光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022031503

基于 PSF 参考模型的星敏感器单粒子效应在轨校正方法

李明谦[1,2,3]，田　宏[1,3]*，陆恺立[1,2,3]

（1. 中国科学院光电技术研究所，成都 610209；2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 中国科学院空间光电精密测量技术重点实验室，成都 610209）

摘　要： 为了提高星敏感器在遭受单粒子效应打击情况下的质心提取精度，提出了一种基于点扩散函数参考模型的在轨校正方法。通过构建星点参考模型及残差校正，该方法能有效去除单粒子噪声，校正噪声星点形态，降低星点质心定位误差。与传统去噪算法相比，该方法能在有效去噪的同时保护星点能量不被破坏。通过仿真实验验证了该算法抗单粒子效应的有效性，通过对比实验验证了该算法相比传统算法的优越性。

关键词： 星敏感器；单粒子效应；质心提取；星点矫正；点扩散函数

中图分类号： V249.323　**文章编号：** 1001－5868(2022)05－0986－06

An On-orbit Correction Method for Star Sensor Under Single Event Effect Based on PSF Reference Model

LI Mingqian[1,2,3], TIAN Hong[1,3], LU Kaili[1,2,3]

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN; 3. Key Laboratory of Science and Technology on Space Optoelectronics Precision Measurement, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN)

Abstract: In order to improve the accuracy of star centroid extraction of star sensor under single event effect condition, an on-orbit correction method based on PSF reference model was proposed. With the construction of star reference model and residual image correction, the proposed method could effectively accomplish single event effect noise elimination and star shape correction, which reduced star centroid error. Compared with existing methods, the proposed method could maintain the energy of stars while denoising. A simulation experiment certificated the effectiveness of the proposed method. A contrast experiment showed the superiority of the proposed method compared with other denoising algorithms.

Key words: star sensor; single event effect; centroid extraction; navigation star correction; point spread function

0　引言

航天器在轨运行期间需要不断获取自身的姿态信息。星敏感器(Star Sensor)是一种高精度的姿态测量仪器，其通过拍摄到的星图计算恒星的质心坐标进而解算出航天器的三轴姿态信息，因此恒星质心坐标计算的精度直接决定着姿态信息测量的精度。星敏感器在成像过程中会受到器件自身及空间特殊在轨工况条件的影响，所拍摄的星图中存在大量的噪声。为了保证星敏感器姿态信息的高精度输

收稿日期：2022－03－15.
基金项目：国家重点研发计划项目(2019YFA0706001).
* **通信作者：**田　宏　**E-mail：**tianhong@ioe.ac.cn

出，需要高效的噪声抑制方法。

星敏感器自身硬件造成的内部噪声主要有固定模式噪声(Fixed Pattern Noise，FPN)、光响应非均匀性噪声(Photo Response Non-Uniformity，PRNU)、暗信号非均匀性噪声(Dark Signal Non-Uniformity，DSNU)[1]。对于此类噪声，大多通过获取背景噪声模板的方式进行地面和在轨校正。航天器在轨飞行时长期处于高能带电粒子辐射环境，辐射环境中的高能带电粒子会击中星敏感器而造成单粒子效应(Single Event Effect，SEE)。单粒子效应会在星敏感器星图中形成高亮的噪声点(SEE 噪声)，这些噪声点会影响星敏感器的姿态计算，严重时造成星敏感器定姿失效，使得航天器有失控解体的危险。目前，航天器所采用的抗 SEE 噪声干扰方法主要是硬件屏蔽法，即使用金属等材料制成屏蔽罩，将器件与高能粒子进行物理隔离。为达到屏蔽效果需要使用大量金属材料，增大了航天器的非载荷质量，降低了运载效率。而星敏感器为了对星空成像需要将镜头裸露在外，此种方法不能对高能粒子进行有效的屏蔽，因此利用软件算法抗 SEE 噪声干扰比硬件屏蔽法更为有效。传统的图像处理算法如均值滤波、高斯滤波等在去除噪声的同时会破坏星点的形态，使得星点能量被分散[2]。星图处理中常用的阈值分割法和背景估计法能有效去除背景噪声，但对 SEE 噪声的针对性较差。此外，一些学者通过帧间对比[3-4]、多帧递归式矫正模板[5]来剔除单粒子效应造成的瞬态伪星点，但这类方法需要对多帧图像进行存储和处理，实时性相对较差且对星敏感器的硬件性能要求极高。上述去噪算法均将 SEE 噪声视为孤立的噪声点，而实际情况中 SEE 噪声会出现在恒星星点的弥散范围内，直接影响星点的形态和像素分布，使质心计算的结果出现极大的偏差。目前针对 SEE 噪声星点的研究较少，因此迫切需要研究适用于此类条件的去噪算法。

