

文章编号: 0253-2239(2006)04-0527-4

一种用于光学成像系统的新型液晶相位调制器*

刘永军^{1,2} 胡立发¹ 曹召良^{1,2} 李大禹^{1,2} 穆全全^{1,2} 鲁兴海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 100039)

摘要: 研制出新型平行排列的二维阵列液晶相位调制器(LCPM),利用此相位调制器在 Zygo 干涉仪上进行了泽尼克(Zernike)多项式的产生和畸变波前调制的实验。能够很好地产生泽尼克多项式的前 2~8 项面形,用 16 项泽尼克模式对畸变波前进行了调制,峰谷(PV)值可由调制前的 0.831λ 减小到调制后的 0.444λ ,均方根(RMS)由调制前的 0.181λ 减小到调制后 0.066λ ,斯特列尔比(Strehl ratio,SR)由调制前的 0.257 达到调制后的 0.844。实验结果表明,在光学成像系统中,利用平行排列的液晶相位调制器,进行波前像差的调制可以使成像质量得到很好的改善。

关键词: 成像系统; 液晶; 光学系统的成像; 相位调制器

中图分类号: O753, O438 文献标识码: A

A Novel Liquid Crystal Phase Modulator for the Optical Imaging System

Liu Yongjun^{1,2} Hu Lifa¹ Cao Zhaoliang^{1,2} Li Dayu^{1,2} Mu Quanquan^{1,2}

Lu Xinghai¹ Xuan Li¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)
(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: A novel liquid crystal phase modulator (LCPM) of 2D liquid crystal array with parallel alignment was fabricated. And experiments of Zernike polynomial production and distorted wavefront modulation were conducted on the Zygo interferometer with the LCPM. The wavefront profiles of the first 2nd to 8th Zernike polynomial were produced successfully. Sixteen Zernike polynomials were used to modulate the distorted wavefront, the peak-to-valley value (PV) was improved from 0.831λ before modulation to 0.444λ after that, root means square (RMS) from 0.181λ to 0.066λ , and Strehl ratio (SR) from 0.257 to 0.844. The results indicated that the quality of imaging of optical systems was greatly improved when the parallel alignment LCPM is used to modulate the distorted wavefront.

Key words: imaging system; liquid crystal; imaging of optical systems; phase modulator

1 引言

任何光学成像系统都具有像差,如果像差过大会严重影响成像质量,因此人们在光学系统中使用非球面透镜,以消除或减少系统像差^[1],使成像质量得到改善。然而,非球面透镜除了加工难度大、成本高等缺点外,最主要是灵活性差,即一个非球面透镜补偿的像差固定,因此只能用在已设计好的固定系

统中,其他的系统不能使用,使得资金流失较大且浪费人力物力。

液晶相位调制器以其制作简单,价格低,计算机编程可控等优点受到国内外研究者的高度重视,已在光学相关联、光互连、相位比较技术等光信息处理方面起着重要的作用^[2~4]。在光学成像系统中,可用其改善光学系统的成像质量。大多数的研究人员

* 国家自然科学基金(50473040,59973020,60277033,19974046)和吉林省科委基金(20020603,20010579)资助课题。

作者简介: 刘永军(1977~),男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事液晶器件及其在光学中的应用研究。E-mail: liuyj@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2005-06-23; 收到修改稿日期: 2005-09-01

出于方便,多考虑研究扭曲型液晶显示器作为相位调制器^[4~8]。对于这样的器件,内部是扭曲排列的液晶,线偏振光在振动方向平行于器件入射面的液晶取向方向入射,沿着器件出射面的液晶取向方向出射,这样在相位调制的时候伴随较大的振幅调制,影响了相位调制的特性。该条件下通常的解决办法是,在使两个偏振片与液晶取向成一定角度的情况下,使用驱动电压的一部分,在这一部分电压内保证振幅调制尽量的小,近似认为是纯相位调制^[8]。这样不仅影响了相位调制的范围,而且不是严格意义上的纯相位调制。针对以上的不足,研制出平行排列电寻址二维阵列 TFT 型液晶相位调制器,研究了该调制器的光学特性。通过在 Zygo 干涉仪上的实验产生了泽尼克(Zernike)多项式的前 2~8 项面形,并且利用泽尼克模式进行了畸变波前的相位调制,得到了较好的畸变调制结果。

