

# 太阳杂光噪声下星敏器星像点质心定位方法

王海涌\*, 华伟, 徐皓, 徐源

北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191

**摘要** 为了保障太阳杂光干扰下星像点质心定位的精度, 本文提出了一种去阈值和杂光斜面噪声的质心定位新方法。首先, 在星像点窗口内将太阳杂光灰度噪声建模为一个斜面。针对质心定位新方法, 推导关于杂光斜面模型各参数估计误差的质心定位误差分析公式, 尤其是关于开窗大小的函数关系。然后, 基于窗口边缘像素给出杂光斜面模型的最小二乘参数估计公式。最后, 采用传统的灰度重心法、去阈值灰度重心法和所提方法进行质心定位仿真测试, 结果表明, 所提方法的精度比传统灰度重心法和去阈值质心法的精度分别提高了 2 倍和 15 倍, 是太阳杂光干扰下星像点质心定位的有效方法, 具有一定的工程应用价值。

**关键词** 测量; 星敏器; 太阳杂光; 阈值; 星图预处理; 质心定位; 灰度重心法; 最小二乘法

**中图分类号** V448.22; V241.62<sup>+</sup>3; V19 **文献标志码** A **doi**: 10.3788/AOS202141.0312005

## Centroiding Method for Star Image Spots under Interference of Sun Straylight Noise in a Star Sensor

Wang Haiyong\*, Hua Wei, Xu Hao, Xu Yuan

School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** To secure the centroiding accuracy of star image spots under the interference of sun straylight noise, we proposed a new centroiding method featuring the subtraction of background threshold and straylight slope noise in this paper. First, the gray noise of sun straylight was modeled as a slope within the window of a star image spot. For the new centroiding method, the error analysis equation of centroiding was deduced regarding the parameter estimation errors of the straylight slope model, especially the function relation concerning the window size. Then, the least-square parameter estimation formulas for the straylight slope model were given based on the window edge pixels. Finally, simulation tests were conducted through three centroiding methods, namely, the traditional gray weighted centroiding method (GWCM), the threshold subtracted GWCM, and the new method. The testing results show that the centroiding accuracy of the proposed method is two times and fifteen times higher than that of the two traditional methods. In conclusion, the method proposed in this paper is an effective centroiding method for star image spots under the interference of sun straylight noise and has a certain value in engineering applications.

**Key words** measurement; star sensor; sun straylight; threshold; star map preprocessing; centroiding; gray weighted centroiding method; least square method

**OCIS codes** 110.4280; 120.6080

## 1 引言

星敏器是天文导航系统中最重要也是精度最高的姿态传感器, 已成为当前很多飞行器的标配<sup>[1]</sup>。

星敏器探测的是微弱的恒星星光, 对杂散光非常敏感。主要的杂散光源为日光、月光和地气光等杂散辐射源<sup>[2-3]</sup>。日光的能量远远高于月光等杂散光, 因此星敏器着重处理的是太阳杂散光。星敏器

收稿日期: 2020-07-20; 修回日期: 2020-09-04; 录用日期: 2020-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(61573113)

\* E-mail: why@buaa.edu.cn

的遮光罩能够抑制绝大部分杂散光,然而,即便是所遗漏的小部分太阳杂散光也会对于星敏感器的运行造成很大干扰。

星像点的质心定位精度会直接影响星敏感器的定姿精度,质心定位技术是星敏感器的关键技术。文献[4-6]均对星敏感器灰度重心法质心定位的系统误差进行了分析,并提出了补偿算法,补偿算法显著提高了质心定位的精度。文献[7]提出了基于高斯规律星像点模拟的灰度弥散方法和高斯质心定位算法,高斯质心定位算法简单精确,精度高于传统的灰度重心法。吴强等<sup>[8]</sup>指出了软阈值去噪法在进行星图的阈值确定时会引起噪声残留的问题。噪声残留必将会影响星点质心的精度,因而吴强等提出了一种不依赖于阈值的加权局部异常因子(LOF)的星图小波去噪方法,但该方法在 i5 计算机上处理每幅星图的时间长达 8.5 s,只具有理论探索意义,还无法应用于实际工程。余路伟等<sup>[9]</sup>针对日月杂光提出了一种背景滤波算法,该算法将卷积核模板边缘像素的均值作为中心点的背景估计值,实则是一种局部固定阈值法,难以用于日月杂光斜坡噪声的过滤,且目标点处的权值( $w_{44}$ )会导致残差图像畸变及质心定位误差。余路伟等在文献[10]中基于掩模像素与目标估计点的距离  $r$  对权值分布进行了改进,尤其是针对强边缘问题设计了四象限旋转对称的掩模。该掩膜与太阳杂光物理背景并不契合,也不能解决阈值误差及星像边缘像素受损的问题,原因在于固定阈值与杂光斜坡特征的矛盾。对于太阳杂光的干扰问题,从上述文献看,业界或者未予以考虑,或者方法不合适。

