

用于开环液晶自适应光学系统的模式预测技术研究*

刘超¹⁾²⁾ 胡立发¹⁾ 穆全全¹⁾ 曹召良¹⁾ 胡红斌¹⁾²⁾ 张杏云¹⁾²⁾ 芦永军³⁾ 宣丽^{1)†}

1) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

3) (大连民族学院光电子技术研究所, 大连 116600)

(2011年8月23日收到; 2011年9月29日收到修改稿)

时间延迟误差是液晶自适应光学系统的一个最主要的误差源. 本文提出了一种利用智能模式预测——迭代最小二乘 (RLS) 模式预测算法来克服其对成像分辨率的影响. 首先, 介绍了具有 RLS 模式预测能力的开环液晶自适应光学系统的结构和工作原理. 其次, 详细讨论了 RLS 模式预测算法的实现过程. 再次, 设计和搭建了一套带有液晶湍流模拟器的开环液晶自适应光学系统, 对 RLS 模式预测算法的预测效果进行了分析, 并和直接开环校正做了比较. 分析结果表明: 当系统处于中等强度湍流条件 (大气相干长度 $r_0 = 6$ cm, Greenwood 频率 $f_G = 35$ Hz) 和只有时间延迟误差情况下, 经过 RLS 预测后, 残差波面的 RMS 值由直接校正的 0.26 波长 (1 波长 = 785 nm) 降低到了 0.15 波长, 校正效果提高了 42%. 最后, 对预测前后自适应光学系统的成像效果进行了对比试验. 实验结果显示, 经过预测以后, 系统的成像分辨率由直接开环校正的 25.4 cycles/mm 提高到了 32.0 cycles/mm, 成像分辨率提高了 26%, 达到了 0.9 倍的衍射极限分辨率. 因此, RLS 模式预测技术可以有效的提高开环液晶自适应系统的成像分辨率.

关键词: 自适应光学, 湍流预测, 迭代最小二乘, 液晶波前校正器

PACS: 95.75.Qr, 42.79.Kr, 42.68.-w

1 引言

液晶纯相位波前调制器已被证明能够精确产生所需要的畸变波前^[1-4], 并且其具有良好的线性位相响应和良好的重复性^[5], 因此特别适合开环控制. 开环液晶自适应系统相对于闭环系统可以节约 50% 的光能利用效率^[5,6], 同时可以提高系统的校正带宽^[7]. 故对于液晶自适应系统来说, 通常使用开环控制. 本研究小组报道了把开环液晶自适应光学系统应用于天文观测和活体人眼视网膜成像等领域^[6,8-10], 都取得了成功. 然而, 开环液晶自适应系统的一个显著缺点就是从波前探测到波前校正之间的时间延迟较长, 从而限制了系统的校正带宽, 使系统的适用范围受到限制. 一般来说, 预测技术可以降低系统延迟的影响, 但前提是湍流波前必

须是可以预测的.

值的庆幸的是, Jorgenson, Aitken 和 Schwartz 等已指出, 大气湍流波前是可以预测的^[11-13]. 到目前为止, 应用于自适应光学系统的预测技术还主要集中在基于变形镜的闭环自适应光学系统中^[14-19]. 对于开环系统方面, Michael Lloyd-Hart 和 Patrick McGuire 等研究了基于波面区域斜率的线性预测方法. 该方法可以有效利用风速等信息, 但计算量巨大. Jorgenson, Aitken 和 Montera 等利用神经网络技术来预测湍流波前斜率^[11,20,21]. 该方法需要成千上万帧的训练数据, 而且容易收敛到区域极小值点^[22]. 而且, 这些研究工作还主要集中在理论分析方面. 到目前为止, 用于实际的开环自适应光学系统的预测技术还未见报道. 本文提出了一种基于迭代最小二乘法 (RLS) 的用于开环自适应系统的模式预测技术. 该方法计算复杂

* 国家自然科学基金 (批准号: 60736042, 50703039) 资助的课题.

† E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn

度小, 收敛速度快, 而且收敛到均方误差全局最小值点. 并且首次把该预测技术应用到了实际的开环液晶自适应光学系统中, 提高了系统的成像分辨率.

2 RLS 模式预测算法

对于具有预测功能的开环液晶自适应光学系

统的结构框图如图 1 所示. 对于每个校正周期包括如下基本步骤: 1) Shack-Hartmann 波前探测器 (WFS) 采集并读出光点阵; 2) 利用光点阵计算斜率向量 (SC); 3) 根据斜率向量重构 Zernike 系数 (ZCR); 4) 利用 RLS 算法对得到的 Zernike 系数中的每个模式进行预测; 5) 利用预测后的 Zernike 系数向量计算灰度图 (GC); 6) 把灰度图发送给液晶波前校正器 (LCOS) 进行畸变波前的校正.



