

# 光学学报

## 基于噪声模型变换的子光斑质心提取方法

陈春璐<sup>1,2,3</sup>, 赵旺<sup>1,2\*\*</sup>, 赵孟孟<sup>1,2,3</sup>, 王帅<sup>1,2\*</sup>, 赵晨思<sup>1,2,3</sup>, 杨康建<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 受天光背景、大气湍流强度、信标光回光特性和探测器噪声等因素影响, 夏克-哈特曼波前传感器子孔径光斑常存在强度分布不均匀和低信噪比的情况, 故子孔径内光斑质心定位不准且波前探测精度下降。提出了一种基于噪声模型变换的子孔径光斑质心提取方法, 采用方差稳定变换(VST)将探测引入的泊松-高斯噪声转换为高斯噪声, 进一步基于残差反馈优化BM3D策略实现低信噪比子孔径图像的高效去噪。结果显示: 所提方法可有效提取低信噪比夏克-哈特曼波前传感器光斑阵列图像中的光斑信号数据, 提高了子孔径光斑的质心定位精度和稳定性; 相比于传统自适应阈值法等方法, 所提方法在子光斑图像峰值信噪比低于6时, 可以提升波前复原精度2倍以上。

**关键词** 测量; 自适应光学; 质心提取; 方差稳定变换; 改进去噪算法; 波前复原

**中图分类号** O436.3

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS221522

### 1 引言

夏克-哈特曼波前传感器具有结构简单、光能利用率高、探测速度快的优点, 故成为了普遍采用的波前传感器<sup>[1-4]</sup>。在实际应用场景中, 受天光背景、大气湍流强度、信标光回光特性和探测器噪声等因素影响, 夏克-哈特曼波前传感器采集的光斑阵列图像常常出现子孔径光斑强度分布不均匀且信噪比(SNR)较低的情况, 这会使得光斑质心难以准确提取, 波前探测精度下降<sup>[5]</sup>。

为了解决低信噪比光斑阵列图像的子光斑定位问题, 研究人员提出了一系列改进方法<sup>[6-13]</sup>, 如加窗阈值质心法、加权质心法、幂指数质心法、加窗阈值加权质心法、互相关算法、频域法和局部自适应阈值法等。然而, 在待测光束的近场光强动态起伏, 探测器噪声、图像背景噪声和其他干扰噪声信号动态变化的情况下, 光斑阵列图像的有效光信号与噪声信号存在时空分布起伏变化, 利用上述方法计算子光斑质心时, 通过动态调整算法参数才能保证子光斑的质心提取精度。这种算法机制将显著增加质心提取算法的复杂度, 同时也存在最佳参数选取与动态设置的问题<sup>[14]</sup>, 最终将导致传感器的波前复原精度下降。此外, 基于神经网络的质心提取方法也得到了广泛应用, 但该类方法的质心

定位精度依赖于训练集生成方式和模型训练精度, 入射光束近场光强动态起伏时训练集生成复杂、模型训练难度增大, 故其目前尚难以用于实际的复杂波前探测场景中<sup>[15-16]</sup>。

针对入射光束近场光强动态起伏时子光斑质心高效提取的问题, 亟需寻求一种高适应性的夏克-哈特曼波前传感器低信噪比子光斑图像质心定位方法。因此, 根据光电探测器的信号特性和噪声特性, 本文提出了基于方差稳定变换(VST)的子光斑质心提取方法, 通过方差稳定变换将随信号变化的泊松高斯噪声转换为方差固定的高斯噪声, 利用改进的3D块匹配协同滤波方法(NFBM3D)去除光斑阵列图像噪声, 再进行子光斑质心提取和波前复原。该方法可有效去除光斑阵列图像噪声, 适应光强变化, 不需要根据光强起伏特性动态调整定位算法参数或提前训练低信噪比子光斑质心提取模型, 具有实现简单、适应性强和鲁棒性好等特点。

### 2 理论分析

当利用波前传感器采集子光斑图像时, 受环境、光电探测器量子特性等因素的影响, 探测器中会引入信号光子噪声、背景光子噪声和读出噪声等<sup>[17-18]</sup>。根据探测噪声特性, 光电探测器噪声一般用泊松高斯模型

收稿日期: 2022-07-25; 修回日期: 2022-08-19; 录用日期: 2022-08-25; 网络首发日期: 2022-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(61805251, 61875203, 11704382, 62105336)、中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(2017429)

通信作者: \*wangshuai@ioe.ac.cn; \*\*zw\_2017@foxmail.com

表示,该模型中因传感器量子特性而引入的与信号相关的噪声使用泊松分布建模,与信号无关的噪声用高斯分布建模<sup>[19-20]</sup>,相应的公式为

$$s(x) = a \cdot p[s_0(x)] + n(x), \quad (1)$$

式中: $s(x)$ 为带有噪声的图像; $s_0(x)$ 为清晰图像; $x$ 为任意一个像素点; $a$ 为增益; $n(\cdot)$ 为均值为 $m$ 、标准差为 $\sigma$ 的高斯噪声分布; $p(\cdot)$ 为依赖于信号的泊松噪声分布。

当入射光束近场光强动态起伏时,光电探测器产生的泊松高斯噪声随入射信号的变化而变化,像素点间噪声方差不统一。因此,先通过方差稳定变换将方差随入射信号变化的泊松高斯噪声转换为方差稳定的高斯噪声,消除噪声方差与信号强度的关系,再在高斯噪声模型下去除图像噪声,减弱环境噪声、探测器噪声等对子光斑质心提取的影响,提升夏克-哈特曼波前传感器在低信噪比下的波前探测精度。所提方法的流程图如图 1 所示。

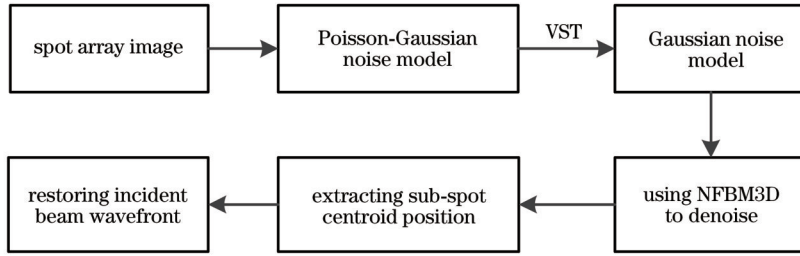


图 1 所提方法流程图

Fig. 1 Flow chart of proposed method

根据式(1),采集图像中的一个像素 $x_1$ 可以表示为

$$x_1 = a \cdot p(y_1) + n, \quad (2)$$

式中: $n$ 服从 $N(m, \sigma_1^2)$ ;泊松分布 $p$ 参数为 $\lambda_0$ ;  $y_1$ 为采集像素 $x_1$ 对应的清晰图像的像素点,此时方差为 $\text{Var}(x_1) = \sigma^2 + a^2 \lambda_0$ 。方差稳定变换即寻找一个变换 $f(x_1)$ 使得方差与原始信号无关,在 $x_1$ 的一个小区域内一次逼近达到

