

快速响应的硅基纯相位液晶器件对动态大气湍流波前的校正能力研究*

刘超¹⁾²⁾ 胡立发¹⁾ 曹召良¹⁾ 穆全全¹⁾ 彭增辉¹⁾ 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)

(2011年6月22日收到; 2011年7月28日收到修改稿)

液晶相位调制器的响应时间延迟是影响液晶自适应光学系统性能的一个主要因素, 为了提高系统的响应速度, 开发了一种快速响应的向列相液晶材料, 并制成了反射式硅基液晶器件 (LCOS). 分析了该 LCOS 的相位调制特性及其对静态畸变波前和扰动波前的校正能力. 首先, 测量了 LCOS 的电光响应特性, 得出其 780 nm 相位调制量的响应时间为 2 ms. 其次, 测量了 LCOS 的相位调制特性, 并对相位调制进行了线性化处理. 再次, 测量了用该 LCOS 搭建的液晶自适应光学系统的闭环和开环 3 dB 带宽, 它们分别为 16 和 18 Hz. 最后, 给出了开环液晶自适应光学系统校正大气湍流的数值模拟结果, 结果表明, 系统的 Strehl 比由校正前的 0.025 上升到了校正后的 0.225. 因此, 该液晶自适应光学系统可以对 Greenwood 频率为 30 Hz 以下的大气湍流进行较良好的校正.

关键词: 液晶相位调制器, 自适应光学, 波前校正, 3 dB 带宽

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

1 引言

近十年以来, 液晶相位调制器越来越受到科研人员及工程技术人员的青睐, 其主要优点有像素数大、小巧轻便、功耗低、价格便宜、产生的波面精度高、重复性好、定标后具有线性响应以及可以实现编程控制等^[1-5]. 然而, 液晶相位调制器的主要缺点是偏振依赖和响应速度慢^[6-8]. 对于偏振依赖即只能调制偏振光的缺点, 可以通过开环控制、两次调制抑或分别调制的办法来克服^[6,7,9]. 对于响应速度慢的缺点, 人们提出了采用铁电液晶或者双频液晶的办法来提高其响应速度^[8,10]. 然而, 由于铁电液晶的双稳态效应, 无法实现连续相位调制. 双频液晶的驱动方式复杂, 其驱动单元数也很难做大. 随着液晶材料研究的不断深入, 向列相液晶的响应速度变得越来越快, 目前可达到毫秒量级. 因此, 向列相液晶相位调制器已经成功应用

于大气及视网膜自适应光学系统中^[11,12].

对应用于大气自适应光学系统中的液晶相位调制器, 液晶的响应时间直接影响系统的带宽. 目前已报道的向列相液晶相位调制器的响应时间约为 4—5 ms^[12], 只能校正 10 Hz 左右的湍流波前. 为了使得液晶自适应光学系统能够校正更快的湍流波前, 需要研究响应速度更快的液晶相位调制器. 本课题组首次开发出了一款高响应速度的向列相液晶相位调制器, 响应时间达到了 2 ms. 本文主要致力于该液晶相位调制器的电光特性、相位调制特性的测试以及其波前校正能力的分析. 给出了该液晶相位调制器的电光响应特性, 测量了相位调制特性并对相位响应进行了线性化处理. 同时还给出了由该液晶相位调制器组成的闭环和开环自适应光学系统的校正效果并测量了相应的 3 dB 带宽, 得到了开环自适应光学系统校正大气湍流波面的数值模拟结果.

* 国家自然科学基金 (批准号: 60578035, 50703039) 资助的课题.

† E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn

2 液晶相位调制器的电光响应特性

基于自制的液晶材料, 加工的快速液晶相位调制器是一种反射式硅基液晶器件 (LCOS). LCOS 的盒厚为 1.4 μm . 所使用的向列相液晶在室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 时的短轴折射率 n_o 为 1.50, 长轴折射率 n_e 为 1.89, 长轴与短轴折射率差 Δn 为 0.39. 为了更加准确地掌握该 LCOS 的响应特性, 对其电光特性进行了实验测试. 测量的实验原理是利用偏振光的干涉, 测试装置如图 1 所示. 光源采用中心波长为 635 nm(以下用 λ_{635} 表示) 的半导体激光器. 激光经过准直透镜后, 成为平行光. 经过偏振片(偏振方向与液晶分子长轴的夹角为 45 $^{\circ}$)后, 斜入射到 LCOS 面板上, 然后被反射回来. 反射光与入射光的夹角需小于 5 $^{\circ}$. 反射光再次经过偏振片后, 被反射镜反射并经过会聚透镜, 最后被聚焦到光电转换器上. 光电转换器将光强信号转换为电压信号并被示波器接收.

