

液晶空间光调制器用于波前校正的性能

蔡冬梅^{1, 2} 姚 军¹ 姜文汉¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209)

² 太原理工大学应用物理系, 山西 太原 030024

摘要 液晶空间光调制器(Liquid crystal spatial light modulator, LC-SLM)作为新型波前校正器具有驱动单元数目多、驱动电压低、控制灵活、价格低廉等优点。通过对 LC-SLM 时间-空间特性的研究, 讨论其在天文观测自适应光学系统中应用的可能性和局限性。利用 LC-SLM 和哈特曼波前传感器构成自适应光学系统, 对低频为主的静态波前像差实现闭环校正。闭环校正后的 RMS 值和 PV 值由闭环前的 0.628λ 、 2.872λ 减小为 0.031λ 、 0.337λ , Strehl 比从 0.04 提高到近似衍射极限的 0.81。利用衍射原理, 对 LC-SLM 的衍射效率进行了数值计算和实验测量。研究表明, LC-SLM 能对大气湍流引入的光波畸变实现高精度校正; 然而响应速度慢、光能利用率低限制了它目前在实际自适应系统中的使用, 不能满足实时校正的要求、以及对微弱目标的应用。

关键词 自适应光学; 液晶空间光调制器; 波前校正

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0285

Performance of Liquid-Crystal Spatial Light Modulator Using for Wave-Front Correction

Cai Dongmei^{1, 2} Yao Jun¹ Jiang Wenhan¹

(¹ State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China
² Department of Applied Physics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract Liquid-crystal spatial light modulator (LC-SLM) has the attractive advantages of large number of correcting elements, low applied voltage, easy control and low cost etc. as an emerging wave-front corrector. Based on the investigation of its time-space characteristics, the capability and limitations of LC-SLM in adaptive astronomical imaging application systems were discussed. An adaptive optical system with a LC-SLM and a Shack-Hartmann sensor was close-looped. As a result, a static aberration, which is mainly composed of low order aberrations, was corrected. RMS value and PV value after closed-loop correction are reduced from 0.628λ , 2.872λ to 0.031λ and 0.337λ , with a Strehl ratio improvement from 0.04 to near diffraction-limited of 0.81. Apart from that, the diffraction efficiency of LC-SLM was calculated and measured. From the result, LC-SLM is capable of correcting atmosphere turbulence nicely. However, Low optical efficiency and response speed are huge drawbacks to limit LC-SLM in a practical adaptive optical system to correct atmospheric aberration in real time and using for faint object.

Key words adaptive optics; liquid-crystal spatial light modulator; wave front correction

1 引 言

自适应光学系统实时校正波前动态像差, 使光学系统具有自动适应外界条件变化始终保持良好工作状态的能力, 其中关键器件——波前校正器是决定自适应光学系统性能、价格的关键因素, 它的发展水

平某种意义上代表了自适应光学的发展水平^[1]。目前最常用的波前校正器——变形镜由于价格昂贵、能耗高、体积大、驱动单元少等问题, 应用范围受到极大限制。尤其在可见光领域, 校正器需要的驱动单元数目比相应红外观测中要多得多。对克服中等

收稿日期: 2008-07-09; 收到修改稿日期: 2008-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(60438030)、中国科学院创新基金(CXJJ-09-505)和中国科学院光电技术研究所基金(C06K022)资助课题。

作者简介: 蔡冬梅(1974—), 女, 博士, 主要从事液晶自适应光学技术、MEMS 波前校正器方面的研究。

E-mail: dm_cai@163.com

强度大气湍流的大口径天文望远镜,驱动器的数目往往需要上万个,靠目前的变形镜制造技术极难实现。液晶空间光调制器(LC-SLM)采用微电子制备技术,像素数目多、能耗低、体积小、成本低、易于控制的特点使基于 LC-SLM 的自适应光学技术受到越来越多的关注^[2~9]。

