根误差) 值分别是 1.0841、0.3574、0.1386、0.1211. 考虑到公式的简洁性, 所以采用三次函数进行拟合, 拟合结果如

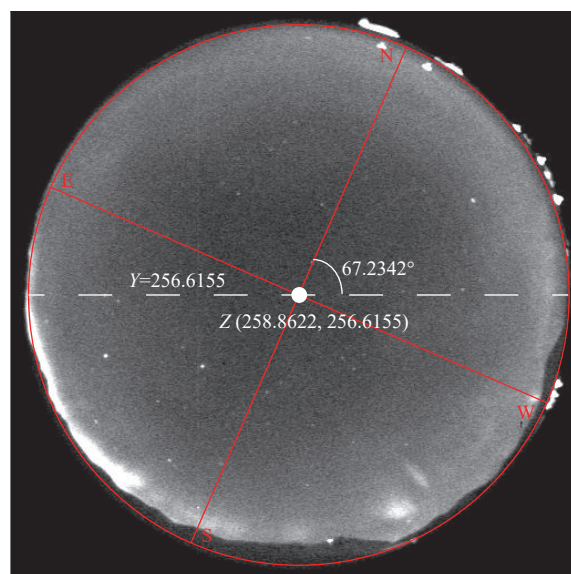


图 4 定标得到的全天空图像中天顶坐标与方位信息

Fig. 4 The zenith coordinates and azimuth information in the all-sky image obtained by calibration

图 5a 中的蓝色曲线所示, 方程为:

$$\theta = 2.001 \times 10^{-6} r^3 - 4.766 \times 10^{-4} r^2 + 0.3581r - 1.192 \quad (15)$$

星点成像半径与天顶角的散点图如图 5b 所示, 拟合结果如图 5b 中蓝色曲线所示, 方程为:

$$r = -8.754 \times 10^{-5} \theta^3 + 4.565 \times 10^{-3} \theta^2 + 3.044\theta + 1.238 \quad (16)$$

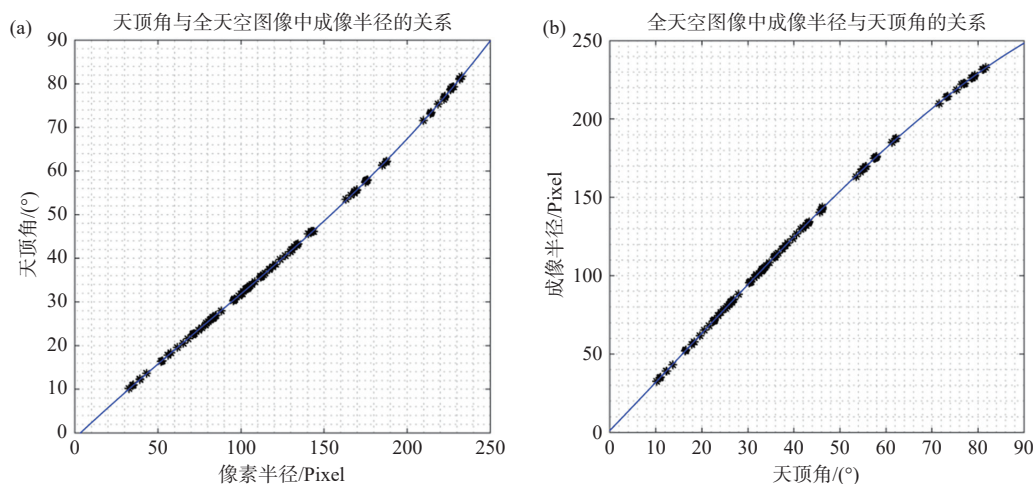


图 5 天顶角与全天空图像中成像半径的关系. (a) 天顶角与成像半径散点分布及拟合; (b) 成像半径与天顶角的散点分布及拟合

Fig. 5 The relationship between zenith angle and imaging radius in all sky images. (a) Scatter distribution and fitting of zenith angle and imaging radius; (b) Scatter distribution and fitting of imaging radius and zenith angle

其中, r 为成像半径, 单位为像素, θ 为天顶角, 单位为度.