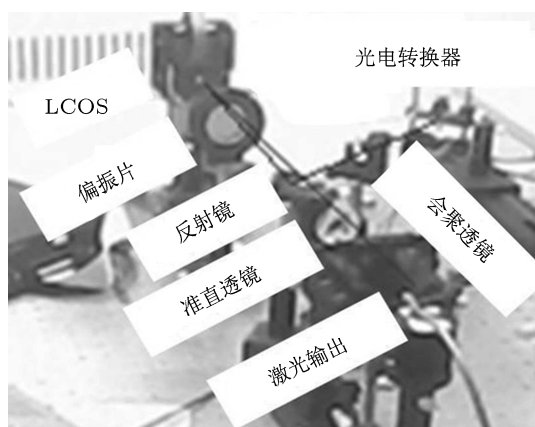


图 1 LCOS 的电光响应测试装置

给 LCOS 交替地施加电压和撤掉电压, LCOS 中的液晶分子也交替地竖起与倒下. 在平行于 LCOS 基板的平面内, 可以把入射的偏振光分解为沿倒下时的液晶分子长轴 (e 光) 和短轴 (o 光) 方向的两个垂直分量. e 光的折射率

$$n_e(\theta) = \frac{n_o n_e}{(n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}, \quad (1)$$

其中 θ 为液晶分子长轴与倒下状态时长轴的夹角. o 光的折射率始终为 n_o , 与 θ 无关. 当光通过 LCOS

以后, o 光与 e 光的相位差

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e(\theta) - n_o) d, \quad (2)$$

其中, d 为 2 倍的液晶层厚度, λ 为激光波长. 当激光第二次通过偏振片后, 其光强

$$I = A^2 [1 - \sin^2(\Delta\varphi/2)], \quad (3)$$

其中 A 为激光第一次通过偏振片后的振幅. 由 (3) 式可知, 得到光强变化后, 对其进行归一化处理, 就可以获得 LCOS 的相位调制量以及相应的响应时间.

实验测得的光强变化如图 2(a) 所示, 相应的相位响应如图 2(b) 所示. 器件无穷长时间相位调制量达到了 1028 nm, 如图 2(b) 所示. 由于液晶自适应光学系统设计的调制量只需 780 nm, 其对应的响应时间为 2 ms(做成 780 nm 的液晶相位调制器后, 响应时间会略长于 2 ms). 这比普通的商业化液晶相位调制器的响应时间快一倍以上.

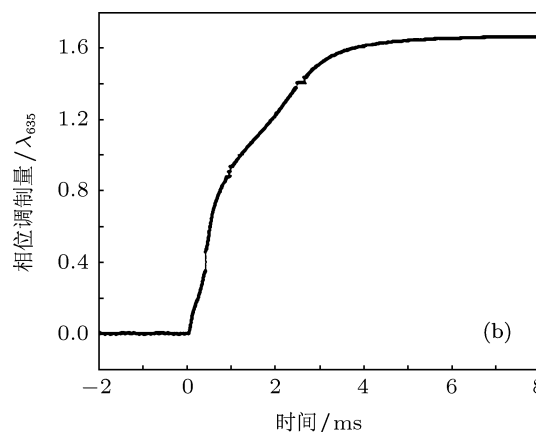
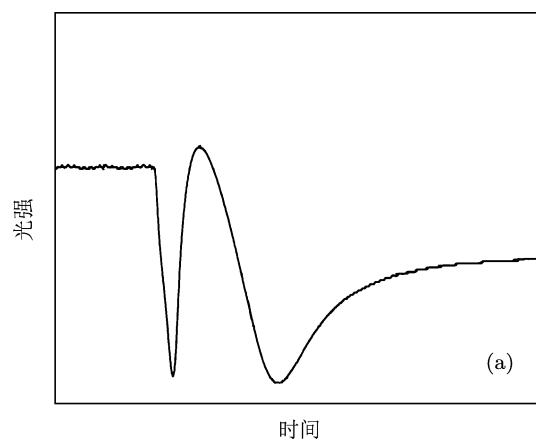


图 2 LCOS 的电光响应 (a) 光强随时间的变化; (b) 相位随时间的变化

3 LCOS 的相位调制特性及其线性化

一般而言, LCOS 相位调制量与施加在其上的电压呈非线性关系. 为了方便控制, 需要对其进行线性化处理. 处理的方法是先对线性离散化的相位分布 P_1 按照液晶的非线性特性进行预处理, 得到离散灰度级 G , G 转换成电压后施加在 LCOS 的各像素上, 使 LCOS 产生与 P_1 相等的线性化相位分布. 对于 LCOS 的控制, G 的取值范围为 0—128 或 128—255, P_1 的取值范围为 0—255. 图 3 给出了施加在 LCOS 上的电压与灰度级的关系. 当 G 从 0 增加到 128 时, 电压从最大值 V_{\max} (比如 10 V, 与工艺有关) 变化到最小值 V_{\min} (比如 0 V, 与工艺有关). 当 G 从 128 增加到 255 时, 电压值又从 V_{\min} 变化到 V_{\max} . 因此, G 只需选择 0—128 或者 128—255 中的一段即可. 本文选择了 128—255 段.

