

衍射法快速线性化液晶空间调制器的相位调制关系

郑明杰 李志芳 陈大强 吴华钦 王由平

福建师范大学光电信息与工程学院, 福建 福州 350007

摘要 纯相位型液晶空间光调制器是应用较广的高精度光学仪器。使用 Holoeye 产家推荐的双孔干涉测量法可使 16 阶闪耀光栅的 1 级光衍射效率达到 80%。但需要滤波、准直、扩束等细致工作, 耗时较长。运用二进制相位光栅衍射法可以简化修正过程。实验中每隔 10 个灰度值测一个点, 利用 Matlab 做线性内插扩展到 255 灰度。使 16 阶闪耀光栅和二进制光栅的 1 级光衍射效率最终达到产家目录给出的 83% 和 40%。修正结果证明 5-5 序列配置的 Holoeye Pluto 的液晶光阀在平均调制相位稳定的基础上, 衍射法校正相位调制特性不受闪烁影响, 且简单可行。

关键词 液晶空间光调制器; 双孔干涉法; 衍射法; 二进制光栅; 闪烁

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.061203

Phase Modulation Characteristics of Liquid Crystal Spatial Light Modulator Fast Linearized with Diffractive Method

Zheng Mingjie Li Zhifang Chen Daqiang Wu Huaqin Wang Youping

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

Abstract The pure phase type of spatial light modulator (SLM) is a widely used high precision optical device. The double-hole interference method recommended by Holoeye can correct the phase to a result which has 80% of 1st diffractive efficiency for 16 level blazed grating. But the total process needs to be conducted carefully with filtering collimation, beam expanding etc., and it takes too long time. The diffractive method using binary grating can simplify the correction process. We make a measurement just every 10 gray level. The total 256 values are achieved by interpolation using Matlab. As a result, the 1st diffractive efficiency of 16 level blazed grating and binary grating reaches to the Holoeye catalog values of 83% and 40% respectively. The experiments prove that the diffractive method based on the stable averaged phase modulation of Holoeye Pluto SLM can correct the characteristic of SLM with simplicity and feasibility, and it is not limited by the phase flicker under 5-5 sequence configuration of SLM.

Key words liquid crystal spatial light modulator; double hole interference; diffractive method; binary grating; flicker

OCIS codes 120.5060; 070.2580; 090.2890; 230.2090

1 引言

近年来,随着纯相位型液晶空间光调制器在精密光学工程中的广泛使用,它越来越受到广大科技工作者的认可。纯相位型液晶空间光调制器的优点在于它仅对光的相位进行调制,不影响光强,具有高光效率的优点;这种空间光调制器一次投入后,可以随时随意生成各种二元全息相位图,具有廉价灵活的优点;空间光调制器上的相位可以看成系统的输入,与输出结果之间可以构成反馈,又具有自适应性的优点。基于以上优点,纯相位型空间光调制器广泛应用于诸如激光整形,全息光镊产生动态点阵,修正光路像差,STED 显微镜产生环形光和透过厚组织聚焦以及空间探测的自适应光学等^[1-7]。纯相位型液晶空间光调制器的代表是反射式电寻址平行配置液晶空间光调制器,它具有反射率高、厚度薄、交叉串扰小、价格低等优点。因为该液晶空间光调制器具有高集成度,高表现力,高反射率以及能与个人计算机之间方便地通过显卡驱动等优点,这种类型的 LCos 液晶空间光调制器将是未来技术发展的主要方向。本文所用即为 Holoeye Pluto

收稿日期: 2013-12-30; 收到修改稿日期: 2014-01-14; 网络出版日期: 2017-05-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(81201124)

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

数字电寻址式液晶空间光调制器。

2 纯相位型 Holoeye Pluto 空间光调制器的伽马修正

正确使用纯相位型液晶空间光调制器的前提是准确地对液晶空间调制器相位灰度特性进行修正,使得灰度在 0~255 之间,相位呈现线性变化。这个线性校正需由使用者在产家提供的部分软件基础上自行完成。常见的校正方法有两种:一种是干涉法,如产家推荐的双孔干涉法,Holoeye 产家提供相应的软件 PhaseCam,利用视屏头即可开展自动测量实验(使用该法能取得 16 阶闪耀光栅 1 级衍射效率 80% 的效果。光路如图 1 所示);又如中国科学院长春光学精密机械与物理研究所使用 ZY-GO 干涉仪与哈特曼波前检测仪实现精密测量^[8-9];第二种是衍射法,即利用二进制光栅测量 1 级光衍射效率进而测定相位^[10-12]。第一种方法的修正结果在不使用专业仪器而使用普通视屏头的条件下(大多数研究室的条件均有限,无法购入昂贵的干涉仪),基本上可以得到线性的相位灰度曲线。但光路需经较好的滤波、准直、扩束以保证平面波阵面,对实验条件和环境的要求较高。使用衍射法的好处在于光路简单,逐点测量的精度和可信度高。通过逐点确认二进制光栅 128 灰度处的衍射光功率,也可以克服激光功率变化(良好的激光功率也有 2% 的变化)对相位测量的影响。由于数字电寻址液晶空间光调制器的闪烁,测量的结果并不是平均调制相位,而是其近似值^[13-15]。因此国际上公认的测量 SLM 调制相位的方法为干涉法。由于 Holoeye Pluto 液晶光阀提供 5-5 的序列配置,相对 18-6 序列配置大大减小了闪烁,这为衍射法的使用提供了可能。图 2 为衍射法实验所用的光路。实验中衍射法无需做很好的准直工作,对波面要求较低。这使空间光调制器的特性在保证准确性的同时,又为修正提供了很大的便利。测量使用的激光功率计的精度较高,测量结果可信度较高;而干涉法对震动等噪音较敏感,需使用较好的相机提高对比度。

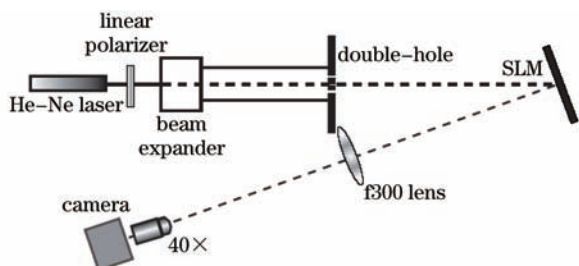


图 1 双孔干涉法修正液晶空间光调制器相位灰度特性的光路

Fig.1 Optical path for correcting the phase gray-level relation curve of the SLM using the double holes interference method

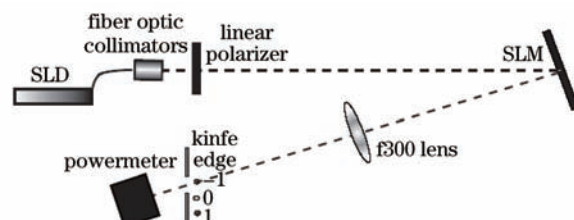


图 2 衍射法修正液晶空间光调制器相位灰度特性的光路

Fig.2 Optical path for correcting the phase gray-level relation curve of the SLM using the diffractive method

液晶空间光调制器的灰度相位关系的线性修正原理——查找法如图 3 所示。直线为目标线性相位灰度曲线,实曲线为原 LUT 查找表灰度曲线,对应的虚曲线为相位灰度关系曲线。连接黑十字可得修正后的 LUT 灰度曲线。黑十字点是通过图中虚线矩形框路径查找对应点获得的。即由线性的相位灰度曲线出发,寻找原相位灰度曲线上等相位点所对应的 LUT 值,该值和原灰度构成新的 LUT 灰度曲线上的校正点。为了

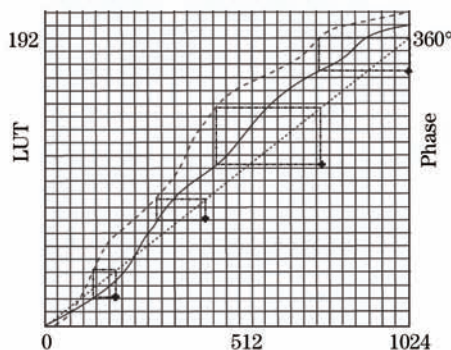


图 3 查找法修正液晶空间光调制器的相位灰度关系的原理

Fig.3 Principle for correcting the phase and gray-level relation of an SLM by using search method

压制电压变动导致的闪烁,Holoeye Pluto的5-5序列每帧寻址5次,导致可用电平数目减少为192个。这意味着可用的相位阶数最多只有192阶,而LUT电平有1216阶。同样,图3中横轴为灰度值,显示驱动的灰阶为1024,但是实际只能使用256个灰阶。

3 衍射法修正实验及结果

首先将840 nm超发光二极管(SLD,3.5 mW)激光经光纤准直扩束到直径2 mm以上,然后通过水平方向偏振片照射液晶的中间部位(准直要求不高)。为分离1级衍射光,在Holoeye Pluto SLM后加焦距300 mm的透镜,且在焦面前加直径为2 mm圆孔光阑。使用Newport1918-r激光功率计读取1级光功率。为SLM选用5-5序列配置,因为该序列下的闪烁较小。然后为SLM加载直线LUT灰度曲线。通过改变Holoeye的应用软件生成的二进制光栅(具有8阶高灰度和8阶0灰度)的高灰度值,观察1级衍射光的光强变化。设置合适的电压使得0~255灰度变化范围内光强升降略大于一个周期,以保证充分利用有限的LUT值。加载直线LUT灰度曲线后测量二进制相位光栅的1级衍射光功率随灰度变化情况,如图4所示。

二进制光栅的一级衍射光强与相位关系如下式^[9]:

$$I_n = \frac{I_0}{2}(1 - \cos \phi) \left[\text{sinc} \left(\frac{\pi n}{2} \right) \right]^2, \quad (1)$$

式中 I_0 为入射光强, ϕ 为光栅的相位, n 为衍射级数。理想情况下一级衍射光效率为40.53%。

图5是将图4的结果利用(1)式转换为相位。经Matlab线性插值得到0~255灰度的相位灰度关系曲线。后利用查找法可以得到新的LUT灰度曲线,如图6所示。重新为SLM加载图6所示的特性曲线后测量1阶光强与灰度的关系得到图7。对比图4,图7的测量结果表明,校正工作获得成功。因为0~255灰度之间,二进制相位光栅的1级光功率随灰度呈余弦关系,即意味着液晶空间光调制器的相位和灰度为线性关系且相位由0调制到 2π 。由图7中良好的线性关系可以推断出,5-5序列下闪烁对相位调制特性的影响可以忽略。说明衍射法适用于该型空间光调制器的特性修正工作。实验测量了16阶闪耀光栅和二进制光栅的1级光衍射效率,达到产家目录给出的83%和40%,这也是衍射法校正成立的证据之一。同时,得到的衍射效率略好于干涉法的修正结果,这更说明了衍射法的正确性和可行性。

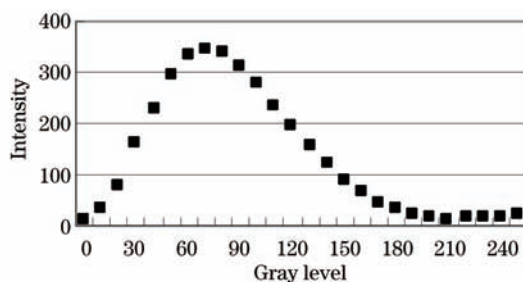


图4 加载直线LUT灰度曲线后测量二进制相位光栅的1级衍射光功率

Fig.4 Power of the 1st order diffractive light measured by using binary phase gratings with loading a linear LUT gray-level curve

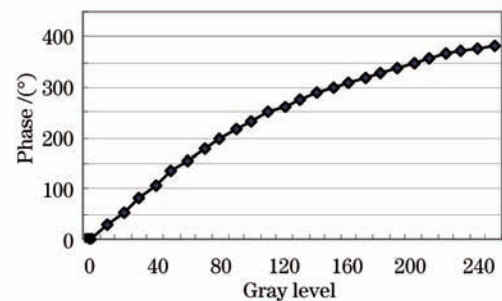


图5 将图4结果换算为相位

Fig.5 Converts the results of Fig.4 to phase

实验中设置激光功率计的模拟滤波器为1 kHz(足以保留SLM上所有的变化);设置数字滤波器为1000。在测完某灰度对应的二进制相位光栅的1级光功率后,迅速点击切换光栅(时间间隔为电脑和SLM系统的响应时间,毫秒级)检查128灰度二进制光栅的1级衍射光效率,做到对所测结果的正确性逐点确认,克服激光功率的缓慢变化的影响。由于所测点数仅26个,整个实验简单易行。实验中1级衍射光功率的最大值约为 $392 \mu\text{W}$,对应灰度128。闪烁的测量结果如图8所示。在200灰度值点出现最大光强变化为 $19 \mu\text{W}$,零灰度对应的背景光强变化为 $0.36 \mu\text{W}$,在128灰度值点处出现一个最小的光强变化为 $0.5 \mu\text{W}$ 。0~255灰度之间闪烁导致的相位变化的最大幅度在 10° 以内。测量时功率计的模拟滤波器取样频率设为1 kHz,高于闪烁最强的300 Hz与600 Hz。

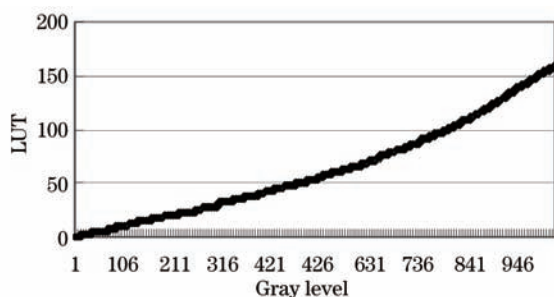


图6 计算得到的新的LUT灰度曲线

Fig.6 New calculated LUT gray-level curve

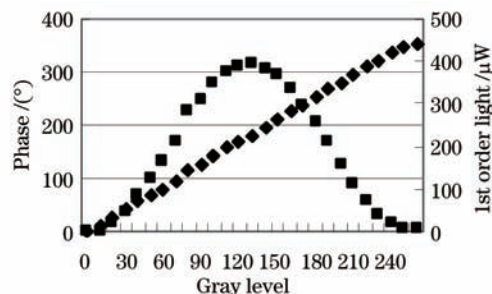


图7 衍射法修正后二进制光栅的1级光强度随灰度变化的曲线及线性相位灰度曲线

Fig.7 1st order light power and gray-level relation curve and linear phase gray-level curve, after the correction using diffractive method

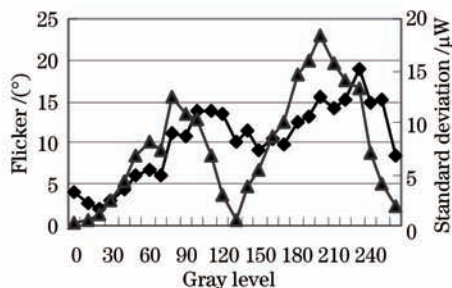


图8 闪烁导致的相位变化(矩形标志)与1级衍射光功率的标准偏差(三角形标志)

Fig.8 Phase variation led by phase flicker (rectangular mark) and standard deviation of 1st order light(triangular mark)

另外还对 633 nm 的 He-Ne 激光做了相同的实验,获得相同的效果。这证明了 5-5 序列配置下, Holoeye Pluto SLM 的修正可以使用衍射法简单快速修正,得到线性的相位调制结果。16 阶闪耀光栅和二进制光栅的 1 级光衍射效率达到产家目录给出的 83% 和 40%。原因可以归结为 SLM 调制的平均相位是稳定的,且闪烁较小,不影响衍射法的校正。840 nm 的 SLD 激光具有 10 nm 的线宽,但实验没有观察到线宽对 SLM 的调制的影响。

4 结 论

本文的工作为广大使用 Holoeye 纯相位液晶空间光调制器的光学工作者提供了一个廉价简易的方法来快速准确地修正液晶的相位调制特性,使液晶空间光调制器的闪耀光栅的 1 级衍射效率达到目录值 83%。

参 考 文 献

- 1 H Ma, P Zhou, X Wang, *et al.*. Near-diffraction-limited annular flattop beam shaping with dual phase only liquid crystal spatial light modulators [J]. *Opt Express*, 2010, 18(8): 8251-8260.
- 2 A Banas, T Aabo, J Gluckstad, *et al.*. Matched filtering generalized phase contrast using binary phase for dynamic spot and line patterns in biophotonics and structured lighting [J]. *Opt Express*, 2013, 21(2): 1849-1856.
- 3 K Dholakia, T Cizmar. Shaping the future of manipulation [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 335-342.
- 4 M Dienerowitz, G Gibson, M Padgett, *et al.*. Holographic aberration correction: optimising the stiffness of an optical trap deep in the sample [J]. *Opt Express*, 2011, 19(24): 24589-24595.
- 5 T Čižmár, M Mazilu, K Dholakia. In situ wavefront correction and its application to micromanipulation [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(6): 388-394.
- 6 T J Gould, D Burke, J Bewersdorf. Adaptive optics enables 3D STED microscopy in aberrating specimens [J]. *Opt Express*, 2012, 20(19): 20998-21009.
- 7 A P Mosk, A Lagendijk, G Lerosey. Controlling waves in space and time for imaging and focusing in complex media [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(5): 283-292.
- 8 Cao Zhaoliang, Mu Quanquan, Hu Lifa, *et al.*. Nonlinear phase modulation of liquid crystal wavefront corrector and

- closed loop correction [J]. *Chinese J Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(2): 157–161.
- 曹召良, 穆全全, 胡立发, 等. 液晶波前校正器相位调制非线性及闭环校正研究[J]. *液晶与显示*, 2008, 23(2): 157–161.
- 9 A Lizana, I Moreno, A Marquez, *et al.*. Time fluctuations of the phase modulation in a liquid crystal on silicon display: characterization and effect in diffractive optics [J]. *Opt Express*, 2008, 16(21): 16711–16722.
- 10 C J Yu, J H Park, J Kim. Design of binary diffraction gratings of liquid crystals in a linearly graded phase model [J]. *Appl Opt*, 2004, 43(9): 1783–1788.
- 11 F H Li, N Mukohzaka, N Yoshida, *et al.*. Phase modulation characteristics analysis of optical-addressed parallel-aligned nematic crystal phase-only spatial light modulator combined with a liquid crystal display [J]. *Opt Rev*, 1998, 5(3): 174–178.
- 12 A Linnenberger, S Serati, J Stockley. Advances in optical phase array technology [C]. SPIE, 2006, 6304: 63040T.
- 13 A Farre, M Shayegan, C L Quesada. Positional stability of holographic optical traps [J]. *Opt Express*, 2011, 19(22): 21374–21384.
- 14 M Person, D Eengsrom, A Frank. Minimizing intensity fluctuations in dynamic holographic optical tweezers by restricted phase change [J]. *Opt Express*, 2010, 18(11): 11250–11263.
- 15 Huang Ziqiang. *Principal of Liquid Crystal Display* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- 黄子强. *液晶显示原理*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.