3 定标结果验证

为了评估本方法的有效性和定标结果的准确性, 本文选取两个不同时刻的全天空图像对定标结果进行验证. 2003 年 12 月 28 日 19:55:01 UT 时, 全天空图像如图 6a 所示, 对应的星空图如图 6b 所示. 全天空图像中共标出了 26 颗星点, 将星空图中星点的方位角和天顶角作为真实值, 根据定标结果以及星点在全天空图像中的位置坐标, 计算各星点的方位角和天顶角, 结果如表 2 所示. 星点方位角的计算公式为:

$$Az_i = \begin{cases} 180^\circ + \arctan\left(\frac{Y_i - Y_z}{X_z - X_i}\right) - \beta, & X_i < X_z \\ \arctan\left(\frac{Y_i - Y_z}{X_z - X_i}\right) - \beta, & X_i > X_z, Y_i \leq Y_z, \arctan\left(\frac{Y_i - Y_z}{X_z - X_i}\right) \geq \beta \\ 360^\circ + \arctan\left(\frac{Y_i - Y_z}{X_z - X_i}\right) - \beta, & X_i > X_z, Y_i \leq Y_z, \arctan\left(\frac{Y_i - Y_z}{X_z - X_i}\right) < \beta \\ 360^\circ + \arctan\left(\frac{Y_i - Y_z}{X_z - X_i}\right) - \beta, & X_i > X_z, Y_i \geq Y_z \\ 90^\circ - \beta, & X_i = X_z, Y_i < Y_z \\ 270^\circ - \beta, & X_i = X_z, Y_i > Y_z \end{cases} \quad (17)$$

其中, X_i 和 Y_i 分别为星点在全天空图像坐标系 XOY 下的横坐标和纵坐标, X_z 和 Y_z 分别为天顶在全

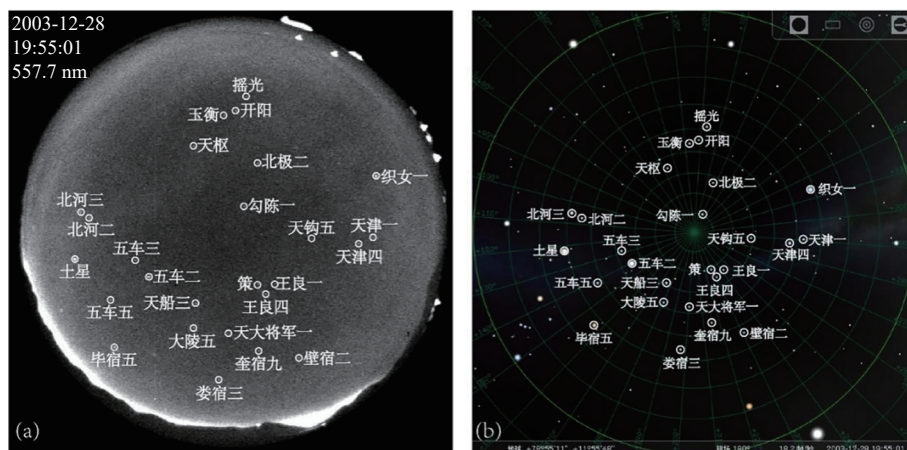


图 6 2003 年 12 月 28 日 19:55:01 UT 定标结果验证. (a) 黄河站的全天空图像; (b) 对应的星空图

Fig. 6 Verification of calibration results at 19:55:01 UT on December 28, 2003. (a) All-sky image at Yellow River Station; (b) Star chart at same time

