

星光观测蒙气差补偿技术

王海涌 林浩宇* 周文睿

(北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191)

摘要 为了消除大气内观星时蒙的影响,提高载体定姿精度,提出了一种蒙气差补偿算法。首先给出了补偿过程涉及的姿态转移矩阵,并完成了相关矢量坐标映射变换;接着在星敏感器坐标系内,用两矢量内积求得视天顶距;最后利用几何公式列出了以真星光矢量投影点估计位置为未知量的方程组,作为星敏感器任意姿态下蒙气差补偿算法模型。在没有任何误差的条件下对模型有效性进行了仿真, 10^{-6} pixel 量级的位置估计精度表明了算法的有效性。加入不同量级的陀螺漂移误差进行了仿真,给定的漂移误差对于蒙气差补偿模型的估计精度影响甚微,仿真结果表明在捷联载体存在一定姿态误差的前提下,蒙气差补偿模型也是适用的,补偿后的星像坐标用以实现星光姿态确定,并进一步对陀螺漂移完成补偿。

关键词 大气光学;蒙气差;星敏感器;天文导航;姿态

中图分类号 V241.62⁺3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1101002

Technology of Atmospheric Refraction Compensation in Starlight Observation

Wang Haiyong Lin Haoyu Zhou Wenrui

(School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract In order to eliminate the influence of atmospheric refraction when observing starlight in the atmosphere and enhance the accuracy of carrier attitude fixing, a compensation algorithm of the refraction is proposed. Firstly, the attitude transfer matrices involved in the whole process and complete the corresponding vector coordinate mapping transform are given. Then in the star sensor coordinate system, the visual zenith angle according to the interior product of two vectors is calculated. Lastly, with geometric formula, the system of equation taking the estimated position of the real starlight vector projection point to be the unknown variables is listed, which can be used as the refraction compensation algorithm model when the star sensor is in any attitude. Under the condition of no error, the simulation to model validity is carried out, and the magnitude of position estimation precision is 10^{-6} pixel, showing the validity of the proposed algorithm. The simulation is done again with different orders of magnitude gyroscope drift errors, and the effect on the estimation precision of refraction compensation model from the given gyroscope drift error is little. The simulation results show that under the premise that there are certain attitude errors of the strapdown carrier, the refraction compensation model is also applicable. The compensated star coordinates are used for starlight attitude determination, and further to compensate the gyroscope drift error.

Key words atmospheric optics; atmospheric refraction; star sensor; celestial navigation; attitude

OCIS codes 100.2000; 120.5710; 120.4640; 280.4788

1 引言

作为一种新型自主导航方法,星光姿态确定技术近年来在空间飞行器上应用得越来越广泛^[1]。但针对大气中型号,比如舰船、飞机,不论是星敏感器的正常工作状态还是作为一项外场实验手段,需要

首先考虑并处理当载体处于任意姿态时由大气折射造成的蒙气差。天顶距越大,蒙气差越大,比如视天顶距 z_a 为 0° 时,不存在蒙气差; $z_a = 5^\circ$, 则蒙气差 $R_0 = 5''.25$; $z_a = 10^\circ$, 则 $R_0 = 10''.60$ ^[2]。星像质心位置经过蒙气差补偿,可以获得更加精确的星光矢量,

收稿日期: 2011-04-15; 收到修改稿日期: 2011-05-28

作者简介: 王海涌(1969—),男,博士,讲师,主要从事天文导航及复合导航技术方面的研究。E-mail: why@buaa.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: haoyulin2000@163.com

进而得到更加准确的星光定姿结果。特别是星敏感器具有大视场且光轴天顶距较大时,蒙气差影响将更加显著,同时造成星对角距误差的增加,最终会导致星图误匹配率和匹配失败率增大^[3]。目前国内外对于蒙气差补偿所用的方法一般是以视天顶距为引数,利用“公式法”或“查表法”来确定蒙气差大小,在天体天顶距小于 30°的情况下,其补偿精度可以达到 0.1^{''}^[4]。

