

点光源哈特曼最优阈值估计方法研究

周睿 魏凌 李新阳 王彩霞 李梅 沈锋

Shack-Hartmann optimum threshold estimation for the point source

Zhou Rui Wei Ling Li Xin-Yang Wang Cai-Xia Li Mei Shen Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 090701 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.090701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.090701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光纤微结构加工和敏感材料物理融合的光纤传感技术

Optical fiber sensing technologies based on femtosecond laser micromachining and sensitive films

物理学报.2017, 66(7): 070703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070703>

光纤法布里-珀罗干涉温度压力传感技术研究进展

Research progress of in-fiber Fabry-Perot interferometric temperature and pressure sensors

物理学报.2017, 66(7): 070708 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070708>

啁啾相移光纤光栅分布式应变与应变点精确定位传感研究

Phase shift chirped fiber Bragg grating based distributed strain and position sensing

物理学报.2017, 66(7): 070702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070702>

单模光纤中用声波导布里渊散射同时测量温度和应变

Simultaneous measurement on strain and temperature via guided acoustic-wave Brillouin scattering in single mode fibers

物理学报.2016, 65(24): 240702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.240702>

基于椭圆腔共振的石英增强光声光谱理论研究

Theoretical research on quartz enhanced photoacoustic spectroscopy base on the resonance in an elliptical cavity

物理学报.2016, 65(19): 190701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.190701>

点光源哈特曼最优阈值估计方法研究

周睿^{1)2)3)†} 魏凌¹⁾²⁾ 李新阳¹⁾²⁾ 王彩霞¹⁾²⁾ 李梅¹⁾²⁾ 沈锋¹⁾²⁾

1)(中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

2)(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

3)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2016年11月8日收到; 2017年2月4日收到修改稿)

针对夏克-哈特曼波前传感器探测系统中噪声随时间及空间变化频率较快的特点, 为了准确估计系统的最优阈值, 根据高斯光斑与噪声的分布特性, 提出一种以滑动窗口内像素均值及图像信号的局部梯度作为参数, 构造关于噪声权重函数的方法, 由此获得子孔径阈值的最优估计值, 并详细分析了算法的基本原理和实现过程. 以典型处理方法获取的阈值与理论最优阈值的误差作为评价标准, 仿真和实验结果表明本文提出的阈值估计方法在不同信噪比、不同光斑大小的条件下, 均能取得优于典型阈值处理方法获得的结果, 且与理论最优阈值的误差小于10%.

关键词: 夏克-哈特曼波前传感器, 高斯光斑, 最优阈值, 权重函数

PACS: 07.07.Df, 05.40.Ca, 42.25.Bs, 95.75.Qr

DOI: 10.7498/aps.66.090701

1 引言

夏克-哈特曼波前传感器(SHWFS)是一种基于波前斜率测量的光学检测装置, 因其具有结构简单、环境适应能力强、实时性强等优点, 广泛应用于自适应光学、激光波前检验、生物光学、光学检测和装调等领域^[1]. SHWFS主要由微透镜阵列和电荷耦合器件(CCD)探测器组成, 利用微透镜阵列对输入光束进行分割采样, 每个透镜作为一个子孔径, 将光束聚焦成一个光斑阵列, 子孔径范围内的波前畸变将造成光斑的位置偏移, SHWFS对输入波前的测量精度主要取决于各个子孔径光斑中心位置的提取精度^[2-4]. 光斑中心位置提取的算法有很多种, 包括一阶矩法、高斯拟合法、权重法、相关法等, 其中一阶矩法由于算法简单, 鲁棒性强, 精度较高而被广泛使用. 一阶矩法以光斑强度为权重, 计算区域内所有像素对光斑质心的贡献, 直接得到强度分布与空间平均相位的关系^[5].

然而一阶矩法对系统噪声比较敏感, 为了提高一阶矩法质心提取精度, 通常需要对CCD的读出信号进行预处理^[6,7]. 在预处理的方法中, 阈值处理的方法由于能够快速去除噪声的影响而受到广泛的关注^[8]. 文献^[9]指出, 根据SHWFS的特点和噪声分布特性, 存在一个最优阈值, 使得质心的探测误差最小; 同时推导了最优阈值等于噪声的均值与噪声的3倍标准差之和. 然而在实际工作过程中, 由于SHWFS系统中有效信号和噪声很难被区分, 因此最优阈值难以实时地准确估计.

目前, 获取SHWFS阈值的方法通常有基于灰度直方图统计的经验值法、迭代法、最大类间方差(Ostu)法、基于图像局部特征的阈值方法等. 文献^[10]提出的基于灰度直方图统计的经验值法, 仅适用于噪声随时间、空间频率变化缓慢的情况, 对于背景随时间、空间频率变化比较剧烈且需要对SHWFS的采样数据实时闭环的场景不适合. 文献^[11]指出, Ostu法在信号相对面积占图像总面积

† 通信作者. E-mail: zhourui@ioe.ac.cn

达到30%以上时其分割性能接近最优值. 然而, 通常情况下 SHWFS 波前探测系统有效信号的面积小于图像总面积的 20%, 采用这种方法得到的阈值偏大, 从而影响质心计算的精度. 文献 [12, 13] 提出使用最大值的百分比作为阈值, 但是由于百分比的确定与探测系统的信噪比 (SNR) 有关, 在实际系统中, 难以实现对百分比的优化. 文献 [14] 提出, 根据 SHWFS 的特点, 利用探测靶面的四个边角区域估计噪声的均值和方差, 这种方法只适用于背景噪声空间分布比较均匀的情况, 对于背景空间分布不均匀的场合, 这种为所有子孔径设置同一阈值的方法不适用.

