

点源信标相关哈特曼-夏克波前传感器光斑 偏移测量误差分析

陈林辉^{1)2)3)†} 饶长辉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)(中国科学院研究生院,北京 100049)

(2010年10月14日收到;2010年12月29日收到修改稿)

在基于哈特曼-夏克波前传感器(SH-WFS)的自适应光学系统中,通常采用质心算法探测点源信标的子孔径光斑偏移量.然而质心算法探测精度受到诸如减阈值等因素的影响,在低信噪比(SNR)时不能准确估计光斑质心位置,而相关哈特曼算法不需要减阈值,具有更好的鲁棒性.本文在介绍相关SH-WFS基本原理的基础上,通过建立基于点源信标探测的相关SH-WFS算法的随机噪声模型,推导了光斑偏移测量误差表达式,系统分析了光子噪声、CCD读出噪声、背景光子噪声等因素对相关SH-WFS测量误差的影响.并进行了数值仿真及实验,仿真计算及实验结果与理论公式非常符合.

关键词: 相关哈特曼-夏克波前传感器, 相关哈特曼算法, 质心算法, 测量误差

PACS: 07.04. Df, 05.40. Ca, 42.25. Bs

1. 引言

自适应光学通过实时测量并校正波前像差,获得接近衍射极限的成像效果,广泛运用于地基望远镜系统^[1],以及光束质量诊断^[2]等领域中.通常自适应光学系统由波前传感器,波前控制器以及波前校正器三部分构成^[3-5].SH-WFS以其具有高速和高精度测量波前像差的能力被广泛用于光波前探测^[6,7].计算子孔径光斑质心偏移量最常用的方法是质心算法,它通过子孔径光斑强度一阶矩计算光斑质心位置.由于CoG算法对噪声敏感,远离质心的像素点上的噪声对质心算法精度影响尤为显著,因此实际应用中需对质心算法进行一定的改进如加权,减阈值等^[8,9].

近年来,随着研究的深入及自适应光学应用领域的拓宽,国内外学者提出了多种新型波前传感技术^[10,11],并在实际应用中进行了深入的研究.相关哈特曼算法广泛应用于目标跟踪^[12]及太阳天文观测自适应光学^[13]等领域.在进行像差测量时,

相关哈特曼算法通过计算子孔径相对于某一特定参考子孔径光斑的相对偏移量求得波前像差.由于匹配算法对噪声不敏感,相关SH-WFS具有较高稳定性的优点,在基于点源目标的自适应光学系统中具有很高的应用价值.相关哈特曼算法误差分析方面的主要工作有:Poyneer^[14]对CCD背景暗电平和读出噪声引起的相关SH-WFS的测量误差进行了分析,但是文章忽略了光子噪声的影响,而在弱光应用场合,光子噪声误差将会十分显著;Thomas等人^[15]也对相关SH-WFS的读出噪声和信号光子噪声误差进行了推导,然而他的推导基于质心公式求相关峰值,其本质有别于相关哈特曼算法.本文介绍了相关SH-WFS的结构和原理;基于点源信标建立了相关哈特曼算法探测精度理论模型,推导了不同种类随机噪声的误差公式,并对理论公式和仿真计算结果进行了比较.最后设计了室内实验验证了相关哈特曼算法误差理论,实验结果和理论公式以及仿真结果十分符合.

† E-mail: lnhui.chen@126.com

2. 相关 SH-WFS 原理

2.1. 相关 SH-WFS 原理

SH-WFS 由微透镜和成像 CCD 组成. 由于微透镜阵列的空间分割, 光波经过微透镜阵列后在其后焦面的 CCD 上形成相应的光斑阵列. 由于大气扰动的影响, 光斑阵列中的子光斑偏离原始位置, 如图 1 所示. 质心算法通过 CCD 器件测量每个成像光斑强度一阶矩计算光斑位置, 由所有子孔径光斑质心偏移量通过波前复原算法得到全孔径波前相位信息.

