

新型 Holoeye Pluto 纯位相型空间光调制器的伽马修正及评价

郑明杰 李志芳 陈大强 吴华钦

(福建师范大学光电与信息工程学院, 福建 福州 350007)

摘要 纯位相型空间光调制器可广泛用于各种精密光学工程,而正确使用纯位相型空间光调制器的前提是正确的伽马修正。针对新型的 Holoeye Pluto 空间光调制器,简单地使用双孔干涉法和 Webcam 进行了成功的伽马修正。修正的结果使得 8 阶的闪耀光栅和 16 阶的闪耀光栅的 1 级光衍射效率分别达到 70% 和 80%;同时利用涡旋位相图较好地生成了对像差及液晶的位相偏差较敏感的 LG01 环形光束。测量了该型液晶的位相稳定性,得出位相的波动上限或平均标准偏差为 2.43° 。

关键词 光学器件;傅里叶光学;伽马修正;双孔干涉;纯位相液晶空间光调制器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.112302

Gamma Correction of a New Type Holoeye Pluto Pure Phase Spatial Light Modulator and Its Evaluation

Zheng Mingjie Li Zhifang Chen Daqiang Wu Huaqin

(College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University,
Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract Pure phase spatial light modulator can be used in many kinds of precision optics, and the prerequisite of correctly using this kind of spatial light modulator is the proper Gamma correction. We complete Gamma correction for a new type of Holoeye Pluto spatial light modulator by simply using the double-hole interference method and Webcam. The results show that the first order diffractive efficiencies of 8-level and 16-level blazed grating reach 70% and 80%, respectively; by displaying vortex hologram, LG01 doughnut beam is generated very well, which is sensitive to the aberration and the deviation of the phase modulated by the spatial light modulator. The stability of the modulated phase is also measured, and the variation upper limit or the averaged standard deviation is 2.43° .

Key words optical devices; Fourier optics; Gamma correction; double-hole interference; pure phase liquid crystal spatial light modulator

OCIS codes 230.2090; 070.2580; 090.2890; 120.5060

1 引言

空间光调制器(SLM)诞生已经有 30 年了。空间光调制器可以用于实现光束的整形滤波、天文望远镜等自适应光学、构建动态全息光镊及系统像差的修正、焦点工程、全息技术二维(2D)及三维(3D)场景再现。受激发射损耗(STED)显微镜、透过厚组织聚焦进而实现超分辨率成像等诸多光学领域^[1-7]。

伽马修正来自于阴极射线管(CRT)电视的 Gamma 修正,是 CRT 电视必须做的一项修正步骤。同样由于液晶调制的位相或灰度与所加电压之间的非线性特性,所有的液晶显示器也都必须做伽马修正。早期的空间光调制器由于控制电路不完善,基本无法实现准确的伽马修正,即实现等间隔灰度对应等间隔位相。例如滨松 PPM8267 光寻址空间光调制器,用户只能控制和选择液晶的总电压而不能实现自由的伽马修正,所以只能利用自己编写新旧灰度映射表加到位相图恢复算法中完成伽马修正^[8]。这种前提下即使算出反函

收稿日期: 2013-06-17; 收到修改稿日期: 2013-07-30; 网络出版日期: 2013-10-28

基金项目: 福建省教育厅科研项目(JB10019)

作者简介: 郑明杰(1972—),男,硕士,副教授,主要从事光镊方面的研究。E-mail: mj.zheng@fjnu.edu.cn

数,由于灰度的均匀取值特点,也无法均匀地产生等间隔的位相。如果灰度位相关系非线性程度大的话,则导致的结果是曲线平缓处可用灰阶变少,曲线陡峭处灰阶密集四舍五入的近似导致的误差变大。

