

自参考干涉波前传感器中针孔直径对闭环自适应光学系统校正精度的影响

白福忠^{1)2)3)4)†} 饶长辉¹⁾²⁾

1)(中国科学院光电技术研究所,成都 610209)

2)(中国科学院自适应光学重点实验室,成都 610209)

3)(内蒙古工业大学机械学院,呼和浩特 010051)

4)(中国科学院研究生院,北京 100049)

(2009 年 12 月 22 日收到;2010 年 2 月 8 日收到修改稿)

使用自参考干涉波前传感器(SRIWFS)进行波前的绝对测量时,为了获得近似平面波前的参考波,针孔直径应该不大于无畸变光学系统艾里斑直径(d_A)的一半,然而这必将导致光能利用率的严重下降.为了最大程度地提高光能利用率并改善干涉条纹的对比度,研究了 SRIWFS 应用于闭环校正中所允许的最大针孔直径,这将在闭环开始阶段尤为重要.数值模拟和实验表明,直径不大于 $1.5d_A$ 的针孔可以获得满意的校正结果,校正后远场斯特列尔比高于 80%;同时光能利用率也将得到极大提高,对于无畸变波前,当针孔直径由 $0.5d_A$ 增大至 $1.5d_A$ 时,强度通过率由 63% 增加至 90%.

关键词: 自适应光学, 自参考干涉波前传感器, 针孔直径, 闭环校正

PACC: 9265, 4225G, 4285F

1. 引 言

自参考干涉波前传感器(SRIWFS)^[1]原理上等同于一个点衍射干涉仪^[2],由于其参考波是通过针孔衍射产生而不再需要人为引入,因此被称之为自参考. SRIWFS 直接测量通过每一子孔径(像素)光束的波前,于是理论上不受强闪烁的影响^[1]. 而当前许多自适应光学(AO)系统依赖梯度传感器,如夏克-哈特曼波前传感器(HS WFS)^[3,4]、横向剪切干涉仪去估计波前畸变. 当强闪烁出现时,由于波前相位中分歧点的出现使得这些系统的性能严重下降^[5]. 与其他波前传感器相比较,基于点衍射干涉原理的 SRIWFS 还具有波前重建算法简单的特点. 在国外,美国劳伦斯国家实验室将自参考马赫-曾德干涉仪应用于激光系统诊断^[6]. 美国空军研究实验室则将其专门应用在强闪烁下的激光传输^[1]. 在我国,中国科学院光电技术研究所将 SRIWFS 应用于 AO 系统的相关研究工作也正在进行^[7].

基于傅里叶光学理论,文献[8]详细分析了 SRIWFS 中针孔直径与参考波前以及光强通过率的关系,并且指出,当 $d \leq 0.5d_A$ 时产生的参考波前的均方根值(Φ_{RMS})低于 $\frac{\lambda}{100}$, 这里 d 表示针孔直径, d_A 表示光学系统的艾里斑直径, λ 表示波长. 这个结论对于 SRIWFS 的设计以及测量精度分析具有非常重要的参考价值. 然而,文献[8]同时指出,当 $d = 0.5d_A$ 时,无畸变点扩散函数通过针孔后的强度将减小到原始光强的 63%;而畸变点扩散函数强度通过率较无畸变时更会严重降低. 于是为了在波前测量时取得较好的条纹对比度进而保证波前测量精度,因而需要对目标光强度也进行衰减. 由此必将会导致光能利用率的严重下降,这也限制了它在某些弱光条件下的应用.

对于闭环 AO 系统,并不要求波前传感器单次测量精度达到很高,而只需考虑闭环校正精度. 于是我们便产生这样一个合理假设:当将 SRIWFS 应用于 AO 系统中时,针孔的直径可以适当增大,在保

† E-mail: b_fzh@yahoo.cn

证所需的闭环校正精度的前提下尽可能使用最大直径的针孔,这样可以最大程度地提高光能利用率.基于此,本文通过数值模拟与实验两种方式分析了 SRIWFS 应用于闭环校正中时所允许的最大针孔直径.