2 波面拟合原理

由于光学面形总是光滑和连续的,因此可以选择一组线性无关的离散基底函数系的组合来拟合波前函数。泽尼克多项式低阶模式可以与低阶像差相对应且对波面的拟合收敛性好、精度高,而被广泛地应用在波面拟合上。

圆域内的任何波前函数 $\phi(r, \theta)$ 都可以分解为泽尼克多项式来描述^[9,10]:

$$\phi(r, \theta) = \sum_{i=1}^{i=\infty} a_i \cdot z_i(r, \theta), \quad (1)$$

式中 a_i 为第 i 项的泽尼克系数, z_i 为第 i 项泽尼克多项式:

$$\begin{cases} z_{\text{even}} = \sqrt{2(n+1)}R_n^m(r)\cos(m\theta), & m \neq 0 \\ z_{\text{odd}} = \sqrt{2(n+1)}R_n^m(r)\sin(m\theta), & m \neq 0 \\ z_i = \sqrt{n+1}R_n^0(r), & m = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+m)/2 - s]! [(n-m)/2 - s]!} r^{(n-2s)},$$

(r, θ) 为圆域内的极坐标。每个多项式 $z_i(r, \theta)$ 的序号 i 按行增长,对一给定的径向 n 级次而言,模式具有较低角频率 m 的在前面;对于两个同样的 n 和 m 的多项式,偶数 i 对应于含 $\cos m\theta$ 的模式,而奇数 i 对应于含 $\sin m\theta$ 的模式。泽尼克模式法波前拟合的实质是建立各泽尼克项的斜率矩阵,求解各项泽尼克系数 a_i 。

波前像差主要是由低阶泽尼克多项式构成,高阶泽尼克多项式所占比例很小。所以在后面的实验中利用了前十六项泽尼克模式,进行畸变波前拟合。

3 实验结果与讨论

3.1 液晶相位调制器的设计

我们研制了薄膜晶体管(TFT)型、像素数为 1920×480 的液晶相位调制器,其像素单元为 $100 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 的长方形,像素间距 $15 \mu\text{m}$ 。涂覆在有导电电极玻璃基板上的液晶取向膜成反平行摩擦,玻璃板间注入的是日本油墨公司生产的 RDP-92975 型向列相液晶,液晶层厚 $5 \mu\text{m}$,液晶的折射率各向异性在波长 632.8 nm 处为 0.198 。液晶相位调制器用六位控制器控制。