足够小的误差,则 $\text{Var}(f) = \left(\frac{df}{dx}\right)^2 \text{Var}(x_1)$ 。为不失一般性,设 $\text{Var}(f) = 1$ ,通过一阶逼近和级数展开可以得到,对于任意一个泊松高斯域的像素点 $x_1$ ,方差稳定变换的过程<sup>[21-26]</sup>可以表示为

$$f(x_1) = \begin{cases} \frac{2}{a} \sqrt{ax_1 + \frac{3}{8}a^2 + \sigma_1^2 - am}, & x_1 > -\frac{3}{8}a - \frac{\sigma_1^2}{a} + m \\ 0, & x_1 \leq -\frac{3}{8}a - \frac{\sigma_1^2}{a} + m \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $f(x_1)$ 为高斯噪声域下像素 $x_1$ 对应的信号强度,变换后 $\text{Var}[f(x_1)] = a/4$ ,此时子光斑图像中泊松高斯噪声已经被转换为高斯噪声,方差不再随信号的变化而变化。

在完成方差稳定变换后,图像标准差固定为1,此时采用的BM3D<sup>[27-28]</sup>去噪算法称为VSTBM3D。在此基础上引入残差反馈进一步提升去噪能力,此时方法称为NFBM3D,其流程如图 2 所示。

NFBM3D算法流程中的步骤一为:对经噪声模型转换(方差稳定变换)的图像进行相似块搜索,完成3D变换、硬阈值滤波和逆变换后进行加权平均,得到初步去噪结果。

步骤一中去掉的噪声信息中存在有效信号,为了提高算法的精度,在原有算法的基础上进行去噪增强,在初步去噪结果的基础上加入噪声反馈。

完成方差稳定变换和残差反馈后的新图像可以表示为

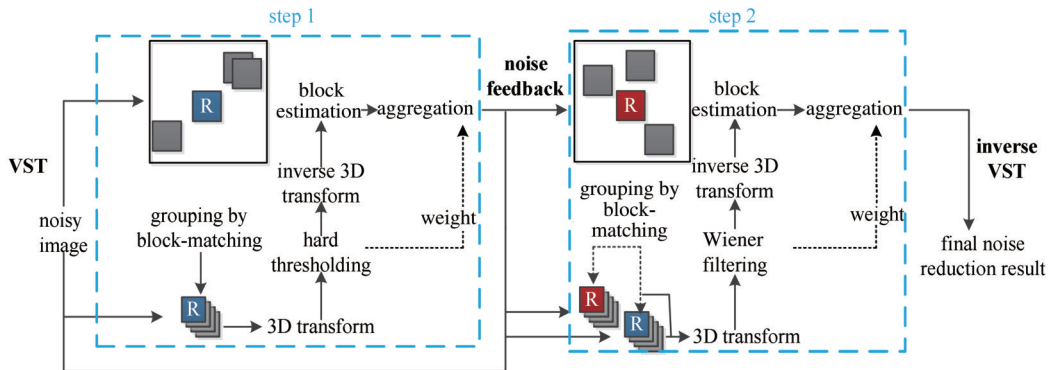


图 2 NFBM3D算法流程

Fig. 2 Flow chart of NFBM3D algorithm

$$Z_{\text{new}} = Z' + \delta(Z - Z'), \quad (4)$$

式中:  $Z$  为方差稳定变换后高斯域的含噪图像;  $Z'$  为基本估计后的去噪图像;  $\delta$  为噪声图像在新图像中所占的权重;  $Z_{\text{new}}$  为新的组合图像。

算法流程中的步骤二为: 改用维纳滤波对 3D 变换后的矩阵进行系数收缩, 重复步骤一中操作得到最终去噪结果  $y$ , 再通过方差稳定变换逆变换回归到初始的域, 得到实际去噪图像。方差稳定变换逆变换的公式为

$$f_{\sigma}^{-1}(y) = \frac{1}{4}y^2 + \frac{1}{4}\sqrt{\frac{3}{2}}y^{-1} - \frac{11}{8}y^{-2} + \frac{5}{8}\sqrt{\frac{3}{2}}y^{-3} - \frac{1}{8} - \sigma^2. \quad (5)$$

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Wavelength /nm	$D/r_0$	Number of sub-apertures	Sub-aperture size / $\mu\text{m}$	Focal length /mm	Pixel length / $\mu\text{m}$
Value	1064	10	16×16	270	11.5	15

图 3 给出了表 1 对应仿真条件下光束波前探测的典型结果。可以发现, 大气湍流比较大时近场光强起伏剧烈, 受限于探测器响应范围, 子光斑图像无明显过饱和区域时容易出现部分子孔径光强较弱、信噪比较低的情况。图 3(a) 给出了波前传感器入射光束的近场光强分布。图 3(b) 给出了含有探测噪声的波前传感器子光斑图像, 噪声模型为泊松-高斯噪声模型, 高斯噪声均值为 0、标准差为 8, 泊松噪声增益为 1。图 3(c) 给出了每个子孔径对应的峰值信噪比。由于入射

利用步骤一、步骤二完成夏克-哈特曼波前传感器采集图像的噪声去除后, 采用强度加权算法进行质心提取<sup>[29-31]</sup>。

### 3 结果分析

#### 3.1 仿真分析

基于 Kolmogorov 湍流理论, 利用分层相位屏模拟激光在湍流大气中的传输过程, 发射面和接收面之间放置一系列表征大气相位特性的相位屏, 激光传输至相位屏处时光场中引入相应的相位扰动, 重复真空中传输叠加相位扰动的过程, 直至得到接收面处光场的复振幅。仿真参数如表 1 所示, 其中  $D$  为望远镜口径,  $r_0$  为大气相干长度。

光束近场光强非均匀, 故波前传感器子光斑图像中不仅有信噪比较高的区域, 还存在低信噪比区域。其中, 峰值信噪比在 0~6 范围内的子孔径有 87 个, 信噪比在 6~15 范围内的子孔径有 100 个, 仅有 21 个子孔径的光斑峰值信噪比大于 15。峰值信噪比  $R_{\text{SN},p}$  的计算公式<sup>[5]</sup>为

$$R_{\text{SN},p} = \frac{I_p - \mu_n}{\sigma_n}, \quad (6)$$

式中:  $I_p$  为子孔径内光强的最大值;  $\mu_n$  为噪声均值;  $\sigma_n$  为噪声标准差。

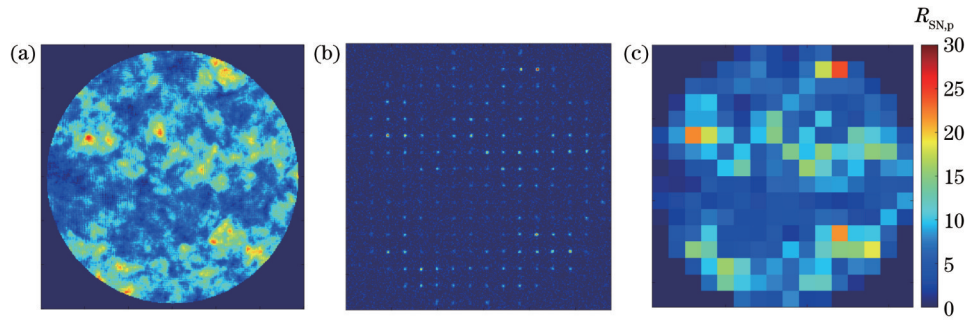


图 3 光束波前探测结果。(a) 近场光强非均匀分布; (b) 低信噪比光斑阵列图像; (c) 各子孔径的峰值信噪比

Fig. 3 Detection results of beam wavefront. (a) Non-uniform distribution of near-field light intensity; (b) spot array image with low signal-to-noise ratio; (c) peak signal-to-noise ratio for each sub-aperture

