

## 基于亚像元坐标的像素频率误差补偿方法

胡雄超<sup>1,2</sup>, 毛晓楠<sup>1,2</sup>, 吴永康<sup>1,2</sup>, 闫晓军<sup>1,2</sup>, 余路伟<sup>1,2</sup>, 王兆龙<sup>1,2</sup>

(1. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109;

2. 中国航天科技集团公司红外探测技术研发中心, 上海 201109)

**摘要:** 详细介绍了一种星敏感器像素频率误差补偿方法并结合实际实验数据对其补偿效果进行验证。首先依据阈值分割的星点提取算法, 分析了像素频率误差产生的几个主要原因。然后改进原有的星点质心定位点扩散函数, 提出了一种基于亚像元坐标的像素频率误差补偿方法。最后通过星敏感器微步距实验, 与正弦曲线法比较。实验结果表明: 在视场中心区域, 使用该方法对采样点补偿后像素频率误差减少了 65.2%, 优于正弦曲线法的 52.7%; 使用视场中心的误差补偿公式对视场边缘的采样点补偿, 像素频率误差减少 58.7%, 优于正弦曲线法的 41.9%。由实验结果可得: 较之于正弦曲线法, 该误差修正方法不仅具有更好的误差补偿效果, 而且在视场范围内具有较强的通用性。

**关键词:** 星敏感器; 亚像元坐标; 像素频率误差; 误差补偿

**中图分类号:** V448.22   **文献标志码:** A   **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0717006

## Pixel frequency error compensation method based on sub-pixel coordinates

Hu Xiongchao<sup>1,2</sup>, Mao Xiaonan<sup>1,2</sup>, Wu Yongkang<sup>1,2</sup>, Yan Xiaojun<sup>1,2</sup>, Yu Luwei<sup>1,2</sup>, Wang Zhaolong<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China;

2. Research and Development Center of Infrared Detection Technology, China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** A pixel frequency error compensation method of star sensor was introduced in detail, and the compensation effect was verified by the experimental data. At first, based on threshold segmentation algorithm for star extraction, the main reasons of pixel frequency error were analyzed. Then, the original point spread function of centroid location was improved and a pixel frequency error compensation method based on sub-pixel coordinates was proposed. Last, through the micro-pace experiment of star sensor, it was compared with sine curve method. Experimental results show that: in the center of the field of view, the pixel frequency error of the sampling point is reduced by 65.2% using this method, which is better than 52.7% of the sine curve method; using the error compensation formula of the field of view to compensate for the sampling point of the field of view, the pixel frequency error is reduced by 58.7%, which is better than 41.9% of the sine curve method. By the experimental results, compared with sine

收稿日期: 2016-11-05; 修订日期: 2016-12-03

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11302127)

作者简介: 胡雄超(1987-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事星敏感器相关方面的研究。Email: xiongchao85@163.com

curve, this error correction method not only has better error compensation effect, but also has strong versatility within the field of view.

**Key words:** star sensor; sub-pixel coordinates; pixel frequency error; error compensation

## 0 引言

星敏感器是卫星平台用于姿态控制的核心单机,具有姿态测量精度高,无漂移,测量姿态连续等优点。星敏感器的工作原理是:当星敏感器光轴指向天空中的某一片区域时,恒星通过星敏感器的光学系统在探测器上投影得到弥散像斑;通过星图处理算法提取星点信息,与导航星库中的星点信息进行匹配;最后解算出星敏感器在天球坐标系下的三轴姿态角。随着对卫星控制精度要求的不断提高,高精度星敏感器的需求日益迫切,而像素频率误差是影响星敏感器精度的一个重要因素。因此,研究星敏感器像素频率误差的修正方法具有十分重要的意义。

像素频率误差表现为星点在像素内等步长移动时,提取的星点质心与像点能量中心的误差呈现以像素为周期的偏差。像素频率误差可以分为系统误差和随机误差。随机误差主要包括暗电流噪声、复位噪声、量化噪声、散粒噪声等<sup>[1]</sup>。随机误差主要通过改善图像信噪比,提高星点亚像素细分定位的精度等方法抑制。系统误差主要通过建模补偿,参考文献[1]通过误差频域分析,发现像素频率误差类似正弦曲线的变化规律,提出使用正弦曲线来拟合并修正像素频率误差;参考文献[2]分析了像元离散采样窗口对系统误差的影响,通过改变窗口大小来减小误差;参考文献[3]通过对误差的二维频域分析,提出了一种改进的正弦曲线法,修正后星敏感器质心定位精度进一步提高。这些方法都没有全面考虑引起系统误差的原因,误差修正效果不理想。

