

文章编号: 1003-501X(2007)11-0019-05

液晶空间光调制器相位调制特性研究

蔡冬梅^{1,2,3}, 薛丽霞¹, 凌 宁¹, 姜文汉¹(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 太原理工大学 应用物理系, 山西 太原 030024)

摘要: 研究了美国 BNS 公司生产的 Modal P256 反射型电寻址液晶空间光调制器的相位调制特性和时间响应特性。采用 He-Ne 激光作光源, 建立迈克尔孙干涉光路观察波前相位变化, 给出器件的相位调制特性曲线。分析测量了器件的相位响应不一致性和像素间的相位交连。通过测量液晶器件对方波和正弦控制信号的相位响应延迟, 分析了液晶空间光调制器(LC-SLM)的时间响应特性。理论分析与实验结果说明: 在特定的入射偏振条件下, LC-SLM 实现纯相位调制, 可用作高分辨力波前校正器件, 然而极慢的响应速度和极低的时间带宽限制了它在动态变化波前相差校正中的应用。

关键词: 液晶空间光调制器; 相位调制; 波前校正; 自适应光学

中图分类号: TN248

文献标志码: A

Characteristics of phase only liquid crystal spatial light modulator

CAI Dong-mei^{1,2,3}, XUE Li-xia¹, LING Ning¹, JIANG Wen-han¹(1. *The Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;*
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China;*
3. *Department of Physics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

Abstract: The spatial and temporal characteristics of Modal P256 Liquid-crystal Spatial Light Modulator (LC-SLM) fabricated by Boulder Nonlinear System were investigated. A Michelson interferometer was conducted to test the phase of wave front using the LC-SLM as a reflective mirror. The phases generated by each pixel were different under the same gray value. The phase coupling of pixels was also analyzed. The time properties were evaluated through testing the time response of LC-SLM to square and sine voltages. As a result, the LC-SLM can be used as a high spatial resolution wave front corrector. However, its slow response rate and poor bandwidth restrict the application in compensating wave front aberration dynamically.

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

引 言

在高分辨力光学成像系统中, 系统内部和外部都有各种静态和动态像差。例如光学系统内部温度变化导致的热变形、不同观测方向下系统部件与重力的相对方向发生变化而导致的重力变形以及大气湍流造成的光波波前动态随机扰动。自适应光学系统实时测量波前动态误差, 实时进行波前校正, 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。

自适应光学系统中对波前误差的补偿是由波前校正器完成的。波前校正器在外加控制下, 实现高速高精度的光学镜面形变化、平移或转角。从而改变光学系统的波前相位。变形镜是最常用的波前校正器件, 它具有响应速度快、校正动态范围大、光程校正量与波长无关并能承受较大功率的优点; 然而现有变形镜

收稿日期: 2007-03-20; 收到修改稿日期: 2007-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60438030)

作者简介: 蔡冬梅(1974-), 女(汉族), 山西运城人, 博士研究生, 主要研究工作: 自适应光学、液晶空间光调制器。E-mail: dm_cai@eyou.com

制造技术复杂、只能单件生产、价格昂贵及能耗高的缺点使其应用范围受到限制。近年, 由于液晶显示和超大规模集成电路技术的迅猛发展以及液晶材料的丰富, 电寻址液晶空间光调制器作为波前校正器件在自适应光学中的应用日益受到关注^[1-2]。驱动单元数多, 能耗低, 体积小, 易于控制、价格低廉等优点使液晶空间光调制器在实现光学系统高分辨力波前控制中具有很大的潜力。目前国际上的一个热点就是利用液晶器件研制高分辨力、低成本的自适应系统^[1-3]。作为波前校正器, 首先要求 LC-SLM 能够满足纯相位调制及对控制信号的快速响应, 可见, 了解和掌握器件的相位调制特性和时间特性, 明确可能的应用范围和限制因素是发挥其应用潜力的重要前提。