在空间应用中,星敏感器的视轴会有很多机会临近太阳,这不仅会引起严重的干扰,还会影响到星敏感器的运行<sup>[11]</sup>。本方法的显著特点就是不仅仅去除背景阈值,而且也去除杂光斜坡噪声,是解决太阳杂光干扰的有效方法。

## 2 太阳杂光背景下星像点质心定位法

太阳杂光的空间分布形式随着星敏器型号以及视轴与太阳角距的不同而不同,灰度分布朝着侧抬升呈斜坡状,具有灰度梯度属性。

图 1 为无噪模拟星图,图 2 为在图 1 上叠加太阳杂光噪声后的星图。星敏感器成像的对象是恒星,对弱光很敏感,因此太阳杂光的影响不可忽视。

### 2.1 传统的星像点去阈值质心法

质心法也称灰度重心法(GWCM),其原理是将



图 1 无噪模拟星图

Fig. 1 A simulated star map without noise



图 2 叠加太阳杂光噪声的星图

Fig. 2 A star map superimposed with sun straylight noise  
星像点区域内目标像素对应的灰度值作为其坐标的权重,属于“一阶距”的概念范畴。其公式为

$$\left\{ \begin{array}{l} x_e = \frac{\sum_{j=r_1}^{r_2} \sum_{i=c_1}^{c_2} iG(i,j)}{\sum_{j=r_1}^{r_2} \sum_{i=c_1}^{c_2} G(i,j)} \\ y_e = \frac{\sum_{j=r_1}^{r_2} \sum_{i=c_1}^{c_2} jG(i,j)}{\sum_{j=r_1}^{r_2} \sum_{i=c_1}^{c_2} G(i,j)} \end{array} \right. , \quad (1)$$

式中: $(i, j)$ 为像素坐标; $G(i, j)$ 为像素灰度,显然没有考虑任何背景噪声; $(c_1, r_1)$ 为目标星像窗口左上角像素的坐标; $(c_2, r_2)$ 为目标星像窗口右下角像素的坐标,该窗口应该包括星像点涵盖的所有有效像素; $(x_e, y_e)$ 为星像点质心真值 $(x_0, y_0)$ 的估计值,具有亚像素精度。

实际的星图都有灰度背景,呈现为一个低频灰度电平,该电平估计值可以通过全局阈值法或者浮动阈值法获得,可以用于图像二值化分割及连通域判断,通常被称为背景阈值。在(1)式所示的质心法公式中,像素灰度理应在去除阈值后进行星像点的质心定位。相比于质心法,去阈值质心法更具合理性,也具有更高的提取精度。因而计算公式相应地修改为

$$\left\{ \begin{aligned} x_e &= \frac{\sum_{j=r_1}^{r_2} \sum_{i=c_1}^{c_2} i [G(i, j) - \mu]}{\sum_{j=r_1}^{r_2} \sum_{i=c_1}^{c_2} [G(i, j) - \mu]} \\ y_e &= \frac{\sum_{j=r_1}^{r_2} \sum_{i=c_1}^{c_2} j [G(i, j) - \mu]}{\sum_{j=r_1}^{r_2} \sum_{i=c_1}^{c_2} [G(i, j) - \mu]} \end{aligned} \right. , \quad (2)$$

式中： $\mu$  为背景能量阈值。

### 2.2 太阳杂光背景下质心定位新方法及其误差分析

散焦效果的星像点光能大体符合二维高斯分布,在  $x$  轴和  $y$  轴上相互独立。可以仅针对  $x$  轴上的分布情形进行误差分析,分析结果同样适用于  $y$  轴。(2)式是离散的数字的计算公式,其对应的连续函数的质心坐标估计公式为

$$x_e = \frac{\iint [E(x, y) - \mu] x dx dy}{\iint [E(x, y) - \mu] dx dy}, \quad (3)$$

式中： $E(x, y)$  为对应像素的能量。

当太阳临近星敏感器遮光罩规避角时,太阳杂光噪声就会对星敏感器的运行产生很大影响。围绕星像点的开窗都是小窗口,小范围内太阳杂光的能量分布可以视为简单的线性斜面噪声,像素的叠加

能量  $E(x, y)$  为定值阈值和一斜面函数的叠加,其表达式为

$$E(x, y) = e(x, y) + \mu + k_1 x + k_2 y + b, \quad (4)$$

式中： $k_1$  和  $k_2$  分别为行方向( $x$  方向)和列方向( $y$  方向)的斜率; $b$  为斜面的纵轴截距; $e(x, y)$  为像素的有效星光能量值。在原有无噪高斯星像点 I 上叠加各式噪声,含噪声星像点 II 抬升并倾斜,效果如图 3 所示。

