

文章编号: 0258-7025(2008)09-1360-05

泰曼-格林干涉仪测量液晶空间光调制器的相位调制特性

张洪鑫^{1,2} 张 健¹ 吴丽莹¹

(¹ 哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)
(² 哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 为了评价美国 BNS 公司反射式 256 pixel×256 pixel 纯相位液晶空间光调制器(LC SLM)的性能,提出利用泰曼-格林干涉仪对相位调制特性进行干涉测量。实验结果表明,液晶空间光调制器的相位随灰度呈非线性分布,利用反插值法建立线性查找表,校正了器件的非线性,非线性度由原来的 17.23% 减小到 2.85%;中心与边缘的相位调制,在同一灰度级最大相位差达到 0.22 π ,中心相位调制均方根误差是边缘的 4 倍,说明该器件存在相位调制的不均匀性,中心相位误差较大,在波前控制中应给予校正。

关键词 测量;空间光调制器;泰曼-格林干涉仪;相位调制

中图分类号 TN 761 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083509.1360

Phase Modulation of Liquid Crystal Spatial Light Modulator Measured by a Twyman-Green Interferometer

Zhang Hongxin^{1,2} Zhang Jian¹ Wu Liying¹

¹ Institute of Ultra-Precision Optoelectronic Instrument Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150008, China

² Department of Mechanical and Electrical Engineering,
Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract In order to evaluate the performance of a reflective 256 pixel×256 pixel phase-only liquid crystal spatial light modulator (LC SLM) from American BNS Company, interference measurements are proposed on the characteristics of phase modulation using a Twyman-Green interferometer. Experimental results indicate that the relation between phase and gray level is nonlinear. A linear look up table is established by inverse interpolation to correct the nonlinearity for this device. The nonlinearity decreases to 2.85% from 17.23%. The phase difference between the centre and the edge is 0.22 π on the equal gray level and the root-mean-square error of phase modulation for the centre is 4 times of that for the edge, which shows the phase modulation for this device is nonuniform and the phase error for the centre should be corrected in wave-front control application.

Key words measurement; spatial light modulator; Twyman-Green interferometer; phase modulation

1 引 言

空间光调制器(SLM)是可以实时编程的衍射器件,它能够在可变的电驱动信号或光驱动信号的控制下,改变空间光分布的相位、振幅或偏振态。由于空间光调制器具有体积小、空间分辨率高、功耗

低、光能损耗小和可编程控制等优点,尤其是对光波方向和空间分布的控制表现出独有的优势^[1],因此在光互联、光计算、光存储、光学计量、激光光镊、可编程控制透镜和自适应光学等方面具有极大的应用价值^[2~8]。

收稿日期:2007-11-23;收到修改稿日期:2008-01-04

作者简介:张洪鑫(1966—),女,吉林人,博士研究生,主要从事光电测试和光信息处理方面的研究。

E-mail:zhxlj2005@yahoo.com.cn

导师简介:张 健(1944—),男,江苏人,教授,博士生导师,主要从事光电精密测量和空间光信息处理方面的研究。

E-mail:zjlab@hit.edu.cn

美国 BNS 公司的反射式 256 pixel × 256 pixel 纯相位液晶空间光调制器 (LC SLM), 其光学特性主要表现为相位调制特性。由于不同空间光调制器结构上的差异, 相位调制特性也各不相同, 因此在使用之前必须对器件进行测量和标定。目前已经有一些较成熟的方法, 如利用双缝干涉仪^[9]、马赫-曾德尔干涉仪^[10]、径向剪切干涉仪^[11,12]、迈克耳孙干涉仪^[13]和数字相移干涉仪^[14]等对空间光调制器的相位调制特性进行测量。前三种方法更适用于测量透射式空间光调制器; 而数字相移干涉仪, 虽然测量精度高, 但所需成本也更高。本文提出采用泰曼-格林干涉仪测量液晶空间光调制器的相位调制特性^[15]。泰曼-格林干涉仪是迈克耳孙干涉仪的改型, 由于液晶空间光调制器适用于激光波长, 因此可以省略迈克耳孙干涉仪光路中的补偿板。