本文针对出现在恒星星点弥散范围内的单粒子噪声，提出一种基于点扩散函数(Point Spread Function，PSF)参考模型的星敏感器单粒子效应在轨校正方法。通过构建单粒子效应工况条件下的 PSF 参考模型来得到星点的残差图像，利用残差图像有效检测出 SEE 噪声像素并对其灰度值进行校正，最终完成对SEE噪声星点形态结构的校正，提高星点质心计算的精度。

1　单粒子效应对星敏感器的影响分析

1.1　星敏感器工作原理

星敏感器在轨时主要有两种工作模式。当航天器初始入轨时，星敏感器处于全天球识别工作模式，该模式下首先由星敏感器的 CCD 或 CMOS 相机对星空成像得到星图，接下来计算星图中星点的质心，将结果与内置导航星库进行星图匹配，最终根据星图匹配结果通过姿态解算算法得到航天器当前的姿态信息。此后星敏感器转入星跟踪模式，该模式下星敏感器利用上一帧的姿态信息预测当前帧的跟踪窗口以对导航星进行跟踪。此时仅需要计算跟踪窗口内导航星的质心，并通过局部星图识别和跟踪算法解算出当前的姿态信息。星敏感器的工作流程如图 1 所示。

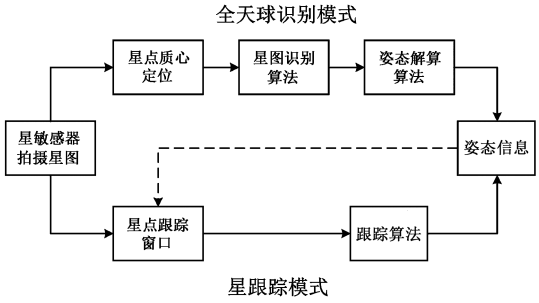
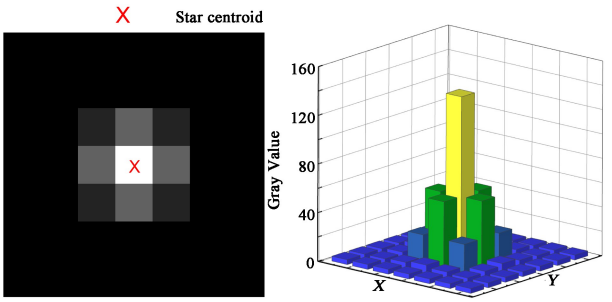


图 1　星敏感器工作流程

对于星敏感器来说，星点质心定位是其整个工作过程中最重要的环节，是决定星敏感器姿态测量精度的重要因素。恒星可以视为无限远的点光源[6]，为了提高星点质心计算的精度，通常使用离焦技术将星点能量弥散到多个像元上，再通过质心法等方法计算精确的质心。

$$\begin{cases}\hat{x}=\dfrac{\sum_{x=1}^{m}\sum_{y=1}^{m}x\cdot I(x,y)}{\sum_{x=1}^{m}\sum_{y=1}^{m}I(x,y)}\\ \hat{y}=\dfrac{\sum_{x=1}^{m}\sum_{y=1}^{m}y\cdot I(x,y)}{\sum_{x=1}^{m}\sum_{y=1}^{m}I(x,y)}\end{cases}\tag{1}$$