表 2 2003 年 12 月 28 日 19:55:01 UT 时的星点信息

Table 2 Information of stellar stars at 19:55:01 UT on December 28, 2003

恒星名	坐标		方位角			天顶角		
	X	Y	计算值/(°)	真实值/(°)	误差/(°)	计算值/(°)	真实值/(°)	误差/(°)
勾陈一	272	226	359.541	359.412	0.128	10.283	10.369	-0.086
天枢	214	157	47.010	46.832	0.178	34.852	34.809	0.042
玉衡	249	122	26.956	26.992	-0.036	43.381	43.620	-0.240
开阳	263	116	21.080	21.201	-0.120	45.323	45.229	0.094
摇光	275	100	16.883	17.146	-0.263	51.184	51.179	0.005
北极二	288	177	2.664	2.942	-0.278	26.961	26.910	0.051
天钩五	350	263	288.759	288.513	0.245	29.072	29.000	0.072
织女一	424	191	314.436	314.168	0.268	58.619	58.511	0.108
天津四	404	269	287.889	287.693	0.196	47.043	47.089	-0.047
天津一	420	262	290.852	290.521	0.331	52.541	52.825	-0.284
王良四	297	328	230.880	231.149	-0.270	25.729	25.426	0.303
策	288	316	228.901	229.024	-0.123	20.989	20.823	0.166
王良一	308	315	242.851	242.507	0.344	24.249	24.195	0.054
天大将军一	372	254	200.374	200.369	0.004	37.217	37.116	0.101
奎宿九	289	393	215.227	215.148	0.079	44.980	44.989	-0.009
壁宿二	335	401	230.570	230.741	-0.171	53.264	53.439	-0.175
娄宿三	243	426	197.416	197.446	-0.030	55.789	55.868	-0.080
天船三	216	338	174.992	175.222	-0.231	29.271	29.062	0.209
大陵五	214	366	180.466	180.546	-0.080	37.790	37.935	-0.145
五车二	162	308	140.711	140.438	0.273	34.981	34.948	0.033
五车三	146	288	128.306	128.311	-0.005	37.434	37.451	-0.017
五车五	118	334	141.549	141.634	-0.086	52.358	52.412	-0.054
毕宿五	123	388	156.806	156.839	-0.033	62.973	63.193	-0.220
土星	77	287	122.251	122.339	-0.089	61.176	61.284	-0.108
北河二	94	240	107.011	106.853	0.158	54.162	54.227	-0.065
北河三	83	233	105.118	105.122	-0.004	58.523	58.491	0.031

天空图像坐标系 XOY 下的横坐标和纵坐标, β 为由天顶指向正北方向的射线与 $Y = Y_c$ 的夹角. 星点天顶角的计算公式即为公式 (15):

$$\hat{Z}_A = 2.001 \times 10^{-6} r^3 - 4.766 \times 10^{-4} r^2 + 0.3581r - 1.192 \quad (18)$$

其中, r 为星点对应的成像半径. 如表 2 所示, 26 颗星点方位角误差绝对值平均为 0.1547° , 天顶角误差绝对值平均为 0.1076° .

2003 年 12 月 22 日 23:20:21 UT 时, 黄河站全天空图像以及对应的星空图分别如图 7a 和 7b 所示, 对应各星点信息如表 3 所示, 22 颗恒星方位角误差绝对值平均为 0.2062° , 天顶角误差绝对值平均为 0.1133° .

4 结 论

本文提出一种基于星点的全天空成像仪自动几何定标方法. 该方法可以对任意场地的全天空成像仪实现自动、快速、精确地几何定标, 得到全天空图像中天顶的像素点坐标、地理方位信息以及天顶角与成像半径的关系. 利用该方法对黄河站 2003 年 12 月的全天空成像仪进行了几何定标, 并通过 2003 年 12 月 28 日 19:55:01 以及 2003 年 12 月 22 日 23:20:21 两个时刻的全天空图像中的星点以及对应的星空图对定标结果进行了验证. 两个时刻的全天空图像中分别标出了 26 颗和 22 颗恒星, 方位角误差绝对值平均分别为 0.1547°