图 1 带有 RLS 预测功能的开环液晶自适应光学系统框图

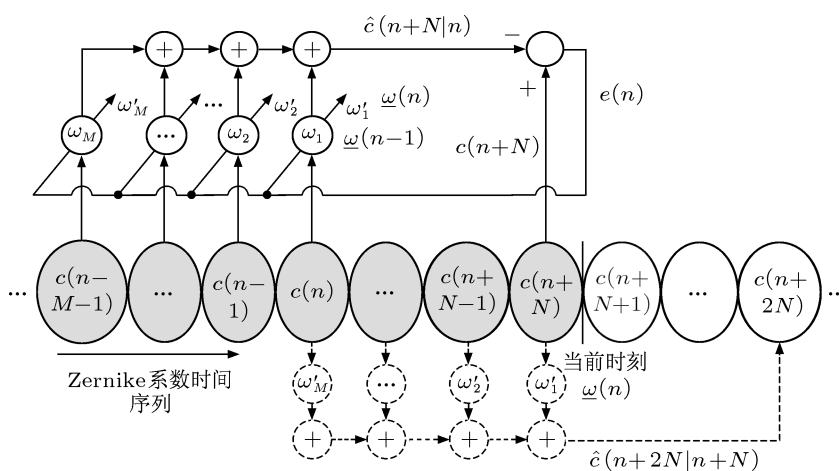


图 2 RLS 预测原理图

RLS 模式预测算法是 RLS 滤波器的扩展, 它是一种通过迭代实现的自适应学习算法. 其预测目标就是使得每个模式的平均均方预测误差达到最小. 当给定一组 Zernike 模式的时间序列 $[c(1), c(2), \dots, c(n), \dots]$, 预测器的输出为

$$\hat{c}(n+N|n) = \sum_{k=1}^M \omega_k c(n-k+1), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

其中 M 为预测器的阶数, N 是向前预测的帧

数, $\hat{c}(n+N|n)$ 是预测值, ω_k 是预测系数. 该预测方法的核心就是找到一组合适的预测系数 $\{\omega_1(n), \omega_2(n), \dots, \omega_M(n)\}$, 从而使得预测均方误差之和达到最小. 即使

$$\begin{aligned} J(n) &= \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} [e(i)^2] \\ &= \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} [c(i+N)]^2 \\ &\quad - \sum_{k=1}^M \omega_k c(i-k+1)]^2, \end{aligned} \quad (2)$$

取得最小值. 其中 $e(i)$ 为预测误差

$$\begin{aligned} e(i) &= c(i+N) - \hat{c}(i+N|i) \\ &= c(i+N) - \sum_{k=1}^M \omega_k c(i-k+1), \end{aligned} \quad (3)$$

λ 为遗忘因子, $0 < \lambda \leq 1$. (2) 式是一个标准的最小二乘问题. 用迭代的方法求解式 (2), 可以得到预测系数 $\underline{\omega}(n)$ 的迭代算法 (本文中, 用下划线标明其为一个列向量)

$$\underline{\omega}(n) = \underline{\omega}(n-1) + \underline{k}(n)e(n). \quad (4)$$

其中 $e(n)$ 为前验估计误差

$$e(n) = c(n+N) - \underline{c}(n)^T \underline{\omega}(n-1), \quad (5)$$

$\underline{k}(n)$ 为 RLS 增益矢量

$$\underline{k}(n) = \frac{\lambda^{-1} P(n-1) \underline{c}(n)}{1 + \lambda^{-1} \underline{c}(n)^T P(n-1) \underline{c}(n)}, \quad (6)$$

$P(n)$ 是一个矩阵, 定义为

$$P(n) = \left[\sum_{i=M+N}^n \lambda^{n-i} \underline{c}(i) \underline{c}(i)^T \right]^{-1}, \quad (7)$$

其迭代更新方法为

$$P(n) = \lambda^{-1} P(n-1) - \lambda^{-1} \underline{k}(n) \underline{c}(n)^T P(n-1), \quad (8)$$

其中 $\underline{c}(n) = [c(n) \ c(n-1) \ \cdots \ c(n-M+1)]^T$, 为预测器的输入矢量.