式中，m 为星点弥散窗口的尺寸，$I(x,y)$为星点窗口内(x,y)处像素的灰度值，$(\hat{x},\hat{y})$为经质心法计算得到的质心坐标。如图 2 所示为离焦后单个星点成像模拟图及其质心计算结果。



(a) 星点成像模拟图 (b) 质心计算结果

图 2 离焦后单个星点成像模拟图及其质心计算结果

1.2 单粒子效应对星点质心定位的影响

高能带电粒子入射进入星敏感器器件内部后会沿其径迹由瞬间电离作用形成电子-空穴对，器件中的敏感结点收集这些电离电荷形成瞬态脉冲。星敏感器的图像传感器受到瞬态脉冲的影响，使得像元上产生对应的信号响应，在图像中形成高亮的 SEE 噪声点。图 3 所示为某器件遭受单粒子效应时的瞬态电压。

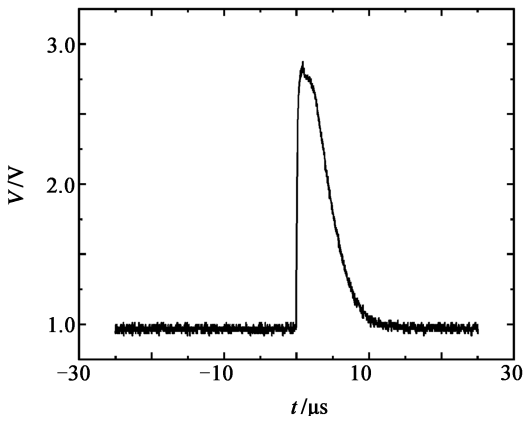
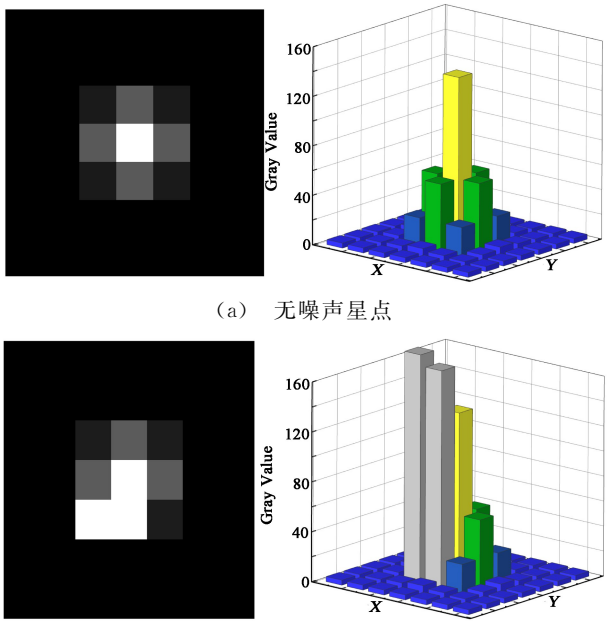


图 3 单粒子效应瞬态电压

当 SEE 噪声出现在星点能量的弥散范围内，会破坏星点原有的形态，影响星点的像素分布，从而使得星点的质心计算产生极大程度的偏差。为分析 SEE 噪声对星点质心定位的影响程度，选取某天区生成一幅含有 22 颗恒星的星图并在星点的弥散范围内添加 SEE 噪声，噪声为[100，255]内的随机值。图 4(a)为未添加 SEE 噪声的模拟星点，图 4(b)为添加 SEE 噪声的模拟星点。利用质心法计算星点质心并统计质心误差，各星点的质心误差如图 5 所示，22 颗星中 X 和 Y 方向上的最大误差分别达到 0.795 85 和 0.849 6 像素。

通过上述分析可以看出，单粒子效应会在星图中产生噪声，造成极大的质心定位误差，进而影响后续的姿态解算，严重时使得星敏感器无法准确地对导航星进行跟踪，造成星敏感器定姿失效。



