

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.01.009

惯性+星光折射定位组合导航技术研究

胡楠希, 李小琥, 李自行

(北京控制与电子技术研究所, 北京 100038)

摘要: 由于现有惯性器件精度水平有限, 纯惯性导航误差较大, 因此需要采用组合导航的方式来提高导航精度。目前, 全自主组合导航方式中传统的惯性+星光定姿组合导航方法只能实现定姿, 不能实现定位, 无法修正加速度表测量误差引起的惯性导航误差, 故在精度上可提升空间有限。为此, 提出了一种惯性+星光折射定位组合导航方法, 重点从星光折射定位原理、大气折射模型、非线性滤波和选星策略几个方面进行论证及分析。通过理论分析与数学仿真相结合的手段, 验证了星光折射定位原理的正确性及工程可行性, 可将自主导航精度提升至 100m, 从而为进一步提高自主导航精度提供了一种技术途径。

关键词: 星光折射定位; 大气折射模型; 非线性滤波; 选星策略

中图分类号: V249.32

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2095-8110(2021)01-0090-06

Research on Integrated Navigation Based on Inertial Navigation and Stellar Refraction Positioning

HU Nan-xi, LI Xiao-hu, LI Zi-xing

(Beijing Institute of Control and Electronic Technology, Beijing 100038, China)

Abstract: The pure inertial navigation error is relatively large due to the limited accuracy of the existing inertial devices, thus it is necessary to use integrated navigation to improve the navigation accuracy. Traditionally, the fully autonomous inertial/stellar attitude integrated navigation method can not determine the position but the attitude, nor can it correct the inertial navigation error caused by the accelerometer measurement error, so the improvement of navigation accuracy is limited. To solve this problem, a method of integrated navigation based on inertial navigation and stellar refraction positioning is proposed. The research is mainly conducted from several aspects, such as the principle of stellar refraction, the model of starlight atmosphere refraction, nonlinear filter and strategy of star choice. By theoretical analysis and mathematical simulation, the correctness of star refraction positioning principle and engineering feasibility are verified. And the navigation accuracy is improved to 100m, which provides a technical approach to improve the accuracy of autonomous navigation.

Key words: Starlight refraction positioning; Starlight atmosphere refraction model; Nonlinear filtering; Strategy of star choice

收稿日期: 2019-05-31; 修订日期: 2019-07-16

基金项目: 国家安全重大基础科研项目(6133030202)

作者简介: 胡楠希(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事导航、制导与控制技术研究。E-mail: nancy111462@126.com

0 引言

由于现有惯性器件精度水平有限,纯惯性导航误差在千米级以上,因此需要采用组合导航的方式来提高导航精度。目前,全自主组合导航方式中传统的惯性+星光定姿组合导航方法只能实现定姿,不能实现定位,在精度上可提升空间有限。

星光折射自主导航技术是一种可进一步提高自主导航精度的有效途径^[1-2]。美国对星光折射间接敏感地平自主导航的研究工作可以追溯到 20 世纪 60 年代^[3-4]。近年来,国内高校和研究机构均开展了相关研究。文献[5]对利用星光折射间接敏感地平的自主导航的基本原理进行了介绍。文献[6-7]研究了大气折射原理及平流层大气变化规律。文献[8]利用现有大气密度模型和固定高度观测模型,建立了自适应星光折射模型。文献[9-16]对采用星光折射进行自主导航的方法进行了研究。

为此,提出了一种惯性+星光折射定位组合导航方法,重点从星光折射定位原理、大气折射模型、非线性滤波和选星策略几个方面进行论证及分析。通过理论分析与数学仿真相结合的手段,验证了星光折射定位原理的正确性及工程可行性,从而为进一步提高自主导航精度提供了一种技术途径。