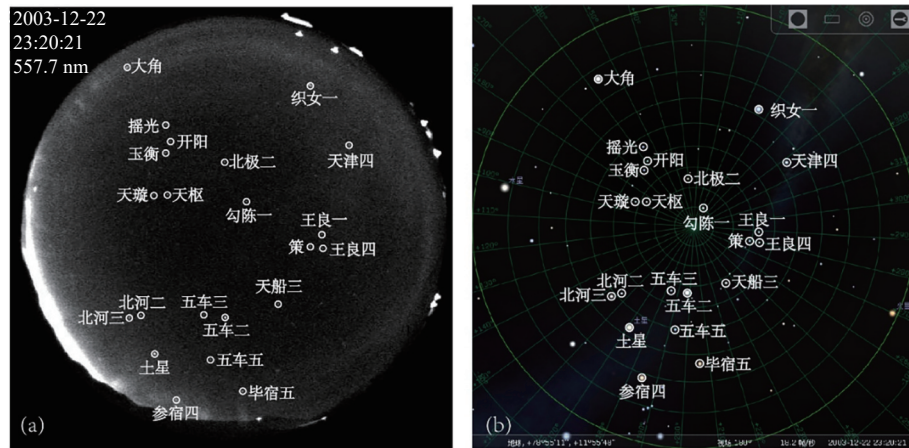


图 7 2003 年 12 月 22 日 23:20:21 UT 时定标结果验证. (a) 黄河站的全天空图像; (b) 对应的星空图

Fig. 7 Verification of calibration results at 23:20:21 UT on December 22, 2003. (a) All-sky image at Yellow River Station; (b) Star chart at same time

表 3 2003 年 12 月 22 日 23:20:21 UT 时的星点信息

Table 3 Information of stellar stars at 23:20:21 UT on December 22, 2003

恒星名	坐标		方位角			天顶角		
	X	Y	计算值/(°)	真实值/(°)	误差/(°)	计算值/(°)	真实值/(°)	误差/(°)
勾陈一	274	226	356.456	356.867	-0.412	10.562	10.675	-0.113
天枢	183	218	85.789	85.902	-0.113	27.072	26.989	0.083
天璇	166	219	90.715	90.468	0.246	31.915	31.876	0.039
玉衡	180	170	65.083	64.836	0.247	37.432	37.488	-0.056
开阳	186	157	58.949	58.846	0.102	39.506	39.740	-0.234
摇光	182	136	55.273	55.895	-0.622	46.130	46.108	0.022
北极二	249	180	30.101	30.644	-0.543	24.549	24.421	0.128
大角	136	71	56.267	56.422	-0.155	76.974	76.762	0.212
织女一	347	91	354.745	354.583	0.162	62.429	62.238	0.191
天津四	393	161	328.248	328.155	0.093	53.809	53.850	-0.041
王良四	362	281	279.464	279.737	-0.273	33.789	33.701	0.088
策	348	278	279.275	278.904	0.371	29.170	29.042	0.129
王良一	361	264	288.631	288.537	0.094	32.630	32.712	-0.082
天船三	311	345	233.302	233.119	0.183	32.699	32.595	0.104
五车二	250	361	197.913	197.641	0.273	33.393	33.325	0.068
五车三	224	358	183.790	183.999	-0.210	34.188	33.992	0.196
五车五	233	410	193.195	193.074	0.121	50.510	50.559	-0.049
毕宿五	269	446	205.830	205.932	-0.102	63.231	63.433	-0.202
参宿四	193	456	184.486	184.462	0.024	71.514	71.543	-0.029
土星	168	403	170.938	170.878	0.060	56.592	56.704	-0.112
北河二	152	358	156.259	156.237	0.022	47.612	47.852	-0.240
北河三	138	361	153.582	153.691	-0.109	51.991	51.915	0.076

和 0.2062° , 天顶角误差绝对值平均分别为 0.1076° 和 0.1133° , 由此可知, 本文提出的定标方法是准确而有效的.

数据与来源

中国极地研究中心(中国极地研究所)国家极地科学数据中心提供北极黄河站全天空极光图像数据.

致谢

感谢中国极地研究中心北极黄河地球系统国家野外科学观测研究站为本研究提供实验基地和必要支持.

