

相位型液晶空间光调制器初始相位的校准与多波长响应的研究

刘冬梅 刘娟 张昭 谢敬辉 王涌天

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 使用时间及环境变化会引起空间光调制器(SLM)初始相位的改变及波长响应的偏移。针对这一问题,研究了纯相位 SLM 的初始相位的校准及多波长响应。针对初始相位的校准问题,采用四步移相干涉法测量了 SLM 的初始相位,进行反复校准,得到了很好的修正效果。针对多波长响应问题,实验研究了干涉条纹级数的变化与不同波长对应的灰度级间的关系,获得了 SLM 对多波长响应的修正系数。研究结果为在各种不同环境中精确使用 SLM 提供了技术参考。

关键词 测量;全息术;空间光调制器;相位校准;多波长响应;四步移相

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.041203

Study of Initial Phase Calibration and Multi-Wavelength Response of Phase-Only Spatial Light Modulator

Liu Dongmei Liu Juan Zhang Zhao Xie Jinghui Wang Yongtian

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The initial phase and wavelength response of the spatial light modulator (SLM) will be shifted with the working time and the environment variation. To solve this problem, we study the initial phase calibration and the multi-wavelength response of phase-only SLM. Four-step phase shifting interferometry is used to measure and calibrate the initial phase of SLM. Michelson interferometer is used to study the relation between the order of interference fringes and the gray scale of different wavelengths experimentally. It is shown that the initial phase is calibrated appropriately and the correction coefficient of wavelength response is achieved successfully. This investigation will provide technologic reference for using SLM in various environments.

Key words measurement; holography; spatial light modulator; phase calibration; multi-wavelength response; four-step phase shift

OCIS codes 120.5060; 120.4640

1 引言

随着液晶技术的发展与日渐成熟,液晶空间光调制器(SLM)凭借它的实时性和灵活性,在光信息处理、光学相关和光互连等相关领域中占据着越来越重要的地位,广泛应用于模式识别、图像处理、数字全息、空间滤波和二元光学等领域^[1~8]。

SLM 由液晶材料实现相位调制,受液晶材料的制约,液晶 SLM 本身存在着几个不容忽视的重要问题:1)由于 SLM 中每个液晶像素的光电特性不完全相同,使其对光的调制有微小的偏差,故 SLM 的相位调制在整个空间上来讲是不均匀的。这种调制的不均匀性还与 SLM 的表层防护玻璃和地址选择电路底板的曲度有关,地址选择电路的底板曲度是底板的非金属化地带和金属化地带在打磨时磨光率不同所造成的结果,

收稿日期: 2011-10-08; **收到修改稿日期**: 2011-10-31; **网络出版日期**: 2012-01-19

基金项目: 国家科学自然科学基金(61077007)、国家 863 计划(2009AA01Z309)和教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0606)资助课题。

作者简介: 刘冬梅(1986—),女,硕士研究生,主要从事衍射光学元件方面的研究。E-mail: 307885311@qq.com

导师简介: 刘娟(1970—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事微纳光学和全息光学等方面的研究。

E-mail: juanliu@bit.edu.cn

导致 SLM 存在着初始相位差。2) SLM 控制软件里原有的初始优化相位会受到环境、使用时间、运输等因素的影响,使得初始补偿出现很大的偏差。3) 由于液晶波片的折射率是波长的函数,因此不是完全消色差的。色散意味着所设计的仪器对单个设定波长有 2π 相位调制,对相对于设定波长长的光波相位调制小于 2π ,对相对于设定波长短的光波相位调制大于 2π 。因此,本文的研究内容是 SLM 初始空间相位和对偏离波长相位响应的修正。

SLM 初始相位的修正一般采用四步移相干涉测量法、光栅测量法、电磁测量法、声波测量法以及激光三角测量法^[9]等。本文采用四步移相干涉测量法^[10]进行初始相位的修正,并实验验证了该方法的有效性。利用干涉原理,通过观测干涉条纹级数的变化,找出不同波长的光源对应的灰度级范围,计算波长修正系数,实现偏移波长响应修正。

2 基本原理

2.1 SLM 初始空间相位的校准

图 1 为实验所用光路:泰曼-格林干涉系统。激光通过空间滤波器(SF)、准直透镜和偏振片之后使用分束镜(BS)分束,其中一束平行光通过平面镜 M 反射,另一束平行光通过 SLM 调制之后,与前一束光干涉,采用 CCD 接收。

利用移相技术求得 SLM 上引入的附加相位调制误差 $\Delta\varphi(x, y)$,即对干涉条纹强度引入时间调制,采集不同相移值对应的干涉强度图,通过移相算法实时检测出 SLM 的相位误差。传统的移相干涉技术通常采用计算机控制的压电陶瓷(PZ)驱动参考反射镜,或采用波片来实现分步移相。本文直接采用反射式纯相位 SLM 实现分步相移。在实验研究中,可将 SLM 作为一个实时可调的波片,它既是被检测和修正的目标,又是移相元件。在具体的操作中,对 SLM 加载适当的灰度图像,使得 SLM 分别产生 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 的相位延迟,并记录下四幅干涉图 $I_0, I_{\pi/2}, I_{\pi}, I_{3\pi/2}$,初始相位分布可由下式求出:

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{I_{3\pi/2} - I_{\pi/2}}{I_0 - I_{\pi}}, \quad (1)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为 SLM 引起的相位误差。用(1)式可求得每一个像素点的相位修正值。通过多次重复测量,可求得精确结果。

2.2 SLM 多波长响应的修正

由于 SLM 相位调制对不同波长的响应可以近似看做是线性的,SLM 对设定波长有 2π 相位调制,对相对于设定波长长的光波相位调制小于 2π ,而对相对于设定波长短的光波相位调制大于 2π 。

应用图 1 所示光路,当 SLM 上加载的图像为 $0 \sim N (N=255)$ 渐变灰度的时候,设定波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,相位调制为 2π ,即比加载同一灰度的图像恰好多出一条干涉条纹;对于比设定波长长的光波,多出的干涉条纹小于一条;对于比设定波长短的光波,多出的干涉条纹多于一条。实验测量其他非设定波长 λ_2 的修正系数,改变输入图像的灰度级范围,使干涉条纹恰好多出一条,此时的灰度范围为 $0 \sim M$,就可得到修正系数

$$\gamma = \frac{N}{M}. \quad (2)$$

SLM 的标准使用波长为 λ_1 ,对于波长 λ_2 ,只要在需载入的相位灰度图前乘以修正系数 γ ,即可获得该波长的准确相位调制。

3 实验结果

3.1 SLM 初始空间相位的校准

本文所用纯相位液晶 SLM 为美国 BNS 公司生产,其像素数为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,总大小为 $7.68 \text{ mm} \times$

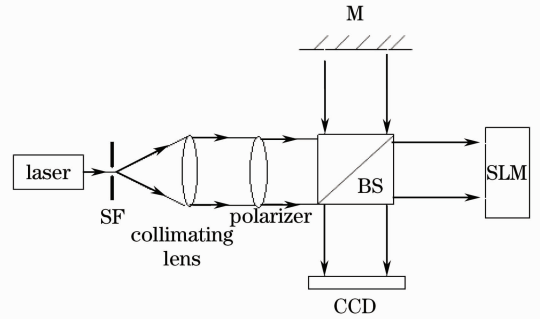


图 1 实验光学系统

Fig. 1 Experimental optical system

7.68 mm, 每个像素长度为 $15 \mu\text{m}$, 标定波长为 632.8 nm, 实验所用激光器为波长 632.8 nm 的氦氖激光器。

图 2 是采用四步移相干涉测量法得到的四幅干涉图像。通过(1)式可得到补偿相位, 如图 3 所示, 其中图 3(a)是直接由(1)式计算得到的补偿相位, 图 3(b)为解包裹之后并将相位等价变换到 $0 \sim 2\pi$ 范围的最终补偿相位。

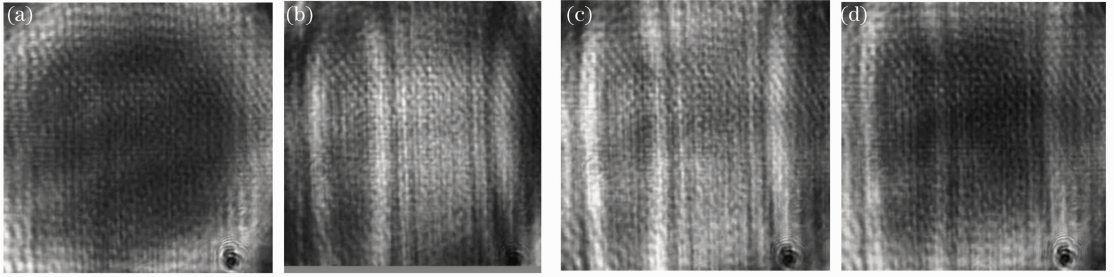


图 2 (a) 0; (b) $\pi/2$; (c) π ; (d) $3\pi/2$ 相位延迟产生的干涉条纹

Fig. 2 Interference fringes for phase delays of (a) 0; (b) $\pi/2$; (c) π ; (d) $3\pi/2$

将图 3(b)加载到 SLM 上, 得到补偿前后的对比干涉条纹, 如图 4 所示。由图 4 可看出, 载入补偿相位之后, 干涉条纹质量有明显的改善。但是也可以看到干涉条纹在一些范围内仍然存在偏差, 分析原因有以下几点: 1) 由于使用四幅不同的干涉图来计算相位分布, 实验时不能保证采集图像所用光源的光强一致。因为四幅图不可能是同时采集的, 在此期间, 不能保证激光器的输出光强不变, 会有一些浮动, 使得采集到的四幅图像的对比性受到一定影响。2) 由于是用 CCD 采集的图像, CCD 像素和 SLM 的像素的配准问题也需要考虑。而且, CCD 像素间的响应不可避免地会存在一定的误差, 这都会对实验结果造成影响。3) 由于要采集的干涉图像灰阶范围很广, 要求 CCD 的响应范围要足够, 不然会出现溢出状况影响实验结果。因此, 使用移相方法进行相位校准, 对实验条件要求较高。

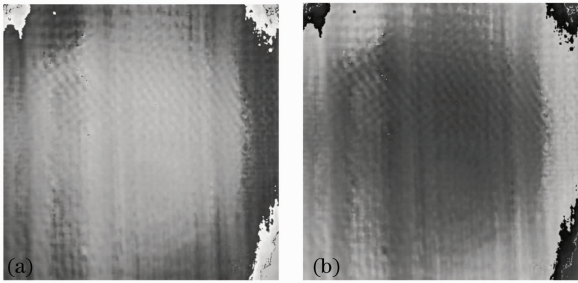


图 3 (a) 由(1)式计算得到的补偿相位;

(b) 解包裹之后的最终补偿相位

Fig. 3 (a) Phase compensation result got from Eq. (1); (b) final phase compensation result after unwrapping

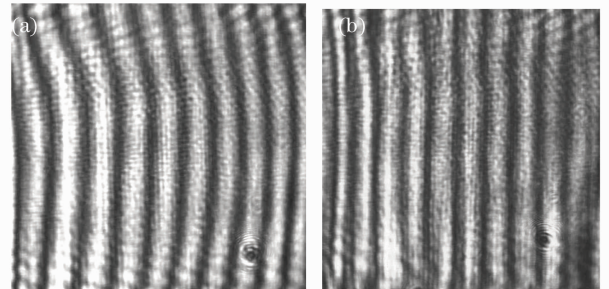


图 4 (a) 未进行修正之前的干涉图像;

(b) 载入最终补偿相位之后的干涉图像

Fig. 4 (a) Interference pattern before correction; (b) interference pattern after loading the corrected phase

3.2 SLM 多波长响应的修正

为了便于观察条纹改变情况, 采用如图 5(a)所示的上下对比的相位调整灰度图。根据实验光路, 当使用 SLM 标准光波波长 632.8 nm 时, SLM 上载入图 5(a)所示相位分布, 得到的干涉条纹如图 5(b)所示。

由图 5(b)可以看出, 当载入图像的灰阶范围为 $0 \sim 255$ 时, SLM 对于设定波长 632.8 nm 的入射光有 2π 的相位调制。

以 532 nm 绿光为例, 完成了 $0 \sim 200$ 到 $0 \sim 255$ 的 55 个灰阶范围的调试, 并确定当灰阶为 $0 \sim 230$ 时, 正好发生了 2π 的相位调制(此时下半部分的干涉条纹正好比上半部分多 1 条)。图 6 为对比干涉条纹。

由图 6(a)可以看到, 当加载的灰阶范围为 $0 \sim 255$ 时, 下半部分的干涉条纹半部分多出 1 条多一点。调节灰度范围, 使下半部分的条纹间距加大, 当下半部分的干涉条纹正好比上半部分条纹多出一条[图 6(b)], 此时灰阶范围为 $0 \sim 230$, 则由(2)式可知绿光(532 nm)对设定波长红光(632.8 nm)的修正系数为 $\gamma = 1.109$ 。

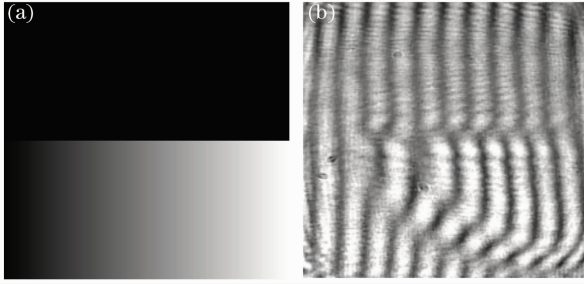


图 5 (a)上半部分灰阶为 0,下半部分为渐变灰阶 $0 \sim N$ ($N=255$)的相位分布; (b) SLM 上载入(a)得到的干涉图像
Fig. 5 (a) Phase distribution for which the gray scale of the upper half is 0, and that of the lower half is $0 \sim N$ ($N=255$); (b) interference pattern obtained by loading (a) on SLM

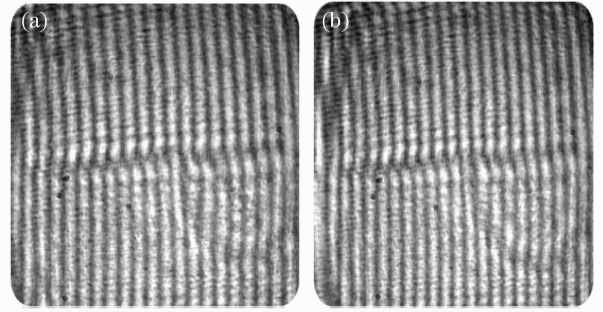


图 6 加载灰度图灰阶为(a) $0 \sim 255$ 和 (b) $0 \sim 230$ 得到的干涉图像
Fig. 6 Interference patterns obtained by loading gray scale of (a) $0 \sim 255$ and (b) $0 \sim 230$

实际使用绿光作光源时,在载入的灰度图中乘以绿光对设定波长红光的修正系数即可。对于其他波长可采取同样的方法实现修正。

4 结 论

解决了 SLM 使用过程中初始相位的变形及多波长响应的偏离问题。通过四步移相干涉测量法获得初始相位分布,进而对 SLM 的初始相位进行校准。通过反复的测量和校准,初始相位得到精确修正。实验研究了 SLM 对偏离波长的相位调制修正系数,获得了较理想的结果。

参 考 文 献

- 1 Xiaodong Xun, Robert W. Cohn. Phase calibration of spatially nonuniform spatial light modulators [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(35): 6400~6406
- 2 Pierre St. Hilaire, Stephen A. Benton, Mark Lucente. Synthetic aperture holography: a novel approach to three dimensional displays [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, **9**(11): 1969~1977
- 3 Sven Kruger, Jorn Kamps, Gunther Wernicke *et al.*. Spatial light modulator system for the application as dynamic diffractive element and in optical image processing [C]. *SPIE*, 2000, **3951**: 179~190
- 4 A. David, J. I. Thackara, W. D. Eades. Photo addressed liquid crystal spatial light modulators [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(22): 4763~4771
- 5 S. E. Broomfield, M. A. A. Neil, E. G. S. Paige. Four-level, phase-only, spatial light modulator [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(18): 1661~1663
- 6 I. Yamaguchi, T. Zhang. Phase-shifting digital holography [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16): 1268~1270
- 7 Torsten Baumbach, Wolfgang Osten, Christoph von Kopylow *et al.*. Application of comparative digital holography for distant shape control [C]. *SPIE*, 2004, **5457**: 598~609
- 8 Zhao Jie, Wang Dayong, Li Yan *et al.*. Experimental study on the quantitative phase contrast imaging of the biological samples by digital holographic microscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2906~2911
赵洁, 王大勇, 李艳等. 数字全息显微术应用于生物样品相衬成像的实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2906~2911
- 9 I. Yamaguchi, A. Yamamoto, S. Kuwamura. Shape measurement of diffuse surfaces by wavelength scanning[C]. in Proc. Fringe'97 Automatic Processing of Fringe Patterns, 1997, 190~197