采用 NFBM3D 方法对图 3 的低信噪比光斑阵列图像进行去噪处理, 图 4 分别给出了原始清晰的光斑图像、带有噪声的光斑图像和 NFBM3D 去噪后的图像。可以明显看出, 去噪后光斑图像和清晰图像很接近, 此时的质心提取规避了噪声的干扰。

分别采用目前夏克-哈特曼波前传感器常用的 Tk 阈值质心法 (TkCoG)、加窗法 (Windowing)、自适应阈值法 (Adathreshold) 和所提的 NFBM3D 方法对图 3 中

的低信噪比光斑图像进行质心提取。Tk 阈值质心法通过子孔径内光斑图像灰度值减去背景均值和三倍标准差去除噪声。加窗法限定子孔径内关于质心提取的像素区域来减少远离光斑的噪声干扰。自适应阈值法通过整体像素减去固定阈值后每个子孔径内光斑灰度值对应减去图像峰值的  $P$  倍 ( $P < 1$ ) 来去除噪声。利用质心探测误差 (CEE,  $E_{\text{CE}}$ ) 来衡量质心探测精度, 其公式为

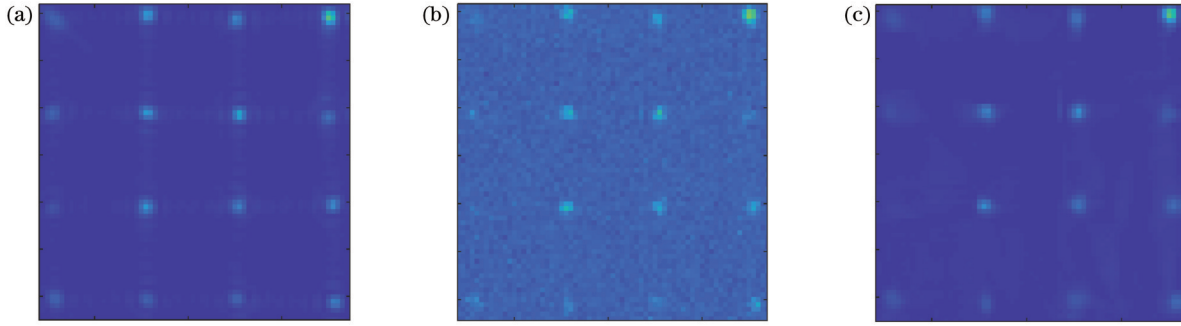


图4 去噪前后的光斑阵列图像。(a)清晰图像;(b)带有噪声的图像;(c) NFBM3D去噪后图像

Fig. 4 Spot array images before and after denoising. (a) Clear image; (b) image with noise; (c) image after NFBM3D denoising

$$E_{CE} = \sqrt{(x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2}, \quad (7)$$

式中:  $(x_n, y_n)$  为第  $n$  个子孔径通过不同方法计算得到的质心位置;  $(x_0, y_0)$  为标定的理论偏移质心位置。图 5 给出了在不同信噪比下以不同方法对子光斑图像进行质心提取的平均探测误差。可以发现,随着子孔径内信噪比的降低,不同方法的质心探测误差持续增大。

所提 NFBM3D 方法在不同信噪比下均具有较低的质心提取误差,尤其在峰值信噪比为 3~6 的低信噪比子孔径中所提方法探测误差的平均值为 0.25 pixel,自适应阈值法探测误差的平均值为 0.58 pixel, Tk 阈值质心法探测误差的平均值为 0.6 pixel,加窗法探测误差的平均值为 0.55 pixel,所提方法的质心位置提取精度较自适应阈值法提升了约 1.3 倍。

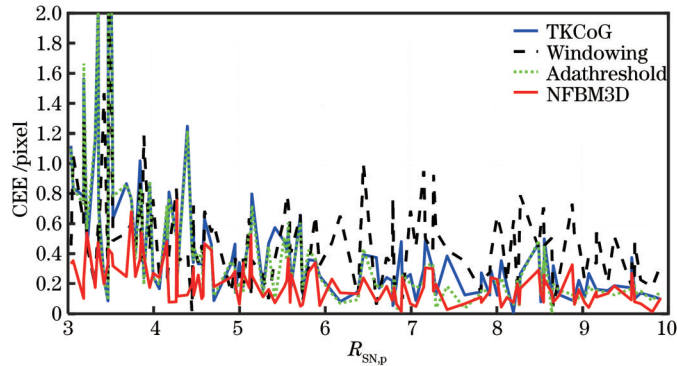


图5 不同峰值信噪比下不同方法的平均 CEE

Fig. 5 Average CEE of different methods under different peak signal-to-noise ratios

固定质心提取算法参数,输入均值为 0、标准差为 8 的高斯噪声和单位泊松噪声,仿真模拟 100 组非均匀变化近场光强作为输入,从 100 组对应的光斑阵列图中选出峰值信噪比小于 10 的子孔径,采用上述 4 种方法进行质心探测,从所有的低信噪比子孔径中随机选取 2000 个子孔径的误差结果如图 6 所示,其中 4 条线从上往下依次代表加窗法、Tk 阈值质心法、自适应阈值法、NFBM3D 法的质心探测误差平均值。可以发现,所提 NFBM3D 方法具有较小的质心提取误差,误差平均值为 0.23 pixel,自适应阈值法的误差平均值为 0.45 pixel, Tk 阈值质心法的误差平均值为 1.06 pixel,加窗法的误差平均值为 1.09 pixel,质心位置提取精度约提升 1.2 倍。该结果表明所提方法能够更好地适应输入光束近场强度非均匀变化的场景。图 7 统计了近场光强非均匀变化时峰值信噪比为 3~4 和 4~5 的子孔径采用上述 4 种方法提取质心时平均误差(质心探测误差)的概率密度曲线(PDF)。可以发现,相较于其