针对全捷联的惯导/天文组合导航系统,通常模式是利用星光定姿结果来校正陀螺的漂移误差,同时保持陀螺高的数据输出率,取长补短^[5]。本文通过研究蒙气差补偿算法,开展惯性/天文全捷联组合导航系统大气内适应性研究。

2 算法设计与计算

2.1 蒙气差的确定

由于大气折射,观测者看到的方向和天体真方向不同,这个方向差叫做蒙气差。捷联星敏感器在大气内以任意姿态观星,光轴会和天顶方向形成一定的夹角,如图 1 所示。

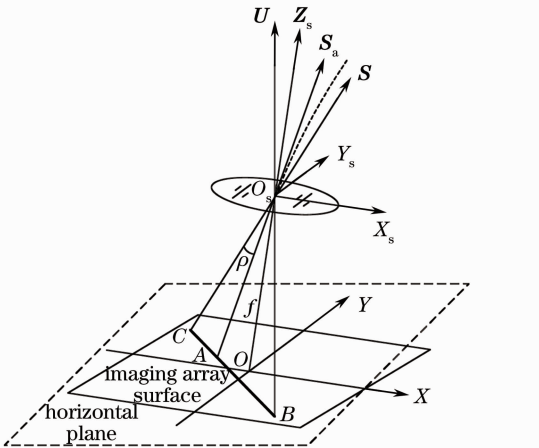


图 1 蒙气差补偿几何原理图

Fig. 1 Geometric diagram of atmospheric refraction compensation

在图 1 中,矢量 U 为天顶方向矢量,矢量 Z_s 为星敏感器光轴方向矢量,图中虚线为实际星光在大气内的折射路径,弯向地心^[6],在星敏感器处的切线方向矢量 S_a 为恒星视方向矢量,矢量 S 为恒星真方向矢量,蒙气差 ρ 即为两者之差, $\angle S_a O_s S$ 或 $\angle A O_s C$ 。 O_s 点为星敏感器坐标系 (s 系) $O_s-X_s Y_s Z_s$ 的原点,位于星敏感器光学系统的光心, s 系初始状态与当地地理坐标系 (东北天坐标系) 重合。 O 点为 CCD 阵列平面坐标系 $O-XY$ 原点,位于星敏感器光轴在

CCD 阵面上的投影点。星光矢量在星敏感器坐标系与 CCD 阵面坐标系之间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -f \end{bmatrix}. \quad (1)$$

A 点为矢量 S_a 在 CCD 面阵上的成像点, C 点为矢量 S 的映射点,即蒙气差修正后的位置点, B 点为 U 在 CCD 面阵上的映射点,用以计算视天顶距。 f 为相机焦距。

2.1.1 姿态转移矩阵

如果载体配置了捷联惯导,可以通过三轴陀螺解算得到载体或者捷联星敏感器在地心惯性系下的姿态转移矩阵 C_i^s 。

如果载体配置的是基于地平坐标系的测量设备,比如外场实验中采用的地平仪及寻北装置等,那么姿态转移矩阵可以分两步求取。

1) 在观测时刻,由地心惯性坐标系 (i 系) 到观测点当地地理坐标系 (g 系) 的姿态转移矩阵为

$$C_i^g = \begin{bmatrix} -\sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 & 0 \\ -\cos \alpha_0 \sin \delta_0 & -\sin \alpha_0 \sin \delta_0 & \cos \delta_0 \\ \cos \alpha_0 \cos \delta_0 & \sin \alpha_0 \cos \delta_0 & \sin \delta_0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 α_0, δ_0 为天顶 U 的赤经、赤纬。