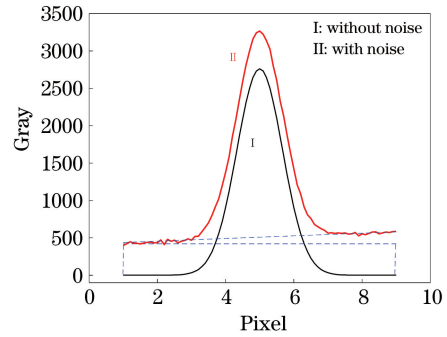


图 3 叠加白噪声、背景阈值和杂光斜面噪声的星像点效果图

Fig. 3 Effect drawing of a star image spot with white noise, background threshold and straylight slope noise

质心真值  $(x_0, y_0)$  位于某一像素上,其整型坐标为  $(i_0, j_0)$ ,是像素的几何中心点。围绕  $(i_0, j_0)$  开窗,且定义相对于像素中心点的真值偏移为  $\beta_x$  和  $\beta_y$  ( $\beta_x = x_0 - i_0, \beta_y = y_0 - i_0$ ),则太阳杂光背景下质心行坐标  $x_e$  的计算公式为

$$x_e(k_1, k_2, b, \mu) = \frac{\iint \{E(x, y) - [k_1(x - i_0) + k_2(y - j_0) + b + \mu]\} x dx dy}{\iint \{E(x, y) - [k_1(x - i_0) + k_2(y - j_0) + b + \mu]\} dx dy} = \frac{t(k_1, k_2, b, \mu)}{s(k_1, k_2, b, \mu)} = x_0 + \delta, \quad (5)$$

式中:分母  $s(k_1, k_2, b, \mu)$  为窗口中有效信号的能量和,或是与星光对应的灰度和(即有效信号); $\delta$  为质心定位算法的误差。

(5)式两边微分可得

$$dx_e = \frac{\partial x_e}{\partial k_1} dk_1 + \frac{\partial x_e}{\partial k_2} dk_2 + \frac{\partial x_e}{\partial b} db + \frac{\partial x_e}{\partial \mu} d\mu = \epsilon_{k_1} + \epsilon_{k_2} + \epsilon_b + \epsilon_\mu. \quad (6)$$

分析由斜率误差  $\Delta k_1$  导致的误差分项

$$\begin{aligned} \epsilon_{k_1} &= \left[ -\frac{\iint (x - i_0) x dx dy}{s} + \frac{t}{s} \frac{\iint (x - i_0) dx dy}{s} \right] \Delta k_1 = \\ &= \left[ -\frac{1}{s} \iint (x - i_0) x dx dy + \frac{(x_0 + \delta)}{s} \iint (x - i_0) dx dy \right] \Delta k_1, \end{aligned} \quad (7)$$

由斜率误差  $\Delta k_2$  导致的误差分项

$$\epsilon_{k_2} = \left[ -\frac{1}{s} \iint (y - j_0) x dx dy + \frac{(x_0 + \delta)}{s} \iint (y - j_0) dx dy \right] \Delta k_2, \quad (8)$$

由斜面方程截距估计误差  $\Delta b$  导致的误差分项

$$\epsilon_b = \left[ -\frac{1}{s} \iint x dx dy + \frac{(x_0 + \delta)}{s} \iint dx dy \right] \Delta b, \quad (9)$$

以及由背景阈值估计误差  $\Delta\mu$  导致的误差分项

$$\epsilon_\mu = \left[ -\frac{1}{s} \iint x dx dy + \frac{(x_0 + \delta)}{s} \iint dx dy \right] \Delta\mu. \quad (10)$$

对比(9)式和(10)式,发现它们的形式完全一致,这是因为在(5)式中  $b$  和  $\mu$  两者代数等价。

方形窗口的边长为  $w$ ,将坐标系原点定义在  $(i_0, j_0)$  处,将不定积分换成定积分, $x$  轴和  $y$  轴的积分上下限均分别为  $w/2$  和  $-w/2$ ,则有

$$\begin{aligned} \epsilon_{k_1} &= -\frac{\Delta k_1}{s} \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} dy \left[ \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} x^2 dx - (\beta_x + \delta) \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} x dx \right] = \\ &= -\frac{\Delta k_1}{s} w \left( \frac{x^3}{3} - \frac{\beta_x}{2} x^2 \right) \Big|_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \quad (\text{ignore the small } \delta \text{ in the previous step}) = -\frac{w^4 - 3\beta_x w^3}{12s} \Delta k_1, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{k_2} &= -\frac{\Delta k_2}{s} \left[ \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} y dy \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} x dx - (\beta_x + \delta) \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} y dy \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} dx \right] = \\ &= -\frac{\Delta k_2}{s} \left( \frac{w^4}{16} - \frac{\beta_x w^3}{4} \right) \quad (\text{ignore the small } \delta \text{ in the previous step}) = -\frac{w^4 - 4\beta_x w^3}{16s} \Delta k_2, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_b &= -\frac{\Delta b}{s} \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \left[ \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} x dx - (\beta_x + \delta) \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} dx \right] dy = \\ &= -\frac{\Delta b}{s} w \left( \frac{x^2}{2} - \beta_x x \right) \Big|_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \quad (\text{ignore the small } \delta \text{ in the previous step}) = -\frac{w^3 - 4\beta_x w^2}{4s} \Delta b. \end{aligned} \quad (13)$$