2. SRIWFS 原理

本文建立的 SRIWFS 是基于改进的马赫-曾德型点衍射干涉仪而设计,其光路图如图 1 所示.入射的畸变波前首先通过分束镜分成两束,一束经针孔滤波后作为参考波,与另一束包含畸变波前信息的目标波通过另一个分束镜会合并产生干涉.通过分析干涉条纹可以重建波前相位.

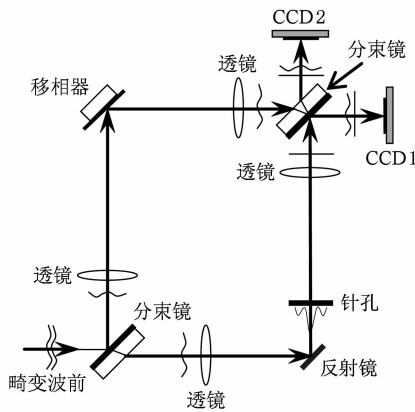


图 1 SRIWFS 光路图

2.1. 波前相位重建

图 1 所示的 SRIWFS 光路中,两个分束镜均为 50:50 非偏振分束镜,颜色较深的一面表示反射面.根据半波损失原理可知,两个 CCD 探测器采集到的两帧干涉图之间的相位差等于 180°.于是这两帧互

补的干涉图可以表示为

$$I_0 = A + B\cos(\Phi), \quad (1a)$$

$$I_1 = A - B\cos(\Phi). \quad (1b)$$

式中 A 和 B 分别表示背景强度和调制度, Φ 为待测相位分布.以上所有量都为坐标 (x, y) 的函数,为了书写方便已经将坐标省略.应用文献[9]中的方法对移相器进行精确标定后可以获得移相器相移量与驱动电压之间的响应关系.于是当移相器引入 90°相移以后,另两帧干涉图可以被采集,并用下式来表示:

$$I_2 = A - B\sin(\Phi), \quad (1c)$$

$$I_3 = A + B\sin(\Phi). \quad (1d)$$

于是通过下式可以计算出波前相位^[10]:

$$\Phi = \arctan\left(\frac{I_3 - I_2}{I_0 - I_1}\right), \quad (2)$$

进一步对该结果进行相位解缠绕后可以得到待测相位分布.

文中的 SRIWFS 只需两次采集、一次移相便可重建波前相位,因而与传统四步移相技术相比其测量实时性明显改善,当然我们还可以采用一些空间移相技术^[11]来更进一步改进测量的实时性;同时,与文献[12—14]中的方法相比较,文中的方法无需制作复杂的掩模板,也无需另外设计特殊的光学元件^[1,15],结构简单且成本低.然而由于没有采用共光路设计,因而这种方法抗干扰能力较差.

2.2. 针孔滤波原理分析

通过针孔衍射产生参考波前是 SRIWFS 的一个关键部分.图 2 显示了一个标准的 4f 针孔滤波系统.目标波与参考波产生的干涉图成像于图像平面,而在图像平面上的参考波前能够通过傅里叶理论确定.透镜 1 和透镜 2 为一对傅里叶透镜,用来实现两次傅里叶变换.针孔(小圆孔)放置在透镜 1 的

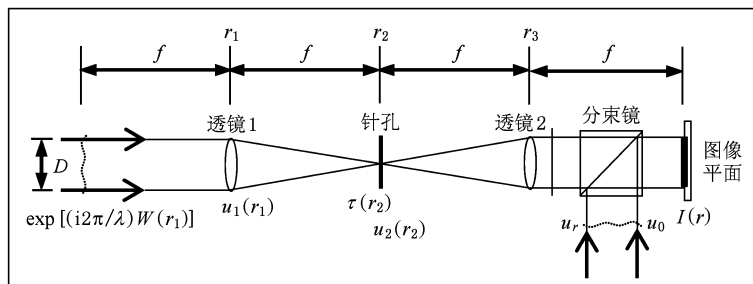


图 2 针孔滤波系统

后焦面上,并与透镜1的后焦点对准,这便实现了低通滤波.再经透镜2后得到的参考波前仅包含低频分量,如果针孔直径足够小可将其近似作为平面波使用.有关参考波前相位的详细理论分析可参阅文献[8],这里将重点分析针孔滤波对参考波强度的影响.

