

## 像素位置偏差对质心定位精度的影响

曹 阳<sup>1,2</sup>, 李保权<sup>1,2</sup>, 李海涛<sup>1</sup>, 桑 鹏<sup>1</sup>

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 为提高微型星敏感器的质心定位精度, 提出了一种利用外差式激光干涉装置标定图像传感器像素位置偏差的方法, 并就像素位置偏差对星点像质心定位精度的影响进行了仿真研究。在噪声忽略不计的情况下, 当像素位置偏差服从 $(-0.02, 0.02)$ 上的均匀分布时, 补偿系统误差能够使星点定位精度从 0.008 pixel 提高到 0.002 pixel。而如果加入服从 $N(0, 5.52)$ 的高斯白噪声, 当像素位置偏差服从 $(-0.02, 0.02)$ 上的均匀分布时, 补偿像素位置偏差能使定位精度从 0.020 pixel 提高到 0.018 pixel; 当像素位置偏差服从 $(-0.04, 0.04)$ 上的均匀分布时, 补偿像素位置偏差能使定位精度从 0.026 pixel 提高到 0.018 pixel, 提高了 31%。这说明标定像素位置偏差对提升质心定位精度有显著作用, 为发展高精度微型星敏感器提供了一种新的技术手段。

**关键词:** 质心定位精度; 微型星敏感器; 像素位置偏差; 外差式激光干涉装置

中图分类号: V448.22 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1217007

## Pixel displacement effects on centroid position accuracy

Cao Yang<sup>1,2</sup>, Li Baoquan<sup>1,2</sup>, Li Haitao<sup>1</sup>, Sang Peng<sup>1</sup>

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of centroiding for high precision miniature star tracker, a method to calibrate the imaging sensor pixel displacement using heterodyne laser interferometry was proposed. And the star position error due to imaging sensor pixel displacement was studied by simulation. The simulation results show that the accuracy of star position can be enhanced from 0.008 pixel to 0.002 pixel by compensating pixel displacement when pixel displacement obeys uniformly distributed over the interval  $(-0.02, 0.02)$  pixel. When the additive Gaussian noise in the star image has a normal distribution with mean 0 and standard deviation 5.5, if pixel displacement obeys uniformly distributed over the interval  $(-0.02, 0.02)$  pixel, the accuracy of star position can be enhanced from 0.020 pixel to 0.018 pixel after compensation; if pixel displacement obeys uniformly distributed over the interval  $(-0.04, 0.04)$  pixel, the accuracy of star position can be enhanced from 0.026 pixel to 0.018 pixel after compensation, which are 31% better than the accuracy without compensation. Simulation results show that calibrating pixel

收稿日期: 2016-04-10; 修订日期: 2016-05-16

基金项目: 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA04060900)

作者简介: 曹阳(1991-), 男, 硕士生, 主要从事高精度天体测量和星敏感器方面的研究。Email: caoyang113@mails.ucas.ac.cn

导师简介: 李保权(1973-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事空间 X 射线成像及新型载荷技术方面的研究。

Email: lbq@nssc.ac.cn

displacement which can significantly improves the star position accuracy can be used as a new method to develop high precision miniature star tracker.

**Key words:** centroid position accuracy; miniature star tracker; pixel displacement; heterodyne laser interferometry

## 0 引言

小卫星是航天器发展的一个重要方向,随着小卫星任务复杂度的增加,对其姿态测量系统势必有着更高的要求,而星敏感器是当今在航天领域中应用最广泛的一种高精度的姿态测量仪器<sup>[1-2]</sup>,因此发展可以应用在小卫星上的微型星敏感器有着非常重要的意义。