RLS 预测算法可以概括成如下几个步骤 [见图 2]. 1) 当最新测量得到的某个模式的 Zernike 系数 $c(n+N)$ 到达预测器时, 其被当做预测器的期望响应. 2) 把上一次的预测系数 $\underline{\omega}(n-1)$ 和输入矢量 $\underline{c}(n)$ 代入 (1) 式对当前的系数值进行预测得到 $\hat{c}(n+N|n)$. 用期望值 $c(n+N)$ 减去预测值 $\hat{c}(n+N|n)$ 得到前验估计误差 $e(n)$, 即 (5) 式所示. 3) 利用 (6) 式计算 RLS 增益矢量 $\underline{k}(n)$, 然后利用 (8) 式计算矩阵 $P(n)$, 接着利用 (4) 式更新预测系数 $\underline{\omega}(n-1)$ 为 $\underline{\omega}(n)$. 4) 最后利用更新后的预测系数和最新测量的 Zernike 系数向量 $\underline{c}(n+N)$ 预测未来第 N 帧的 Zernike 系数值, 即

$$\begin{aligned} &\hat{c}(n+2N|n+N) \\ &= \sum_{k=1}^M \omega_k(n) c(n+N-k+1). \end{aligned} \quad (9)$$

至此, Zernike 系数向量中的一个模式的预测便完成了. 其他模式也按上述步骤依次进行.

当所有的模式都预测完毕后, 便得到了一个预测后的 Zernike 系数向量. 而预测器则等待下一个 Zernike 系数向量的到来. 当新的 Zernike 系数向量到来以后, 预测器把时间采样点 n 增加为 $n+1$, 然后重复上面的 Zernike 系数向量的预测过程.

在迭代过程的开始, 有两个变量需要给定初值, 即 $\underline{\omega}(0)$ 和 $P(0)$. 本文中取 $\underline{\omega}(0) = 0$, $P(0) = \delta^{-1} I$, I 为单位矩阵, δ 是一个相对很小的数, $\delta \leq 0.02 \sigma_c^2$ (σ_c^2 预测器输入矢量的方差).

3 实验及结果

3.1 光路及实验装置介绍

实验利用了液晶纯相位调制器作为湍流模拟器, 以产生时间和空间特性可控的湍流波面. 实现了该湍流模拟器与开环液晶自适应光学系统的对接. 实验光路图和实物图如图 3 和图 4 所示. 由光纤束发出的白光被倾斜镜 (TTM, 帧频 700 Hz, 口径直径 15 mm) 反射后, 经过透镜 L_1 (焦距 100 mm, 口径 25 mm), 633 nm 高通滤光片 (D), 偏振片 (P, 透振方向为 s 偏振光) 变成 s 偏振光, 然后经透镜 L_2 (焦距 270 mm, 口径 67.5 mm) 后进入到液晶湍流模拟器 (ATS, 使用向列相液晶, 调制方向为 s 偏振光方向, 中心波长 785 nm, 帧频 200 Hz, 像素数目 256×256 , 口径直径 6.1 mm). 然后经 ATS 调制后被反射回来, 再次经过透镜 L_2 , 被平面反射镜 M_1 反射后经过一个 $\lambda/2$ 玻片, s 偏振光变成了与竖直方向成 45° 的线偏振光. 该偏振光经透镜 L_3 (焦距 270 mm, 口径 40 mm) 后进入到液晶波前校正器 (LCWFC, 使用向列相液晶, 调制方向为 s 偏振光方向, 中心波长 633 nm, 帧频 286 Hz, 像素数目 256×256 , 口径直径 6.1 mm). LCWFC 对其中的 s 分量进行校正, p 分量保持不变. 接着两个分量的光都被 LCWFC 反射回来, 经透镜 L_3 , 平面反射镜 M_2 和透镜 L_4 (焦距 150 mm, 口径 37.5 mm) 后进入到偏振分光棱镜 (PBS). 其中被 LCWFC 校正后的 s 偏振光被 PBS 反射后经透镜 L_5 (焦距 250 mm, 口径 40 mm) 进入成像相机 Camera (Micro Vista CMOS) 用于成像, 另一部分没有被 LCWFC 校正的 p 偏振光被 PBS 透过, 进入 Shack-Hartmann 波前探测器 [23,24] (WFS, 口径 3 mm, 微透镜数 20×20 成六角排列, 帧频 500 Hz,

背部相机像素数目 128×128) 进行波前探测. 值得注意的是, 在该液晶自适应光学系统中, 虽然波前探测器 WFS 位于波前校正器 LCWFC 的后面, 但由于偏振态的关系, 仍然属于开环光路^[6]. 光路中,

TTM 用于校正 ATS 产生的倾斜畸变, LCWFC 用于校正除倾斜以外的其他高阶畸变, 预测也针对这部分畸变进行, 而 WFS 用于探测畸变波前. 故 TTM, ATS, LCWFC 和 WFS 需要处于光学共轭的位置上.

