

间接敏感地平星敏感器视场内折射星数的 概率分布适用模型

王海涌 金光瑞 赵彦武

(北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191)

摘要 针对星光折射法间接敏感地平星敏感器视场内折射星数量不足的工程问题,对折射星数在星敏感器视场内的概率分布进行了研究。阐述了星光折射间接敏感地平的基本原理;推导了视场内平流层条带面积占视场面积的比例系数,并在视场内可观测星数概率分布模型基础上,得到了折射星数的概率分布模型。对星光折射解析定位新方法进行了可行性分析,给出了星敏感器视场、极限观测星等、轨道远地点距离与视场内折射星数分布之间的关系。折射星数概率分布曲线与用蒙特卡罗方法获得的概率分布曲线相似,泊松参数偏差为 1.48,相对误差为 12.8%。仿真结果表明了该模型的正确性和有效性,该模型对于间接敏感地平星敏感器参数设计具有指导作用。

关键词 大气光学;折射星数概率分布;概率论;蒙特卡罗实验

中图分类号 P12.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1201002

Applicable Probability Distribution Model of Refracted Star Number in Field of View of Indirectly Sensing Horizon Star Sensor

Wang Haiyong Jin Guangrui Zhao Yanwu

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

Abstract Aiming at the engineering problem that the refracted star number in the field of view (FOV) of a star sensor is not enough to carry out indirectly sensing horizon, it is necessary to study the probability distribution function (PDF) of refracted star number in the FOV. A brief introduction of the principle of stellar refraction is given. The proportion coefficient of the stratosphere strip area fallen in the FOV to the whole FOV area is deduced, and combined with the validated PDF of the total star number in FOV, the PDF of the refracted star number is obtained at last. The feasibility analysis on the analytic positioning method based on stellar refraction is finished by using the PDF model, presenting the quantification relationship between the FOV, apparent magnitude (M_v), apogee distance and probability distribution. The plotted refracted star number PDF curve is similar to that by Monte Carlo simulation results, with Poisson parameter bias of 1.48, an equivalent of relative error of 12.8%. The simulation results show the correctness of the PDF model, which will be helpful to the parameter design of the star sensor used for indirectly sensing horizon through starlight refraction.

Key words atmospheric optics; probability distributions of the number of refracted stars; probability theory; Monte Carlo experiment

OCIS codes 000.3860; 010.1290; 120.5710

1 引 言

近地航天器天文定位涉及到直接敏感地平^[1-3]和间接敏感地平两种方法^[4-5],直接敏感地平法依靠红外地平仪直接确定地心矢量方向,精度低;星光折射间接敏感地平法综合利用航天器的轨道动力学

模型、高精度的星敏感器和大气折射数学模型精确敏感地平,可以实现高精度的定位。

20 世纪 80 年代初,美国开始了多任务姿态确定和自主导航系统(MADAN)导航系统的研究,1989 年进行了空间实验,20 世纪 90 年代投入使用,

收稿日期: 2013-05-29; 收到修改稿日期: 2013-08-05

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等方面的研究。

E-mail: why@buaa.edu.cn

此系统就利用了星光折射间接敏感地平的原理^[6-7]。在同一时期,法国国家空间研究中心(CNES)以低轨道地球观测卫星 SPOT 为背景,也进行了星光折射法自主导航的研究^[8]。

近年来,国内一些机构也对星光折射自主导航技术进行了研究。文献[9]建立了星光大气折射的通用模型,并给出了相应的经验公式。文献[10]建立了连续高度的大气密度模型,并在此基础上建立了一种自适应连续高度的星光折射观测模型。文献[11]设计了一种组合大视场星敏感器,可以实现同时观测整个地球边缘的三颗折射星。文献[12]提出了一种适用于变轨航天器的星光折射解析定位新方法。