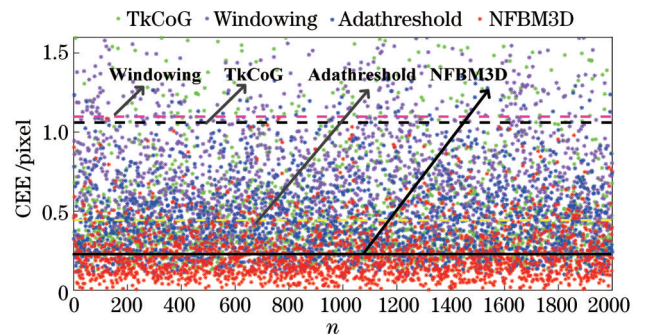


图6 光强非均匀变化时不同方法的 CEE

Fig. 6 CEE of different methods under non-uniformly varying light intensity

他方法存在的探测误差遍布较广、数值较大的情况,所提 NFBM3D 方法的质心提取误差一直保持在最小水平。

由图 5~7 可以看出,相比于现有夏克-哈特曼传感

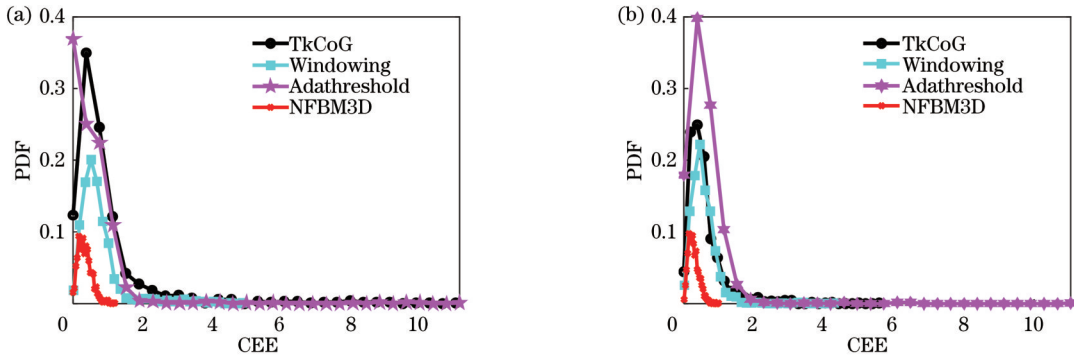


图 7 不同峰值信噪比下不同方法 CEE 的概率密度函数。(a) 信噪比为 3~4; (b) 信噪比为 4~5

Fig. 7 Probability density functions of CEE of different methods under different peak signal-to-noise ratios. (a) Peak signal-to-noise ratio of 3-4; (b) peak signal-to-noise ratio of 4-5

器常用的自适应阈值法, 所提 NFBM3D 方法通过方差稳定变换有效地去除了动态变化的泊松-高斯噪声对光斑质心提取的影响, 入射光束光强动态起伏时无需根据近场光强特性动态调整质心提取算法参数, 仍可实现较高精度的质心提取, 对实际波前探测应用场景具有更强的适应性。

将所提去噪方法与其他典型去噪方法进行对比, 针对图 3 所示的波前传感器图像, 固定噪声和阈值参数, 在 100 组近场光强非均匀变化对应的光斑阵列图像中对峰值信噪比小于 10 的子孔径采用不同去噪方法进行质心探测, 随机选取 2000 个子孔径的探测误差, 如图 8 所示, 其中 4 条线从上往下依次代表非局部均值滤波 (NLM)、BM3D、VSTBM3D、NFBM3D 去噪后质心探测误差的平均值。可以看出: 利用去噪算法对含噪声的波前传感器采集图像进行噪声去除后, 质心探测误差都有所减小, 均控制在 0.4 pixel 以下; NLM 和 BM3D 方法能较好地去除图像中的高斯噪声, 但采集的光斑阵列图像中存在泊松噪声干扰; 在 BM3D 去噪前引入方差稳定变换, 即 VSTBM3D 方法的质心提取误差减小了 15%, 特别是所提 NFBM3D 方法的质心探测误差又进一步减小了 5%。

为了进一步验证质心测量误差降低对波前重构精

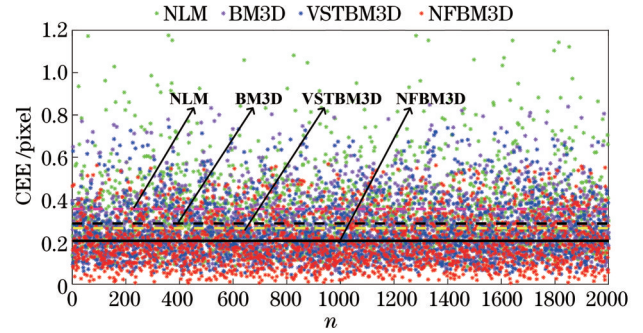


图 8 光强变化时不同去噪方法预处理后的 CEE

Fig. 8 CEE after pre-processing with different denoising methods under varying light intensity

度的提升作用, 在获取质心数据之后, 使用 Zernike 模式法进行波前复原, 采用误差波前的均方根误差 (RMS) 评价波前复原的效果。图 9(a) 为图 3 对应光束的理论输入波前, 图 9(b)、(c) 为图 3 对应光束无噪声时的复原波前和复原残差, 无噪声时波前复原精度高, 残差仅为输入的 5%。图 10 给出了针对图 3 低信噪比光斑阵列图像, 采用不同方法提取质心后的波前复原误差。可以发现: 直接使用 Tk 阈值质心法、加窗法、自适应阈值法提取质心后的波前复原残差分别为  $0.1340\lambda$ 、 $0.1639\lambda$ 、 $0.1052\lambda$ ; 采用 BM3D 去噪并提取质心后的波前复原残差减小到了  $0.0595\lambda$ , 缩小了

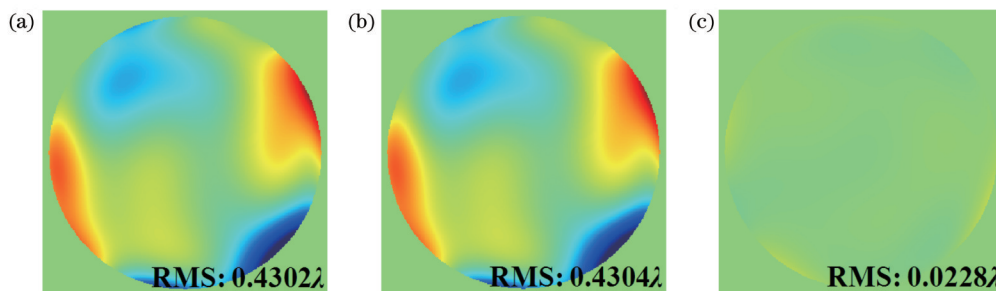


图 9 无噪声时的复原波前和复原残差。(a) 输入波前; (b) 无噪声时复原波前; (c) 无噪声复原残差

Fig. 9 Restoration wavefront and restoration residual in absence of noise. (a) Input wavefront; (b) recovery wavefront without noise; (c) recovery residual without noise

43.4%;所提NFBM3D对应的波前复原残差进一步缩小为 $0.0331\lambda$ ,相较于自适应阈值法缩小了68.5%。该波前复原对比结果进一步说明,所提的基于泊松-高