本文以迈克尔孙干涉原理为基础, 对电寻址液晶空间光调制器的相移特性, 器件的相位响应不一致性和由于边缘电场效应造成的像素间的相位交连进行了理论分析和试验验证。利用 LC-SLM 对 45°偏振入射光的强度调制拟合正弦控制信号, 给出了器件对不同频率正弦信号的延迟相位测量结果。

1 液晶空间光调制器相位调制原理

1.1 相位调制原理

在 P256 液晶空间光调制器中, 平行排列的向列液晶层被夹在两片镀有透明导电层(ITO) 的玻璃中。如图 1 所示的折射率椭球^[4], 光波穿过平行排列的向列液晶层, 过球体中心垂直传播方向的中心截面为一椭圆, 椭圆长轴为非常光折射率 n_e , 短轴是寻常光折射率 n_o 。若中心截面与光轴 z 的夹角改变, n_o 不变, n_e 发生变化。定义液晶的双折射率为

$$\Delta n = n_e - n_o \quad (1)$$

在液晶两端施加电场, 液晶分子发生偏转, 不同的电场使液晶分子偏转角度不同。液晶分子的有效折射率为

$$n_{\text{eff}} = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \varphi(y) + n_e^2 \sin^2 \varphi(y)}} \quad (2)$$

其中 $\varphi(y)$ 是液晶层 y 处液晶分子偏转的角度。波长为 λ 的入射光穿过液晶层后, 光波的相位变化量为

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{-d/2}^{d/2} [n_{\text{eff}}(\varphi(y)) - n_o] dy \quad (3)$$

其中 d 为液晶层厚度, 入射光波的相位改变, 实现相位调制。

若入射光为线偏振光, 且偏振方向与中心截面长轴平行时, 液晶对光束为纯相位调制, 且入射光的偏振态不变; 当入射偏振方向与中心截面短轴一致时, 液晶对光束无相位调制; 当入射偏振方向介于二者之间, 液晶对光束既有相位调制又有强度调制, 出射光偏振态改变; 当偏振方向和长轴成 45° 时, 液晶对入射光的强度调制最大。

1.2 液晶空间光调制器像素间相位影响

液晶元件的上升时间和下降时间与液晶层厚度的平方成正比^[5], 要提高液晶的响应速度需要降低液晶层厚度。一方面限定液晶对特定波长的相位调制幅度为 $[0 \sim 2\pi]$, 另外通过提高液晶的双折射率降低液晶层厚。目前液晶技术的发展已经使得 SLM 的液晶层厚降低到微米级, 施加在每个像素上的电场在像素区域内是相同的假设对于超薄液晶层不再成立。相邻像素电场相互影响, 使得相邻像素的相位响应发生交连^[6-7]。图 2 为相邻像素电场相互作用示意图, 图中一半像素施加电压, 另一半像素控制电压为 0。相邻像素电场强度差值越大, 引起的相位交连越强, 相位受到影响的像素数越多。

