

彩色全息显示中液晶空间光调制器 位相调制偏差的矫正方法^{*}

郑华东[†] 于瀛洁 代林茂 王 涛

(上海大学精密机械工程系, 上海 200072)

(2009 年 11 月 12 日收到; 2009 年 12 月 18 日收到修改稿)

采用三基色激光照明并结合时分复用或空间复用技术, 可实现基于液晶空间光调制器(LC-SLM)的彩色全息显示。但由于在不同激光波长入射条件下 LC-SLM 的位相调制特性曲线不同, 难以同时满足多波长入射条件下 2π 线性位相调制的要求, 致使彩色全息再现结果受到共轭像和零级斑的干扰。针对该问题, 本文通过实验测试获得 LC-SLM 在不同波长入射时的位相调制特性曲线, 并分析了 RGB 激光器各分量的位相调制特性曲线非线性偏差和调制幅度偏差对多阶位相型傅里叶变换相息图再现效果的影响。根据“查表法”建立了各波长入射条件下满足 2π 线性位相调制的灰度映射关系, 并对 RGB 分量相息图进行修正。通过对修正前后 RGB 分量相息图的数值模拟再现和光电再现实验与分析, 结果表明: 该方法有效地克服了 LC-SLM 位相调制特性曲线偏差的不利影响, 从而改善了彩色全息显示中各分量相息图的再现质量。

关键词: 彩色全息显示, 液晶空间光调制器, 位相调制, 偏差矫正

PACC: 4240J, 4225F, 4260F, 6130

1. 引 言

液晶分子具有电光效应, 其指向矢在外加电场作用下发生偏转而呈现有序的排列, 从而可以实现对入射光波复振幅的调制。近年来, 国内外学者对液晶空间光调制器(LC-SLM)的特性进行了深入的研究^[1-6]。LC-SLM 已在光束整形与偏转控制^[7-12]、波前相移控制^[13, 14]、干涉测量^[15, 16]、衍射成像^[17-25]等各个领域发挥重要作用。

LC-SLM 具有实时性的特点, 可以动态地承载全息图, 从而能够实现动态全息显示。采用多波长激光入射并结合时分复用技术或空间复用技术, 还可以实现基于 LC-SLM 的彩色全息显示^[22-25]。

LC-SLM 的调制特性偏差对于彩色全息显示有较大的影响, 主要表现为共轭像和零级斑的残存、再现像效率的降低、再现像灰度对比的失真以及三基色再现像合成时的颜色失真等问题。所以, 对 LC-SLM 调制特性偏差的矫正是彩色全息显示中的重

要问题。对于位相型 LC-SLM 而言, 其位相调制偏差主要来源于两个方面: 一是 LC-SLM 的面阵非均匀性位相调制偏差; 二是位相调制特性曲线的非线性度偏差和调制幅度偏差。LC-SLM 的面阵非均匀性位相调制的分布情况可通过激光干涉测量等方式获得, 并通过对输入的调制信号(灰度图样)进行矫正的方式进行补偿^[26]。而非线性度和调制幅度主要反应 LC-SLM 对输入信号的响应特性。对于位相型全息图而言, LC-SLM 位相调制曲线的非线性偏差和调制幅度偏差是影响位再现像质量的重要因素。矫正 LC-SLM 位相调制特性曲线偏差的方法主要有两种: 一种是通过改变 LC-SLM 的位相调制曲线以矫正位相调制偏差。例如, 调整 LC-SLM 的输入灰度值所对应的驱动电压^[17], 或对激光光源、起偏器和检偏器等组件进行参数优化配置^[27]。另一种方式是根据 LC-SLM 的实测“灰度-位相调制曲线”, 通过“查表法(LUT)”矫正输入信号的灰度值, 以实现精确的位相调制。

实际上, LC-SLM 的调制特性曲线与入射光的

* 国家自然科学基金(批准号: 60772124), 上海市科委国际合作项目(批准号: 09530708700) 和上海大学研究生创新基金(批准号: Shucx101060, Shucx102195)资助的课题。

† E-mail: zhenghuadong_08@163.com

波长、入射角度、偏振态等因素密切相关。即便保持其他参数设置不变,当入射光波长发生改变时,LC-SLM 的调制特性曲线往往也不同。而对基于位相型 LC-SLM 的彩色全息显示而言,不同波长入射时位相调制曲线的不同是导致各颜色分量再现像质量存在差异的重要影响因素。但是,通过修改位相调制特性曲线的方法难以同时满足多波长入射条件下 2π 线性位相调制的要求。因此,本文提出:在不改变 LC-SLM 的硬件参数设置的情况下,通过实验测试获得不同波长入射时 LC-SLM 的位相调制特性曲线,并通过“查表法”建立在各波长入射条件下满足 2π 线性位相调制的灰度映射关系。并根据映射关系对傅里叶变换相息图进行修正,以克服 LC-SLM 位相调制特性曲线的非线性偏差和调制幅度偏差的不利影响,从而改善相息图的光电再现效果。最后通过对多波长下修正前后相息图的数值模拟再现和光电

再现实验与分析,以验证该方法的有效性。

2. LC-SLM 的调制特性测试与分析

图 1(a) 所示为基于双缝干涉的 LC-SLM 的振幅和位相调制特性测试系统。其中,LC-SLM 为德国 HOLOEYE Photonics AG 公司的一款 LCoS-SLM(型号为 LC-R2500)。RGB 三基色半导体激光器的工作波长为 635 nm(R),532 nm(G) 和 473 nm(B)。测试实验中,激光经扩束准直后通过起偏器产生线偏振光,经过 LC-SLM 左右两个区域分别调制后的光束在会聚透镜焦距附近形成干涉条纹,经显微物镜放大后的干涉条纹由 CCD 进行记录。给 LC-SLM 加载如图 1(b) 所示的视频信号时,干涉条纹将发生有规律的移动。据此可测得相应状态下的振幅和位相调制特性曲线。

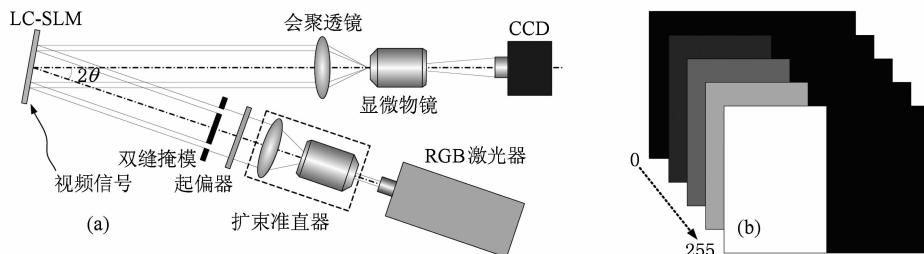


图 1 实验系统的调制特性测试方案 (a) 测试系统的光路示意图;(b) 输入 LC-SLM 的测试信号

在光束入射角 θ 为 10° 以及起偏器旋转角度为 80° 的情况下(该状态为本实验系统的最佳位相调制状态,详见文献[28]),测得空间光调制器在各个波长分别入射时的振幅和位相调制特性曲线如图 2 所示。其中,振幅调制幅度定义为相对振幅的最大值与最小值之差,其中相对振幅为各灰度级(输入信号)下的输出强度与所有灰度级下的平均输出强

度之比。由图 2(b) 可知,在各波长激光束分别入射时,系统的振幅调制幅度均小于 5% ,接近纯位相调制。但 RGB 各分量对应的位相调制特性曲线仍然存在一定的非线性,而且调制幅度超过 2π ,如果将相息图以 256 级灰度线性编码方式输入 LC-R2500,则实际的位相调制结果并不能达到调制幅度恰好为 2π 的线性位相调制要求。

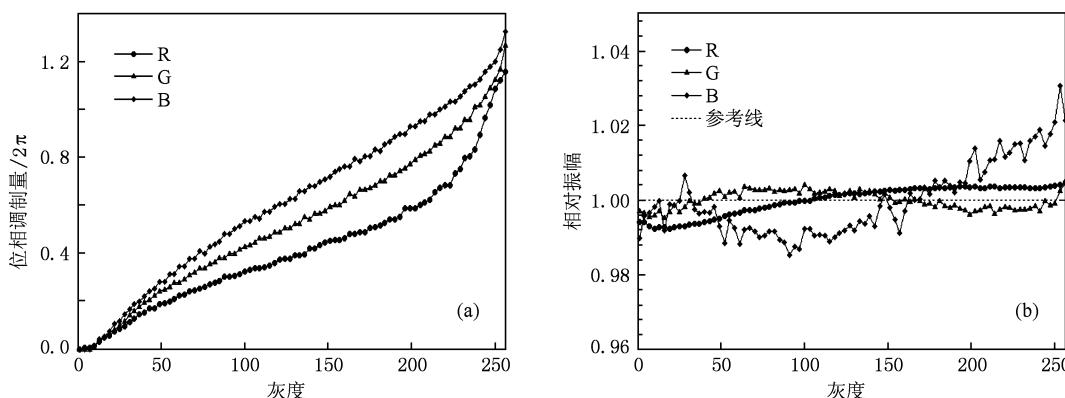


图 2 实测的位相和振幅调制特性曲线 (a) 位相调制特性曲线;(b) 振幅调制特性曲线

3. 多波长入射条件下灰度映射关系的建立

理想情况下,多阶位相型相息图再现时不存在零级斑和共轭像。例如,对图 3(a)所示的原图采用迭代傅里叶变换算法,获得 256 级灰度编码的多阶位相型相息图(以下简称“相息图”)如图 3(b)所

示,其右上角为局部放大视图。在满足 2π 线性位相调制时的数值再现效果如图 3(c)所示,其数值再现结果像的峰值信噪比(PSNR)^[29]为 8.46。图 3(c)中所示为数值再现结果的归一化振幅的算术平方根(以下各数值再现结果图像均做类似处理),以突出显示再现像的零级、共轭像以及其他噪声。当不满足 2π 线性位相调制时,相息图再现结果中将出现零级和共轭像,再现像的 PSNR 也将受到影响。

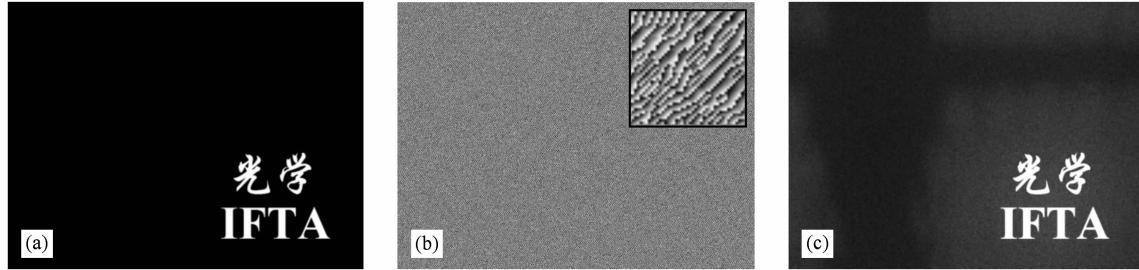


图 3 傅里叶变换相息图及其理想的数值再现结果 (a) 原图;(b) 迭代傅里叶变换相息图;(c) 数值再现像($\text{PSNR} = 8.46$)

因此,本文提出,根据 RGB 各分量的实测调制特性曲线,采用灰度映射变换对相息图重新进行灰度编码,以改善再现效果。其方法是:首先,实测获得最佳位相调制状态下 RGB 各分量的振幅和位相调制特性曲线;再根据位相调制特性曲线,反求 $0-2\pi$ 之间 256 级相移量所对应的输入灰度值(取值范围为 0—255),获得“输入灰度(相移量) - 输出灰度(修正后的灰度)”映射表;再根据灰度映射表,对 RGB 各分量相息图的像素灰度值进行修正,获得适合实测状态下 RGB 调制特性曲线的新相息图;最后将修正后的相息图输入 LC-SLM,并进行光电再现。

当一幅像素总量为 $M \times N$ 的傅里叶变换相息图 $H(k, l)$ ($1 \leq k \leq M, 1 \leq l \leq N$) 输入 LC-SLM,并以波长为 λ 的激光照明时,由于入射光波受到振幅和位相的耦合调制,再现像面(夫琅和费衍射区)的强度分布 $I_\lambda(u, v)$ 可表示为

$$I_\lambda(u, v) = |\mathcal{F}\{A_\lambda(k, l)\exp[j\varphi_\lambda(k, l)]\}|^2, \quad (1)$$

式中, \mathcal{F} 为傅里叶变换符, $A_\lambda(k, l)$ 和 $\varphi_\lambda(k, l)$ 分别表示在入射光波长为 λ 时 $H(k, l)$ 所对应的振幅调制量和位相调制量。

特别地,当 $A_\lambda(k, l)$ 为常数时,为纯位相调制状态;当 $\varphi_\lambda(k, l)$ 为常量时,为纯振幅调制状态。

设修正后的新相息图为 $\hat{H}_\lambda(k, l)$, 根据灰度映射关系,则有

$$\hat{H}_\lambda(k, l) = f_\lambda[H(k, l)], \quad (2)$$

式中, “ $f_\lambda(\cdot)$ ” 表示波长为 λ 时的灰度映射函数。则新的再现像面强度分布 $\hat{I}_\lambda(u, v)$ 可表示为

$$\hat{I}_\lambda(u, v) = |\mathcal{F}\{\hat{A}_\lambda(k, l)\exp[j\hat{\varphi}_\lambda(k, l)]\}|^2, \quad (3)$$

式中, $\hat{A}_\lambda(k, l)$ 和 $\hat{\varphi}_\lambda(k, l)$ 分别表示在入射光波长为 λ 时 $\hat{H}_\lambda(k, l)$ 所对应的振幅调制量和位相调制量。

根据图 2(a)所示的位相调制特性曲线,求得修正 RGB 各分量相息图的映射关系如图 4 所示。再根据映射关系,由(2)式求得 RGB 各分量修正后的相息图(如图 5 所示),其中各相息图右上角所示为

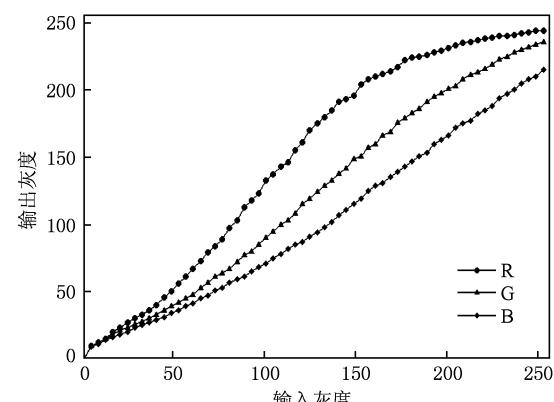


图 4 根据 RGB 各分量调制特性曲线对相息图进行修正的灰度映射关系

局部放大效果.

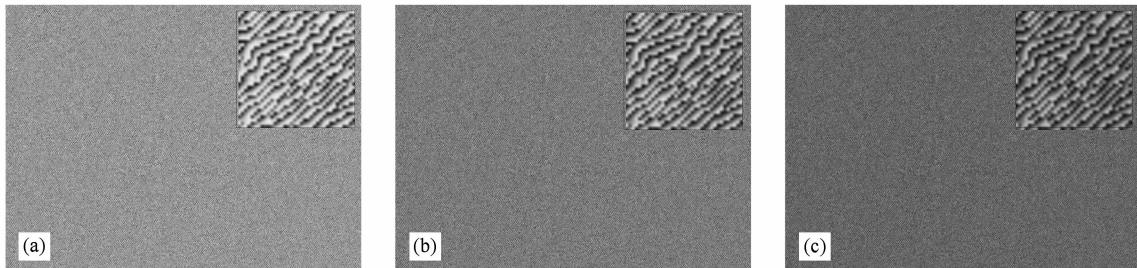


图 5 根据 RGB 各分量灰度映射关系对原相息图进行修正后的新相息图 (a) R 分量修正后的相息图;(b) G 分量修正后的相息图;(c) B 分量修正后的相息图

4. 数值再现与分析

为检验本文提出的位相矫正方法的有效性,本研究将修正前后相息图根据多波长入射条件下实测的调制曲线进行数值模拟再现,并与原图像进行对比分析.

图 6 所示为 256 级灰度编码相息图根据 RGB 各分量实测调制特性曲线进行数值再现的效果(图中所示仍为归一化振幅的平方根值). RGB 各分量对应相息图的再现结果中均存在零级斑和共轭像.

R 分量的位相调制特性曲线的非线性最严重,因此对再现结果的影响也最为严重. 再现像强度较弱,其 PSNR 仅为 0.16,零级和再现像的归一化强度之比为 1:0.02. G 分量和 B 分量的再现结果的 PSNR 分别为 0.67 和 0.73,比 R 分量再现结果稍好,但由于二者的调制幅度均超过 2π ,且仍存在非线性调制,使得再现像仍存在较强的零级斑和共轭像. 零级和再现像的归一化强度之比分别为 1:0.08 和 1:0.09. 可见,RGB 各分量实际调制曲线所对应的再现结果的衍射效率均较低.



图 6 实测调制特性曲线所对应的 256 级灰度编码相息图的数值再现结果 (a) R 分量相息图的再现结果($PSNR = 0.16$);(b) G 分量相息图的再现结果($PSNR = 0.67$);(c) B 分量相息图的再现结果($PSNR = 0.73$)

经过修正后的 RGB 各分量相息图的数值再现

结果如图 7 所示. RGB 各分量对应的新相息图的再



图 7 根据映射关系调制特性曲线进行修正灰度编码后相息图的数值再现结果 (a) R 分量相息图的再现结果($PSNR = 5.81$);(b) G 分量相息图的再现结果($PSNR = 8.46$);(c) B 分量相息图的再现结果($PSNR = 8.45$)

现效果较修正之前有明显的改善。再现像面的共轭像消失,且修正处理后的RGB各分量相息图再现像的PSNR分别达到5.81,8.46和8.45。但根据映射关系,使得修正后相息图的某些位相阶次缺失,这导致再现结果仍残留一定程度的零级斑和噪声,各分量零级斑和再现像的归一化强度之比分别为1:0.55,0.37:1,0.85:1。其中G分量零级斑残余量最少,而R分量和B分量则残余的零级相对强些,这是因为R分量的位相调制特性非线性较严重,而B分量的位相调制幅度远超过 2π (虽然其线性较好),而这两者均易导致映射过程中的位相阶次缺失较严重,以致修正后相息图的再现结果残余的零级较强。

因此,从理论上讲,如果振幅调制幅度很小,位相调制幅度能够达到或超过 2π ,则可根据位相调制曲线对位相全息图进行修正使其满足 $0-2\pi$ 线性位相调制的要求。但如果原位相调制特性曲线的非线性较严重,或调制范围远超过 2π ,其修正后相息图的再现效果也将存在较强的残余零级和背景噪声。

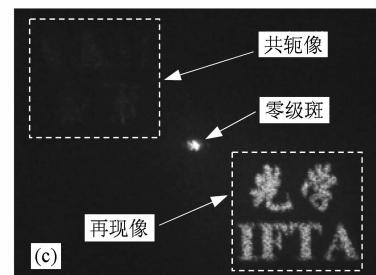


图9 RGB各分量原相息图的光电再现结果 (a) R分量相息图的再现结果($RCR = 13.36$);(b) G分量相息图的再现结果($RCR = 18.62$);(c) B分量相息图的再现结果($RCR = 11.83$)

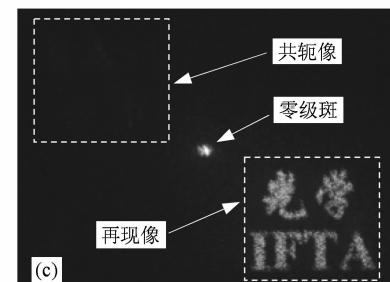


图10 RGB各分量修正后相息图的光电再现结果 (a) R分量相息图的再现结果($RCR = 20.26$);(b) G分量相息图的再现结果($RCR = 28.51$);(c) B分量相息图的再现结果($RCR = 21.94$)

本研究通过分析再现像和共轭像的强度之比(RCR)对修正前后光电再现像的质量进行评价。对

5. 光电再现实验与分析

本研究构建的光电再现实验系统如图8所示。其中,同步控制器用于控制RGB激光器三色激光输出的顺序,衰减片用于控制出射光的光强。在系统的最佳位相调制状态下,用彩色CCD记录RGB各分量激光入射时修正前后相息图的光电再现结果(记录过程保持CCD的曝光参数不变)。图9为图3(b)所示原相息图在RGB各分量激光入射时的光电再现结果,图10为图5所示修正后的RGB分量相息图的光电再现结果。

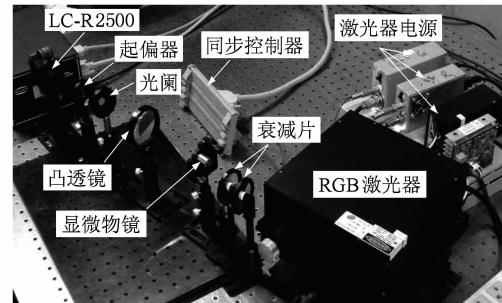


图8 光电再现实验系统

于修正前相息图的光电再现结果而言, RCR 的定义如下:

$$\text{RCR}(\lambda) = \sum_{u,v \in S} I_{\lambda}^{\text{opt}}(u,v) / \sum_{u,v \in S^*} I_{\lambda}^{\text{opt}}(u,v), \quad (4)$$

而对于修正后相息图的光电再现结果而言, RCR 的定义如下:

$$\text{RCR}(\lambda) = \sum_{u,v \in S} \hat{I}_{\lambda}^{\text{opt}}(u,v) / \sum_{u,v \in S^*} \hat{I}_{\lambda}^{\text{opt}}(u,v), \quad (5)$$

式中, $I_{\lambda}^{\text{opt}}(u,v)$ 和 $\hat{I}_{\lambda}^{\text{opt}}(u,v)$ 分别表示修正前后在入射波长为 λ 时的光电再现结果, S 和 S^* 分别表示再现像和共轭像所在区域(图 9 和图 10 中虚线框所示).

在图 9 和图 10 所示的光电再现结果中, R 分量相息图修正前的光电再现结果的 RCR 为 13.36, 修正后 RCR 提高到 20.26; G 分量相息图修正前的光电再现结果的 RCR 为 18.62, 修正后 RCR 提高到 28.51; B 分量相息图修正前的光电再现结果的 RCR 为 11.83, 修正后 RCR 提高到 21.94. 这表明, 本文所提方法对改善 RGB 各分量相息图的光电再现的质量是有效的.

然而, 在图 10 所示的 RGB 各分量相息图的光电再现结果中, 仍存在残余的零级斑和微弱共轭像. 其原因主要表现在: 一方面, LC-SLM 的栅格效应致使再现像存在直流分量(零级); 另一方面, 液晶像素并非孤立存在, 如果相邻像素间灰度值不同, 则相邻液晶像素将受彼此之间驱动电压(与输

入信号有关)的影响, 导致该像素对应的实际位相调制量容易偏离该灰度值所对应的位相调制量, 这也是影响再现效果的另一个因素. 为进一步改善再现效果, 液晶像素之间相互影响的机理、定量测试以及补偿方法还有待进一步深入研究.

6. 结 论

对于 LC-SLM 而言, 位相调制特性曲线的非线性偏差和调制幅度偏差是影响再现像质量的重要因素. 而且, 不同波长入射时位相调制曲线的不同是导致各颜色分量再现像质量存在差异的重要影响因素. 本文分析了 RGB 激光器各分量的调制特性曲线对多阶位相型傅里叶变换相息图再现效果的影响. 结果表明, 位相调制曲线的非线性和调制幅度超过(或不足) 2π 是导致相息图再现时出现共轭像和零级斑的主要因素. 本文根据各波长入射条件下的位相调制特性曲线, 建立了在各波长入射条件下满足 2π 线性位相调制的灰度映射关系, 并根据映射关系对相息图进行修正. 通过对多波长入射条件下修正前后相息图的数值模拟再现和光电再现实验的分析, 结果表明: 该方法对克服 LC-SLM 位相调制特性曲线的非线性偏差和调制幅度偏差的不利影响, 从而改善彩色全息光电再现效果具有指导意义.

- [1] Tochner J L B, Dupont L 1997 *Appl. Opt.* **36** 1730
- [2] Ge A M, S Zh, Xu K Sh 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2481 (in Chinese) [葛爱明、隋展、徐克瑞 2003 物理学报 **52** 2481]
- [3] Ren G J, Yao J Q, Wang P, Zhang Q, Zhang H Y, Zhang Y P, 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 994 (in Chinese) [任广军、姚建铨、王鹏、张强、张会云、张玉萍 2007 物理学报 **56** 994]
- [4] Ge Z B, Wu T X, Zhu X Y, Wu S T 2005 *J. Opt. Soc. Am. A* **22** 966
- [5] Cao Zh L, Hu L F, Liu Y G, Mu Q Q, Xuan L 2007 *Chin. Phys.* **16** 1665
- [6] Xing H Y, Yang G Ch, Ye W J, Yuan M Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 238
- [7] Love G D 1997 *Appl. Opt.* **36** 1517
- [8] Zheng J H, Zhong Y W, Wen K, Luo X S, Zhuang S L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1831 (in Chinese) [郑继红、钟阳万、温垦、骆鑫盛、庄松林 2010 物理学报 **59** 1831]
- [9] Cao Zh L, Hu L F, Jiang B G, Li Ch, Mu Q Q, Xuan L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4529
- [10] Cai D M, Lin N, Jiang W H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 897 (in Chinese) [蔡冬梅、凌宁、姜文汉 2008 物理学报 **57** 897]
- [11] Fernández E J, Prieto P M, Artal P 2009 *Opt. Express* **17** 11013
- [12] Liu B H, Zhang J 2006 *Chin. J. Lasers* **33** 899 (in Chinese) [刘伯晗、张健 2006 中国激光 **33** 899]
- [13] Guo C S, Zhen Y R, Wang H T, Wang Y R, Cai L Z 2003 *Appl. Opt.* **42** 6975
- [14] Bitou Y 2003 *Opt. Lett.* **28** 1576
- [15] Falldorf C, Osten S, Kopylow C, Jüptner W 2009 *Opt. Lett.* **34** 2727
- [16] Baker K L, Stappaerts E A 2006 *Opt. Lett.* **31** 733
- [17] Kohler C, Schwab X, Osten W 2006 *Appl. Opt.* **45** 960
- [18] Yu Y J, Wang T, Zheng H D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3154 (in Chinese) [于瀛洁、王涛、郑华东 2009 物理学报 **58** 3154]
- [19] Zhang X J, Liu X, Li H F 2007 *J. Zhejiang University (Engineering Science)* **41** 1519 (in Chinese) [张晓洁、刘旭、李海峰 2007 浙江大学学报(工学版) **41** 1519]

- [20] Huang S J, Wang Sh Zh, Yu Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 952 (in Chinese) [黄素娟、王溯中、于瀛洁 2009 物理学报 **58** 952]
- [21] Georgiou A, Christmas J, Moore J, Jeziorska-Chapman A, Davey A, Collings N, Crossland W A 2008 *Appl. Opt.* **47** 4793
- [22] Ito T, Okano K 2004 *Opt. Express* **12** 4320
- [23] Shimobaba T, Shiraki A, Masuda N, Ito T 2007 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **9** 757
- [24] Ren Ch Y, Sun X D, Pei Y B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 298 (in Chinese) [任常愚、孙秀冬、裴延波 2009 物理学报 **58** 298]
- [25] Martínez J L, Martínez-García A, Moreno I 2009 *Appl. Opt.* **48** 911
- [26] Hu L F, Xuan L, Liu Y J, Cao Zh L, Li D Y, Mu Q Q 2004 *Opt. Express* **12** 6403
- [27] Kohler C, Haist T, Schwab X, Osten W 2008 *Opt. Express* **16** 14861
- [28] Zheng H D 2009 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai University) (in Chinese) [郑华东 2009 博士学位论文 (上海: 上海大学)]
- [29] Zheng H D, Yu Y J, Qian H Y, Asundi A 2008 *Proc. SPIE* **7155** 71550C

Correction method for phase-modulation deviation of liquid crystal spatial light modulator in full-color holographic display^{*}

Zheng Hua-Dong[†] Yu Ying-Jie Dai Lin-Mao Wang Tao

(Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

(Received 12 November 2009; revised manuscript received 18 December 2009)

Abstract

It is feasible to realize full-color holographic display based on liquid crystal spatial light modulator by use of multi-wavelength illumination combined with time division multiplexing (TDM) or space division multiplexing (SDM). However, the modulation characteristics of liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM) vary with the wavelength of incident laser beam. Especially, the non-linearity and the modulation-depth mismatch of phase modulation curve are the important factors influencing the reconstruction quality of phase hologram in full-color holographic display. In order to solve this problem, a novel method is proposed to correct the gray-scale of phase holograms in the RGB channels with the established gray-mapping model according to the phase modulation curves measured under different wavelengths, and compensate the effects of non-linearity and the modulation-depth mismatch of phase modulation curves. Analysis of numerical and optical reconstruction results are carried out. It is verified that the method is effective to improve the qualities of reconstructed images in the RGB channels.

Keywords: full-color holographic display, liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM), phase modulation, deviation correction

PACC: 4240J, 4225F, 4260F, 6130

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60772124) and the International Cooperation Program of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (Grant No. 09530708700) and the Graduate Innovation Foundation of Shanghai University, China (Grant Nos. Shucx101060, Shucx102195).

† E-mail: zhenghuadong_08@163.com