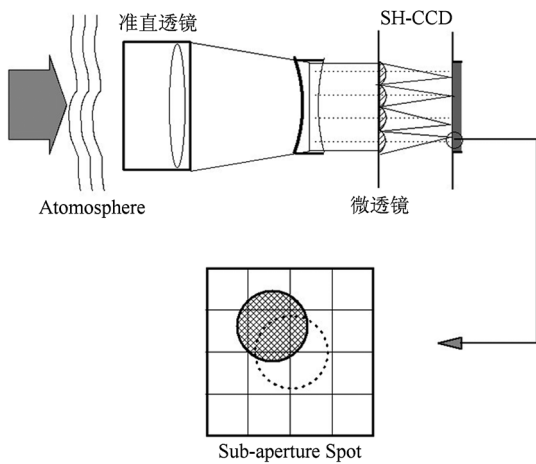


图 1 SH-WFS 示意图

与质心算法不同, 相关哈特曼算法在得到微透镜成像光斑阵列后通过相关哈特曼算法计算光斑阵列的相对与选取的参考光斑的位置偏移而获取当前孔径的倾斜信息. 基于点源目标相关 SH-WFS 的核心是精确计算所有子孔径光斑同选取的参考子孔径光斑的相对偏移量.

2.2. 相关哈特曼算法计算子孔径光斑偏移量

考虑两离散光斑强度矩阵, 如图 2 所示设 r 为参考光斑, s 为目标光斑. 可认为各子孔径光斑之间只有相对位置偏移, 而光斑能量分布完全一致. 设衍射光斑的光强分布函数为 $p(x, y)$, 则离散采样的光斑函数 $I(i, j)$ 为

$$I(i, j) = \int_i^{i+1} \int_j^{j+1} p(x, y) dx dy, \quad (1)$$

其中 (i, j) 为像素坐标, 若选参考子孔径光斑偏移

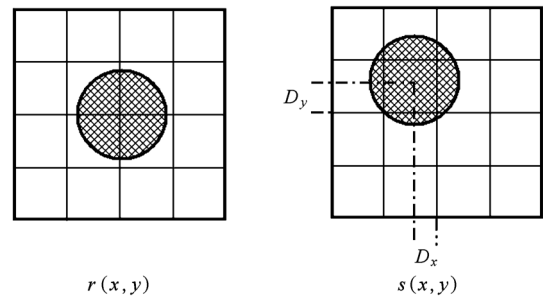


图 2 子孔径光斑示意图

量为零, 则参考光斑为:

$$r(i, j) = I(i, j). \quad (2)$$

设目标子孔径与参考子孔径之间水平和垂直相对偏移量为 D_x, D_y , 则目标子孔径光斑可表示为

$$s(i, j) = I(i + D_x, j + D_y). \quad (3)$$

采用相关哈特曼算法的光斑相对偏移量估计为

$$(\hat{D}_x, \hat{D}_y) = (D_x, D_y) | \max(C(\hat{D}_x, \hat{D}_y)), \quad (4)$$

其中

$$C(\hat{D}_x, \hat{D}_y) = \sum \sum s(x, y) \times r(x + D_x, y + D_y) \quad (5)$$

为参考和目标子孔径光斑的相关函数. 需要指出, 由于 CCD 像素的离散采样, 相关函数 $C(D_x, D_y)$ 是一个离散矩阵, 通常在 x 和 y 两个方向分别对矩阵 $C(D_x, D_y)$ 峰值位置进行抛物线插值, 以获得亚像素精度的估计 (\hat{D}_x, \hat{D}_y) . 由于 x 和 y 方向是对称的, 考虑 x 坐标方向, 可得插值后得相关峰值坐标估计为

$$\hat{D}_x = m - \frac{0.5[C(m+1, n) - C(m-1, n)]}{C(m+1, n) + C(m-1, n) - 2C(m, n)}, \quad (6)$$

其中 (m, n) 为相关峰值整像素坐标位置.

由于匹配滤波器是具有最优 SNR 的滤波器^[16], 在对光斑偏移量的检测中相关运算对噪声有很好的抑制作用. 而传统质心算法很容易受到来自远离中心的像素点噪声影响.

Thomas 等人提出了对相关函数矩阵 $C(m, n)$ 使用质心算法以估计亚像素精度相关峰位置的方法^[15], 经过对该算法的研究发现, 如果不对 $C(m, n)$ 进行减阈值处理, 该算法的本质就是质心算法. 另外在空间频域运用线性相位求解偏移量的方法也是一种求解相对偏移量的方法, 然而该算法对噪声较敏感^[17].