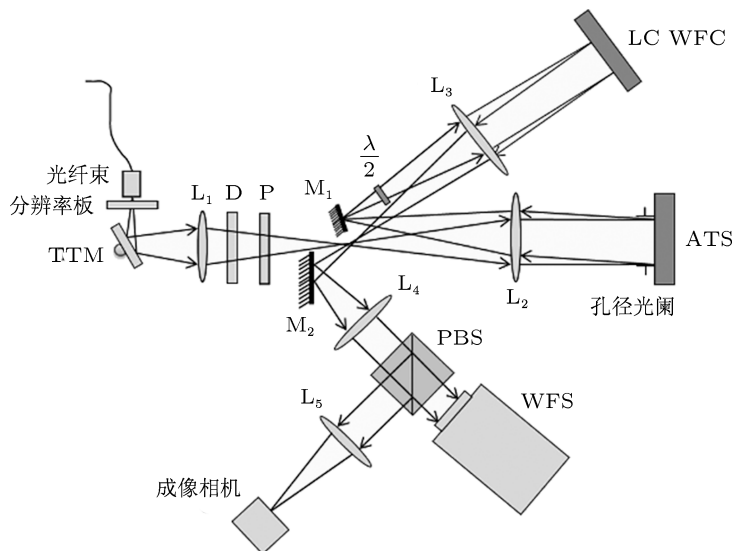


图3 预测系统光路

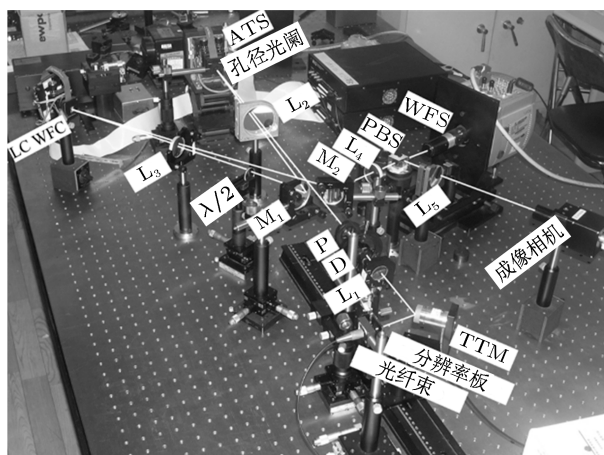


图4 预测系统光路实物图

3.2 湍流波面的 RLS 模式预测分析

让湍流模拟器产生大气相干长度 $r_0 = 6$ cm, Greenwood 频率^[25] $f_G = 35$ Hz 的湍流波前. 利用 WFS 记录湍流波面的 Zernike 系数, 利用第二节的预测算法对测得的 Zernike 系数的各个模式进行预测分析和比较, 以得出在只有时间延迟误差的

情况下, RLS 模式预测算法的预测效果. 由于系统延迟约为 3 倍的 WFS 采样周期, 故向前预测的帧数 $N = 3$. 预测器的阶数 $M = 10$, 遗忘因子 $\lambda = 1$. 为了表征预测的效果, 定义了预测效果因子

$$\eta = [1 - \langle \sigma_\phi^2 \rangle_{\text{pre}}^{1/2} / \langle \sigma_\phi^2 \rangle_{\text{unpre}}^{1/2}] \times 100\%, \quad (10)$$

其中 $\langle \sigma_\phi^2 \rangle_{\text{unpre}}^{1/2}$ 为经过直接校正后残差波面的平均 RMS 值, $\langle \sigma_\phi^2 \rangle_{\text{pre}}^{1/2}$ 为经过预测校正后残差波面的平均 RMS 值. 图 5 给出了湍流波面校正前的 RMS 值、直接校正后残差波面的 RMS 值以及预测校正后残差波面的 RMS 值随时间的变化情况. 可以看出, 经过直接校正后, 湍流波面的平均 RMS 值从 0.96 wave (1wave = 785 nm) 降低到了 0.26 wave, 而经过预测校正以后进一步降低到了 0.15 wave. 预测效果因子达到了 42%.