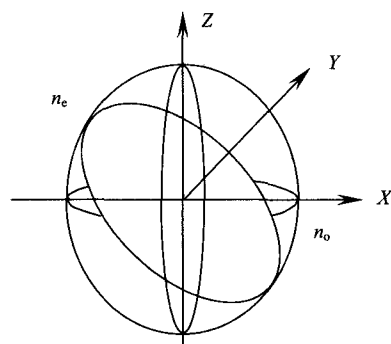


图 1 液晶折射率椭球

Fig.1 Refractive index ellipse sphere of liquid crystal

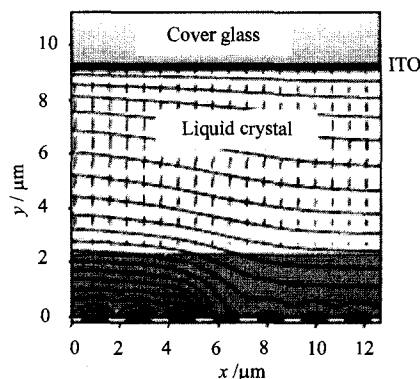


图 2 相邻像素边缘的相互影响

Fig.2 Illustration of electric field coupling of pixels

2 液晶空间光调制器相位调制的空间特性

2.1 液晶空间光调制器相位调制特性

实验装置如图3所示的迈克尔孙干涉仪。LC-SLM代替干涉仪的一个反射镜，氦氖激光经显微物镜~针孔~准直透镜得到平行光，平行光透过偏振片后，经分光镜一路作为参考光经反射镜入射至 CCD，另一路经 LC-SLM 后反射，两路光干涉，CCD 采集干涉条纹。为保证 LC-SLM 工作在纯相位调制状态，调整偏振片使入射线偏振光平行 LC-SLM 的非寻常光轴入射。

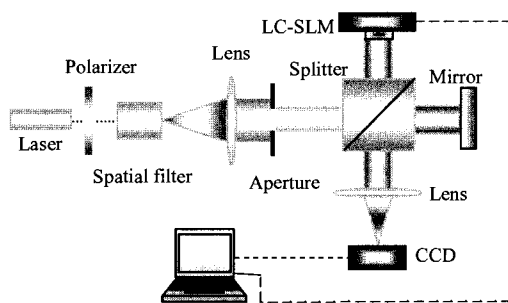


图3 实验光路

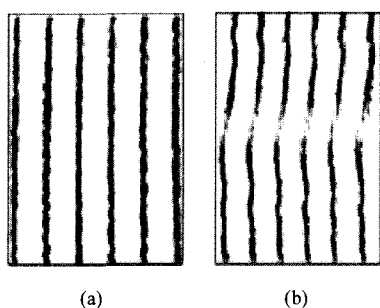
Fig.3 Experiment setup

计算机控制 LC-SLM 下半部分像素灰度信号不变，逐次改变上半部分所加灰度值。上下两部分干涉条纹相对平

移，平移距离反映器件对控制信号的相对相位响应。图4(a)是器件未施加电压时的干涉条纹；图4(b)是上半部分和下半部分像素分别施加不同电压时形成的干涉条纹。当加载在上半部分像素的灰度信号从0变到255时，上半部分干涉条纹平移了一个条纹间距，相位变化了 2π 。图5是 LC-SLM 对灰度值的相位响应特性曲线，对工作波长633nm，器件的相位调制幅度为 $[0\sim 2\pi]$ ，灰度和相位响应近似满足线性关系。

在控制电压作用下，液晶的相位响应是非线性变化的，实际上液晶与线性变化的灰度之间不满足线性

变化。实验中利用厂家提供的客户查值表(LUT)，通过 PC 将控制 LC-SLM 的灰度值映射为一组新的灰度值，使灰度与相位响应近似满足线性关系，例如灰度值60通过 LUT 映射为197。相位响应特性曲线满足线性关系有利于校正波前像差时校正信号的确定，然而使相位调制区间的相位变化分辨力降低， $[0\sim 2\pi]$ 范围内，相位分辨力从256降低为64，相位调整步长为 0.0342π 。图5中相位调制曲线是在入射波长为632.8nm和忽略像素相位响应不一致条件下得到的，反映了器件对此波长入射光总的相位响应趋势，但对单个像素不是完全定量的。



(a) (b)

图4 干涉条纹

Fig.4 Fringe under phase modulation

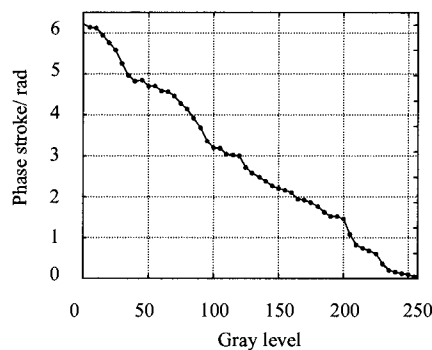


图5 相位调制特性曲线

Fig.5 Performance of phase modulation

调整步长为 0.0342π 。图5中相位调制曲线是在入射波长为632.8nm和忽略像素相位响应不一致条件下得到的，反映了器件对此波长入射光总的相位响应趋势，但对单个像素不是完全定量的。