2) s 系相对于 g 系的态度,通过相关测试设备可以解算得到。例如 s 系相对于 g 系的欧拉角转动顺序为俯仰 (θ)-偏航 (ψ)-滚转 (φ),于是可求出由观测点当地地理坐标系到星敏感器坐标系的态度转移矩阵为^[7]

$$C_g^s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由此,观测时刻由地心赤道惯性坐标系到星敏感器坐标系的态度转移矩阵为

$$C_i^s = C_g^s C_i^g. \quad (4)$$

2.1.2 视天顶距的确定

如图 1 所示,视天顶距 $z_a = \angle A O_s B$,为天顶方向矢量 U 和恒星视方向矢量 S_a 的夹角。通过观测地点的精确定位和定时,矢量 U 在 i 系下赤经、赤纬作为已知条件,矢量 S_a 在 s 系下的坐标表示观测结果。利用姿态转移矩阵 C_i^s 可以将 i 系下的天顶 U_i 矢量坐标转化为 s 系下的 U_s 矢量坐标,同理可将星敏感

器视场内恒星 i 系下方位矢量坐标映射为 s 系下的矢量坐标。设天顶 U (或任意一颗恒星 S) 的赤经、赤纬为 α_0, δ_0 , 则在 i 系下的矢量坐标为

$$\begin{cases} x_i = \cos \delta_0 \cos \alpha_0 \\ y_i = \cos \delta_0 \sin \alpha_0, \\ z_i = \sin \delta_0 \end{cases} \quad (5)$$

映射到 s 系下, 矢量坐标为

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \mathbf{C}_i^s \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}. \quad (6)$$

那么, s 系下天顶方向 U_s 的矢量坐标为

$$\mathbf{U}_s = \begin{bmatrix} x_{us} \\ y_{us} \\ z_{us} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_i^s \begin{bmatrix} x_{ui} \\ y_{ui} \\ z_{ui} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

星敏感器星光成像 A 点的平面坐标为 (x_a, y_a) , 则矢量 \mathbf{S}_a 在 s 系内可表示为

$$\mathbf{S}_a = \begin{bmatrix} -x_a \\ -y_a \\ f \end{bmatrix}. \quad (8)$$

在星敏感器坐标系 s 系中, 根据两矢量内积公式来确定视天顶距 z_a 为

$$z_a = \arccos \left(\frac{\mathbf{U}_s \cdot \mathbf{S}_a}{|\mathbf{U}_s| |\mathbf{S}_a|} \right). \quad (9)$$

2.1.3 公式法求蒙气差

在实际应用中, 不管是“大气折射表”^[8], 还是利用公式^[4,9], 都是以视天顶距 z_a 为引数, 先查出或计算出平均大气折射率 ρ_0 , 再根据观测点当地的气温 $T^{[10]}$ 和海拔高度 h , 利用经验公式得到订正参数, 最后得到实际蒙气差 ρ 。采用的公式为

$$\rho_0 = 60''.2 \tan z_a, \quad (10)$$

$$M = \frac{-0.00383T}{1 + 0.00367T}, \quad (11)$$

式中 T 是观测时空气的摄氏温度,

$$N = \frac{H}{760} - 1, \quad (12)$$

其中 H 是以 Pa 计的实气压, 表示为

$$H = H' [1 - 0.00264 \cos 2\varphi - 0.000163(T' - T)], \quad (13)$$

其中 H' 是读得的气压数值(观测时), φ 是观测地纬度, T' 是气压表内水银的温度。最后利用公式

$$\rho = \rho_0 (1 + M + N), \quad (14)$$

就可以得到实际的蒙气差。

2.2 蒙气差补偿算法

经过蒙气差补偿, 可以提高 CCD 面阵上恒星映

射点的坐标估计精度。大气折射弯向地心, 视天顶距减小, 但不改变天体的方位角^[4], 因此, 天顶矢量方向 U 、恒星视方向 \mathbf{S}_a 和真方向 \mathbf{S} 共面于平面 O_sBC 。A、B、C 三点为上述三矢量在 CCD 阵面上的投影点, 位于平面 O_sBC 和 CCD 阵列平面的交线上, 如图 1 所示。