国内对基于星光折射的自主导航方法的研究目前处于理论研究阶段,对于折射星分布问题,即如何保障航天器观测到足够的折射星的工程问题,国内外还未见文献报道。折射星分布问题研究对星敏感器视场(FOV)设计及极限观测星等、导航星表的建立和识别过程本身都有重要影响。本文在分析星光折射基本原理的基础上建立折射星数的概率分布模型。星光折射解析定位新方法至少需要观测三颗折射星^[12],针对这一约束条件,着重讨论极限观测星等、视场和轨道远地点距离对折射星数概率分布的影响,进行该方案的可行性分析。利用蒙特卡罗统计实验验证^[13]折射星数概率分布模型的正确性和有效性。

2 星光折射间接敏感地平基本原理

如图 1 所示,当星光通过地球大气时,由于大气密度不均匀,光线折射弯向地心。航天器上星敏感

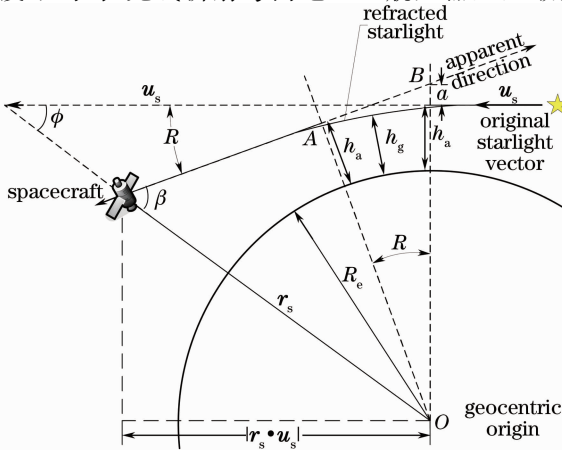


图 1 星光折射几何参数关系原理

Fig. 1 Principle of geometric relations of star refraction

器观测的是折射后的星光矢量,折射后的星光矢量与标准星光矢量之间的角距即为星光折射角 R 。已有星光折射角与大气密度的关系模型,以及大气密度随高度变化的模型,从而可以确定星光在大气层中的折射高度 h_g ,这个高度的观测量反映了航天器与地球之间的几何关系。

图 1 中 R_e 为地球半径, h_g 为折射高度, h_a 为视高度, R 为星光折射角, r_s 表示地心到航天器的位置矢量, u_s 为折射星未折射前的星光矢量方向, β 为折射后的星光矢量与航天器位置矢量的夹角, ϕ 为未折射的星光矢量与航天器位置矢量的夹角, a 是个小量。

根据星光在大气中折射的数学模型,可以得到星光折射角 R 与折射高度 h_g 之间的关系为^[4]

$$h_g = h_0 - H \ln R + H \ln \left[k(\lambda) \rho_0 \sqrt{\frac{2\pi R_e}{H}} \right], \quad (1)$$

式中 H 为 h_0 处的密度标尺高度, ρ_0 为 h_0 处的大气密度, $k(\lambda)$ 为散射系数,由光波波长 λ 决定。

文献[9]给出了折射高度 h_g 在 20~50 km 范围内随星光折射角变化的经验公式为

$$h_g = 58.29096 - 6.587501 \cdot \ln R. \quad (2)$$

折射高度 h_g 无法直接反映航天器与地球之间的几何关系,因此需要进一步建立折射高度 h_g 与视高度 h_a 之间的关系式。根据星光折射定律,并考虑到 $R_e \gg h_g$,则视高度 h_a 可以表示为

$$h_a = h_g + k(\lambda) \rho_g R_e, \quad (3)$$

式中 ρ_g 为 h_g 处的大气密度。

(1)~(3)式建立了视高度 h_a 与星光折射角 R 之间的关系,可以利用星敏感器测量的星光折射角 R 计算视高度 h_a 。

另外,根据图 1 中的几何关系,视高度可以写成

$$h_a = \sqrt{r_s^2 - \mu^2} + \mu \tan R - R_e - a, \quad (4)$$

式中 $\mu = |r_s \cdot u_s|$, a 为一个非常小的量。根据直角三角形 OAB 的几何观测可以得到

$$\frac{R_e + h_a}{R_e + h_a + a} = \cos R. \quad (5)$$

对于典型的情况, $h_a = 25$ km 时,相应的折射角 $R = 150''$, $a = 1.69$ m。从量值上可以看出, a 相对于 h_a 很小,可以直接忽略。