文中分析了像素频率误差产生的原因,改进了原有的星点质心定位点扩散函数,提出了一种基于亚象元坐标的像素频率误差补偿方法。最后,结合实际微步距实验,与原有的正弦曲线法作比较。试验结果表明:较之于正弦曲线法,文中的像素频率误差修正方法不仅具有更好的误差补偿效果,而且在视场范围内有较强的通用性。

## 1 星敏感器像素频率误差分析

由于随机误差的不确定性<sup>[4-5]</sup>,主要分析系统误差对像素频率误差的影响。系统误差本质在于星点质心定位时,使用探测器像素几何中心代替像素能量中心,其主要由质心提取算法决定。现阶段主要的质心提取算法有:高斯曲线拟合法,质心法,平方加权质心法以及基于阈值分割的星点提取法<sup>[6]</sup>。基于阈值分割的星点提取法计算过程简单,具有很强的抗干扰能力,目前在星敏感器的图像处理中广泛应用。使用基于阈值分割的星点提取法模型对系统误差进行分析,得到产生系统误差的主要原因:像元离散采样、像元非光敏区,阈值的选取以及满阱电荷等。

### 1.1 像元离散采样

对像素频率误差进行频域分析,画出像元离散采样过程示意图<sup>[7]</sup>,如图 1 所示。 $i(x)$ 是光学系统对星点的点扩散函数。成像时, $i(x)$ 首先与单个像元的频率响应函数  $p(x)$  进行卷积,得到像元点扩散函数的频域响应函数  $f(x)$ 。然后  $f(x)$  与像元离散采样函数  $s(x)$  相乘,得到离散采样后的数字采样函数  $g(x)$ 。经过像元离散采样后,通常以像元几何中心代替像元的能量中心,使得星点质心定位发生偏差。

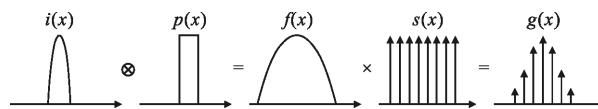


图 1 像元离散采样示意图

Fig.1 Schematic diagram of pixel discrete sampling

### 1.2 像元非光敏区

探测器像元存在非光敏区,在非光敏区不能进行光电转换,从而使星点能量中心发生偏移。图 2 为像元光敏区及其响应函数<sup>[1]</sup>。

图 2(a)中为像元光敏区图像,黑色区域为光敏区,白色部分为非光敏区。图 2(b)为频域响应函数, $T$  为像素周期, $FF$  为非光敏区影响因子。像元非光敏

区在像元右侧,则像点的质心坐标向左偏。

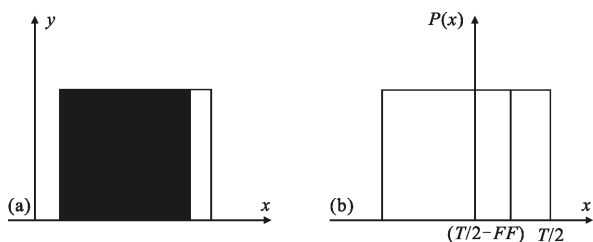


图 2 像元光敏区分布以及响应函数

Fig.2 Pixel photosensitive distribution and response function

### 1.3 满阱电荷

星敏感器探测器像元具有固定的满阱电荷<sup>[1]</sup>。当光源较强时,光电转换的电荷数达到满阱电荷值,就不会继续发生光电转换,像元的灰度值达到饱和值。当星点在探测器上的投影有多个饱和点时,就会存在星点能量的损失。此时使用基于阈值分割的星点提取法模型提取质心坐标,会偏离实际的能量中心点。

### 1.4 阈值的选取

基于阈值分割的星点提取法来提取星点质心坐标,理论上是以减去星图背景阈值的灰度值作为权重,公式如下<sup>[3]</sup>:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^N x_i h_i}{\sum_{i=1}^N h_i} \quad (1)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i h_i}{\sum_{i=1}^N h_i} \quad (2)$$

其中:  $h_i = \begin{cases} f_i - M & f_i \geq M \\ 0 & f_i < M \end{cases}$

公式(1)、(2)中 $(x_i, y_i)$ 是实际星点在探测器面上投影的第*i*个像元的坐标, $f_i$ 是第*i*个像元的像素值, $M$ 是星点质心提取阈值。当阈值太大时,会剔除星点有效像元;当阈值太小时,会引入背景噪声,两者都会影响星点的质心定位精度。