由于  $b$  和  $\mu$  两者代数等价,因此有

$$\epsilon_\mu = -\frac{w^3 - 4\beta_x w^2}{4s} \Delta\mu. \quad (14)$$

将(11)~(14)式代入(6)式,可得误差的综合表达式为

$$\Delta x_e = \epsilon_{k_1} + \epsilon_{k_2} + \epsilon_b + \epsilon_\mu = -\frac{w^4 - 3\beta_x w^3}{12s} \Delta k_1 - \frac{w^4 - 4\beta_x w^3}{16s} \Delta k_2 - \frac{w^3 - 4\beta_x w^2}{4s} \Delta b - \frac{w^3 - 4\beta_x w^2}{4s} \Delta\mu. \quad (15)$$

分析(15)式所示的误差综合表达公式可以得出如下定性结论:

1) 每项误差分母中的  $s$  是星像点灰度累加和,因而目标星越亮, $s$  越大,综合误差越小,二者成严格的反比关系。

2) 4 个误差分项均与星像点质心位置有关。星像点位置偏移  $\beta_x = x_0 - i_0 \in [-0.5 \text{ pixel}, 0.5 \text{ pixel}]$ ,当  $\beta_x = -0.5 \text{ pixel}$  时误差最大,是最不利的情形。

3) 质心估计误差随着窗口边长  $w$  的增大而增大。

4) 对背景噪声参数的估计越准确,斜率误差  $\Delta k_1$ 、斜率误差  $\Delta k_2$ 、斜面方程截距估计误差  $\Delta b$  和背景阈值估计误差  $\Delta\mu$  越小,综合误差越小,因而太阳杂光的斜坡特征不可忽略。

### 3 太阳杂光斜面噪声的参数估计

建立杂光背景剔除算法时,建议只针对纳入姿态确定的星应用该算法,处理的星数少可以提高实时性。目标星的窗口图像既包括边缘的背景数据,也包括中间的星像数据,是两者的叠加。进行背景估计只能选择窗口边缘的像素作为样本。

方形窗口共有  $4(w-1)$  个窗口边缘像素。由于窗口相对于整幅星图来说足够小,故选用空间平面拟合,斜面方程为

$$z = k_1 x + k_2 y + b. \quad (16)$$

假定已采用局部阈值法或全局阈值法完成对  $\mu$  的估计, $z$  的样本值是边缘像素灰度  $G_n$  减去阈值估计值  $\mu$ ,即  $(G_n - \mu)$ 。采样点  $x$  和  $y$  的值即为边缘像素的行列坐标  $(r_n, c_n)$ 。最小二乘法系数拟合公式为



$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{4(w-1)} r_n^2 & \sum_{n=1}^{4(w-1)} r_n c_n & \sum_{n=1}^{4(w-1)} r_n \\ \sum_{n=1}^{4(w-1)} r_n c_n & \sum_{n=1}^{4(w-1)} c_n^2 & \sum_{n=1}^{4(w-1)} c_n \\ \sum_{n=1}^{4(w-1)} r_n & \sum_{n=1}^{4(w-1)} c_n & \sum_{n=1}^{4(w-1)} 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{4(w-1)} r_n (G_n - \mu) \\ \sum_{n=1}^{4(w-1)} c_n (G_n - \mu) \\ \sum_{n=1}^{4(w-1)} (G_n - \mu) \end{bmatrix} \quad (17)$$

基于(18)式,星像的有效灰度信号  $g_{ij}$  可以通过窗口图像像素灰度  $G_{ij}$  计算获得,从而既可以去除背景阈值,也可以去除太阳杂光斜面噪声。星像的有效灰度信号  $g_{ij}$  为

$$g_{ij} = G_{ij} - \mu - (k_1 i + k_2 j + b) \quad (18)$$

#### 4 质心定位法误差分析公式的仿真

处理星像点采用剔除“阈值+杂光斜面噪声”的新方法。然而,杂光斜面参数估计会有误差,这些误差( $\Delta k_1$ 、 $\Delta k_2$  和  $\Delta b$ )会使质心定位产生误差,参见(11)、(12)和(13)式。

各例仿真均在误差最大的最不利情形( $\beta_x = -0.5$  pixel)下进行。首先开展模型斜率估计误差  $\Delta k_1$  对质心坐标  $x$  误差分量影响的研究,结果如图 4 所示。