目前国际上主流的微型星敏感器 ST-16 和 ST-200 在其发展规划中均提到计划将产品的视向测量精度提高到亚角秒级别<sup>[3]</sup>,但切实可行的技术方案还需要广泛深入的研究。由于尺寸的限制,提高质心定位精度是提高微型星敏感器精度最可靠、可行性最高的方法。目前针对提高质心定位精度,研究人员所做的工作主要围绕质心定位算法的改进和对系统误差的补偿展开,杨君<sup>[4]</sup>等分析了质心法 S 曲线系统误差的形成原因,并建立了系统误差补偿的模型;贾辉<sup>[5]</sup>等推导出了系统误差的数学表达式,并通过数值迭代算法计算星点实际位置;魏新国<sup>[6]</sup>等采用频域分析法推导了 S 曲线误差的表达式并与仿真结果进行对比,又结合实验结果分析了用正弦模型补偿系统误差的效果;唐圣金<sup>[7]</sup>等提出了利用三次样条插值函数对系统误差进行补偿的方法。

虽然国内外众多学者针对质心定位算法的改进做了大量工作,但对图像传感器本身性质的研究仍然比较有限。王洪涛<sup>[8]</sup>等结合实际图像传感器的像素感光区形状和像素填充率,提出了一种改进的质心算法。近年来,随着高精度天体测量的发展,人们开始关注图像传感器的像素位置不均匀性对质心定位精度的影响,并且通过标定像素位置不均匀性取得了非常好的质心定位精度。1995 年喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的 Shaklan 等人最先认识到像素位置偏差对质心定位精度的影响,并用双光束干涉产生的静态干涉条纹对哈勃望远镜上广域行星照相机(WF/PC II)的 CCD 进行了

标定,标定的结果显示其所用的 CCD 的像素位置偏差均方根约为 0.02 pixel,通过将标定结果运用在质心定位算法中,最终取得了 0.005 pixel 的质心定位精度<sup>[9]</sup>。2011 年 JPL 的 Nemati 等人提出用差频激光束产生动态干涉条纹对 CCD 进行标定,标定结果显示其所标定的 CCD 的像素位置偏差约为 0.01 pixel,通过将标定结果运用在所提出的质心定位算法中,最终质心定位精度能够达到  $3 \times 10^{-5}$  pixel<sup>[10]</sup>。2013 年法国的 Crouzier 等人同样用动态干涉条纹对 CCD 进行标定,最终得到的像素位置偏差约为  $5 \times 10^{-3}$  pixel<sup>[11]</sup>。因此想到是否可以通过将像素位置偏差的标定结果应用在星敏感器算法中来提高星敏感器精度,为此进行了初步的探索。

## 1 像素位置偏差标定算法及标定装置

通常都假设焦平面上每个像素的位置按照规则的网格状分布。但对于质心定位精度要求非常高的应用来说,上面的假设不再成立:像素并不按规则网格分布,而是有一定的位置偏差<sup>[9]</sup>。事实上,在阵列探测器生产过程中需要经历一系列的工艺过程。特别是在光刻工艺中,在从掩模图形到光刻胶图形的转移过程中,诸如基片的表面预处理、甩胶、前烘、曝光、显影、后烘等工艺因素都不可避免地产生形状和位置误差<sup>[12]</sup>。

### 1.1 像素位置偏差标定算法

两束相干激光束在一个无噪声、形状完全规则的图像传感器上产生理想干涉条纹,图像传感器测量到的信号是正弦波信号,如果用最小二乘法对测量数据进行拟合,最终的残差会很小,但如果某个像素与规则网格偏离了一段距离,最终拟合结果在这个像素上就会有比较大的残差,通过拟合出的正弦波和该像素上的残差就可以知道这个像素的位置偏差,这就是用干涉条纹测量像素位置偏差的基本思路。下面简单介绍文中提出的利用动态干涉条纹对像素位置偏差进行标定的方案。使用两根单色相干