3. 计算与分析

3.1. 噪声来源分析

SH-WFS 的质心探测精度受众多因素影响,主要的误差源有^[9]:

1) CCD 像素单元的离散采样误差,光斑灰度值的量化误差,CCD 靶面截断误差,CCD 响应非均匀性,可将其统一为系统误差范畴.在一定情况下可以减小系统误差的影响,如提高采样精度,扩大 CCD 靶面大小等,因此在本文中暂不考虑系统误差的影响.

2) 信号光子噪声,服从信号光斑光强函数的泊松分布.

3) 背景光子噪声,服从背景光强函数的泊松分布.

4) CCD 读出噪声以及背景暗电平,服从高斯分布.

其中信号光子噪声,背景光子噪声,CCD 的背景暗电平和读出噪声可统一为随机噪声,是影响 SH-WFS 精度的主要因素.

3.2. 光斑模型建立

对于圆形或方形子孔径,衍射光斑光强分布通常用高斯函数进行近似^[8,9],由于 CCD 像素的采样,(i, j) 像素收集到的平均信号光子数 $\overline{I_{ij}}$ 为

$$\overline{I_{ij}} = \frac{N_{ph}}{4} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{i+1-x_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{i-x_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right] \times \left[\operatorname{erf}\left(\frac{j+1-y_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{j-y_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right]. \quad (7)$$

其中 N_{ph} 为光斑内信号光总能量, $\operatorname{erf}(\dots)$ 为误差函数, σ 为光斑的等效高斯宽度,光斑的半高全宽 $N_T \approx 2.355\sigma$, 设 CCD 上像素的大小为 s 则可用 $N_s = N_T/s$ 来表示光斑的大小. 如果参考模版大小为 $N(N \text{ pixel})$, 定义参数 $F = N/N_s$ 为计算区域相对光斑的大小. 由于采样过于粗糙将导致引入额外误差, 计算中让 $N_s > 2$; 另外 F 过小则光斑的能量损失也将带来额外误差, 计算中设 $F = 1$.

根据 3.1 节对噪声的分析,在信号光基础上叠

加随机噪声,生成目标光斑 s . 其中光子噪声由泊松随机变量生成;背景光子噪声由均值为常数的泊松随机变量产生;读出噪声为零均值高斯噪声,CCD 背景暗电平为常数. 则目标光斑第 (i, j) 像素收集到的总平均光子数 $\overline{s(i, j)}$ 为

$$\overline{s(i, j)} = \overline{I_{ij}} + \overline{I_{bij}} + \overline{I_{dij}}, \quad (8)$$

其中 $\overline{I_{bij}}$ 是第 (i, j) 个像素接收到的平均背景光子数, $\overline{I_{dij}}$ 是 CCD 的背景暗电平.

假定各噪声源之间互不相关,由于光子噪声的方差等于均值,目标光斑的噪声方差为

$$\sigma_s^2(i, j) = \overline{I_{ij}} + \overline{I_{bij}} + \sigma_r^2, \quad (9)$$

其中 σ_r 是 CCD 的读出噪声均方根值.

参考光斑 r 定义为偏移量为零的理想子孔径衍射光斑,其光强分布由(7)式给出为

$$r(i, j) = \frac{N_{ph}}{4} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{i+1}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{i}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right] \times \left[\operatorname{erf}\left(\frac{j+1}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{j}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right]. \quad (10)$$

3.3. 相关哈特曼-夏克算法噪声误差推导

由(6)式可得两光斑相对偏移量

$$\hat{D}_x = m - \frac{0.5(c_1 - c_{-1})}{c_1 + c_{-1} - 2c_0}, \quad (11)$$

其中 c_{-1}, c_0, c_1 为互相关因子最大值附近的三个离散值, 并设 m_{-1}, m_0, m_1 为 c_{-1}, c_0, c_1 的均值, 为简化公式, 在相对偏移量 D_x 为零的情况下可得到 x 方向光斑偏移量的相关哈特曼算法估计方差为^[14]

$$\sigma_{x, \text{corr}}^2 = \frac{\sigma_1^2 - \sigma_{-1,1}^2}{8 \cdot (m_1 - m_0)^2}, \quad (12)$$

式中 m_k 为相关系数 c_k 的均值, σ_k^2 为 c_k 的方差, $\sigma_{k,l}^2$ 为 c_k 和 c_l 的协方差.