本文针对 SHWFS 系统中光斑及噪声分布的特点, 通过求取子孔径滑动窗口内像素均值及信号的局部梯度方向, 构造噪声权重函数的方法对最优阈值进行估计, 对该算法进行了仿真和实验, 并将该算法得到的阈值与典型处理方法得到的阈值进行了对比和分析. 结果表明, 本文提出的方法与典型方法相比, 能够得到更接近理论最优阈值的结果, 从而有效地提高了 SHWFS 质心探测精度.

2 最优阈值估计方法分析

在 SHWFS 探测波前相位畸变时, 采用孔径分割的方法, 将相位面分割为多个子孔径, 探测子孔径的平均斜率来重构相位. 通常子孔径内的光斑强度可以用高斯函数来拟合 [15], 其表达式为

$$G(x, y) = A \exp \left\{ - \left[\frac{(x - x_c)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y - y_c)^2}{2\sigma_y^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

其中 A 为高斯光斑的幅值; $x_c, y_c, \sigma_x, \sigma_y$ 分别为光斑 x, y 方向的中心位置及 x, y 方向的光斑宽度. 由于 SHWFS 光斑的强度呈高斯分布且面积较小, 其像素灰度值比较集中、分散性小, 而噪声一般可认为是高斯白噪声, 典型 SHWFS 光斑沿 x 轴的剖面如图 1 所示. 根据噪声和光斑的分布特性, 由噪声区域对应的窗口 (i) 和有效光斑区域对应的窗口 (ii) 可以看出, 随着滑动窗口逐渐靠近有效光斑的中心位置, 对应窗口内像素拟合曲线与 x 轴的夹角、窗口内像素均值均呈现单调增长的趋势, 即像素属于噪声的概率与滑动窗口内像素拟合曲线与 x 轴夹角及窗口内像素均值成反比.

同样, 利用上述分析方法, 可以对二维 SHWFS 光斑进行二维滑动窗口的处理, 对二维滑动窗口内像素求取局部梯度方向, 具体做法是对窗口内的像素信号进行平面拟合, 从而得到其拟合平面法线方程与 z 轴的夹角, 其数学过程可以表达为

$$a_{i,j}X + b_{i,j}Y + Z + d_{i,j} = 0, \quad (2)$$

其中 X, Y 为光斑在滑动窗口内的坐标位置, Z 为光斑强度信息, $(a_{i,j}, b_{i,j}, d_{i,j})^T$ 为需要求取的拟合平面法向量方程的参数, 其矩阵乘法表达式为

$$(X, Y, 1)(a_{i,j}, b_{i,j}, d_{i,j})^T = -Z. \quad (3)$$

以滑动窗口为 3×3 为例, 可以得到

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} a_{i,j} \\ b_{i,j} \\ d_{i,j} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} I_{i-1,j-1} \cdots I_{i,j} \cdots I_{i+1,j+1} \end{bmatrix}^T, \quad (4)$$

即

$$Mv = -Z, \quad v = -M^+Z, \quad (5)$$

其中 M, v, Z 分别为滑动窗口内坐标位置组成的矩阵、待拟合平面的法向量及窗口内像素的强度向量; M^+ 为 M 的伪逆. 对于 3×3 的窗口, 可以得到

$$M^+ = \begin{bmatrix} -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} \\ -\frac{1}{6} & 0 & \frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & 0 & \frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & 0 & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

因此, 滑动窗口内各像素拟合平面的法向量可以表达为如下的卷积形式, 其中 \otimes 表示卷积:

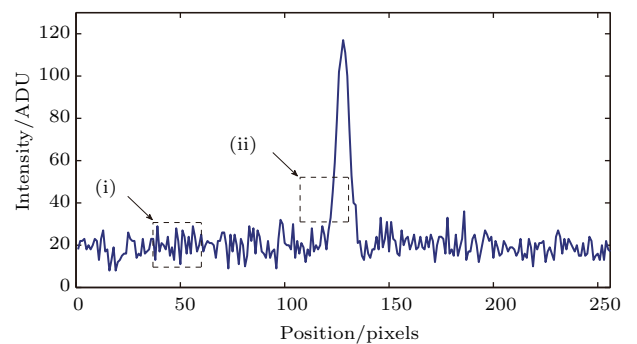


图 1 典型高斯光斑 x 轴剖面图

Fig. 1. The x axis profile of tradition SHWFS spot.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{i-1,j-1} & a_{i,j-1} & a_{i+1,j-1} \\ a_{i-1,j} & a_{i,j} & a_{i+1,j} \\ a_{i-1,j+1} & a_{i,j+1} & a_{i+1,j+1} \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} I_{i-1,j-1} & I_{i,j-1} & I_{i+1,j-1} \\ I_{i-1,j} & I_{i,j} & I_{i+1,j} \\ I_{i-1,j+1} & I_{i,j+1} & I_{i+1,j+1} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{i-1,j-1} & b_{i,j-1} & b_{i+1,j-1} \\ b_{i-1,j} & b_{i,j} & b_{i+1,j} \\ b_{i-1,j+1} & b_{i,j+1} & b_{i+1,j+1} \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} I_{i-1,j-1} & I_{i,j-1} & I_{i+1,j-1} \\ I_{i-1,j} & I_{i,j} & I_{i+1,j} \\ I_{i-1,j+1} & I_{i,j+1} & I_{i+1,j+1} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{i-1,j-1} & d_{i,j-1} & d_{i+1,j-1} \\ d_{i-1,j} & d_{i,j} & d_{i+1,j} \\ d_{i-1,j+1} & d_{i,j+1} & d_{i+1,j+1} \end{bmatrix} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} I_{i-1,j-1} & I_{i,j-1} & I_{i+1,j-1} \\ I_{i-1,j} & I_{i,j} & I_{i+1,j} \\ I_{i-1,j+1} & I_{i,j+1} & I_{i+1,j+1} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

由此,可以得到子孔径内各像素拟合平面法向量与 z 轴的夹角,即局部梯度方向可以表示为

$$\theta_{i,j} = \arccos \frac{1}{\sqrt{a_{i,j}^2 + b_{i,j}^2 + 1}}. \quad (10)$$

同时,由前述分析可知,像素属于有效光斑的概率不仅与滑动窗口内像素拟合曲线与 x 轴的夹角有关,也与窗口内像素均值有关,滑动窗口内像素均值可以表示为(11)式,其归一化的均值可以表示为(12)式:

$$\mu_{i,j} = \frac{\sum_{\text{windows}} I_{i,j}}{n \times n}, \quad (11)$$

$$\mu'_{i,j} = \frac{\mu_{i,j}}{\max(\mu_{i,j})}. \quad (12)$$

由此,像素属于噪声的概率 $P_{i,j}$ 可以表示为 $\theta_{i,j}, \mu'_{i,j}$ 的权重函数,即

$$P_{i,j} = f(\theta_{i,j}, \mu'_{i,j}), \quad (13)$$

其中 $\theta_{i,j} \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$, 同时函数 f 应满足关于 $\theta_{i,j}, \mu'_{i,j}$ 单调递减. 为了简化计算,可以取如(14)式所示的像素隶属于噪声的权重函数,

$$f(\theta, \mu) = \frac{1}{\mu'} \cos \theta. \quad (14)$$

在上述分析的基础上,根据(13)式可得子孔径内所有像素的概率,从而得到基于滑动窗口统计的噪声均值如(15)式:

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_{\text{sub-aper}} P_{i,j} d_{i,j}}{\sum_{\text{sub-aper}} P_{i,j}}. \quad (15)$$

同时,为了有效估计噪声的标准差,需要将滑动窗口投影到 x, y 平面以便实现对有效高斯光斑

区域的噪声标准差的估计,如(16)式所示,其中 Z' 表示去除倾斜后的光强:

$$Z' = (MM^+ - I)Z. \quad (16)$$

由此,可以求得去除倾斜后滑动窗口中心像素的标准差估计如(17)式所示,其中 $I'_{i,j}, \bar{I}'$ 分别为去除倾斜后滑动窗口各个像素的灰度值和均值,

$$\hat{\sigma}_{i,j} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{\text{sub-aper}} (I'_{i,j} - \bar{I}')^2}, \quad (17)$$

因此,可以得到子孔径内关于噪声标准差的估计如下:

$$\hat{\sigma} = \frac{\sum_{\text{sub-aper}} P_{i,j} \hat{\sigma}_{i,j}}{\sum_{\text{sub-aper}} P_{i,j}}. \quad (18)$$

根据上述分析,由(15)和(18)式得到了子孔径内关于噪声的均值与标准差的估计值,从而可以得到子孔径内最优阈值的估计为

$$\hat{T} = \hat{\mu} + 3\hat{\sigma}. \quad (19)$$

3 仿真计算及分析

为了验证基于滑动窗口投影最优阈值估计方法的有效性,本节针对该方法与迭代阈值法、最大值百分比阈值法及Ostu法求得的阈值与理论最优阈值进行了对比分析.其中迭代阈值法设定图像最大、最小灰度值的平均数为初始阈值 T_0 , 阈值 $T(i)$ 将图像分为前景和背景, u, v 分别为前景和背景的平均灰度等级,取 $T(i+1) = (u+v)/2$, 当迭代到 $T(i+1) = T(i)$ 时停止,取该值为子孔径内图像的阈值;最大值百分比阈值法设定子孔径内图像最大

值的百分比作为阈值, 根据文献 [12, 13] 通常选择最大值的 30%; Ostu 法将图像分为背景和目标两类, 使得两类之间的方差最大, 从而求得阈值。

为了便于分析和比较在不同光斑大小、不同高斯光斑中心强度及不同噪声水平情况下几种阈值处理方法结果与理论最优阈值的接近程度, 可以将 SNR 定义为高斯光斑的能量与噪声标准差的比值, 其表达式如下:

$$SNR = 10 \log \frac{\text{total energy of signal}}{\text{std of noise}}. \quad (20)$$

同时为了评价不同方法得到的阈值与理论最优阈值的接近程度, 定义如下式所示的性能指标来衡量各种阈值处理方法的效果,

$$E = |(\hat{T} - T)/T| \times 100\%, \quad (21)$$

其中 \hat{T} 表示利用各种阈值处理方法得到的阈值估计, T 表示理论的最优阈值。

根据 (1) 式定义的高斯光斑, 针对子孔径尺寸为 $24 \text{ pixels} \times 24 \text{ pixels}$, 高斯光斑的半径从 0.5 pixels 到 3 pixels 变化, 分别利用高斯光斑能量保持不变、改变噪声水平的方法和噪声水平不变、改变高斯光斑能量的方法, 在不同 SNR 条件下, 将典型阈值处理方法与本文提出的方法进行了比较和分析。如 (20) 式所示, 随着 SNR 的增加, 被测光斑的质量逐渐改善。仿真过程中的典型光斑如图 2 所示, 其中图 2(a) 表示在 $SNR = 16.73 \text{ dB}$ 条件下光斑和噪声强度的分布情况, 图 2(b) 表示受噪声影响光斑强度的三维分布情况。

当滑动窗口大小为 $3 \text{ pixels} \times 3 \text{ pixels}$ 时, 保持噪声水平不变, 通过调整高斯光斑能量的方法改变 SNR, 将本文提出的最优阈值估计法、迭代阈值法、

最大值百分比阈值法及 Ostu 法的结果与理论最优阈值进行比较, 结果如图 3 所示。其中图 3(a)—(d) 表示光斑的半径 $\sigma_A = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 \text{ pixels}$ 条件下的仿真结果。从图 3 可以看出: 在 4 种不同高斯光斑大小条件下, 当 SNR 较高时, 典型阈值处理方法得到的阈值约为最优阈值的 2—10 倍, 远远高于理论的最优阈值; 并且光斑半径越小, 使用典型阈值处理方法得到的阈值偏离理论最优阈值的幅度越大; 随着 SNR 的降低, 典型阈值处理方法得到的阈值偏离理论最优阈值的程度有所降低, 但与理论的最优阈值相比, 仍有较大误差; 在 SNR 较低的情况下, 典型阈值处理方法得到的阈值会小于理论的最优阈值, 并且光斑半径越大, 使用典型阈值处理方法得到的阈值偏离理论最优阈值的幅度越大, 最大偏差约是理论最优阈值的 $1/2$, 因此不能有效抑制噪声信号; 然而, 在不同的光斑大小及 SNR 条件下, 本文提出的阈值估计方法的结果与理论最优阈值的误差均能保持在 10% 以内, 且在各种光斑半径下一致性较好, 明显优于典型阈值处理方法。

图 4 显示了在滑动窗口大小为 $3 \text{ pixels} \times 3 \text{ pixels}$, 保持高斯光斑能量不变, 通过调整噪声水平的方法改变 SNR 时, 本文提出的最优阈值估计法与典型阈值处理方法进行比较的结果。从图 4 结果可以得到与图 3 相同的结论: 在 SNR 较好的情况下, 典型阈值处理方法得到的阈值远远高于理论的最优阈值, 在 SNR 较低的情况下, 典型阈值处理方法得到的阈值低于理论的最优阈值; 而本文提出的方法能够在不同 SNR 条件下, 对 4 种高斯半径光斑得到的最优阈值与理论最优阈值的误差范围保持在 10% 以内。

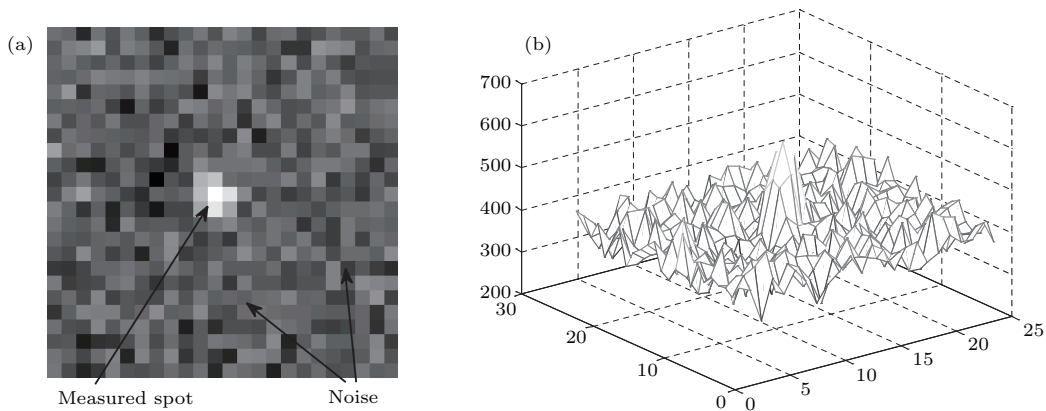


图 2 (a) $SNR = 16.73 \text{ dB}$ 时包含背景噪声的光斑图像; (b) $SNR = 16.73 \text{ dB}$ 时包含背景噪声的光斑图像的三维显示
Fig. 2. (a) Spot image with background noise ($SNR = 16.73 \text{ dB}$); (b) the three-dimensional show of the spot image with background noise ($SNR = 16.73 \text{ dB}$).

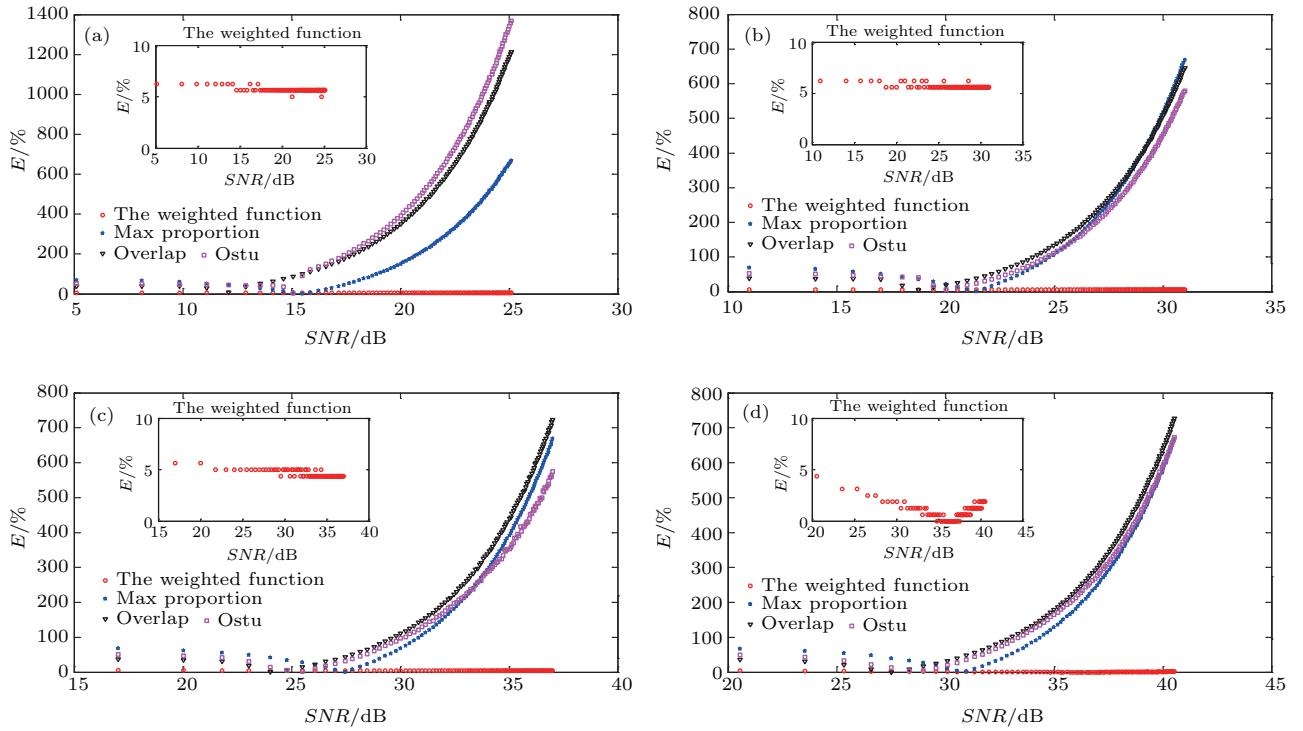


图3 (网刊彩色) 噪声水平不变, 不同高斯光斑强度条件下各种阈值估计方法得到的阈值与理论最优阈值的误差 (a) $\sigma_A = 0.5$; (b) $\sigma_A = 1.0$; (c) $\sigma_A = 2.0$; (d) $\sigma_A = 3.0$

Fig. 3. (color online) The error between the theoretic threshold and the threshold obtained by different methods with the invariable noise level and the different spot energies: (a) $\sigma_A = 0.5$; (b) $\sigma_A = 1.0$; (c) $\sigma_A = 2.0$; (d) $\sigma_A = 3.0$.

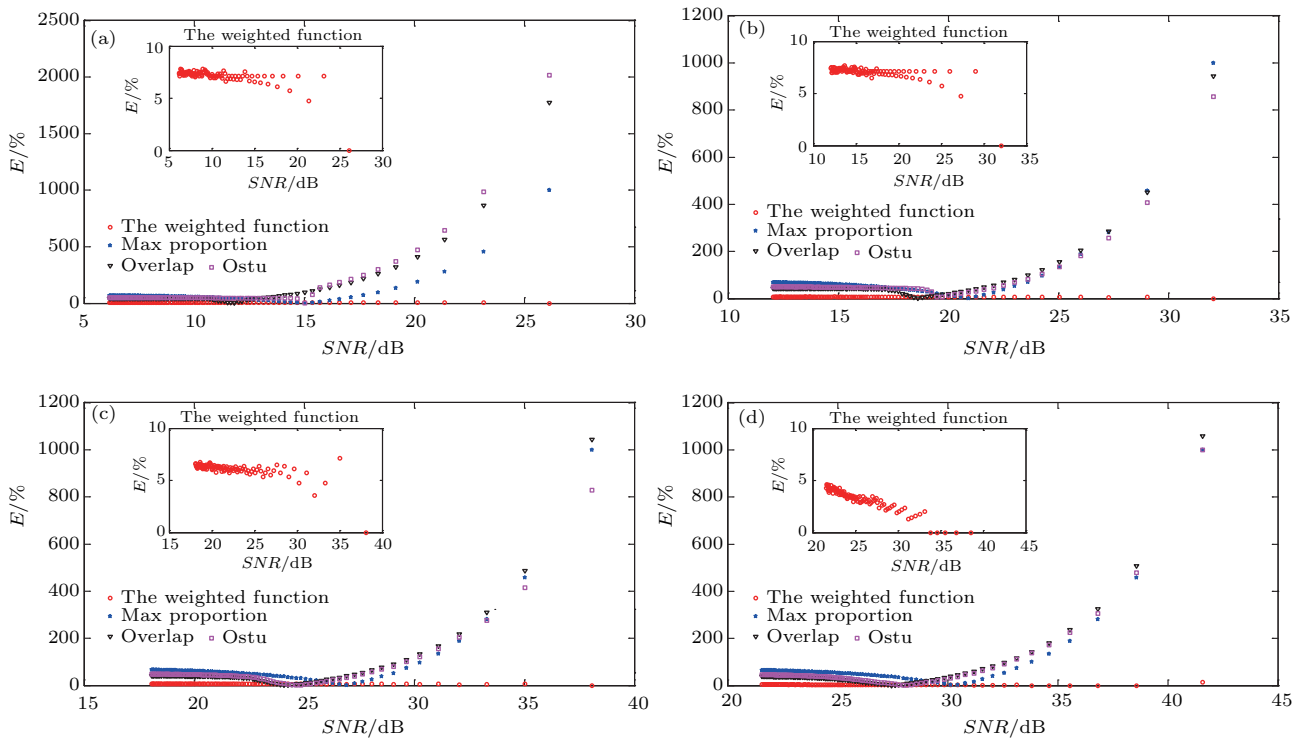


图4 (网刊彩色) 高斯光斑能量不变, 不同噪声水平条件下各种阈值估计方法得到的阈值与理论最优阈值的误差 (a) $\sigma_A = 0.5$; (b) $\sigma_A = 1.0$; (c) $\sigma_A = 2.0$; (d) $\sigma_A = 3.0$

Fig. 4. (color online) The error between the theoretic threshold and the threshold obtained by different methods with the invariable spot energy and the different noise levels: (a) $\sigma_A = 0.5$; (b) $\sigma_A = 1.0$; (c) $\sigma_A = 2.0$; (d) $\sigma_A = 3.0$.

从上述仿真和分析可以看出, 在高斯光斑强度或噪声水平发生变化引起SNR发生改变时, 本文提出的最优阈值估计方法与典型阈值处理方法相比, 均能够较为准确地得到噪声的理论最优阈值. 同时, 本文也对不同滑动窗口大小情况下, 噪声权重函数中 μ' 和 $\cos\theta$ 取不同的幂指数进行了仿真和分析, 均能获得与图3和图4相类似的结论.

4 实验结果

为了验证本文提出的最优阈值估计算法的效果, 建立了如图5所示的实验系统. 该实验系统主要包括激光器、由微透镜阵列和CCD探测器组成的SHWFS及计算处理模块3个部分. 其中激光器采用波长 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 的电流可调节的激光器, SHWFS采用方形排布 8×8 的微透镜阵列, 单个微透镜的口径为 2.667 mm , 焦距为 77 mm , SHWFS使用的CCD探测器靶面大小为 $240 \text{ pixels} \times 240 \text{ pixels}$, 每个子孔径大小为 $24 \text{ pixels} \times 24 \text{ pixels}$, 像元尺寸为 $24 \mu\text{m}$, 探测器位数为14位. SHWFS获取的典型的 8×8 (其中有效子孔径数为48) 的子光斑图像阵列如图6(a)所示, 利用本文提出的最优阈值估计方法处理后的子光斑图像阵列如图6(b), 各个子孔径的SNR如图6(c)所示. 由图6(b)和图6(c)可以看出, 在各子孔径内SNR从10—25 dB大范围波动的情况下, 利用本文提出的方法依然能够有效地去除各个子孔径内的噪声.

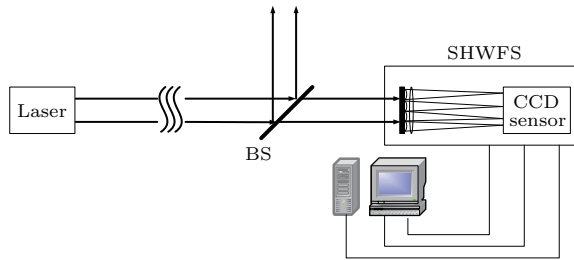


图5 实验装置示意图
Fig. 5. The schematic diagram of experiment Setup.