斯噪声模型变换的光斑阵列图像噪声去除方法可以实现对光斑阵列图像的高效去噪,进而可明显提升质心提取和波前复原的精度。

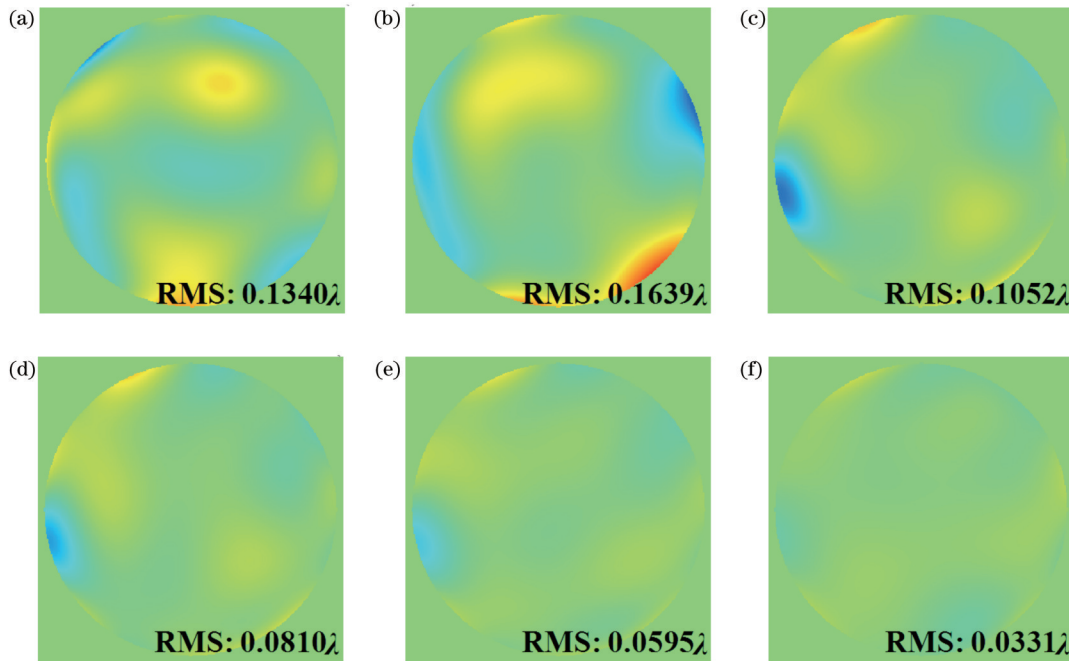


图 10 不同方法质心提取后波前复原残差。(a) TkCoG;(b) Windowing;(c) Adathreshold;(d) NLM;(e) BM3D;(f) NFBM3D  
Fig. 10 Wavefront recovery residuals after centroid extraction by different methods. (a) TkCoG; (b) Windowing; (c) Adathreshold; (d) NLM; (e) BM3D; (f) NFBM3D

### 3.2 实验结果与分析

为验证所提质心提取方法在实际应用场景中的有效性,搭建了如图 11 所示的实验验证系统,对光强非均匀分布下夏克-哈特曼波前传感器采集的光斑阵列

图像进行质心提取与波前复原。准直光源发射平行光,经过大小可调的光阑后,利用透过率不均匀的衰减片调制光束近场强度。经过强度调制的光束穿过线性偏振片产生偏振光进入液晶空间光调制器,由液晶空

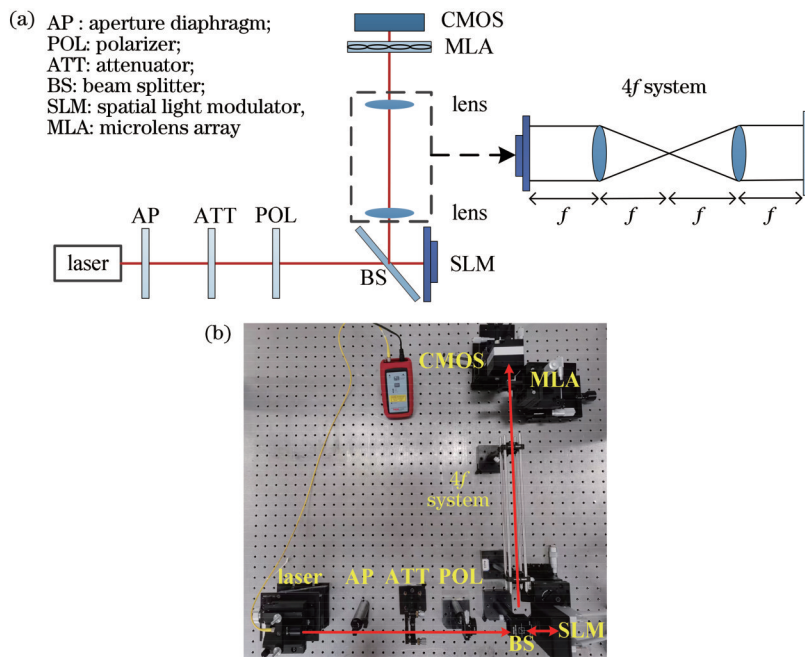


图 11 实验系统。(a)示意图;(b)实物图  
Fig. 11 Experimental system. (a) Schematic diagram; (b) physical map

间光调制器产生像差调制相位继而产生波前畸变。经过强度和相位调制后的光束通过分光镜经过 4f 系统将畸变相位共轭至微透镜阵列所在平面,被微透镜

阵列孔径分割并聚焦在互补金属氧化物半导体 (CMOS) 相机感光面上。实验装置主要技术参数如表 2 所示。

表 2 实验参数  
Table 2 Experimental parameters

Parameter	Wavelength /nm	Pixel size / $\mu\text{m}$	Number of sub-apertures	Target pixel	Number of effective sub-apertures	Focal length / cm
Value	635	6.4	16 $\times$ 16	992 $\times$ 992	192	4.23

CMOS 相机采集的光斑阵列图像如图 12(a) 所示,图像中信号和噪声混淆在一起。相比于理论仿真,实验采集的子光斑图像中泊松-高斯噪声和信号难以有效分离,实验中采用图 13 所示方法估计噪声大小,先对子孔径内灰度值进行从大到小排序,将子孔径主光斑区域以外的像素认为是噪声<sup>[5]</sup>。图 13(a) 为图 3 未添加噪声时任取一个子孔径的放大情况。图 13(b) 是对图 13(a) 所示的子孔径添加噪声后的图像,实线

方框图内为主光斑区域,假定主光斑外的像素为噪声,以估计其均值  $\mu_n$  和标准差  $\sigma_n$ ,利用式(6)得到每个子孔径内光斑的峰值信噪比。图 12(b) 给出了每个子孔径对应的峰值信噪比,由于入射光束的近场光强非均匀,故波前传感器不同子孔径内光斑图像的信噪比不同且存在低信噪比子孔径区域。在实验中,以信噪比极高时的质心估计结果  $(x_0, y_0)$  为标准质心位置,用于计算质心偏移误差。

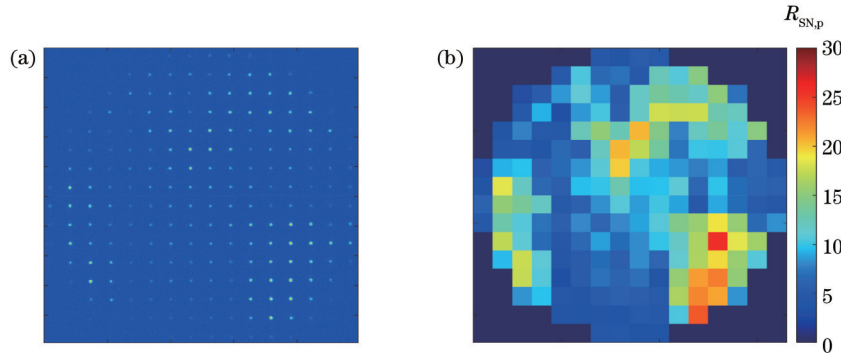


图 12 光束波前探测结果。(a) 采集的光斑阵列图像;(b) 各子孔径的峰值信噪比

Fig. 12 Detection results of beam wavefront. (a) Acquired spot array image; (b) peak signal-to-noise ratio of each sub-aperture