激光束在图像传感器上产生干涉条纹, 激光频率应在传感器响应谱段内, 激光束与图像传感器之间保持较远的距离以保证在探测器表面的光强近似均匀分布。干涉条纹的宽度需要大于二倍的像素间距。同时为了使干涉条纹的辨别更加容易, 使用声光调制器(AOM)让两束激光有一定的频率差, 这样干涉条纹会在探测器表面移动。在探测器表面的光强可以用下面的公式描述:

$$I(x, y, t) = I_1^{\text{met}} + I_2^{\text{met}} + 2\sqrt{I_1^{\text{met}} I_2^{\text{met}}} \text{Re}\{e^{i(k_x^{\text{met}} x + k_y^{\text{met}} y + \Delta\omega t)}\} \quad (1)$$

式中:  $I_1^{\text{met}}$ 、 $I_2^{\text{met}}$  分别为两束激光在探测器平面上的光强;  $k_x^{\text{met}}$ 、 $k_y^{\text{met}}$  分别为干涉条纹波矢量的横向和纵向分量;  $\Delta\omega$  为两束激光的频差。

而一般可以用下面这个模型来表示一个像素所记录到的光电子数:

$$I_{mn} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) Q_{mn}(x, y) dx dy \quad (2)$$

式中:  $(m, n)$  为像素的行列坐标;  $Q_{mn}(x, y)$  为像素  $(m, n)$  的像素响应函数。

对于星敏感器而言, 不需要考虑像素响应内部

不均匀性, 像素响应函数可以用下面的公式表示:

$$Q_{mn}(x, y) = \begin{cases} q_{mn} & \text{像素感光区} \\ 0 & \text{其他区域} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $q_{mn}$  为像素  $(m, n)$  的量子效率。

将公式(1)和(3)代入(2)中, 可以得到:

$$I_{mn}(t) = (I_1^{\text{met}} + I_2^{\text{met}}) q_{mn} + 2q_{mn} \sqrt{I_1^{\text{met}} I_2^{\text{met}}} \times \text{Re} \left\{ e^{i(k_x^{\text{met}} x_{mn} + k_y^{\text{met}} y_{mn} + \Delta\omega t)} \iint_{\text{感光区}} e^{i(k_x^{\text{met}} x + k_y^{\text{met}} y)} dx dy \right\} \quad (4)$$

式中:  $I_{mn}(t)$  为像素  $(m, n)$  在  $t$  时刻的输出值;  $(x_{mn}, y_{mn})$  为像素  $(m, n)$  的实际位置坐标值。

由公式(3)可知: 理想情况下探测器上每个像素的输出信号均为严格的正弦信号, 且两个像素输出信号的相位差与它们沿波矢量方向的距离严格成正比。因此, 只要先对每个像素的输出信号进行拟合得到像素间的相位差, 就可以知道像素之间沿波矢量方向的实际距离。用两组互相垂直的动态干涉条纹进行实验, 最后就可以计算出像素间的实际位置关系, 也就可以求出每个像素的像素位置偏差。

