

文章编号: 1001-3806(2009)06-0571-04

反射式空间光调制器的相位调制特性测试

徐桂权, 冯少彤, 聂守平*, 朱竹青

(南京师范大学 江苏省光电技术重点实验室, 南京 210097)

摘要: 为了测试德国 HOLOEYE 公司 LC-R2500 型 1024 像素 × 768 像素反射式空间光调制器的纯相位调制特性, 采用了基于双光束干涉原理的测量方法, 得到了输入图像灰度与相移量对应关系。将相位恢复算法编码后的纯相位图像作为空间光调制器的输入信息, 进行了理论分析和实验验证。结果表明, 光学再现像与数值模拟结果相吻合, 验证了纯相位调制特性测量的准确性。

关键词: 测量与计量; 相位调制; 双缝干涉; 数值再现; 光学再现

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.004

Measurement of phase modulation characteristics of reflective spatial light modulators

XU Gui-quan, FENG Shao-tong, NIE Shou-ping, ZHU Zhu-qing

(Jiangsu Province Key Laboratory for Opto-electronic Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract: In order to measure the phase modulation characteristics of type LC-R2500, made by Germany HOLOEY company, the relationship between image gray and phase shift was obtained based on double-slit interference. The image encoded by phase retrieval algorithm was input to spatial light modulator, theoretical analysis and experimental research were deployed. Experimental results show the optical reconstructed image is conformal to the numerical reconstructed image, which proves the veracity of measurement of phase modulation characteristics.

Key words: measurement and metrology; phase modulation; double-slit interference; numerical reconstruction; optical reconstruction

引言

液晶空间光调制器由于具有低功耗、高分辨率和可编程等优点, 越来越广泛地应用于光信息处理的各个领域^[1-5], 而这些应用多基于空间光调制器的相位或振幅调制功能。因此, 有效测试空间光调制器调制特性是发挥其巨大应用潜力的重要前提。基于液晶材料的特殊性质, 测量其调制特性的方法也有所不同, 但基本上是根据光的干涉原理进行的。目前, 对空间光调制器的调制特性的测量中主要有 Mach-Zehnder 干涉法^[6]、环路径向剪切干涉法^[7]、数字波面移相干涉仪测量法^[8]以及双缝干涉法。Mach-Zehnder 干涉法需要具有稳定性很好的实验装置; 环路径向剪切干涉法的后期处理需要进行大量的数学运算; 数字波面移相

干涉仪测量法测量结果精度高, 但是, 实验中所需的干涉仪费用昂贵。作者所采用的双缝干涉法, 参与干涉的两路光经过相近的物理路径, 从而减小了环境因素对实验的影响, 提高了实验精度, 实验方法简单易行。同时, 相位恢复算法具有能够将图像的灰度信息调制成相位信息, 并且可以准确再现原有灰度信息的优点, 因此, 利用相位恢复算法将灰度图像变换成纯相位信息, 实现信息加密处理, 再利用空间光调制器的纯相位调制特性可以对原灰度图像进行光学再现。实验结果表明, 光学再现像与数值模拟再现像相吻合, 作者所采样的纯相位调制特性测量方法是可行的。

1 空间光调制器调制原理

众所周知, 液晶的弹性常数值很小, 致使液晶分子排列稳定度也不很高。只要很小的外部电场、磁场、应力、热等外场的影响, 原有的基态的液晶排列状态就会发生畸变, 产生部分的折射梯度, 从而实现对光束的偏折角度、相位等参量的调整。图 1 所示为扭曲-向列液晶盒, 基片中间的液晶层被分成许多薄层, 每一层内分子的取向基本一致, 且平行于层面; 相邻薄层因受到

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2009400); 江苏省高校自然科学研究重大资助项目 (09KJA140002)

