

文章编号 1004-924X(2017)增-0060-06

## 采用分区曝光提高非均匀光照下质心测量 信噪比的哈特曼波前传感器

马晓燮, 饶长辉\*, 饶学军, 杨金生

- (1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;
2. 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209)

**摘要:** 为了降低非均匀光照明对哈特曼波前传感器波前测量精度的影响, 分析了哈特曼波前传感器绝对标定原理和质心测量误差与信号光能量的关系, 提出了对哈特曼波前传感器分区曝光的方法。该方法在被测波前为静态波前的条件下, 通过对哈特曼波前传感器不同子孔径区域设置不同的曝光时间, 来提高单个子孔径内光斑质心测量的信噪比。最后, 针对哈特曼波前传感器绝对定标的  $35 \times 35$  个子孔径进行分区曝光, 仿真结果表明, 单个子孔径内的质心误差降低至 0.1 pixel 内。分区曝光的方法可以有效降低非均匀光照下子孔径内光斑的质心测量误差, 从而提高哈特曼波前传感器在非均匀光照时的波前测量精度。

**关键词:** 自适应光学; 波前测量; 质心探测; 分区曝光; 哈特曼波前传感器

**中图分类号:** P427.1, TP212.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172513.0060

## Hartmann wavefront sensor for improving SNR of centroid measurement under non-uniform illumination using zone-sharing exposure

MA Xiao-yu, RAO Chang-hui\*, RAO Xue-jun, YANG Jin-sheng

- (1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. Key Laboratory of Adaptive optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

\* Corresponding author, E-mail: chrao@ioe.ac.cn

**Abstract:** In order to reduce the influence of non-uniform illumination on the wavefront measurement accuracy of Hartmann wavefront sensor, the absolute calibration principle of Hartmann wavefront sensor as well as the relationship between the centroid measurement error and the signal light energy were analyzed, then a method for zone-sharing exposure of Hartmann wavefront sensor was proposed. Under the condition of a static wavefront, the signal-to-noise ratio of centroid measurement in a single subaperture was improved by setting different exposure time for different subaperture regions of the Hartmann wavefront sensor. Finally, the  $35 \times 35$  sub apertures used for absolute calibration of the Hartmann wavefront sensor was exposed as zone-sharing exposure. Simulation results show that the centroid measurement error within a single sub aperture is reduced to 0.1 pixel. The method of divi-

收稿日期: 2017-06-01; 修订日期: 2017-07-01.

基金项目: 中科院西部之光 A 类人才项目

sional exposure can effectively reduce the centroid measurement error of the spot in non-uniform illumination, thus improving the accuracy of the Hartmann wavefront sensor in non-uniform illumination.

**Key words:** adaptive optics; wavefront measurement; centroid detection; zone-sharing exposure; Hartmann wavefront sensors

## 1 引言

作为光学波前测量仪器,哈特曼波前传感器可以直接反映波前畸变模式,具有光能利用率高、测量动态范围大、探测速度快等特点,并得到了广泛应用<sup>[1-8]</sup>。在光刻机领域,哈特曼波前传感器主要用于检测投影物镜的像差,其测量精度已经达到了亚纳米量级<sup>[7-9]</sup>。

哈特曼波前传感器在波前测量前需要进行标定,以消除传感器中各个元件的加工及装配误差<sup>[4-7]</sup>。除此之外,对哈特曼波前传感器进行标定还可以确定传感器中各个元件的物理参数,从而确定测量波前复原的比例系数<sup>[4-8]</sup>。传统标定方法使用平面波作为标定波前,而绝对标定方法使用球面波作为标定波前,标定精度更高。如 Alexander Chernyshov 等人利用绝对标定方法标定后的哈特曼波前传感器在复原球面波前时获得了  $\lambda/100$ (P-V)的精度<sup>[10-12]</sup>。