(4)式建立了视高度与航天器位置之间的函数关系,当观测到不少于 3 颗折射星时,采用最小二乘微分迭代法可以实现天文定位。当可观测的折射星数目少于 3 颗时,则需要利用航天器的轨道动力学模型建立状态方程,根据(4)式建立观测方程,采用

Kalman 滤波方法可以实现高精度的天文定位。

3 视场内折射星数与总星数的比例

当星光穿过对流层时(折射高度小于 20 km),因对流层温度变化大、对流活动强烈,间接敏感地平精度低。当星光折射高度过高时(大于 50 km),星光折射角又过小,星传感器观测噪声会引起地平敏感精度的降低。因此,折射高度适宜在 20~50 km 的平流层范围内,平流层温度变化缓慢,大气密度适中,没有水汽、气溶胶等随机性大的成分影响,大气折射角合适,可以取得较高的导航精度。

当折射高度 h_g 满足 $20 \text{ km} < h_g < 50 \text{ km}$ 时,根据(2)式,星光折射角 R 应满足 $3.52'' < R < 334.51''$ 。进而根据(3)式,可以求出视高度 h_a 应满足 $20.0004 \text{ km} < h_a < 50 \text{ km}$ 。为了后续分析的方

便,将折射星视高度 h_a 的范围近似为 20~50 km。

由图 1 中几何关系可知,折射后的星光矢量和航天器位置矢量的夹角 β 可以表示为

$$\beta = \arcsin\left(\frac{R_e + h_a}{r_s}\right), \quad (6)$$

式中 $r_s = |\mathbf{r}_s|$, 为航天器的地心距,远地点为最不利情形,故 r_s 取轨道远地点距离。

考虑到视高度 h_a 应满足 $20 \text{ km} < h_a < 50 \text{ km}$, 可以计算出 β 的范围边界为

$$\begin{cases} \beta_{\max} = \arcsin[(R_e + 50)/r_s] \\ \beta_{\min} = \arcsin[(R_e + 20)/r_s] \end{cases} \quad (7)$$

航天器在轨飞行阶段,20~50 km 的平流层映射为视场内一带状范围,可观测到的折射星就分布在该条带内,如图 2(a)所示。可将该条带近似为四边形,如图 2(b)所示。

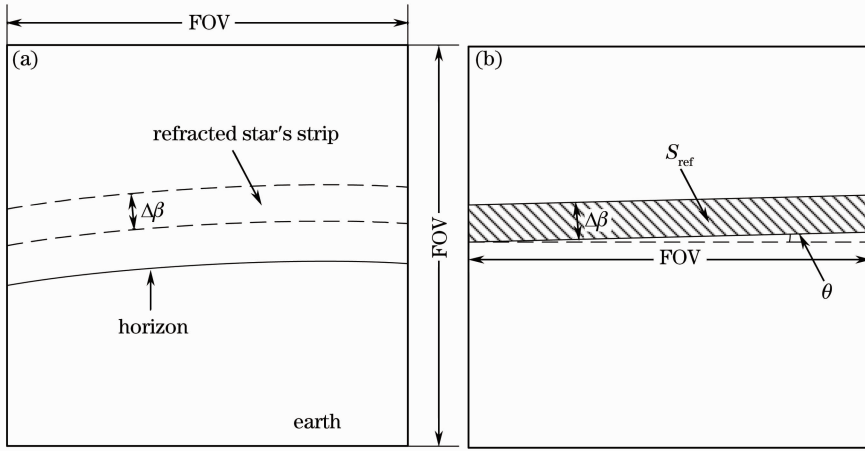


图 2 存在有效折射星的平流层映射条带

Fig. 2 Mapped stratospheric strip in FOV suitable for observing refracted stars

图 2 中 $\Delta\beta = \beta_{\max} - \beta_{\min}$ 为折射星分布带的宽度, $\theta (0 \sim \pi/4)$ 为折射星分布带与像平面底边的夹角, $0 \sim \pi/4$ 具有代表性。

根据图 2(b)中的几何关系,折射星分布带的面积 S_{ref} 为

$$S_{\text{ref}} = \Delta\beta \frac{\theta_{\text{FOV}}}{\cos \theta}. \quad (8)$$

令 c 表示折射星分布带面积 S_{ref} 在整个像平面中所占的比例:

$$c = \frac{S_{\text{ref}}}{\theta_{\text{FOV}} \times \theta_{\text{FOV}}} = \frac{\Delta\beta}{\theta_{\text{FOV}} \cdot \cos \theta} = \frac{\beta_{\max} - \beta_{\min}}{\theta_{\text{FOV}} \cos \theta}. \quad (9)$$

假定恒星在天球上近似于均匀分布, c 可以表示视场内折射星数与总星数的比例,因此 c 也可以写成

$$c = \frac{N_{\text{ref}}}{N_{\text{FOV}}} = \frac{\beta_{\max} - \beta_{\min}}{\theta_{\text{FOV}} \cos \theta}, \quad (10)$$

式中 N_{ref} 为星传感器视场内折射星数的平均值, N_{FOV} 为星传感器视场内总星数的平均值。

4 折射星数的概率分布模型

目前,很多仿真研究工作均假定整个轨道周期有几十颗折射星。该假定值得探讨,对于真实的航天器,要实现基于星光折射的解析天文定位,就需要保证星传感器可以观测到至少 3 颗折射星,也就必须知道视场内出现 k 颗折射星的概率,即视场内折射星数的概率分布,以确保视场中出现 k 颗以上折射星的天区覆盖率接近于 100%,这样的概率分布模型分析有助于星传感器参数设计。

4.1 折射星数的概率分布模型

假设星敏传感器可观测的极限观测星等为 M_v , 则全天球亮于 M_v 的星数为^[14]

$$N_{M_v} = 6.57 \exp(1.08M_v). \quad (11)$$

天球球面面积为 $S_{\text{sph}} = 4\pi$, 假定全天球恒星近似于均匀分布, 则星敏传感器视场内的平均星数 N_{FOV} 为

$$N_{\text{FOV}} = N_{M_v} \frac{S_{\text{FOV}}}{S_{\text{sph}}} = N_{M_v} \frac{S_{\text{FOV}}}{4\pi}, \quad (12)$$

$$N_{\text{ref}} = c \cdot N_{\text{FOV}} = 6.57 \frac{(\beta_{\max} - \beta_{\min}) \{ \pi - 2\arccos[\sin^2(\theta_{\text{FOV}}/2)] \}}{4\pi \cdot \theta_{\text{FOV}} \cos \theta} \exp(1.08M_v) \geq 6.57 \frac{\Delta\beta \cdot \{ \pi - 2\arccos[\sin^2(\theta_{\text{FOV}}/2)] \}}{4\pi \cdot \theta_{\text{FOV}}} \exp(1.08M_v). \quad (14)$$

根据文献[14-15], 星敏传感器视场内出现 k 颗折射星的概率 P 近似服从参数为 N_{ref} 的泊松分布, 即

$$P = 1 - \sum_{i=0}^{k-1} \frac{N_{\text{ref}}^i \exp(-N_{\text{ref}})}{i!}. \quad (15)$$

(14)式和(15)式的组合为折射星数的概率分布模型, $\Delta\beta = \beta_{\max} - \beta_{\min}$ 是基于轨道远地点距离 r_s 运算所得, 在轨道远地点观测到 k 颗折射星的概率 P 与星敏传感器的视场 θ_{FOV} 和星敏传感器可观测的极限观测星等 M_v 共同决定。

4.2 星光折射解析定位方法可行性分析

星光折射解析定位方法不需要航天器的轨道动力学模型, 但需要保障视场内的折射星数大于等于3颗。在保证视场内折射星数大于等于3颗的概率为99.74%的情况下, 根据(15)式可得

$$P(k \geq 3) = 1 - \left(1 + N_{\text{ref}} + \frac{N_{\text{ref}}^2}{2} \right) \times \exp(-N_{\text{ref}}) = 99.74\%, \quad (16)$$