基于 LC-SLM 的自适应系统要实现高精度、实时波前校正,LC-SLM 除了要满足普通光学元件的基本要求—足够的面形精度和光洁度,在工作波段具有高反射率,还要能对外加控制作出准确而迅速的响应。本文以电寻址相位型液晶空间光调制器作为研究对象,建立基于 LC-SLM 的液晶自适应闭环系统,针对大气湍流校正像差的特点,对目前 LC-SLM 在大气湍流自适应波前校正应用中的优势和限制因素进行理论分析和实验研究。

2 LC-SLM 的时间特性

自适应光学用在透过大气的目标成像或激光大气传输系统时,大气湍流造成的动态随机扰动变化速度很快,波前畸变频率可以达到几百赫兹,对波前校正系统的时间带宽要求很高,系统的各个组成部分需要快速响应。传统变形反射镜的响应时间小于 1 毫秒,谐振频率在几千赫兹以上,对一般带宽在几百赫兹以下的自适应光学系统,不构成限制。

液晶空间光调制器对波前的相位调制基于液晶分子的偏转,液晶分子在电场作用下偏转,偏转角度随电压增大而增加,分子指向的变化导致有效折射率改变,光程差变化。此过程是一种分子过程,速度远远低于原子、电子过程。不论分子的上升或下降过程,都是动力克服阻力使分子状态发生变化的过程,且下降过程总慢于上升过程。提高液晶器件的响应速度主要靠降低液晶层厚度和采用折射率高的材料;然而厚度的减小会受到“彩虹现象”的限制,因此限定 LC-SLM 对工作波长的相位调制深度为 2π 。

BNS 公司的 Modal P256 LC-SLM 是基于硅基技术的反射式 LC-SLM,有效像素单元 256×256 ,工作波长 633 nm;相位调制度 $[0 \sim 2\pi]$;填充比 85%,响应时间 33~100 ms。通过测量,其上升时间和下降时间分别为 16 ms、21 ms^[10]。液晶的上升、下降时间仅反映分子在电场作用下克服阻力,分子状态发生改变所需时间。对自适应光学系统,波前校正器对控制信号的相位延迟量才是决定器件工作带宽的关键因素。

对 LC-SLM 施加不同频率的正弦信号,得到 LC-SLM 对频率的相位延迟曲线,见图 1。图中横坐标为正弦信号频率,纵坐标为 LC-SLM 对信号的相位延迟量。对最简单的比例积分控制器(PID),闭环系统的相位裕度等于 $(90 - \theta)^\circ$, θ 为系统的相位延迟量,闭环系统稳定工作的相位裕度应大于 40° ^[11]。当频率为 4 Hz 时,LC-SLM 的相位延迟量为 54° 。忽略其它相位延迟因素,系统闭环工作时传递函数的过零频率最大为 4 Hz,远远小于变形镜几千赫兹的谐振频率。LC-SLM 的时间特性决定了它目前不能对大气湍流造成的波前畸变进行实时校正。

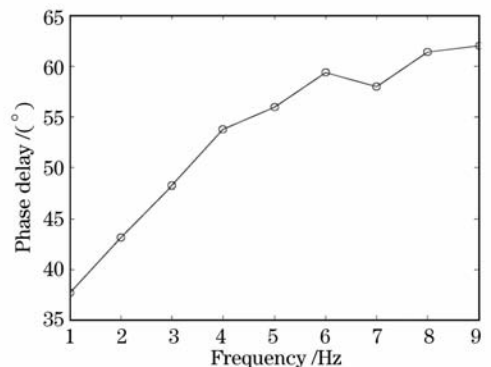


图 1 LC-SLM 的相位延迟曲线

Fig. 1 The phase delay of LC-SLM

3 LC-SLM 的空间特性

3.1 LC-SLM 的表面面形

由于制造工艺的局限和误差,LC-SLM 的光学反射基板不是一个理想的光学面,存在一定的面形误差。利用 Veeco 干涉仪测量 LC-SLM 的基板面形质量,基板反射面的峰谷(PV)值为 0.32λ ,RMS 值为 0.063λ , $(\lambda = 635 \text{ nm})$ 。图 2 给出了面形误差包含的像差分布,横坐标为 Zernike 项,纵坐标为像差系

