

90-94

第4卷第5期
1996年10月光学 精密工程
OPTICS AND PRECISION ENGINEERINGVol. 4, No. 5
October, 1996光子计数型 Shack-Hartmann
波前探测器研究

张 强 姜文汉

(中国科学院成都光电技术研究所, 成都 610209)

A 摘要 波前探测器是自适应光学系统的一个关键部分, 用来探测由于大气湍流引起的人射光波前畸变。本文通过分析和比较, 选用 ICCD 形式的 Shack-Hartmann 波前探测器, 作为人造信标自适应光学系统的波前探测器。理论分析与实验结果表明: 探测器的动态范围与微透镜口径、焦距及探测器工作波长有关; 影响探测器波前探测精度的因素有光量子起伏噪声、探测器读出噪声和探测器中光学系统成像质量。

关键词: 自适应光学; 波前探测器; 光子计数

15 采用人造信标的自适应光学系统极大地扩展了自适应光学系统的应用范围^[1,2]。但是人造信标自适应光学系统对激光器要求极高, 影响了其实用化进程。对光子计数型波前探测器进行研究的意义在于尽可能降低对信标激光器的要求, 促进人造信标自适应光学系统尽快达到实用化程度。

1 自适应光学波前探测器

人造信标自适应光学系统, 要求波前探测器能在脉冲光方式下进行波前探测, Shack-Hartmann 波前探测器具有量子效率高、没有运动部件的优点, 并且适宜于脉冲光方式下进行波前探测, 因此为世界上绝大多数自适应光学系统所采用。

ICCD Shack-Hartmann 波前探测器由四部分组成: 微阵列透镜、像增强器、耦合物镜、CCD 及图像采集处理系统。波前探测器有两个最主要技术指标: 动态范围和波前探测精度。

动态范围

$$R_x = R_y = \pm \left(\frac{d^2}{2\lambda f} - 1 \right) \quad (1)$$

灵敏度系数

$$\Delta W_x = \frac{P_x}{\lambda FM} (\lambda / \text{Pixel} \cdot \text{子孔径})$$

$$\Delta W_y = \frac{P_y}{\lambda FM} (\lambda / \text{Pixel} \cdot \text{子孔径}) \quad (2)$$

收稿日期: 1996年8月5日

式中: f, d 分别为微透镜的焦距和孔径大小, P_x, P_y 分别为 X, Y 方向的 CCD 像素大小, M 为耦合物镜的成像倍率。

微阵列透镜的口径越大, 或焦距越小时, 探测器的动态范围越大; 波前探测精度由光斑质心探测精度乘上探测器灵敏度系统得到。根据上面的分析, 我们设计建立起了两套 ICCD Shack-Hartmann 波前探测器, 并在上面进行了一系列的原理性实验。

2 波前探测器精度分析

Shack-Hartmann 波前探测器的波前探测精度主要取决于光斑质心的探测精度。影响光斑质心的探测精度的因素主要有^[5-7]:

- 1) 对光斑光信号强度分布的离散采样;
- 2) 光量子起伏噪声;
- 3) 探测器读出噪声。

Jeffrey S. Morgan 等人的工作表明, 如果光斑宽度与探测器靶面上像素宽度的比值大于 1, 则探测器对光斑信号强度分布的离散采样带来的误差可以忽略不计^[6]。因此下面只分析光量子起伏噪声和探测器读出噪声对质心探测精度的影响。光斑质心坐标计算公式:

$$X_c = \frac{\sum_{i,j}^{L,M} X_j N_{ij}}{\sum_{i,j}^{L,M} N_{ij}}, \quad Y_c = \frac{\sum_{i,j}^{L,M} Y_j N_{ij}}{\sum_{i,j}^{L,M} N_{ij}} \quad (3)$$

式中: L, M 分别为子窗口内 X, Y 方向的 CCD 像素数, X_j, Y_j 分别为子窗口内第 (i, j) 个 CCD 像素处的坐标, N_{ij} 为子窗口内第 (i, j) 个 CCD 像素处探测到的光信号强度(单位: ADU)。

