

一种基于全息术的光学系统闭环像差补偿方法*

唐艳秋¹⁾²⁾ 孙强¹⁾ 赵建¹⁾ 姚凯男^{1)2)†}

1)(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2014年6月12日收到; 2014年7月23日收到修改稿)

提出了一种基于21单元变形镜与全息波前传感器的全息自适应光学系统, 并对其像差校正能力进行了分析. 首先描述了全息波前传感器基本原理, 并在薄全息图近似下给出基于快速傅里叶变换算法的全息波前传感器数值模型; 然后基于21单元变形镜的数值模型, 分析了该变形镜的波前校正能力; 在此基础上, 数值模拟并实验验证了全息自适应光学系统对静态像差的闭环校正能力.

关键词: 自适应光学, 全息术, 波前传感器, 变形镜

PACS: 42.40.Kw, 42.30.-d

DOI: 10.7498/aps.64.024206

1 引言

自适应光学在光学技术方面有着广泛的应用, 如惯性约束核聚变激光系统、自由空间光通信系统、天文观测系统、激光武器系统等^[1-3]. 自适应光学系统由波前传感器、波前控制器与波前校正器构成, 其中波前传感器起着系统伺服回路波前误差传感的作用. 它通常通过实时连续测定望远镜入瞳面上动态入射波前的相位畸变, 并通过波前控制器为波前校正器提供实时控制信号, 最终使光学系统达到或接近衍射受限的像质水平^[4]. 自适应光学系统目前使用的波前传感器主要为通过测量波前斜率获得波前相位的哈特曼传感器^[5-10]. 哈特曼波前传感器需要通过复杂的矩阵运算获得波前校正器的驱动信号, 繁重的计算量限制了自适应光学系统的闭环带宽. 2000年, Neil等^[11,12]首先提出了一种模式波前传感器, 并提出了全息元件应用在模式波前传感器的可能性, 这种方法能够大幅度提高波前解算的计算量; 文献^[13-17]将计算全息元件应用于模式波前传感器并校准了响应曲线, 单阶像

差探测精度达到 $\lambda/50$; 刘长海等^[18-22]也在上述工作的基础上, 使用平面波结合傅里叶透镜替代球面光波在夫琅禾费面成像达到了提高光能利用率的目的.

本文将全息波前传感器配合于连续镜面分离促动变形镜构建了一套全息自适应光学系统. 首先在薄全息图近似下, 推导出基于快速傅里叶算法的全息波前传感器数值模型, 模拟了全息波前传感器对低12阶 Zernike 像差, 即 $Z(2, 0)$, $Z(2, -2)$, $Z(2, 2)$, $Z(3, -1)$, $Z(3, 1)$, $Z(4, 0)$, $Z(3, -3)$, $Z(3, 3)$, $Z(4, 2)$, $Z(4, -2)$, $Z(4, 4)$, $Z(4, -4)$ 探测过程. 使用参考文献^[11]定义的 Zernike 多项式, 建立了文献^[23]所述的21单元连续镜面分离促动变形镜的数值模型, 分析了变形镜对以 Zernike 项表征的波前像差校正能力. 在考虑21单元变形镜的波前像差校正能力的情况下, 设计了对12阶 Zernike 像差进行补偿的全息自适应光学系统模型, 并提出了基于模式法的波前控制策略, 数值模拟了全息自适应光学系统的闭环校正过程. 最后, 建立实验装置对数值模拟结果进行了实验验证.

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2013AA03A116)、国家重大科学仪器设备开发专项 (批准号: 2013YQ14051702) 和吉林省省科技厅项目 (批准号: 20140204030GX) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yaokainan001@126.com

2 全息波前传感器理论模型

全息波前传感器基本原理如图1. 利用计算机模拟一束具有某一 Zernike 模式像差 $bZ_j(x, y)$ 的光波 $O_1(x, y)$ 与一束汇聚于点 A (x_A, y_A, z_A) 的球面参考光波 $R_1(x, y)$ 干涉, 产生子全息图1. 另一束具有相同模式相反幅度 $-bZ_j(x, y)$ 的光波 $O_2(x, y)$ 与一束汇聚于点 B (x_B, y_B, z_B) 的球面参考光波 $R_2(x, y)$ 干涉, 形成子全息图2. 利用多元全息元件的特性, 将两幅子全息图叠加, 形成一幅包含着该种模式像差信息的多元全息图.