3.2 液晶相位调制器的光学特性研究

利用法国 JOBIN YVON 公司的光谱型椭圆偏振仪,测出了在波长 632.8 nm 处液晶相位调制器的

相位随灰度级的变化关系,测得的结果如图 1 空白点线所示。并且测出了在相位调制的情况下透过光强随灰度级的变化关系如图 1 实心黑点线所示。

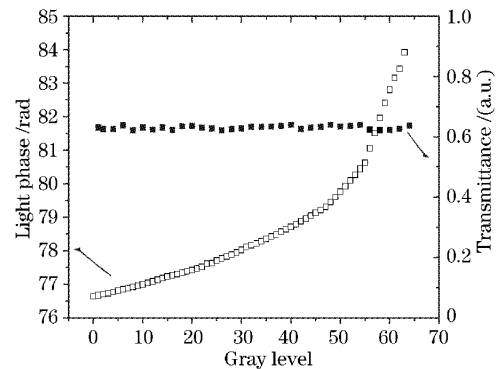


图 1 相位和透射率随灰度级变化关系

Fig. 1 The phase and transmittance as a function of the grey level

由图 1 可以看出,在低灰度级间相位变化比较小,而在高灰度级间相位变化较大,所以为了提高实验精度,我们实验时利用 $0 \sim 55$ 级灰度。且可以看出整个灰度变化范围内透过光强变化不大,这就保证了在调制波前相位的时候,波前强度的分布保持不变,以得到较好的相位调制。相位调制器的相位调制范围优于 1λ ,最小调整步长为 $0.052 \mu\text{m}$ 。关于平行排列液晶器件的相位调制原理在文献^[11,12]中有详细的介绍。

通常认为,液晶器件的相位调制范围较小不适合用于大像差的调制,然而,在一些静态的光学系统中,由于液晶的响应速度慢不会影响系统的成像质量,因此可以通过增加液晶层的厚度和提高液晶的折射率各向异性,来提高液晶相位调制器的调制范围。

3.3 泽尼克多项式面形的产生

利用图 1 中相位随灰度级的变化关系,在美国 Zygo 公司的菲索型 GPI1000 干涉仪上进行相位调制的实验,CCD 是 1000×1000 像素,实验的光路如图 2 所示。

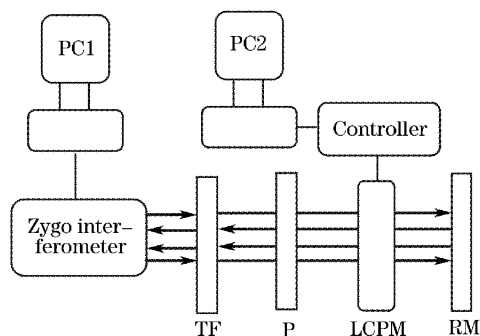


图 2 测量相位的实验光路图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for phase measurement

Zygo 干涉仪的 632.8 nm He-Ne 激光被部分反射镜 TF 分成反射和透射两束光:反射光被反射回干涉仪内部称为参考光;透射光经偏振片 P 后变为与液晶的排列方向相同的线偏振光,垂直经过液晶相位调制器后被部分反射镜 RM 反射回干涉仪内部,称为物光。物光与参考光发生干涉,由计算机 PC1 分析干涉条纹可以计算求得物光波的相位变化。然后计算机 PC2 根据 3.2 节中的相位随灰度级的变化关系,通过控制器 Controller 施加相应的灰度级信号于液晶相位调制器上。

图 3 中(a)列是利用上述实验光路产生的泽尼克多项式的前 2~8 项面形图,均产生峰谷值 0.2λ ,且均是去除背底影响的实验结果,此影响是由于液晶相位调制器本身基板的和平和加工工艺的限制造成的。图 3 中(b)列是相对应的计算模拟结果。

图 3 中(a)列每个子图的底面表示干涉仪 CCD 的像素,单位是像素,纵轴表示波前相位的起伏程度,单位是波长,两列的 1,2 表示波前倾斜、3 表示波前离焦、4,5 表示波前像散、6,7 表示波前彗差。可以看出,利用此类型液晶相位调制器产生了与真实泽尼克多项式面形很接近的面形,即可以产生与波前像差相对应的低阶项,因此可以通过计算机控制