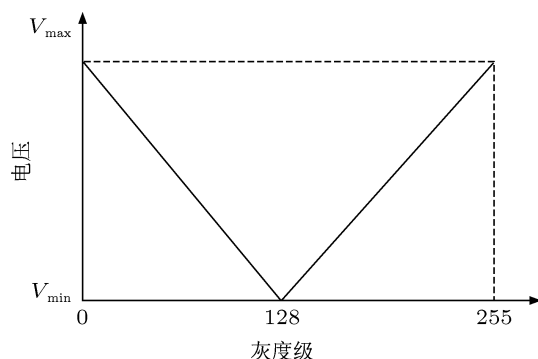


图 3 LCOS 上施加的电压与灰度级的对应关系

定标曲线 (LUT) 用于把需产生的相位分布 P_1 映射到灰度级分布 G , 以实现 LCOS 的线性化响应. 为了测量 LUT, 首先需要测量液晶的相位调制特性. 给 LCOS 施加如图 4(a) 所示的线性变化的灰度图, 其每行的相位分布相同, 都从 0 变化到 255. 采用线性 LUT 后 (即此时的 LUT 只是线性地将 0—255 区间映射到 128—255 区间), 对应的施加在 LCOS 上的电压从左到右线性地从 V_{\min} 变化到 V_{\max} . 利用 Zygo 干涉仪测量了 LCOS 产生的真实相位分布, 如图 4(b) 所示. 对每行相位分布求平均, 便获得了 LCOS 相位的非线性响应关系, 即 LCOS 的相位调制特性. 由图 4(b) 可以看出 LCOS 的调制量达到了 1025 nm, 与上述测得的 1028 nm 在实验误差范围内一致. 由于 LCOS 的调制量只需达

到 780 nm, 故将低电压端的调制量删除, 只保留高电压端的 780 nm 的相位分布. 然后将其归一化到 0—255 区间. 最后, 把相位分布当作自变量, 灰度级当作因变量, 做插值处理, 找出每个相位级次上对应的灰度级, 便得到了 LUT, 结果如图 5(a) 所示. 从图 5(a) 可以看出, 对于 780 nm 的相位调制量, 灰度级分布的取值范围是 154—255.

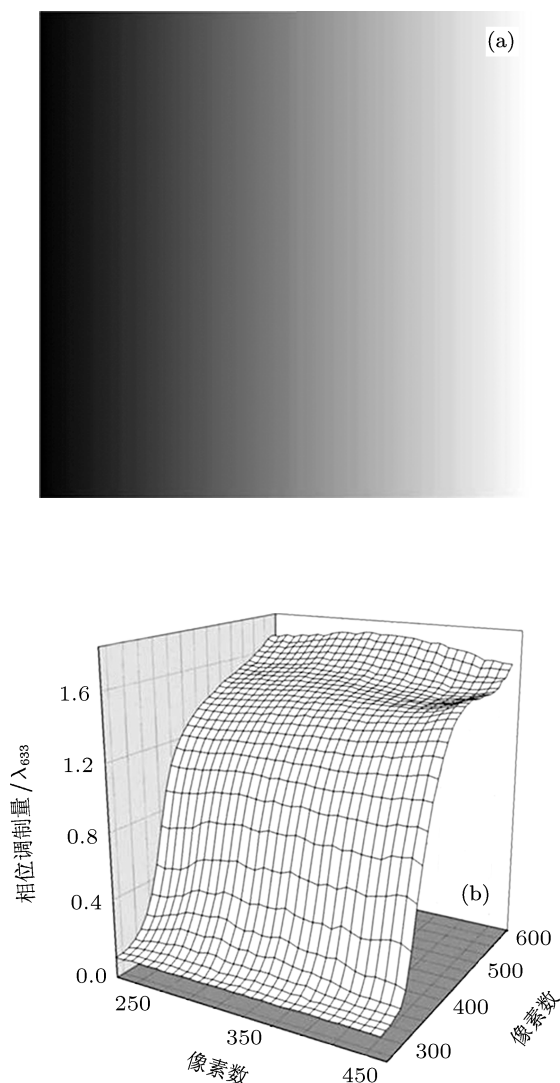


图 4 每行灰度级都线性地从 0 到 255 变化的灰度图及相应的相位响应曲面 (a) 灰度图; (b) 相应的相位响应曲面

利用所测量的 LUT, 仍然给 LCOS 施加图 4(a) 所示的灰度图, 得到了如图 5(b) 所示的相位响应. 由图 5(b) 可见, 相位响应的线性度非常好, 调制量为 784 nm, 与设计的 780 nm 在实验误差范围内一致. LCOS 定标的顺利完成为波前校正做好了准备.