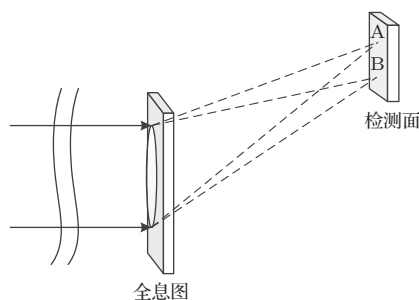


图1 全息波前传感原理

如果定义两幅全息图透射率函数分别为

$$\begin{aligned} H_1(x, y) &= |O_1(x, y) + R_1(x, y)|^2 \\ &= O_1(x, y)^2 + R_1(x, y)^2 + O_1(x, y)R_1^*(x, y) \\ &\quad + O_1^*(x, y)R_1(x, y), \\ H_2(x, y) &= |O_2(x, y) + R_2(x, y)|^2 \\ &= O_2(x, y)^2 + R_2(x, y)^2 + O_2(x, y)R_2^*(x, y) \\ &\quad + O_2^*(x, y)R_2(x, y), \end{aligned} \quad (1)$$

应用计算全息技术生成全息图可以去掉直流项.

$$\begin{aligned} H_1(x, y) &= O_1^*(x, y)R_1(x, y) \\ &= \exp\{-ibZ_j(x, y)\} \times \exp\{-ik[(x-x_A)^2 \\ &\quad + (y-y_A)^2 + z_A^2]^{1/2}\}, \\ H_2(x, y) &= O_2^*(x, y)R_2(x, y) \\ &= \exp\{ibZ_j(x, y)\} \times \exp\{-ik[(x-x_B)^2 \\ &\quad + (y-y_B)^2 + z_B^2]^{1/2}\}. \end{aligned} \quad (2)$$

当用一束具有同种模式像差的光波 $W(x, y)$ 照射全息图时, 将同时复现出两束被该模式像差调制的球面波, 分别汇聚于点 A 与点 B.

$$\begin{aligned} H_1(x, y) \times W(x, y) &= \exp\{iaZ_j(x, y)\} \times \exp\{-ibZ_j(x, y)\} \\ &\quad \times \exp\{-ik[(x-x_A)^2 + (y-y_A)^2 + z_A^2]^{1/2}\}, \\ H_2(x, y) \times W(x, y) &= \exp\{iaZ_j(x, y)\} \times \exp\{ibZ_j(x, y)\} \\ &\quad \times \exp\{-ik[(x-x_B)^2 + (y-y_B)^2 + z_B^2]^{1/2}\}. \end{aligned} \quad (3)$$

故当 $a = b$ 时, 点 A 处光斑接近于衍射极限, 而点 B 处受像差影响峰值能量最小. 当 $a = -b$ 时, 点 B 处光斑接近于衍射极限, 而点 A 处光斑峰值能量最弱. 因此可以通过探测 A, B 两点相对光强得到入射光波 $W(x, y)$ 像差幅度.

若要测量更多 Zernike 模式的像差, 根据多元全息元件的特性, 相应叠加更多对子全息图, 并控制相干球面波的波矢方向, 使聚焦的光斑在空间上分离, 通过测量每对光斑的相对光强, 得到相应 Zernike 模式幅度, 从而拟合出畸变波前.

3 全息波前传感器数值模拟

基于前述理论, 我们对全息波前传感器进行数值模拟. 模拟参数选择如下: 相位型全息图采样点数 512×512 , 激光波长 632.8 nm , 全息图通光孔径 6 mm , 像平面距离全息图平面 3000 mm , 聚焦光斑离轴大于 1 cm , 对低 12 阶 Zernike 项像差, 即 $Z(2, 0)$, $Z(2, -2)$, $Z(2, 2)$, $Z(3, -1)$, $Z(3, 1)$, $Z(4, 0)$, $Z(3, -3)$, $Z(3, 3)$, $Z(4, 2)$, $Z(4, -2)$, $Z(4, 4)$, $Z(4, -4)$ 进行探测. 全息图加载各阶像差 $\pm 0.5\lambda$ (RMS, root mean square) 如图2.

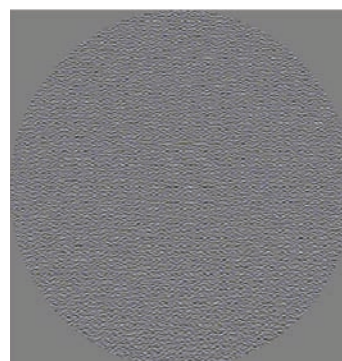


图2 计算全息图

假设用平面光波照射全息图, 数值计算全息像平面光场分布, 如图3. 全息像平面上共有12对光斑, 观察各对光斑, 可以看出光斑携带有全息图所加载的各阶像差的信息. 且当平面波入射时, 每对光斑光强基本相等.