2 液晶空间光调制器的相位调制特性

液晶空间光调制器利用向列相液晶的电控双折

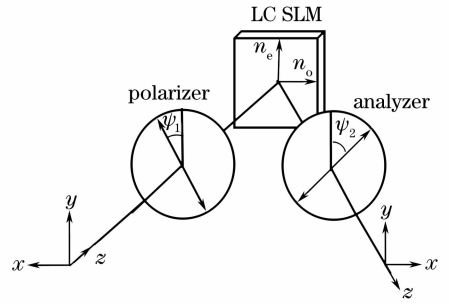


图 1 反射式空间光调制器示意图

射效应, 能够对入射光产生一定的相位延迟, 但需夹在两个偏振片之间工作, 如图 1 所示。光在液晶中传播会发生双折射, 非常光的折射率为 n_e , 寻常光的折射率为 n_o , 非常光方向平行于 y 轴, 即为液晶分子方向。起偏器与检偏器的偏振方向与 y 轴的夹角分别为 ψ_1 和 ψ_2 。

根据琼斯矩阵^[16,17], 光经过起偏器、液晶空间光调制器和检偏器后, 强度透射率为

$$T = \frac{1}{4} \{ \cos(\psi_2 + \psi_1) - \cos(\psi_2 - \psi_1) + \cos \beta [\cos(\psi_2 + \psi_1) + \cos(\psi_2 - \psi_1)] \}^2 + \frac{1}{4} \sin^2 \beta [\cos(\psi_2 + \psi_1) + \cos(\psi_2 - \psi_1)]^2, \quad (1)$$

式中 β 为双折射系数。相位延迟 δ 为

$$\delta = \beta + \arctan \frac{\sin \beta [\cos(\psi_2 + \psi_1) + \cos(\psi_2 - \psi_1)]}{\cos(\psi_2 + \psi_1) - \cos(\psi_2 - \psi_1) + \cos \beta [\cos(\psi_2 + \psi_1) + \cos(\psi_2 - \psi_1)]}. \quad (2)$$

保持起偏器和检偏器的偏振方向均平行于 y 轴, 即 $\psi_1 = \psi_2 = 0$, 当给液晶层施加电压 V 时, 液晶空间光调制器的强度透射率 $T = 1$, 相位延迟为

$$\delta = 2\pi d [n_e(V) - n_o] / \lambda, \quad (3)$$

式中 d 为液晶层的厚度, λ 为入射光的波长。由于向列相液晶是平行排列的, 液晶分子不发生扭曲, 因此垂直于液晶层表面外加电压时, 液晶空间光调制器能够产生纯相位调制^[18]。

3 测量原理

液晶空间光调制器的每一个像素是可以独立编程控制的, 制造商将器件的驱动电压映射为计算机显示的灰度值, 可以由计算机将灰度变化范围在 0 ~ 255 的 8 位位图加载到液晶空间光调制器的驱动器中。位图的灰度值与施加到像素单元的驱动电压相对应, 因此相位调制特性就是确定相位延迟与计算机灰度级之间的对应关系。

泰曼-格林干涉仪的实验光路如图 2 所示, 波长

为 632.8 nm 的激光束通过起偏器, 被分束器 (BS) 分为二束光, 经参考镜反射回来的一束光与空间光调制器反射的另一束光会聚到分束器, 通过检偏器发生干涉。将 CCD 放置在透镜的像平面采集干涉条纹。

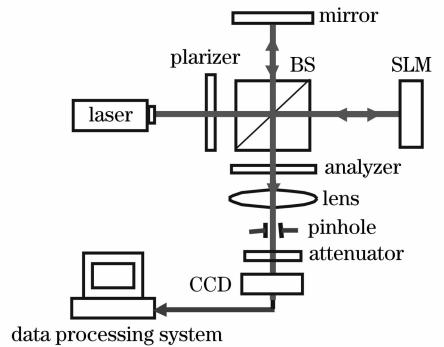


图 2 泰曼-格林干涉仪光路图

Fig. 2 Optical path for Twyman-Green interferometer

当给液晶空间光调制器加载如图 3(a) 所示的阶梯灰度时, 干涉条纹产生了对应的相对移动, 相移与干涉条纹相对移动量的关系为^[19]