调制器实现光波波前的控制。

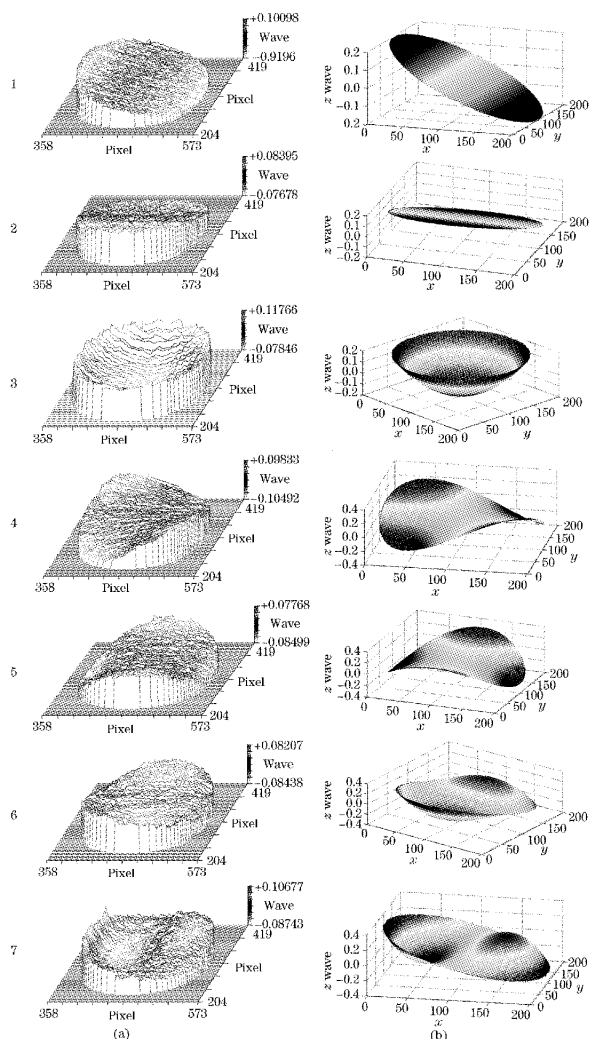


图 3 泽尼克项的产生与模拟。(a)列是液晶产生的结果,(b)列是计算模拟的结果

Fig. 3 Production and simulation of Zernike polynomials. (a) produced, (b) simulated

3.4 畸变波前的调制

利用图 2 的光路,在偏振片 P 前加入粗糙的玻璃,使光波前产生一定量的畸变,利用液晶相位调制器进行畸变波前的调制,使之成为平面波。具体调制方法是首先选取 16 项泽尼克模式,利用图 2 中干涉仪上的计算机 PC1 对畸变波前进行拟合,得到各项泽尼克模式系数。然后计算机 PC2 依据 PC1 中所得的系数,根据(1)式重新得到畸变波前,再依据液晶相位调制器的相位随灰度级的变化关系,通过控制器施加灰度级信号在液晶像素上,使之产生与畸变波面共轭的相位,从而可调制畸变波面成为理想的平面波。

图 4 是调制前后的波前相位,峰谷可由调制前

的 0.831λ 减小到调制后的 0.444λ , 均方根由调制前的 0.181λ 减小到调制后的 0.066λ 。从图 4 中可以看出, 调制后的波面整体质量得到了明显的改善。但局部还残留一定量的相位差, 这主要是由于液晶相位调制器的控制面积与 Zygo 干涉仪的数据采集

的面积不易对准导致的, 改进实验方法可以提高调制质量。还有灰度级与相位是一一对应的关系, 由于灰度级的级数限制, 导致灰度级间的相位差较大, 增加灰度级数可以提高调制质量。

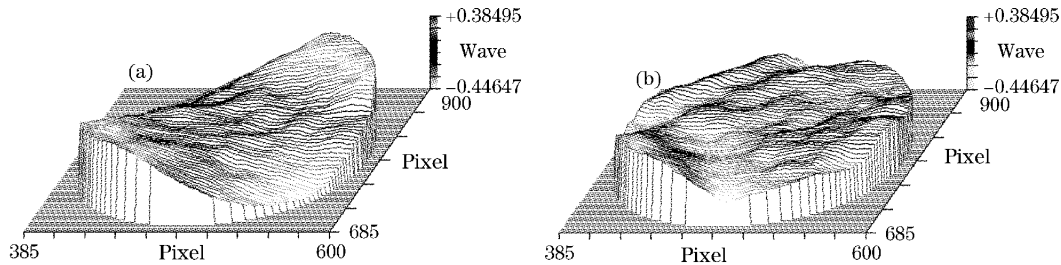


图 4 波前相位分布图。(a)调制前,(b)调制后

Fig. 4 The 2-D plot of wavefront phase. (a) Before modulation, (b) after modulation