1 惯性+星光折射定位组合导航原理

1.1 星光折射定位原理

星光折射定位导航方法是利用星光在大气中的折射角和折射高度之间的关系而间接敏感地平,从而实现高精度定位导航。

首先,星光在穿过大气层时会发生偏折。由于平流层(高度 20~50km)大气密度比较稳定,使得视高度 h_a 与折射角 θ_{ss} 的关系可以用大气折射模型表示

$$h_a = h_0 - H \ln(\theta_{ss}) + H \ln \left[K(\lambda) \rho_0 \left(\frac{2\pi R_e}{H} \right)^{1/2} \right] + \theta_{ss} \left(\frac{H R_e}{2\pi} \right)^{1/2} \quad (1)$$

其次,视高度 h_a 与观测点位置 r 、折射角 θ_{ss} 之间存在如下几何关系

$$h_a = \mathbf{r}^T \mathbf{u} + \left(\mathbf{r}^T \mathbf{s} - \frac{R_e \cdot \theta_{ss}}{2} \right) \cdot \tan(\theta_{ss}) - R_e \quad (2)$$

星光折射定位的几何关系如图 1 所示。

综上所述,星光折射定位的基本原理如下:首先,通过星敏感器持续观测穿过平流层的多颗不同

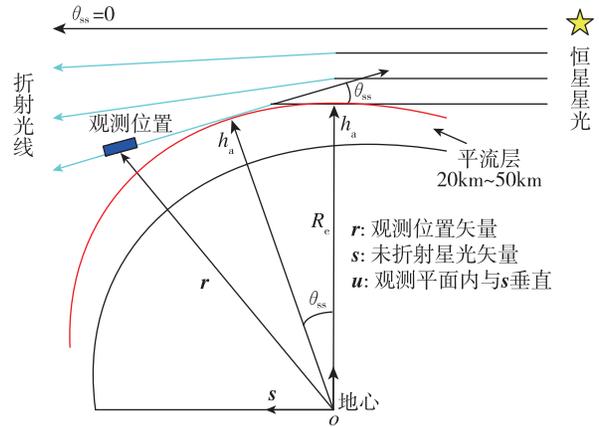


图 1 星光折射定位几何关系图

Fig. 1 Geometric illustration of stellar atmospheric refraction positioning

方向折射星,测量得到折射角;其次,根据大气折射模型与折射角计算得到视高度;最后,根据星敏感器测量得到的折射角与大气模型计算得到的视高度,建立惯性+星光折射定位观测方程,解算载体位置。该定位原理如图 2 所示。

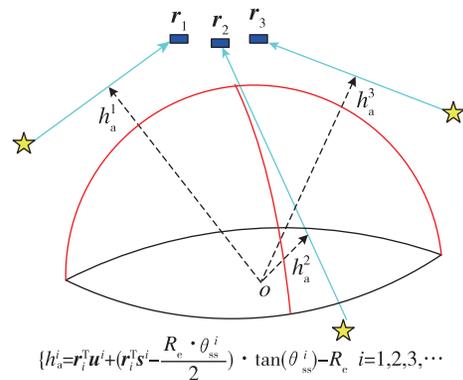


图 2 星光折射定位原理图

Fig. 2 Illustration of stellar refraction positioning

1.2 大气折射原理

公式给出的是简化的大气折射模型,是在假设大气密度与高度是指数关系,同时大气密度在全球均匀分布的前提下得到的。这个简化模型可以定性地说明大气折射的基本原理:折射角随着视高度的降低而增大。视高度与折射角近似关系如图 3 所示。