## 2 星敏感器像素频率误差补偿方法

前面分析了像素频率误差率中系统误差的几个主要原因,为了提高星敏感器的精度,需要使用误差修正公式对像素频率误差进行修正<sup>[8-9]</sup>。传统的正弦曲线法<sup>[1]</sup>和其改进方法<sup>[4]</sup>都是基于对误差的频域分析,只能修正像元离散采样以及像元非光敏区引

起的系统误差,对于阈值的选取和满阱电荷引起的系统误差没有修正。文中对引起系统的误差 4 个原因进行统一考虑,提出了一种基于亚像元坐标的像素频率误差补偿方法。

### 2.1 星点成像的点扩散函数

由于产生系统误差的原因较多,很难进行频域分析对像素频率误差建模。所以依据系统误差的 4 个原因,可由星点成像的点扩散函数来分析质心定位的偏差。

图 3 中,理想的星点的点扩散函数为  $f(x)$ ,服从高斯分布。

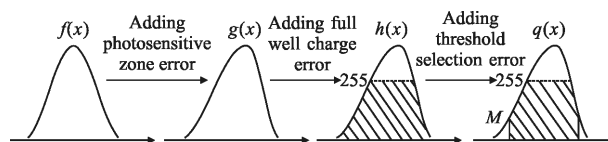


图 3 改进的点扩散函数

Fig.3 Improved point spread function

考虑非光敏去误差,假设像元非光敏区在像元的左边,则点扩散函数的能量往右偏,得到函数  $g(x)$ 。依据公式(1)星点质心坐标向右偏。

假设星点有能量饱和点,在  $g(x)$  中进一步加入满阱电荷的误差,得到点扩散函数  $h(x)$ ,阴影部分为星点能量分布区域。公式(3)为  $h(x)$  的表达式:

$$\begin{cases} h(x) = g(x) & h(x) \leq 255 \\ h(x) = 255 & h(x) > 255 \end{cases} \quad (3)$$

最后加入阈值选取的误差,假设星点提取阈值为  $M$ ,得到函数点扩散  $q(x)$ ,阴影部分为星点能量分布区域。公式(4)为  $g(x)$  的表达式:

$$\begin{cases} q(x) = h(x) & q(x) > M \\ h(x) = 0 & q(x) \leq M \end{cases} \quad (4)$$

### 2.2 基于亚像元坐标的像素频率误差补偿方法

基于 2.1 节的分析,提出了一种基于亚像元坐标的像素频率误差补偿方法。

假设星点沿着  $x$  轴以一定小步长转动  $l$ 。起始点质心坐标为  $(x_0, y_0)$ ,转动  $i$  次后质心坐标为  $(x_i, y_i)$ ,第  $i$  次转动的距离为  $(dx_i, dy_i)$ ,因为是沿着  $x$  轴转动所以,所以需要满足:

$$dy_i = y_{i+1} - y_i = 0 \quad (5)$$

计算每次转台转动星点质心沿着  $x$  轴移动的距离  $dx_i$ 。

$$dx_i = x_{i+1} - x_i \quad (6)$$

mean(dx)表示 dx 的平均值,对每次移动距离减去直流分量得到  $DX$ ,  $DX$  为每次移动距离的波动曲线,可以用来表示像素频率误差。

$$DX = dx - \text{mean}(dx) \quad (7)$$

星点质心的亚像元坐标其实就是星点质心坐标的小数部分,  $[x_i]$  表示星点质心坐标的整数部分,第  $i$  次转动后的星点质心的亚像元坐标设为  $UX_i$ 。

$$UX_i = x_i - [x_i] \quad (8)$$

基于实际的微步距离实验,画出实际的亚像元坐标与像素频率误差的关系图如图 4 所示。

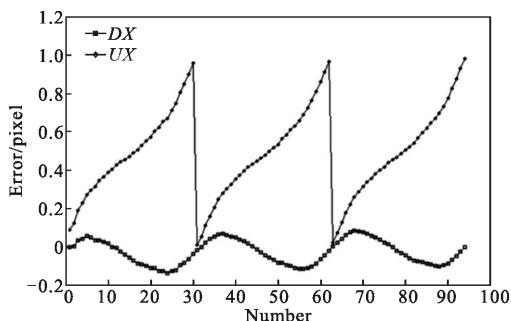


图 4 亚像元坐标与像素频率误差关系图

Fig.4 Relationship between sub-pixel coordinates and pixel frequency error

设  $DX$  的变化周期为  $T_{DX}$ ,  $UX$  的变化周期为  $T_{UX}$ , 像素的变化周期为  $T$ , 通过图 4 可以发现三者相同。