作者简介: 徐桂权 (1983-), 男, 硕士研究生, 现主要从事基于相位编码的图像信息隐藏技术研究。

* 通讯联系人。E-mail: nieshouping@ninu.edu.cn

收稿日期: 2008-08-18; 收到修改稿日期: 2008-09-26

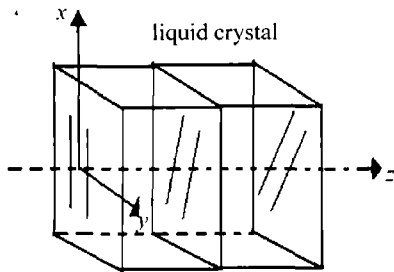


Fig. 1 Structure diagram of twisted-nematic liquid crystal display

分子相互作用力的影响,薄层中分子取向将逐渐从一个基片处的方向“均匀”地过渡到另一个基片处的方向,形成均匀的扭曲排列形式。如果把把这个液晶盒放在图2的光路中,当液晶基片两端没加电场时,液晶层

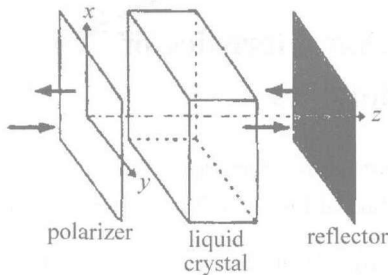


Fig. 2 Structure diagram of reflective liquid crystal spatial light modulator

可看作被分成许多与 z 轴正交垂直的薄片;当沿着 z 轴加上电场时,且调制电压超过门槛电压 V_c 时,液晶分子朝电场方向转过一个角度 θ (与面 $x-O-y$ 夹角), θ 是所加电压 V 的函数^[6]:

$$\theta = \begin{cases} 0, & (V \leq V_c) \\ \frac{\pi}{2} - 2\arctan\left[\exp\left(-\frac{V - V_c}{V_0}\right)\right], & (V > V_c) \end{cases} \quad (1)$$

式中, V_0 为调制电压的额定电压。随着分子取向的偏转,光沿着 z 轴的折射率 n_z 也发生变化,且有:

$$\frac{1}{n_z^2(\theta)} = \frac{\cos^2\theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_e^2} \quad (2)$$

空间光调制器正是通过改变驱动电压的大小,使各像元得到相应的 θ 值,使线偏振光发生双折射,通过检偏实现对空间光的振幅和相位调制。

通过选择入射线偏振光振动方向与定向矢 x 轴的夹角和驱动电压的大小,可实现近振幅调制或近相位调制^[6]。若入射光偏振方向与定向矢 x 轴平行时,液晶对光束为纯相位调制,且入射光的偏振态不变;当入射偏振方向与定向矢 x 轴垂直时,液晶对光束无相位调制。

2 相位调制特性测量

测量相位调制特性实验装置如图3所示。本实验的测量对象是 HOLOEYE 公司的 1024 像素 \times 768 像素的反射式空间光调制器 LC-R2500。半导体激光器发出的光波波长为 532nm,经显微物镜扩束后再经透镜

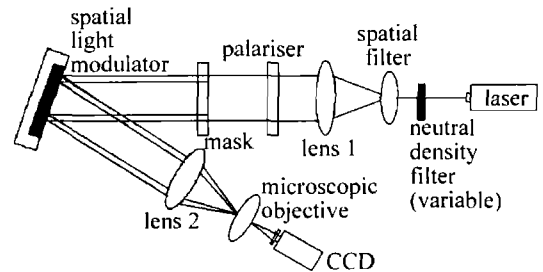


Fig. 3 Experimental setup of phase modulation measurement

1 变为平行光,用偏振片改变入射光的偏振状态,线偏振光经过双缝掩膜板后变成两束光照射到空间光调制器上,经空间光调制器反射,再经透镜 2 会聚于一点发生干涉,干涉条纹通过显微物镜的放大被 CCD 接收。