哈特曼波前传感器的测量精度受限于子孔径内焦斑的质心探测误差以及复原误差。对于静态测量对象来说,由于不考虑波前复原计算的时效性,子孔径数可以设计得足够多,复原误差的影响大大小于质心的探测误差的影响,因此提高质心的探测精度对提高哈特曼波前传感器的复原精度是至关重要的。基于离散质心计算公式的质心计算误差<sup>[13-14]</sup>,目前最常用是利用阈值法去除背景光噪声和 CCD 相机的本底噪声,提高光斑质心的信噪比,从而提高质心的探测精度。然而在绝对标定方法中,为了提高标定波前的质量,通常利用纳米级针孔衍射产生的球面波前作为标定波前。此时,衍射波前的空间强度分布会随着半径的增大而迅速降低。文献<sup>[15]</sup>分析了非均匀光强分布对质心位置的影响,并提出了修改复原矩阵算法来提高波前复原精度的方法。然而,受到 CCD 相机满井电荷的限制,非均匀光强分布还会急剧降低哈特曼波前传感器边缘子孔径的信噪比,从而

增大质心探测误差。为了解决该问题,本文讨论了信噪比对质心探测精度的影响,提出了针对哈特曼波前传感器不同光照强度区域分区曝光的方法,并利用仿真证明了该方法的正确性。

## 2 质心测量误差与信号光能量的关系

哈特曼波前传感器的质心计算公式为:

$$x_c = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{mn} I_{mn}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{mn}}, y_c = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N y_{mn} I_{mn}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{mn}}, \quad (1)$$

其中:  $I_{mn}$  为子孔径内坐标为  $(m, n)$  处的像素点的灰度值;  $x_{mn}$  为像素位置;  $M, N$  是子孔径窗口尺寸。

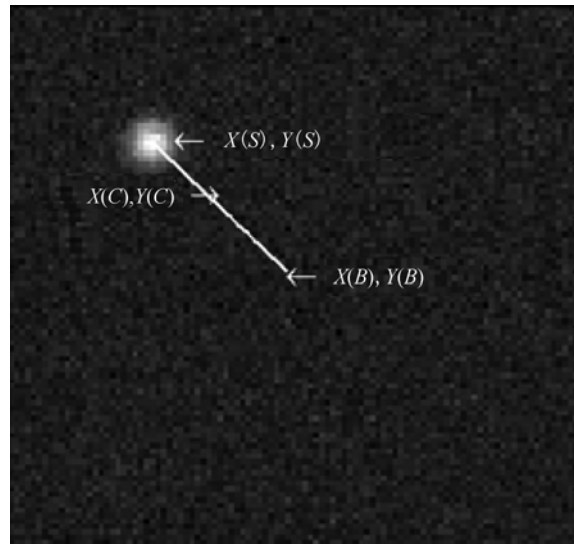


图 1 噪声对质心探测精度的影响

Fig. 1 Influence of noise on centroid detection accuracy

如图 1 所示,在高精度哈特曼波前传感器中,通常通过增大子孔径内光斑的直径来减少采样误差。此时,质心测量误差主要是由光子噪声和 CCD 相机读出噪声  $n_r$  决定。根据曹根瑞等人的

分析,质心探测误差  $\sigma_x$  为<sup>[13]</sup>:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_r^2 LM}{V_s^2} \left( \frac{L^2 - 1}{12} + x_c^2 \right) + \frac{\kappa \sigma_A^2}{V_s}, \quad (2)$$

其中:  $L, M$  是窗口尺寸,  $\sigma_r$  是 CCD 的读出噪声,  $\sigma_A$  是光斑的高斯宽度,  $x_c$  是光斑位置,  $V_s$  是信号光斑灰度级之和(即信号光能量),  $\kappa$  是光子-灰度级转换因子。

在对哈特曼波前传感器进行绝对标定时,激光光束经透镜聚焦在针孔上表面中心,通过针孔衍射产生球面标定波前,标定波前经过微透镜阵列后,在探测器焦平面上形成阵列光斑作为参考基准,如图 2 所示。