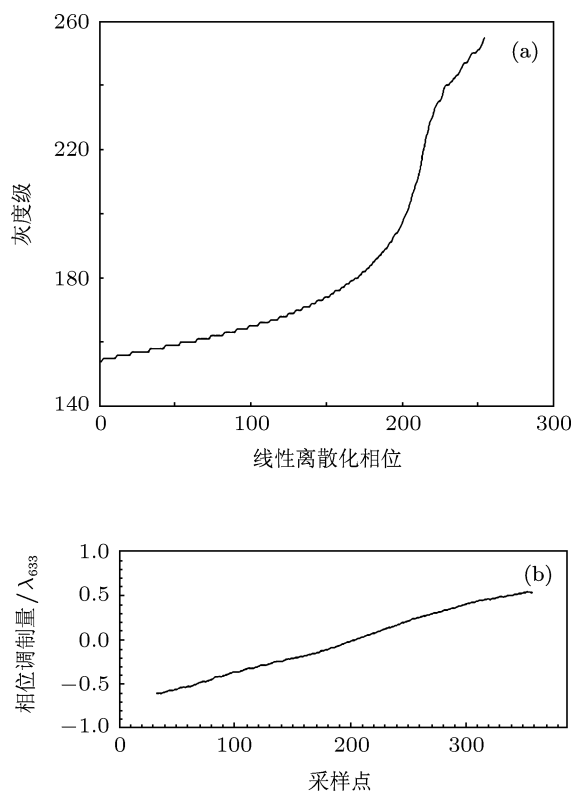


图5 LUT 以及应用该 LUT 后所获得的线性相位响应 (a) LUT; (b) 线性相位响应

4 LCOS 对静态畸变和动态扰动畸变的校正

4.1 闭环系统的校正效果

利用新研制和定标后的 LCOS 搭建了一个闭环自适应光学系统, 如图 6 所示. 由光纤束发出的白光经过 780 nm 的滤光片后成为单色光, 经光阑、透镜 L1 后被型号为 PI S330 的倾斜镜 (TTM) 反射, 然后经透镜 L2, L3 和分束棱镜 (BS) 后进入 LCOS, 被 LCOS 反射后经 BS、透镜 L4 和 L5 进入偏振分束棱镜 (PBS). PBS 将其分成偏振方向相互垂直的两束光, 其中一束光进入一个型号为 ShaH1000 的哈特曼探测器^[13,14] (WFS), 另一束光进入一个电荷耦合相机 (CCD, 图 6 中 WFS2 的位置). 对于闭环系统, 需要把偏振片和四分之一波片 ($\lambda/4$) 插入光路中, 如此 WFS 所探测到的便是经 LCOS 校正后的波前残差, CCD 所接收到的就是经闭环校正后光纤束的像. WFS 的帧频为 500 Hz,

LCOS 的响应时间为 2 ms.

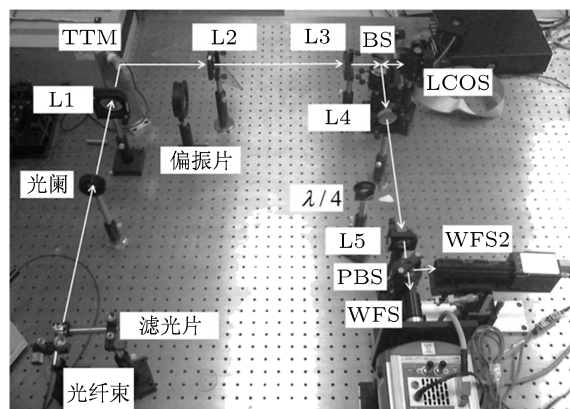


图6 开环/闭环液晶自适应光学系统

首先检验了该 LCOS 对静态畸变的校正能力. 当系统的响应矩阵^[15] 测量完成以后, 在光纤束与光阑之间插入一个屈光度为 500° 的镜片, 给系统引入了一个静态的波前畸变. 用 WFS 测量畸变波前, 其峰峰值 (PV) 等于 4.01 个波长 (波长为 780 nm), 均方根值 (RMS) 为 1.03 个波长, 如图 7(a) 所示. 相应的光纤束的像模糊不清, 如图 7(c) 所示. 经系统校正后, 畸变波前的 PV 降为 0.15 个波长, RMS 降为 0.02 个波长, 如图 7(b) 所示. 此时能清楚地分辨光纤束中每个光纤芯的像, 如图 7(d) 所示.

为了确定 LCOS 对扰动波前的校正能力, 需要测量系统的闭环带宽. 把屈光度为 500° 的镜片从光路中拆除, 使用 TTM 产生不同频率的正弦倾斜扰动, 然后用系统进行校正. 图 8(a) 给出了 WFS 所探测到的倾斜模式系数在系统校正前后的变化情况. 从图 8(a) 可以看出, 经校正后, 倾斜扰动的幅值明显减小. 为了定量评价系统对各种扰动频率的校正效果, 引入扰动抑制的概念, 其定义为^[8]

$$R = 20 \lg \left(\frac{A_{\text{res}}}{A_{\text{tur}}} \right), \quad (4)$$

其中, A_{res} 是校正后扰动的振幅, A_{tur} 是校正前扰动的振幅. 此处采用 3 dB 带宽对系统的扰动抑制能力进行评价, 定义为当扰动抑制 $R = -3$ dB 时所对应的频率. 图 8(b) 给出了系统对各个扰动频率的抑制作用. 从图 8(b) 可以看出, 系统的闭环带宽为 16 Hz, 并且对 20 Hz 以下的频率扰动都有抑制作用.