### 1.2 像素位置偏差标定装置及测量误差

图 1 为上述所提出的标定像素位置偏差技术方

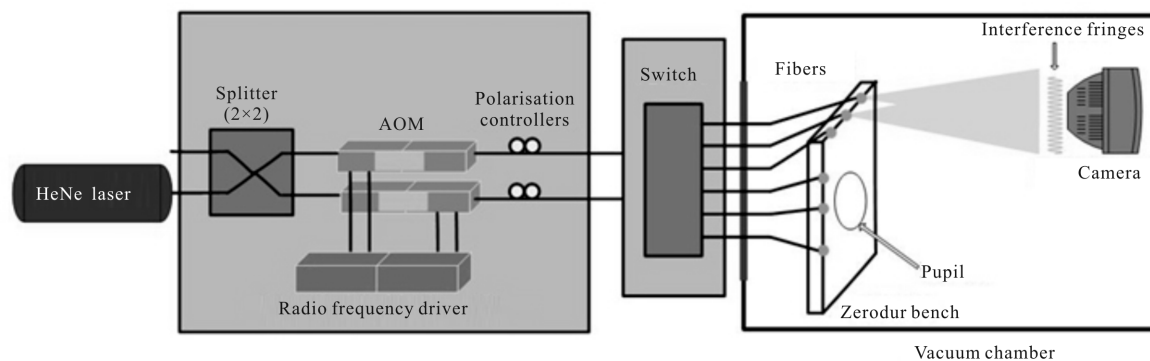


图 1 外差式激光干涉系统示意图

Fig.1 Schematic of heterodyne laser interferometry

案的原理示意图。这套标定技术可以用于标定包括 CCD、CMOS 在内的各种图像传感器。

实际测量中影响像素位置偏差测量精度的因素很多, 主要包括激光波长的稳定性、支撑系统的热膨胀、光的散粒噪声、图像传感器噪声等。为了提高像素位置偏差测量精度, 对实验进行了以下设计: 使用稳频氦氖激光器并封闭实验环境, 减少空气流动以

保证激光波长的稳定性; 整个装置放置在光学隔离平台; 支撑结构使用殷钢材料以减少热膨胀; 增加实验时长以减少光子散粒噪声的影响。

接下来对该标定测量方法的理论测量误差进行分析。为了便于分析, 不妨假设像素为正方形且填充因子为 100%, 再将干涉测量系统的参数代入公式(4)中, 这样可以推出在干涉条纹照射下图像传感

器输出信号的一种更为简便的近似表达式:

$$I_{mm}(t)=(I_1^{\text{met}}+I_2^{\text{met}})q_{mm}\times[1+V_{mm}\text{sinc}\left(\frac{\pi B_x e}{\lambda_m L}\right)\text{sinc}\left(\frac{\pi B_y e}{\lambda_m L}\right)\times\cos\left(2\pi\frac{B_x x_{mm}+B_y y_{mm}}{\lambda_m L}+\Delta\omega t\right)] \quad (5)$$

式中:  $B_x$  与  $B_y$  分别为两根光纤的横向基线距离与纵向基线距离;  $\lambda_m$  为激光波长;  $L$  为光纤与图像传感器之间的距离(工作台长度);  $e$  为像素的边长;  $V_{mm}$  为干涉条纹的对比度。

使用误差传递公式对公式(5)进行分析, 可以计算出各种因素对像素位置偏差测量精度的影响。以所设计的装置参数为例计算理论测量误差, 部分装置参数如表 1 所示, 计算结果如表 2 所示。计算结果显示, 使用标定测量方法, 像素位置偏差的理论测量精度可以达到  $8.76\text{e}-06$  像素, 这样的测量精度对于星敏感器而言是足够的。

表 1 干涉测量装置及图像传感器参数

Tab.1 Parameters of heterodyne laser interferometry and image sensor

Parameter	Notion	Value
Bench length	$L$	1 m
Wavelength	$\lambda_m$	633 nm
Baseline length	$B_x, B_y$	20 mm
Pixel size	$e$	11 $\mu\text{m}$
Effective well size	$w$	89 000 electrons

表 2 测量不确定度分析结果

Tab.2 Uncertainty analysis results

Error name	Unit	Value	Pixel position calibration error /pixel
Wavelength stability	$\delta\lambda/\lambda$	1.00E-5	1.00E-07
Baseline stability	Micron	0.001	5.00E-10
Bench stability	Micron	0.05	5.00E-10
Shot noise	Photons	1.00E+5	4.60e-06
Readout noise	Electrons	1.3	6.69e-06
Dark current	Electrons/s	32(20 $^{\circ}\text{C}$ )	3.29e-06
RSS			8.76e-06

## 2 像素位置偏差对定位精度的影响

为了研究像素位置偏差对星点质心定位精度的具体影响, 在 MATLAB 下进行了仿真实验。

### 2.1 星点像的仿真

星敏感器通常采用离焦的光学系统设计, 离焦光学系统的成像理论非常复杂, 对于星敏感器来说, 只需要知道星光经过离焦光学系统后在像平面的光强分布可以用二维高斯函数来表示就足够了, 即:

$$I(x, y)=(I_0/2\pi\sigma^2)\exp[-(x-x_0)^2/2\sigma^2-(y-y_0)^2/2\sigma^2] \quad (6)$$

式中:  $I_0$  为恒星在图像传感器平面上的总光强;  $(x_0, y_0)$  为恒星的质心坐标。

将公式(3)和(6)代入(2)中, 可以得到传感器的输出图像的计算公式:

$$I_{mm}=q_{mm}\left(\frac{I_0}{2\pi\sigma^2}\right)\times\int_{m-a/2+\Delta y}^{m+a/2+\Delta y}\exp[-(x-x_0)^2/2\sigma^2]dx\cdot\int_{n-a/2+\Delta x}^{n+a/2+\Delta x}\exp[-(y-y_0)^2/2\sigma^2]dy \quad (7)$$

式中:  $(\Delta x, \Delta y)$  为像素横向和纵向的位置偏差;  $a$  为传感器的感光区边长。

### 2.2 像素位置偏差的补偿方法

为消除像素位置偏差对星点定位的影响, 需要将像素位置偏差的标定结果应用到质心定位算法中。常见的质心定位算法包括灰度平均法、曲面拟合法等<sup>[13]</sup>, 由于将像素位置偏差结果应用到曲面拟合法中非常容易, 并且随着处理器芯片计算能力的提高, 拟合法计算耗时较大的问题也得到了了一定程度的解决, 文中采用曲面拟合法作为星敏感器的质心定位算法。

恒星在星敏感器像平面的光强分布可以近似视为高斯分布, 因此可以用二维高斯函数对星点像进行拟合。二维高斯函数的形式如公式(6)所示。采用高斯曲面拟合法进行质心计算时, 用质心窗内每个像素的行列坐标和灰度输出值( $m, n, I_{mm}$ )对公式(6)用最小二乘法进行拟合, 可以得到式中每个参数的值, 其中 $(x_0, y_0)$ 即为恒星的中心坐标。

要将像素位置偏差应用到高斯曲面拟合法中, 只需要将拟合所用的数据改为  $(m+\Delta y_{mm}, n+\Delta x_{mm}, I_{mm})$  即可, 其中 $(\Delta x_{mm}, \Delta y_{mm})$ 为像素 $(m, n)$ 的像素位置偏差。

### 2.3 无噪声条件下像素位置偏差对星点定位精度的影响

首先研究不考虑噪声时像素位置偏差对星点质

心定位精度的影响。仿真中图像传感器的像素位置偏差( $\Delta x, \Delta y$ )参照 JPL 的标定结果大小,按 $(-0.02, 0.02)$  pixel 之间的均匀分布生成。点扩散函数的  $\sigma$  取 0.62 pixel,质心计算采用  $5 \times 5$  质心窗,用公式(7)来计算传感器的输出图像,像素的感光区形状为正方形,填充率为 80%。在单个像元内即 $[-0.5, 0.5]$  pixel 区间以 0.1 pixel 为间隔选取 121 个实际质心位置,分别用高斯拟合法和补偿像素位置偏差的高斯拟合法进行质心计算,并求出星点质心的偏差的均方根值,进行了 20 次仿真实验。仿真结果如图 2 所示。

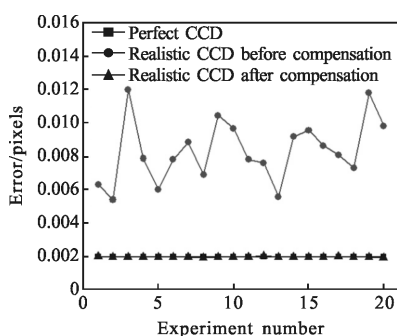


图 2 无噪声条件下的定位误差  
Fig.2 Centroiding error(without noise)

可以看出,不考虑噪声的情况下,当不存在像素位置偏差时,高斯拟合法的定位误差为 0.002 pixel;加入 0.02 pixel 的像素位置偏差后,定位误差的平均值为 0.008 pixel,最大值为 0.012 pixel;而将像素位置偏差标定结果应用到质心计算中,定位误差的平均值为 0.002 pixel。可见像素位置偏差会对质心定位精度产生影响,对于精度要求非常高的星敏传感器,这个影响是不能忽略的,必须予以考虑;而将像素位置偏差的标定结果应用到质心计算中,平均定位精度从 0.008 pixel 提高到 0.002 pixel,提高了 4 倍,说明标定像素位置偏差能够大幅提高星敏传感器精度。

### 2.4 有噪声条件下不同像素位置偏差大小对星点定位精度的影响

前文的分析中并没有考虑图像传感器噪声,另外不同图像传感器的像素位置偏差的大小实际上也并不完全相同,下面通过仿真研究分析不同的像素位置偏差在不同噪声条件下对星点质心定位精度的影响。

为了考虑噪声对定位精度的影响,必须知道恒星在星敏传感器上的实际输出大小和 CMOS 的噪声。以实

验室所设计的微型星敏传感器为例进行计算,镜头孔径为 16 mm,CMOS 芯片采用 E2V 的 EV76C560 芯片,其像素尺寸为  $5.3 \mu\text{m}$ ,曝光时间 100 ms。结合前面的星敏传感器具体参数并利用 G2 型恒星的光谱以及 EV76C560 芯片的光谱响应,可以计算出一颗 5.75 等 G2 型恒星在星敏传感器中的图像总输出值为 1044 LSB。另外,根据实验室测试的结果,曝光时间 100 ms 时该芯片常温下噪声的标准差为 5.5 LSB。

考虑不同的像素位置偏差大小对质心定位精度的影响,像素位置偏差分别按 $(-0.01, 0.01)$ , $(-0.02, 0.02)$ 一直到 $(-0.10, 0.10)$  pixel 之间的均匀分布生成,按照实测值加入服从  $N(0, 5.5^2)$  的高斯白噪声,质心计算采用  $5 \times 5$  质心窗,取 0.62 pixel,像素的感光区形状为正方形,填充率为 80%,重复前面的仿真,所得的结果如图 3 所示。

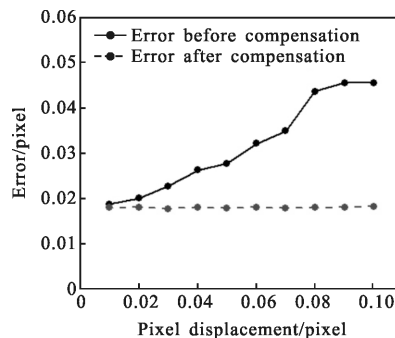


图 3 有噪声条件下不同像素位置偏差时的定位误差  
Fig.3 Centroiding error under different pixel displacement (with noise)

可以看出,存在标准差为 5.5 的高斯白噪声的情况下,当像素位置偏差比较小,如 0.02 pixel 时,对于图像传感器而言,补偿像素位置偏差只能使精度有微小的提高,从 0.02 pixel 提高到 0.018 pixel,想要达到更高的定位精度必须采用噪声较低的图像传感器;而若像素位置偏差大于等于 0.04 pixel,像素位置偏差对定位精度的影响很大,必须要对像素位置偏差进行补偿,比如像素位置偏差按照 $(-0.04, 0.04)$ 之间的均匀分布生成时,补偿像素位置偏差能够使定位精度从 0.026 pixel 提高到 0.018 pixel,精度提高了 31%。

