

# 高精度星敏传感器标定方法研究\*

易敏<sup>1</sup>, 邢飞<sup>2</sup>, 孙婷<sup>1</sup>, 王宏<sup>1</sup>

(1. 北京信息科技大学 先进光电子技术国际合作联合实验室 北京 100192;

2. 清华大学精密仪器系 北京 100084)

**摘要:**星敏传感器是一种广泛应用在航天飞行器中的高精度姿态测量器件,精度标定是保证高精度测量的重要环节。为了提高星敏传感器的整体精度,对传统星敏传感器标定方法进行了仿真分析,针对传统星敏传感器标定方法模型参数难以解耦的弊端,提出单独标定主点,将星敏传感器光学参数误差(如焦距、成像平面倾斜和畸变)等看作一个整体误差源,采用直接映射的方式进行标定。该方法简单方便、标定精度高,避免了传统方法中误差影响因素分析不全面及多次求取拟合近似值造成的累积误差。实验结果表明,该标定方法完全满足测量角误差 $2''$ 的要求。

**关键词:**光学参数;高精度;标定;整体误差源;直接映射

中图分类号: TH7 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

## Calibration method of high-accuracy star sensor

Yi Min<sup>1</sup>, Xing Fei<sup>2</sup>, Sun Ting<sup>1</sup>, Wang Hong<sup>1</sup>

(1. Joint International Research Laboratory of Advanced Photonics and Electronics, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Star sensor is a high precision attitude measurement instrument widely used in spacecraft. The star sensor's calibration is very essential for the high precision measurement of star sensor. In order to improve the overall accuracy of the star sensor, a simulation analysis is carried out for the traditional star sensor calibration method. The model parameters are difficult to decouple for the traditional star sensor calibration. To solve this issue, a direct mapping calibration method is proposed in which the focal length, imaging plane tilt and distortion, etc. as a whole parameter are calibrated. This simple method can achieve higher accuracy, which avoids the shortcomings caused by the error analysis of the traditional method. Experimental results show that the calibration method fully meets the system requirements of  $2''$ .

**Keywords:** optical parameter; high-accuracy; calibration; whole error source; direct mapping

## 0 引言

星敏传感器是卫星平台用于姿态控制的核心仪器,有测量姿态连续且漂移小的优点。为了提高星敏传感器的整体精度,标定实验成为所有星敏传感器的必经过程,也是星敏传感器研发的核心技术之一。目前已有较多的文献对星敏传感器的标定方法进行了研究和分析,总体来看,存

在对误差因素评价不够系统和全面,多次求取拟合近似值造成累积误差等问题,精度不能得到保证<sup>[1-4]</sup>。

本文介绍了星敏传感器原理与标定理想针孔模型,给出了一种单独标定主点位置,对影响星敏传感器精度的其他参数误差,如焦距、成像平面倾斜误差和畸变等<sup>[5-7]</sup>,看作一个系统整体误差源的标定方法,以此为依据,可以进一步进行实验室标定,并对实验结果进行了仿真验证。

收稿日期:2017-07 Received Date: 2017-07

\* 基金项目:国家自然科学基金(61605099)、北京市未来芯片技术高精尖创新中心科研基金(KYJJ2016002)、“青年人才托举工程”2016-2018年度项目(2016QNRC001)资助

## 1 星敏感器标定模型

星敏感器的理想模型为针孔模型,如图1所示。图像坐标系为  $(X_i, Y_i, Z_i)$ ,假设星像中心坐标为  $(x_0, y_0)$ ,则恒星单位矢量在星敏感器本体坐标系中为:

$$N_i = \frac{1}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -x_i \\ -y_i \\ f \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $f$  为光学系统焦距。

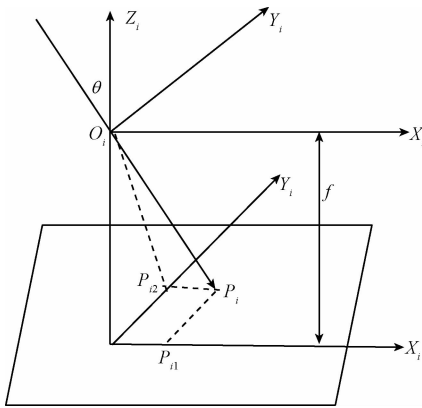


图1 针孔模型

Fig.1 Pinhole model

针孔模型是基于共线原理,星空中的每一个点都通过投影中心直接映射到图像平面上,星光矢量  $O_i P_i$  与星敏感器光轴的夹角  $\theta$  的正切为:

$$\tan\theta = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} / f \quad (2)$$

$$f = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} / \tan\theta \quad (3)$$

$$\theta = \arctan(\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} / f) \quad (4)$$