假设坐标原点位于每个子窗口的中心, 并且忽略 CCD 不同像素上探测到的光信号强度的协方差, 则有质心探测精度:

$$S_{X_c}^2 = S_{X_c(pn)}^2 + S_{X_c(m)}^2 \quad (4)$$

$$S_{X_c(pn)}^2 = \frac{1}{\sum_{i,j}^{L,M}} (\bar{X}_j^2 - \bar{X}_j^2) \quad (5)$$

$$S_{X_c(m)}^2 = \frac{\sum_{i,j}^{L,M} ((S_{X_r}^2 + \frac{S_r^2}{G^2}) X_j^2)}{(\sum_{i,j}^{L,M} P_{ij})^2} \quad (6)$$

式中: $S_{X_c(pn)}^2$ 为光量子起伏噪声对质心探测精度的影响, $S_{X_c(m)}^2$ 为探测器读出噪声对质心探测精度的影响, $\sum_{i,j}^{L,M} P_{ij}$ 为探测器每个子孔径上每个采样周期内的入射光子计数, $\sqrt{(\bar{X}_j^2 - \bar{X}_j^2)}$ 为光斑宽度, $S_{X_r}^2, S_r^2$ 分别为像增强器噪声和 CCD 读出噪声, G 为像增强器增益。

从上面分析结果表明:

- 1) 光量子起伏噪声和探测器读出噪声是影响波前探测精度的主要因素;
- 2) CCD 靶面上光斑宽度与光量子起伏噪声对波前探测精度有影响;
- 3) 像增强器的增益对 CCD 的读出噪声有抑制作用。

3 实验系统

根据波前探测器精度分析的结果我们进行了一系列实验,实验系统如图 1;系统采用波长 $0.6328 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器作光源,通过加不同透过率的滤光片,可改变出射光强度;分光镜 F1 将平行光束一分为二,一路到达光子计数器,用于监测波前探测器的入射光子计数;另一路到达 Shack-Hartmann 波前探测器。

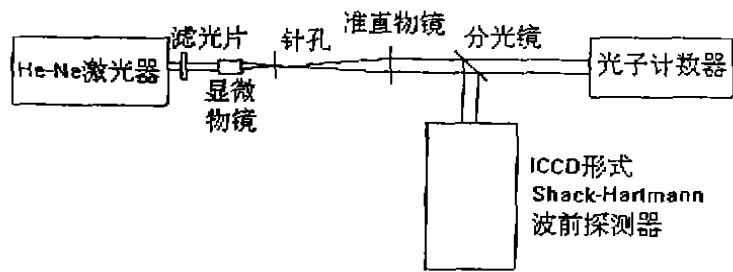


图 1 波前探测精度实验系统

Fig. 1 Experiment system of wavefront sensor accuracy

灵敏度系数是将探测器质心探测精度转换为波前探测精度,灵敏度系数的值可以由公式(1-2)计算得到,也可以通过实验标定得到:在波前探测器之前的平行光路中,放置一块平面反射镜,转动该反射镜使到达探测器的平面波前产生整体倾斜,测出入射波前的整体倾角和光斑质心的漂移量,即可得到波前探测器的灵敏度系数。

4 实验结果及其分析

到目前为止我们只进行波前探测重复精度的实验:在完全相同的条件下,连续采集 10 幅光斑阵列图像,分别对各幅图像中的同一光斑计算出光斑质心坐标,可以得到探测器的光斑质心探测重复精度,乘上探测器灵敏度系数即为探测器的波前探测重复精度。

4.1 微阵列透镜对波前探测精度的影响

我们知道光量子起伏噪声是对探测器波前探测精度的影响,与入射光子计数和 CCD 靶面上光斑宽度有关。当到达探测器的入射光强一定时,微阵列透镜的透过率将影响入射光子计数。1 号和 2 号微阵列透镜具有相同的口径和焦距,实测其透过率分别为:78.9%和 82.0%。

微阵列透镜的成像质量将影响它所形成光斑的能量集中度。若光斑的能量集中度较低,将对探测器的波前探测精度构成影响:展宽实际光斑的宽度;被分散的能量容易被噪声淹没;可能对相邻子窗口的光斑质心坐标的计算造成串扰。光斑环绕能量曲线反映了光斑的能量集中度,图 2 给出光斑环绕能量曲线。图中横坐标为以光斑质心为中心的窗口大小,纵坐标为光斑环绕能量归一化值;点划线和虚线分别为 2 号和 1 号微阵列透镜的光斑环绕能量曲线。

1、2 号微透镜具有完全相同的焦距和口径大小,但 2 号微透镜的透过率和能量集中度均优于 1 号微透镜,因此在相同的实验条件下,2 号微透镜的

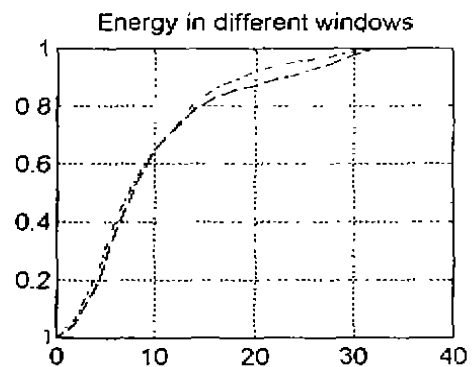


图 2 光斑环绕能量

Fig. 2 Circle energy of spot

质心探测精度应优于 1 号微透镜。实验结果表明：1 号和 2 号微透镜的光斑质心探测精度分别为 0.21263Pixel 和 0.17704Pixel。

4.2 增益对波前探测精度的影响

像增强器增益的目的在于将微弱的入射光信号放大,抑制 CCD 的读出噪声的影响,但是随着像增强器增益的增大,像增强器暗电流的输出值比入射光信号的输出值增大得更快。因此在一定的入射光子计数条件下,像增强器的增益并不是越大越好,而是存在一最佳值使得波前探测精度将最好,图 3 给出入射光子计数为 189 时,波前探测精度随像增强器增益变化的曲线,像增强器增益最佳值约为 60 nt/lx。图中横坐标为像增强器的增益,纵坐标为波前探测精度。不同的探测器在不同的实验条件下,像增强器增益的最佳值可以通过实验得到。

4.3 阈值对波前探测精度的影响

在计算光斑质心坐标时选取阈值,是为了减小探测器读出噪声对波前精度的影响;阈值太小,则不能有效消除探测器读出噪声对波前探测精度的影响;阈值太大,又会减小实际参与计算的有效光子信号。入射光子计数和像增强增益均保持不变时,波前探测精度会随着计算光斑质心坐标时所取阈值的不同而变化,并且存在一个最佳阈值使得波前探测精度为最好,图 4 给出入射光子计数为 189,像增强器增益为 60 nt/lx 条件下,取不同阈值时的波前探测精度,此时最佳阈值为 6。图中横坐标为计算光斑质心时所取阈值,纵坐标为波前探测精度。

4.4 波前探测器的探测精度

由式(4)、(5)、(6)知道,波前探测器探测精度与入射光子计数存在的关系:

$$S_x^2 = \frac{a_1}{\sum_{i,j} P_{ij}} + \frac{a_2}{(\sum_{i,j} P_{ij})^2} \quad (7)$$

对实验结果用上式进行最小二乘法拟合(见图 5)。图中横坐标为探测器每个子孔径每个探测周期内的入射光子计数,纵坐标为波前探测精度。实线为计算得到的仅考虑光量子起伏噪声时的波前精度;虚线和点划线分别为连续光和脉冲光方式下的波前探测精度。可以看到实验结果与式(7)吻合得很好。