式中 $P(k \geq 3)$ 表示折射星数大于等于3颗的概率。

解算(16)式可得到 $N_{\text{ref}} = 10.077$, 进而根据(14)式计算得到

$$6.57 \frac{\Delta\beta \{ \pi - 2\arccos[\sin^2(\theta_{\text{FOV}}/2)] \}}{4\pi \cdot \theta_{\text{FOV}}} \times \exp(1.08M_v) = 10.077. \quad (17)$$

对(17)式进行变形, 可得

$$M_v = \frac{1}{1.08} \ln \left(\frac{4\pi \cdot 10.077 \cdot \theta_{\text{FOV}}}{6.57 \Delta\beta \cdot S_{\text{FOV}}} \right). \quad (18)$$

(7)式和(18)式联合给出了保障视场内观测到至少3颗折射星的概率为99.74%时, 对星敏传感器极限观测星等的要求。在航天器位于轨道远地点的最不利情形下, (7)式和(18)式给出了星敏传感器极限观测星等与视场的关系。

式中 $S_{\text{FOV}} = 2\pi - 4\arccos[\sin^2(\theta_{\text{FOV}}/2)]$ 为星敏传感器方形视场对应的球面面积。

则星敏传感器视场内的平均星数为

$$N_{\text{FOV}} = 6.57 \frac{\pi - 2\arccos[\sin^2(\theta_{\text{FOV}}/2)]}{4\pi} \times \exp(1.08M_v). \quad (13)$$

再与(10)式相结合, 并考虑 $0 < \theta < \pi/4$, 则星敏传感器视场内折射星的平均星数 N_{ref} 为

首先通过仿真分析星敏传感器极限观测星等与轨道远地点和视场范围的函数关系。对于不同轨道, 远地点距离长度从6500 km增加到7500 km, 视场范围从 $10^\circ \sim 25^\circ$ 的情况, 根据(18)式对星敏传感器极限观测星等进行解算, 仿真结果如图3所示。

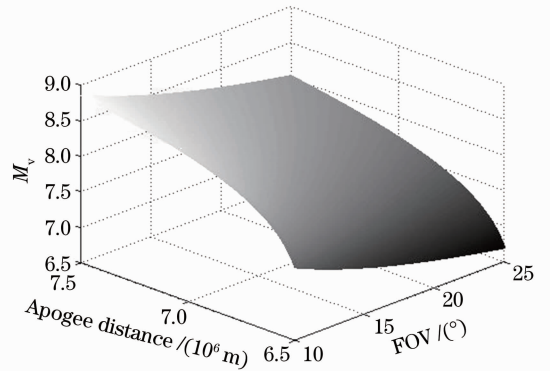


图3 星敏传感器极限观测星等与星敏传感器视场、轨道远地点距离的函数关系

Fig. 3 Function of M_v , θ_{FOV} and apogee distance

从图3中可以看出, 随着远地点距离的增加, 需要提高星敏传感器的极限观测星等来观测更暗的星, 以保证全轨道至少有三颗折射星。随着星敏传感器视场的增大, 视场内的折射星数增多, 星敏传感器的极限观测星等降低。

同理, 在极限观测星等确定前提下, 利用(7)式和(18)式, 也可分析极限观测星等与轨道远地点及视场大小的函数关系。

5 实验结果与分析

5.1 折射星概率分布模型的仿真验证

为了验证折射星数概率分布模型的正确性和有效性, 利用蒙特卡罗实验对该模型进行了仿真验证。

假定星敏感器视场为 $20^\circ \times 20^\circ$ ，轨道远地点距离为 6700 km，并利用(18)式计算得到星敏感器的极限观测星等 7.5473 作为仿真条件。在轨道远地点距离为 6700 km 的约束条件下，随机生成航天器的位置矢量；在每个位置随机产生星敏感器的视轴指向，星敏感器的视轴指向与航天器的位置矢量之间的夹角 φ 应等于 $\arcsin[(R_e + 30 \text{ km})/r_s]$ ，以保证发生折射的平流层落在星敏感器的视场内；利用 SAO 星表确定出现在星敏感器视场内的导航星，并筛选折射星，计算可见折射星数。将蒙特卡罗实验结果(100000 个样本点)与折射星数概率分布模型的预测结果进行了比较，其结果如图 4 所示。