根据 i 系天顶矢量 U 及姿态转移矩阵 \mathbf{C}_i^s 求得 B 点坐标 (x_b, y_b) , 结合通过观测得到的 A 点坐标 (x_a, y_a) 可得直线 AB 方程。再在 $\triangle AO_sC$ 内利用余弦定理, 联立二元非线性方程组^[11]

$$\begin{cases} y_c - y_a - \left(\frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \right) (x_c - x_a) = 0 \\ \frac{O_sA^2 + O_sC^2 - AC^2}{2O_sA \cdot O_sC} - \cos \rho = 0 \\ \sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2} - \sqrt{(x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2} > 0 \end{cases}, \quad (15)$$

式中

$$\begin{cases} O_sA = \sqrt{x_a^2 + y_a^2 + z_a^2} \\ O_sC = \sqrt{x_c^2 + y_c^2 + z_c^2} \\ AC = \sqrt{(x_a - x_c)^2 + (y_a - y_c)^2} \\ z_a = z_c = -f \end{cases}. \quad (16)$$

由于恒星真天顶距 z 要大于恒星视天顶距 z_a , 因此在 CCD 阵面上, 真实星光投影点 $C(x_c, y_c)$ 应该为距天顶虚拟投影点 B 较远点, 方程组添加此约束条件即可求得 C 点坐标的唯一解, 即 $C(x_c, y_c)$ 的坐标值, 从而完成对蒙气差的修正。

3 仿真计算

3.1 蒙气差补偿算法有效性验证

在不考虑任何误差(包括陀螺仪漂移误差和星敏感器标定误差)的条件下, 先进行算法有效性验证。具体实验方案为, 在星敏感器成像面的“米”字

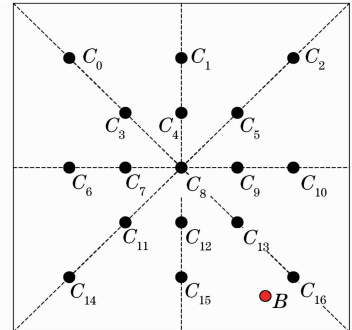


图 2 天顶映射点和假定恒星理想映射点
Fig. 2 Ideal mapping locations of zenith and 17 assumed stars

型的方向,即横、竖及两条对角线方向上,选取 17 个位置点 $C_i (i=0,1,\dots,16)$,作为假定恒星的理想映射点,如图 2 所示。

然后,根据星敏传感器当前姿态得到 i 系和 s 系的姿态转换矩阵,将天顶点 U 也映射到星敏传感器面阵,得到其映射点 B ,那么可以得到 17 个真天顶距 $Z_i = BC_i$ 。(10)式变为

$$\rho_0 = 60'' \cdot 2 \tan(Z - \rho_0), \quad (17)$$

式中真天顶距 $Z_i = \angle BO_s C_i$,从而解得系列蒙气差值 ρ_i 。对于每个 C_i 点加入蒙气差,得到 17 个折射星光的成像位置点 A_i 。再运用(15)式和(16)式解算估值 \hat{C}_i ,并计算绝对误差。参见表 1,仿真参