图 6 给出了任意挑选的第 3 个 Zernike 模式的预测情况. 可以看出, 对于直接校正 (图 6(a) 的 + 号线), 由于系统的时间延迟, 校正量总是落后于实际的湍流 (图 6(a) 的 × 号线) 信号, 故存在较大的残差; 而预测信号 (图 6(a) 的 • 号线) 基本与湍

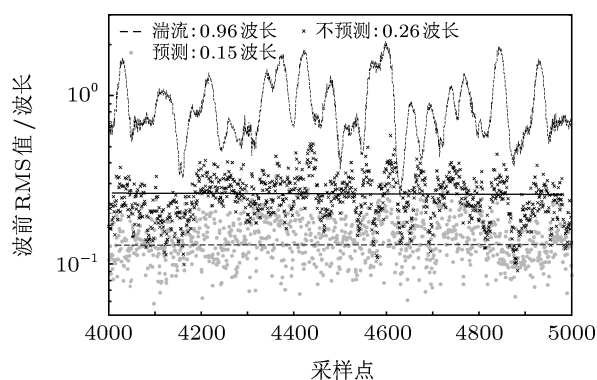


图5 湍流波面、直接校正后的残差波面以及预测校正后的残差波面的 RMS 值随时间的变化 (单位为波长: 785 nm, 采样频率 500 Hz)

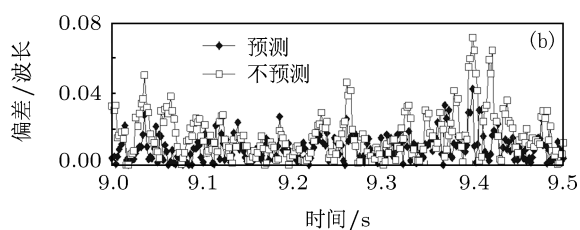
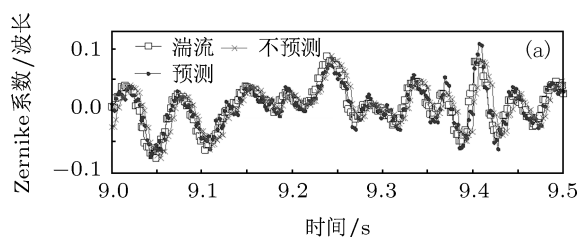


图6 第3项 Zernike 系数的预测效果

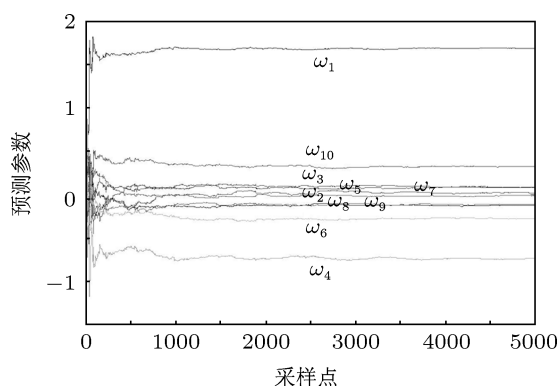


图7 对第3项 Zernike 模式进行预测时的预测系数

流信号重合了, 故预测校正残差比直接校正后的残差明显减小. 图7给出了对第三个模式进行预测时, 预测系数随时间的变化情况. 可以看出, 对于10个预测系数, 当迭代1000次以后, 就全部稳定了. 对于其他模式的预测也基本如此.

为了了解每个模式的预测情况, 图8给出了前35个 Zernike 模式 (piston 除外) 经直接校正后和预测校正后的模式系数残差 RMS 值的分布情况. 可以看出, 随着模式数的增加, 直接校正后和预测校正后的模式残差都逐渐减小. 对于每个 Zernike 模式, 预测后的残差值总是小于直接校正后的残差值. 为了表征经过预测后各模式的预测效果, 定义了模式预测效果因子

$$\eta_{\text{mode}} = [1 - \langle \sigma_{\text{mode}}^2 \rangle^{1/2} / \langle \sigma_{\text{mode}}^2 \rangle_{\text{unpre}}^{1/2}] \times 100\%, \quad (11)$$

其中 $\langle \sigma_{\text{mode}}^2 \rangle_{\text{pre}}^{1/2}$ 为预测校正后第 mode 个模式的平均残差, $\langle \sigma_{\text{mode}}^2 \rangle_{\text{unpre}}^{1/2}$ 为直接校正后第 mode 个模式的平均残差. 图9给出了各模式的预测效果因子分布. 可以看出, 随着模式序数的增加, 模式预测因子由45%缓慢下降到30%左右. 这主要因为随着模式数的增加, 模式信噪比^[26]会降低, 同时湍流的模式截止频率会越大^[27], 故预测效果会下降.