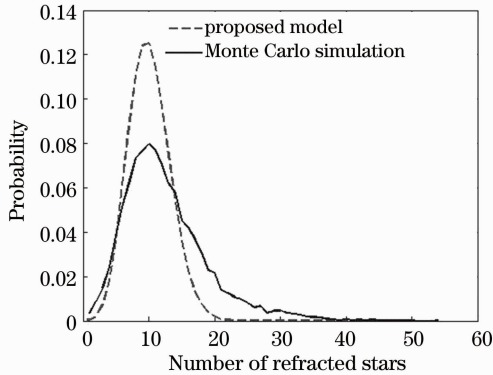


图 4 视场内折射星数的概率分布曲线

Fig. 4 Probability distributions of the number of refracted stars in FOV

从图 4 中可以看出，预测结果与蒙特卡罗实验结果分布曲线大体趋势相同，从而证明了该模型的正确性。蒙特卡罗实验仿真结果为泊松分布，其泊松分布参数 λ_{sta} 为 11.5565，模型参数 $\lambda_{\text{mod}} = 10.077$ 与之相比有 1.48 的偏差，相对误差为 12.8%。误差原因在于恒星在天球上并非均匀分布，且(11)式并不能完全真实地反映恒星在天球中的分布，造成了蒙特卡罗实验结果与模型预测结果的偏差。

5.2 星光折射解析定位方法可行性的仿真实验验证

利用蒙特卡罗实验(10000 个采样点)对 4.2 节中星光折射解析定位方法的可行性分析结果进行验证，结果如表 1 所示。

根据第一组实验结果，在轨道远地点距离和极限观测星等不变的情况下，随着视场的增加，观测到的折射星数目逐渐增多；从第二组蒙特卡罗实验结果中可以得到，当轨道远地点距离与视场一定时，折射星数目随着星敏感器的极限观测星等逐渐增加；第三组蒙特卡罗实验表明，在星敏感器参数(视场和极限观测星等)确定的情况下，可观测折射星随着轨

道远地点距离的增大而减少。可以看出，蒙特卡罗实验结果与理论分析一致。

表 1 蒙特卡罗仿真实验结果

Table 1 Results of Monte Carlo simulation

| Experimental groups | Simulation conditions | | | Results | |
|---------------------|-----------------------|--------------------|-------|------------------|--------------------|
| | r_s/km | FOV / ($^\circ$) | M_v | N_{ref} | $P(k \geq 3) / \%$ |
| First group | 6600 | 10 | 7.6 | 7.7190 | 91.13 |
| | 6600 | 15 | 7.6 | 11.579 | 97.47 |
| | 6600 | 20 | 7.6 | 15.810 | 98.30 |
| | 6600 | 25 | 7.6 | 19.582 | 99.35 |
| Second group | 6600 | 20 | 7.4 | 12.720 | 97.80 |
| | 6600 | 20 | 7.5 | 14.053 | 97.74 |
| | 6600 | 20 | 7.6 | 15.827 | 98.85 |
| | 6600 | 20 | 7.7 | 17.340 | 99.70 |
| Third group | 6500 | 20 | 7.6 | 23.096 | 99.89 |
| | 6600 | 20 | 7.6 | 15.119 | 98.93 |
| | 6700 | 20 | 7.6 | 12.664 | 98.18 |
| | 6800 | 20 | 7.6 | 11.092 | 96.74 |

6 结 论

根据星光折射间接敏感地平的基本原理，推导了视场内平流层条带面积占视场面积的比例系数，进而建立了视场内折射星数的概率分布模型，并利用该模型对星光折射解析定位新方法进行了可行性分析。采用蒙特卡罗实验对该模型进行了验证。利用该模型不但可以根据航天器的轨道事先获得视场内导航星的分布情况，保证对于选定敏感器的极限观测星等和视场，出现在视场内的折射星数满足概率要求；而且还可以根据预测的分布结果，对内部星表进行优化。由仿真结果可知，采用该模型获得的概率分布与蒙特卡罗实验得到的结果接近，泊松参数偏差为 1.48，相对误差为 12.8%，证明了该模型的正确性和有效性。因此，该方法有助于星敏感器的视场和极限观测星等参数设计。