由(5)式容易得到

$$m_k = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r(i-k, j) \overline{s(i, j)}, \quad (13)$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r^2(i-k, j) \sigma_s^2(i, j), \quad (14)$$

$$\sigma_{k,l}^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r(i-k, j) r(i-l, j) \sigma_s^2(i, j). \quad (15)$$

将(13), (14)和(15)式代入(12)式有

$$\sigma_{x, \text{corr}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r(i-1, j) (r(i-1, j) - r(i+1, j)) \sigma_s^2(i, j)}{8 \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (r(i-1, j) - r(i, j)) \overline{s(i, j)} \right)^2}. \quad (16)$$

将(7),(8),(9)式代入(16)式则有

$$\sigma_{x,\text{corr}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \overline{I_{s(i-1)j}} (\overline{I_{s(i-1)j}} - \overline{I_{s(i+1)j}}) (\overline{I_{sij}} + \sigma_r^2 + \overline{I_{bij}})}{8 \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\overline{I_{s(i-1)j}} - \overline{I_{sij}}) (\overline{I_{sij}} + \overline{I_{bij}} + \overline{I_{dij}}) \right)^2} \quad (17)$$

3.4. 光斑偏移量误差仿真计算

根据上述仿真过程生成理想零偏移的参考模版以及 500 帧含噪声的目标光斑数据. 采用相关哈特曼算法计算目标光斑和参考模版的相对偏移量, 通过计算 500 帧光斑偏移量估计值的标准差得到相关哈特曼算法计算误差.

相对偏移量计算流程如图 3 所示: 算法先计算目标光斑和参考模版的相关函数矩阵, 通过检测相关函数矩阵中峰值位置, 获取相关峰附近的离散相关值, 对其插值得到相关峰的亚像素精度位置.

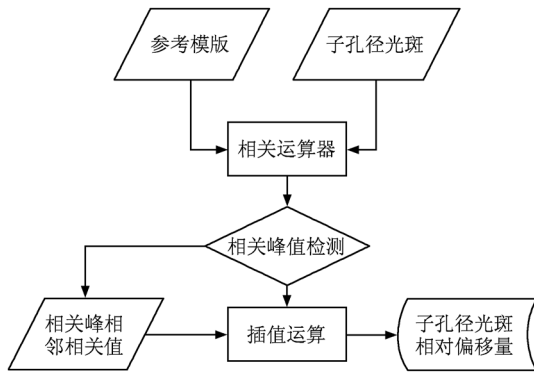
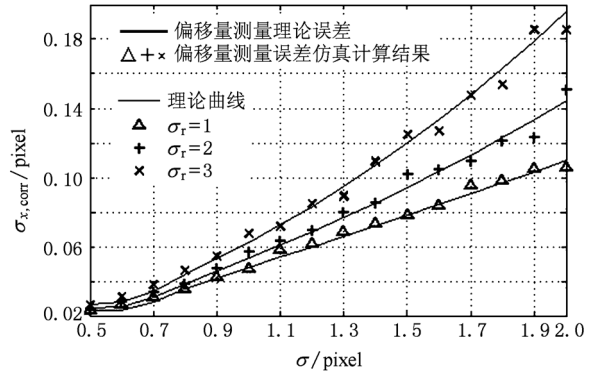


图 3 仿真相关哈特曼算法偏移量计算流程

3.5. 仿真计算结果分析

3.5.1. 等效高斯宽度对偏移量误差的影响分析

由(17)式可以看出相关哈特曼算法偏移量计算误差和噪声方差 $\sigma_s^2(i,j)$, 以及高斯光斑结构有关. 光斑结构主要由光斑的等效高斯宽度决定. 等效高斯宽度 σ 反映了光斑能量的集中程度, σ 越小光斑能量越集中. 图 4 为在光斑信号光总能量为 600ADU, 对应读出噪声分别为 1, 2, 3ADU 时, 按(17)式得出的偏移量估计的理论误差和数值仿真计算误差随光斑等效高斯宽度变化的比较. 从图 4 可以看出光斑等效高斯宽度越大随机噪声误差也越大.