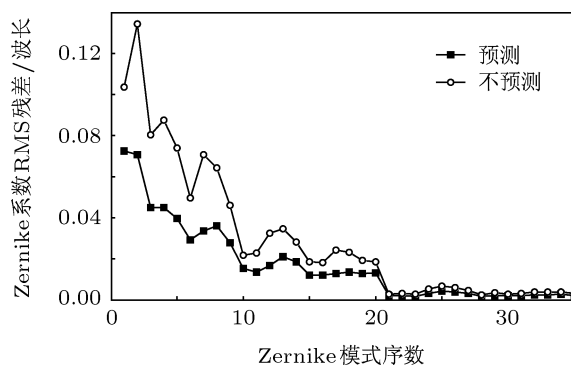


图8 经直接校正和预测校正后的模式残差 RMS 随模式数的分布

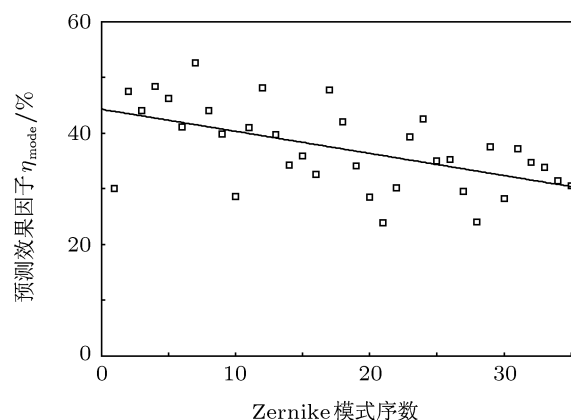


图9 模式预测效果因子随模式数的分布

3.3 湍流波面直接校正与预测校正后的成像效果

仍然让湍流模拟器产生大气相干长度 $r_0 = 6\text{ cm}$, $f_G = 35\text{ Hz}$ 的湍流波前. 相应的光纤束的像如图 10(a) 所示. 此时光纤束的像模糊不清, 分辨不出任何细节. 当开启液晶自适应光学系统开环校正功能以后, 所获得的光纤束的像如图 10(b) 所示, 此时基本可以分辨每个光纤芯. 当开启模式预测功能以后, 光纤束的像如图 10(c) 所示. 与直接校正相比, 图像对比度明显提高, 可以非常清楚的分辨每个光纤芯.

为了定量研究预测的效果, 在光纤束后放上一

块分辨率板, 如图 3 和图 4 所示. 在与上面实验同样的湍流条件下, 开展了直接校正和预测校正实验. 在校正前, 分辨率板的像如图 11(a) 所示, 图像一片模糊, 分辨率极低. 经过直接开环校正以后, 分辨率板的像如图 11(b) 所示, 此时分辨率可以达到 25.4 cycles/mm , 而该系统的衍射极限分辨率为 35.9 cycles/mm , 故达到了 0.7 倍的衍射极限分辨率. 经预测校正以后, 分辨率板的像如图 11(c) 所示, 此时分辨率进一步提高到了 32.0 cycles/mm , 达到了 0.9 倍的衍射极限分辨率. 故预测后与直接校正相比, 分辨率提高了 26% . 由于此时的系统的误差源除了时间延迟误差, 还包括了 LCWFC 的拟合误差等, 故预测效果从成像上看会有所下降.