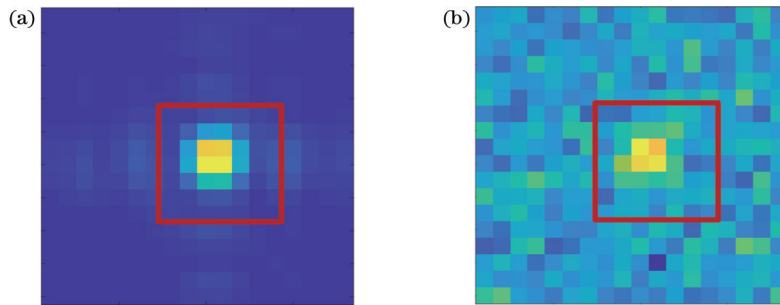


图 13 信噪比估计方法。(a) 单个清晰子光斑放大图;(b) 单个带噪声子光斑放大图

Fig. 13 Estimation method for signal-to-noise ratio. (a) Enlarged view of single clear sub-spot; (b) enlarged image of single noisy sub-spot

针对实际采集的光斑阵列图像,需要提前明确方差稳定变换的输入参数。噪声特性在短时间内不会发生变化,统计了图像像素值的方差,以图像的像素值为横轴,该像素值对应的方差为纵轴,如果像素-方差曲线为一条近似的直线,则该图像的噪声可以被认定是泊松-高斯分布,截距为高斯噪声的方差,斜率为泊松噪声的参数。当标准差大于 2 时,变换后的方差

稳定在理想值 1 左右,后期 BM3D 去噪的标准差输入参数即为 1<sup>[21-26]</sup>。分别采用 Tk 阈值质心法、加窗法、自适应阈值法、NLM、VSTBM3D、NFBM3D 6 种方法对图 12 的低信噪比光斑图像进行质心提取,图 14 给出了峰值信噪比在 3.5~13.5 范围内的子孔径通过不同方法提取质心的平均误差(质心探测误差)。可以看出,随着峰值信噪比的减小,除所提方法外的

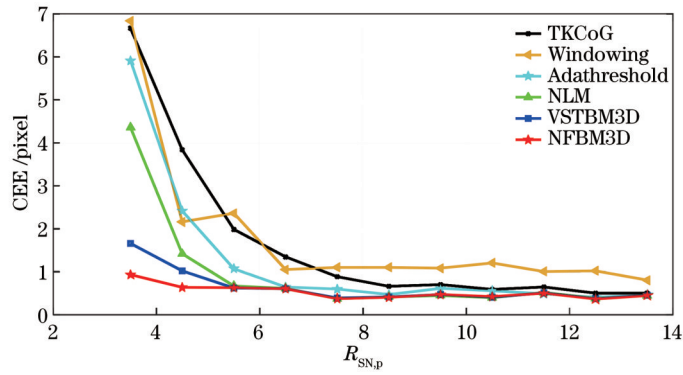


图 14 各方法的 CEE

Fig. 14 CEE of each method

5 种方法质心探测误差都明显增大,质心探测精度大幅降低尤其在峰值信噪比小于 7 的子孔径中自适应阈值法的质心的探测误差平均值为 2.1 pixel, Tk 阈值质心法的质心探测误差平均值为 2.2 pixel, 加窗法的质心探测误差平均值为 2.1 pixel, 所提方法的质心探测误差平均值为 0.35 pixel, 质心位置提取精度较自适应阈值法约提升了 4 倍, 并且提取效果稳定。

对图 12 所示的光斑阵列图像进行 Zernike 模式复原, 输入波前和 6 种质心提取算法得到的复原波前如

图 15 所示, 复原残差如图 16 所示, 并计算相应的峰谷 (PV) 值和 RMS 值。可以看出, 在图 12 所示的噪声水平和非均匀光强分布下, 所提的 NFBM3D 方法具备更高的波前复原精度。自适应阈值法复原残差的 PV 值和 RMS 值分别是  $0.9937\lambda$  和  $0.1077\lambda$ , 相比之下, 所提方法的复原误差减少了一半。VSTBM3D 去噪后复原残差的 PV 值和 RMS 值达到了  $0.7680\lambda$  和  $0.0652\lambda$ , 而改进算法去噪后复原残差的 PV 值和 RMS 值分别是  $0.3855\lambda$  和  $0.0430\lambda$ , 效果进一步提升了约 60%。

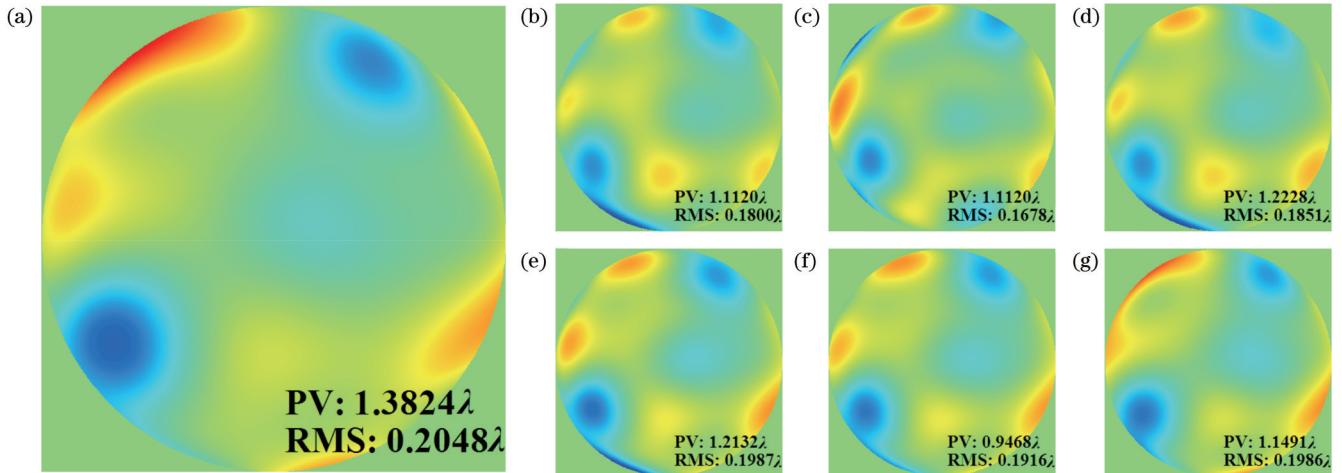


图 15 输入波前和采用不同质心提取方法时的复原波前。(a)输入波前;(b)TkCoG;(c) Windowing;(d) Adathreshold;(e) NLM;(f) VSTBM3D;(g) NFBM3D

Fig. 15 Input wavefront and recovery wavefronts obtained by different centroid extraction methods. (a) Input wavefront; (b) TkCoG; (c) Windowing; (d) Adathreshold; (e) NLM; (f) VSTBM3D; (g) NFBM3D

### 4 结 论

针对入射光束近场光强动态起伏时,夏克-哈特曼波前传感器低信噪比光斑阵列图像子光斑质心高精度提取的问题,提出了一种基于方差稳定变换的图像去噪与光斑质心提取算法。通过方差稳定变换将随信号变化的泊松-高斯噪声转换为方差固定的高斯噪声,结合改进的NFBM3D对光斑阵列图像进行高效去噪,得到低信噪比光斑阵列图像中的有效信号,再进行质心