图 5(a), 图 5(b) 分别对应调制前和调制后的点扩展函数(SPF)分布情况, 可见调制后光学系统的成像质量得到了很大的提高。斯特列尔比由调制前的 0.257 达到调制后的 0.844 。

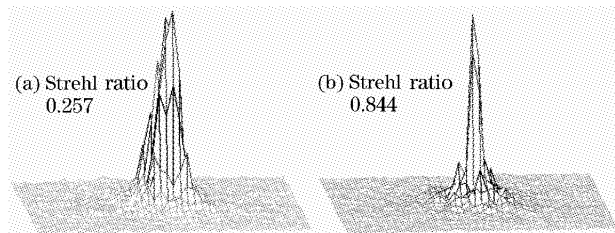


图 5 点扩展函数分布。(a)调制前,(b)调制后

Fig. 5 The comparisons of peak scatter factor. (a) Before modulation, (b) after modulation

4 结 论

研制了一种可用在光学成像系统中, 平行排列的液晶相位调制器。得到了此调制器的相位随灰度级的变化关系, 依据此关系实验产生了泽尼克多项式的前 $2\sim 8$ 项面形, 且依据此关系利用共轭相位的方法对畸变波前进行了平面波的调制, 均得到了较好的实验结果, 证明了此平行排列型液晶相位调制器可以进行波前像差的调制。随着电子学和微电子学技术的发展, 很快将能加工大面积、高分辨率、高平整度的高质量液晶器件。因此, 液晶器件不仅在显示方面有重要的应用, 而且在成像的光学系统中也有着潜在的应用。

参 考 文 献

- Hao Peiming. The eyepiece of aspherical surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(10): 1389~1393 (in Chinese)
赫沛明, 非球面目镜[J]. *光学学报*, 1997, **17**(10): 1389~1393
- Yun Maojin, Li Guohua, Wang Ning. Study of tunable liquid crystal filter by voltage[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1119~1122 (in Chinese)
云茂金, 李国华, 王宁. 电压调谐液晶滤光片的研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1119~1122
- L. G. Neto, D. Roberge, Y. Sheng. Programmable optical phase-mostly holograms with coupled-mode modulation liquid-crystal television[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(11): 1944~1950
- Y. Sheng, G. Paul-Hus. Optical on-axis imperfect phase-only correlator using liquid-crystal television[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(29): 5782~5785
- N. Konforti, E. Marom, S.-T. Wu. Phase-only modulation with twisted nematic liquid crystal spatial light modulators[J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(3): 251~253
- Kanghua Lu, Bahaa E. A. Saleh. Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator [J]. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(3): 240~246
- Jeffery A. Davis, Ignacio Moreno, Philbert Tsai. Polarization eigenstates for twisted nematic liquid crystal displays[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(5): 937~945
- Judit Remenyi, Peter Varhegyi. Amplitude, phase, and hybrid ternary modulation modes of a twisted-nematic liquid crystal display at ~ 400 nm[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(17): 3428~3434
- R. J. Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 207~211
- Ronald Cubalchini. Modal wave-front estimation from phase derivative measurements[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, **69**(7): 972~977
- Liu YongJun, Xuan Li, Hu Lifa *et al.*. The wavefront modulation characteristics of the parallel aligned liquid crystal device[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12):
刘永军, 宣丽, 胡立发等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(12):
- Liu YongJun, Xuan Li, Hu Lifa *et al.*. Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure-phase[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1682~1686 (in Chinese)
刘永军, 宣丽, 胡立发等. 平行排列液晶器件的波前调制特性[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1682~1686