一束振幅为1,相位分布表示为 $W(r_1)$ 的畸变波前入射至透镜1,透镜1的直径为 D ,焦距为 f .紧接着透镜1后的光场能够使用原始波前与透镜光瞳函数的乘积来描述为

$$u_1(r_1) = \text{cyl}\left(\frac{r_1}{D}\right) \exp[(2\pi i \lambda) W(r_1)]. \quad (3)$$

圆函数 $\text{cyl}\left(\frac{r_1}{D}\right)$ 表示:当 $r_1 < \frac{D}{2}$ 时, $\text{cyl}\left(\frac{r_1}{D}\right) = 1$;

其他情况下, $\text{cyl}(r_1/D) = 0$.光场 $u_1(r_1)$ 传播至焦平面上时可用它的傅里叶变换 $U_1(r_2)$ 来表示,频谱面上的空间频率 ρ 与空间坐标 r_2 的关系为: $\rho =$

$\frac{r_2}{\lambda f}$.焦平面上一个直径为 d 的针孔相当于理想圆形低通滤波器,其滤波函数可写成

$$\tau(r_2) = \text{cyl}(r_2/d), \quad (4)$$

于是在针孔后面的光场复振幅为

$$u_2(r_2) = \tau(r_2) U_1(r_2). \quad (5)$$

透镜2将经过滤波器的光场成像在图像平面.

针孔前后总能量之比定义为参考波的强度通过率

$$T = \frac{\sum |u_2(r_2)|^2}{\sum |u_1(r_1)|^2}, \quad (6)$$

式中, T 表示强度通过率,求和符号表示在整个光瞳内对强度进行求和运算.下面以一个平面波前与一个离焦波前(峰谷值 $\Phi_{\text{PV}} = 1\lambda$)为研究对象,分析它们经针孔滤波后 T 与 d 的变化关系,结果如图3所示,针孔直径 d 的单位用系统艾里斑直径 d_A 来表示.由图3可知,对于平面波前,当 d 由 $0.1d_A$ 增大

至 $0.7d_A$ 时, T 由4%迅速增加至80%;然后当 d 再逐渐增大时, T 增加缓慢.然而对于离焦波前, T 将严重降低,例如当 $d = 0.5d_A$ 时,平面波前与离焦波前的强度通过率 T 分别等于0.5%和63%.

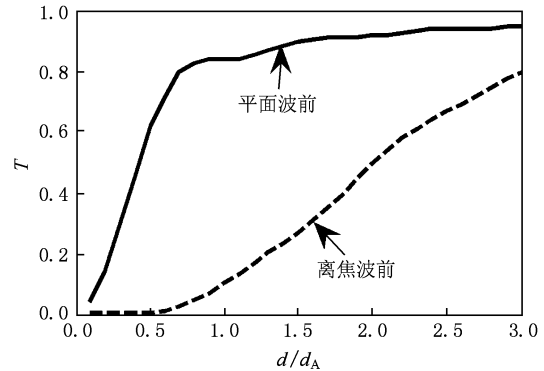


图3 强度通过率 T 与针孔直径 d 的关系

3. 基于SRIWFS的闭环AO系统

3.1. 闭环校正数值模拟

使用数值模拟测试不同直径针孔的闭环校正能力与闭环稳定性.闭环AO系统数值模拟示意图显示于图4.通过在入射波前的频谱面放置针孔滤波器以实现入射波前的低通滤波,这样便可得到参考波;根据图1所示的SRIWFS原理产生四帧移相干涉图,并将其量化到0—255级灰度,这等价于实验系统中8位CCD探测器所采集到的无噪声数据.应用2.1节介绍的方法重建波前相位.重建的相位(ε)被输入到校正器SLM,SLM更新数据后与原始畸变波前叠加产生校正波前,然后进行闭环操作.校正过程中的远场斯特列尔比(SR)由残余相位误差计算得到.

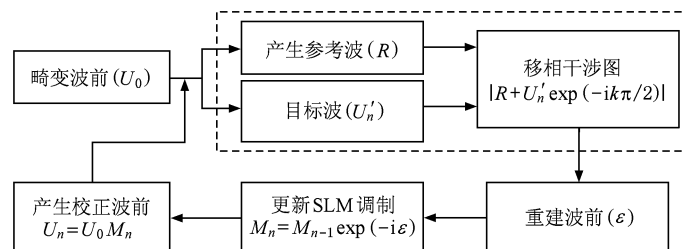


图4 闭环AO系统数值模拟示意图

将前 25 阶泽尼克像差 ($\Phi_{PV} = 1\lambda$) 作为原始波前进行模拟闭环操作, d 分别等于 $d_A, 1.5d_A$ 和 $2d_A$, 闭环校正后的 SR 显示于图 5. 模拟结果表明, 当 $d = d_A$ 时, 所有泽尼克像差均可以实现完全的闭环校正, 校正后的 SR 接近 1; 当 $d = 2d_A$ 时, 仅仅对某些泽尼克像差可以实现较高精度的校正; 而当 $d = 1.5d_A$ 时, 仍可以对所有泽尼克像差实现较高精度的校正, 校正后的 SR 高于 96%. 同时由图 3 发现, 当 d 由 $0.5d_A$ 增大到 $1.5d_A$ 时, 对于平面波前, T 由 63% 增加至 90%; 对于离焦波前 ($\Phi_{PV} = 1\lambda$), T 由 0.5% 增加至 27%.

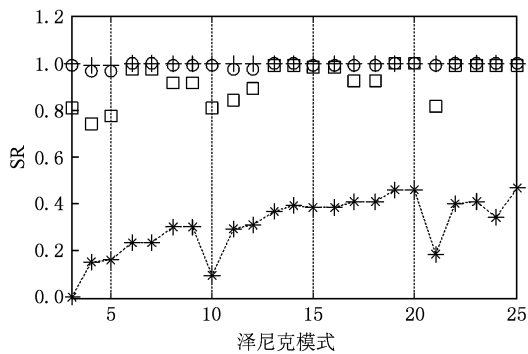


图 5 前 25 阶泽尼克像差模拟闭环校正结果 ('*' 表示校正前的 SR, 'x', 'o' 和 '□' 分别表示 d 等于 $d_A, 1.5d_A$ 和 $2d_A$ 时闭环校正后的 SR)

3.2. 实验 AO 系统

闭环 AO 系统实验光路显示于图 6, He-Ne 激光器产生的线偏振光经扩束准直后入射至液晶空间光调制器 (LCSLM), 然后由其反射后进入 SRIWFS. 在 SRIWFS 中, 入射光束首先被分成目标波和参考波. 一部分目标波由透镜 3 成像到 CCD1, 另一部分

目标波与参考波重新会合后产生干涉. 放置于 LCSLM 共轭位置的 CCD2 能够同时采集到两帧相位差为 180° 的干涉图. 当移相器分别引入 0° 和 90° 相移后, SRIWFS 一共可以获得四帧相位差为 90° 的移相干涉图, 根据 (2) 式可以计算出波前相位, 使用计算结果的共轭函数驱动 LCSLM 实现波前畸变的校正.

使用在实验系统中的 LCSLM 已经在我们的实验室进行了广泛研究, 包括相位调制特性以及畸变补偿能力的测量和研究^[16-18]. 同时, 由于 LCSLM 可以实现纯相位调制且能够准确地拟合出低阶像差^[18,19], 这将有助于我们准确对比模拟和实验结果. 实验中, 一个 $D/r_0 = 5$ 的大气湍流相位屏 (由前 35 阶泽尼克像差组成; 其中, D 表示入瞳直径, r_0 表示 Fried 常数) 首先由 LCSLM 产生, 并将在闭环校正时一直加载于 LCSLM. 于是, LCSLM 产生的畸变波前与系统固有像差之和将被 SRIWFS 测量, 然后将测量结果的共轭函数输入 LCSLM, 闭环校正开始工作.

实验中, 光学系统艾里斑直径 $d_A = 2.44\lambda f/D \approx 50 \mu\text{m}$, 其中 f (150 mm) 是透镜 1 的焦距, D (4.61 mm) 是入瞳直径, λ (632.8 nm) 是入射光的波长. 我们使用了四个不同直径 ($1.1d_A, 1.3d_A, 1.5d_A$ 和 $1.7d_A$) 的针孔去研究它们对闭环校正结果的影响. 8 位图像探测器 CCD1 记录远场点扩散函数, 而 SR 通过 HS WFS 测量出的残余相位误差进行估计得到. 闭环校正前后波前相位分布以及远场图像分别显示于图 7 和 8. 实验结果显示, 不同直径的针孔对畸变波前的校正效果各有差异; 针孔直径越大闭环校正精度越低.

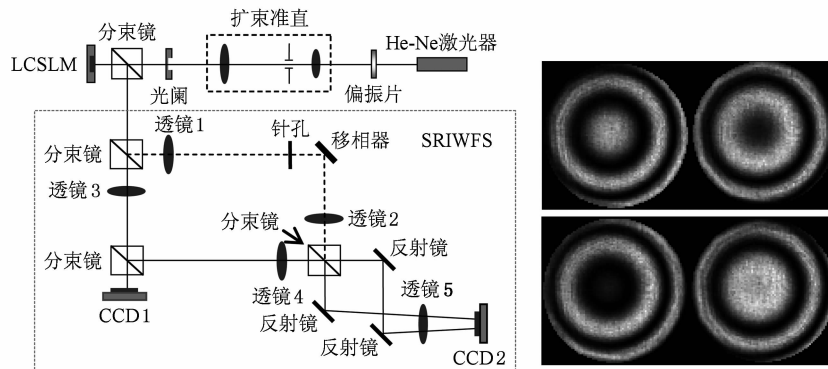


图 6 闭环 AO 系统实验光路 (右侧图像表示当引入一个离焦波前后由 CCD2 采集得到的两组移相干涉图)

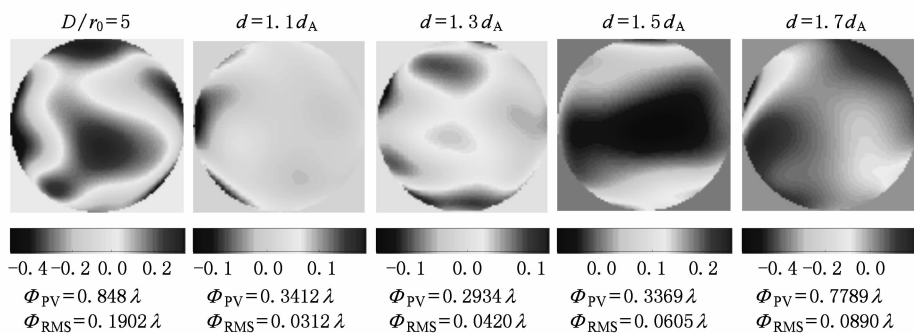
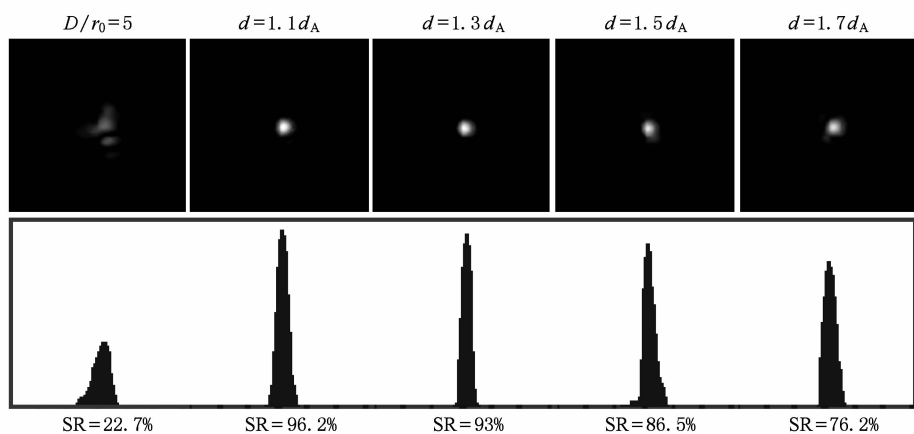
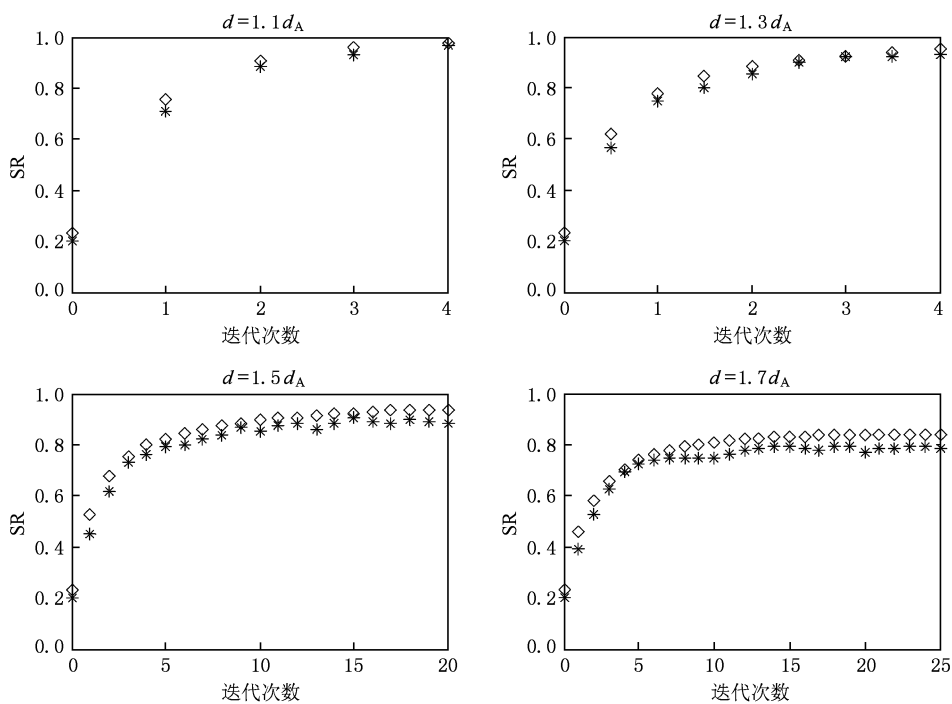
图7 校正前以及使用四种直径的针孔校正后的残余波前相位(单位: λ)图8 校正前以及使用四种直径的针孔校正后的远场图像及其中心截面图示. 远场图像 100×100 像素 ($8.8 \mu\text{m}/\text{像素}$)