2.2 液晶空间光调制器相位响应不一致性

图4(b)中对同一灰度值，干涉条纹错开的位移量不一致。原因可能为：1) LC-SLM的反射面不是理想平面；2) 各像素对同一灰度值的相位响应不一致。以液晶中心点为圆心取直径不同的圆，保持圆外各像素电压为0，给圆内各像素点施加同一工作电压。Veeco干涉仪测量圆内外像素点的相位响应(去除液晶基板面形影响)。沿液晶平面 x 、 y 方向分别计算各像素响应相位差随直径的变化关系见图6，同一驱动电压，各像素相位响应不同，工作区域增大，相位响应差别增加，当直径大于3.46mm时，液晶各像素对灰度信号相位响应不一致性明显增强，约为 0.063λ 。结果说明：液晶边缘区域内像素相位响应不一致性比较明显。用LC-SLM拟合波前时，除液晶像素结构引起的波面边缘拟合误差增大的原因外，相位响应不一致进一步降低了器件的波前拟合能力。响应不一致的原因可能是在同一控制电压作用下，液晶分子偏转角度不同引起的。

2.3 液晶空间光调制器像素间相位的影响

图4(b)水平中心部分的干涉条纹明显倾斜，说明中心区域像素的相位响应受到相邻两侧像素位相的影响。保持下半部分控制电压为0，上半部分施加不同电压以改变上下两部分产生的相位差，利用 Veeco 干

涉仪测量各像素的相位变化, 计算相位发生交连的像素数。相位交连像素数与位相差关系如图 7 所示, 位相差增加, 交连像素数增多。像素区域边缘电场的相互影响引起的像素相位交连降低了由于像素结构造成的离散相位分布, 使拟合波面更加连续。然而, 相邻像素的位相交连使器件类似一个低通滤波器, 相位分布中的高频分量被抑制掉^[8]。用液晶空间光调制器校正相位变化很快的高阶像差时, 相位分布趋向平滑, 高频分量丢失, 降低了对高阶像差的校正能力。

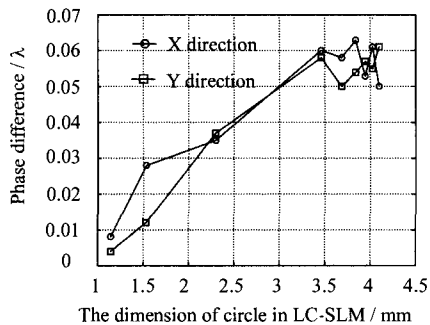


图 6 LC-SLM 的相位响应不一致性

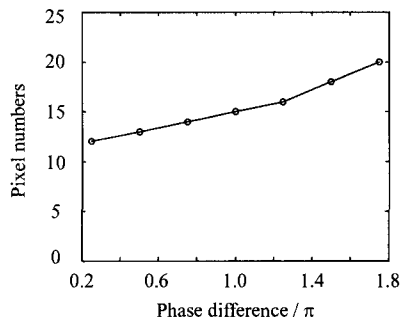


图 7 相邻像素相位影响

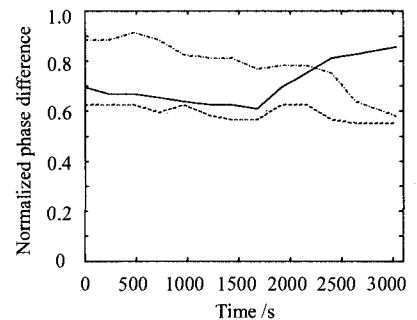


图 8 LC-SLM 的相位随时间的变化

Fig.6 Phase difference of LC-SLM to the same gray value

Fig.7 Phase coupling of neighboring pixels

Fig.8 Phase response of LC-SLM with time

2.4 液晶空间光调制器相位调制的稳定性

利用液晶空间光调制器进行波前校正时, 需要器件在长期工作条件和不同工作温度下保持相位调制的稳定性, 否则将影响校正效果。长时间工作后, 液晶对入射激光的残余吸收会影响到液晶分子的准直度, 从而影响到液晶的折射率变化。