$$\delta = 2\pi(\Delta/\Lambda), \quad (4)$$

式中 Δ 为干涉条纹的相对移动量, Λ 为干涉条纹的周期宽度。

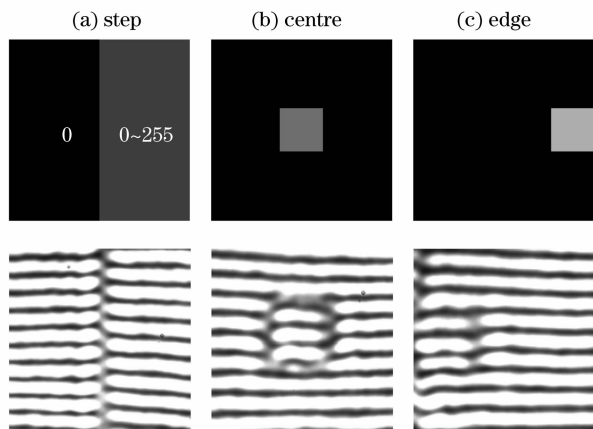


图3 灰度图与对应的干涉条纹

Fig. 3 Grayscale images and interference fringes

4 实验结果

图4是空间光调制器强度透射率随灰度级变化的曲线,曲线的均方根(RMS)值为0.01,这表明液晶空间光调制器在纯相位调制模式下伴随的振幅调制非常小,可忽略。图5是SLM的相位调制特性曲线,最大相位调制达到 3.2π ,并且对应0~100和155~255的灰度范围相位呈非线性分布,在155~255灰度范围内相位曲线的非线性度达到17.23%。由于空间光调制器为动态衍射器件,通常要求它工作在相位为0~ 2π 的线性区域,因此必须对该器件相位调制的非线性进行校正。

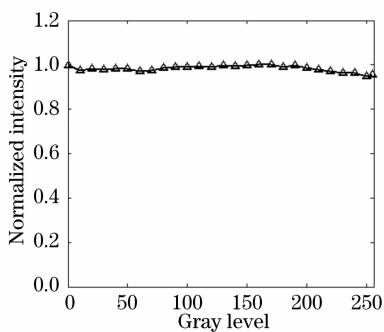


图4 强度透射率随灰度级变化曲线

Fig. 4 Transmission intensity versus gray level

在图5曲线中找到灰度范围为185~255对应的比较平滑的相位曲线,在70个灰度级上对应0~ 2π 的相位调制。采用反插值法建立线性查找表,确定实际灰度值在185~255内与计算灰度值在0~255之间的对应关系,如图6所示。利用该查找表