提取和波前复原。与其他算法不同,所提方法无需根据光束近场强度与噪声分布变化而动态调整算法参数,对输入光束光强变化具有更强的适应性,更有助于算法在实际系统中的集成应用。通过仿真和实验证明,在子光斑图像峰值信噪比低于 6 时,所提方法的质心提取和波前复原精度较常规方法可提升 2 倍以上。加速处理是下一步的重点研究内容,所提算法的相似块寻找、匹配等部分经加速处理后,有望满足自适应光学系统质心提取实时性的要求,可应用于激光通信、激



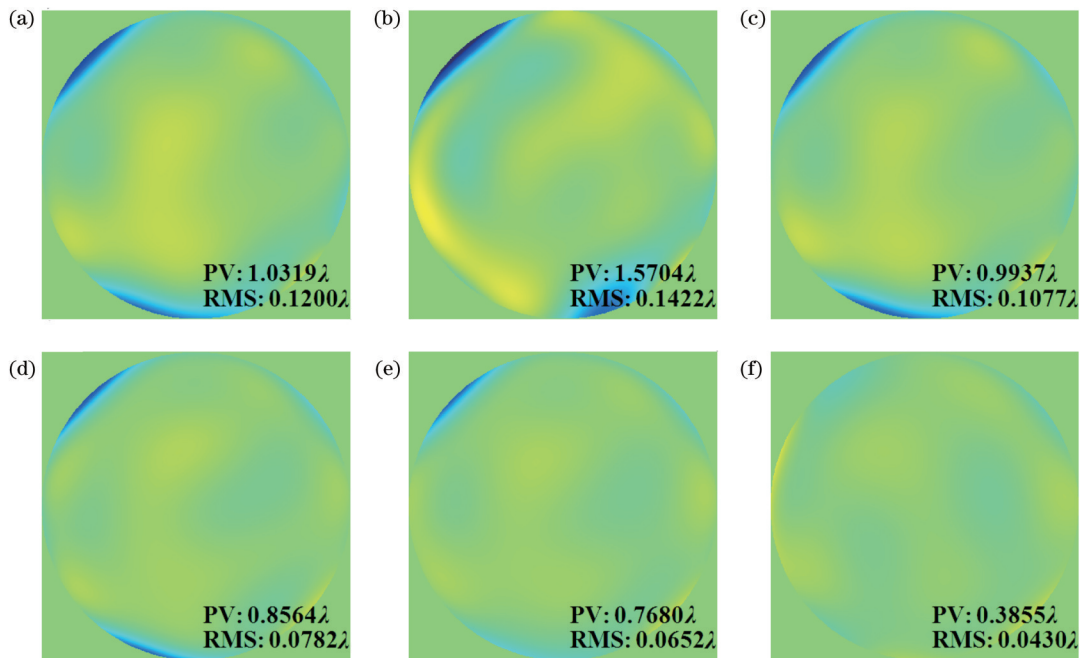


图 16 采用不同质心提取方法时的复原残差。(a) TkCoG; (b) Windowing; (c) Adathreshold; (d) NLM; (e) VSTBM3D; (f) NFBM3D

Fig. 16 Recovery residuals obtained by different centroid extraction methods. (a) TkCoG; (b) Windowing; (c) Adathreshold; (d) NLM; (e) VSTBM3D; (f) NFBM3D

光大气传输等领域的长距离、强湍流像差测量与校正中。

#### 参 考 文 献

- [1] Booth M J. Adaptive optical microscopy: the ongoing quest for a perfect image[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(4): e165.
- [2] Hardy J W. Adaptive optics for astronomical telescopes[M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [3] Hardy J W. Adaptive optics: a progress review[J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1542: 2-17.
- [4] 徐月, 刘超, 兰斌, 等. 自适应光学在星地激光通信中的研究进展[J/OL]. *激光与光电子学进展*: 1-17[2022-03-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20220713.1956.645.html>.  
Xu Y, Liu C, Lan B, et al. Progress of adaptive optics in satellite-to-ground laser communication [J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*: 1-17[2022-03-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20220713.1956.645.html>.
- [5] Yin X M, Li X, Zhao L P, et al. Automatic centroid detection for Shack-Hartmann wavefront sensor[C]//2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 14-17, 2009, Singapore. New York: IEEE Press, 2009: 1986-1991.
- [6] Marcelino G M, Schulz V H, Seman L O, et al. Centroid determination hardware algorithm for star trackers[J]. *International Journal of Sensor Networks*, 2020, 32(1): 1-14.
- [7] Clare R M, Weddell S J, Louarn M L. Centroiding of truncated Shack-Hartmann Laser Guide Star images with known reference images[C]//2019 International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ), December 2-4, 2019, Dunedin, New Zealand. New York: IEEE Press, 2019.
- [8] Thomas S, Fusco T, Tokovinin A, et al. Comparison of centroid computation algorithms in a Shack-Hartmann sensor[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2006, 371(1): 323-336.
- [9] Wheeler D J, Schmidt J D. Correlation-based Shack-Hartmann wavefront slope sensing in strong turbulence[C]//2010 IEEE Aerospace Conference, March 6-13, 2010, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2010.
- [10] Vyas A, Roopashree M B, Prasad B R. Performance of centroiding algorithms at low light level conditions in adaptive optics[EB/OL]. (2010-01-10) [2022-02-04]. <https://arxiv.org/abs/1001.1503>.
- [11] 魏平. 低信噪比条件下哈特曼波前传感器图像信号处理方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.  
Wei P. Research on image signal processing method of Hartmann wavefront sensor under low signal-to-noise ratio conditions[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [12] 王星星, 唐新明, 祝小勇, 等. 高分七号卫星足印光斑质心提取方法与稳定性监测[J]. *光学学报*, 2021, 41(24): 2428001.  
Wang X X, Tang X M, Zhu X Y, et al. Centroid extraction method of Gaofen-7 satellite footprint spots and stability monitoring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2428001.
- [13] 李旭旭. 低信噪比下点源目标哈特曼传感器的子光斑定位算法研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2018.  
Li X X. Research on subspots localization algorithms of point-source Shack-Hartmann sensor under low signal-to-noise ratio conditions[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [14] 李旭旭, 李新阳, 王彩霞. 哈特曼传感器子孔径光斑的局部自适应阈值分割方法[J]. *光电工程*, 2018, 45(10): 170699.  
Li X X, Li X Y, Wang C X. Local adaptive threshold segmentation method for subaperture spots of Shack-Hartmann sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(10): 170699.
- [15] 李自强. 基于深度学习的自适应光学波前传感技术[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2021.  
Li Z Q. Study on the wavefront sensing technology in adaptive optics based on deep learning[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [16] Guo Y M, Zhong L B, Min L, et al. Adaptive optics based on machine learning: a review[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2022,