表 1 不考虑误差的 9 颗假定恒星的实验数据

Table 1 Test data of 9 assumed stars without consideration of any error

| Number i | C_i /pixel | $\rho / (")$ | A_i /pixel | \hat{C}_i /pixel | $\delta / (10^{-5} \text{ pixel})$ | |
|---------------|--------------|--------------|---------------------|-------------------------|------------------------------------|----------------|
| | | | | | δ_{X_i} | δ_{Y_i} |
| 0 | (171,171) | 14.0977 | (171.1993,171.1823) | (170.999993,170.999994) | -0.6699 | -0.6129 |
| 2 | (171,855) | 10.2823 | (171.1962,854.9984) | (170.999994,855.000000) | -0.6408 | 0.0051 |
| 3 | (341,341) | 10.6385 | (341.1506,341.1339) | (340.999995,340.999996) | -0.4928 | -0.4384 |
| 5 | (341,683) | 8.2271 | (341.1494,683.0434) | (340.999995,682.999999) | -0.4818 | -0.1401 |
| 8 | (512,512) | 7.2207 | (512.1042,512.0878) | (511.999997,511.999997) | -0.3330 | -0.2805 |
| 11 | (683,341) | 7.6995 | (683.0599,341.1327) | (682.999998,340.999996) | -0.1920 | -0.4256 |
| 13 | (683,683) | 3.8736 | (683.0594,683.0430) | (682.999998,682.999999) | -0.1864 | -0.1351 |
| 14 | (855,171) | 9.4197 | (855.0151,171.1790) | (854.999999,170.999994) | -0.0490 | -0.5812 |
| 16 | (855,855) | 0.7837 | (855.0149,854.9985) | (854.999999,855.000000) | -0.0466 | 0.0048 |

由仿真结果可以得出补偿后星点位置坐标 X 方向和 Y 方向的标准差^[13]

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{17} \sum_{i=0}^{16} \delta_{X_i}^2} = 3.9623 \times 10^{-6}, \quad (18)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{1}{17} \sum_{i=0}^{16} \delta_{Y_i}^2} = 3.4959 \times 10^{-6}. \quad (19)$$

极小的标准差充分说明了蒙气差补偿算法原理的正确性。

3.2 姿态误差对蒙气差补偿算法的影响

按照全捷联模式进行分析,实际惯导陀螺漂移误差会影响到星敏传感器所转过的三轴姿态角精度,导致观测地点观测时刻星敏传感器光轴指向产生误差,最终表现为天顶投影点 B 的坐标误差。

分析陀螺漂移误差对蒙气差修正算法精度的影响。分别取两组陀螺漂移误差率和两组星敏传感器姿态,积分时间 30 min,漂移误差导致三轴姿态角误差,3 个欧拉角(俯仰角 θ ,偏航角 ψ ,滚转角 φ)的基元旋转顺序为 $\theta \rightarrow \psi \rightarrow \varphi$ 。在星图主对角线上从第 4 个到第 1020 个像素位置点中,等间隔取 128 个测试点,作为假定恒星理想映射点(不含蒙气差),其他仿

数^[12]设置如下:观测时刻观测地点的天顶坐标为赤经 60° 赤纬 40° ,气压 95976 Pa,气温 15°C 。g 系下星敏传感器三轴姿态角由陀螺仪给出,俯仰角 5° ,偏航角 10° ,滚转角 5° 。CCD 面阵大小为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,像素尺寸 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$,星敏传感器镜头焦距 28.8 mm,视场 $15^\circ \times 15^\circ$ 。成像面阵平面坐标系原点在左上角第一个像素中心,向下为 X 轴,向右为 Y 轴。选取两条对角线上的 9 个测试点,仿真结果如表 1 所示。表 1 中, C_i 为假定恒星映射点, A_i 为加蒙气差后位置点, \hat{C}_i 为蒙气差补偿后位置, δ_X 和 δ_Y 分别为 X 方向和 Y 方向的误差。

真条件同 2.1 节,分 4 种情况进行仿真,如表 2 所示。

表 2 仿真情形

Table 2 Different cases for simulation

| | Drift error rate $[(^\circ)/\text{h}]$ | Drift error $(^\circ)$ | Euler angle/s order and value |
|--------|---|---------------------------|---|
| Case 1 | 0.1 | 0.05° | $5^\circ \rightarrow 10^\circ \rightarrow 5^\circ$ |
| Case 2 | 0.1 | 0.05° | $-5^\circ \rightarrow 10^\circ \rightarrow 5^\circ$ |
| Case 3 | 1 | 0.5° | $5^\circ \rightarrow 10^\circ \rightarrow 5^\circ$ |
| Case 4 | 1 | 0.5° | $-5^\circ \rightarrow 10^\circ \rightarrow 5^\circ$ |