从工程应用的角度看,简化的大气模型计算得到的视高度误差较大,因此需要构建考虑大气参数非均匀性的精确大气折射模型。

该方法得到的视高度与观测点位置、星光方向以及折射角有关,如式(3)所示

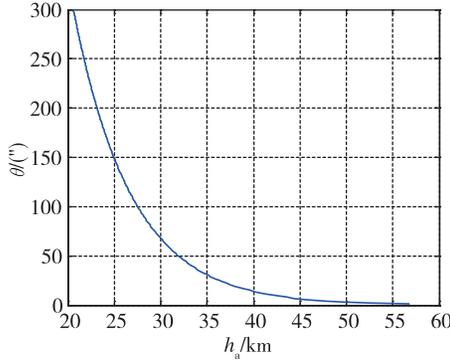


图3 视高度与折射角关系图

Fig. 3 Relationship between apparent height and refraction angle

$$h_a = f\{\Theta_0, \Phi_0, \Psi, n_i, h_i | \theta_{ss}\} \quad (3)$$

1.3 非线性滤波原理

常用的估计方法主要有两类:最小二乘法和Kalman滤波。最小二乘法比较适合对常值参数进行估计,而Kalman滤波适合对时变系统进行估计。传统的Kalman滤波算法需要对状态方程与观测方程进行线性化处理,对于线性系统有较好的适应性,但是随着滤波周期的增大以及系统非线性的增强,滤波的非线性误差也会增大。

无迹Kalman滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)是一种针对非线性系统的滤波方法。对于线性系统来说,它的滤波性能与传统Kalman滤波相当;对于非线性系统,它的性能则明显优于传统Kalman滤波。在惯性+星光折射定位过程中,状态方程与观测方程既是时变的更是非线性的,因此通过上述分析可以得出,UKF算法是最适合惯性+星光折射的定位算法。

UKF算法不需要对系统进行线性化处理,其主要思想如下,假设一个离散非线性系统

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= F(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, k) + \boldsymbol{\omega}_k \\ \mathbf{z}_k &= H(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, k) + \mathbf{v}_k \end{aligned} \quad (4)$$

式中, \mathbf{x}_k 为系统状态矢量; \mathbf{u}_k 为控制矢量; $\boldsymbol{\omega}_k$ 为系统噪声矢量; \mathbf{z}_k 为观测矢量; \mathbf{v}_k 为量测噪声矢量。在 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 附近选取一系列采样点,这些采样点的均值和协方差分别为 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 和 \mathbf{P}_k 。设状态变量为 $n \times 1$ 维,那么 $2n + 1$ 个采样点及其权重分别如下

$$\begin{cases} \boldsymbol{\chi}_{0,k} = \hat{\mathbf{x}}_k \\ W_0 = \tau / (n + \tau) \\ \boldsymbol{\chi}_{i,k} = \hat{\mathbf{x}}_k + \sqrt{n + \tau} (\sqrt{\mathbf{P}(k|k)})_i \\ W_i = 1 / [2(n + \tau)] \\ \boldsymbol{\chi}_{i+n,k} = \hat{\mathbf{x}}_k - \sqrt{n + \tau} (\sqrt{\mathbf{P}(k|k)})_i \\ W_{i+n} = 1 / [2(n + \tau)] \end{cases} \quad (5)$$

标准的UKF算法如下:

初始化

$$\hat{\mathbf{x}}_0 = E[\mathbf{x}_0], \mathbf{P}_0 = E[(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0)(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0)^T] \quad (6)$$

计算采样点

$$\boldsymbol{\chi}_{k-1} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{k-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \sqrt{n + \tau} (\sqrt{\mathbf{P}_{k-1}})_i \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-1} - \sqrt{n + \tau} (\sqrt{\mathbf{P}_{k-1}})_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

状态方程更新

$$\boldsymbol{\chi}_{k|k-1} = F(\boldsymbol{\chi}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}, k-1)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \sum_{i=0}^{2n} W_i \boldsymbol{\chi}_{i,k|k-1}$$

$$\mathbf{P}_k = \sum W_i [\boldsymbol{\chi}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{x}}_k] [\boldsymbol{\chi}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{x}}_k]^T + \mathbf{Q}_k$$

$$\mathbf{y}_{k|k-1} = H(\boldsymbol{\chi}_{k|k-1}, \mathbf{u}_{k-1}, k)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_k = \sum_{i=0}^{2n} W_i \mathbf{y}_{i,k|k-1} \quad (8)$$