$$N_{\text{ph}} = 600\text{ADU}, N = \text{round}(2\sigma) + 1, \overline{I_{bij}} = 0$$

图 4 不同噪声水平 σ_r 时等效高斯宽度 σ 对相关哈特曼算法精度影响

3.5.2. 读出噪声 σ_r 偏移量误差计算

$\overline{I_{sij}}$ 既是入射信号光子的平均强度, 又是符合泊松分布的信号光子噪声的均方差, 如果让 $\overline{I_{sij}} = N_{\text{ph}} \cdot \lambda_{sij}$, 其中 λ_{sij} 为归一化高斯光斑强度, 则在只考虑读出噪声时, 由(17)式可得读出噪声理论误差为

$$\sigma_{x,\text{corr}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_{s(i-1)j} (\lambda_{s(i-1)j} - \lambda_{s(i+1)j})}{8 \cdot \text{SNR}^2 \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\lambda_{s(i-1)j} - \lambda_{sij}) \lambda_{sij} \right)^2} \quad (18)$$

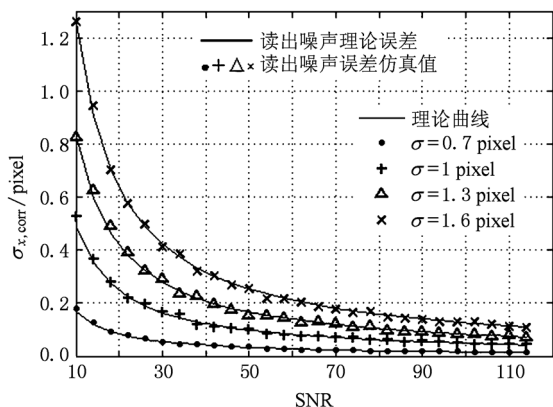
其中信噪比为 $\text{SNR} = N_{\text{ph}}/\sigma_r$, 从(18)式可见相关哈特曼算法偏移量计算方差与 SNR 的平方成反比. 图 5 为在光斑等效高斯宽度分别为 0.7, 1, 1.3, 1.6 pixel 时, 读出噪声 SNR 对相关哈特曼算法偏移量估计误差的理论曲线和仿真结果比较. 可以看出仿真结果和理论分析非常符合.

3.5.3. 信号光子噪声 $\overline{I_{sij}}$ 偏移量误差计算

同样让 $\overline{I_{sij}} = N_{\text{ph}} \cdot \lambda_{sij}$, 只考虑光子噪声时由(17)式可得光子噪声理论误差为

$$\sigma_{x,\text{corr}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_{s(i-1)j} (\lambda_{s(i-1)j} - \lambda_{s(i+1)j}) \lambda_{sij}}{8 \cdot N_{\text{ph}}^2 \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\lambda_{s(i-1)j} - \lambda_{sij}) \lambda_{sij} \right)^2} \quad (19)$$

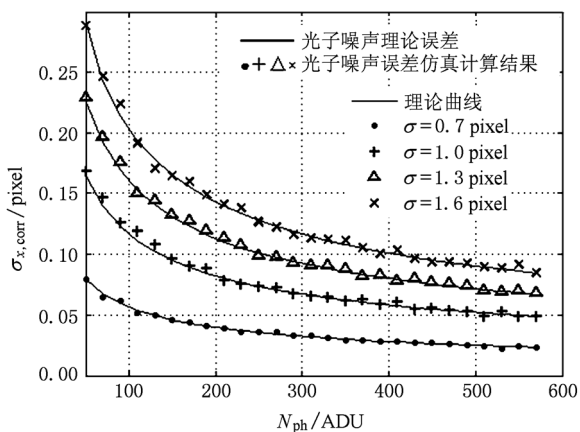
图 6 为在光斑等效高斯宽度分别为 0.7, 1, 1.3, 1.6



$$N = \text{round}(2\sigma) + 1, \overline{I_{bij}} = 0$$

图5 不同光斑大小 σ 时读出噪声 σ_r 对相关哈特曼算法精度影响

pixel 时,信号光子噪声对相关哈特曼算法偏移量估计误差的理论曲线和仿真结果的比较.