References

Boyd S, Vandenberghe L. 2004. Convex Optimization[M]. Cambridge:

- Cambridge University Press: 466-479.
- Chaston C C, Peticolas L M, Bonnell J W, et al. 2003. Width and brightness of auroral arcs driven by inertial Alfvén waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 108(A2): 1091.
- Hu Z J, Yang H, Huang D, et al. 2009. 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*, 71(8-9): 794-804.
- Hu Z J, Yang H, Liang J, et al. 2010. 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*, 72(7-8): 638-642.
- Hu Z J, Yang H G, Han D S, et al. 2012. 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*, 117(A2): A02201.
- Hu Z J, Yang H G, Hu H Q, et al. 2013. The hemispheric conjugate observation of postnoon "bright spots"/auroral spirals[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(4): 1428-1434.
- Hu Z J, Ebihara Y, Yang H G, et al. 2014. Hemispheric asymmetry of the structure of dayside auroral oval[J]. *Geophysical Research Letters*, 41(24): 8696-8703.
- Hu Z J, He F, Liu J J, et al. 2017a. Multi-wavelength and multi-scale aurora observations at the Chinese Zhongshan Station in Antarctica[J]. *Polar Science*, 14: 1-8.
- Hu Z J, Yang Q J, Liang J M, et al. 2017b. Variation and modeling of ultraviolet auroral oval boundaries associated with interplanetary and geomagnetic parameters[J]. *Space Weather*, 15(4): 606-622.
- Hu Z J, Yang H G, Ebihara Y, et al. 2017c. Surveys of 557.7/630.0 nm Dayside Auroral Emissions in Ny-Ålesund, Svalbard, and South Pole Station[M]//Haaland S, Runov A, Forsyth C. Dawn-Dusk Asymmetries in Planetary Plasma Environments. Geophysical Monograph Series. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.: 143-154. doi: 10.1002/9781119216346.ch11.
- Huo J, Lu D R. 2009. Calibration and validation of an all-sky imager[J]. *Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2: 220-223.
- Kazantzidis A, Tzoumanikas P, Nikitidou E, et al. 2017. All-sky imager: A new instrument for the estimation of solar irradiance[C]// Cloudiness and Aerosol Optical Properties. Cham: Springer: 1805-1814. doi: 10.1007/978-3-319-35095-0_169.
- Qiu Q, Yang H G, Lu Q M, et al. 2013. Widths of dayside auroral arcs observed at the Chinese Yellow River Station[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 102: 222-227.
- Qiu Q, Yang H G, Lu Q M, et al. 2016. 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*, 142: 20-24.
- Qiu Q, Yang H G, Lu Q M, et al. 2017. Correlation between emission intensities in dayside auroral arcs and precipitating electron spectra[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(2): 489-498 (in Chinese).
- Shi R, Hu Z J, Ni B, et al. 2014. Modulation of the dayside diffuse auroral intensity by the solar wind dynamic pressure[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119: 10092-10099.
- Sigernes F, Holmen S E, Biles D, et al. 2014. Auroral all-sky camera calibration[J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 3: 241-245.
- Tohsing K, Schrempf M, Riechelmann S, et al. 2014. Validation of spectral sky radiance derived from all-sky camera images - a case study[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7: 2137-2146.
- Voss K J, Zibordi G. 1989. Radiometric and geometric calibration of a visible spectral electro-optic "Fisheye" camera radiance distribution system[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 6(4): 652-662.
- Wang C M, Li Q Z, Xu J Y, et al. 2016. Gravity wave characteristics from multi-stations observation with OH all-sky airglow imagers over mid-latitude regions of China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(5): 1566-1577 (in Chinese).
- Xu J, Li Q, Yue J, et al. 2015. Concentric gravity waves over northern China observed by observed by an airglow imager network and satellites[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120: 11058-11078.
- Zhang H P, Hu Z J, Hu Y G, et al. 2020. Calibration and verification of all-sky auroral image parameters by star maps[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(2): 401-411(in Chinese).
- Zotti G, Hoffmann S M, Wolf A, et al. 2021. The simulated sky: Stellarium for cultural astronomy research[J]. *Journal of Skyscape Archaeology*, 6(2): 221-258.

附中文参考文献

- 丘琪, 杨惠根, 陆全明, 等. 2017. 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*, 60(2): 489-498.
- 王翠梅, 李钦增, 徐寄遥, 等. 2016. 基于多站 OH 全天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*, 59(5): 1566-1577.
- 张会朋, 胡泽骏, 胡耀垓, 等. 2020. 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*, 63(2): 401-411.