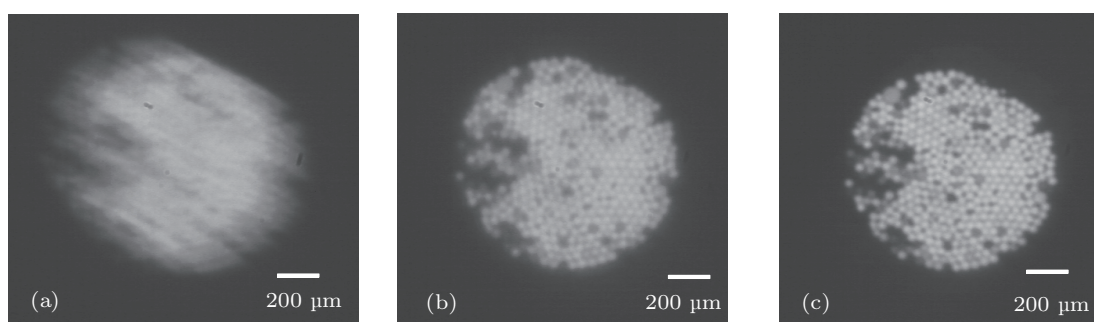


图 10 光纤束的像 (a) 校正前; (b) 开环校正后; (c) 开环预测校正后

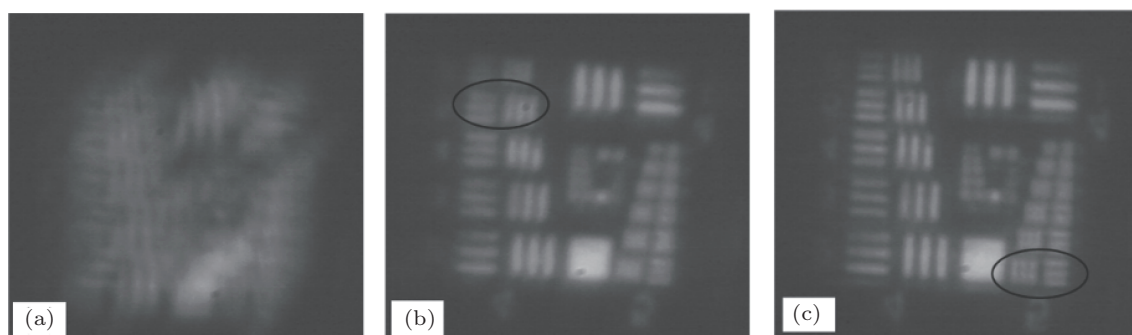


图 11 光分辨率板的像 (a) 校正前; (b) 开环校正后; (c) 开环预测校正后

4 结论

时间延迟误差是自适应光学系统的一个主要误差源之一. 本文首次提出了一种迭代最小二乘预测算法对湍流波前的各个模式系数进行预测, 改善

系统的校正带宽, 从而提高成像分辨率. 首先搭建了一套带液晶湍流模拟器的开环液晶自适应光学系统. 其次利用波前探测器测量产生的湍流波面, 分析了 RLS 模式预测的效果. 结果表明, 在 Greenwood 频率 $f_G = 35\text{ Hz}$, 大气相干长度 $r_0 = 6\text{ cm}$ 的

湍流条件和系统只存在时间延迟误差的情况下,直接校正后残差波面的 RMS 值由校正前的 0.96 wave 降低至 0.25 wave. 预测校正以后,残差波面的 RMS 值减小到 0.15 wave,预测效果提高了 42%. 最后,利用直接开环校正和 RLS 模式预测校正实现了对光纤束和分辨率的成像. 结果表明,经过模式预测以后,光纤束像的对比度明显提高,可以非常清楚地分辨每颗光纤芯. 由分辨率板的实验可知,系统

的分辨率由直接开环校正的 25.4 cycles/mm 提高到预测校正后的 32.0 cycles/mm,提高了 26%. 由于系统的衍射极限分辨率为 35.9 cycles/mm,故系统的性能由直接校正的 0.7 倍的衍射极限分辨率提高到了预测后的 0.9 倍衍射极限分辨率. 由此可见,通过 RLS 模式预测方法,可以明显的提升开环液晶自适应系统的校正效果.