$$N = \text{round}(2\sigma) + 1, \overline{I_{bij}} = 0, \sigma_r = 0$$

图6 不同光斑大小 σ 时信号光子噪声 $\overline{I_{bij}}$ 对相关哈特曼算法精度影响

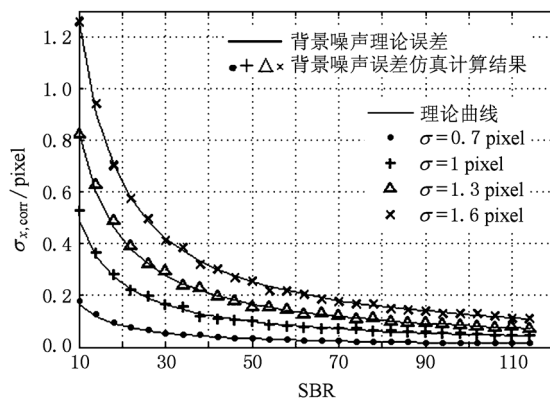
3.5.4. 背景光子噪声 $\overline{I_{bij}}$ 偏移量误差计算

通常情况下,进入哈特曼波前传感器的为强度均一的背景光,让 $\overline{I_{bij}} = b$,则由(17)式,只考虑背景光子噪声时,噪声误差方差为

$$\sigma_{x,\text{corr}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_{s(i-1)j} (\lambda_{s(i-1)j} - \lambda_{s(i+1)j})}{8\text{SBR}^2 \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\lambda_{s(i-1)j} - \lambda_{sij}) \lambda_{sij} \right)^2}, \quad (20)$$

式中信背比为 $\text{SBR} = N_{\text{ph}}/b$,可以看出相关哈特曼算法偏移量计算方差与 SBR 的平方成反比.图7为在光斑等效高斯宽度分别为 0.7, 1, 1.3, 1.6 pixel 时

背景光子噪声 SBR 对相关哈特曼算法偏移量估计误差的理论曲线和仿真结果的比较.



$$N = \text{round}(2\sigma) + 1, \sigma_r = 0$$

图7 不同光斑大小 σ 时背景光子噪声 $\overline{I_{bij}}$ 对相关哈特曼算法精度影响

4. 实验

为了进一步验证相关哈特曼算法误差分析的正确性,进行了实验研究.实验中为简化装置,只对单个孔径的光斑位置测量误差进行了实验测定和对比分析.实验光路如图8所示,实验中利用氩氦激光器模拟点源信标,该信标光依次通过衰减片 F、显微物镜 L_1 、针孔 S、准直透镜 L_2 之后,再经过透镜 L_3 汇聚于 CCD 探测器上.

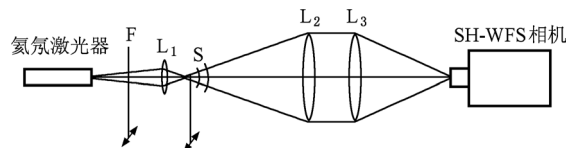


图8 实验光路图

4.1. 数据处理:

4.1.1. 噪声的计算

实验在暗室中进行,背景光子噪声很微弱,实际噪声可由高斯白噪声近似.如图9所示,CCD 图像的有效大小为 128×128 像素,而实际光信号分布区域约为 10×10 像素,选取 20×20 像素大小区域进行相关哈特曼算法计算,取该幅图像四个角区域计算随机噪声大小,每个角区域包括 30×30 像素,每个光强下采集 500 帧图像,第 f 帧图像用 $G_a(f)$ 表

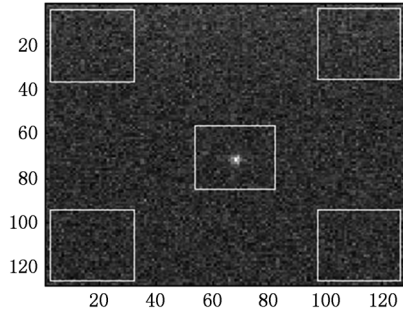


图9 CCD采集光斑图像

示,其中 a 为角区域的编号. 第 f 帧图象噪声均值 $\overline{N_{noise}}$ 的计算公式为

$$\overline{N_{noise}}(f) = \frac{1}{4 \cdot 30 \cdot 30} \times \sum_{a=1}^4 \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^{30} G_a(i, j, f). \quad (21)$$

第 f 帧图象噪声方差 $\sigma_{noise}^2(f)$ 为

$$\sigma_{noise}^2(f) = \frac{1}{4 \cdot 30 \cdot 30} \times \sum_{a=1}^4 \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^{30} [G_a(i, j, f) - \overline{N_{Bij}}]^2. \quad (22)$$

对相关运算而言,参考光斑的选取也很关键,实验中对 500 帧图象 $G(f)$ 进行累加,将累加后接近零噪声的 20×20 像素光斑区域作为参考

$$\text{Mod} = \frac{1}{500} \sum_{f=1}^F [G(f) - \overline{N_{noise}}(f)]. \quad (23)$$

如图 10 所示.

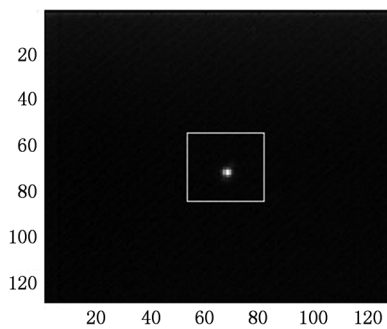


图 10 参考光斑图像

4.1.2. 光斑能量及 SNR 的计算

光斑内信号光能量 N_{ph} 为

$$N_{ph} = \frac{1}{500} \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{20} [G(i, j, f) - \overline{N_{noise}}(f)]. \quad (24)$$

光斑 SNR 为

$$\text{SNR} = \frac{N_{ph}}{\sigma_{noise}}. \quad (25)$$

4.1.3. 等效高斯宽度的计算

设等效高斯宽度为 σ , 由参考光斑灰度图可知参考光斑峰值为

$$\max(\text{Mod}) = \frac{N_{ph}}{2\pi\sigma^2}. \quad (26)$$

因此等效高斯宽度为

$$\sigma = \sqrt{\frac{N_{ph}}{2\pi\max(\text{Mod})}}. \quad (27)$$

4.2. 实验结果

通过改变光源光强,获得多组不同 SNR 的图像数据. 实验实测点源光斑等效高斯宽度 σ 为 1.55 pixel, 运用 4.1 节方法计算不同组图像 SNR, 通过 (18) 式计算出相应的理论误差. 图 11 中实线及“▲”号表示相关哈特曼算法理论误差及实验测量误差.

作为比较,实验中还采用传统质心算法计算了光斑位置偏移量测量误差,不考虑采样误差时,传统减最佳阈值质心算法(TCoG)的偏移量测量误差公式为^[9]

$$\sigma_{x, \text{CoG}}^2 = \frac{4(\sigma_{noise}^2 + \overline{N_B})}{V_s^2(T)} \left[\frac{1}{4} - x_c^2(T) \right] + \frac{\sigma^2}{V_s(T)}, \quad (28)$$

式中, $V_s(T)$ 为减阈值 $T = 3\sigma_{noise}$ 后光斑中信号光的总能量, $\overline{N_B}$ 为噪声均值, $x_c(T)$ 为减阈值后信号光斑的质心位置. 图 11 中虚线及“+”号表示质心算法偏移量测量理论误差及实验测量误差.

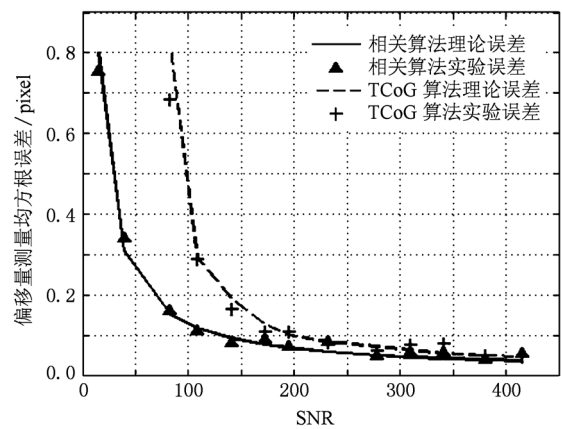


图 11 不同 SNR 时相关哈特曼算法、质心算法理论误差及实验误差比较

由图 11 实验结果表明,两种算法实验测量误差与误差理论公式非常符合,在低信噪比时相关哈特曼算法偏移量估计误差明显小于质心算法.