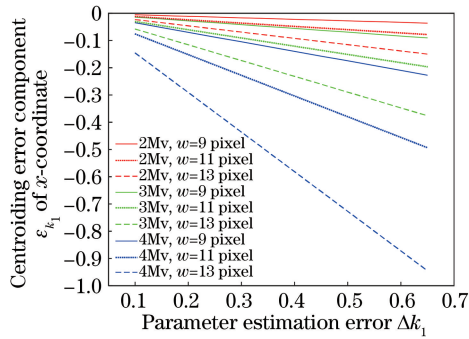


图 4 模型斜率估计误差  $\Delta k_1$  对质心坐标  $x$  误差分量的影响

Fig. 4 Effect of model slope estimate error  $\Delta k_1$  on centroiding error component of  $x$ -coordinate

同理可得误差分量  $\epsilon_{k_2}$  与估计误差  $\Delta k_2$  的关系,如图 5 所示。

由图 4 和图 5 可以看出:对于星等为 4Mv 的暗星,其定位误差相比星等为 3Mv 和 2Mv 的暗星更大,这是因为暗星成像的灰度和[即(15)式分母中的  $s$ ]要比亮星更小;窗宽  $w$  位于(15)式的分子中,开窗越小,误差越小,因此对于三种星等的暗星来说,窗宽  $w$  为 9 pixel 时的误差比窗宽  $w$  为 11 pixel 和 13 pixel 时的误差更小; $\Delta k_1$  和  $\Delta k_2$  对质心坐标  $x$

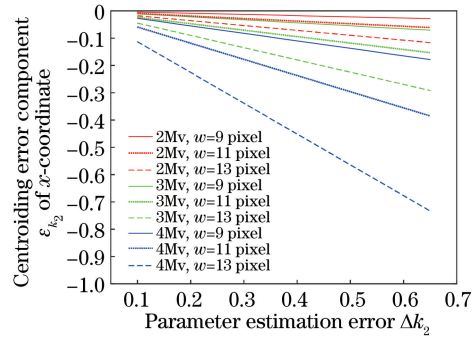


图 5 模型斜率估计误差  $\Delta k_2$  对质心坐标  $x$  误差分量的影响

Fig. 5 Effect of model slope estimate error  $\Delta k_2$  on centroiding error component of  $x$ -coordinate

误差分量的影响基本在同一量级,且前者的影响比后者稍大一些。

太阳杂光模型斜面截距  $b$  的估计误差  $\Delta b$  对质心坐标  $x$  误差分量的影响如图 6 所示。

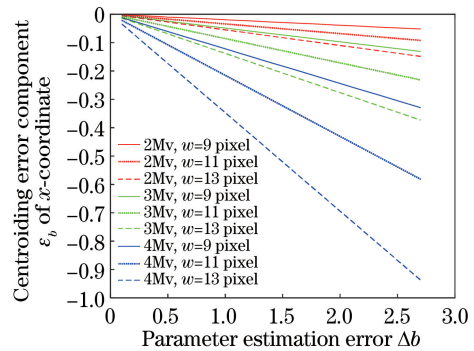


图 6 斜面截距估计误差  $\Delta b$  对质心坐标  $x$  误差分量的影响

Fig. 6 Effect of model slope estimate error  $\Delta b$  on centroiding error component of  $x$ -coordinate

图 6 总体上展示了同样的规律,即误差分量随恒星星等和窗口的增大而增大。(15)式中的  $\Delta b$  与星图背景阈值参数  $\Delta \mu$  两者代数等价,仿真曲线完全一样,故不再重复描述。建议在工程应用中,将  $\mu$  和  $b$  合并为一个新参数  $d$ ,并将其作为模型斜面截距参数,在窗口范围内由最小二乘法重新获得  $d$  的估值,这样就可以避免  $\mu$  值原有误差的导入。

## 5 去斜坡噪声质心定位算法仿真验证

### 5.1 算法原理的仿真验证

基于某种非线性模型生成 1 幅(1024 pixel × 1024 pixel)太阳杂光仿真图像,如图 7 所示,其对角

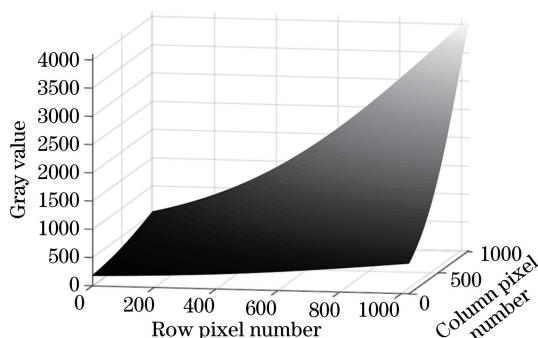


图 7 基于非线性模型仿真的太阳杂光灰度图像  
Fig. 7 A sun straylight gray image generated from a nonlinear model

线的一端已达饱和(灰度值为 4095)。

如图 8 所示,在对角线上相隔 128 个像素选取 8 个位置,作为窗口中心,在小窗口(11 pixel × 11 pixel)范围内作斜面线性拟合(不加白噪声),最小二乘线性拟合精度如表 1 所示。