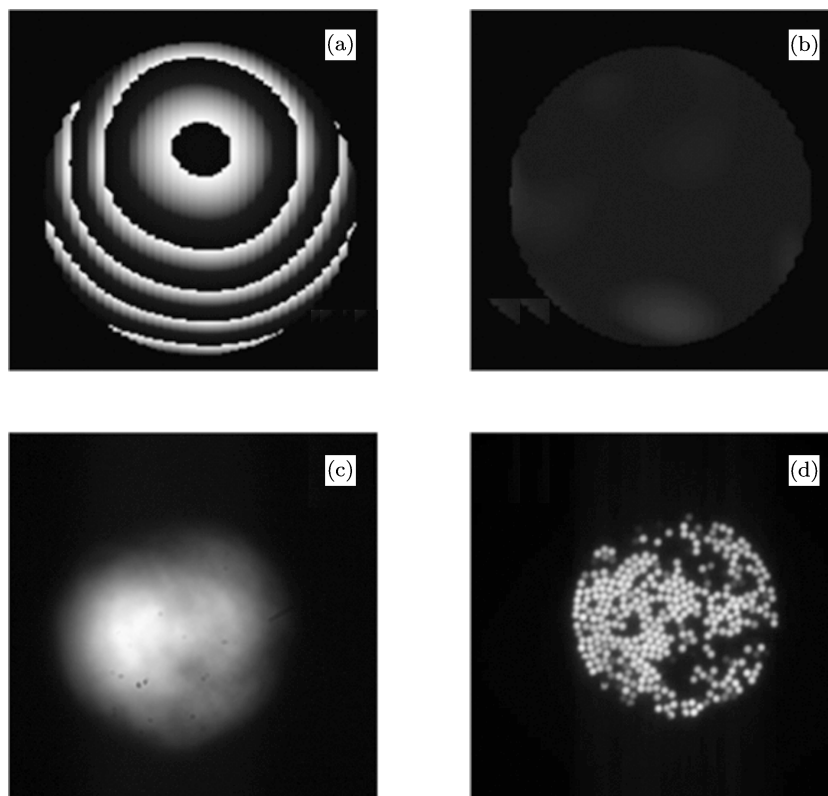


图 7 经自适应光学系统校正前后的波相差及光纤束的像 (a) 校正前的波前畸变; (b) 校正后的波前畸变; (c) 校正前光纤束的像; (d) 校正后光纤束的像

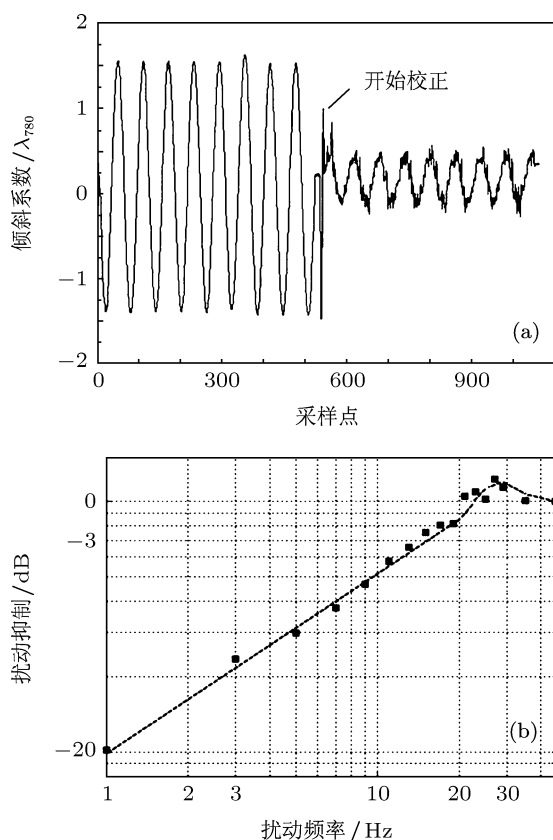


图 8 闭环液晶自适应光学系统对倾斜扰动的校正 (a) 倾斜扰动校正前后的幅度变化; (b) 系统对各扰动频率的校正效果

4.2 开环系统对动态扰动波前的校正

对于液晶自适应光学系统, 开环校正可以提高能量利用率和校正频率^[9,16]. 因此, 大部分大气液晶自适应光学系统都工作在开环状态下. 我们对开环系统的带宽进行了测试. 实验系统如图 6 所示, 把偏振片和四分之一波片从光路中移出. 此时 LCOS 调制的光被 PBS 反射, WFS 测量到的是未校正的波前畸变, 故系统为开环系统. 为了探测校正后的扰动波前, 在系统中移开 CCD, 换上另一个哈特曼探测器 (WFS2), 专门测量开环校正后的波前扰动. 开环系统对各倾斜扰动频率的抑制作用如图 9 所示. 给定液晶不同的响应时间, 测量了相应的 3 dB 开环抑制带宽. 液晶响应时间为 2 ms 时, 带宽最高, 达到 18 Hz; 响应时间为 6 ms 时, 带宽下降为 12 Hz. 由此可知, 给定液晶响应时间越长, 系统的带宽越小, 校正效果越稳定. 这主要是因为响应时间越长, 液晶响应越到位. 对于实际的开环系统, 给定的响应时间应该与实际的液晶响应时间相等.