保持液晶空间光调制器驱动电压不变, 用 Veeco 干涉仪记录器件相位响应随时间的变化。图 8 是在光照条件 $1.25\text{W}/\text{cm}^2$ 、3100s 内, 液晶对不同驱动电压的相位响应随时间的波动, 横坐标代表时间的变化, 纵坐标为整个液晶面对驱动电压相位响应的归一化 RMS 值。驱动电压取 10 和 128 时, 液晶相位调制不稳定; 对灰度值 128, 1600s 后相位波动很大; 灰度 255 时相位调制稳定, 器件的调制稳定性和工作电压紧密相关。

实验仅进行了 3600s, 此时液晶温度变化不会太大, 实验结果还不能完全说明液晶在不同温度下的器件的相位调制特点, 还有待进一步的测量分析。

3 液晶空间光调制器相位调制的时间特性

图 3 实验光路中, 调整偏振片使入射偏振方向与非寻常光轴成 45° , 此时 LC-SLM 对入射线偏振光有最大强度调制。去掉干涉仪中的反射镜, 用光电倍增管代替 CCD, 通过连接在 CCD 上的示波器记录强度调制曲线。把两个不同的驱动电压交替施加给液晶空间光调制器, 交替变化的驱动电压相当于一个方波电压信号, 改变电压交替频率就得到周期不同的方波信号。图 9 为器件对周期 120ms 的方波信号的响应曲线, 相位差建立时液晶的滞后时间为 16ms(上升时间); 恢复时滞后 21ms(下降时间)。LC-SLM 对周期为 669ms、不同相位幅度的方波的响应时间如图 10 所示, 器件的上升时间随位相的增大而增加, 下降时间没有明确的变化规律; 器件的最大响应时间为 53ms。和变形镜微秒级的响应时间相比, 用液晶空间光调制器校正像差时 LC-SLM 的响应速度大大限制了自适应系统的工作带宽。

忽略波前校正中其它相位延迟因素的影响, 由 LC-SLM 组成的自适应系统的工作带宽由液晶器件的响应频率决定。使控制电压按正弦规律变化得到 LC-SLM 对正弦电压信号的强度响应曲线, 得到强度响应曲线与正弦控制电压曲线的相位延迟。图 11 是 LC-SLM 对不同频率正弦信号的相位延迟随正弦信号频率的变化, 横坐标是正弦信号频率, 纵坐标为器件对控制信号的相位响应延迟, 单位为度。对采用比例积分控制器(PID)的自适应闭环控制系统, 相位裕度等于 $90^\circ - \theta$, 其中 θ 是系统的相位延迟, 要保证闭环系统稳定工作, 相位裕度应大于 40° ^[9]。以 θ 等于 50° 作为判断标准, 图 11 中, 正弦电压频率为 4Hz 时器件的相位延迟达到 54° , 闭环工作时传递函数的过零频率最大仅为 4Hz, 远远小于变形镜上千赫兹的谐振频率, 器件