图9 四种直径的针孔对应的闭环校正过程中 SR 与迭代次数的关系('◇'与'*'分别表示模拟与实验校正结果)

3.3. 模拟与实验比较

对使用在 3.2 节实验中的原始畸变波前(图 7 左图)进行数值模拟闭环校正,模拟与实验结果的对比显示于图 9. 由图 9 中的数据发现,闭环迭代过程中的实验数据与数值模拟结果非常一致. 根据 Marechal 准则, $SR > 80\%$ 、残余相位误差 $\Phi_{RMS} < \frac{\lambda}{14}$ 时,光学成像系统的分辨率可近似认为达到衍射极限^[20]. 因此,结合模拟与实验结果得出, $1.5d_A$ 的针孔可以实现较高精度的校正,校正后的 SR 高于 80%.

4. 结 论

当使用 SRIWFS 进行波前的绝对测量时,一般选择 $0.5d_A$ 的针孔,这样可以保证参考波前的精度高于 $\lambda/100$,然而这也会导致光能利用率的严重下降. 而光能利用率对于基于 SRIWFS 的 AO 系统的稳定和快速闭环非常重要,主要因为在闭环校正的开始阶段时畸变波前一般较大,导致参考光的强度通过率很低,进而使得干涉条纹的对比度较差,从而影响了 SRIWFS 的探测能力. 因此,对于基于 SRIWFS 的 AO 系统,在保证所需校正精度的前提下

应该尽可能使用大直径的针孔,以便最大程度地提高光能利用率.

本文通过建立模拟与实验闭环 AO 系统对 SRIWFS 应用于闭环校正中时所允许的最大针孔直径进行研究. 结果表明,不大于 $1.5d_A$ 的针孔可以获得满意的校正结果,校正后的 SR 高于 80%;同时光能利用率也得到了大幅度的提高,对于平面波前,当 d 由 $0.5d_A$ 增大至 $1.5d_A$ 时, $T = 63\%$ 增加至 90%;而对于一个离焦波前 ($\Phi_{PV} = 1\lambda$), T 由 0.5% 增加至 27%. 本文的研究结果可以为闭环 AO 系统中 SRIWFS 的设计以及校正精度分析提供非常有价值的理论依据.