在给定 2 ms 响应时间时, 开环液晶自适应光

学系统的带宽为 18 Hz, 比闭环系统带宽快了 2 Hz, 这主要是因为开环状态下可以实现并行处理. 对于开环系统, 当 LCOS 开始响应时, WFS 就可以开始下一个校正周期的波前探测. 而对于闭环系统, WFS 需要等到 LCOS 响应到位以后才能开始下一个校正周期的波前探测. 不仅如此, 开环液晶自适应光学系统还可以提高 50% 的能量利用率^[9]. 因此, 应用于大气湍流校正的液晶自适应光学系统通常使用开环控制.

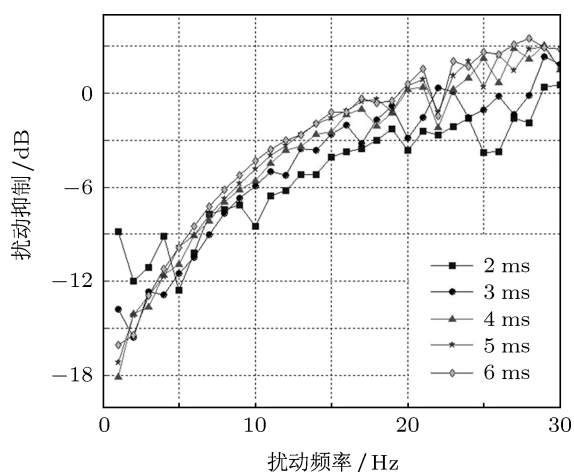


图9 开环液晶自适应光学系统对各扰动频率的校正效果

4.3 开环系统校正大气湍流波面的数值模拟

由于实验条件的限制, 对于大气湍流波前的校正实验暂时未能开展. 所以, 利用数值分析的方法分析了系统对大气湍流波面的校正能力, 为以后湍流校正实验的顺利开展做好准备. 长春地区夜

间 500 m 水平大气湍流的 Greenwood 频率 f_G 一般不超过 26 Hz^[17]. 系统的开环带宽 $f_{3\text{ dB}}$ 为 18 Hz, 因此, 根据残差公式^[18]

$$\sigma^2 = \left(\frac{f_G}{f_{3\text{ dB}}} \right)^{5/3} \quad (5)$$

可知, 经开环系统校正后的波面残差的 RMS $\sigma = \left(\frac{f_G}{f_{3\text{ dB}}} \right)^{5/6} = \left(\frac{26}{18} \right)^{5/6} \text{ rad} = 1.36 \text{ rad}$.

利用大气湍流波面的模拟算法^[19], 模拟了口径 D 为 1.2 m, 大气相干长度 r_0 为 8 cm, Zernike 项数为 136 的一幅大气湍流相位分布, 结果如图 10(a) 所示. 其 PV 为 49.4 rad, RMS 为 10.9 rad. 设经过 TTM 校正后, 湍流波面上的总体倾斜完全去除, 其 PV 变为 24.9 rad, RMS 为 3.3 rad, 结果如图 10(b) 所示. 设湍流的 f_G 为 26 Hz, 则经过 LCOS 校正后, 残差波面的 PV 降低到 9.4 rad, RMS 减小为 1.3 rad, 如图 10(c) 所示.

对于图 10(b), (c) 波面, 计算了相应的点扩散函数, 所得结果如图 11 所示. 校正前, 能量分散, Strehl 比只有 0.025. 经 LCOS 校正后, 能量聚集, Strehl 比达到了 0.225.

根据图 11 的点扩散函数, 对一预定观察目标校正前后的图像进行了模拟. 经湍流扰动后的图像一片模糊, 分辨不出任何细节, 如图 12(a) 所示; 校正后如图 12(b) 所示, 效果比较明显, 可以清楚地看到目标的轮廓, 还可以分辨目标的主要结构; 图 12(c) 是观察目标衍射极限的图像. 以上模拟的是在湍流的 Greenwood 频率 f_G 为 26 Hz, 液晶自适应光学系统开环带宽为 18 Hz 情况下的结果, 未考虑跟踪误差、探测误差、探测能量等方面的因素.