式中:  $\theta$  角的测量精度是星敏感器整体精度的基础。在理想情况下,实际测量得到的夹角  $\theta_s$  与根据式(4)计算所得的角  $\theta_i$  应该是相等的,即有:

$$\theta_s = \theta_i \quad (5)$$

由于星敏感器光学系统像差、装配误差及焦距测不准等因素的存在,导致实测互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 平面上星像点的中心位置坐标与理想的星像点的中心坐标有偏差,因此针孔模型并不能准确的模拟真实星敏感器成像情况<sup>[8-9]</sup>。实际星点质心  $P_i'(x_i', y_i')$  与理想星点质心并不重合,从而引入测量角误差  $\Delta\theta$ <sup>[10]</sup>:

$$\Delta\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{\Delta x_i'^2 + \Delta y_i'^2}}{f}\right) - \arctan\left(\frac{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}}{f}\right) \quad (6)$$

## 2 星敏感器标定方法

### 2.1 常用误差参数标定方法

星敏感器的标定原理是通过理想条件下已知的参考点质心位置和畸变图像相应星像点质心位置间对应关系,建立起整个图像中畸变坐标与理想坐标之间的映射关系,从而达到标定的目的<sup>[11-12]</sup>。通过对星敏感器的内部参数,包括像面主点、光学系统焦距、光学系统畸变等参数进行分析,得到它们对测量精度的影响后逐一标定是星敏感器标定的常用方法<sup>[13-16]</sup>。标定流程如图2所示。

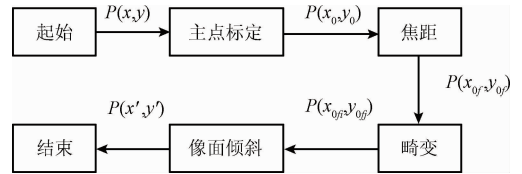


图2 常用参数标定流程

Fig.2 Common parameter calibration flow chart

为了更加清晰地分析传统参数标定方法,对这种方法进行仿真实验验证。首先分别对星敏感器像面主点、光学系统焦距、光学系统畸变等误差建模,并用最小二乘法进行参数估计。其次,利用平行光管、三轴高精度转台和星敏感器样机完成校准数据采集。为了更加全面了解标定效果,视场范围取  $15^\circ \times 12^\circ$ ,焦距  $f$  取 4 713.72 pixels。标定结果像面修正图如图3所示。

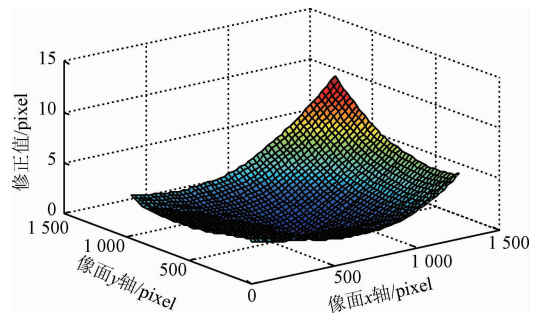


图3 传统标定方法像面修正图

Fig.3 Corrected figure of traditional calibration method

由仿真结果可见,使用传统标定方法标定,标定点最大偏差可达 12 pixels,小视场范围内标定结果较平稳,操作较简单,标定点偏差约在 5 pixels 以内,但不适合大视场的情况,整体实验效果并不理想。分析原因,主要是这种标定方法中,建立的模型参数相互耦合,难以解耦和分析,受外界环境影响大,且最小二乘估计方法难以得到全局最优解,受初始值影响较大,得到的估计参数难以控制,所以这种标定方法精度不能得到保证。

## 2.2 改进误差参数标定方法

为了满足星敏传感器不断提升的精度要求,使标定方法更简单有效,避免传统标定方法复杂的解耦过程,提出将所有误差参数当作一个整体未知误差源的标定方法。考虑到主点的标定精度会对其他参数标定精度产生影响,所以单独标定主点。流程如图4所示。