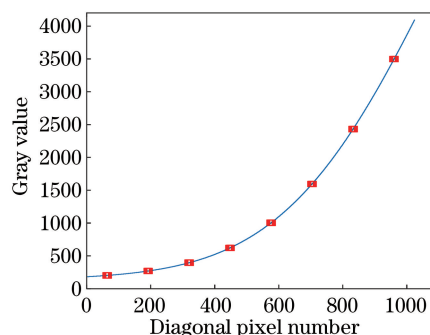


图 8 对角线上相隔 128 个像素的 8 个开窗位置  
Fig. 8 Eight window locations on the diagonal with an interval of 128 pixels

表 1 无噪非线性杂光背景下的仿真试验结果

Table 1 Simulating test results under the nonlinear straylight background without white noise

Window number	1	2	3	4	5	6	7	8	
$k_1$	0.1940	0.3537	0.6657	1.139	1.875	2.781	3.740	4.519	
$k_2$	0.1940	0.3537	0.6657	1.139	1.875	2.781	3.740	4.519	
$b$	199.7	265.0	387.3	608.4	981.2	1561.9	2386.3	3443.1	
Linear fitting accuracy	0.288	0.290	0.273	0.282	0.304	0.294	0.287	0.279	
GWCM	Mean1 /pixel	-0.0425	-0.0403	-0.0379	-0.0371	-0.0373	-0.0387	-0.0409	-0.0434
	Std1 /pixel	0.2244	0.2308	0.2377	0.2436	0.2479	0.2506	0.2523	0.2533
G_thWCM	Mean2 /pixel	0.1679	0.3083	0.5795	0.9989	1.6489	2.4018	3.2838	3.9625
	Std2 /pixel	0.1998	0.3644	0.6872	1.1883	1.973	2.8339	3.9173	4.728
G_slopWCM	Mean3 /pixel	-0.0020	0.0021	0.00038	0.0037	-0.0023	-0.0011	0.0031	-0.0025
	Std3 /pixel	0.0026	0.0028	0.0005	0.0042	0.0034	0.0013	0.0035	0.0033

然后,对各窗口中心像素方形范围内的 16 个随机位置星像点作质心定位,统计其均值和标准差,也一并列入表 1 中。其中,GWCM 表示传统的灰度重心法,G\_thWCM 表示去阈值的灰度重心法,G\_slopWCM 表示去斜坡噪声的灰度重心法,Mean 表示 16 个样本测量误差的均值;Std 表示测量误差的标准差。结果表明,去斜坡噪声的灰度重心法(G\_slopWCM)无论是在均值方面还是在标准差方面,均表现优异,精度高达 0.1% 像素量级。很显然,原因之一是没加白噪声,但其根本原因在于先估计再去斜坡噪声的算法是合理的。

本次试验中精度表现最差的是去阈值的灰度重心法(G\_thWCM),因为它舍去的是固定阈值,与杂光斜坡状噪声物理背景不相符。斜坡去阈值后是一个楔形,楔形或三角形重心有“偏移中点”效应,质心系统误差随着斜率的增加而不断加大,在第 8 个位

置(960 pixel,960 pixel)处的斜率为 4.519,质心误差均值高达 3.9625 pixel,说明去阈值后反而更加不适应于斜坡噪声。事实上,误差最大的本应是传统的灰度重心法。该算法不去除阈值或保留了阈值残留,其背景可分解成 1 个四棱柱和 1 个楔形两个成分(参见图 3)。四棱柱或矩形重心计算有“窗口中心汇聚”效应,更严格的说是越趋向窗口中心像素的中心,四棱柱越高,这种效应越显著,该效应与楔形重心的“偏移中点”效应叠加后,误差应更大;然而其误差却小于 G\_thWCM 的误差。仔细研究后发现原因在于仿真条件,16 个随机星像点均坐落在同一个窗口的中心像素区域内,由于阈值强大的权重,GWCM 质心定位也一定趋向于同一个窗口的中心像素内,从而导致了并不最差的均值和方差。如果实际的星像点坐落点远离窗口中心像素,GWCM 的低劣性能就会显露。

### 5.2 基于太阳杂光试验图像的算法验证

某单位基于太阳模拟器开展了某型星敏感器的太阳杂光成像试验,杂光图像的 6 张样片如图 9 所示,其中  $\alpha_{SCA}$  代表阳光矢量和星敏感器光轴的夹角。

由图 9 可知,杂光噪声背景显然不是线性的,右边上下两角部饱和,规律难以把握。但考虑到镜头及遮光罩的轴对称性,非线性分布的空间频率应该很低,如图 10 所示。

杂光图像对角线像素灰度图及开窗位置如图 11 所示,取样测得背景灰度随机噪声标准差为 12.92。在每个窗口的中心像素内随机生成 16 颗星像点,与图 10 所示的背景图叠加,沿用 5.1 小节的方法开展试验,结果如表 2 所示。