将 256 幅灰度图像依次输入到空间光调制器上,每幅图像由两个灰度等级组成,一半是灰度为 0 保持不变,另一半灰度由 0 依次变为 255,如图 4a 所示。由

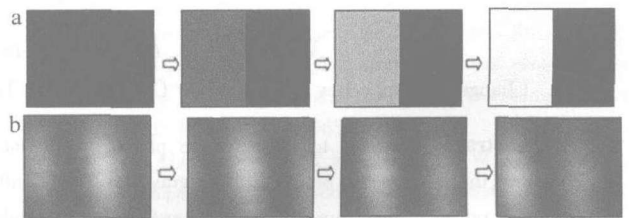


Fig. 4 Input image and interference fringe

a—gradual change process of input images b—corresponding interference fringe recorded by CCD

于不同的灰度值代表不同的调制相位,因此,每幅图像的两个灰度等级产生相应的相位差,该相位差可以通过干涉条纹的移动量得到,这就是利用双光束干涉测量空间光调制特性的原理。图 4b 为在 CCD 上接收到的与图 4a 对应的干涉条纹,可以直观看出干涉条纹的相对移动过程。

设 L 为干涉条纹宽度, Δs 为干涉条纹相对于初始位置时的移动量,则对应的相移量为:

$$\Delta\delta = 2\pi \frac{\Delta s}{L} \quad (3)$$

这样,只要检测出输入图像变化时干涉条纹中心位置的变化,就可以利用(3)式得到输入图像的灰度与相移量之间的对应关系,这个关系也就是空间光调制器的相位调制特性。图5所示为测得的输入图像灰度与相移量之间的关系曲线,可以看出,LC-R2500型空间光调制器的相位调制随着输入信号的灰度变化而改变,且当灰度值在 10~240 之间时具有较好的线性特性。在此基础上,撤掉图3装置中的双缝掩膜板和显微物镜,在空间光调制器上依次输入 256 幅单一灰度值的图像,图像灰度值由 0 渐变到 255,调整 CCD 位置以便接收到清晰的图像,输出图像的强度分布归一化结果如图6所示,不同的输入灰度对应的输出强度几乎完全相同,这也表明,此时空间光调制器工作在纯

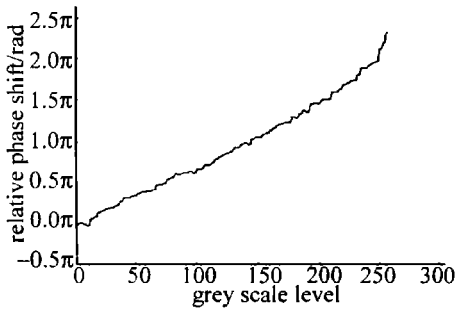


Fig. 5 Phase modulation curve

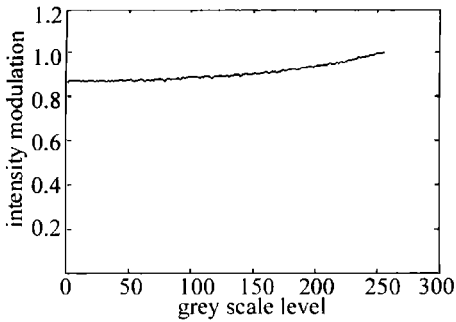


Fig. 6 Optical amplitude modulation curve

相位调制状态。

为了检验测量结果的准确性,下面利用相位恢复算法将灰度图像转换成纯相位信息,再利用测得的空间光调制器的相位特性将相位信息输入,从而通过比

$$R = \frac{\sum_{u=1}^M \sum_{v=1}^N \{A_k(u,v) - E[A_k(u,v)]\} \{h_1(u,v) - E[h_1]\}}{\langle \sum_{u=1}^M \sum_{v=1}^N [A_k(u,v) - E[A_k(u,v)]]^2 \rangle \langle \sum_{u=1}^M \sum_{v=1}^N [h_1(u,v) - E[h_1]]^2 \rangle}^{1/2} \quad (7)$$

R 的值随着迭代次数的增加而提高,图7为相关系数与迭代次数的对应曲线,由此可知,只要迭代5次以上的再现图与原图的相关系数就在0.95以上,收敛很快,设经过 k_1 次迭代满足收敛条件,则此时输入面上为纯相位分布函数 $\exp[i\varphi_{k_1}(x,y)]$ 。

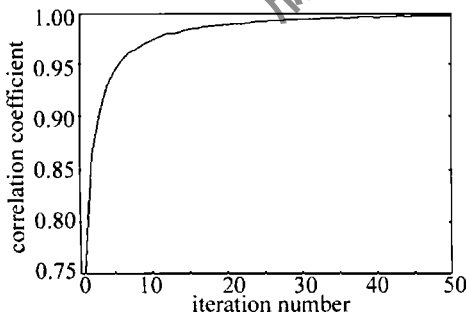


Fig. 7 Relationship between correlation coefficient and iteration number

采用相位恢复算法可实现图像加密,从算法的流程来看,该算法是将图像的灰度信息调制成了相位信息,起到对图像进行隐藏的作用。

4 相位编码后数值再现及光学再现

图8为经相位恢复算法编码后的图像再现装置

较光学再现像与数值再现像的相关性验证测量结果。

3 相位恢复算法

相位恢复算法是衍射光学元件设计中的常用算法之一^[9-10],设迭代开始时输入面上的输入为:

$$f_1(x,y) = a_1(x,y) \exp[i\varphi_1(x,y)] \quad (4)$$

式中, (x,y) 为空间位置坐标, $a_1(x,y)$ 为振幅分布(一般取常数1), $\varphi_1(x,y)$ 为相位函数。经夫琅禾费衍射在输出面上的输出为:

$$F_1(u,v) = A_1(u,v) \exp[i\Phi_1(u,v)] \quad (5)$$

在这时实施第1个约束条件,用所期望得到的振幅分布 $h_1(u,v)$ 替代(5)式中的振幅分布 $A_1(u,v)$,保留其相位分布 $\Phi_1(u,v)$,从而得到一个新的复振幅分布 $F_1'(u,v) = h_1(u,v) \exp[i\Phi_1(u,v)]$,再进行傅里叶逆变换回到输入面,在输入面上得到:

$$f_2(x,y) = a_2(x,y) \exp[i\varphi_2(x,y)] \quad (6)$$

在这时实施第2个约束条件,保留(6)式的相位分布,取其振幅取为常数1,从而得到一个新的复振幅分布,将之作为下一次迭代的输入。经多次迭代,直到输出面上得到的振幅分布 $A_k(u,v)$ 与所期望得到的振幅分布 $h_1(u,v)$ 达到收敛条件为止。用相关系数 R 来描述 $A_k(u,v)$ 与 $h_1(u,v)$ 的相似程度:

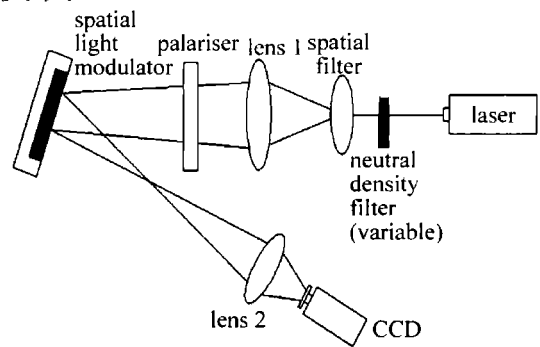


Fig. 8 Experimental setup of optical reconstruction

图。选取二值图像和灰度图像(如图9a所示)依次作为实验图像。

经25次迭代的相位恢复算法编码后的纯相位信息分别见图9b,数值再现图分别见图9c,此时它们与原图像的相关系数分别为0.9807和0.9902。编码后的纯相位图以灰度图形式显示在空间光调制器上,经空间光调制器的纯相位调制,作为相位信息输入。在CCD上接收到的再现像分别见图9d,由于0级衍射的存在图像中心有亮点,但是图像轮廓清晰可辨。图9c与图9d中的相关峰值^[11]见图10,相关系数为0.7752。

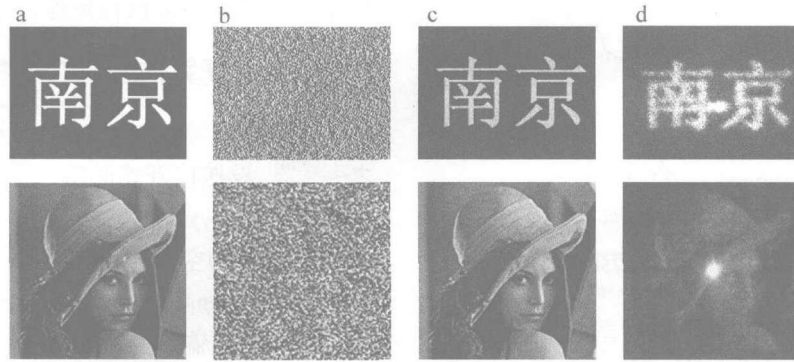


Fig. 9 Numerical and optical reconstructed images of the encoded images

a—original images b—encoded phase c—numerical reconstructed images d—optical reconstructed images

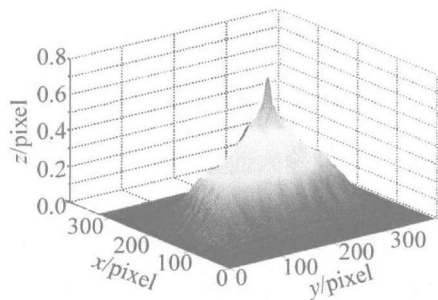


Fig. 10 Correlation peak

5 结论

利用双缝干涉法原理,提出了一种测量空间光调制器纯相位调制特性的方法,参与干涉的两路光经过相近的物理路径,从而减小了环境因素对实验的影响,提高了实验精度,实验方法简单易行。测试出了 HO-LOEYE 公司的 LC-R2500 型空间光调制器的纯相位调制特性,把经过相位恢复算法编码后纯相位图以灰度图形式显示在空间光调制器上,经空间光调制器的纯相位调制作为相位信息输入。由光学再现像与数值再现像比较可知,取得了很好的调制效果,由于实际测量条件与该器件的运用环境相一致,因此,测量结果能够满足实际应用的需要。

参考文献

[1] NAVEEN K N. Optical phase encryption by phase contrast using ele-

ctrically addressed spatial light modulator [J]. Opt Commun, 2003, 217(1/6):117-122.

[2] ROBERGE D, NETO L G, SHENG Y L. Full complex modulation spatial light modulator using two coupled-mode modulation liquid crystal televisions [J]. SPIE, 1995, 2490:407-415.

[3] MAREK S, MALCORZARA K. Application of liquid crystal devices for optoelectronic reconstruction of digitally stored holograms [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 33(3):191-201.

[4] CHOI H, SHESTAK S A, KIM S K, *et al.* Recent improvement of pulse laser electro-holographic system [J]. SPIE, 2002, 4659:76-82.

[5] WANG Ch, LIU J S. A novel differential optical modulator for the application of the spatial optic communication [J]. Laser Technology, 2008, 32(1):18-22 (in Chinese).

[6] LU K H, SALEH B E A. Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator [J]. Opt Engng, 1990, 29(3):240-242.

[7] LI D H, TAN Z F, CHEN H X, *et al.* Measuring LCTV's phase modulation characteristics based on cyclic radial shearing interferometer [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(8):970-974 (in Chinese).

[8] LIU Y J, XUAN L, HU L F, *et al.* Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure phase [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(12):1682-1686 (in Chinese).

[9] BRENNER K H. Method for designing arbitrary two-dimensional continuous phase elements [J]. Opt Lett, 2000, 25(1):31-33.

[10] DAVIS J A, VALADEZ K O, COTTRELL D M. Encoding amplitude and phase information onto a binary phase-only spatial light modulator [J]. Appl Opt, 2003, 42(11):2003-2008.

[11] ARSENAULT H H, GARCIA-MARTINEZ P. Intensity-invariant non-linear filtering for detection in camouflage [J]. Appl Opt, 2005, 44(26):5483-5490.

· 简 讯 ·

欢迎订阅 2010 年度《激光技术》

国内统一刊号:CN51-1125/TN