的响应速度成为制约它在自适应光学系统中应用的主要因素。

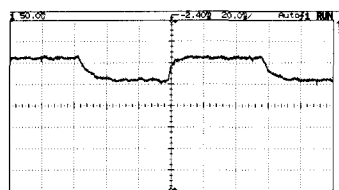


图9 LC-SLM方波电压的响应曲线

Fig.9 Response curve of LC-SLM to square wave

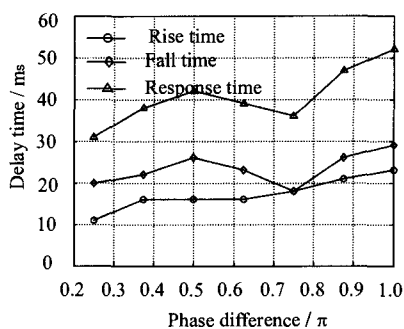


图10 LC-SLM的时间响应特性

Fig.10 Time response of LC-SLM

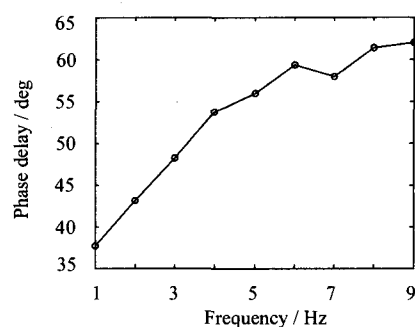


图11 LC-SLM的相位延迟曲线

Fig.11 Phase delay of LC-SLM

4 结论

本文采用美国 BNS 公司研制的 256 像素 \times 256 像素的反射式空间光调制器作为测试对象,分析了电寻址型液晶器件的相位调制和相邻相位交连原理;利用迈克尔孙干涉原理建立了一套相位测试装置对器件的相位调制特性进行了测量。结果表明,在客户查值表和入射波长为 632.8nm 条件下,器件产生 $0\sim 2\pi$ 的相位调制幅度。利用 Veeco 干涉仪对器件相位响应的一致性、稳定性及相邻像素的相位交连进行了实验测量,并给出了评价器件空间一致性和相位交连的特性曲线。通过对器件响应时间及对不同频率正弦信号的延迟相位的测量,明确了 LC-SLM 的时间特性对其在自适应系统中应用的限制。本文的实验结果虽然只针对 BNS 的 256 \times 256 LC-SLM,但一定程度上反映了现有商品化电寻址型液晶相位调制器件的相位和时间特性。目前用于纯相位 LC-SLM 的液晶材料的性质造成的器件相位调制幅度对波长的依赖、只对线偏振光敏感及较慢的响应速度限制了它目前在自适应光学校正中的实际应用,只能用于对光能利用率要求不高、工作波长范围窄,响应速度要求不高的场合^[10]。

参考文献:

- [1] Dou R. Close-loop adaptive-optics system with a liquid-crystal television as a phase retarder[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(14): 1583-1585.
- [2] Kirsch J C. Modulation characteristics of the Epson liquid crystal television [J]. *Opt. Eng.*, 1992, **31**(5): 963-970.
- [3] Love G D. Wave-front correction and production of Zernike modes with a liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(7): 517-1524.
- [4] 范少卿. 物理光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
FAN Shao-qing. *Physics optics* [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1990.
- [5] Dayton D, Browne S. Characterization and control of a multi-element dual-frequency liquid crystal device for high speed adaptive optical wave front correction [J]. *Appl Opt.*, 2001, **40**(15): 2345-2355.
- [6] Stockley J, Subacius D. The influence of inter-pixel region in liquid crystal diffraction grating [J]. *SPIE*, 1999, **3635**: 127-136.
- [7] Bouvier M, Scharf T. Analysis of nematics liquid crystal binary gratings with high spatial frequency [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(8): 2129-2137.
- [8] Hällsig E, Stigwall J. Fringing fields in a liquid crystal spatial light modulator for beam steering [J]. *Journal of Modern Optics*, 2004, **51**(8): 1233-1247.
- [9] 李新阳, 姜文汉. 自适应光学控制系统的有效带宽分析[J]. 光学学报, 1997, **17**(12): 1697-1702.
LI Xin-yang, JIANG Wen-han. Effective bandwidth analysis of adaptive optics control system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1697-1702.
- [10] CAI Dong-mei, LING Ning, JIANG Wen-han. Performance of liquid crystal spatial modulator as a wavefront corrector for atmospheric turbulence compensation [J]. *SPIE*, 2007, **6457**: 64570-1-8.