5. 结 论

本文介绍了相关哈特曼算法的原理,分析了相关哈特曼算法的性能.从点源光斑的高斯近似出发,推导了子孔径光斑偏移量测量中各种随机噪声的误差公式.通过数值仿真和室内实验验证了相关

哈特曼算法的随机噪声误差理论,在实验中比较了不同 SNR 时相关哈特曼算法及传统减阈值质心算法光斑偏移量探测误差.结果表明,相关哈特曼算法是一种对 CCD 背景暗电平和噪声阈值不敏感的算法,在低 SNR 条件下具有比传统质心算法更好的测量精度.

本课题研究过程中得到了中科院光电技术研究所姜文汉院士、李新阳研究员的指导,并获得马晓燮,魏凌,廖周等同志的诸多帮助,在此一并表示感谢.

-
- [1] 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]
- [2] Yang P, Yang R F, Shen F, Li X Y, Jiang W H 2009 *Opt. Commun.* **282** 1349
- [3] Hardy J W 1978 *Proc. IEEE* **66** 651
- [4] Jiang W H, Gong Z B 1998 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **15** 193 (in Chinese) [姜文汉、龚知本 1998 量子电子学报 **15** 193]
- [5] Ning Y, Yu H, Zhou H, Rao C H, Jiang W H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4717 (in Chinese) [宁禹、余浩、周虹、饶长辉、姜文汉 2009 物理学报 **58** 4717]
- [6] Ares J, Mancebo T, Bara S 2000 *Applied Optics* **39** 1511
- [7] Zhang Y Y, Rao C H, Li M, Ma X Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5904 (in Chinese) [张艳艳、饶长辉、李梅、马晓燮 2010 物理学报 **59** 5904]
- [8] Cao G R, Yu X 1994 *Optical Engineering* **33** 2331
- [9] Ma X Y, Rao C H, Zheng H Q 2009 *Optics Express* **17** 8525
- [10] Bai F Z, Rao C H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8286 (in Chinese) [白福忠、饶长辉 2010 物理学报 **59** 8286]
- [11] Wang J X, Bai F Z, Ning Y, Huang L H, Jiang W H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** (in Chinese) [王建新、白福忠、宁禹、黄林海、姜文汉 2011 物理学报 **60**]
- [12] Rao C H, Jiang W H, Fang C, Ling N, Zhou W C 2003 *Chin. J. Astron. Astrophys.* **3** 576
- [13] Rimmele T R 2000 *Proc. SPIE* **4007** 218
- [14] Poyneer L A 2003 *Applied Optics* **42** 5807
- [15] Thomas S, Fusco T 2006 *RAS, MNRAS* **371** 323
- [16] Zheng J L, Ying Q H, Yang W L 2000 *Signal and System* (Beijing: Higher Education Press) (in Chinese) [郑君里、应启珩、杨为理 2000 信号与系统 (北京:高等教育出版社)]
- [17] Sidick E 2007 *Proc. of SPIE* **6687** 668710-1

Error analysis of correlating Shack-Hartmann wave-front sensor for a point source

Chen Lin-Hui^{1)2)3)†} Rao Chang-Hui¹⁾²⁾

1) (*The 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) (*Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 14 October 2010; revised manuscript received 29 December 2010)

Abstract

In Shack-Hartmann wavefront sensor (SH-WFS) based adaptive optics system, the centroiding algorithm is usually used to estimate the centroid of a point source spot. But the detecting accuracy of the centroiding algorithm is affected by many factors such as threshold selection, so that the centroid position of the spot cannot be evaluated accurately under the condition of low signal-to-noise ratio (SNR). Comparatively the correlating algorithm for Shack-Hartmann wave front-sensing is more robust because it need not reduce the thresholding. In this paper, based on the the principle of the correlating SH-WFS, the measurement error of the correlating SH-WFS is derived by building up the noise model of the correlating SH-WFS. The influences of spot size, photon noise, read out noise and background light noise on the measurement of the correlating SH-WFS are analyzed systematically. The numerically simulation results and the experimental results are consistent well with the theoretical analyses.

Keywords: correlating Shack-Hartmann wavefront sensor, correlation algorithm, centroiding algorithm, measuring error

PACS: 07.04.Df, 05.40.Ca, 42.25.Bs

† E-mail: linhui.chen@126.com