- 5(7): 200082.
- [17] 张丽. 摄像机图像噪声分析及处理[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
Zhang L. Analysis and processing of the camera image noise[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [18] 徐凤. 图像去噪算法及噪声估计研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.  
Xu F. Study on image denoising algorithm and noise estimation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [19] 果实. 基于卷积神经网络的真实相机图像去噪的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
Guo S. Research on real-world camera photographs denoising based on convolutional neural network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [20] 徐焕宇, 徐萌兮, 余宇, 等. 自适应光学系统图像的梯度域点扩散函数估计与盲复原方法[J/OL]. 激光与光电子学进展:1-14 [2022-03-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20220713.1646.456.html>.  
Xu H Y, Xu M X, She Y, et al. Blind deconvolution of adaptive optics images using gradient domain point spread function estimation[J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress:1-14[2022-08-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20220713.1646.456.html>.
- [21] Foi A. Noise estimation and removal in MR imaging: the variance-stabilization approach[C]//2011 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Macro, March 30-April 2, 2011, Chicago, IL, USA. New York: IEEE Press, 2011: 1809-1814.
- [22] Makitalo M, Foi A. Optimal inversion of the generalized Anscombe transformation for Poisson-Gaussian noise[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(1): 91-103.
- [23] Makitalo M, Foi A. A closed-form approximation of the exact unbiased inverse of the Anscombe variance-stabilizing transformation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(9): 2697-2698.
- [24] Makitalo M, Foi A. Poisson-Gaussian denoising using the exact unbiased inverse of the generalized anscombe transformation [C]//2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, March 25-30, 2012, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2012: 1081-1084.
- [25] Azzari L, Foi A. Variance stabilization for noisy estimate combination in iterative Poisson denoising[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(8): 1086-1090.
- [26] Azzari L, Foi A. Variance stabilization in Poisson image deblurring[C]//2017 IEEE 14th International Symposium on Biomedical Imaging, April 18-21, 2017, Melbourne, VIC, Australia. New York: IEEE Press, 2017: 728-731.
- [27] Dabov K, Foi A, Katkovnik V, et al. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(8): 2080-2095.
- [28] 陈朋, 蔡焯伟, 赵冬冬, 等. 基于自适应BM3D的侧扫声纳图像散斑降噪[J]. 光电工程, 2020, 47(7): 190580.  
Chen P, Cai X W, Zhao D D, et al. Despeckling for side-scan sonar images based on adaptive block-matching and 3D filtering [J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(7): 190580.
- [29] 魏平, 李新阳, 罗曦, 等. 部分子孔径缺光对夏克-哈特曼波前传感器波前复原的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0409002.  
Wei P, Li X Y, Luo X, et al. Influence of lack of light in partial subapertures on wavefront reconstruction for Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0409002.
- [30] 张强, 姜文汉, 许冰. 利用Zernike多项式对湍流波前进行波前重构[J]. 光电工程, 1998, 25(6): 15-19.  
Zhang Q, Jiang W H, Xu B. Reconstruction of turbulent optical wavefront realized by Zernike polynomial[J]. Opto-Electronic Engineering, 1998, 25(6): 15-19.
- [31] 张雨东, 饶长辉, 李新阳. 自适应光学及激光操控[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.  
Zhang Y D, Rao C H, Li X Y. Adaptive optics and laser control [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.

## Sub-Spot Centroid Extraction Algorithm Based on Noise Model Transformation

Chen Chunlu<sup>1,2,3</sup>, Zhao Wang<sup>1,2\*\*</sup>, Zhao Mengmeng<sup>1,2,3</sup>, Wang Shuai<sup>1,2\*</sup>, Zhao Chensi<sup>1,2,3</sup>,  
Yang Kangjian<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

**Objective** The Shack-Hartmann wavefront sensor is widely used due to its advantages of simple structure, high utilization rate of light energy, and fast detection speed. In practical application scenarios, affected by factors such as skylight background, atmospheric turbulence intensity, return characteristics of beacon light, detector noise, etc., the spot array images collected by the Shack-Hartmann wavefront sensor often have uneven sub-aperture spot intensity distributions, with low signal-to-noise ratios (SNR). In this case, it is difficult to accurately extract the centroid of a light spot, and the detection accuracy of the wavefront decreases. To solve the localization problem of the sub-spots of spot array images with a low SNR, researchers have proposed several improved methods, such as the thresholding centroid method, weighted centroid method, intensity weighted centroid method, cross-correlation algorithm, frequency domain method, local adaptive threshold method, windowed thresholding centroid method, and windowed thresholding weighted centroid method. However, when the near-field light intensity of the beam to be measured fluctuates dynamically, and the

detector noise, image background noise, and other interfering noise signals change dynamically, the effective optical signal and noise signal of a spot array image fluctuate in time and space. When the spot centroid is selected, the algorithm parameters need to be dynamically adjusted to ensure the centroid extraction accuracy of the sub-spot. This algorithm mechanism significantly increases the complexity of the centroid extraction algorithm, and there are also problems with optimal parameter selection and dynamic setting, which will eventually lead to a decrease in the wavefront restoration accuracy of the sensor. The efficient centroid extraction of the sub-spot when the near-field intensity of the incident beam dynamically fluctuates requires a centroid localization method for the low-SNR sub-spot image collected by the Shack-Hartmann wavefront sensor with high adaptability.

**Methods** When the wavefront sensor collects the sub-spot image, the detector introduces signal photon noise, background photon noise and readout noise, etc., due to factors such as the environment and the quantum characteristics of the photodetector. According to the characteristics of detection noise, photodetector noise is generally represented by a Poisson-Gaussian model. In this model, the signal-related noise introduced by the quantum characteristics of the sensor is modeled by Poisson distribution, and the signal-independent noise is modeled by Gaussian distribution. According to the signal characteristics and noise characteristics of the photodetector, this paper proposes a method to extract the centroid of a sub-spot based on variance-stabilizing transformation (VST). It converts the Poisson-Gaussian noise that varies with the signal into Gaussian noise with a fixed variance. An improved block-matching and 3D filtering (BM3D) method, i. e., noise feedback block-matching and 3D collaborative filtering (NFBM3D), is used to remove the noise of the spot array image, and then sub-spot centroid extraction and wavefront restoration are performed.

**Results and Discussions** The method can effectively remove the noise of the spot array image and adapt to the change in light intensity. It does not need to dynamically adjust the parameters of the localization algorithm or train the centroid extraction model of the low-SNR sub-spot in advance according to the fluctuation characteristics of light intensity, which has the advantages of simple implementation, strong adaptability, and good robustness. The centroid localization accuracies and wavefront restoration errors of multiple sub-spot images in a single frame of sub-spot images and different near-field fluctuations (Figs. 5–10) are compared, and experiments confirm that the centroid detection error of the method in this paper is improved by more than 2 times, and the wavefront restoration residual is controlled below  $0.045\lambda$  (Figs. 14–16).

**Conclusions** Through simulation and experiments, it is confirmed that the method proposed in this paper can effectively extract the light spot signal data in the low-SNR spot array image collected by the Shack-Hartmann wavefront sensor. It can avoid noise interference in the image and fully improve the centroid localization accuracy and stability of the sub-aperture spot. Compared with the traditional adaptive threshold and other methods, this method can improve the centroid extraction and wavefront restoration accuracy by more than 2 times when the peak SNR of the sub-spot image is lower than 6. This algorithm is expected to meet the real-time requirements of the centroid extraction of the adaptive optics system after the accelerated processing of similar and fast search and matching.

**Key words** measurement; adaptive optics; centroid extraction; variance-stabilizing transformation; improved denoising algorithm; wavefront restoration