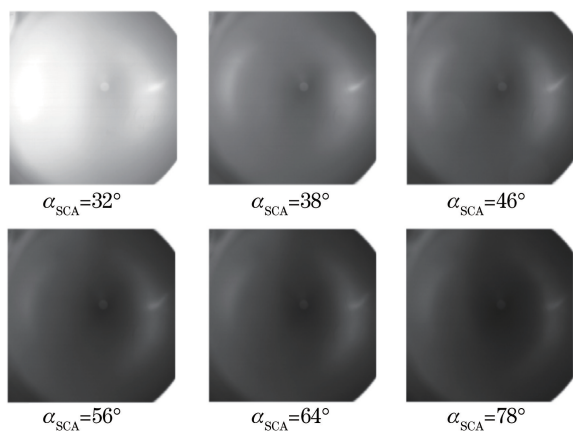


图 9 实验室内基于太阳模拟器的杂光图像样片

Fig. 9 Straylight images produced by a sun simulator in lab

8 个窗口下 3 种方法的标准差柱状图如图 12 所示。

尽管杂光试验成像中的斜坡特征并不显著,但

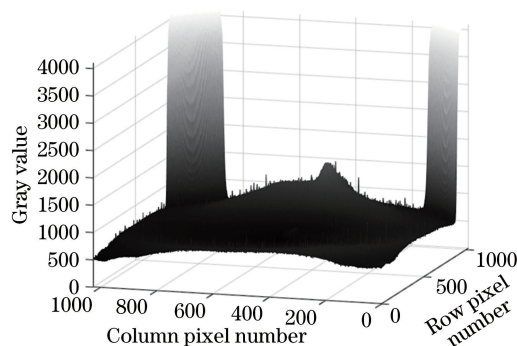


图 10 第 4 幅杂光图样 ( $\alpha_{SCA} = 56^\circ$ ) 的三维灰度图

Fig. 10 Three-dimensional display of the 4th gray image ( $\alpha_{SCA} = 56^\circ$ ) in Fig. 9

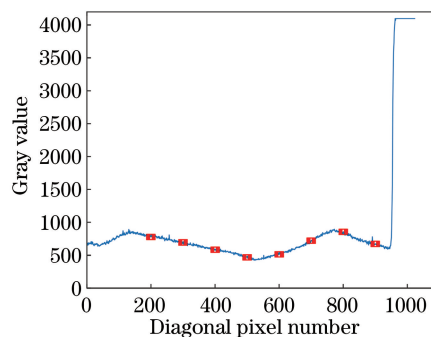


图 11 杂光图像对角线像素灰度图及 8 个窗口位置

Fig. 11 Gray distribution of diagonal pixels of sun straylight image and the eight window locations

总体上看,去斜坡噪声的灰度重心法依然表现得最好。尤其是在高斜率情形下,比如在窗口 7 上,斜率  $k_1 = -2.0277$ ,为最高值。16 颗星像点的  $x$  坐标定位误差如图 13 所示。去斜坡噪声的灰度重心法最适合用于背景高斜率情形下,该例精度 (0.0793 pixel) 是传统灰度重心法精度 (0.2466 pixel) 的 3 倍,是去阈值灰度重心法精度 (1.2990 pixel) 的 16 倍。

表 2 基于太阳模拟器生成太阳杂光图像的仿真测试结果

Table 2 Simulating test results based on a sun straylight gray image produced by a sun simulator

Window number		1	2	3	4	5	6	7	8
	$k_1$	-0.3745	-0.666	-0.6318	-0.9479	1.0944	1.9721	-2.0277	-0.7720
	$k_2$	795.9	0.2280	-0.5751	-0.9617	0.8662	2.5900	-0.4249	-0.4308
	$b$	795.9	694.2	590.7	477.0	513.1	685.0	847.7	673.9
GWCM	Mean1 /pixel	0.0597	-0.0631	-0.0594	-0.0772	-0.0398	-0.0257	-0.0773	-0.0711
	Std1 /pixel	0.2460	0.2448	0.2430	0.2403	0.2416	0.2450	0.2466	0.2444
G_thWCM	Mean2 /pixel	-0.2515	-0.7044	-0.2668	-0.9558	0.6930	1.2418	-1.3198	-1.393
	Std2 /pixel	0.2273	1.0513	0.3148	1.0838	0.8188	1.0995	1.2990	2.1314
G_slopWCM	Mean3 /pixel	-0.0127	0.0713	0.2800	-0.1764	-0.2541	0.1128	0.0666	-0.4563
	Std3 /pixel	0.0314	0.0965	0.3309	0.1981	0.2998	0.1211	0.0793	0.7074