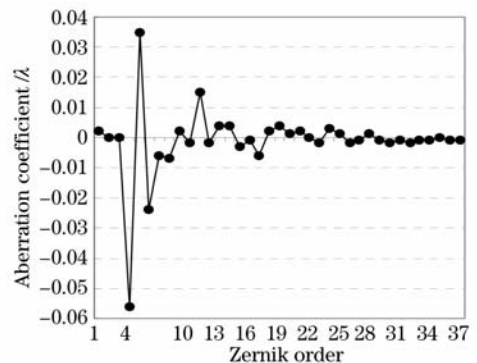


图 2 LC-SLM 表面面形像差分布

Fig. 2 Aberration distribution of LC-SLM's surface

数。基板面形误差主要由低阶的像散和离焦组成，同时有一定量的彗差和球差。作为波前校正器，要求 LC-SLM 在校正面形误差基础上，仍具备一定的校正能力，才能满足校正外界动态干扰的要求。

3.2 LC-SLM 的相位调制特性

作为波前校正器，LC-SLM 应工作在纯相位或近相位调制状态下，即调制后的波面强度不改变，或变化很小；同时闭环校正中，波前校正器的相位校正量和控制电压满足线性关系，易于校正信号的确定。Model P 256 LC-SLM 的相位调制特性曲线和强度变化曲线见图 3，灰度从 0~255 变化时，LC-SLM 的相位调制量变化了 2π ，相位调制曲线近似满足线性变化；强度调制归一化曲线变化缓慢，幅度小于 3%，可以认为 Model P256 工作于纯相位状态，近似没有强度调制^[10]。另外 LC-SLM 进行相位调制时，由于电场的边缘效应，相邻液晶分子的偏转互相影响，存在明显的相位交连。相位交连使 LC-SLM 类似一个低通滤波器，低频分量通过，高频分量被抑制，调制后波面分布趋向平滑^[12]。

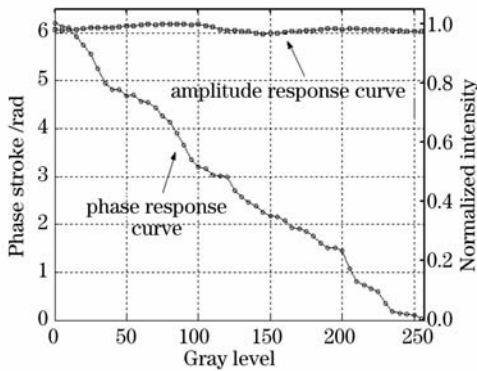


图 3 LC-SLM 相位、强度调制曲线
Fig. 3 Phase and amplitude response of LC-SLM with grey level

3.3 LC-SLM 拟合 Zernike 像差

作为波前校正器，LC-SLM 应具备一定的像差校正能力，补偿光学器件自身误差和外界干扰对光学系统的影响。与传统 PZT 变形镜相比，LC-SLM 的像素数目远远超过变形镜的驱动器个数。然而像素结构使 LC-SLM 的拟合波面不是一个连续面，单个像素只能产生一个整体相移，拟合波面用一个阶跃函数去逼近一个连续函数，二者间的误差，造成 LC-SLM 的校正能力降低。

波前校正器的最大变形量需要满足所有被校正误差的总和，例如望远镜，除校正大气湍流外，还要同时校正一定的静态误差。目前 PZT 变形镜的最大校正量为 $3\sim 6\ \mu\text{m}$ ，LC-SLM 为了提高响应速度，尽量减小液晶层厚，限定其相位调制深度为 $[0\sim 2\pi]$ ，相当于一个波长的最大变形量。对大于一个波长的像差，LC-SLM 利用相位包裹 (Phase wrapping) 方法对相位函数进行处理^[12]。