Holoeye Pluto 的液晶的电压由脉冲编码调制(PCM)电路模块提供,实际就是通过 Sequence 文件控制基本脉冲的累积产生不同权重的电压。液晶分子的取向由这个电压的均方根(RMS)值决定。Holoeye 提供的常用的 Sequence 文件有 18-6 和 5-5 两种。前者允许有 256 级标准灰阶,后者只有 192 级灰阶,但是位相调制效果闪烁更小。同时用户可以自己编制 Sequence 文件和伽马曲线。这些为伽马修正提供了较大的灵活性。修正的总体思想可参照 2012 年中国科学院光电研究院的研究^[9-10],虽然其修正的是强度调制曲线。首先对测量到的强度灰度关系曲线做多项式拟合,再利用 Bolzano 二分法计算伽马修正函数,最后再把灰度映射关系写到视频图像阵列(VGA)控制电路上实现等间隔的直线修正。而由于液晶控制电路技术的进步,查找表(LUT)得以使用。此时伽马修正的实际做法为线性 LUT 曲线及所对应的位相灰度曲线和线性位相灰度曲线,在这三条曲线之间做映射可得伽马修正曲线(即新的 LUT 曲线)。Holoeye Pluto 的空间光调制器还可以灵活选择电压工作区间,快捷地实现等间隔灰度对应等间隔的位相调制效果。据了解,目前国内有多家大学和研究团体均已购买 Holoeye 的纯相位型空间光调制器,而国内相关的伽马修正的文献较少。同时,每台液晶空间光调制器都有差别,厂商并不提供线性的伽马修正文件,因此伽马修正必须自己动手完成。本文成功地对 Holoeye Pluto 纯相位型空间光调制器进行了伽马修正。然望该研究能给众多使用纯相位型空间光调制器的光学工作者提供有价值的参考。

2 Holoeye Pluto 空间光调制器基本情况

图 1 为 Holoeye Pluto 空间光调制器工作在缺省出厂配置下观察 45° 倾斜的 16 阶闪耀光栅的调制效果(适当离焦以便观察)。图中 0 级光强比较大;2 级较 1 级光强更大,错级现象明显,说明位相调制不准确,必须进行伽马修正。

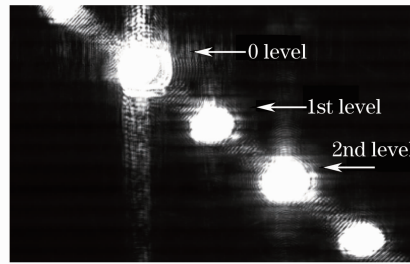


图 1 SLM 缺省配置下闪耀光栅傅里叶变换的离焦观察结果

Fig.1 Fourier transform result of an obliqueblazed hologram observed under defocusing with applying the defaulted configuration of the SLM

图 2 为利用 Newport-1918 激光功率计测得的缺省配置下液晶的 0~4 V 电压的强度调制曲线。曲线形状与典型液晶显示器的强度调制曲线基本相同^[11-12]。曲线与余弦曲线偏离明显,即灰度位相之间存在非线性

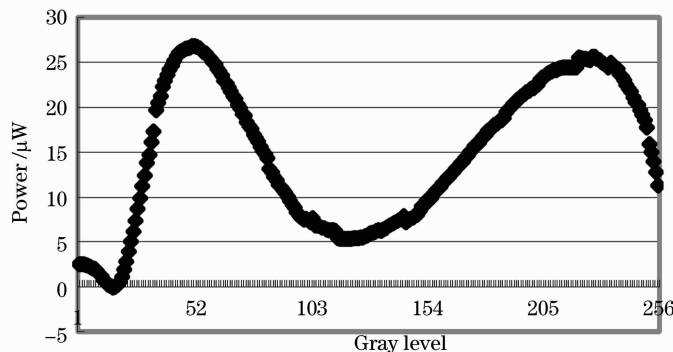


图 2 SLM 缺省配置下液晶的 0~4 V 电压的强度调制曲线

Fig.2 Intensity modulation curve with applying 0~4 V voltage under the defaulted configuration of the SLM

性关系。由图还可知电压较小时液晶分子无法克服分子间的粘性,起不到调制作用,因此要适当提高液晶工作的最小电压。

3 纯位相型 Holoeye Pluto 空间光调制器的伽马修正

纯位相型空间光调制器的伽马修正方法原理上与强度型液晶 SLM 的伽马修正方法相似^[9],但其具体做法不同。基本过程为:设定液晶的电压为 0 到最大允许电压,给空间光调制器加载直线的灰度电平关系曲线(LUT 曲线),测出完整的灰度位相关系曲线。选取变化平缓的,变化略大于 2π 的曲线段对应的最高最低电压作为空间光调制器的工作电压。设定好电压后重新测量直线灰度电平曲线作用下的位相灰度关系曲线。重复测量多次后平均得到最后的灰度位相关系曲线测量结果。将这个结果复制到 Holoeye 提供的 excel 计算文件可得伽马修正曲线。加载该曲线后可测得直线的灰度位相关系。

实验采用双孔干涉法。双孔孔径 2~3 mm,孔距 6~8 mm。使光路保持较好的对称性,双孔对称排列且边缘整洁。调节成像位置使 3 根干涉条纹刚好充满相机面。实验中使用 Webcam 即普通视屏头(480 pixel × 640 pixel),理论上可得约 1.7° 的测量精度,略高于 5-5 序列的 $360^\circ/192 = 1.88^\circ$ 。如果使用 18-6 序列 $360^\circ/256 = 1.4^\circ$,同样测 3 根条纹,相机须有 780 pixel 以上。

双孔干涉法的主要原理为双孔的傅里叶变换,下式为一维的变换结果:

$$E(u) = F[g_a(x - D/2) + g_a(x + D/2)] = 2\cos(uD/2) \frac{\sin(ud/2)}{u/2},$$

式中 E 为焦面上的电场强度, F 表示傅里叶变换, g_a 表示门函数, D 为孔距, d 为孔径, x,u 分别对应物面和焦面的坐标。要在 CCD 上得到 3 根条纹,孔距必须是孔径的 2 倍或以上。由 sinc 函数的对称性可知条纹数最小也是最佳的数目为 3,条纹越多测量结果的精度就越低。孔距可以由 CCD 的成像面积逆推计算。考虑到后续计算机处理时做的是离散傅里叶变换,包含周期性延拓,最好能调节相机位置使得相机刚好容纳 3 个周期的余弦函数,提高基波的成分,改进测量效果。求解算法上 sinc 函数余弦调制不影响条纹的位相读出,可以使用普通的等厚干涉条纹位相算法。具体程序上,先使用 Matlab 的 smooth 函数对条纹做平滑化去除高频成分,再用快速傅里叶变换(FFT)得到幅频和相频特性,最后用 angle 和 unwrap 函数得到基波也是幅频特性中幅度最大的频率成分对应的位相。

实验中的要点如下:

- 1) 调节起偏器的偏光方向与液晶的长边平行,使空间光调制器处于纯位相调制状态。可以利用太阳镜初步设定起偏器的偏光方向。最后通过观察最小的闪耀光栅 0 次光强度来确定准确的角度。
- 2) 使用焦距 $f=300$ mm($f300$) 的透镜做傅里叶变换,由 $40\times$ 物镜将干涉条纹成像于相机上。并调节距离使相机上可见的条纹数为 3。条纹在相机上居中。在焦面上可加限光光阑去掉高次衍射光。对焦时注意让双孔逐渐重合避免测到错误条纹。
- 3) 调整激光光强使条纹对比度尽可能最大即最高点在灰度值 250 附近,稍微饱和对测量没有影响;低点尽可能低,主要靠降低背景光强度、加限光光阑去掉高次衍射光。通过在 PhaseCam 中选多行像素做数据的平均处理。激光的断面强度分布要求高斯分布,使得光强调整时不影响准直效果和条纹质量。

4 伽马修正实验及结果

图 3 为实验中所用的双孔干涉测量光路。起偏器的偏光角度调为液晶面长边方向,保证偏光方向与液晶分子的长轴平行。利用 $f300$ 透镜得到双孔干涉的傅里叶变换结果。视频头或 Webcam 摘去镜头以观察干涉条纹。实验中取孔径为 2 mm,孔距为 6 mm。通过给液晶分子施加 0~4 V 电压可测得对 633 nm 激光,纯位相 Holoeye Pluto 空间光调制器具有 3.76π 的调制能力。图 4 中黑色曲线为 5-5 序列下,修正前加载直线灰度电平曲线获得的调制效果,合理选择工作电压范围使得所调制的位相略大于 2π ,经修正后可刚好达到 2π (灰色曲线)。图 5 为经计算得出的 18-6 序列和 5-5 序列的伽马修正曲线即灰度电平曲线(LUT 曲线)。

成功的校正必须使得衍射效率达到器件的理想状态。按照 Holoeye 的用户手册记录,Pluto 的液晶空

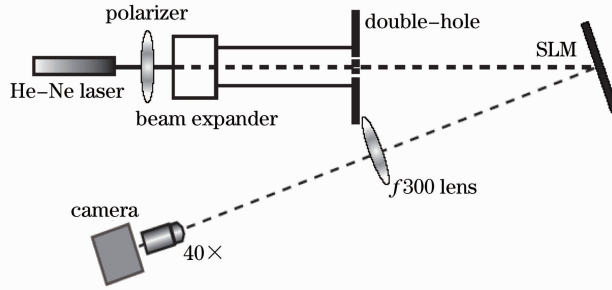


图3 使用双孔干涉法进行伽马修正的实验光路

Fig. 3 Experimental setup for Gamma correction using double-hole interference method

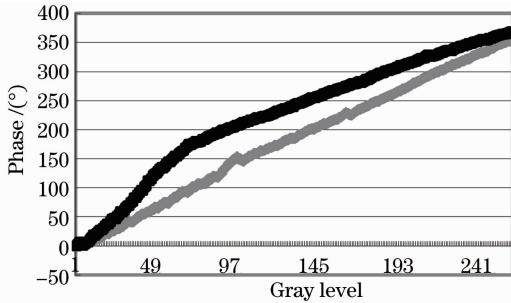
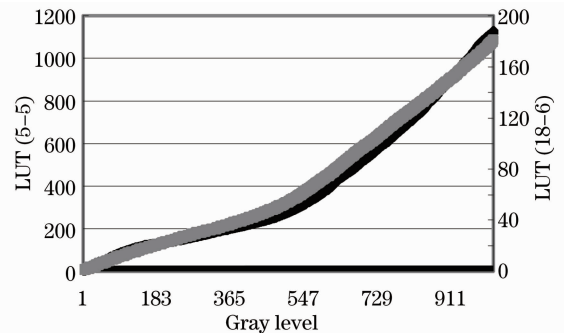


图4 直线伽马曲线作用下的灰度位相关系曲线(黑色)和修正后的灰度位相关系曲线(灰色)

Fig. 4 Relation between phase and gray level with applying a linear Gamma curve (black) and after correction (gray)

图5 5-5序列(黑色)与18-6(灰色)序列的伽马修正曲线
Fig. 5 Gamma correction curves measured under 5-5 sequence configuration (black) and 18-6 sequence configuration (gray)

间光调制器在表现 8 阶的闪耀光栅时 1 级衍射效率能达到 75%，16 阶为 83%。这是验证伽马校正成功与否的标准。在 5-5 序列和伽马修正曲线的配置下，图 6(a)~(c) 分别表示空屏(灰度值 40)、8 阶闪耀光栅和 16 阶闪耀光栅的傅里叶变换观察结果(稍微离焦避免相机过度饱和)。用刀口法多次扫描的结果为 8 阶的 1 次光衍射效率达到 70%，16 阶的达到 80%。可见修正达到理想效果。由于用涡旋位相光栅生成的环形光即 LG01 光束对光路像差及空间光调制器的位相调制的偏差最为敏感，因此环形光可用于评价修正成功与否^[13]。图 6(d)，(e) 为修正前后的环形光的离焦观察结果。虽然由于不同时间段拍摄的原因图 6(d)，(e) 离焦程度不同，但是可以看到在旋转对称性上图 6(e) 获得了明显改善。

测量过程中入射激光和液晶反射的激光的功率变化情况用 Newport-1918 激光功率计记录。Newport 激光功率计的模拟低通滤波器设置为 1 kHz，数字低通滤波器设置为 1000。取样间隔 10 ms。结果如图 7

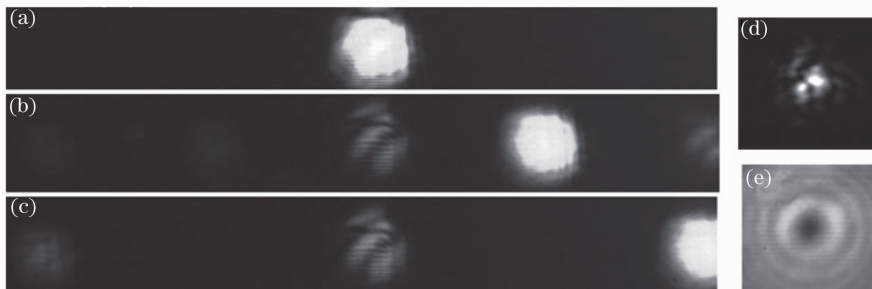


图6 (a)~(c)空屏、8阶闪耀光栅和16阶闪耀光栅傅里叶变换的离焦观察结果；(d)，(e)伽马修正前后 LG01 环形光的离焦观察结果

Fig. 6 (a)~(c) Defocused observations of Fourier transform results of blank hologram, 8-level and 16-level blazed patterns; (d), (e) LG01 vortex observed before and after Gamma correction

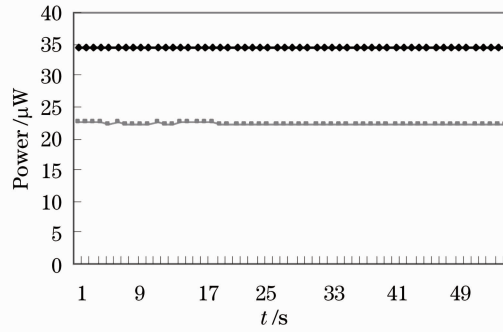


图 7 位相改变时出射光的强度变化(灰色)和入射激光自身的光强变化(黑色)

Fig. 7 Intensity variations of the reflected laser (gray) and the incident laser (black)

所示,激光功率几乎不变;由 0~255 改变液晶的灰度同时测量经液晶面反射后的激光功率,变化仅为 0.5%;液晶的反射效率达到 64.45%。

电寻址的空间光调制器由于电平的生成机制附带而来的一个缺点就是液晶分子的转向由电压的 RMS 值决定,即加载在液晶分子上的电压大小不是恒定的,而是波动的。这造成了空间光调制器所调制的位相出现波动即闪烁^[14]。Holoeye LC-R2500 型的空间光调制器的位相闪烁在 25°室温下能达到 50°,极大地影响了液晶的性能。在位相修正的同时,在同一个时间段内通过多次反复测量液晶空间光调制器在 5-5 序列和直线灰度电平特性曲线配置下的位相灰度关系曲线,得到除 0 外各级灰度值对应的位相变动(其中包含闪烁及其他系统变化量)的标准偏差如图 8 所示。平均标准偏差为 2.43°,为 360°的 0.67%。这个值是液晶位相平均波动的上限,说明该型空间光调制器的稳定性较好。

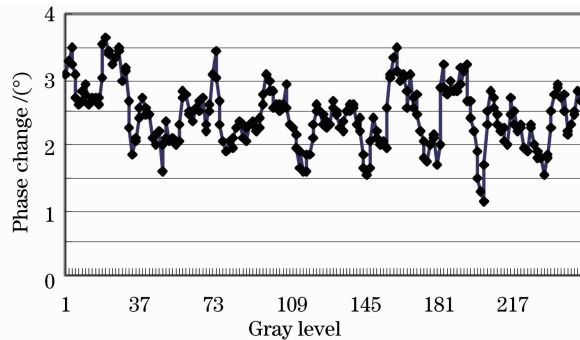


图 8 1~255 各阶灰度值时位相闪烁的标准偏差

Fig. 8 Standard deviations or the phase flicker of every gray level

此外,实验同时也对 18-6 序列配置下的空间光调制器做了伽马修正,但调制效果不如 5-5 序列的调制效果。两个序列的实验在同一个时间段内采用相同的办法完成。8 阶和 16 阶衍射光栅的衍射效率均略低于 5-5 序列的结果。18-6 序列提供 256 个灰阶,本应具有更强表现力、对应更高的衍射效率。由于 18-6 序列下,1 pixel 内控制电路对液晶的寻址只有 2 次,而 5-5 序列有 5 次,导致前者的位相闪烁比后者大 3 倍。是否因为幅度较大的闪烁导致调制效果变差,有待深入研究。

5 结 论

纯位相型液晶空间光调制器的伽马修正是利用空间光调制器进行深入的精密应用研究的前提和基础。实验中发现干涉条纹的测量除了对噪音比较敏感,对激光的指向稳定性和准直性要求均较高。本文虽然只是阶段性成果,但能为广大使用纯位相液晶空间光调制器的光学工作者提供详细的参考。

参 考 文 献

- 1 J Gluckstad, D Palima. Generalized Phase Contrast Applications in Optics and Photonics [M]. New York: Springer Press, 2009. 103-144.

- 2 K Dholakia, T Cizmar. Shaping the future of manipulation [J]. *Nature Photon*, 2011, 5(6): 335–342.
- 3 D Preece, R Bowman A Linnenberger, *et al.*. Increasing trap stiffness with position clamping in holographic optical tweezers [J]. *Opt Express*, 2009, 17(25): 22718–22725.
- 4 S E Skelton, M Sergides, R Saija, *et al.*. Trapping volume control in optical tweezers using cylindrical vector beams [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(1): 28–30.
- 5 N T Shaked, B Katz, J Rosen. Review of three-dimensional holographic imaging by multiple-viewpoint-projection based methods [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(34): H121–H136.
- 6 T J Gould, D Burke, J Bewersdorf, *et al.*. Adaptive optics enables 3D STED microscopy in aberrating specimens [J]. *Opt Express*, 2012, 20(19): 20998–21009.
- 7 A P Mosk, A Lagendijk, G Leroosey, *et al.*. Controlling waves in space and time for imaging and focusing in complex media [J]. *Nature Photon*, 2012, 6(5): 283–292.
- 8 M J Zheng, Y Ogura, J Tanida. Three-dimensional dynamic optical manipulation by combining a diffractive optical element and a spatial light modulator [J]. *Opt Rev*, 2008, 15(2): 105–109.
- 9 Qiu Jisi, Fan Zhongwei, Tang Xiongxin. New adjustment method for Gamma curve of liquid crystal spatial light modulator and its effect on beam shaping [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 061402.
邱基斯, 樊仲维, 唐熊忻. 液晶空间光调制器 Gamma 曲线的线性化调试算法及其对光束整形的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 061402.
- 10 Li Yubo, Jia Wenjian, Zeng Yuxiao, *et al.*. A method for linearization of phase response generated in liquid crystal modulator [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(7): 132–135.
李宇波, 贾文建, 曾宇骁, 等. 一种液晶调制器位相响应特性线性化方法[J]. *光电工程*, 2009, 36(7): 132–135.
- 11 Huang Ziqiang. Principle of Liquid Crystal Display (2nd edn.) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. 120–139.
黄子强. 液晶显示原理(第2版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. 120–139.
- 12 Feng Zhixing. Theoretical calculation of the general twisted nematic liquid-crystal displays [J]. *Optoelectronic Technology*, 2009, 20(3): 174–178.
冯治兴. 广义扭曲向列液晶显示器件的理论计算[J]. *光电子技术*, 2009, 20(3): 174–178.
- 13 A Jesacher, A Schwaighofer, S Furhapter, *et al.*. Wavefront correction of spatial light modulators using an optical vortex image [J]. *Opt Express*, 2007, 15(9): 5801–5808.
- 14 J García-Márquez, V López, A González-Vega, *et al.*. Flicker minimization in an LCoS spatial light modulator [J]. *Opt Express*, 2012, 20(8): 8431–8441.