(a) 无噪声星点

(b) 单粒子噪声星点

图 4 模拟星点对比

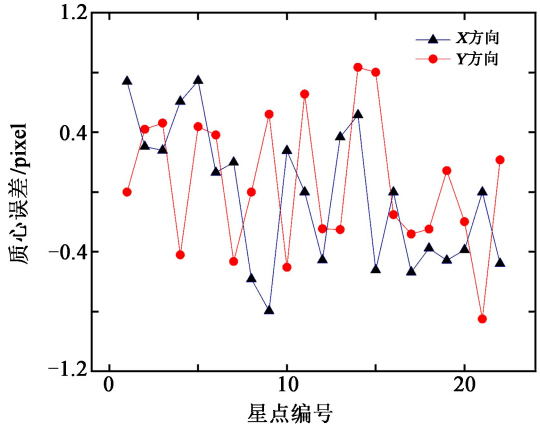


图 5 SEE 噪声星图的质心误差

2 单粒子效应在轨校正方法

在一般工况条件下，星图的背景分布较为平均并伴随着一定的噪声，星点目标与背景噪声叠加在一起。当星敏感器被高能带电粒子击中后，由瞬态脉冲产生的 SEE 噪声与星点的灰度响应叠加在一起造成该像素位置上灰度值骤增。本文通过构建星点参考模型并与 SEE 噪声星点进行差分得到残差图像，利用残差图像中 SEE 噪声像素与其他正常像素间灰度值差异较大的特性，通过阈值分割来进行 SEE 噪声像素的检测，接下来通过残差校正函数对 SEE 噪声像素的灰度值进行校正，最终结合参考模

型反演星点灰度值，完成对 SEE 噪声星点形态结构的校正，以提高星点质心计算的精度。本文的算法流程如图 6 所示。

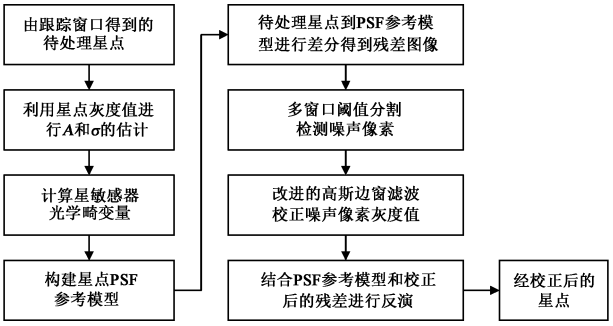


图 6　算法流程框图

2.1　PSF 参考模型的构建及参数估计

考虑到星点为一高斯弥散像斑，利用 PSF 来构建星点的参考模型，同时加入星敏感器的光学畸变，则跟踪窗口内星点的 PSF 参考模型可以表示为

$$I_{\mathrm{ref}}(x,y)=\frac{A}{2\pi\sigma^2}\cdot \exp\left[-\frac{(x-x_{\mathrm{s}}+\Delta x)^2+(y-y_{\mathrm{s}}+\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{2}$$

式中，A 为星点总能量，即弥散范围内像素灰度值之和，σ 表征星点的弥散程度，其取值由成像器件决定，$(x_{\mathrm{s}},y_{\mathrm{s}})$为星像点中心坐标，$\Delta x$ 和 Δy 为星敏感器的光学畸变量。接下来利用星点的弥散像斑对 σ 进行估计，如图 7 所示。

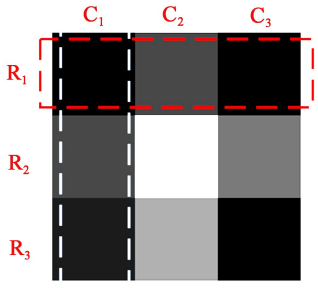


图 7　星点弥散像斑

利用式(2)可得星点像斑第一、二、三行像素的灰度值行累加和为

$$\begin{cases} I_{\mathrm{R}_1}=\sum_{(x,y)\in \mathrm{R}_1} I_{\mathrm{ref}}(x,y) \\ I_{\mathrm{R}_2}=\sum_{(x,y)\in \mathrm{R}_2} I_{\mathrm{ref}}(x,y) \\ I_{\mathrm{R}_3}=\sum_{(x,y)\in \mathrm{R}_3} I_{\mathrm{ref}}(x,y) \end{cases} \tag{3}$$

联立式(2)和(3)可得到由星点像斑灰度值行累加和所表示的 σ 估计值：

$$\hat{\sigma}_{\mathrm{R}}=\sqrt{\left(\ln\frac{I_{\mathrm{R}_2}^2}{I_{\mathrm{R}_1}I_{\mathrm{R}_3}}\right)^{-1}} \tag{4}$$

同理可得由星点像斑灰度值列累加和所表示的 σ 估计值：

$$\hat{\sigma}_{\mathrm{C}}=\sqrt{\left(\ln\frac{I_{\mathrm{C}_2}^2}{I_{\mathrm{C}_1}I_{\mathrm{C}_3}}\right)^{-1}} \tag{5}$$

由式(2)可得星点中心像素灰度值 I_{c} 为

$$I_{\mathrm{c}}=\frac{A}{2\pi\sigma^2} \tag{6}$$

则星点的总能量为

$$A=2\pi\sigma^2 I_{\mathrm{c}} \tag{7}$$

对于 SEE 噪声星点，其弥散范围内像素灰度值之和还需加上噪声灰度值。考虑到 SEE 噪声在几个像素内，则对于 SEE 噪声星点，有

$$A=(q+2\pi\sigma^2)I_{\mathrm{c}} \tag{8}$$

式中，q 为固定系数，取值范围为 2～4。

2.2　星敏感器光学畸变量的计算

星光经过星敏感器的光学系统后会产生光学畸变，其中主要包括径向畸变和切向畸变等[7]。因为径向畸变引起图像点沿径向移动且对图像点影响较大[8]，故本文主要考虑星敏感器光学系统的径向畸变。径向畸变可以表示为

$$\begin{cases} \Delta x=k_1\bar{x}r^2+k_2\bar{x}r^4+k_1\bar{x}r^6+\cdots \\ \Delta y=k_1\bar{y}r^2+k_2\bar{y}r^4+k_1\bar{y}r^6+\cdots \end{cases} \tag{9}$$

式中，$\bar{x}=x-x_0$，$\bar{y}=y-y_0$，$r^2=\bar{x}^2+\bar{y}^2$，x_0 和 y_0 为视场中心坐标，k_1，k_2，k_3，…为径向畸变参数。

考虑到光学畸变标定不是本文所研究的主要内容，且太多的畸变参数会使得模型的复杂度过高，因此采用多参数高阶模型并没有明显优势[9]，故本文仅使用一阶径向畸变参数。则由一阶径向畸变参数所表示的星敏感器光学畸变量为

$$\begin{cases} \Delta x=k_1\bar{x}r^2 \\ \Delta y=k_1\bar{y}r^2 \end{cases} \tag{10}$$

2.3　残差校正

将 SEE 噪声星点与所构建的 PSF 参考模型进行差分得到星点的残差图像。通过多窗口阈值分割来分割残差图像中的 SEE 噪声像素与星点像素，当像素灰度值大于阈值 th 时为 SEE 噪声像素，否则为星点像素。

$$th=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\mu_i+\alpha\cdot\delta_i) \tag{11}$$

式中，μ_i 和 δ_i 分别为第 i 个窗口内灰度值均值和标

准差，N 为窗口个数。

残差图像中的 SEE 噪声可以视作暗背景上的孤立噪声点，采用合适的去噪方法能对其灰度值进行有效的校正。传统的高斯滤波能有效去除单点噪声，但其会对图像的轮廓边缘产生较强的模糊效果。边窗滤波对图像有较好的保边效果，再考虑到星点的能量分布呈二维高斯分布，因此采用改进的高斯边窗滤波法对 SEE 噪声像素的灰度值进行校正。

改进的高斯边窗滤波将传统的高斯滤波模板分为如图 8 所示的 4 个三角形子模板 W_U，W_D，W_L 和 W_R，分别用 4 个子模版对中心像素进行滤波，可得到 4 个滤波值 E_U，E_D，E_L 和 E_R。

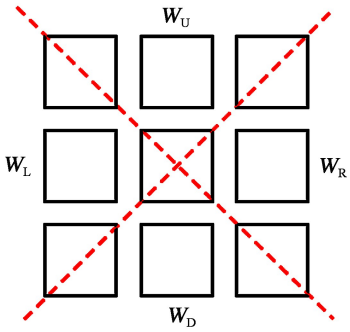


图 8 三角形高斯子模版

$$\begin{cases} E_U = \sum_{(i,j)} W_U(i,j) \cdot E(i,j), (i,j) \in W_U \\ E_D = \sum_{(i,j)} W_D(i,j) \cdot E(i,j), (i,j) \in W_D \\ E_L = \sum_{(i,j)} W_L(i,j) \cdot E(i,j), (i,j) \in W_L \\ E_R = \sum_{(i,j)} W_R(i,j) \cdot E(i,j), (i,j) \in W_R \end{cases} \tag{12}$$

则中心像素的灰度值经滤波后为

$$E'_C = \alpha \cdot \mathrm{argmax}_{K \in (U,D,L,R)} \| E_K - E_C \|_2^2 \tag{13}$$

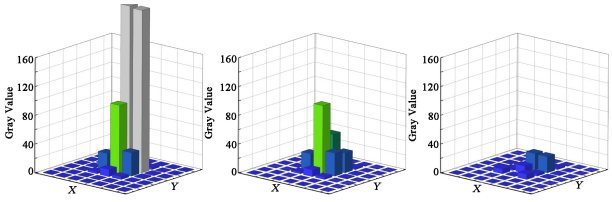
式中，α 为控制滤波程度的系数，取值范围在[0,1]间，其值越大，滤波结果越接近初始值。

3 实验与结果

选取某天区信息生成一幅含有 20 颗恒星的星图，并在星点的弥散范围内添加 SEE 噪声，噪声为[100,255]内的随机值，同时添加强度为[0.5,0.01]的背景噪声。对生成的 SEE 噪声星图分别采用本文算法、高斯滤波、均值滤波以及直接边窗滤波进行处理。

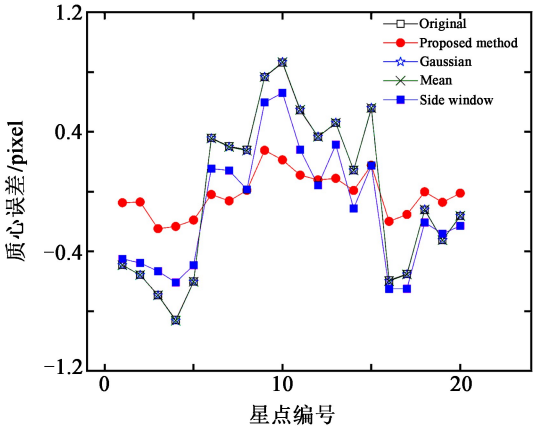
如图 9，经本文方法处理后，SEE 噪声被有效去除，星点的形态得到了有效的校正。而经直接边窗处理后，虽然去除了 SEE 噪声，但星点的能量被极大地削弱，星点的形态遭到了严重的破坏。

经各方法处理后的质心误差结果如图 10 所示。经高斯滤波和均值滤波后，与未经处理的星图类似，仍然存在较大的质心误差。经过直接边窗滤波之后，质心误差有所降低，但由于星点的能量被极大地削弱，因而质心误差仍然较大。经本文算法处理后，质心误差得到了极大程度的降低，整幅星图的星点质心误差均值下降到 0.1 像素水平且标准差在 0.1 像素以内，如表 1。

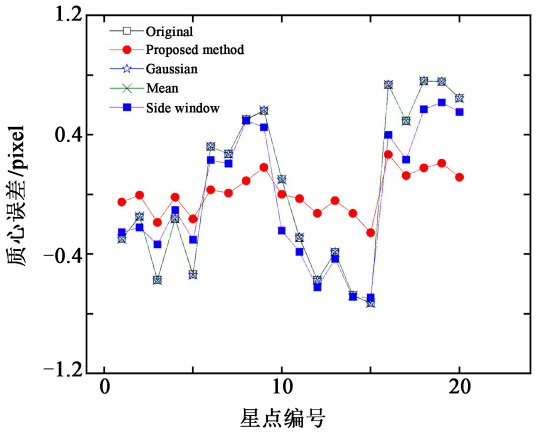


(a) 校正前 (b) 本文方法 (c) 边窗处理

图 9 经不同方法处理后的星点形态对比



(a) X 方向质心误差



(b) Y 方向质心误差

图 10 经不同方法处理后的质心误差对比

表 1　处理前后质心误差统计结果(像素)

方向	处理前		经所提方法处理后	
	均值	标准差	均值	标准差
X	0.480 0	0.215 7	0.114 5	0.087 0
Y	0.476 1	0.208 6	0.110 8	0.083 2

4　结论

针对单粒子噪声破坏导航星点形态结构，造成质心定位误差增大进而影响星敏感器姿态精度的问题，提出一种基于 PSF 参考模型的星敏感器单粒子效应在轨校正方法。研究了工况条件下星点 PSF 参考模型的构建及参数估计方法。最后通过改进的高斯边窗滤波完成了对星点的校正。仿真实验结果表明，本文算法能有效去除单粒子噪声，校正噪声星点形态，保护星点能量不被破坏，降低星点质心定位误差，去噪效果优于传统算法。

参考文献：

[1] 张承钰，袁　利，王　立，等. 空间光学敏感器像素位置精确测量技术发展现状[J]. 空间控制技术与应用，2019，45(2)：11-17.
Zhang Chengyu，Yuan Li，Wang Li，et al. Current situation of pixel position accurate measurement technique for spatial optical sensor[J]. Aerospace Control and Application，2019，45(2)：11-17.

[2] Lu K，Liu E，Zhao R，et al. Star sensor denoising algorithm based on edge protection[J]. Sensors，2021，21(16)：5255.

[3] Boldrini F，Procopio D，Airy S，et al. Miniaturised star tracker (AA-STR) ready to fly[J]. Proc. Symposium Small Satellites，2004，571：46.

[4] Lauer M，Jauregui L，Kielbassa S. Operational experience with autonomous star trackers on ESA interplanetary spacecraft[C]// Proc. of the 20th International Symposium on Space Flight Dynamics，2007.

[5] Schmidt U. Intelligent error correction method applied on an active pixel sensor based star tracker[J]. Proc. SPIE，2005，5964：596405-596405-8.

[6] 郝云彩，贾瑞明，马晓蕾. 基于 PSF 相关的星点定位算法[J]. 空间控制技术与应用，2015，41(6)：1-7.
Hao Yuncai，Jia Ruimin，Ma Xiaolei. Star locating algorithm based on PSF correlation [J]. Aerospace Control and Application，2015，41(6)：1-7.

[7] 樊巧云，李小娟，张广军. 星敏感器镜头畸变模型选择[J]. 红外与激光工程，2012，41(3)：665-670.
Fan Qiaoyun，Li Xiaojuan，Zhang Guangjun. Selection of star sensor lens aberration model [J]. Infrared and Laser Engineering，2012，41(3)：665-670.

[8] 张宇轩，王宏力，何贻洋，等. 光学畸变耦合下的星敏感器焦距误差建模与分析[J]. 电光与控制，2022，29(2)：63-66.
Zhang Yuxuan，Wang Hongli，He Yiyang，et al. Modeling and analysis of focal length error of star sensor under optical distortion coupling[J]. Electronics Optics & Control，2022，29(2)：63-66.

[9] 赫志达. 星敏感器误差建模及解耦标定方法研究[D]. 合肥：国防科技大学，2017.
He Zhida. Research on star sensor error modeling and decoupled calibration method[D]. Hefei：National University of Defense Technology，2017.

作者简介：

李明谦(1995—)，男，四川省成都市人，硕士研究生，主要研究方向为星敏感器图像处理；

田　宏(1965—)，女，四川省成都市人，博士，研究员，从事航天器姿态测量设备星敏感器的研发，主要研究方向为空间飞行器自主导航；

陆恺立(1990—)，男，四川省成都市人，博士研究生，助理研究员，从事航空航天嵌入式软件开发，主要研究方向为星敏感器算法。