利用 LC-SLM 拟合 Zernike 像差，分析其对不同像差的拟合能力。图 4 是 LC-SLM 产生的离焦、像散、球差和彗差的干涉图样。从像差干涉条纹结果看，LC-SLM 完全能够拟合出 PV 值大于一个波长的各项 Zernike 像差，相位包裹方法有效地扩大了器件的动态调制范围。为准确评价 LC-SLM 的像差校正能力，分别选取离焦、球差和彗差进行定量分析，图 5 中 (a)、(b)、(c) 分别是离焦 Z_2^0 、球差 Z_4^0 和彗差 Z_3^1 的测量值曲线和理论曲线。横坐标、纵坐标表分别表示像差系数的理论值和哈特曼测量值。图中除了像差的测量曲线和理论曲线，同时给出了产生该像差时引入的其它像差的大小。测量值偏离理论值或引入其它像差都会造成像差的校正效果变差，LC-SLM 对该像差的较真能力下降。

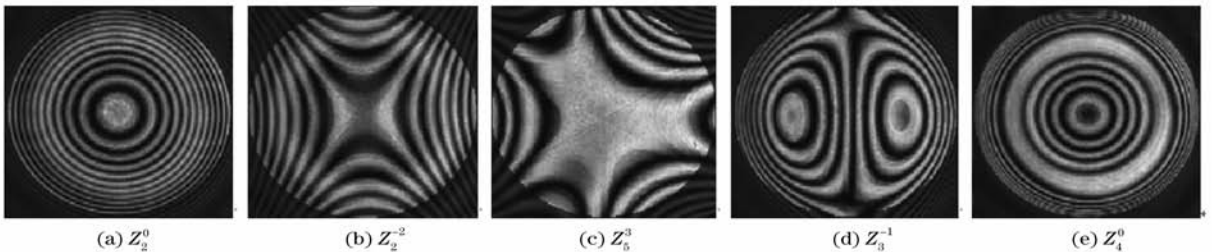


图 4 LC-SLM 产生 Zernike 像差的干涉图样

Fig. 4 Two-dimensional interferences patterns of Zernike aberrations in generated by LC-SLM

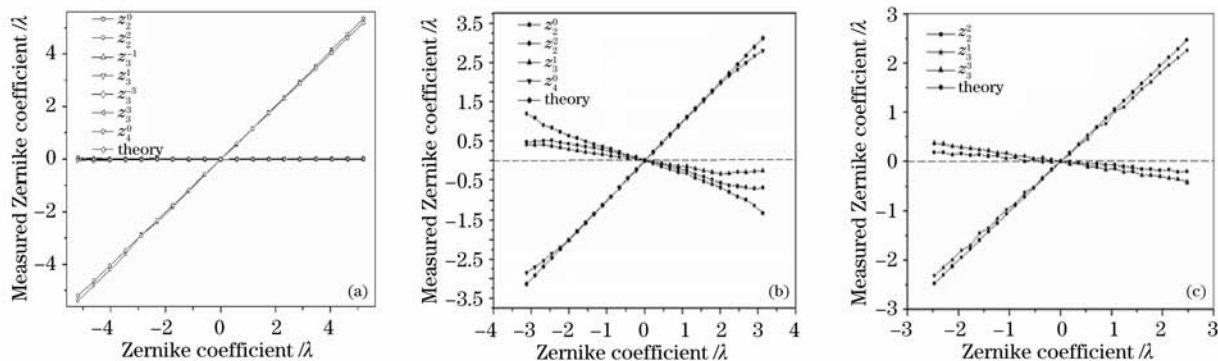


图 5 LC-SLM 产生像差测量曲线 (a) 离焦; (b) 彗差; (c) 球差

Fig. 5 Measured Zernike aberrations generated by LC-SLM (a) defocus; (b) coma; (c) spherical

图 5(a)中离焦系数在 $\pm 4\lambda$ 范围内, 测量值和理论值非常吻合; 系数大于 $\pm 4\lambda$, 测量值略小于理论值, 但基本无其它像差项引入, LC-SLM 对大离焦具有很好的校正效果。图 5(b)中, 像差系数小于 $\pm 2\lambda$, 测量值与理论值基本吻合, 但同时引入一定的其它像差; 超过 $\pm 2\lambda$, 测量值误差和引入的像差同时增大, LC-SLM 对球差的校正能力快速下降。图 5(c)中, LC-SLM 对彗差的校正能力介于二者之间。图 5 表明, 像差阶数增大, LC-SLM 的校正能力下降; 对低阶像差 LC-SLM 的校正精度高, 校正动态范围大; 校正动态范围不大时, LC-SLM 对高阶像差的拟合精度较好, 随着动态范围增大, LC-SLM 对高阶像差的校正能力快速下降^[12]。

对于球差等高阶像差, 像差变化快, 相位分布陡峭, 分立像素拟合的波面与连续波面之间的误差大; 另外像素的相位交连也是造成高阶像差校正能力低的重要原因, 高频分量被抑制, 波面平滑、下降。对低阶像差, 像差变化缓慢, 同时相位交连使离散波面趋于平滑, 有利于 LC-SLM 对低阶像差的校正。

4 LC-SLM 闭环校正实验

图 6 为基于 LC-SLM 的自适应闭环实验系统。入射光经过偏振棱镜 P、空间滤波系统 SF、光阑 AP 得到光束大小与 LC-SLM 工作面匹配的单体波, 像差板 ABP 在光路中引入像差, 单体波经分束镜 BS₁ 入射至 LC-SLM 进行调制, 调制波面通过透镜 L₁, L₂ 组成的光束匹配系统, 波前残余误差被 H-S 传感器测量; PC 机处理传感器测量结果得到波前残余误差, 得到相应的灰度控制信号, 送入 LC-SLM, LC-SLM 产生相位共轭波前, 像差被校正。位于成像透镜 L₃ 焦平面的 CCD 测量闭环校正前后的远场光斑。闭环系统采用比例-积分控制算

法, 实验确定系统的闭环增益系数为 0.6。

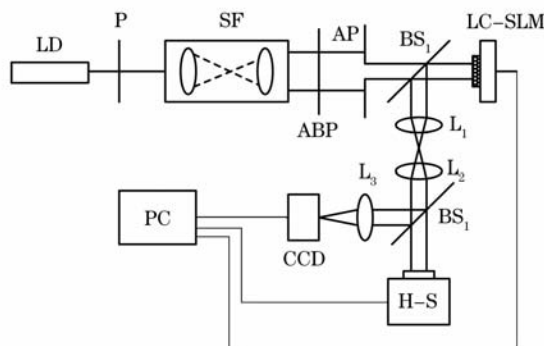


图 6 液晶自适应光学系统

Fig. 6 Optical lay out of liquid-crystal adaptive optical system

由于 LC-SLM 响应时间的限制, 像差板在光路中只引入静态波前畸变。图 7 为系统闭环前后的实验结果。图 7(a)、(c)分别为闭环前后的二维波面; 图 7(b)、(d)是与(a)、(c)分别对应的远场光斑。闭环后入射波面的 RMS 值、PV 值由闭环前的 0.628λ 、 2.872λ 变为 0.031λ 、 0.337λ , 入射畸变波前被校正为一个较好的平面波。校正后的 Strehl 比由 0.04 提高到接近衍射极限的 0.81, 远场光强基本聚焦在成像透镜焦平面位置。

像差板 ABP 在光路中引入的波前畸变主要由低阶像差: 离焦、像散组成, 同时伴有小量的球差等高阶像差项。实验结果验证了 LC-SLM 对低阶像差有很好的校正效果, 当高阶像差不大时, LC-SLM 也具备很好的校正能力。

在天文观测自适应光学系统中, 由大气湍流引起的光波畸变中, 低频成分占绝大多数。特别是整体倾斜占全部光波波前畸变的 87% 左右, 而离焦和像散占 7.9% 左右。仅从 LC-SLM 的像差校正能力看, LC-SLM 对大气湍流具备很好的校正效果。

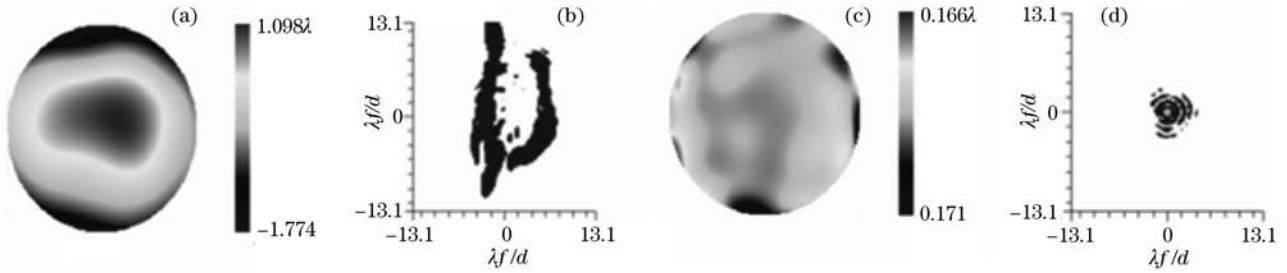


图 7 液晶自适应系统静态像差校正实验结果，(a)、(b)校正前波前和 PSF；(c)、(d)校正后波前和 PSF

Fig. 7 Experimental results of adaptive optical system using LC-SLM (a)、(b) are the aberration and PSF before correction. (c)、(d) are the aberration and PSF after correction

5 LC-SLM 的衍射效应

闭环校正实验中，入射光强度可调，能够满足哈特曼传感器对入射光强度的要求。然而对天文观测自适应系统，观测目标强度不能人为控制。要求波前校正器具备很高的光能利用率，使尽可能多的光强进入哈特曼传感器，满足其对入射光强度的要求，准确测量出波前残余误差。传统变形镜的反射率一般在 99% 以上，波前校正器几乎不影响光能损失。

由于 LC-SLM 实现相位调制的物理机制，目前商品化 LC-SLM 均要求入射光为线偏振光。入射波面进入 LC-SLM 之前首先通过偏振棱镜，入射光

强度降低 50%。入射偏振条件一方面降低了入射光强度，同时增加了光学系统的复杂性和成本。

除偏振条件外，电寻址型 LC-SLM 的离散像素结构使器件类似一个多矩孔光栅，造成强烈的衍射现象。入射光经 LC-SLM 反射后，在成像透镜的焦平面上很容易观察到在强度最大的 0 级衍射斑的周围分布着强度依次变弱的各次级衍射光斑，零级谱外的光能损失使器件的光能利用率降低。零级衍射效率反映了 LC-SLM 的最大光能利用率。

根据光的衍射原理，垂直入射的线偏振光经 LC-SLM 反射后的远场强度分布为

$$I(x, y) = \frac{d^2 D}{(\lambda f)^2} \text{sinc}^2\left(\frac{dD^{1/2}x}{\lambda f}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{dD^{1/2}y}{\lambda f}\right) \frac{\sin^2\left(\frac{\pi Ndx}{\lambda f}\right) \sin^2\left(\frac{\pi Ndy}{\lambda f}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi dx}{\lambda f}\right) \sin^2\left(\frac{\pi dy}{\lambda f}\right)} \quad (1)$$

其中 N 、 d 和 D 分别是 LC-SLM 像素数、像素尺寸和像素的填充比， f 为远场焦距， λ 为入射光波长。对确定像素尺寸的 LC-SLM，填充比决定零级衍射斑的强度大小。利用(1)式计算 LC-SLM 的衍射效率与填充比的变化曲线，见图 8。随着填充比的增大，相邻像素间隙减小，零级衍射效率增大。对填充比为 85% 的 LC-SLM，零级衍射效率为 75%，衍射效应使光强利用率降低了 1/4。

调整偏振棱镜的光轴方向，使入射偏振方向平行液晶寻常光轴方向。对所有像素施加相同灰度值，测量零级衍射光强度随灰度的变化。改变入射偏振方向与液晶非寻常光轴方向平行，同样记录零级衍射光强度随灰度的改变。当入射偏振方向沿寻常光轴方向入射时，光线始终以寻常光折射率 n_o 传播，LC-SLM 对入射光没有相位调制，零级衍射

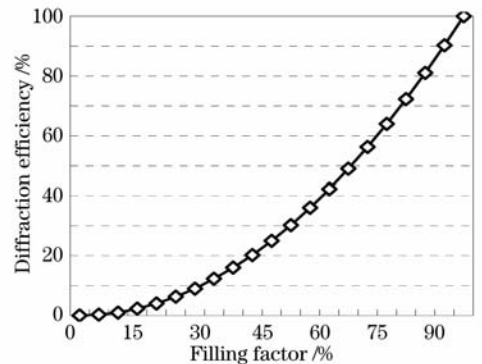


图 8 零级衍射效率和随填充比的变化

Fig. 8 Zeroth order diffraction efficiency with filling factor 效率不随控制电压变化而改变。入射偏振光沿非寻常光轴方向入射时，光线将以非寻常光折射率 n_e 传播，电压改变液晶分子逐渐趋向与液晶器件表面

垂直,入射偏振光将以 n_o 传播,此时它将有最大的相位变化。对所有像素施加相同的灰度值,入射平面波经 LC-SLM 调制后仅产生整体平移,相位分布不变仍为平面波,反射光的零级衍射效率理论上不会发生变化。零级衍射效率随灰度的变化曲线见图 9,图中两条零级衍射效率随灰度的波动很小;偏振方向平行非寻常光轴入射时的平均衍射效率为 51.3%;平行寻常光轴入射时的平均衍射效率等于 56.3%。

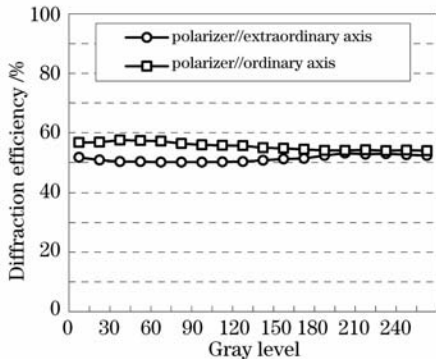


图 9 零级衍射效率随灰度控制信号的变化

Fig. 9 Zeroth-order diffraction efficiency with gray level

与衍射效率的理论值相比,约有 20% 的光强损失。上述衍射效率的理论推导假定液晶基板为一理想光学反射面,实际液晶基板的反射率并不满足 100% 的反射率,同时还有一定的面形误差。液晶基板的反射损失以及面形误差引起的散射使实际衍射效率降低。比较两条衍射效率曲线,入射光轴平行非寻常光轴,LC-SLM 实现相位调制时的衍射效率在灰度值 [0~180] 范围内,低于不调制时的测量结果。衍射效率的不完全一致说明液晶分子在电场作用下,分子扭曲并不完全平行,对入射光有少量的强度调制作用。

由于入射光的偏振要求、衍射效应以及基板的反射、散射损失,器件实际用于波前像差校正的光能利用率仅为 28% 左右。与传统 PZT 变形镜 99% 以上的反射率相比,LC-SLM 极低的光能利用率使自适应光学系统在弱光条件下不能正常工作。用于天文观测的自适应光学系统,观测目标常常非常微弱,LC-SLM 不适合在此类场合中作为波前校正器实现波前像差补偿。

6 结 论

利用商品化 LC-SLM 作为波前校正器,对其作为波前校正器的特性进行了实验测量和理论分析,

特别是在天文自适应光学系统应用的可能性进行了分析。目前国外正在为下一代天文望远镜研制 4096(46×46)单元波前校正器,液晶空间光调制器无可比拟的像素数目,可以满足大气自适应光学系统对高驱动单元的要求。然而 LC-SLM 的时间特性限制了它对变化较快的动态波前像差的实时校正,对校正大气湍流的自适应光学系统是不适用的;LC-SLM 极低的光能利用率要求它只能工作在光强很强的工作条件下。另外上述研究结果针对特定工作波长,由于 LC-SLM 固定的液晶层厚度和材料的色散效应,LC-SLM 的相位调制深度并不对所有波长满足 2π ,扩大校正动态范围的相位包裹方法失效,像差校正误差随着波长的偏离和相位包裹次数的增大快速增加,不适合宽谱带工作环境^[12]。从星星等天体观测目标发出的光波有一定的波长范围,入射光的谱带宽度是限制 LC-SLM 应用的另一重要因素。因此现有商品化 LC-SLM 器件存在的低光能利用率、色散、有限相位调制幅度以及极慢的时间响应特点使其暂时还不适用低亮度、宽谱带、像差变化较快的自适应光学系统,尤其用于校正大气湍流扰动的高分辨望远镜成像系统和激光大气传输。但在光能利用率要求不高、工作波长范围窄,响应速度低的场合可作为一个非常有希望的高分辨率波前校正器。

参 考 文 献

- Zhou Renzhong, Yan Jixiang. Theory of Adaptive Optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 135
周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 135
- Andrew K. Kirby, Gordon D. Love. Fast, large and controllable phase modulation using dual frequency liquid crystals [J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(7): 1470~1475
- Liu Yongjun, Hu Lifa, Cao Zhaoliang *et al.*. A novel liquid crystal phase modulator for the optical imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 527~530
刘永军, 胡立发, 曹召良 等. 一种用于光学成像系统的新型液晶相位调制器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 527~530
- G. D. Love. Wave-front correction and production of Zernike modes with a liquid crystal spatial light modulator [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(7): 1517~1524
- P. M. Prieto, E. J. Fernandez. Adaptive optics with a programming phase modulator; application in the human eye [J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(17): 4059~4071
- C. A. Thompson, M. K. Katrtz. Performance of a high resolution wave front control system using a liquid crystal spatial light modulator [C]. *SPIE*, 2000, **4124**: 170~177
- Hongxin Huang, Takashi Inoue. An adaptive optics control system using a high-resolution liquid crystal spatial light modulator [C]. *SPIE*, 2004, **5639**: 129~137
- David Dayton, Steve Sandven. Adaptive optics using a liquid crystal phase modulator in conjunction with a Shack-Hartmann

- wavefront sensor and zonal control algorithm [J]. *Opt. Exp.*, 1997, **1**(11): 338~346
- 9 Cao Zhaoliang, Mu Quanquan, Hu Lifa. Design on liquid crystal adaptive optical system for 600 mm telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1147~1150
- 曹召良, 穆全全, 胡立发. 600 mm 望远镜液晶自适应系统成像光路设计[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1147~1150
- 10 Cai Dongmei, Xue Lixiang, Ling Ning *et al.*. Characteristics of phase only liquid crystal spatial light modulator [J]. *Opto-Electronics Engineering*, 2007, **34**(11): 19~23
- 蔡冬梅, 薛丽霞, 凌宁等. 液晶空间光相位调制特性研究[J]. *光电工程*, 2007, **34**(11): 19~23
- 11 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Effective bandwidth analysis of adaptive optics control system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1697~1702
- 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统的有效带宽分析[J]. *光学学报*, 1997, **17**(12): 1697~1702
- 12 Cai Dongmei, Ling Ning, Jiang Wenhan. The performance of phase only liquid crystal spatial light modulator used for generating Zernike terms [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(2): 897~903
- 蔡冬梅, 凌宁, 姜文汉. 纯相位液晶空间光调制器拟合 Zernike 像差性能研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(2): 897~903