参 考 文 献

- 1 R Serradell, A D Dianous, M Hebert. New generation of infrared horizon scanning sensors for low altitude spacecraft [J]. Acta Astronautica, 1985, 12(2): 101-106.
- 2 Wang Haiyong, Lin Haoyu, Zhou Wenrui. Technology of atmospheric refraction compensation in starlight observation [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1101002.
王海涌, 林浩宇, 周文睿. 星光观测蒙气差补偿技术[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1101002.
- 3 Fang Jiancheng, Ning Xiaolin. Principle and Application of Celestial Navigation [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006.
房建成, 宁晓琳. 天文导航原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- 4 J L Lair, P Duchon, P Riant, et al.. Satellite navigation by

- stellar refraction [J]. *Acta Astronautica*, 1988, 17(10): 1069–1079.
- 5 Wang Guoquan, Ning Shunian, Jin Shengzhen, *et al.*. Study on model of starlight atmosphere refraction from 25 km to 60 km in autonomous navigation for satellite [J]. *Eulletin of Science and Technology*, 2005, 21(1): 106–109.
王国权, 宁书年, 金声震, 等. 卫星自主导航中 25~60 km 星光大气折射模型研究[J]. *科技通信*, 2005, 21(1): 106–109.
- 6 R Counley, R Whie, E Cai. Autonomous satellite navigation by stellar refraction [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamic*, 1984, 7(2): 129–134.
- 7 Ning Xiaolin, Wang Longhua, Bai Xinbei, *et al.*. A scheme designed satellite autonomous navigation system based on stellar refraction [J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(11): 1601–1610.
宁晓琳, 王龙华, 白鑫贝, 等. 一种星光折射卫星自主导航系统方案设计[J]. *宇航学报*, 2012, 33(11): 1601–1610.
- 8 He Ju. Survey of overseas celestial navigation technology development [J]. *Ship Science and Technology*, 2005, 27(5): 91–96.
何 炬. 国外天文导航技术发展综述[J]. *舰船科学技术*, 2005, 27(5): 91–96.
- 9 Wang Guoquan, Ning Shunian, Jin Shengzhen, *et al.*. Research on starlight atmospheric refraction model in autonomous satellite navigation [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2004, 33(6): 616–620.
王国权, 宁书年, 金声震, 等. 卫星自主导航中星光大气折射模型的研究方法[J]. *中国矿业大学学报*, 2004, 33(6): 616–620.
- 10 Hu Jing, Yang Bo. Modified measurement model of stellar horizon atmospheric refraction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 272–277.
胡 静, 杨 博. 一种改进的星光大气折射观测模型[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 272–277.
- 11 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): 971–974.
薛申芳, 宁书年, 金声震, 等. 组合大视场星敏感器自主定轨中的星光折射[J]. *光学学报*, 2006, 26(7): 971–974.
- 12 Wang Xinlong, Ma Shan. High precision autonomous localization method for high altitude and long-flight-time of unmanned aerial vehicle [J]. *Acta Aeronautica Astronautica Sinica*, 2008, 29(s): 39–45.
王新龙, 马 闪. 高空长航时无人机高精度自主定位方法[J]. *航空学报*, 2008, 29(s): 39–45.
- 13 Hu Liqin, Huang Fuxiang. Monte Carlo radiative transfer modeling of optical lightning signals observed by satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1101001.
胡丽琴, 黄富祥. 基于蒙特卡罗方法的卫星光学波段闪电辐射观测模拟[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1101001.
- 14 Liu Zhaoshan, Liu Guangbin, Wang Xinguo, *et al.*. *Onboard Star Sensor Principle and System Applications* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
刘朝山, 刘光斌, 王新国, 等. *弹载星敏感器原理及系统应用* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- 15 C C Liebe. Accuracy performance of star trackers-atutorial [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 587–599.

栏目编辑: 何卓铭