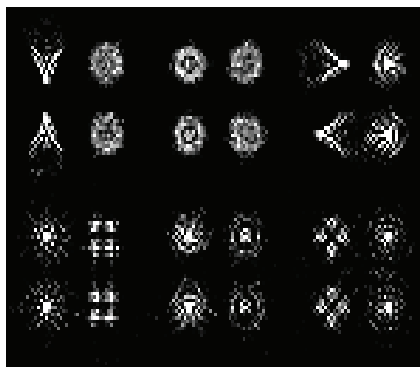


图3 全息像平面光斑

在全息像面上每对光斑的中心处, 选择24个 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的探测孔径, 对孔径以内的光斑能量进行积分, 并计算以一阶矩表示的相对光强. 使用仅具有某一项像差的入射光波照射全息图, 并连续改变该项像差幅度, 可以得到所对应的相对光强数据, 从而得到该项像差的响应灵敏度. $Z(2, 0)$ 像差响应灵敏度曲线如图4所示. 其余各阶 Zernike 像差有着相似的响应灵敏度性质.

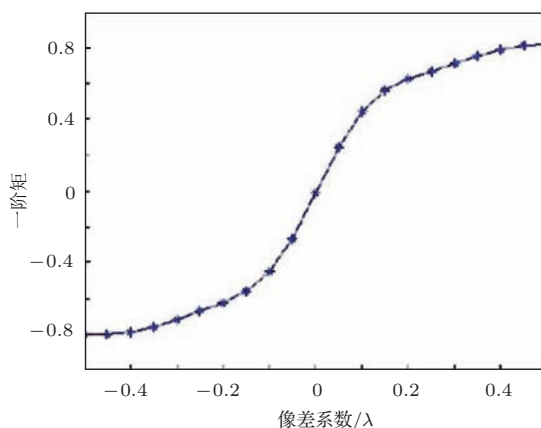


图4 $Z(2, 0)$ 响应灵敏度

如图4所示, 可以看出响应灵敏度曲线在小像差情况下具有良好的线性度. 将像差系数为零处的曲线斜率近似定义为该阶像差的响应灵敏度, 通过图4可以看出这种近似在像差较大的情况下显然是不准确的, 并且随着像差的增大, 近似的精确性显著下降. 但是在自适应光学系统中这并不影响最

终的闭环校正效果, 这是由于我们能够准确地探测到各阶像差的“趋势”, 这在后面的实验中得到了验证. 相反, 我们可以得到这样的结论, 全息波前传感器在小像差近似下拥有着较高的精度, 且像差越小, 精度越高.

然后对具有波前畸变入射光波的每一项 Zernike 像差分别进行探测, 从而拟合出畸变波前. 模拟入射光波波前像差 0.136λ (RMS), 如图5(a)所示. 通过全息像面光斑的相对光强数据求解 Zernike 项系数, 拟合波前如图5(b)所示, 波前探测误差如图5(c)所示, 波前探测误差为 0.045λ (RMS).

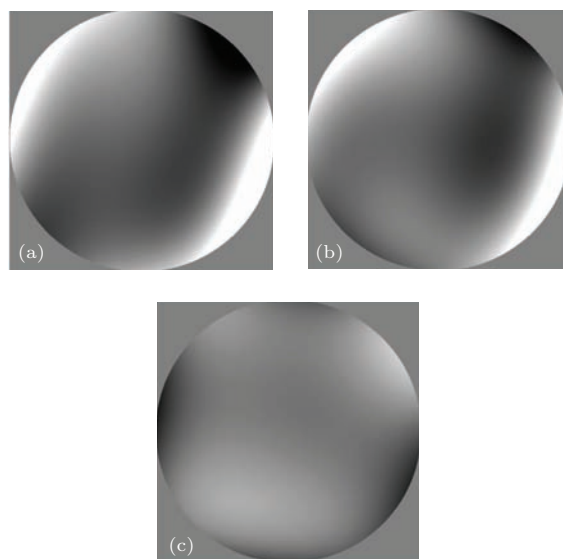


图5 (a) 畸变波前; (b) 探测波前; (c) 探测误差

通过数值模拟实验能够得到如下结论: 在小像差近似的情况下, 全息波前传感器通过探测全息像面光斑相对光强, 利用事先标定的响应灵敏度, 直接得到每一项 Zernike 像差系数, 能够实现对畸变波前的准确快速探测, 并且随着像差的减小, 探测误差也逐步降低. 这种特性是适合于闭环校正系统的, 这是因为可以通过若干次闭环校正使波前畸变趋于最小. 下面对由这种全息波前传感器构成的全息自适应光学系统展开研究.

4 21 单元变形镜波前拟合能力分析

波前校正器通过改变光波前传输的光程或改变传输媒介的折射率来改变入射光波前的相位结构, 从而达到对波前相位进行校正的目的, 是自适应光学系统的重要组成部分^[23,24]. 波前校正器目

前主要有分离促动器连续表面变形镜、拼接子镜变形镜、薄膜变形镜、双压电变形镜、微电子机械系统变形镜、液晶空间光调制器以及自适应次镜。目前最为常用的是分离促动器连续表面变形镜。对21单元分离促动器连续表面变形镜进行了数值建模,该型变形镜的具体参数在文献[23, 24]中进行了详细描述。模拟21单元变形镜口径50 mm,促动器采用 5×5 方形排列,去掉对角的4个促动器,如图6(a);相邻促动器间距9 mm,耦合20%。在以下分析中,假设各促动器响应函数一致,统一采用高斯函数近似,实际应用中各个促动器响应函数可以通过直接测量得到。采用最小二乘方法对21单元变形镜对低16阶Zernike像差的拟合能力进行了分析。