$$T_{DX} = T_{UX} = T \quad (9)$$

$DX$  和  $UX$  周期相同, 可以以  $UX$  为输入、 $DX$  为输出进行七阶多项式拟合, 拟合公式如下:

$$DX = m_7 UX^7 + m_6 UX^6 + m_5 UX^5 + m_4 UX^4 + m_3 UX^3 + m_2 UX^2 + m_1 UX + m_0 \quad (10)$$

将实际采集得到的星点亚像元坐标代入七阶多项式拟合公式, 得到理论值  $dx_r$ 。设补偿后像素频率误差为  $dx_c$ , 则有:

$$dx_c = dx_r - DX \quad (11)$$

### 3 计算结果与分析

星传感器像素频率误差可以通过微步距试验测得。微步距测试系统<sup>[10-12]</sup>的主要设备包括:单星星光模拟器、高精度转台和数据处理计算机,如图 5 所示。单星星光模拟器和二维高精度轴向转台安装在大理石光学平台上,以减少外部振动对测量过程的

影响。转台结构分内框和外框,星传感器安装在转台的内框上,内框轴随着外框的转动而转动。二轴转台外框位置精度为  $0.251''$ ,内框位置精度为  $0.248''$ 。星传感器通过通讯接口将处理结果和图像传输到数据处理计算机上,该计算机负责完成数据处理。

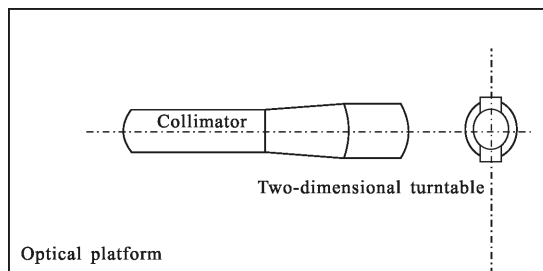


图 5 星传感器微步距测试系统

Fig.5 Micro-step testing system of star sensor

### 3.1 像素频率误差的采集与补偿

以某型星传感器为试验对象,其视场为  $18^\circ \times 18^\circ$ ,探测器分辨率为  $2048 \times 2048$ 。从视场中心(翻转为  $0^\circ$ )开始,转台以  $\mu=1''$  的步长运动,是星点像斑在探测器靶面上移动的距离为 3 个像素,在每一个位置星传感器采集星点质心 15 次,以各个测量位置横坐标的平均值作为实际测量位置点的  $x$  坐标值。以同样方法采集得到视场边缘(翻转为  $8^\circ$ )的数据。

图 6 中,  $dx$  为转台移动时星点质心移动的距离

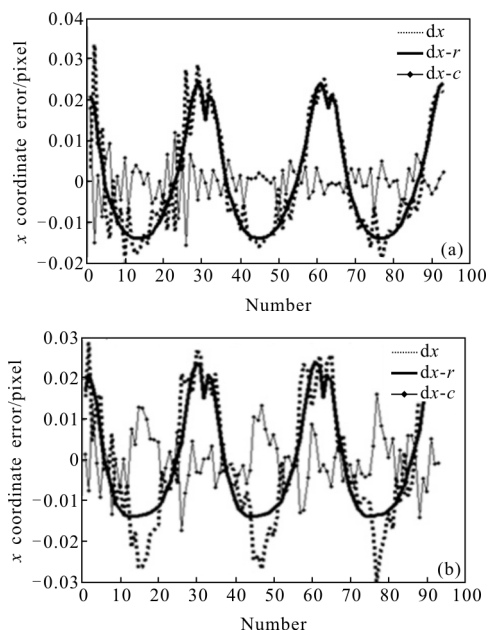


图 6 翻转为  $0^\circ$ 、 $8^\circ$  时,文中方法像素频率误差的修正效果图

Fig.6 Using the method in this paper, the correction effect of the pixel frequency error when turning angle is  $0^\circ$ ,  $8^\circ$