针对如图5所示的SHWFS系统, 根据文献[8, 16]在光子噪声可以被忽略的情况下, 将背景噪声、读出噪声、杂散光噪声等信号统一地看作是系统的探测噪声, 并且该噪声服从高斯分布. 首先在关闭激光器的状态下, 获取SHWFS系统的噪声图像信息, 通过多帧平均的方法获得相对准确的噪声均值和标准差; 在实验过程中探测器的增益、曝光时间以及实验环境等条件均保持一致. 因

此, 可以认为噪声的均值和标准差基本保持不变, 即理论最优阈值保持不变, 根据(19)式可以得到该实验条件下的理论最优阈值为410 ADU; 然后通过调节激光器电流的方法改变有效信号的能量, 从而得到受噪声影响的图像信号. 对SHWFS系统采集的图像信号, 分别利用本文提出的方法、迭代阈值法、最大值百分比阈值法及Ostu法求得阈值, 并与理论最优阈值进行了对比分析, 4种方法结果与理论最优阈值的误差曲线如图7所示; 表1显示了4种方法在不同SNR条件下得到的计算结果. 由图7和表1可以看出, 与典型阈值处理方法相比,

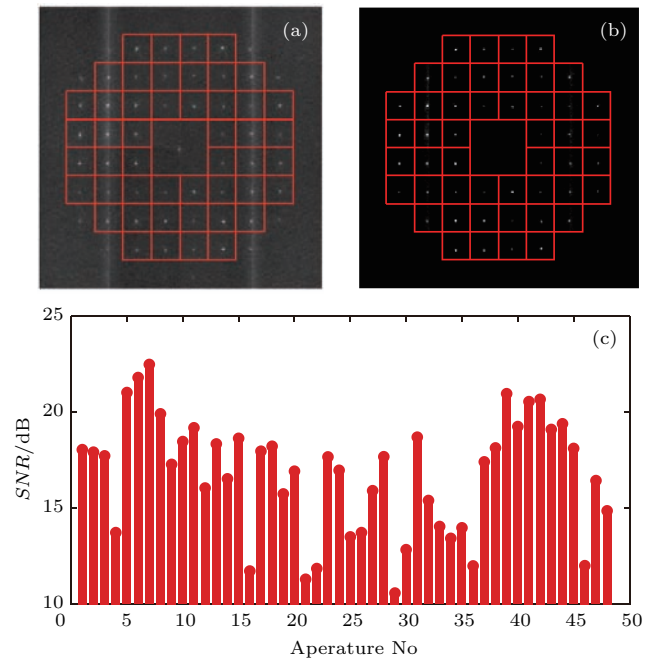


图6 (a) 处理前的SHWFS典型图像; (b) 处理后的SHWFS图像; (c) 各个孔径光斑图像的SNR

Fig. 6. (a) The image in the SHWFS before processed; (b) the image in the SHWFS after processed using the presented method; (c) the SNR of all the apertures.

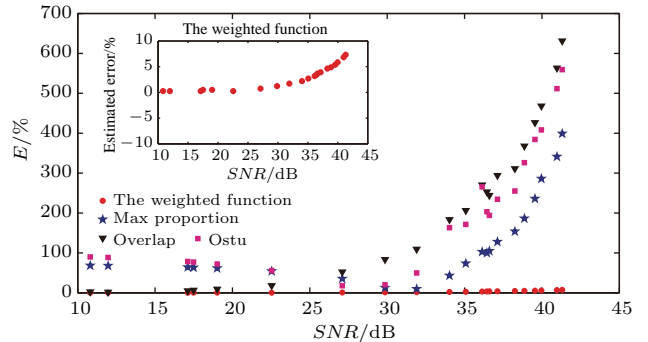


图7 (网刊彩色) 实验条件下各种阈值估计方法与理论最优阈值的误差

Fig. 7. (color online) The error between the theoretic threshold and the threshold obtained by different methods.

表1 不同SNR条件下各种方法对应的估计阈值比较(单位: ADU)
Table 1. The estimated threshold using the different methods with the different SNR (unit : ADU).

阈值估计方法	SNR/dB									
	41.31	39.96	38.86	37.13	36.44	35.08	31.90	27.10	19.02	11.97
百分比	2046	1583	1174	934	820	712	450	265	157	132
迭代法	2998	2329	1918	1616	1447	1256	858	624	448	403
Ostu	2703	2084	1747	1371	1243	1113	614	337	114	47
本文方法	440	434	430	426	424	421	417	413	412	411

利用本文提出的最优阈值估计方法得到的阈值能获得更高精度最优阈值的估计值, 在各种SNR条件下, 与理论最优阈值的误差均小于10%, 为高精度的质心计算提供了一种较好的阈值处理方法.

5 结 论

本文针对SHWFS探测系统中, 子孔径光斑呈现高斯分布、噪声随时间变化比较快且空间分布不均匀的特点, 提出了一种利用滑动窗口均值、滑动窗口内像素局部梯度方, 即像素与 $x-y$ 平面夹角作为参数, 构造噪声权重函数的最优阈值估计方法. 比较了这种方法以及迭代阈值法、最大值百分比阈值法和Ostu法等典型的阈值处理方法结果与理论最优阈值的误差. 仿真和实验结果表明, 与典型的阈值处理方法相比, 本文提出的方法能够得到更高精度最优阈值的估计值, 并且在各种SNR条件下与理论最优阈值保持小于10%的误差.