量测更新

$$\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{y}}_k, \hat{\mathbf{y}}_k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i [\mathbf{y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{y}}_k] [\mathbf{y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{y}}_k]^T + \mathbf{R}_k$$

$$\mathbf{P}_{\mathbf{x}_k, \hat{\mathbf{y}}_k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i [\boldsymbol{\chi}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{x}}_k] [\mathbf{y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{y}}_k]^T$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{\mathbf{x}_k, \hat{\mathbf{y}}_k} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{y}}_k, \hat{\mathbf{y}}_k}^{-1}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k)$$

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k - \mathbf{K}_k \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{y}}_k, \hat{\mathbf{y}}_k} \mathbf{K}_k^T \quad (9)$$

式中, \mathbf{Q}_k 和 \mathbf{R}_k 分别为系统和量测噪声协方差。当 \mathbf{x}_k 为高斯分布时,通常选取 $n + \tau = 3$ 。

从滤波算法中可以看到,状态方程与观测方程都没有进行线性化处理,而是直接采用实际的方程进行计算。系统状态估计误差通过采样点进行描述,并通过估计观测量与实际观测量的偏差对系统状态估计与方差进行修正。采样点示意图如图4所示。

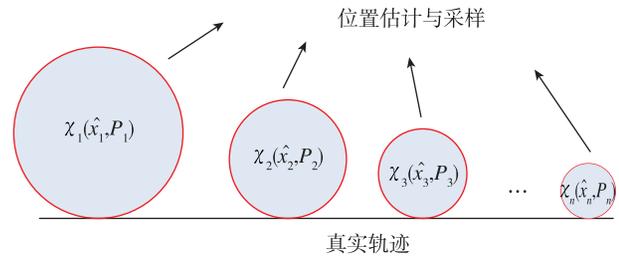


图4 采样点示意图

Fig. 4 Illustration of sample point

图4中,每一个圆代表每一次观测后估计的采样点分布,下方的横线代表真实轨迹。采样点的均

值为每一次估计的位置,采样点的方差为估计的方差。由于初始位置误差较大,因此第 1 个圆会比较大,圆心距离真实轨迹较远。随着观测次数的增大,估计的方差会减小,估计的位置误差也会减小,因此圆会越来越小,最终收敛到真实的位置。

1.4 折射星分布原理

折射星的分布取决于观测点与星光方向的相对关系。如图 1 所示,定义地心矢量 r 与未折射的星光矢量 s 之间的夹角为 α , 则公式可以改写为

$$h_a = |r| \cdot \sin(\alpha) + |r| \cdot \cos(\alpha) \cdot \tan(\theta_{ss}) - R_e(1 + \theta_{ss} \cdot \tan(\theta_{ss})/2) \quad (10)$$

由此可知,随着折射星视高度的增大,夹角 α 也在增大,可观测的折射星与观测点地心矢量的夹角为一个圆锥面,如图 5 所示。

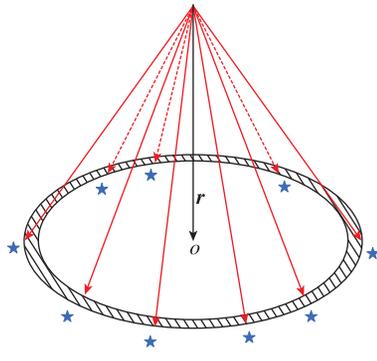


图 5 折射星分布示意图

Fig. 5 Distribution of refraction star

根据上述分析可知:在观测点移动过程中,持续观测同一颗折射星,地心矢量与星光矢量之间的夹角是在变化的,所观测到的折射角与视高度也是连续变化的。

2 惯性+星光折射定位组合导航的应用

2.1 基于非线性滤波的惯性+星光折射定位方法

为了将 UKF 算法应用于惯性+星光折射定位,需要对滤波方程进行细化,主要包括状态方程与观测方程。

滤波方程中使用的观测量为视高度,而直接的观测是折射角,因此需要将折射角转化为视高度。通过采样点可以估计出相应的视高度估计值,这里需要用到视高度与位置的几何关系方程,该方程就是观测方程

$$\hat{h}_a = \hat{r}^T u + \left(\hat{r}^T s - R_e \cdot \frac{\theta_{ss}}{2} \right) \cdot \tan(\theta_{ss}) - R_e \quad (11)$$