实验结果表明:欲达到 0.1λ 的波前探测精度,探测器每个采样周期内每个子孔径上应有的入射光

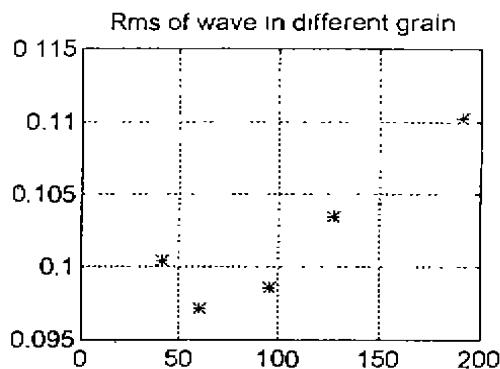


图 3 增益对波前探测精度的影响

Fig. 3 Wavefront sensor accuracy relative to gain

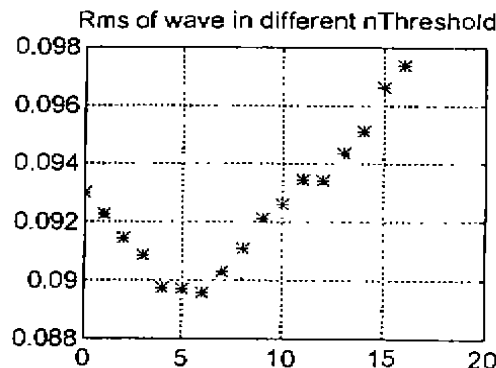


图 4 阈值对波前探测精度的影响

Fig. 4 Wavefront sensor accuracy relative to threshold

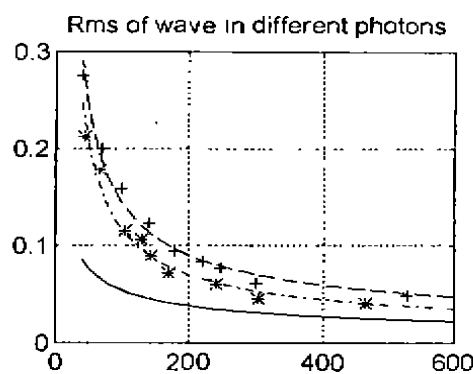


图 5 波前探测器的探测精度

Fig. 5 Wavefront sensor accuracy relative to photon-count

子计数,在脉冲条件下约为 140,在连续光条件下约为 180。

5 总 结

理论分析与实验结果表明:ICCD Shack-Hartmann 波前探测器具有光子计数条件下的波前探测能力,而且可在脉冲光条件下进行波前探测,因此能够满足人造信标自适应光学系统对波前探测器的要求。

增大微透镜的口径,或者减小微透镜的焦距,可以提高探测器的动态范围;提高探测器对入射信号光子的利用率,降低探测器的读出噪声,并提高探测器中光学系统的成像质量是提高波前探测精度的主要途径。欲提高探测器对入射信号光子的利用率,应提高微阵列透镜的透过率;欲降低探测器读出噪声,应选用小暗电流的像增强器和低暗背景噪声的 CCD,像增强器应具有适当的增益,此外在计算光斑质心时应选取合适的阈值。

参 考 文 献

- [1] Gardner etc., Design and Performance Analysis of Adaptive Optical Telescopes Using Laser Guide Stars. Proceedings of IEEE, 1990, 78(11)
- [2] R. Foy. and A. Labeyrie, Feasibility of Adaptive Telescope with Laser Probe. Astrophys., 1985, L29, 152
- [3] Herbert T. Barclay 等著, 杨泽平译, SWAT 波前传感器. 自适应光学望远镜译文集(第四集), 中国科学院成都光电技术研究所编辑, 1994
- [4] J. W. Hardy etc., Real Time Atmospheric Compensations. JOSA, 1977, 67(3)
- [5] Jeffrey S. Morgan etc., Centroid Position Measurements and Subpixel Sensitivity Variations with the MAMA Detector. Applied Optics, 1989, 28(6)
- [6] Ronald R. Parenti and Richard J. Sasiela, Laser-guide-star System Forastronomical Applications. JOSA, 1994, 11(1)
- [7] Genrui Cao, Xin Yu, Accuracy Analysis of a Hartmann-Shack Wavefront Sensor Operated with a Faint Object. Optical Engineering, 1994, 33(7)

The Research of Shack-Hartmann Wavefront Sensor in Photon Counting Condition

Zhang qiang, Jiang Wenhan

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

Abstract

Wavefront sensors, one of key parts of Adaptive Optical System, are used to measure wavefront distortion induced by atmosphere turbulence and so on. In this thesis, several kinds of wavefront sensors, which can be used in the Adaptive Optical System, are compared and analyzed, and the ICCD Shack-Hartmann wavefront sensor is chosen for the Laser Guide Star Adaptive Optics System. According to the theoretical analyses and experimental results, the dynamic range is relative to the diameter and focal length of the lenslet and detecting wavelength. The factors affecting on the accuracy are photon noise, readout noise and quality of the lens of the sensor.

Key words: Adaptive Optical system, Wavefront sensor, Photon-counting.

张 强 男, 1968 年 9 月生, 1990 年 7 月毕业于浙江大学光学仪器工程系(学士), 1996 年 7 月毕业于中国科学院成都光电技术研究所(工学硕士)。从事自适应光学的研究工作。