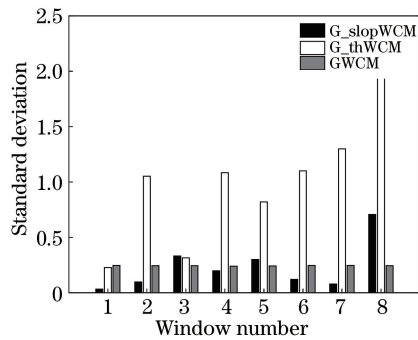
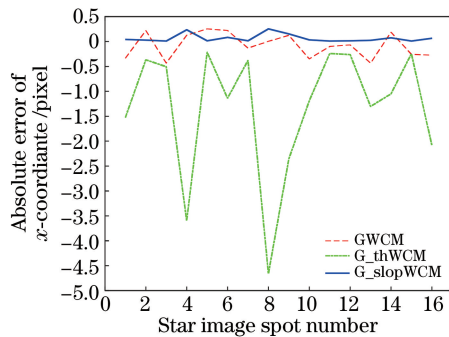


图 12 8 个窗口下 3 种方法标准差的对比

Fig. 12 Standard deviation comparison between three centroiding methods at eight windows

图 13 三种方法的质心  $x$  坐标绝对误差曲线Fig. 13 Absolute error curves of centroided  $x$ -coordinate by three methods

## 6 结 论

本文建立了一种去阈值和杂光斜面噪声的质心定位新方法,保障了太阳杂光干扰下星像点质心定位的精度。将太阳杂光灰度噪声建模为一斜面,在星图小窗口内是合理的,而且针对简单斜面进行参数估计,计算效率高。对新方法开展了误差分析,推导了以杂光斜面及背景阈值参数估计误差为自变量的质心定位误差公式;揭示了质心定位误差与窗口边长之间的定量关系,进行了可视化仿真及分析,为工程上确定窗口大小提供了理论依据。本文给出了基于窗口边缘像素的斜面参数估计方法和最小二乘参数估计公式,从而构成了一个完整的技术方法。所提方法比传统的灰度重心法及去阈值质心法的精度分别提高了 2 倍和 15 倍,是太阳杂光干扰下星像点质心定位的有效方法,具有较高的工程应用价值。

## 参 考 文 献

[1] Fang J C, Ning X L. Theory and application of celestial navigation [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2006: 233-

235.

房建成, 宁晓琳. 天文导航原理及应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 233-235.

- [2] Li Y, Liao Z B, Mu S B, et al. Stray light suppressing technique and simulation for star sensor [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(12): 2620-2624.  
李洋, 廖志波, 穆生博, 等. 星敏传感器杂散光抑制方法及仿真分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(12): 2620-2624.
- [3] Chen Y, Zheng X J, Liu Z M, et al. Testing of stray light irradiance at exit of lens hood for star sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(6): 1464-1471.  
陈赞, 郑循江, 刘宗明, 等. 星敏传感器遮光罩出口杂光的辐照度测试 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(6): 1464-1471.
- [4] Sirkis J S. System response to automated grid methods [J]. Optic Engineering, 1990, 29(12): 1485-1493.
- [5] Wei X G, Zhang G J, Jiang J. Subdivided locating method of star image for star sensor [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(9): 812-815.  
魏新国, 张广军, 江洁. 星敏传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.
- [6] Wang H Y, Song Z F. Systemic error analysis and compensation of gray centroid method for integral-type Gaussian PSF in star tracker [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2016, 36(4): 146-148.  
王海涌, 宋振飞. 星敏传感器灰度重心法质心定位系统误差分析及补偿算法 [J]. 弹箭与制导学报, 2016, 36(4): 146-148.
- [7] Wang H Y, Fei Z H, Wang X L. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(7): 1672-1677.  
王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1672-1677.
- [8] Wu Q, Zhang R. Wavelet denoising of near-earth all-day star map based on local outlier factor [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0810001.  
吴强, 张锐. 基于局部异常因子的近地全天时星图小波去噪 [J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0810001.
- [9] Yu L W, Mao X N, Jin H, et al. Study on image process method of star tracker for stray lights resistance filtering based on background [J]. Aerospace Shanghai, 2016, 33(4): 26-31.



- 余路伟, 毛晓楠, 金荷, 等. 星敏感器抗杂光背景滤波图像处理方法研究[J]. 上海航天, 2016, 33(4): 26-31.
- [10] Yu L W, Mao X N, Zhou Q, et al. Image processing of star sensor based on maximum background estimation[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(7): 889-895.
- 余路伟, 毛晓楠, 周琦, 等. 采用最大背景估计的星敏感器图像处理方法[J]. 激光与红外, 2017, 47(7): 889-895.
- [11] An M, Zhang J, Wang X H, et al. Simulation and analysis for the stray light suppressing based on STK [J]. Tactical Missile Technology, 2013(3): 59-66.
- 安萌, 张健, 王啸虎, 等. 基于 STK 的星敏杂光抑制的仿真分析[J]. 战术导弹技术, 2013(3): 59-66.