通过直接观测量折射角还可以计算得到真实的视高度观测值,这里需要用到大气折射模型

$$h_a = f\{\Theta_0, \Phi_0, \Psi, n_i, h_i | \theta_{ss}\} \quad (12)$$

基于方程的视高度估计值与视高度观测值之间的偏差对位置速度进行修正。从滤波开始,每一个滤波周期都进行状态方程的计算。当进行星光观测时,则进行量测的更新与状态的修正;当没有观测时,则只进行状态方程的计算。

滤波方程中,初始的位置取惯性导航的位置,初始的位置方差应设置为惯导误差的方差,量测噪声应选取折射角观测偏差引起的视高度偏差的方差。

滤波过程的示意图如图 6 所示。

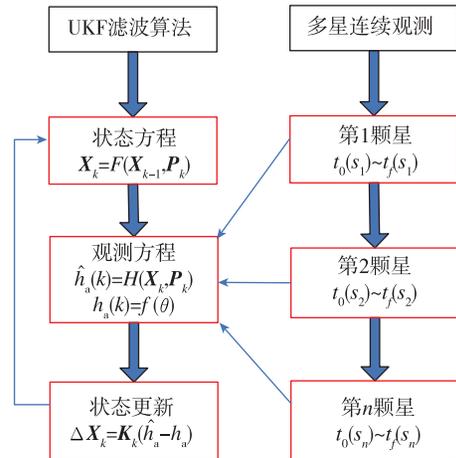


图 6 滤波过程示意图

Fig. 6 Illustration of filtering

2.2 折射星选星策略

折射星选星策略应包括 2 个部分:1)备选星的筛选;2)折射星的选择策略。

由于星库中的星较多,但是可用的折射星只是一小部分。另外,根据 1.4 节的分析可知,折射星的观测不仅需要关注观测的是哪一颗星,更要关注在什么时间去观测。因此,需要根据观测段的位置将所有可用的折射星筛选出来作为折射星备选星库,以便从中选择可用的折射星。

在已知折射星备选星库后,折射星的选择应该服从如下原则:1)选择不少于 3 颗星;2)所选星在方位上尽量分布均匀;3)前后 2 颗折射星的观测时间间隔应该考虑调姿时间与连续观测时间。

3 数学仿真

在考虑了大气折射模型后,星光折射定位的算法流程如图7所示。

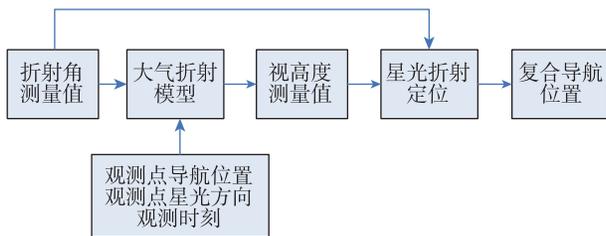


图7 惯性+天文组合导航工作流程图

Fig. 7 Workflow of inertial/stellar integrated navigation

大气折射模型根据输入的辅助数据与折射角测量值计算出该时刻的视高度,组合导航根据大气折射模型计算的视高度与星敏感器观测到的折射角进行星光折射定位。按照上述流程进行蒙特卡罗仿真。

仿真后统计的位置估计误差如表1所示。

表1 位置估计误差统计(3σ)

Tab. 1 Error of position analysis(3σ)			m
ΔX	ΔY	ΔZ	
58	78	41	

从仿真结果可以得出,基于非线性滤波的定位方法可以有效地消除观测误差并得到较高的位置估计精度,证明了惯性+星光折射定位算法合理有效。

4 结论

本文提出了一种惯性+星光折射定位组合导航方法,重点从星光折射定位原理、大气折射模型、非线性滤波和选星策略几个方面进行论证及分析。通过理论分析与数学仿真相结合的手段,验证了星光折射定位原理的正确性及工程可行性。采用该方法可以提高组合导航精度,从而为进一步提高自主导航精度提供了一种技术途径。

参考文献

[1] Chory M A, Hoffman D P, Lemay J L. Satellite autonomous navigation-status and history[J]. IEEE Transaction on Position, Location and Navigation Symposium, 1986, 4(7): 110-121.