将陀螺漂移误差 ϵ_{gyo} 加入 3 个欧拉角中,得到对应 4 种情形的仿真结果,如图 3 和表 3 所示。表 3 中 Δ_{max} 和 Δ_{min} 分别为最大和最小绝对位置误差,出现误差最值的测试点序号也在表中给出。

表 3 四种情形下最大、最小误差及出现位置

Table 3 Maximum-minimum errors and their positions

| | $\Delta_{\text{max}} /$ (10^{-3} pixel) | Test point number | $\Delta_{\text{min}} /$ (10^{-3} pixel) | Test point number |
|--------|--|----------------------|--|----------------------|
| Case 1 | 1.6000 | 1 | 0.1101 | 111 |
| Case 2 | 1.4000 | 128 | 0.0069 | 63 |
| Case 3 | 16.1420 | 1 | 1.2986 | 114 |
| Case 4 | 13.5870 | 128 | 0.0478 | 65 |

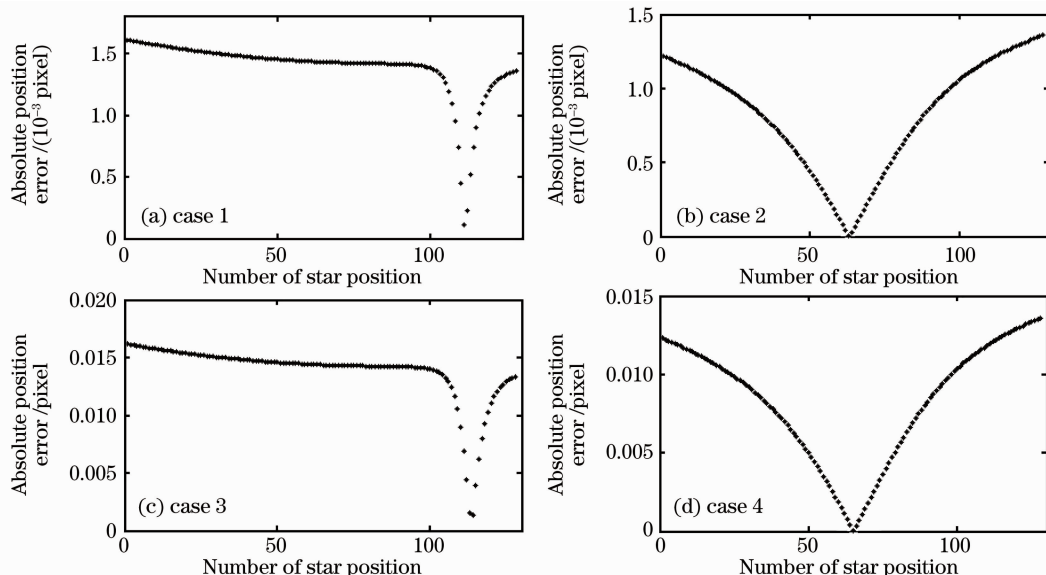


图3 仿真结果

Fig. 3 Simulation results

仿真结果表明,陀螺漂移误差对蒙气差补偿算法造成的影响不大,在实际应用中,捷联载体本身存在的一定量值姿态误差,对于蒙气差补偿影响甚微。

4 结 论

给出了补偿蒙气差的过程涉及的姿态转移矩阵,完成了矢量坐标变换。推导出了星传感器大气内观星时的蒙气差补偿理论算法,在星传感器坐标系内,用两矢量内积法求得视天顶距。根据公式得到该姿态下的星光蒙气差,利用蒙气差补偿算法得到真星光矢量投影点估计位置。首先在不考虑误差的情况下对算法进行了验证,补偿后星点位置坐标精度 σ_x 和 σ_y 达到 10^{-6} pixel量级,证明了算法的正确性;然后加入不同量级的陀螺漂移,在载体存在姿态误差的情形下分别进行了仿真, 10^{-3} pixel量级略强的真星光映射位置估计精度结果表明了在一定姿态误差条件下,蒙气差补偿模型也是适用的。像点质心估计精度的提高有利于星光姿态精度的提高,并进一步完成对陀螺漂移误差的补偿。