-
- [1] Love G D 1997 *Appl. Opt.* **36** 1517
 - [2] Prieto P, Fernandez E, Manzanera S, Artal P 2004 *Opt. Express* **12** 4059
 - [3] Schmidt J, Goda M, Duncan B 2007 *Appl. Opt.* **46** 2423
 - [4] Cai D M, Ning 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]
 - [5] Li C, Xia M, Mu Q, Jiang B, Xuan L, Cao Z 2009 *Opt. Express* **17** 10774
 - [6] Liu C, Hu L, Mu Q, Cao Z, Xuan L 2011 *Appl. Opt.* **50** 82
 - [7] Mu Q, Cao Z, Peng Z, Liu Y, Hu L, Lu X, Xuan L 2010 *Opt. Commun.* **283** 2017
 - [8] Mu Q, Cao Z, Li D, Hu L, Xuan L 2008 *Appl. Opt.* **47** 4279
 - [9] Li C, Xia M, Li D, Mu Q, Xuan L 2010 *J. Biomed. Opt.* **15** 046009-1
 - [10] Jiang B G, Cao Z L, Mu Q Q, Li C, Xia M L 2008 *Opt. Precis. Eng.* **16** 1805 (in Chinese) [姜宝光, 曹召良, 穆全全, 李抄, 夏明亮 2008 光学精密工程 **16** 1805]
 - [11] Jorgenson M, Aitken G 1992 *Opt. Lett.* **17** 466
 - [12] Schwartz C, Baum G, Ribak E N 1994 *J. Opt. Soc. Am. A* **11** 444
 - [13] Aitken G J, McGaughey D 1995 *Proceedings of Topical Meeting on Adaptive Optics* **54** 89
 - [14] Paschall R, Anderson D 1993 *Appl. Opt.* **32**
 - [15] Wild W 1996 *Opt. Lett.* **21** 1433
 - [16] Dessenne C, Madec P Y, Rousset G 1997 *Opt. Lett.* **22** 1535
 - [17] Dessenne C, Madec P Y, Rousset G 1998 *Appl. Opt.* **37** 4623
 - [18] Dessenne C, Madec P Y, Rousset G 1999 *Opt. Lett.* **24** 339
 - [19] Poyneer L, Vran J 2008 *J. Opt. Soc. Am. A* **25** 1486
 - [20] Jorgenson M B, Aitken G J M 1992 *Proc. SPIE* **1706** 113
 - [21] Montera D, Welsh B, Roggemann M, Ruck D 1997 *Appl. Opt.* **36** 675
 - [22] McGuire P, Rhoadarmer T, Coy H, Angel J, Lloyd-Hart M 2000 *Proc. SPIE* **4007** 682
 - [23] Cheng S Y, Cao Z L, Hu L F, Mu Q Q, Li P F, Xuan L 2010 *Opt. Precis. Eng.* **18** 1060 (in Chinese) [程少园, 曹召良, 胡立发, 穆全全, 李鹏飞, 宣丽 2010 光学精密工程 **18** 1060]
 - [24] 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]
 - [25] Liu C, Hu L F, Mu Q Q, Cao Z L, Gao F, Wang Y W, Xuan L 2010 *Opt. Precis. Eng.* **18** 2200 (in Chinese) [刘超, 胡立发, 穆全全, 曹召良, 高峰, 王永伟, 宣丽 2010 光学精密工程 **18** 2200]
 - [26] Gendron E 1994 *Astron. Astrophys.* **48** 187
 - [27] Conan J M, Rousset G, Madec P-Y 1995 *J. Opt. Soc. Am. A* **12** 1559

Modal prediction for open-loop liquid-crystal adaptive optics systems*

Liu Chao¹⁾²⁾ Hu Li-Fa¹⁾ Mu Quan-Quan¹⁾ Cao Zhao-Liang¹⁾ Hu Hong-Bin¹⁾²⁾
Zhang Xing-Yun¹⁾²⁾ Lu Yong-Jun³⁾ Xuan Li^{1)†}

1) (State Key Laboratory of Applied Optics , Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

2) (Graduate school of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (Optoelectronic Institute of Dalian Nationalities University , Dalian 116600, China)

(Received 23 August 2011; revised manuscript received 29 September 2011)

Abstract

In order to reduce the time delay of the liquid-crystal (LC) adaptive optics system (AOS) which reduces the image resolution of the observed objects, we present a new technique for the first time which is called recursive least square (RLS) modal prediction of turbulent wavefront. First, we introduce the structure of the open-loop LC AOS with RLS predictor. Second, we present the RLS modal prediction algorithm in detail. Third, an actual open-loop LC AOS is designed and built, and the RLS prediction is carried out on it. It is shown that under a pure time delay system and the turbulent condition with Greenwood frequency of 35 Hz and Fried parameter of 6 cm, after prediction the residual wavefront error reduces to 0.15 wave (wave = 785 nm) from 0.26 wave that is obtained through the direct open loop correction. The prediction gain reaches 42%. Finally, the images obtained by the open-loop AOS with and without prediction are demonstrated. With direct correction without prediction, the image resolution reaches 25.4 cycles/mm. After the correction with RLS prediction, the image resolution reaches 32.0 cycles/mm which is equal to 0.9 of the diffraction limit resolution of the system. Therefore, with respect to correction without prediction, a relative gain of 26% in image resolution is achieved with RLS prediction. In conclusion, the RLS modal prediction can improve the image resolution of the open-loop LC AOS effectively.

Keywords: adaptive optics, turbulent prediction, recursive least square, liquid crystal wavefront corrector

PACS: 95.75.Qr, 42.79.Kr, 42.68.-w

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 60736042,50703039).

† E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn