

文章编号 1004-924X(2008)07-1203-05

增大夏克-哈特曼波前传感器动态测量范围的方法

李华强^{1,2}, 宋贺伦^{1,2}, 饶长辉¹, 饶学军¹

(1. 中国科学院 光电技术研究所 自适应光学实验室, 四川 成都 610209;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为了使夏克-哈特曼波前传感器(HS)在具有高灵敏的同时又能获得大的动态测量范围,介绍了一种能够增大 HS 动态测试范围的软件处理方法-外推法。在运用外推法时,首先需要找出任意子孔径(A)对应的焦斑位置作为起始点,然后利用外推法得到与 A 相邻的子孔径(B)内的焦斑位置,再以 B 内的焦斑位置作为起始点外推得到与 B 相邻的其它子孔径内的焦斑位置,依次类推,直至把所有子孔径内的焦斑全部找到。文中利用实验对外推法的可行性和实用性进行了验证,结果表明,在超出 HS 动态测量范围 2 倍的情况下,利用外推法可以完美地复原波面,基本解决了 HS 的动态测量范围和灵敏度相互矛盾的问题。

关 键 词:自适应光学;夏克-哈特曼波前传感器;动态范围;外推法;焦斑

中图分类号:O439;TP212.14 文献标识码:A

Extrapolation method to extend dynamic range of Shack-Hartmann wave-front sensor

LI Hua-qiang^{1, 2}, SONG He-lun^{1, 2}, RAO Chang-hui¹, RAO Xue-jun¹

(1. *Adaptive Optical Laboratory, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, ChengDu 610209, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A software-based method called extrapolation method was presented to overcome the trade-off between the sensitivity and the dynamic range of displacement of Shack-Hartmann Wavefront Sensor (HS). Firstly, a beginning focal-spot of a random sub-aperture (A) was obtained, and the focal-spots of the neighbor sub-apertures (B) on A were found through the extrapolation method. By taking a focal-spot of B as the beginning point, the focal-spots of the neighbor sub-apertures on B could be obtained. In the same way, the other focal-spots could also be obtained. In order to demonstrate the feasibility and practicability of the extrapolation method, an experiment was carried out. The results show that the extrapolation method can restore the wave-front while the aberration of the incident wave-front is about twice that of dynamic range of HS, which can satisfy measurement requirements for the large dynamic range and high sensitivity of HS.

Key words: adaptive optics; Shack-Hartmann Wavefront Sensor(HS); dynamic range; extrapolation method; focal-spot

收稿日期:2007-11-02;修订日期:2007-12-29.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1 引言

夏克-哈特曼波前传感器(Shack-Hartmann Wavefront Sensor, 简称 HS)是一种在自适应光学中常用的波前测量仪器^[1-4], 现在已经广泛应用于光学测量^[5-6]、天文观测^[7]和眼科科学^[8-9]等其它领域, 相对于干涉仪而言, HS 具有结构简单、实时性强、对工作环境要求低等优点。

HS 动态测量范围指的是仪器能够测量到的最大波前起伏, 其受限于微透镜的 f 数, f 数越小, 动态范围越大, 而 HS 的测量灵敏度越低, 因此, 在设计 HS 时必须在动态范围和测量灵敏度之间权衡, 迫切需要一种方法在保持 HS 具有高测量灵敏度的同时, 又能获得大的动态测量范围。

增大 HS 动态测量范围的方法可以分为硬件方法和软件方法两类。相对于硬件方法而言, 软件方法具有操作灵活、造价低、不需对 HS 的硬件结构进行改动等优点, 因此经常被用来提高 HS 的动态测量范围。J. Pfund^[10]是最早提出利用软件方法提高 HS 动态范围的, 利用反卷积的方法重新建立起焦斑和子孔径的对应关系; Junwon Lee^[11]按坐标位置对焦斑进行排序, 排列后的焦斑就分别对应着各个子孔径, 这种排序法简单、易于实现, 但需要手工去除那些不参与波面复原的多余光斑。