参 考 文 献

- Xue Shenfang, Ning Shunian, Jin Shengzhen *et al.*. The starlight refraction in autonomous orbit determination for satellite by large field of view star sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 972~974
- 薛申芳,宁书年,金声震等.组合大视场星传感器自主定轨中的星光折射[J].*光学学报*,2006,**26**(7):972~974
- Chinese Academy of Sciences Purple Mountain Observatory. 2006 China Astronomical Almanac[M]. Beijing: Science Press, 2006. 488~489

- 中国科学院紫金山天文台. 2006年中国天文年历[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 488~489

- Lin Runzhi, Yang Xueyou, Zou Jian *et al.*. Study on the center extraction precision of image photographed by CCD for large scale inspection[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, **29**(12): 51~53
- 林润芝,杨学友,邹剑等.面向大尺寸检测CCD图像中心提取精度的研究[J].*传感器与微系统*,2010,**29**(12):51~53
- Ma Wenzhang. Spherical Astronomy [M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 1991. 73~83
- 马文章. 球面天文学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1991. 73~83
- Fang Jiancheng, Ning Xiaolin. Celestial Navigation Principle and Application [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006. 261~278
- 房建成,宁小琳.天文导航原理及应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.261~278
- Zhang Hongyi, Liu Jingmin. Error-correction method of atmospheric refraction on elevation angle [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2008, **30**(4): 25~27
- 张宏艺,刘敬民.俯仰角大气折射误差修正方法[J].*光电技术应用*,2008,**30**(4):25~27
- Xiao Yelun. Aircraft and Spacecraft Motion Modeling—Flight Dynamics Theory Foundation[M]. Beijing: Beihang University Press, 2003. 63~64
- 肖业伦.航空航天器运动的建模——飞行动力学的理论基础[M].北京:北京航空航天大学出版社,2003.63~64
- Jiang Guobing. The High Precision Automatic Starsearch System Design Based on Embedded System [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. 21~22
- 蒋国兵.基于嵌入式系统的高精度自动寻星系统设计[D].杭州:浙江大学信息学院,2008.21~22
- Han Yan, Qiang Xiwen, Feng Jianwei *et al.*. Height distribution profiles and its application of atmosphere refractive index[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(2): 267~271
- 韩燕,强希文,冯建伟等.大气折射率高度分布模式及其应用[J].*红外与激光工程*,2009,**38**(2):267~271
- Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming *et al.*. Profile and character of atmospheric temperature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 592~596
- 孙刚,翁宁泉,肖黎明等.大气温度分布特性及对折射率结构

- 常数的影响[J]. 光学学报, 2004, **24**(5): 592~596
- 11 Li Xuekui, Hao Zhihang, Li Jie *et al.*. New calibration method of principal distance of star sensors through diagonal distance[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, **30**(5): 755~759
李学夔, 郝志航, 李 杰 等. 利用星对角距对星敏传感器主距进行标定的新方法[J]. 半导体光电, 2009, **30**(5): 755~759
- 12 Nils Neumann, Malak Samaan, Michael Conradt *et al.*. Attitude determination for the SHEFEX 2 mission using a low cost star tracker [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2009, AIAA-2009-6279
- 13 Shen Zhongru, Guo Futian, Ding Hui. The Modern Testing Technology and System Design [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2006. 18~45
申忠如, 郭福田, 丁 晖. 现代测试技术与系统设计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006. 18~45

栏目编辑: 何卓铭