## 3 结论

文中提出了一种利用外差式激光干涉装置标定图像传感器像素位置偏差的方法,并就像素位置偏

差对星点像质心定位精度的影响进行了仿真研究,结果表明像素位置偏差对质心定位影响显著。在噪声忽略不计的情况下,补偿系统误差能够使星点定位精度从 0.008 pixel 提高到 0.002 pixel,提升了 4 倍;而如果考虑噪声,以本实验室设计的微型星敏感器为例,加入服从  $N(0, 5.5^2)$  的高斯白噪声,当像素位置偏差服从  $(-0.02, 0.02)$  上的均匀分布时,补偿像素位置偏差能使定位精度从 0.02 pixel 提高到 0.018 pixel;当像素位置偏差比较大,如服从  $(-0.04, 0.04)$  pixel 上的均匀分布时,补偿像素位置偏差能使定位精度从 0.026 pixel 提高到 0.018 pixel,提高了 31%。结果表明像素位置偏差是影响质心定位精度的一个重要因素,当质心定位精度要求很高( $\sim 0.01$  pixel)时,有必要对像素位置偏差进行标定,这是发展高精度微型星敏感器的一种新的技术手段。

#### 参考文献:

- [1] Jing Yan, Jiang Jie, Zhang Guangjun. Subdivided locating method of image for star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2281–2285. (in Chinese)  
金雁, 江洁, 张广军. 高动态星体目标提取方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2281–2285.
- [2] Zhang Hui, Yuan Jiahu, Liu Enhai. CCD noise effects on position accuracy of star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 629–633. (in Chinese)  
张辉, 袁家虎, 刘恩海. CCD 噪声对星敏感器星点定位精度的英雄[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 629–633.
- [3] Segert T, Engelen S, Buhl M, et al. Development of the Pico star tracker ST-200—design challenges and road ahead [C]//Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2011: SSC11–IX–4.
- [4] Yang Jun, Zhang Tao, Song Jingyan, et al. High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location [J]. *Optics and Precision Engineering*, 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法[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 1002–1010.
- [5] Jia H, Yang J K, Li X J, et al. Systematic error analysis and compensation for high accuracy star centroid estimation of star tracker [J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(11): 3145–3152.
- [6] Wei Xingguo, Xu Jia, Zhang Guangjun. S-curve error compensation of centroiding location for star sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21 (4): 849–857. (in Chinese)  
魏新国, 徐佳, 张广军. 星敏感器质心定位的 S 曲线误差补偿[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 849–857.
- [7] Tang Shengjin, Guo Xiaosong, Zhou Zhaofa, et al. Modified systematic error compensation algorithm for star centroid subpixel detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1502–1507. (in Chinese)  
唐圣金, 郭晓松, 周召发, 等. 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.
- [8] Wang Hongtao, Luo Changzhou, Wang Yu, et al. An improved centroid algorithm for star point [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(7): 55–59. (in Chinese)  
王洪涛, 罗长洲, 王渝, 等. 一种改进的星点质心算法[J]. 光电工程, 2009, 36(7): 55–59.
- [9] Shaklan S, Sharman M, Pravdo S. High-precision measurement of pixel positions in a charge-coupled device [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(29): 6672–6681.
- [10] Liu Liting, Shen Lianguan, Zhao Wei, et al. Experiment on manufacturing error of photo-resist model based on UV lithography [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2008, 6(6): 430–436. (in Chinese)  
刘雳颀, 沈连娟, 赵玮, 等. 紫外光刻加工误差实验 [J]. 纳米技术与精密工程, 2008, 6(6): 430–436.
- [11] Nemati B, Shao M, Zhai C, et al. Micropixel-level image position sensing testbed [C]//SPIE, International Society for Optics and Photonics, 2011, 8151: 894477.
- [12] Crouzier A, Malbet F, Preis O, et al. An experimental testbed for NEAT to demonstrate micro-pixel accuracy [C]//SPIE, International Society for Optics and Photonics, 2012: 8445: 926147.
- [13] Wei Xingguo, Zhang Guangjun, Jiang Jie. Subdivided locating method of image for star sensor [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 29 (9): 812–815. (in Chinese)  
魏新国, 张广军, 江洁. 星敏感器中星图图像的星体细分定位方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(9): 812–815.