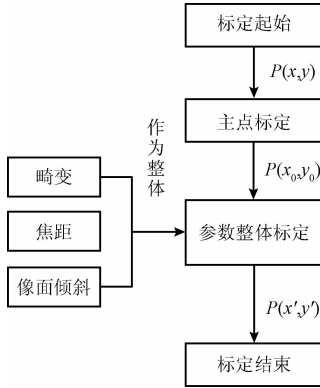


图4 参数整体标定法流程

Fig. 4 Flow chart of parametric integral calibration process

由于光学系统在视场的不同区域畸变不同,像差也有很大的变化,为了达到系统的精度要求,利用大量离散星像建立位置映射关系,通过直接映射的方式完成标定。将误差参数看作整体的标定方法,避免了常用标定方法的缺点,能有效地提高星敏传感器的标定精度。

### 2.2.1 主点标定

在这种标定方法中,主点作为光学畸变的参考中心,必须先于其他参数标定。如果考虑到主点的位置误差,则式(1)并不适用于在星敏传感器本体坐标系中恒星单位矢量,应改为:

$$l_i = \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -(x_i - x_0) \\ -(y_i - y_0) \\ f \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $(x_0, y_0)$  为主点像面坐标。

主点标定主要设备为自准直经纬仪、待标定星敏传感器、光学平台以及其他辅助固定装置。具体操作为从瞄准一个垂直镜面开始,操作者注入一束平行光,将目镜十字丝刻线的图像投射到对面的平面反射镜从镜面反射回的十字丝与物镜中的十字丝重合。如果反射回来的十字丝有偏差,可以由经纬仪准确读出,并进行调整。最终保证标定主点位置与实际镜头主点位置重合。

### 2.2.2 其他参数整体标定方法与结果分析

由以上的分析,提出了将除主点以外的其他参数整体看作一个参数误差,设计实验对整个像面定点移动采

集图像,获得的定点位置数据通过简单运算,即可得到整个像面的修正数据。为了尽量提高系统的精度,避免拟合带来的误差,最后采用直接映射的方式对全像面修正。理论上讲,映射点越多,标定精度越高。实验设备有平行光管、三轴高精度转台和待标定星敏传感器<sup>[17-18]</sup>,如图5所示。

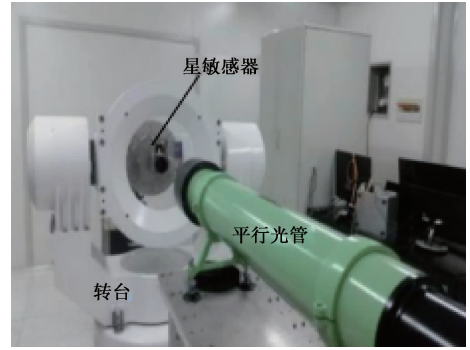


图5 实验设备

Fig. 5 Experimental equipment

用平行光管作为星模拟器,通过3轴转台控制星敏传感器在整个像面对  $N$  行  $M$  列进行定点移动采集图像,方位角步进为  $\alpha$ , 高低角步进为  $\beta$ , 对  $N \times M$  个定点按照自上而下从左到右的顺序依次采集图像,采集过程示意图如图6所示。在全像面内对采集的点位置坐标采用二次插值的方法,获得适用于整个像面的标定数据。

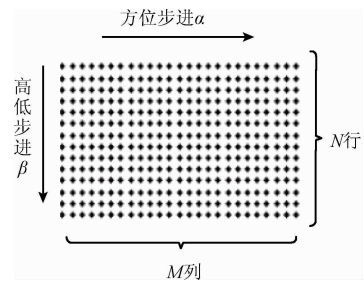


图6 采集过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sampling process

二次插值计算出适用于全像面的星点位置坐标  $(x, y)$ , 根据星敏传感器的标定模型,由式(3)和(6)可得测量角误差  $\Delta\theta$ , 这种标定方法的函数关系为:

$$\Delta\theta = \varphi(\alpha, \beta, x_0, y_0, x_i, y_i) \quad (8)$$

式中:  $\alpha, \beta, x_0, y_0, x_i, y_i$  作为的已知的输入量,  $(x_0, y_0)$  为中心点坐标,  $(x_i, y_i)$  为实际测得星点坐标,  $\alpha, \beta$  已知, 易得实际测量夹角  $\theta_s$ 。通过整体标定的方法最终计算得测量角误差  $\Delta\theta$ 。即可分析得星敏传感器实际成像镜面情况。

### 3 实验与结果

为了对提出的星敏感器标定方法可达精度进行验证,本文采用如图7所示,视场角为 $15^\circ \times 12^\circ$ 的星敏感器,APS CMOS图像传感器像素为 $1\,280\text{ pixel} \times 1\,024\text{ pixel}$ 。



图7 星敏感器  
Fig.7 Star sensor

#### 3.1 主点标定

实验器件:

星敏感器、leica6100A 自准直经纬仪、电源、采集卡、三脚架、星敏固定板及支架。

自准直经纬仪的口径应与星敏感器相近或大于星敏感器口径以避免渐晕现象。标定实物如图8所示。

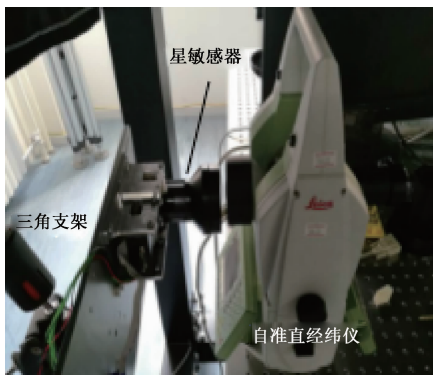


图8 实验设备  
Fig.8 Test equipment

实验步骤:

- 1) 将星敏感器用星敏固定板及支架固定后,置于三脚架上,放在经纬仪前。
- 2) 利用其自准直目镜确保平面反射镜从镜面反射回

的十字丝与物镜中的十字丝重合。重合后的中心在 $512 (\pm 20)\text{ pixel} \times 640 (\pm 20)\text{ pixel}$  以内。主点标定结果图如图9所示。

3) 使用采集卡对主点位置采集 30 幅图片,利用 MATLAB 计算得到各图的主点位置如表1所示。取 30 幅图的平均值即为标定主点位置。



图9 主点标定结果  
Fig.9 Calibration results of main point

表1 主点计算数据

Table 1 Main point calculation data

序号	X轴	Y轴
1	641.536 1	513.924 6
2	641.521 1	513.924 6
3	641.536 2	513.919 2
4	641.535 4	513.929 8
5	641.526 8	513.919 4
6	641.530 6	513.929 6
7	641.547 4	513.924 5
8	641.530 9	513.924 8
9	641.540 8	513.919 2
10	641.546 8	513.925 1
11	641.531 0	513.929 5
12	641.542 3	513.908 3
13	641.531 0	513.929 9
14	641.525 6	513.924 5
15	641.542 2	513.913 9
16	641.531 8	513.929 6
17	641.531 6	513.903 3
18	641.531 6	513.914
19	641.536 6	513.924 3
20	641.542 5	513.935 3
21	641.531 7	513.914 0
22	641.531 9	513.940 5
23	641.546 7	513.935 2

续表1 (pixel)

序号	X轴	Y轴
24	641.531 6	513.919 3
25	641.537 5	513.919 5
26	641.542 4	513.924 3
27	641.548 4	513.903 2
28	641.536 2	513.924 7
29	641.542 1	513.929 6
30	641.531 1	513.924 7
平均值	641.535 9	513.922 9

### 3.2 其他参数标定

根据2.2节中提出的标定方法,现对焦距、光学系统畸变及像面倾斜等误差因素看作整体,进行标定实验。星敏传感器具体参数如表2所示。

表2 标定参数数据

Table 2 Calibrated parameter data

视场/(°)	像元尺寸/mm	分辨率/pixel	主点位置/pixel
15 × 12	0.005 3	1 280 × 1 024	641.535 9 × 513.922 9

模型建立:

1) 视场为 15° × 12°, 转动三轴高精度转台, 方位角步进为 0.3°, 高低角步进为 0.3°, 共采集 41 × 51 组位置星点图像。

2) 每点采样 30 次, 进行质心提取, 作为精度标定的模型。

实验得到实际 2 091 点的坐标平均值和其分别对应的转台位置, 按照星敏传感器测量原理, 根据实验所得质心位置计算星敏传感器标定点的修正值, 修正了光学系统的多项固有误差。像面修正图如图 10 所示。由图 10 可知, 使用将误差参数看作整体的标定方法修正后, 每个标定偏差均在 0.2 pixel 内。将理想标定位置与实测位置进行分析比较, 由式(6)计算出 41 组测量角误差  $\Delta\theta$ , 每组测量角度误差平均值如表 3 所示。

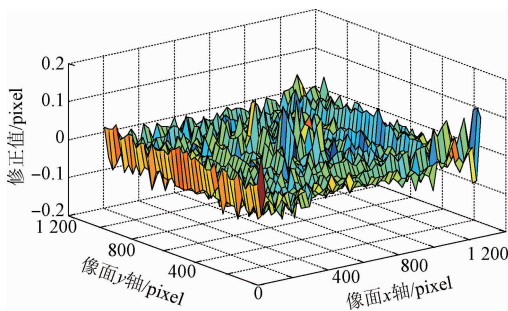


图10 像面修正图

Fig. 10 Image plane correction

表3 计算后的测量角误差  $\Delta\theta$ Table 3 Measure Angle error  $\Delta\theta$ 

行数	平均值/(")	行数	平均值/(")
1	1.089 1	22	1.298 0
2	0.847 3	23	1.459 9
3	1.523 7	24	1.377 1
4	0.662 5	25	1.503 1
5	0.841 3	26	1.366 4
6	0.733 3	27	0.865 8
7	1.217 6	28	0.984 8
8	0.938 6	29	1.187 2
9	0.785 0	30	1.241 6
10	0.769 2	31	0.756 2
11	0.957 9	32	1.109 1
12	1.380 6	33	1.052 3
13	0.876 1	34	0.867 9
14	0.840 5	35	0.692 6
15	1.171 1	36	0.592 4
16	1.437 1	37	1.274 8
17	1.288 0	38	0.951 4
18	1.245 7	39	0.659 2
19	1.393 2	40	0.737 6
20	1.484 8	41	1.405 6
21	1.312 8		

通过计算可以得出, 在实验采集的 2 091 个标定平均测量角误差为 1.007 5", 41 组标定平均测量角误差平均值当中, 最大值为 1.523 7", 标定标准差为 0.984 3"。分析得标定点的测量角误差均在 2" 之内, 满足标定精度要求。

## 4 结 论

本文结合星敏传感器标定的误差模型, 分析了影响测量精度的因素, 提出了首先标定主点, 其他误差参数看作一个整体未知误差源, 利用大量离散星像建立位置映射关系, 通过直接映射的方法标定。采用该方法对实测的星敏传感器标定数据进行修正, 标定后每个标定点的测量角误差均在 2" 以内。结果表明, 这种方法标定精度高、稳定性好、操作计算简便满足日益提高的星敏传感器标定精度的需求。



## 参考文献

- [1] 胡雄超,吴永康,闫晓军,等.一种星敏传感器标定误差修正方法研究[J].上海航天,2016,33(6):89-90.  
HU X CH, WU Y K, YAN X J, et al. A calibration error correction method for star sensor [J]. Aerospace Shanghai, 2016, 33(6): 89-90.
- [2] 王洪涛,罗长洲,王渝,等.星敏传感器模型参数分析及校准方法研究[J].电子科技大学学报,2010,39(6):880-883.  
WANG H T, LUO CH ZH, WANG Y, et al. Star sensor model parametric analysis and calibration method study[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(6): 880-883.
- [3] RYBERG A, LENNARTSON B, CHRISTIANSSON A K, et al. Analysis and evaluation of a general camera model[J]. Computer Vision & Image Understanding, 2011, 115(11):1503-1515.
- [4] LIEBE C C. Accuracy performance of star trackers-A tutorial[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2002, 38(2):587-599.
- [5] 孙婷,邢飞,尤政.高精度星敏传感器光学系统误差分析[J].光学学报,2013,33(3):253-261.  
SUN T, XING F, YOU ZH. Optical system error analysis of high accuracy star trackers [J]. Acta Optic Sinica, 2013, 33(3):253-261.
- [6] 王晓辉,程健庆,韩瑜.基于改进模型的摄像机标定[J].电子测量技术,2013,36(12):40-44.  
WANG X H, CHENG J Q, HAN Y. Camera calibration based on improver model [J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(12): 40-44.
- [7] XING F, DONG Y, YOU Z. Laboratory calibration of star tracker with brightness independent star identification strategy [J]. Optical Engineering, 2006, 45(6): 711-725.
- [8] 张辉,田宏,袁家虎,等.星敏传感器参数标定及误差补偿[J].光电工程,2005,32(9):2-4  
ZHANG H, TIAN H, YUAN J H, et al. Parameter calibration and error compensation of star sensor [J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(9):2-4.
- [9] 贺鹏举,梁斌,张涛,等.大视场星敏传感器标定技术研究[J].光学学报,2011,31(10):192-198.  
HE P J, LIANG B, ZHANG T, et al. Calibration method for wide field of view star sensor [J]. Acta Optic Sinica, 2011, 31(10):192-198.
- [10] 李勉洪,丁国鹏,郑伟波.大视场星敏传感器标定技术[J].传感器与微系统,2015,34(7):41-42.  
LI M H, DING G P, ZHENG W B. Calibration technology for wide field of view star sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(7):41-42.
- [11] 钟红军,杨孟飞,卢欣.星敏传感器标定方法研究[J].光学学报,2010,30(5):1344-1346.  
ZHONG H J, YANG M F, LU X. Calibration method of star sensor [J]. Acta Optic Sinica, 2010, 30(5): 1344-1346.
- [12] 曹佃生.广角镜头畸变测量及校正方法研究[J].电子测量与仪器学报,2015,29(8):1210-1215.  
CAO D SH. Distortion measurement and correction method of wide-angle lens [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(8): 1210-1215.
- [13] 乔培玉,何昕,魏仲慧,等.高精度星敏传感器的标定[J].红外与激光工程,2012,41(10):2781-2783  
QIAO P Y, HE X, WEI ZH H, et al. Calibration of high-accuracy star sensors [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10):2781-2783.
- [14] 邢飞,董瑛,武延鹏,等.星敏传感器参数分析与自主校正[J].清华大学学报:自然科学版,2005,45(11):1484-1488.  
XING F, DONG Y, WU Y P, et al. Star tracker parametric analysis for autonomous calibration [J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition, 2005, 45(11):1484-1488.
- [15] 孙婷,邢飞,尤政.一种基于天体运动学的星敏传感器精度测量方法[J].清华大学学报:自然科学版,2012,52(4):430-435.  
SUN T, XING F, YOU ZH. Accuracy measurement of star trackers based on astronomy [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2012, 52(4): 430-435.
- [16] 李茜.小视场长焦距光电系统畸变测量校正方法研究[J].国外电子测量技术,2012,31(2):35-38.  
LI Q. Research on distortion measurement and calibration technology for narrow-field and long-focal-length optical system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2012, 31(2): 35-38.
- [17] WANG H J, XING F, YOU Z, et al. Study of high-precision earth sensor with triple-FOV [J]. Instrumentation, 2014, 1(2): 23-28.

- [18] 王洪剑, 邢飞, 尤政. 三视场红外地球敏感器导航算法分析及研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1201-1209.

WANG H J, XING F, YOU ZH. Numerical analysis and experiment study of navigation algorithm with triple-FOV infrared earth sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6): 1201-1209.

### 作者简介



**易敏**, 2014 年于燕山大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为微型 APS CMOS 星敏感器、天文导航和自动化。

E-mail: 1274104144@qq.com

**Yi Min** received her B. Sc. degree from Yanshan University in 2014. She is currently a graduate student

in Beijing Information Science & Technology University. His research interest focuses on micro APS CMOS star sensors, celestial navigation and automation.



**孙婷**(通讯作者), 2009 年年于天津大学获得学士学位, 2014 年于清华大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学副教授, 主要研究方向为空间先进光学姿态敏感器和天文导航技术。

E-mail: sunting09@tsinghua.org.cn

**Sun Ting** (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Tianjin University in 2009 and received her Ph. D. degree from Tsinghua University in 2014. Now she is an associate professor in Beijing Information Science & Technology University. Her main research interests include advanced optical attitude sensor for space and celestial navigation technology.