本文介绍了一种新型的软件处理方法-外推法, 这种方法需要预先知道某个子孔径对应的焦斑, 然后以此为起始点外推得到其它子孔径对应的焦斑。本文详细地介绍了外推法增大 HS 动态测量范围的工作原理, 并通过实验验证了这种方法的可行性和实用性。

2 HS 的动态测量范围

HS 的工作原理如图 1 所示。入射光经微透镜阵列分割采样后会聚到 CCD 上, 每个微透镜都在 CCD 上限定了一个区域称为子孔径, 计算出每个子孔径内的焦斑位置和相对于参考点的偏移量, 最终利用模式法或区域法复原出最终的波面。

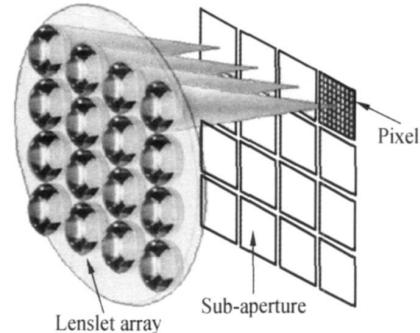


图 1 夏克-哈特曼波前传感器的工作原理图

Fig. 1 Operational principle of HS

子孔径上的波前斜率和焦斑偏移量(Δ_x, Δ_y)成正比关系^[12], 由下式给出:

$$\begin{cases} \Delta_x = \frac{f}{S} \iint \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} dx dy, \\ \Delta_y = \frac{f}{S} \iint \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} dx dy \end{cases}, \quad (1)$$

其中, f 为微透镜焦距, S 为微透镜的面积, W 为入射波前。被测波前起伏越剧烈, 子孔径内光斑的偏移量也就越大。对于 HS 来说, 只要知道了每个子孔径内光斑的偏移量便可以利用不同的数学手段复原出最终的波面。

在传统的 HS 中, 通过微透镜的光束必须会聚于相应的子孔径内, 然后利用子孔径内像素点的输出计算出焦斑位置和相对于参考点的偏移量。HS 的动态范围可以用子孔径内所允许的光斑最大偏移量来描述。对于图 1 中所描述的 HS, 光斑的最大偏移量是 $\frac{\omega}{2}$, 其中 ω 为子孔径的边长, 根据式(1)得:

$$\begin{cases} \frac{\omega}{2} = \frac{f}{S} \iint \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} dx dy, \\ \frac{\omega}{2} = \frac{f}{S} \iint \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} dx dy \end{cases}, \quad (2)$$

入射波面的起伏比较剧烈时, 式(2)右边的积分项变大, 导致子孔径内焦斑的偏移量过大, 超出了 HS 的动态测量范围, 此时通过微透镜的光束不再汇聚到对应的子孔径内, 直接导致了焦斑和子孔径之间的对应关系不再明确, 相对于参考点的偏移量也就不容易得到。外推法就是为了重新找回子孔径和焦斑之间的对应关系而产生的一种软件处理方法。

3 外推法工作原理

图2描述了外推法的工作原理。每个子孔径参考点的坐标在测量之前就是已知的。子孔径(i, j)对应着的焦斑已知(如图2(1)的‘☆’所示),相对于参考点的偏移量用($\Delta x_{i,j}$, $\Delta y_{i,j}$)表示。

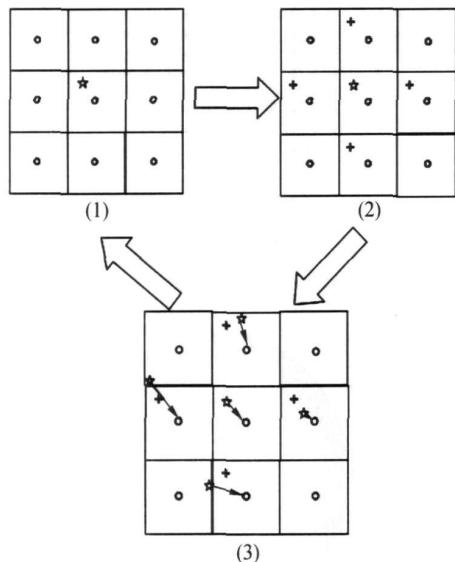


图2 外推法的工作原理图(‘O’表示参考点,‘☆’表示焦斑位置,‘+’表示外推得到的焦斑位置)