参考文献

- [1] Li J, Gong Y, Hu X R, Li C C 2014 *Chin. J. Laser* **41** 0316002 (in Chinese) [李晶, 巩岩, 呼新荣, 李春才 2014 中国激光 **41** 0316002]
- [2] Baik S H, Park S K, Kim C J, Cha B 2007 *Opt. Laser Technol.* **39** 262
- [3] Zhu Z Y, Li D Y, Hu L F, Mu Q Q, Yang C L, Cao Z L, Xuan L 2016 *Chin. Phys. B* **25** 090702
- [4] Gao C Q, Gao M W, Weber H 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 2191
- [5] Wei L, Shi G H, Lu J, Yang J S, Li X Q, Zhang Y D 2013 *J. Opt.* **15** 055702
- [6] Chen L H, Rao C H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 090701 (in Chinese) [陈林辉, 饶长辉 2011 物理学报 **60** 090701]
- [7] Li C H, Xian H, Jiang W H, Rao C H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4289 (in Chinese) [李超宏, 鲜浩, 姜文汉, 饶长辉 2007 物理学报 **56** 4289]
- [8] Ares J, Arines J 2001 *Opt. Lett.* **26** 1831
- [9] Ma X Y, Rao C H, Zheng H Q 2009 *Opt. Express* **17** 8525
- [10] Liang C, Liao W H, Shen J X, Zhou Y 2009 *Chin. J. Laser* **36** 430 (in Chinese) [梁春, 廖文和, 沈建新, 周宇 2009 中国激光 **36** 430]
- [11] Ren J F, Rao C H, Li M Q 2002 *Opto-Electron. Eng.* **29** 1 (in Chinese) [任剑峰, 饶长辉, 李明全 2002 光电工程 **29** 1]
- [12] Thatiparthi C, Ommanib A, Burmanc R, Thapa D, Hutchings N, Lakshminarayanan V 2016 *Proc. SPIE* **9693** 969321
- [13] Thomas S 2004 *Proc. SPIE* **5490** 1238
- [14] Nightingale A M, Gordeyev S 2013 *Opt. Eng.* **52** 071413
- [15] Shen F, Jiang W H 1999 *High Power Laser and Particle Beams* **11** 27 (in Chinese) [沈锋, 姜文汉 1999 强激光与粒子束 **11** 27]
- [16] Li Y K, Zhang J Z, Zhang F Z 2014 *Proc. SPIE* **9242** 92421V

Shack-Hartmann optimum threshold estimation for the point source

Zhou Rui^{1)2)3)†} Wei Ling¹⁾²⁾ Li Xin-Yang¹⁾²⁾ Wang Cai-Xia¹⁾²⁾ Li Mei¹⁾²⁾ Shen Feng¹⁾²⁾

1) (*Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

2) (*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 8 November 2016; revised manuscript received 4 February 2017)

Abstract

The Shack-Hartmann wavefront sensor (SHWFS) is an optical detection device based on the measurements of wavefront slopes. It is widely used in an adaptive optics system due to its simple structure and strong environment adaptability. The measuring accuracy of the SHWFS depends mainly on the accuracy of the spot image centroid in each sub-aperture. There are many centroid algorithms including the center of gravity algorithm, Gauss fitting algorithm, and correlation algorithm. As to the simplicity, robustness, high accuracy and stability, the center of gravity algorithm is more widely used. However, the accuracy of gravity algorithm is sensitive to the noise including discretization, aliasing, photon noise, readout noise, stray light, and direct current bias. To improve the accuracy of centroid, the output signals of SHWFS must be pre-processed to suppress the noise effect by using the method of thresholding in general. Many threshold methods have been presented to reduce the error of centroid and there theoretically exists an optimum threshold which causes the minimum error of centroid based on the characteristics of SHWFS and noise. However, it is difficult to separate the signals from the noises, and the optimum threshold cannot be estimated accurately in real time in the SHWFS systems. In this paper aiming at noises in SHWFS, which vary with time and space rapidly, a method based on the noise weighted function of the mean value of pixels and the local gradient direction of image signals in the moving windows is presented according to the characteristics of the Gaussian spot and noise distributions. Moreover, the theory and parameters determination of the method are analyzed. The method utilizes the probability that the pixels in the moving windows belong to the noise, and the probability is inversely proportional to the mean value of pixels and the local gradient direction of image signals, and so the monotonically reducing probability function of pixels is constructed. Finally, the standard deviation and mean value of noise can be obtained, and the estimation value of optimum threshold is equal to the mean value of noise plus three times the standard deviation of noise. To investigate the effects of the optimum threshold estimation with the different spot sizes, spot strengths and noise levels, the proposed algorithm is compared with traditional methods. The simulation and experimental results show that the proposed method could achieve higher accuracy, and the error between the threshold obtained by the method presented in this paper and theoretical optimum threshold is less than 10%, which is less than those from the traditional methods.

Keywords: Shack-Hartmann wavefront sensor, Gaussian spot, optimum thresh, weighted function

PACS: 07.07.Df, 05.40.Ca, 42.25.Bs, 95.75.Qr

DOI: 10.7498/aps.66.090701

† Corresponding author. E-mail: zhourui@ioe.ac.cn