

提高人眼波前传感器信噪比的实验研究*

高卫华, 王肇圻, 母国光

(南开大学、天津大学联合研究院 南开大学 现代光学研究所
光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要: Hartmann-Shack(H-S)人眼波前传感器噪声主要是角膜的反射光。本文用模拟人眼对消噪声的两种方法进行了实验研究。首先,对使用偏振分光棱镜(PBS)的 H-S 系统,在系统出瞳不变,入瞳变化的条件下测量了对应的信噪比。实验证明:与采用薄半透半反镜相比,在光线斜入射消除 PBS 内部反射噪声的前提下,该方法可使信噪比提高到 11:1。其次,对离轴入射法进行实验研究,获得 200:1 信噪比,最后对上述两种方法获得的光斑点阵进行了比较分析。

关键词: 人眼波前像差; Hartmann-Shack 波前传感器; 偏振分光棱镜; 离轴入射

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)01-0058-04

Experimental study of wavefront sensors for increasing signal-to-noise ratios*

GAO Wei-hua, WANG Zhao-qi, MU Guo-guang

(United Academy of Nankai University and Tianjin University, Institute of Modern Optics, Nankai University,
The Key Laboratory of Ministry of Education Opto-electronic Information Science and Technique, Tianjin 300071, China)

Abstract: The primary factor resulting in the noise of Hartmann-Shack wavefront sensors is the light reflected from corneas. A Hartmann-Shack apparatus with unequal entrance and exit pupil sizes are used to investigate two different ways of reducing noise, by measuring the signal-to-noise ratios in artificial eyes. Firstly, in the case of polarization beam splitters with inner reflection removed, the maximal signal-to-noise ratio is shown to be 11:1, which is much higher than that got by using a traditional pellicle beam splitter. Secondly, the off-axial methods are used and the result is 200:1. The results above and corresponding spots arrays are discussed and illustrated.

Key words: Wavefront aberrations of eyes; Hartmann-Shack wavefront sensor; Polarization beam splitter; Off-axial

0 引言

人眼视力的矫正至少有数百年的历史。Helmholtz

通过观测发现人眼除了传统的离焦和像散之外,还存在其他高阶像差^[1]。1994年,Liang 首创了用 Hartmann-Shack 波前传感器来测量人眼的波前像差^[2],这种客观

收稿日期:2004-02-20; 修订日期:2004-05-29

* 基金项目:天津市科技攻关重点项目资助(033183711)

作者简介:高卫华(1976-),男,河北石家庄人,硕士生,主要研究方向为人眼波像差。

测量的方法目前已得到广泛应用。然而由于视网膜的反射光相当弱,而高阶像差的分量相对较小,所以测量中出现的噪声会严重影响结果。因此消除噪声成了 Hartmann-Shack 人眼传感器系统设计中重要的一环。

在人眼波前传感器中,噪声分为:系统中的光学器件和人眼角膜的反射光形成的噪声;激光散斑所造成的噪声;视网膜的多层干涉形成的噪声^[3]。其中第一部分占比最大。

Hartmann-Shack 人眼波前传感器在初期多采用薄半透半反镜作分光装置,采用计算机图像处理的方法消噪声,这种方法会造成一定的误差^[2]。Liang 在 1997 年的实验中采用了偏振分光棱镜代替半透半反镜的方法提高信噪比^[4]。2000 年 H.Hofer 提出了用光线离轴入射人眼的方法消噪声^[3]。

用模拟人眼对上述方法进行实验研究表明,与同条件下采用薄半透半反镜相比,在解决内部反射噪声的影响后,使用偏振分光棱镜可将信噪比提高到 11:1;离轴入射法可得到 200:1 的信噪比。

1 装置

Hartmann-Shack 波前传感器测量过程如图 1 所示。

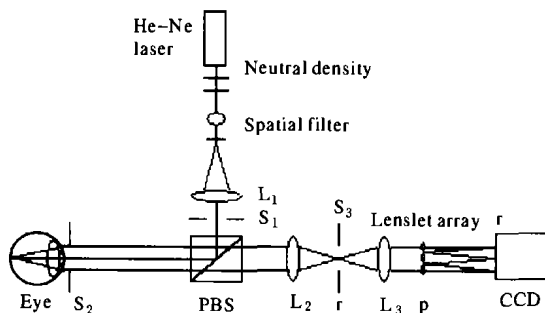


图 1 Hartmann-Shack 人眼波前传感器装置图

Fig.1 Schematic of Hartmann-Shack wavefront sensor for the eye

一束功率为 5 mW 的线偏振 He-Ne 激光先后通过一个中性滤光片和空间滤波器,再由透镜 L_1 准直为平行光,经薄半透半反镜或偏振分光棱镜反射后,入射到模拟人眼光学系统,会聚在视网膜上。视网膜上的漫反射光线经过人眼光学系统后形成一个形变的波前,再次经过分光器,透镜 L_2 和 L_3 将瞳孔按比

例成像在微透镜阵列上。

入射到眼睛的光束孔径由入瞳控制,光阑 S_1 和 S_2 控制系统入瞳与出瞳。光阑 S_3 的作用是消除角膜和镜面反射光。与视网膜和瞳孔共轭的平面分别用 r 和 p 标出。

实验中的模拟人眼由两部分组成,前半部分为一焦距 18 mm 小凸透镜,其前表面曲率半径与角膜接近,模拟角膜;后半部分为一块经过特殊处理的磨砂平面,模拟视网膜。对于实际人眼,光进入眼睛时,在空气和角膜界面上约被反射掉 2.5%,在到达视网膜的过程中会再损失 80%^[5],采用 $0.632 \mu\text{m}$ 的光照射时,视网膜的反射率约为 10%。为了和真实人眼的角膜反射率、眼内吸收、视网膜反射率保持一致,模拟角膜反射率为 5%,模拟视网膜反射率为 0.8%,则从小透镜前表面的反射光强与经模拟眼出射的光强比与实际人眼的情况近似。

2 用偏振分光棱镜提高信噪比

偏振分光棱镜可以将入射的任意一束偏振光分成偏振状态互相垂直的两束偏振光,透射光用 p 表示,反射光用 s 表示,从垂直相邻的两表面出射,并且 $T_p:T_s$ 能保持很高的消光比。在 Hartmann-Shack 波前传感器中,经偏振分光棱镜反射后入射人眼的为 s 光,经过人眼光学系统后,得到角膜反射光(噪声)和视网膜反射光(信号)。角膜反射光,即 Purkinje 像,按反射点不同可分为四类: P_1, P_2, P_3, P_4 像^[6],其中角膜前表面反射的 P_1 像能量最强,占的比重最大^[7],因此角膜反射噪声近似认为是 P_1 像。成 P_1 像的反射光线偏振方向不发生变化^[6],仍保持 s 方向。但视网膜的反射光偏振态却发生了改变,不再是单纯的 s 光,这是由人眼光学系统的特性造成的^[8,9]。所以偏振分光棱镜可以滤掉角膜反射光,而让视网膜反射光通过,从而提高信噪比。而对半透半反镜,二者的透射率相等。

虽然使用偏振分光棱镜可以提高信噪比,但是在正入射时棱镜自身的内部反射噪声会对信号产生很大的影响。

实验中尝试将棱镜偏转一个角度,令光线斜入射来消除内部的反射噪声,如图 2 所示。

由偏振分光棱镜的参数可知,入射光的入射角可

在 $45^\circ \pm(0^\circ \sim 2^\circ)$ 之间变化,不影响棱镜的性能。入射

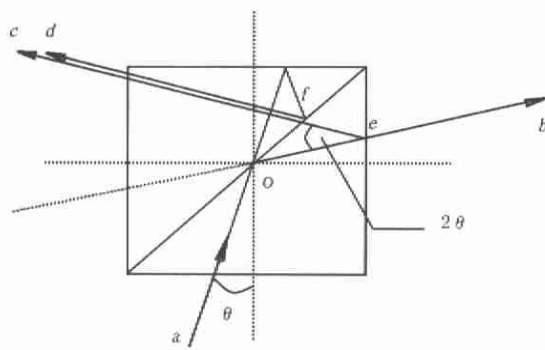


图 2 偏振分光棱镜内部反射光路图

Fig.2 Optical path inner the polarization beam splitter

光 ao 以 $\theta=1.5^\circ$ 斜入射,出射光 ob 和内部反射光 ec 、 fd 夹角为 $2\theta=3^\circ$,选取透镜 L_2 焦距为 10 cm, S_3 孔径为 1 mm,这时内部反射光交 S_3 于距中心 5.2 mm 一点,被全部消除。表 1 给出了使用薄半透半反镜、偏振分光棱镜正入射和偏振分光棱镜斜入射时实测的信噪比,模拟人眼出瞳 7 mm 不变,入瞳分别为 1.5、2、3、4、5、7 mm(光阑 S_3 在视网膜的共轭面,起到限制角膜反射光通过的作用,在测量过程中孔径也保持 1 mm 不变)。

表 1 不同条件下信噪比随入瞳的变化

Tab.1 Signal-to-noise ratios as a function of various entrance pupils under different conditions

Entrance pupil/mm	1.5	2	3	4	5	7
BS	1:3	1:3	2:3	5:8	5:6	1:1
PBS1	1:2	2:5	1:2	1:2	7:15	10:23
PBS2	1:1	2:1	3:1	5:1	7:1	11:1

BS: Signal-to-noise ratios corresponding to the pellicle beam splitter

PBS1: Polarization beam splitter with normal incidence

PBS2: Polarization beam splitter with inclined incidence

实验表明,无论采用薄半透半反镜还是偏振分光棱镜,人眼波前传感器的信噪比都会随着入瞳的增大而提高。这是由于光阑 S_3 的限制,入瞳边缘处对应的角膜反射光都被滤掉,只有中心点附近反射的平行光轴的光线才可以通过。保持入射能量不变,入瞳增大时,通过 S_3 的角膜反射光能量密度减小,而视网膜反射光能量密度不变,所以提高了信噪比。

由表 1 可看出,偏振分光棱镜正入射不仅没有提高信噪比,反而比采用薄半透半反镜有所降低。考虑偏振分光棱镜斜入射,入瞳 3 mm 时,使用偏振分光棱镜的信噪比是半透半反镜的 4.5 倍,在入瞳为 7 mm 时,两者相差 11 倍。因此相对于传统的半透半反镜法,光线斜入射偏振分光棱镜可以较大地提高传感器的信噪比,获得清晰的光斑点阵。所采光斑如图 3 所示,(a)图是薄半透半反镜采得的光斑,(b)图和(c)图分别对应偏振分光棱镜正入射和斜入射。

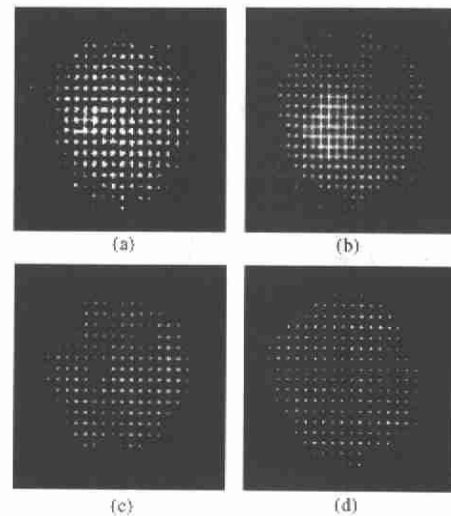


图 3 光斑点阵

Fig.3 Spots array

3 离轴入射提高信噪比

偏振分光棱镜虽然能较大幅度提高信噪比,但总有部分角膜反射光无法消去;并且由于其对偏振方向的筛选性,使相当一部分的视网膜反射光无法通过^[8,9],衰减了信号。

采用离轴入射的方法,不但可以提高信噪比,而且还能增加透射的视网膜反射光的能量和 CCD 上光斑的均匀性^[3]。实验系统如图 4 所示。一束孔径 1.5 mm 的 He-Ne 激光经薄半透半反镜反射后,沿平行于光轴的方向射入模拟人眼,入射点偏离角膜中心,角膜上的反射光束与光轴成一定夹角返回,调节光阑 S_3 足够小,可以完全消掉这部分噪声。实验测得,入射点偏离中心 1、2、2.75 mm 时, S_3 对应 1、3、5 mm 时可以很好消去反射噪声。随入射点偏离距离增大, S_3 孔径变大,获得的信号光能量也增大,选取中心偏离 2 mm,此时所测信噪比达 200:1。

虽然离轴入射使视网膜漫反射光的光强分布与沿光轴入射稍有不同,但 Hartmann-Shack 波前传感器测量的是光斑与参考点阵的相对移动,通过光斑移动的斜率算出眼睛的波像差和泽尼克系数,所以离轴入射不会对测量精度产生影响,这一点已被实验所证实。而且薄半透半反镜不具有对偏振态的筛选性,会使入射到 CCD 上的视网膜反射光能量有很大提高,大幅提高信噪比,得到极为清晰的图样,如图 3 (d) 所示。

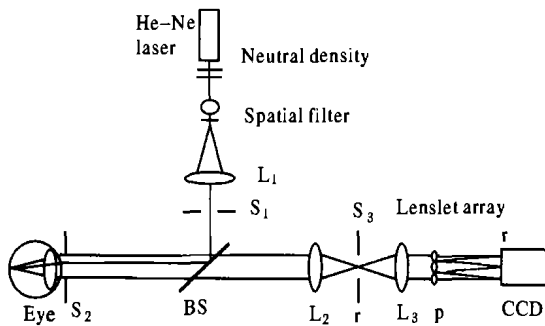


图 4 离轴入射的 Hartmann-Shack 人眼波前传感器

Fig.4 Schematic of Hartmann-Shack wave front sensor for the eye with off-axial methods.

4 结论

实验研究了消除波前传感器中角膜反射光噪声的两种方法,并通过实验用模拟人眼进行了验证。

利用偏振分光棱镜虽然可以提高信噪比,但其额外带来的内部反射噪声是正入射时不可克服的困难。用旋转偏振分光棱镜,使光线斜入射的方法在保证原

有高信噪比的前提下,完全消去了偏振分光棱镜的内反射噪声。但由于偏振分光棱镜对偏振态的筛选性,使反射信号有一定程度衰减,不利于测量。离轴入射法解决了这一问题,这种方法不但具有高信噪比而且增加了入射到 CCD 上信号的能量,并使光斑的均匀性得到提高。

参考文献:

- [1] H von Helmholtz. *Physiological Optics*[M]. New York: Dover, 1896.
- [2] Liang J, Grimm B, Goelz S, et al. Objective measurement of the wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor[J]. *J Opt Soc Am A*, 1994, 11: 1949-1957.
- [3] Hofer H, Artal P, Singer B, et al. Dynamics of the eye's wave aberration [J]. *J Opt Soc Am A*, 2000, 18: 497-506.
- [4] Liang J, Williams D R. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye[J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14: 2873-2883.
- [5] 潘笃武, 贾玉润, 陈善华. *光学*[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1997.
- [6] Pierscionek B K, Weale R A. Investigation of the polarization optics of the living human cornea and lens with Purkinje images[J]. *Applied Optics*, 1998, 37: 6845-6851.
- [7] Williams D R, Brainard D H, McMahon M J, et al. Double-pass and interferometric measures of the optical quality of the eye[J]. *J Opt Soc Am A*, 1994, 11: 3123-3135.
- [8] Van Blokland G J. Ellipsometry of the human retina in vivo: preservation of polarization[J]. *J Opt Soc Am A*, 1985, 2: 72-75.
- [9] Bueno J M, Artal P. Double-pass imaging polarimetry in the human eye [J]. *Optic Letters*, 1999, 24: 64-66.

(上接第 57 页)

- [2] Glatzel H, Schmid M, Egle W, et al. Assembly, performance prediction and X-ray test of the demonstration model ODM for the X-ray telescope XMM [A]. *SPIE[C]*. 1994, 2210: 360-372.
- [3] Geary J M. Interferometry on grazing incidence optics [J]. *Optical Engineering*, 1987, 26(12): 1125-1128.
- [4] Geary J M. Interferometry on Wolter X-ray optics: a possible approach[J]. *Optical Engineering*, 1989, 28(3): 217-221.
- [5] 欧阳自远, 李春来, 邹永廖. 深空探测进展与开展我国深空探测的思考[J]. *国际太空*, 2003, (2): 2-6.
- [6] Alfred Gatzweiler, Holger Glatzel. Interferometric measurement of near-cylindrical surfaces with high amplitude resolution[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(31): 7207-7212.
- [7] Geary J M. New test for cylindrical optics[J]. *Optical Engineering*, 1987, 26(8): 813-820.