可以实现用户输入端0~255灰度级与器件0~ 2π 相位调制的线性对应关系。

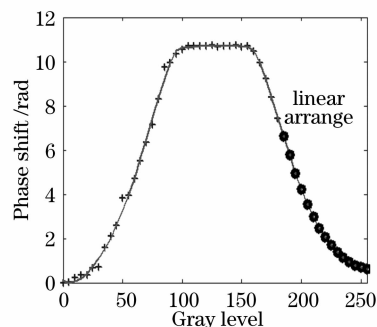


图5 相位调制特性曲线

Fig. 5 Phase modulation characteristics

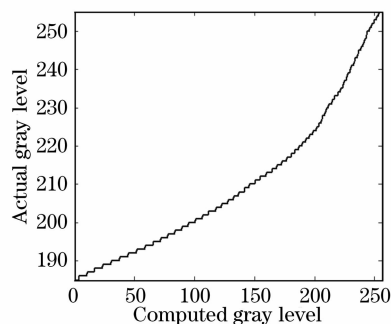


图6 计算灰度值与实际灰度值的对应关系

Fig. 6 Relation between computed gray level and actual gray level

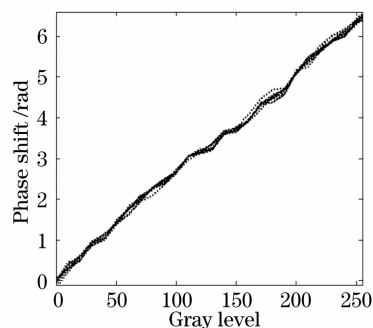


图7 线性相位调制特性曲线

Fig. 7 Linear phase modulation characteristics

校正的相位特性曲线如图7所示。通过10组测量数据得到相位调制范围为0~ 2.07π ,非线性度减小到2.85%,是原相位曲线的1/8,可见利用线性查找表能够明显改善相位调制的非线性。相位曲线相对理想值的均方根误差平均波动范围为0.01 rad,如图8所示,表明该器件的相位调制能满足一定的精度要求。

为了评价相位调制的均匀性^[20],加载如图3(b),(c)所示的灰度图,分别得到液晶空间光调制器

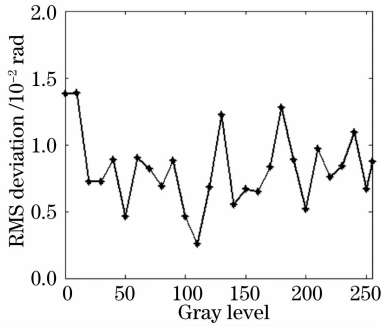


图 8 相位调制均方根误差曲线

Fig. 8 RMS phase deviation versus gray level

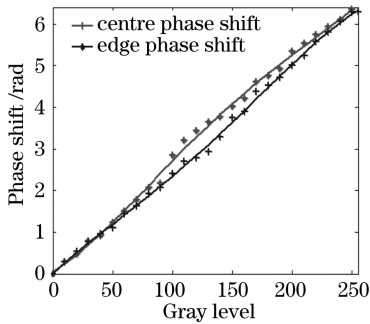


图 9 中心与边缘相位调制特性曲线

Fig. 9 Phase modulation characteristics for the centre and the edge of the SLM

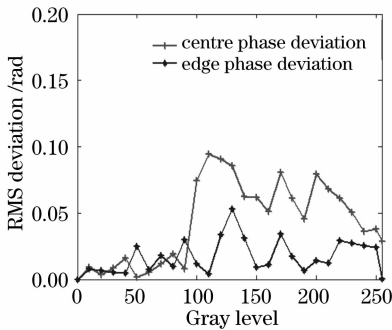


图 10 中心与边缘相位调制均方根误差曲线

Fig. 10 RMS phase deviation versus gray level for the centre and the edge of the SLM

工作孔径上中心与边缘的相位曲线,如图 9 所示。中心与边缘的相位曲线出现了偏差,在同一灰度级最大相位差达到 0.22π 。进一步分析图 10 中心与边缘相位调制量偏离理想值的均方根误差分布曲线,得出中心的均方根误差为 0.04 rad,边缘的均方根误差为 0.01 rad,中心相位误差是边缘的 4 倍。实验结果表明,液晶空间光调制器的相位调制具有不均匀性,中心的相位误差较大,主要是由反射基板的固有误差造成的,因此在波前控制等应用中必须对器件的固有误差进行校正。

5 结 论

利用泰曼-格林干涉仪测量了液晶空间光调制器的相位调制特性,该器件实际的相位调制范围为 $0\sim 3.2\pi$,相位随灰度级呈非线性分布,非线性度达到 17.23% 。利用反插值法建立了线性查找表,在 $0\sim 2.07\pi$ 范围内实现了相位调制与灰度级的线性关系,非线性度减小到 2.85% ,表明利用线性查找表能够明显改善相位调制的非线性。该器件中心与边缘的相位调制,在同一灰度级最大相位差达到 0.22π ,中心相位调制偏离理想值的均方根误差是边缘的 4 倍,说明空间光调制器的相位调制不均匀,中心的相位误差较大。对于综合评价液晶空间光调制器的相位特性和相位调制不均匀性,泰曼-格林干涉仪是一种简单有效的方法。

参 考 文 献

- 1 P. F. McManamon, T. A. Dorschner, D. L. Corkum *et al.*. Optical phased array technology [J]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**(2): 268~298
- 2 D. C. O'Brien, G. E. Faulkner, T. D. Wilkinson *et al.*. Design and analysis of an adaptive board-to-board dynamic holographic interconnect [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(16):3297~3305
- 3 Liu Bohan, Zhang Jian. Dynamical laser beams steering with a phase-only spatial light modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):899~902
刘伯哈,张 健. 纯相位空间光调制器动态控制光束偏转[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7):899~902
- 4 Liu Bohan, Wu Liying, Zhang Jian. Fast phases retrieval for diffraction optical devices optimal design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):219~224
刘伯哈,吴丽莹,张 健. 一种用于衍射光元件优化设计的快速算法的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2):219~224
- 5 Zhaoliang Cao, Li Xuan, Lifa Hu *et al.*. Investigation of optical testing with a phase-only liquid crystal spatial light modulator [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **13**(4):1059~1065
- 6 J. E. Curtis, B. A. Koss, D. G. Grier. Dynamic holographic optical tweezers [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **207**(1-6):169~175
- 7 M. J. Yzuel, J. Campos, A. Márquez *et al.*. Inherent apodization of lenses encoded on liquid-crystal spatial light modulators [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(32):6034~6039
- 8 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
- 9 Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei *et al.*. Optical modulation characteristics of liquid crystal television (LCTV) and its application in optics information processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(8):741~745
陈怀新,隋 展,陈祯培等. 利用液晶电视(LCTV)的光学调制特性及其应用[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(8):741~745
- 10 Rensheng Dou, Michael K. Giles. Closed-loop adaptive optics system with a liquid crystal television as a phase retarder [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(14):1583~1585
- 11 Zhao Xiaofeng, Li Dahai, Chen Zhenpei. Measuring phase modulation characteristics of liquid crystal spatial modulators by using cyclic radial shearing interference [J]. *Journal of*

- Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2002, **39**(4): 675~679
赵晓风, 李大海, 陈祯培. 利用径向剪切干涉法测量液晶空间光调制器的位相调制特性[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2002, **39**(4):675~679
- 12 Li Dahai, Chen Huaixin, Chen Zhenpei. Utilizing LCTV's modulation characteristics to compensate distorted wavefront [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):614~618
李大海, 陈怀新, 陈祯培. 利用液晶电视的位相调制特性补偿畸变波前[J]. 中国激光, 2003, **30**(7):614~618
- 13 Ge Aiming, Sui Zhan, Xu Keshu. Characteristics of phase-only modulation using a reflective liquid crystal on silicon device [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(10):2481~2485
葛爱明, 隋展, 徐克寿. 反射型 LCOS 器件纯相位调制特性的研究[J]. 物理学报, 2003, **52**(10):2481~2485
- 14 Wang Zhihua, Yu Xin. Measuring of the phase modulation of liquid crystal spatial light modulator and correcting of the wavefront [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(2):196~201
王治华, 俞信. 液晶空间光调制器相位调制测量及波前校正[J]. 光学技术, 2005, **31**(2):196~201
- 15 Rensheng Dou, Michael K. Giles. Phase measurement and compensation of a wave front using a twisted nematic liquid-crystal television [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(19):3647~3651
- 16 C. Soutar, K. H. Lu. Determination of the physical properties of an arbitrary twisted-nematic liquid crystal cell [J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(8):2704~2712
- 17 Hongxin Zhang, Jian Zhang, Liying Wu. Evaluation of phase-only liquid crystal spatial light modulator for phase modulation performance using a Twyman-Green interferometer [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2007, **18**:1724~1728
- 18 S. T. Wu, U. Efron, L. D. Hess. Birefringence measurements of liquid crystals [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(21):3911~3915
- 19 Colin Soutar, Stanley E. Monroe, Jr., Jerome Knopp. Complex characterisation of the Epson liquid crystal television [C]. *SPIE*, 1993, **1959**:269~277
- 20 Xiaodong Xun, Robert W. Cohn. Phase calibration of spatially nonuniform spatial light modulators [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(35):6400~6406