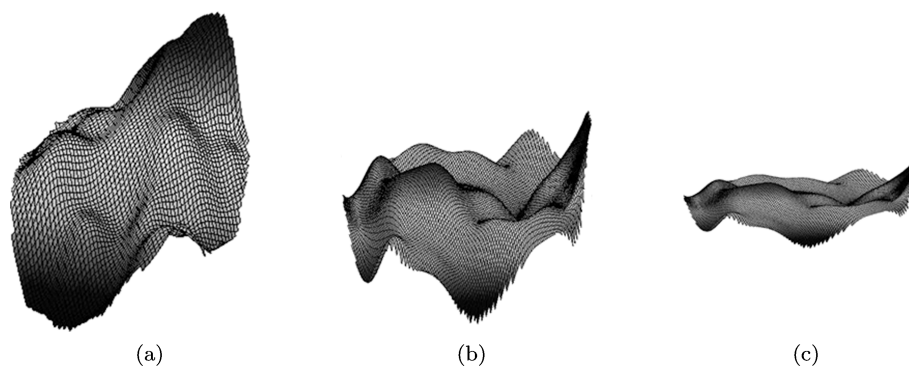


图 10 模拟的大气湍流波面 (a) 校正前; (b) 经过 TTM 校正; (c) 经过 LCOS 校正

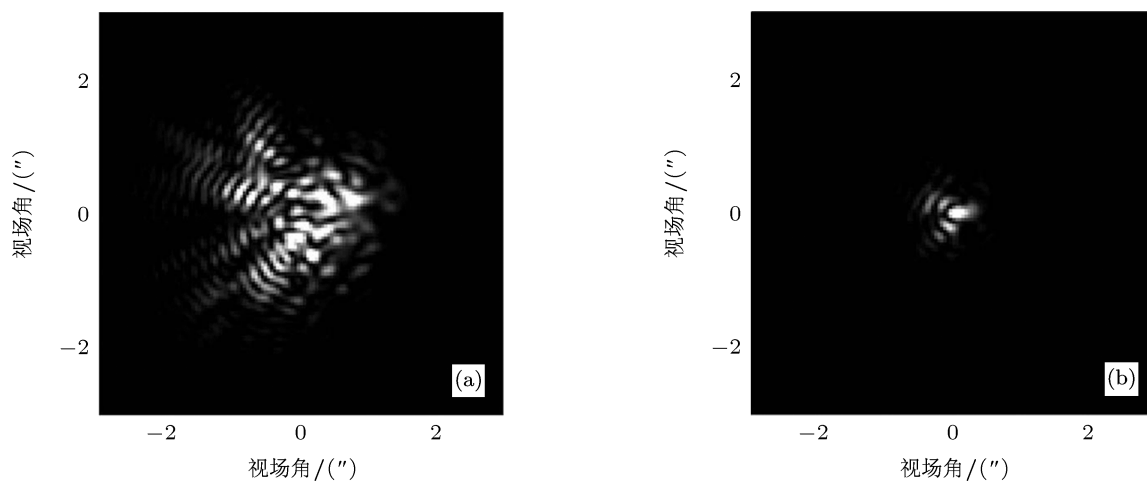


图 11 校正前后的点扩散函数 (a) 校正前; (b) 校正后

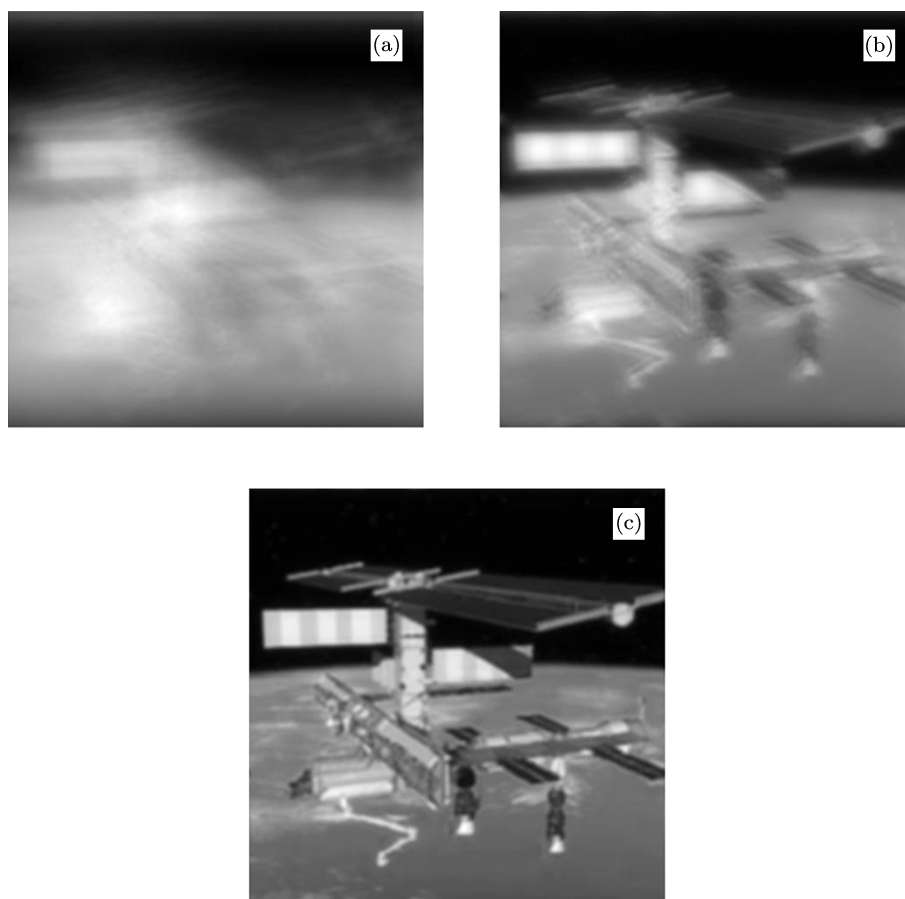


图 12 液晶自适应光学系统对一预定观测目标的模拟校正效果 (a) 校正前; (b) 校正后; (c) 衍射极限图像

5 结论

本文分析了波前相位调制量为 780 nm, 响应时间为 2 ms 的快速向列相液晶相位调制器对湍

流波前的校正能力. 首先, 测量了 LCOS 的电光响应特性, 得出其总的相位调制量为 1028 nm, 满足 780 nm 调制量的要求. 其次, 测量了 LCOS 相位调制特性, 并对相位响应进行了线性化处理, 得到