Fig. 2 Operational theory of extrapolation method
(‘O’: reference spot, ‘☆’: focal spot, ‘+’: estimated position)

(m, n)表示与(i, j)相邻的子孔径。在微透镜数量很多时,位于子孔径(m, n)、(i, j)上的波面起伏差别很小,根据式(1)可知,在这种条件下子孔径(i, j)、(m, n)对应的焦斑具有大致相等的偏移量,所以子孔径(m, n)对应的焦斑位于($X_{m,n}', Y_{m,n}'$)附近(在图2(2)用‘+’表示),

$$\begin{cases} X_{m,n}' = x_{m,n} + \Delta x_{i,j} \\ Y_{m,n}' = y_{m,n} + \Delta y_{i,j} \end{cases}$$

$$m \in [i-1, i+1]; \quad n \in [j-1, j+1], \quad (3)$$

其中,($x_{m,n}$, $y_{m,n}$)表示子孔径(m, n)内参考点的坐标。

子孔径(m, n)对应的焦斑位置和($X_{m,n}', Y_{m,n}'$)还会有一定的差距,但可以认为在所有的焦斑中,距离($X_{m,n}', Y_{m,n}'$)最近的焦斑对应着子孔径(m, n)。根据式(3)这个判据可以写

成:

$$\min[(X - X_{m,n}')^2 + (Y - Y_{m,n}')^2] = \\ (X_{m,n} - X_{m,n}')^2 + (Y_{m,n} - Y_{m,n}')^2, \quad (4)$$

其中,(X, Y)表示所有焦斑的位置坐标,($X_{m,n}, Y_{m,n}$)表示子孔径(m, n)对应的焦斑坐标。根据式(4)的判断准则,可以找到与子孔径(m, n)对应的焦斑(如图2(3)所示)。

完成图2所述的3个步骤后,再以子孔径(m, n)对应的焦斑作为起始点,重复上面所述的步骤,直至把所有子孔径对应的焦斑找到。由上述可知:外推法就是在已知某个子孔径、焦斑对应关系的情况下,寻找出与该子孔径相邻的子孔径对应的焦斑。

4 外推法的优缺点

从上面的分析中可以看出,外推法除了具备软件处理方法所具有的造价低、编程灵活等优点外,还具有以下优势:(1)外推速度快,如果子孔径A对应的焦斑已知,那么与A相邻的子孔径对应的焦斑都可以通过外推法得到;(2)不受多余焦斑的影响,所谓的多余焦斑就是指不参与波前复原的焦斑,它们是由于微透镜阵列和被测波面在形状、大小上的不匹配而造成的;而外推法只寻找参与复原运算的子孔径对应的焦斑,因此多余焦斑不会对外推法产生影响。

外推法也存在着一些使用上的限制:(1)外推法需要预先知道某个子孔径对应的焦斑,二者对应关系的正确与否将直接决定外推法的成败;(2)式(4)所述的判断条件决定了外推法的使用是有一定限制的;把式(1)、(3)代入式(4)得:

$$\min((X - X_{m,n}')^2 + (Y - Y_{m,n}')^2) = \\ (x_{m,n} + \Delta x_{i,j} - x_{m,n} - \Delta x_{m,n})^2 + \\ (y_{m,n} + \Delta y_{i,j} - y_{m,n} - \Delta y_{m,n})^2 = \\ (\Delta x_{i,j} - \Delta x_{m,n})^2 + (\Delta y_{i,j} - \Delta y_{m,n})^2 = \\ f^2 [(W_{i,j}^x - W_{m,n}^x)^2 + (W_{i,j}^y - W_{m,n}^y)^2], \quad (5)$$

其中, $W_{i,j}^x$, $W_{i,j}^y$ 分别是波面x, y方向的偏导数在子孔径(i, j)内的均值。由式(5)可以看出,外推法的适用范围不但受到波面的偏导数的限制,而且还和波面的曲率有关。

5 实验结果

外推法的可行性可以通过实验得到了验证。

实验装置如图 3 所示。实验中的哈特曼波前传感器主要包括:光源(波长 $\lambda=633 \text{ nm}$), 显微物镜, 针孔(直径 $10 \mu\text{m}$), 准直物镜, 光束匹配系统, 微透镜阵列(20×20 , 微透镜大小: $0.14 \text{ mm} \times 0.14 \text{ mm}$, 焦距 $f=4 \text{ mm}$)和 CCD(像素大小: $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$)。

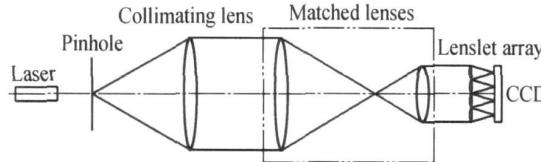


图 3 验证外推法可行性的装置图

Fig. 3 Experimental setup for extrapolation method

实验过程包括两部分:(1)标定参考点,此时针孔位于准直物镜的焦点上,产生的平行光被微透镜聚焦到 CCD 上,根据焦斑质心算法确定子孔径内的光斑位置,记录下这些位置坐标作为每个子孔径的参考点;(2)测量波面,此时针孔沿光轴方向移动,偏离了准直物镜的焦点,根据几何光学的观点,被测光束将产生离焦像差;针孔偏离准直物镜焦点的距离保证了被测光束的像差超出了哈特曼波前传感器的动态范围。

图 4 是 CCD 采集到的光斑阵列,其中方框代表子孔径,很明显,位于最右边三列和最上面两行的光斑都已经超出了 HS 的动态测量范围,其中最大的偏移距离接近于 2 倍的动态范围;并且图

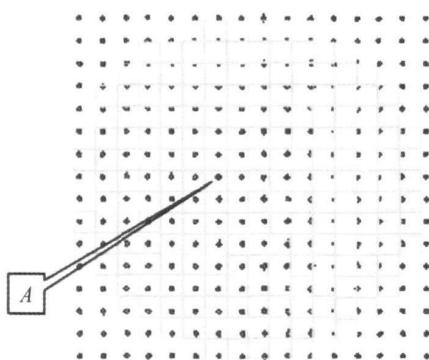


图 4 实验中采集到的点阵图

Fig. 4 Original spot image of HS

中很多边缘点并不参与波前复原运算,此时若采用排序法^[1],必须人为地把这些点去掉,这样既增大了工作量,也有可能把参与运算的点去掉。使用外推法就可以避免这样的问题。首先指定子

孔径 A 对应的焦斑已知,外推法得到的子孔径、焦斑的对应关系如图 5 所示。从点阵的排布来看,波面具有明显的倾斜,去除这些倾斜量,复原出的波面如图 6 所示,很明显离焦像差是最主要的成分,这就充分验证了外推法的可行性。

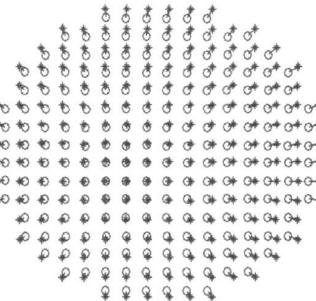


图 5 子孔径和焦斑之间的对应关系图

Fig. 5 Corresponding relationship between focal spots and reference spots

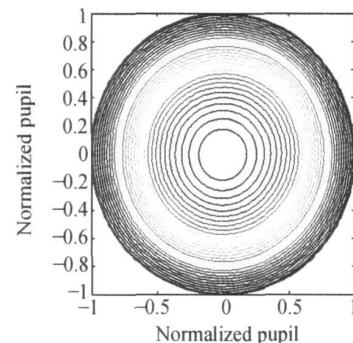


图 6 复原波面的等高图

Fig. 6 Contour of reconstructed wave-front without tilt aberration

6 结 论

外推法是一种能够增大 HS 动态测量范围的软件处理方法,这种方法只需要预先给定某个子孔径对应的焦斑,便可以以此为起点外推得到所有子孔径对应的焦斑。外推法的优点在于不需要对 HS 做任何硬件方面的改变,不需要去除那些不参与运算的光斑点,并且外推速度快,费用低,编程灵活。外推法的使用范围主要受限于事先给定的子孔径、焦斑对应关系的准确性和被测波面的斜率和曲率(第 4 节中所述);其可行性通过实验(第 5 节所述)得到了验证,在超出 HS 动态测量范围 2 倍的情况下,外推法仍然可以完美地复原出波面。

参考文献:

- [1] 沈锋,姜文汉.夏克-哈特曼波前传感器的波前相位探测误差[J].光学学报,2000,20(5): 666-671.
SHEN F, JIANG W H. The measurement error of wavefront phase with Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Acta Opt. Sin.*, 2000, 20(5):666-671. (in Chinese)
- [2] PLATT B C, SHACK R. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing [J]. *Refract Surg*, 2001, 17(9):573-574.
- [3] 吴毅,王英俭.哈特曼波前探测及波前校正的仿真与误差分析[J].光学学报,1995, 15(4): 473-479.
WU Y, WANG Y J. Simulation and error analysis for Hartmann wavefront sensing and deformable mirror wave-front recovery [J]. *Acta Opt. Sin.*, 1995, 15(4):473-479. (in Chinese)
- [4] SOUTHWELL W H. Wavefront estimation from wavefront slope measurement [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1980, 70 (8): 998-1006.
- [5] 姜文汉,鲜浩,杨泽平,等.哈特曼波前传感器的应用[J].量子电子学报,1998, 15(2):228-235.
JIANG W H, XIAN H, YANG Z P, et al . Application of Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, 15(2):228-235. (in Chinese)
- [6] DANIEL M H, DURAN-RAMIREZ V M. Measuring aspheric wavefronts with high accuracy using hartmann test [J]. *SPIE*, 2005, 5776, 524-529.
- [7] 李新阳,姜文汉.湍流大气中哈特曼波前传感器模式波前复原误差[J].强激光与粒子束,2000,12(2): 149-154.
LI X Y, JIANG W H. Zernike modal wavefront reconstruction of error of Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(2): 149-154. (in Chinese)
- [8] 全薇,凌宁,王肇圻,等.哈特曼传感器测量人眼波像差的特性研究[J].光电工程,2003, 30(3):1-5.
QUAN W, LING N, WANG ZH Q, et al . Property study for Hartmann sensor used in measuring wave aberration of human eye [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, 30(3):1-5. (in Chinese)
- [9] LINDLEIN N,PFUND J,SCHWIDER J. Expansion of the dynamic range of a Shack-Hartmann sensor by using astigmatic micro lenses [J]. *Opt. Eng.*, 2000, 39: 2220-2225.
- [10] PFUND J,LINDLEIN N,SCHWIDER J. Dynamic range expansion of a Shack-Hartmann sensor by use of a modified unwrapping algorithm [J]. *Opt. Lett.*, 1998, 23(13): 995-997.
- [11] JUNWON L, SHACK R V. Sorting method to extend the dynamic range of the Shack-Hartmann wave-front sensor [J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(23):835-4845.
- [12] 邓罗根. Hartmann-Shack 波前传感器的 Fourier 光学分析[J]. 光学技术, 1994(2):16-19.
DENG L G. Fourier optics analysis of Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Optical Technique*, 1994(2):16-19. (in Chinese)

作者简介:李华强(1981—),男,山东德州人,博士,主要从事波前探测方面的研究。E-mail: l_h_q @163.com·
饶长辉(1972—),男,四川成都人,研究员,主要从事大气湍流校正以及天文成像方面的研究。