图6(b), (c), (d)分别为 $Z(2, 0)$, $Z(2, -2)$, $Z(5, -1)$ 阶Zernike像差理想波前相位;图6(e), (f), (g)分别为21单元变形镜使用全口径时对 $Z(2, 0)$, $Z(2, -2)$, $Z(5, -1)$ 阶Zernike波前像差的拟合结果;图6(h), (i), (j)分别为21单元变形镜使用70%有效口径时对 $Z(2, 0)$, $Z(2, -2)$, $Z(5, -1)$ 阶Zernike波前像差的拟合结果。当使用70%有效

口径时,21单元变形镜具有较好的拟合效果,这是由于如图6(a)所示的促动器分布对镜面周边缺少约束的结果。从图6还可以看出,21单元变形镜对 $Z(2, 0)$, $Z(2, -2)$ 像差拟合较好,而 $Z(5, -1)$ 像差的拟合结果不好。

为了定量评价21单元变形镜对各阶Zernike像差的拟合能力,定义拟合误差(fitting error)为残余波前像差的RMS值与理想Zernike像差波前RMS值的比值。

图7为低16阶Zernike像差,即 $Z(2, 0)$, $Z(2, -2)$, $Z(2, 2)$, $Z(3, -1)$, $Z(3, 1)$, $Z(4, 0)$, $Z(3, -3)$, $Z(3, 3)$, $Z(4, 2)$, $Z(4, -2)$, $Z(4, 4)$, $Z(4, -4)$, $Z(5, 1)$, $Z(5, -1)$, $Z(5, 3)$, $Z(5, -3)$ 的拟合误差,可以看出,21单元变形镜对低12阶像差具有较好的拟合能力,拟合误差小于0.5,而对高4阶Zernike像差的拟合能力差。这主要是受限于变形镜促动器分布的空间频率,21单元变形镜对更高阶的Zernike像差是不具备校正能力的。下面的实验中我们选择低12阶Zernike像差作为全息自适应光学实验系统校正对象。