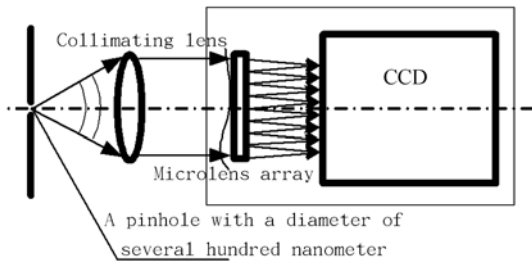


图 2 哈特曼波前传感器绝对标定原理

Fig. 2 Absolute calibration principle of Hartmann wavefront sensor

为了获得高质量的球面标定波前,此时针孔直径尺寸与入射光波波长相比拟。入射光波在圆孔边界上会发生电(磁)三个分矢量之间的耦合<sup>[13]</sup>,可以采用有限差分域(Finite Differential Time Domain, FDTD)法对会聚高斯光束经针孔后的矢量衍射进行数值求解。经过仿真计算,衍射波前强度的均匀性随数值孔径的增加而变小。

如图 3 和图 4 所示,在满足波前误差 P-V 设

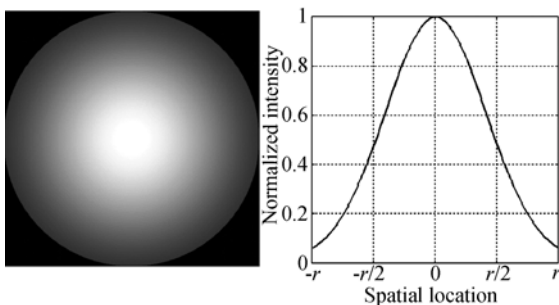


图 3 绝对标定中波前的光强分布

Fig. 3 Intensity distribution of wavefront in absolute calibration

计值要求的前提下,衍射波前强度呈中心对称分布,均匀性  $I_{\min}/I_{\max}$  仅为 0.12。

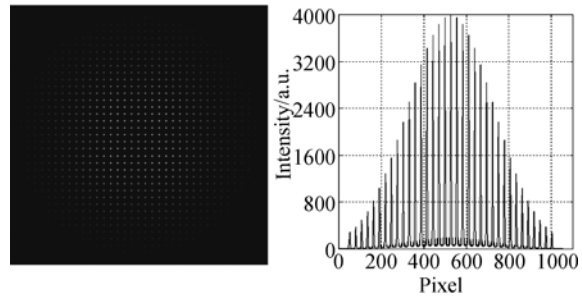


图 4 非均匀光照条件下哈特曼波前传感器的成像光斑  
Fig. 4 Imaging spot of Hartmann wavefront sensor under non-uniform illumination

当采用该球面波前对  $35 \times 35$  子孔径的哈特曼波前传感器进行绝对标定时,横截面上每个子孔径处的质心测量误差曲线如图 5 所示,其中:  $I_{\max} = 4000 \text{ ADU}$ ,  $L = M = 30 \text{ pixel}$ ,  $\sigma_r = 2 \text{ ADU}$ ,  $\sigma_A = 6 \text{ pixel}$ ,  $\kappa = 0.1$ 。显然,受光照度的影响,边缘子孔径的质心测量误差明显高于中心子孔径。

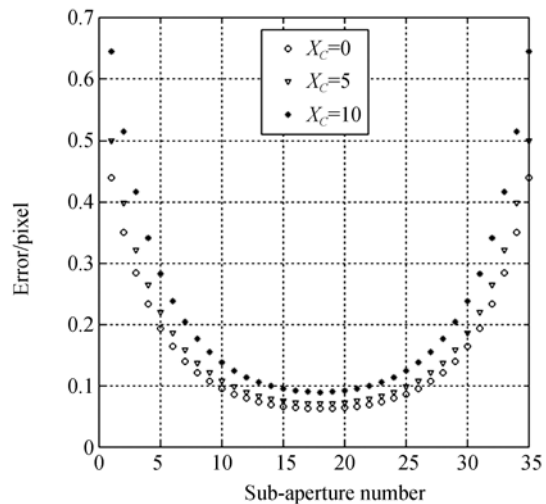


图 5 质心误差与子孔径位置之间的关系

Fig. 5 Relation between centroid calculating error and position of sub-aperture

### 3 分区曝光方法

根据上面的讨论结果,单个子孔径内光斑质心测量需要足够的信噪比来保证哈特曼波前传感器的测量精度。在 CCD 相机噪声恒定的条件下,

通过提高信噪比来提高信号光能量;在标定波前光强一定的条件下,通常采用控制积分时间的方式来保证单个子孔径内光斑质心测量的信噪比。但是,由于 CCD 相机的动态范围是一定的,当波前的强度均匀性过低时,单次采集无法满足所有子孔径内光斑质心测量的信噪比。

分区曝光原理是在被测波前为静态波前的条件下,通过设置不同的曝光时间和选取光照能量达标、非饱和的子孔径单元来计算光斑质心,直到完成所有子孔径区域的光斑质心采集。

在采用绝对标定系统时,如果需要将  $x_c = 0$  时单个子孔径中质心测量误差控制在 0.1 pixel 之内,此时光能量至少应为 6421ADU,将  $35 \times 35$  子孔径从左向右按照 1~35 编号后,采用的分区曝光方式如下(图 6 中黄色为信噪比最佳时的子孔径,红色为曝光过度时的子孔径,淡蓝色为信噪比过低时的子孔径,彩图见期刊电子版):

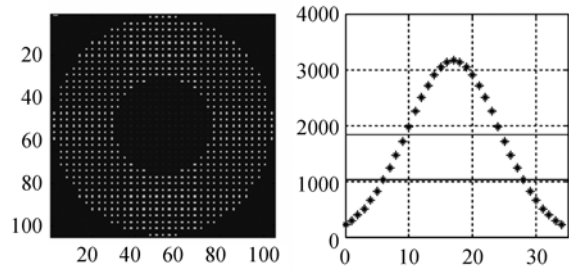
第一次曝光,采集编号为 11~25 的子孔径所在环内的光斑数据,见图 6(a)。

第二次曝光,采集编号为 8~10 的子孔径(或 26~28 的子孔径)所在环内的光斑数据,见图 6(b)。

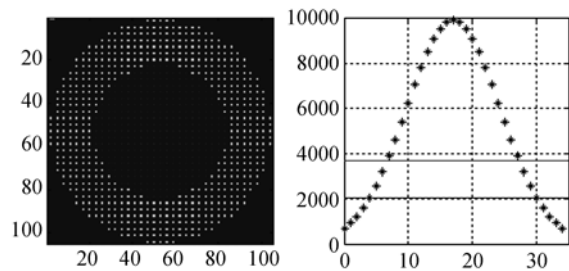
第三次曝光,采集编号为 6~7 的子孔径(或 29~30 的子孔径)所在环内的光斑数据,见图 6(c)。

第四次曝光,采集编号为 4~5 的子孔径(或 31~32 的子孔径)所在环内的光斑数据,见图 6(d)。

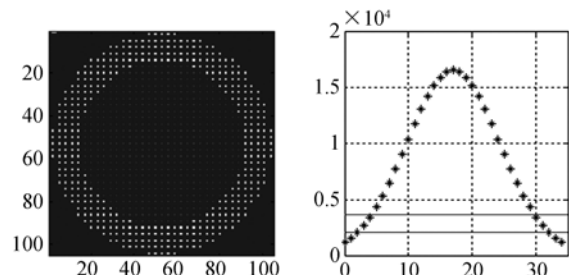
第五次曝光,采集编号为 1~3 的子孔径(或 33~35 的子孔径)所在环内的光斑数据,见图 6(e)。



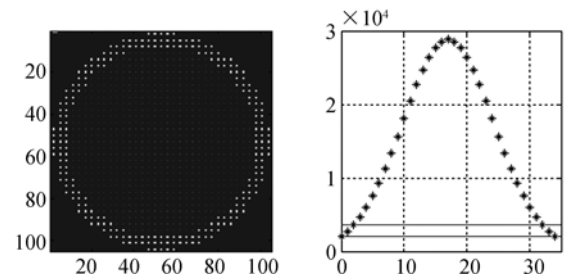
(b)第二次曝光  
(b)The second exposure



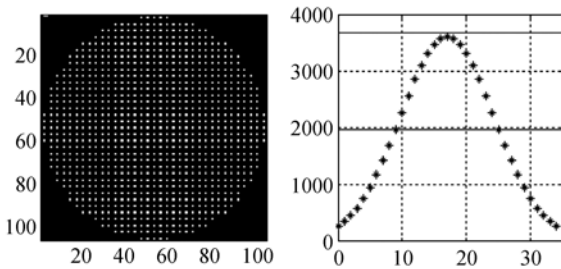
(c)第三次曝光  
(c)The third exposure



(d)第四次曝光  
(d)The fourth exposure



(e)第五次曝光  
(e)The fifth exposure



(a)第一次曝光  
(a)The first exposure

图 6 分区曝光原理图

Fig. 6 Schematic diagram of zone-sharing exposure

## 4 分区曝光仿真结果

如图 7 所示,由于分区曝光后单个子孔径内的光照能量得到了保证,因此单个子孔径内的质心误差明显降低到 0.1 pixel 之内( $x_c=0$ )。

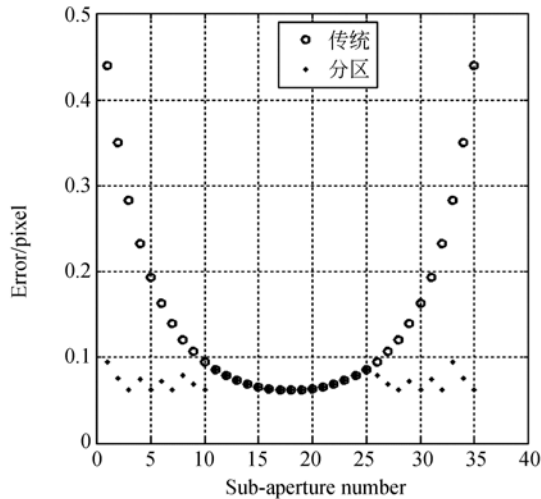


图 7 质心误差与子孔径位置之间的关系(分区曝光)  
Fig. 7 Relation between centroid calculating error and position of sub-aperture (zone-sharing exposure)

图 8 是两种曝光方式测量误差的仿真对比图。被测波前的误差起伏量(PV 值)分别为 10,

20,30,40 和 50 nm,被测波前起伏量分别采用 50 组随机像差仿真。显然,分区曝光可以有效地提高哈特曼波前探测器的测量精度。

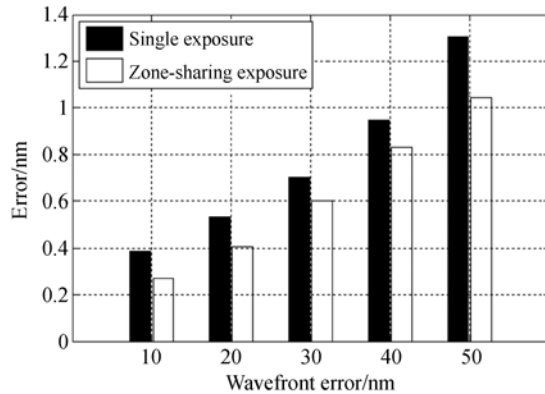


图 8 两种曝光方式的波前复原误差对比  
Fig. 8 Comparison of measurement errors between two exposure methods

## 5 结 论

本文采用分区曝光的方法,通过对不同区域设置不同的曝光时间,从而保证对应区域内光斑的能量达到质心测量精度所需的最低限斑,从而提高了子孔径光斑质心测量的信噪比,降低了哈特曼波前传感器的测量误差。

### 参考文献:

- [1] CARVALHO L A. A simple and effective algorithm for detection of arbitrary Hartmann-Shack patterns[J]. *Journal of Biomedical Informatics*, 2004, 37: 1-9.
- [2] DROSTE D, BILLE J. An ASIC for hartmann-shack wavefront detection dirk droste and josef bille[J]. *Journal of Solid-state Circuits*, 2002, 37(2): 173-182.
- [3] BAYER A, BARKUSKY F, LEINHOS U, et al.. Characterization of absorptance losses in optical materials using a high resolution Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. *SPIE*, 2008, 6879: 1-9.
- [4] VÉDRENNE N, MICHAU V, ROBERT C, et al..  $C_n^z$  profile measurement from Shack-Hartmann data[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(18): 2659-2661.
- [5] SCHWIDER J. Fizeau-type multi-pass Shack-Hartmann-Test[J]. *Optics Express*, 2008, 16(1): 362-372.
- [6] PLATT B C, SHACK R. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2001, 17: 573-577.
- [7] ARES J, MANCEBO T, BARA S. Position and displacement sensing with Shack-Hartmann wavefront sensors[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(10): 1511-1520.
- [8] 姜文汉,鲜浩,杨泽平,等. 哈特曼传感器的应用[J]. *量子电子学报*, 1998, 15(2): 228-235.  
JIANG W H, XIAN H, YANG Z P, et al.. Application of Hartmann sensor [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, 15 (2): 228-235. (in Chinese)
- [9] TORU F, KOSUKE S, YASUSHI M, et al.. In-

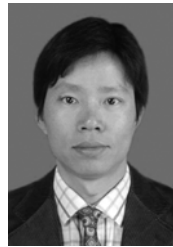
- tegrated projecting optics tester for inspection of immersion ArF scanner[J]. *SPIE*, 2006, 6152: 1-7.
- [10] TORU F, NAONORI K, YASUSHI M. On board polarization measuring instrument for high NA excimer scanner[J]. *SPIE*, 2005, 5752: 846-852.
- [11] YANG J SH, WEI L, CHEN H L, *et al.*. Absolute calibration of Hartmann-Shack wavefront sensor by spherical wavefronts[J]. *Opt. Com.*, 2010, 283: 910-916.
- [12] WANG L, RAO CH H, RAO X J. Analysis of wave-front error for nanometer pinhole vector diffraction[J]. *Opt. precision Eng.*, 2012, 20: 499-505.
- [13] CAO G R, YU X. Accuracy analysis of a Hartmann-Shack wavefront sensor operated with a faint object[J]. *Opt. Eng.*, 1994, 33: 2321-2335.
- [14] JIANG W, XIAN H, SHEN F. Detecting error of Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Optical Engineering*, 1998, 3126: 534-544.
- [15] MA X Y, MU J, TIAN Y, *et al.*. Extension of the modal wave-front reconstruction algorithm to non-uniform illumination[J]. *Opt. Exp.*, 2014, 22: 15589-15598.

#### 作者简介:



马晓燮(1983—),男,四川达州人,副研究员,2006年于电子科技大学获得学士学位,2011年于中国科学院光电技术研究所获得博士学位,主要从事哈特曼波前传感器设计与研制、阵列型单光子计数技术以及太阳能综合利用技术的研究。E-mail: maxiaoyu001@126.com

#### 通讯作者:



饶长辉(1971—),男,江西东乡人,研究员,1993年于武汉测绘科技大学获得学士学位,2001年于中国科学院光电技术研究所获得博士学位,主要从事自适应光学技术研究和系统研制,太阳望远镜的研制与空间天气预报等工作。E-mail: chrao@ioe.ac.cn