SRIWFS 能够直接重建畸变波前相位,然后将重建结果的共轭函数输入波前校正器实现波前校正. 这样的 AO 系统不依赖任何复杂的控制算法和波前重建算法,并且可以取得高分辨率的校正. 文中建立的闭环 AO 系统仅可以实现静态畸变或者慢变化的动态畸变的校正,进一步对 SRIWFS 测量实时性以及抗干扰能力进行研究,以使得这种 AO 系统能够实现动态畸变的实时校正.

感谢中国科学院光电技术研究所的姜文汉院士对作者在研究工作中的指导以及帮助.

-
- [1] Rhoadarmer T A 2004 *Proc. SPIE* **5553** 112
- [2] Smartt R N, Steel W H 1975 *Jpn. J. Appl. Phys.* **14** 351
- [3] 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]
- [4] 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]
- [5] Fried D L 1998 *J. Opt. Soc. Am. A* **15** 2759
- [6] Feldman M, Mockler D J 1991 *Proc. SPIE* **1542** 490
- [7] Lin H 2007 *M. S. Thesis* (Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [林衡 2007 硕士学位论文(北京:中国科学院研究生院)]
- [8] Bai F Z, Rao C H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4056 (in Chinese) [白福忠、饶长辉 2010 物理学报 **59** 4056]
- [9] Bai F Z, Rao C H 2009 *Opt. Express* **17** 16861
- [10] Schmit J, Creath K 1995 *Appl. Opt.* **34** 3610
- [11] Noraras J, Paterson C 2007 *Opt. Express* **15** 13745.
- [12] Kwon O Y 1984 *Opt. Lett.* **9** 59
- [13] Mercer C R, Creath K 1994 *Opt. Lett.* **19** 916
- [14] Medecky H, Tejnilek E, Goldberg K A, Bokor J 1996 *Opt. Lett.* **21** 1526
- [15] Corley M S, Rhoadarmer T A 2005 *Proc. SPIE* **5894** 1
- [16] Cai D M, Yao J, Jiang W H 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 285 (in Chinese) [蔡冬梅、姚军、姜文汉 2009 光学学报 **29** 285]
- [17] Bai F Z, Rao C H 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 1487 (in Chinese) [白福忠、饶长辉 2010 光学学报 **30** 1487]
- [18] Cai D M, Ling N, Jiang W H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 897 (in Chinese) [蔡冬梅、凌宁、姜文汉 2008 物理学报 **57** 897]
- [19] Ge A M, Sui Z, Xu K S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2481 (in Chinese) [葛爱明、隋展、徐克寿 2003 物理学报 **52** 2481]
- [20] Muller R A, Baffington A 1974 *J. Opt. Am.* **64** 9

Effect of pinhole diameter on correction accuracy of closed-loop adaptive optics system using self-referencing interferometer wavefront sensor

Bai Fu-Zhong^{1)2)3)4)†} Rao Chang-Hui¹⁾²⁾

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

2) (*Key Laboratory on Adaptive Optics of the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

3) (*School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China*)

4) (*Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 22 December 2009; revised manuscript received 8 February 2010)

Abstract

When the self-referencing interferometer wavefront sensor (SRIWFS) is applied to the absolute measurement of wavefront phase, the pinhole diameter should be less than half the Airy-disk diameter (d_A) produced by an unaberrated optic so as to obtain a good approximation to a reference plane wave. In this way, however, the intensity transmission is also greatly reduced. To increase the intensity transmission as much as possible and improve the fringe contrast especially in the beginning of closed-loop correction, the maximal pinhole diameter allowed in the closed-loop correction with using SRIWFS is studied. Computer simulation and experiment demonstrate that a pinhole with not greater than $1.5d_A$ can obtain a satisfied correction result and the Strehl ratio after correction is greater than 80%. Additionally, for a plane wavefront the intensity transmission will be increased from 63% to 90% as the pinhole diameter increases from $0.5d_A$ to $1.5d_A$.

Keywords: adaptive optics, self-referencing interferometer wavefront sensor, pinhole diameter, closed-loop correction

PACC: 9265, 4225G, 4285F

† E-mail: b_fzh@yahoo.cn