[2] Gounley R B, White R L, Gai E. Autonomous satellite navigation by stellar refraction[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 1984, 7(2): 129-134.

[3] Anthony J. Air force Phillips laboratory autonomous space navigation experiment [C]// Proceedings of AIAA Space Programs and Technologies Conference. Huntsville, AL, 1992.

[4] White R L, Goumey R B. Satellite autonomous navigation with SHAD[R]. Cambridge, Massachusetts: The Charles Stark Draper Laboratory, Inc., 1987.

[5] 房建成, 宁晓琳, 田玉龙. 航天器自主天文导航原理与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 103-134.

Fang Jiancheng, Ning Xiaolin, Tian Yulong. The theory of spacecraft autonomous navigation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 103-134(in Chinese).

[6] 王国权, 宁书年, 金声震, 等. 卫星自主导航中25-60公里星光大气折射模型研究[J]. 科技通报, 2005, 21(1): 106-109.

Wang Guoquan, Ning Shunian, Jin Shengzhen, et al. Study on model of starlight atmosphere refraction from 25km to 60km in autonomous navigation for satellite[J]. Bulletin of Science and Technology, 2005, 21(1): 106-109(in Chinese).

[7] 王国权, 宁书年, 金声震, 等. 卫星自主导航中星光大气折射的研究方法[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(6): 616-620.

Wang Guoquan, Ning Shunian, Jin Shengzhen, et al. Research on starlight atmosphere refraction model in autonomous navigation for satellite[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(6): 616-620(in Chinese).

[8] 胡静, 杨博, 精确星光大气折射导航观测模型的研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(7): 773-777.

Hu Jing, Yang Bo. Precise research on stellar horizon atmospheric refraction model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(7): 773-777(in Chinese).

[9] Wang X L, Xie J, Ma S. Starlight atmospheric refraction model for a continuous range of height[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2010, 33(2): 634-637.

[10] 温永智, 吴杰. 基于卫星导航数据在线拟合星光折射模型方法[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(1): 7-10.

Wen Yongzhi, Wu Jie. Fitting starlight atmosphere

- refraction model line using satellite navigation data [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2011, 33(1): 7-10(in Chinese).
- [11] Fang J C, Ning X L. Installation direction analysis of star sensors by hybrid condition number[J]. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(10): 3567-3582.
- [12] Ning X L, Fang J C. An autonomous celestial navigation method for LEO satellite based on unscented Kalman filter and information fusion[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2007, 11(2/3): 222-228.
- [13] 李琳琳, 孙辉先. 基于星敏感器的星光折射卫星自主导航方法研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2004, 26(3): 353-357.
- Li Linlin, Sun Huixian. Satellite autonomous navigation by stellar refraction based on a star sensor[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(3): 353-357(in Chinese).
- [14] Ning X L. Autonomous satellite navigation using starlight refraction angle measurements[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(9): 1761-1772.
- [15] 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.
- Ning Xiaolin, Wang Longhua, Bai Xinbei, et al. A scheme design of satellite autonomous navigation system based on stellar refraction[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(11): 1601-1610(in Chinese).
- [16] 江浩, 苏伟雄, 薛艳. 飞行载体在大气折射条件下的星图识别[C]// 中国惯性技术学会 2010 年科技工作者研讨会. 云南, 2010.
- Jiang Hao, Su Weixiong, Xue Yan. The star pattern recognition of flight carriers in the atmosphere refraction[C]// *Proceedings of 2010 China Scientific and Technical Workers Symposium of Inertial Technology Society*. Yunnan, 2010(in Chinese).

(编辑: 孟彬)