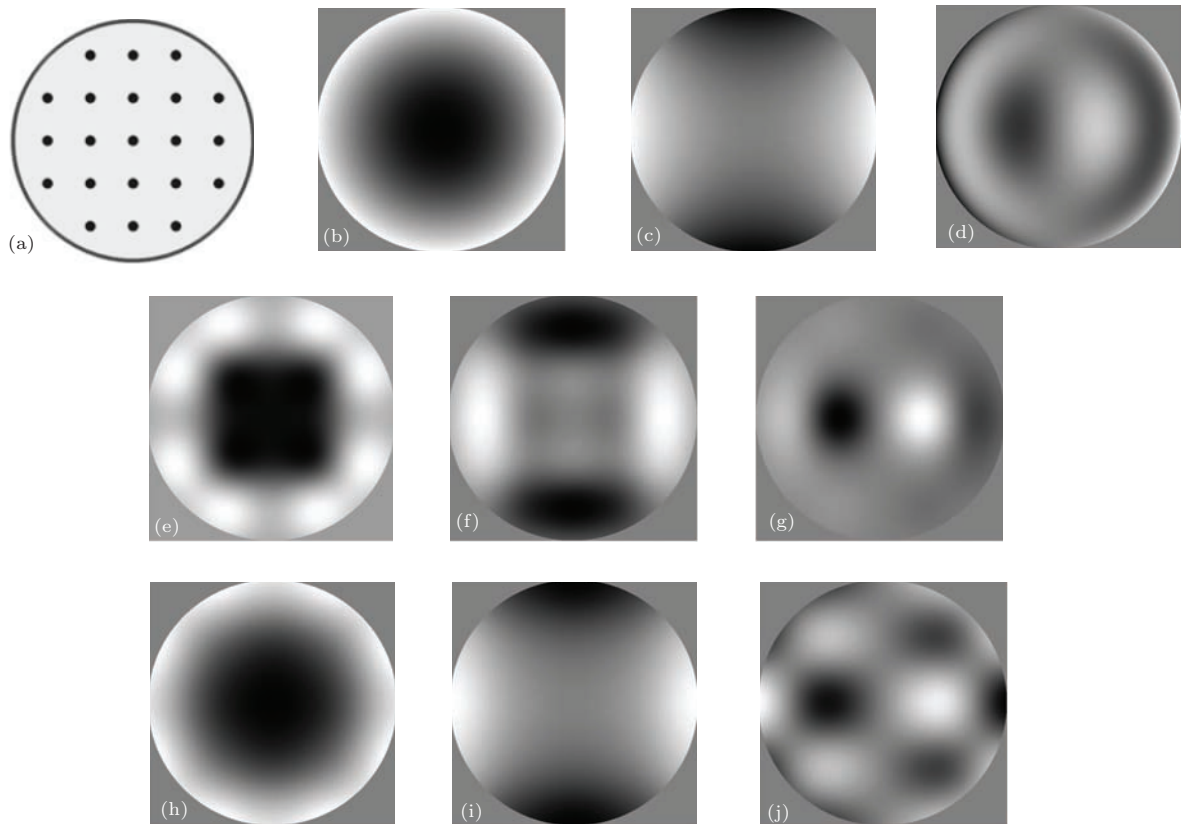


图6 变形镜促动器分布及像差拟合 (a) 促动器分布; (b) $Z(2, 0)$; (c) $Z(2, -2)$; (d) $Z(5, -1)$; (e) $Z(2, 0)$, 100% 口径; (f) $Z(2, -2)$, 100% 口径; (g) $Z(5, -1)$, 100% 口径; (h) $Z(2, 0)$, 70% 口径; (i) $Z(2, -2)$, 70% 口径; (j) $Z(5, -1)$, 70% 口径

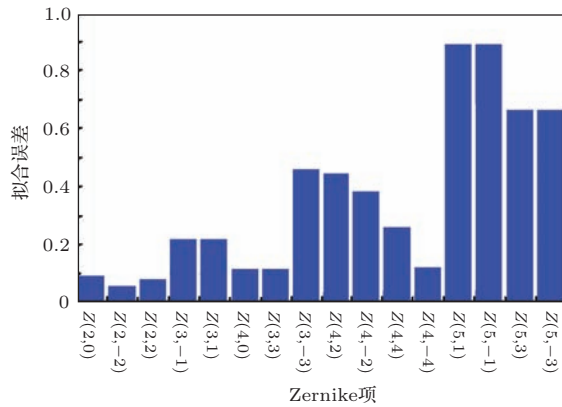


图7 21单元形变镜像差拟合误差

5 全息自适应光学系统数值模拟

全息自适应光学系统数值模型结构如图8, 其中全息波前传感器具体参数与前述数值模拟实验

中相同, 21单元变形镜模型同前所述。

实验中加载具有一定波前像差的入射光波后, 首先求解全息波前传感器全息像面处的光场分布, 然后通过探测孔径内的光强数据计算每对光斑的相对光强, 得到各阶 Zernike 像差系数, 从而实现波前畸变的 Zernike 像差分解; 波前控制器分别对各阶像差进行比例-积分-微分 (PID) 计算, 然后通过 21 单元变形镜数值模型分别校正各阶 Zernike 像差。对于校正后的波前残差重新作为入射光波进行迭代计算, 从而实现闭环校正。实验中共进行 30 次闭环校正。

实验中模拟加载波前畸变 RMS 值 0.86λ , 如图9(a), 加入波前畸变后, 系统焦面处激光光斑如图9(b)。为了将问题分解, 首先忽略变形镜的影响, 认为变形镜能够“理想”校正波前传感器所探测的波前像差。自适应光学系统闭环校正达到稳态后,

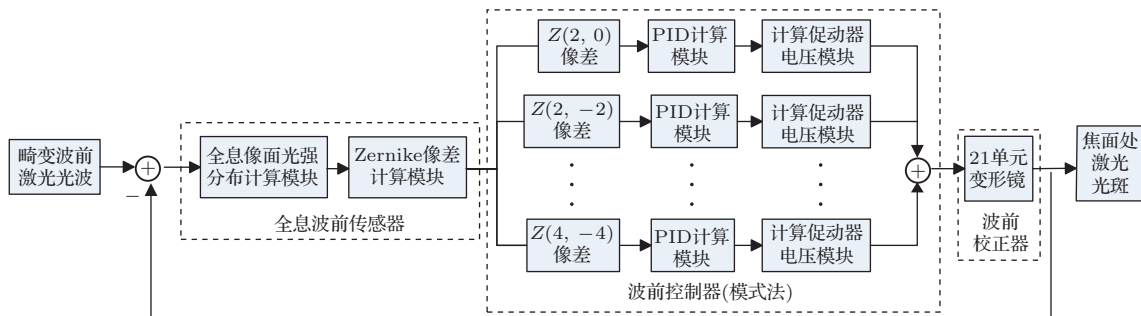


图8 全息自适应光学系统数值模型结构框图

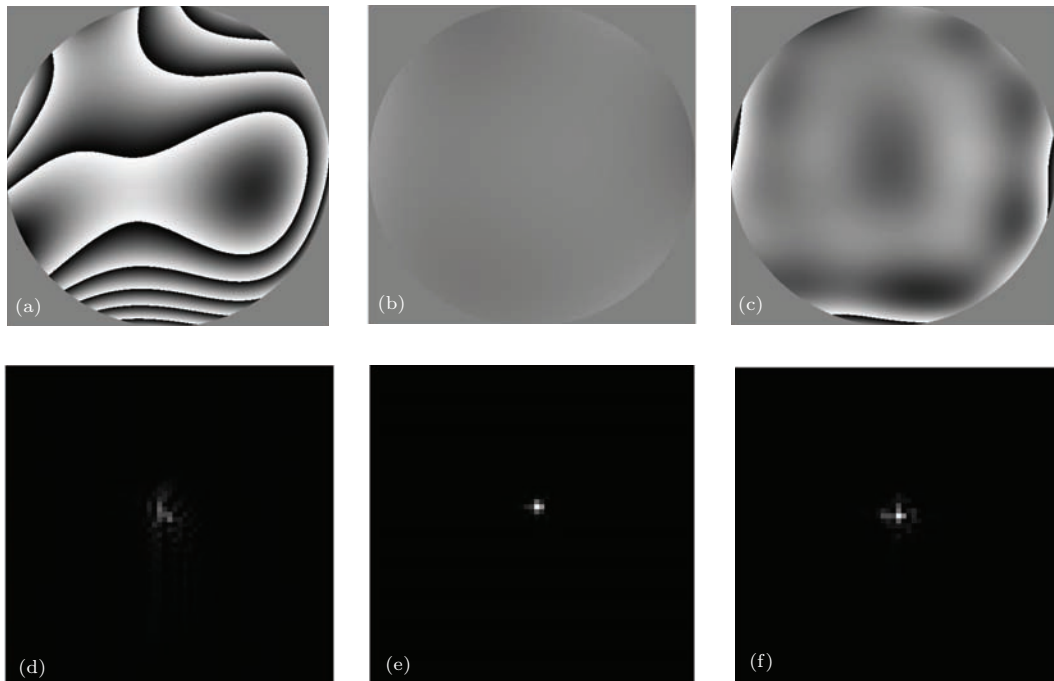


图9 (a) 加载的被测像差; (b) 加载像差后系统点扩散函数; (c) “理想”变形镜校正后的波前像差; (d) “理想”变形镜校正后的点扩散函数; (e) 21单元变形镜校正后的波前像差; (f) 21单元变形镜校正后的点扩散函数

波前残差RMS值 0.02λ ,如图9(c),焦面处激光光斑如图9(d).引入21单元变形镜模型后,自适应光学系统闭环校正达到稳态后,波前残差RMS值 0.12λ ,如图9(e),焦面处激光光斑如图9(f).

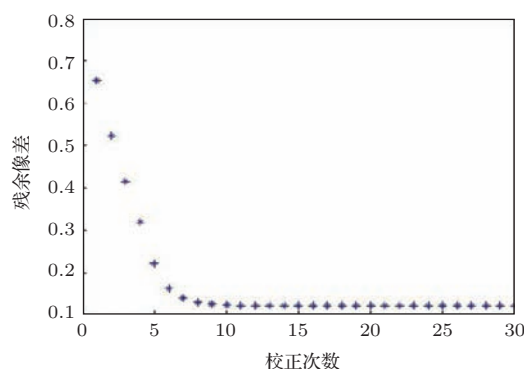


图10 全息自适应光学系统动态特性

为了评价引入21单元变形镜模型后的自适应光学系统的动态校正能力,以校正次数为横坐标,校正后的残差RMS值为纵坐标,建立系统动态响应曲线如图10,可以看出控制系统约经历7次闭环校正达到稳态.应当注意的是,实验中加载的初始波前像差RMS值达到了 0.86λ ,已经超过了全息波前传感器所编码的最大波前像差.也就是说,全息自适应光学系统在最初几次校正中是无法准确探测波前像差的,但是系统仍旧通过约7次闭环校正

达到了稳态,这是由于系统虽然无法准确探测波前,但是却能探测各阶Zernike像差的“趋势”,或者说“极性”,因此全息自适应光学系统可以让各阶Zernike像差逐次递减,从而最终使各阶像差幅值达到最小.虽然这可能影响响应时间,但是全息自适应光学系统可以通过提高校正频率来补偿这种影响.

6 全息自适应光学系统实验验证

我们建立了如图11的实验装置,对全息自适应光学系统进行了实验验证.

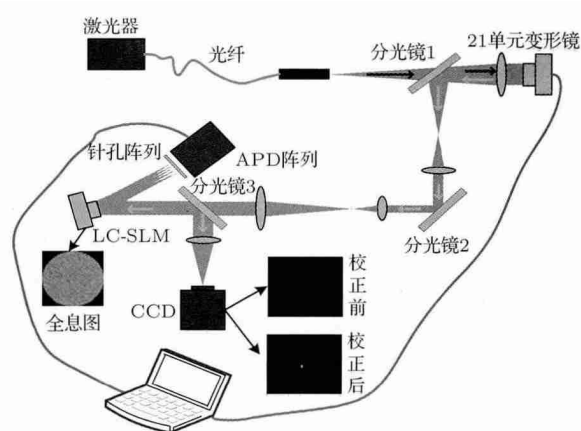


图11 实验装置图

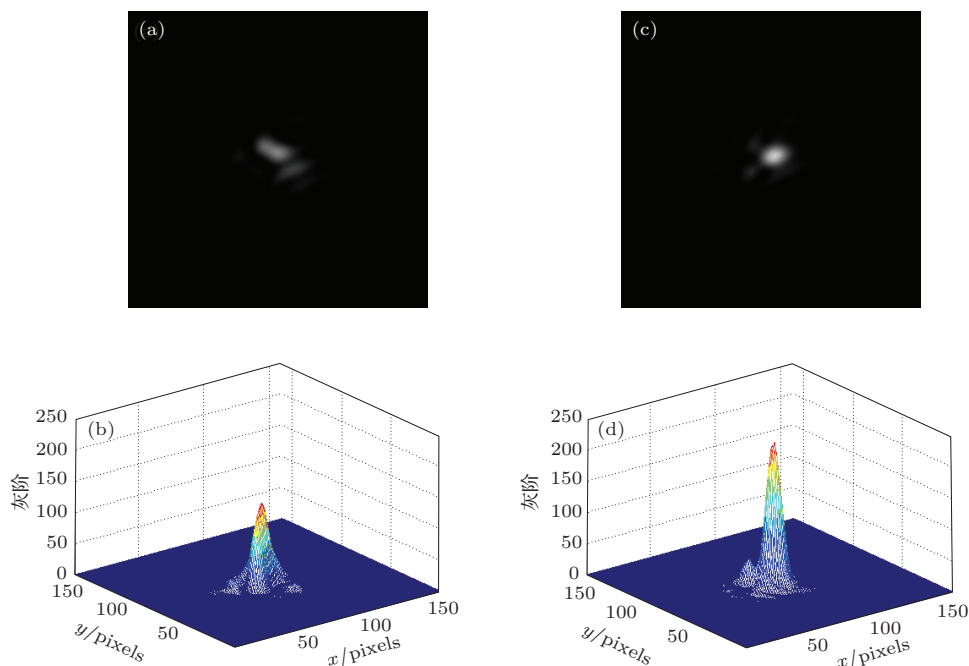


图12 (网刊彩色) (a), (b) 自适应光学系统像差校正前焦平面光斑; (c), (d) 自适应光学系统闭环补偿像差后焦平面光斑

实验中使用的激光器输出波长 632.8 nm, 采用 21 单元连续镜面变形镜作为波前校正元件^[25,26], 压电促动器工作电压 0—110 V, 其促动器排布参数与前述数值模拟实验中相同. 全息波前传感器由液晶空间光调制器、针孔阵列以及雪崩二极管 (APD) 阵列构成, 其中相位型全息图由液晶空间光调制器显示, 光瞳直径 $\phi 6$ mm, 全息像面距全息图距离 3000 mm (为减小系统尺寸, 使用一个平面镜将光路折叠), 全息光斑离轴距离大于 2 cm, 针孔滤波器直径 $\phi 1$ mm. APD 阵列采用 SENL 公司扫描式探针显微镜 (SPM) 探测器阵列 Array4p9, 像元数 12×12 , 像元尺寸 3 mm. 实验中采用 400 mm 焦距透镜成像, 以评估波前校正的效果. 成像电荷耦合器件 (CCD) 像元尺寸 $4.65 \mu\text{m}$, 帧频 $6 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$.

在实验开始之前, 由于针孔阵列存在对准误差以及 APD 阵列存在的非均匀性误差, 需要标定系统零点. 然后, 由变形镜依次给出各个模式 Zernike 像差, 通过测量 APD 阵列输出信号来标定全息波前传感器响应灵敏度.

在完成系统标定后, 进行变形镜展平实验. 当 21 单元变形镜各个促动器均加载 55 V 电压时, 成像 CCD 采集到焦平面光斑如图 12(a), 焦平面光场分布如图 12(b), 斯特列尔比为 0.46. 当系统闭环工作并达到稳态后, 成像 CCD 采集到焦平面光斑如图 12(c), 焦平面光场分布如图 12(d), 斯特列尔比为 0.80.

7 结 论

本文给出了全息波前传感器的像差求解方法, 建立了 21 单元变形镜的数值模型, 并基于这种模型, 对 Zernike 像差的拟合能力进行了分析. 数值模拟并实验验证了基于全息术的自适应光学系统对低 12 阶 Zernike 像差的闭环校正过程. 实验结果表明, 系统可以通过若干次闭环校正实现对畸变波前的有效校正.

参考文献

- [1] Zacharias R A, Bliss E, Feldman M 1999 *Solid State Laser for Application to Inertial Confinement Fusion Conference SPIE* **3492** 678
- [2] Tyson R K 1996 *Appl. Opt.* **35** 3640
- [3] Perram G P, Marciniak M A, Goda M 2004 *SPIE* **5414** 0277–786X
- [4] Zhou R Z 1996 *Adaptive Optics* (Beijing: National Defence Industry Press) p109 (in Chinese) [周仁忠 1996 自适应光学 (北京: 国防工业出版社) 第 109 页]
- [5] Platt B C, Shack R 2001 *J. Refractive Surgery* **17** 573
- [6] Jia J L, Wang J L, Zhao J Y, Liu X Y, Li H W, Wang L, Lin X D, Zhao Y F 2013 *Opt. Precis. Engineer.* **21** 1387 (in Chinese) [贾建禄, 王建立, 赵金宇, 刘欣悦, 李洪文, 王亮, 林旭东, 赵雨菲 2013 光学精密工程 **21** 1387]
- [7] Zhao J Y, Wu Y H, Jia J L 2012 *Opt. Precis. Engineer.* **20** 1350 (in Chinese) [赵金宇, 吴元昊, 贾建禄 2012 光学精密工程 **20** 1350]
- [8] Fan Z H, Wang C H, Jiang W H 2011 *Opt. Precis. Engineer.* **19** 501 (in Chinese) [樊志华, 王春鸿, 姜文汉 2011 光学精密工程 **19** 501]
- [9] Chen L H, Rao C H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 090701 (in Chinese) [陈林辉, 饶长辉 2011 物理学报 **60** 090701]
- [10] Guo Y M, Ma X Y, Rao C H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 069502 (in Chinese) [郭友明, 马晓燮, 饶长辉 2014 物理学报 **63** 069502]
- [11] Neil M A A, Booth M J, Wilson T 2000 *J. Opt. Soc. Am. A* **17** 1098
- [12] Neil M A A, Booth M J, Wilson T 2000 *Opt. Lett.* **25** 1083
- [13] Ghebremichael F, Andersen G P, Gurley K S 2008 *Appl. Opt.* **47** A62
- [14] Andersen G P, Dussan L, Ghebremichael F, Chen K 2009 *Opt. Eng.* **48** 085801
- [15] Geoff Andersen, Ghebremichael F, Jeff B 2012 *SPIE* **8380** 83800D
- [16] Andersen G P, Ghebremichael F 2012 *SPIE* **8447** 84472L
- [17] Booth M J 2014 *Light: Sci. Appl.* **3** 1
- [18] Liu C H, Jiang Z F 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 147 (in Chinese) [刘长海, 姜宗福 2009 中国激光 **36** 147]
- [19] Liu C H, Xi F J, Ma H T 2010 *Appl. Opt.* **49** 5117
- [20] Liu C H, Jiang Z F, Huang S Y 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 3069 (in Chinese) [刘长海, 姜宗福, 黄盛炆 2010 光学学报 **30** 3069]
- [21] Liebetraut P, Petsch S, Liebeskind J, Zappe H 2013 *Light: Sci. Appl.* **2** 1
- [22] Liu C H, Xi F J, Huang S Y 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 0214002 (in Chinese) [刘长海, 习锋杰, 黄盛炆 2011 中国激光 **38** 0214002]
- [23] Lin X D, Liu X Y, Wang J L 2012 *Acta Photon. Sin.* **41** 511
- [24] Luo Q, Huang L H, Gu N T, Rao C H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094201
- [25] 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]
- [26] Ning Y, Zhou H, Yu H, Rao C H, Jiang W H 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1089

A closed-loop aberration compensating method of optics system based on holography^{*}

Tang Yan-Qiu¹⁾²⁾ Sun Qiang¹⁾ Zhao Jian¹⁾ Yao Kai-Nan^{1)2)†}

1) (*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

2) (*University of China Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 12 June 2014; revised manuscript received 23 July 2014)

Abstract

We propose a holographic adaptive optics system based on holographic wavefront sensor and 21-element deformable mirror, and analyze the wavefront correction ability of the system in this paper. The principle of holographic wavefront sensor is described, and its numerical model is provided by fast Fourier transform algorithm in the thin hologram approximation. Then, the wavefront correction ability of 21-element deformable mirror is analyzed with its numerical model. Finally, the aberration compensation of the system is simulated and an experimental device is set up to verify the feasibility of the proposed adaptive optics system.

Keywords: adaptive optics, holography, wavefront sensor, deformable mirror

PACS: 42.40.Kw, 42.30.-d

DOI: 10.7498/aps.64.024206

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2013AA03A116), the National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project (Grant No. 2013YQ14051702), and the Jilin Provincial Science and Technology Department, China (Grant No. 20140204030GX).

[†] Corresponding author. E-mail: yaokainan001@126.com