与平均值的差值曲线,是像素频率误差相对于亚像元坐标的七阶多项式拟合曲线。 $dx\_c$ 是经过文中方法误差补偿后的像素频率误差曲线。在视场中心时(翻转为 $0^\circ$ ),由 2.2 节的方法得到误差补偿公式对像素频率误差进行修正:修正前像素频率误差的标准差为 0.041 9 pixel,修正后标准差变为 0.014 6 pixel,质心定位精度提高了 65.2%;在视场边缘时(翻转为 $8^\circ$ ),使用视场中心的误差补偿公式对像素频率误差进行修正,验证误差补偿公式在视场范围内的通用性:修正前像素频率误差的标准差( $3\sigma$ )为 0.0484 pixel,修正后的标准差为 0.020 0 pixel,质心定位精度提高了 58.7%。

转台沿着  $y$  轴转动时,像素频率误差修正方法与效果与沿  $x$  轴运动时相同。在星敏感器测量恒星像斑质心的实际过程中,恒星运动的轨迹可以分解为  $x, y$  两个方向的运动并分别做误差补偿。图 7 给出了恒星运动轨迹与  $x$  轴夹角为  $45^\circ$  时误差修正的效果图。

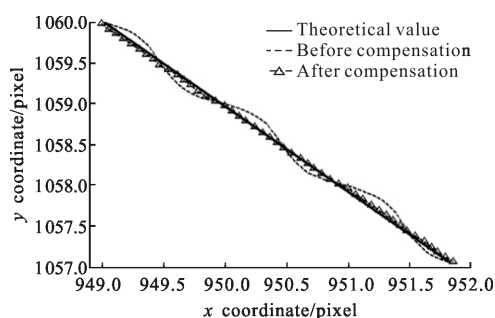


图 7 对两轴像素频率误差修正效果图

Fig.7 Correction effect chart of the two axes pixel frequency error

计算得到修正前像素频率误差的标准差为 0.035 9 pixel,修正后的标准差为 0.021 5 pixel,质心定位精度提高了 40.1%。

### 3.2 与正弦曲线法补偿效果的比较

使用改进的正弦曲线法<sup>[4]</sup>对  $x$  轴像素频率误差进行补偿,误差补偿效果如图 8 所示。相同条件下,在视场中心,用正弦曲线法补偿后标准差变为 0.019 8 pixel,质心定位精度提高了 52.7%。相对于文中提出的补偿方法,提高质心定位精度的效果差了 12.5%。在边缘视场用正弦曲线法补偿后的标准差为 0.281 pixel,质心定位精度提高了 41.9%。表 1 为两种误差补偿方法的效果对比,对比结果表明文中的

误差修正方法不仅具有更好的误差补偿效果,而且在视场范围内具有较强的通用性。

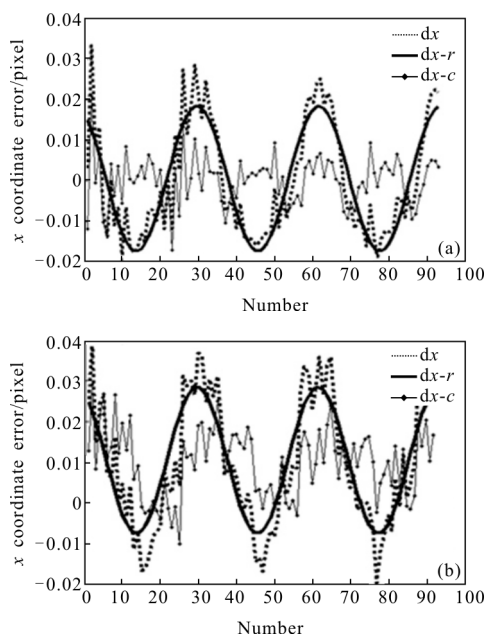


图 8 翻转为  $0^\circ, 8^\circ$  时正弦曲线法对像素频率误差的修正效果图

Fig.8 Using sine curve method, the correction effect of the pixel frequency error when turning angle is  $0^\circ, 8^\circ$

表 1 误差补偿效果对比

Tab.1 Error compensation effect contrast

Rolling angle /( $^\circ$ )	Error before compensation /pixel	Error after compensation_ this paper method /pixel	Accuracy improvement	Error after compensation_ sine curve method /pixel	Accuracy improvement
0	0.041 9	0.014 6	65.2%	0.019 8	52.7%
8	0.484	0.020 0	58.7%	0.281 1	41.9%

## 4 结 论

文中针对星敏感器星点成像与质心提取的特点,对像素频率误差产生的几个主要原因进行分析,基于星点成像的扩散函数和像素频率误差的机理,将引起星敏感器像素频率误差的 4 个因素进行统一考虑,对星点质心亚像元坐标和像素频率误差的关系进行建模,得到了一种基于亚像元坐标的像素频率误差修正方法。使用星敏感器微步距测试系统,对某型星敏感器进行星点质心定位的像素频率误差修正试验。分别使用改进的正弦曲线法和文中的误差

修正方法对像素频率误差进行修正,修正结果表明:在视场中心,正弦曲线法使质心定位精度提高了52.7%,文中的误差修正方法使质心定位精度提高了65.2%,文中的误差修正方法效果优于传统的正弦曲线法;同时,在视场边缘也能使质心定位精度提高58.7%,验证了修正公式在视场范围内的通用性。

#### 参考文献:

- [1] Wei Xinguo, Xu Jia, Zhang Guangjun. S-curve error compensation of centroid location for star sensors [J]. *Opt Precision Eng*, 2013, 21(4): 849-857. (in Chinese)  
魏新国, 徐佳, 张广军. 星敏传感器质心定位的S曲线误差补偿[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 849-857.
- [2] Jia Hui, Yang Jiankun, Li Xiujian, et al. Systematic error analysis and compensation for high accuracy star centroid estimation of star tracker[J]. *Sci China: Tech Sci*, 2011, 41(1): 69-76. (in Chinese)  
贾辉, 杨建坤, 李修建, 等. 星敏传感器高精度星点提取系统误差分析及补偿方法研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(1): 69-76.
- [3] Jiang Liang, Zhang Yu, Zhang Ligu, et al. Effect of point spread functions on star centroid error analysis[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3437-3445. (in Chinese)  
姜亮, 张宇, 张立国, 等. 点扩散函数对星点提取误差分析的影响[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3437-3445.
- [4] Zhi Shuai, Zhang Liu, Li Xinlu. Realization of simulated star map with noise [J]. *Chinese Optics*, 2014, 4(4): 581-587. (in Chinese)  
支帅, 张刘, 李欣璐. 带噪声模拟仿真星图的实现[J]. 中国光学, 2014, 4(4): 581-587.
- [5] Li Jie, Guo Pan, Wang Chunzhe. Application of shearlet transform in the star extraction [J]. *Chinese Optics*, 2015, 3(3): 386-393. (in Chinese)  
李杰, 郭盼, 王春哲. 剪切波变换在星点提取中的应用[J]. 中国光学, 2015, 3(3): 386-393.
- [6] Wang Haiyong, Fei Zhenghong, Wang Xinlong. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution [J]. *Opt Precision Eng*, 2009, 17(7): 1672-1677. (in Chinese)  
王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星点精确模拟及质心计算[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1672-1677.
- [7] Yang Jun, Zhang Tao, Song Jingyan, et al. High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location [J]. *Opt Precision Eng*, 2010, 18(4): 1002-1010. (in Chinese)  
杨君, 张涛, 宋靖雁, 等. 星点质心亚像元定位的高精度误差补偿方法[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 1002-1010.
- [8] Tang Shengjin, Guo Xiaosong, Zhou Zhaofa. Modified systematic error compensation algorithm for star centroid sub-pixel detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1502-1507. (in Chinese)  
唐圣金, 郭晓松, 周召发. 星点亚像元定位中系统误差的改进补偿方法 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1502-1507.
- [9] Wei Wei, Liu Enhai. Preprocessing of infrared star map and position accuracy analysis of star point [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 991-996. (in Chinese)  
魏伟, 刘恩海. 红外星图预处理及星点定位精度分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 991-996.
- [10] Chen Shu, Zhang Guangjun, Zheng Xunjiang, et al. Technology of miniature starsensor [J]. *Aerospace Shanghai*, 2013, 30(4): 69-78. (in Chinese)  
陈纾, 张广军, 郑循江, 等. 小型化星敏传感器技术[J]. 上海航天, 2013, 30(4): 69-78.
- [11] Sun Gaofei, Zhang Guoyu, Gao Yujun, et al. Design of star sensor ground calibration equipment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2822-2827. (in Chinese)  
孙高飞, 张国玉, 高玉军, 等. 星敏传感器地面标定设备的设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2822-2827.
- [12] Jiang Liang, Zhang Ligu, Zhang Xingxiang, et al. Compensation for star centroid systematic error [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0314001. (in Chinese)  
姜亮, 张立国, 张星祥, 等. 星敏传感器星点定位系统误差补偿[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0314001.