了 LUT. 接着, 搭建了闭环和开环自适应光学系统. 测量出了系统的闭环 3 dB 带宽为 16 Hz, 开环 3 dB 带宽为 18 Hz. 最后, 对开环的自适应光学系统做了校正 26 Hz 大气湍流的数值模拟实验. 结果表明, 系统的 Strehl 比由校正前的 0.025 上升到了校正后的 0.225. 预定观测目标的图像在校正前一片模糊, 无法分辨, 经校正后可以清楚地分辨目标的轮廓及主要结构. 因此, 该系统可以对 30 Hz 以下的大气

湍流扰动进行良好的校正.

需要指出的是, 自适应光学系统的校正能力还与波前探测器的帧频以及波前重构的计算时间有关系. 本文所使用的是帧频为 500 Hz 的哈特曼波前探测器. 要提高自适应光学系统的 3 dB 带宽, 不仅要降低液晶相位调制器的响应时间, 也要尽量采用高帧频的波前探测器, 同时还应降低数据处理和传输的时间.

- [1] Dayton D, Sandven S, Gonglewski J, Browne S, Rogers S, McDermott S 1997 *Opt. Express* **1** 338
- [2] Liu C, Mu Q Q, Hu L F, Cao Z L, Xuan L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 064214
- [3] Love G D 1997 *Appl. Opt.* **36** 1517
- [4] Restaino S R, Payne D M, Baker J T, Andrews J R, Teare S W, Gilbreath G C, Dayton D, Gonglewski J 2003 *Proc. SPIE* **5003** 187
- [5] 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]
- [6] Hu L, Xuan L, Mu Q, Cao Z, Li D, Liu Y, Peng Z, Lu X 2009 *J. Opt.* **12** 045501
- [7] Love G 1993 *Appl. Opt.* **32** 2222
- [8] Dayton D, Browne S, Gonglewski J, Restaino S 2001 *Appl. Opt.* **40** 2345
- [9] Liu C, Hu L, Mu Q, Cao Z, Xuan L 2011 *Appl. Opt.* **50** 82
- [10] Burns D C, Underwood I, Gourlay J, O'Hara A, Vass D G 1995 *Opt. Commun.* **119** 623
- [11] Jiang B G, Cao Z L, Mu Q Q, Li C, Xia M L, Xuan L 2008 *Opt. Precis. Eng.* **16** 1805 (in Chinese) [姜宝光, 曹召良, 穆全全, 李抄, 夏明亮, 宣丽 2008 光学精密工程 **16** 1805]
- [12] Cao Z, Mu Q, Hu L, Li D, Peng Z, Liu Y, Xuan L 2009 *Opt. Express* **17** 2530
- [13] Chen 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]
- [14] 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]
- [15] Liu C, Kong N N, Hu L F, Xuan L 2009 *Opt. Precis. Eng.* **17** 2899 (in Chinese) [刘超, 孔宁宁, 胡立发, 宣丽 2009 光学精密工程 **17** 2899]
- [16] Mu Q, Cao Z, Li D, Hu L, Xuan L 2008 *Appl. Opt.* **47** 4279
- [17] 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]
- [18] Tyler G A 1994 *J. Opt. Soc. Am. A* **11** 358
- [19] Roddier N 1990 *Opt. Eng.* **29** 1174

Dynamic wavefront correction with a fast liquid-crystal on silicon device of pure phase*

Liu Chao¹⁾²⁾ Hu Li-Fa¹⁾ Cao Zhao-Liang¹⁾ Mu Quan-Quan¹⁾
Peng Zeng-Hui¹⁾ 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 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 22 June 2011; revised manuscript received 28 July 2011)

Abstract

In order to increase the response speed of the liquid crystal phase modulator (LCPM), a new kind of fast liquid crystal material is designed and synthesized, and a corresponding LCPM, called liquid crystal on silicon (LCOS), is fabricated. We test the phase modulation of the LCOS and examine its wavefront correction ability on static and disturbed wavefront. First, the electro-optical response is tested. The response time to a phase modulation quantity of 780 nm is 2 ms. Second, the phase modulation of the LCOS is tested and linearized. Third, the 3 dB closed-loop and open-loop disturbance rejection bandwidths of the adaptive optics system (AOS) are measured to be 16 and 18 Hz, respectively. Finally, the simulated correction of 26 Hz turbulence with the open-loop AOS is conducted. After correction, the Strehl ratio increases from 0.026 to 0.225. Therefore, with our fabricated LCOS, the liquid crystal AOS is able to correct the turbulence below 30 Hz.

Keywords: liquid crystal phase modulator, adaptive optics, wavefront correction, 3 dB bandwidth

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

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60578035, 50703039).

† E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn