

文章编号 1004-924X(2006)02-0213-05

# 液晶空间光调制器的纯相位调制特性研究

刘伯晗,张健,吴丽莹

(哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**介绍了液晶空间光调制器的纯相位调制原理,采用泰曼-格林干涉系统对液晶纯相位特性进行测试。测量了BNS(Boulder Nonlinear Systems)公司的专利产品-256256像素纯相位空间光调制器的相位与电压(灰度)的响应曲线。给出了对任意图形进行相位恢复的优化算法流程,利用纯相位调制方法对光束进行方向和强度的快速程序控制。设计了实验装置,实际产生了二维任意衍射图形,图形产生时间小于200 ms。本研究对空间目标进行扫描跟踪,具有精确、响应快、无机械惰性等特点,在激光寻的、制导以及多目标威胁预警和反击中有着重要的研究价值。

**关键词:**空间光调制器;干涉术;优化算法;相位调制

**中图分类号:**TN761.92 **文献标识码:**A

## Research of the phase-only modulation characterization of a liquid crystal spatial light modulator

LIU Bo-han, ZHANG Jian, WU Li-ying

(College of Fine Photoelectric Instrument and Engineering,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The principle of phase-only modulation of a liquid crystal spatial light modulator (SLM) was introduced, and its phase characteristics were measured by a Twyman-Green interferometer system. The response curves of phase and voltage of the SLM with 256256 pixels patented by Boulder Nonlinear Systems (BNS) were measured. The program to retrieve the phases of an arbitrary intensity pattern was developed with an optimal algorithm. With the phase-only modulation method, the directions and intensities of laser beams could be controlled by the program easily. An experimental set-up was constructed to generate arbitrary 2-D diffractive pattern with generating pattern time in less than 200 ms. This experimental study is of value in the fields of multi-object tracing, laser guiding and multi-object defense.

**Key words:** spatial light modulator; interferometry; optimal algorithm; phase modulation

### 1 引言

液晶空间光调制器是一种新型的衍射光学元

件,具有质量小、功耗低、无机械惰性等特点,逐渐成为代替传统机械转台的无机械扫描器件<sup>[1]</sup>。电寻址液晶空间光调制器,利用外电压改变液晶分子指向达到控制液晶的双折射,从而实

现对光波的调制作用。这使得液晶空间光调制器成为一种对光波进行可编程控制器件。纯相位电寻址空间光调制器可对光波相位面进行连续调制,特别适合连续光束偏转控制<sup>[2]</sup>。根据目前掌握的文献,国内对液晶空间光调制器的研究大部分集中在原理研究<sup>[3-5]</sup>及少数利用液晶电视改制的调制器特性研究上<sup>[6]</sup>,真正具有纯相位调制、可行的液晶调制器件还鲜有报道。本文采用的 256 × 256 像素纯相位液晶空间光调制器为 BNS (Boulder Nonlinear Systems) 公司的专利产品,据其产品说明书介绍可以实现 0-2π 范围内的纯相位调制。为了验证和进一步研究其特性,本文在应用该调制器之前对其相位特性进行了测试。此外,文中还给出了以该调制器作为可编程衍射光学元件进行任意衍射图形的发生试验。

## 2 相位调制及相位优化

### 2.1 液晶调制器的相位调制原理

设空间光调制器某一像素透射函数为  $h(\Delta\varphi)$ , 其复数表示形式为:

$$h(\Delta\varphi) = r \exp(j\Delta\varphi), \quad (1)$$

式中  $|r| \leq 1$ ,  $\Delta\varphi$  为经过调制器的相位变化。值得注意的是,当  $|r| = 1$  时,调制器只对入射光波的相位进行调制,称为纯相位调制。这时,调制后光强度不变,有利于光束的光束能量集中及远距离传播。纯相位电寻址液晶空间光调制器,是利用驱动电压改变液晶分子指向来产生光程差,从而实现入射光的相位调制。其光程差可简单表示为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) d, \quad (2)$$

式中  $n_e$  为非寻常光等效折射率,  $n_o$  为寻常光折射率,  $d$  为液晶盒厚。可以将液晶空间光调制器看作一种可变相位光栅元件,通过对驱动电压控制,来实现对入射光波相位面的可编程控制。最典型应用是对光束进行偏转控制。一束单色平面波经过液晶空间光调制器后,偏转角度可由光栅公式确定

$$\sin \alpha_m = \frac{m\lambda}{\Lambda}, \quad (3)$$

其中  $\alpha_m$  是光束偏转角,  $m$  为衍射级次,  $\lambda$  是光波长,  $\Lambda$  是周期长度,对于液晶空间光调制器,以  $n$

个像素为一个周期,单个像素尺寸为  $p$ ,则  $\Lambda$  为  $np$ 。

### 2.2 相位优化设计方法

然而,当电压是非周期性的,甚至是“无规律”时,就要对调制器相位逐点进行分析。将液晶调制器整体看作一个相位掩模,当单位平面波经过该相位掩模,远场光振幅分布和出射光波(刚离开相位掩模后的光波)有简单的傅里叶变换对应关系:设任意一个 SLM 像素点  $(\xi, \eta)$  的相位为  $\varphi(\xi, \eta)$ , 由整数  $(m, n)$  表征的各衍射级的复振幅

$$A(m, n) = \iint \exp[j\varphi(\xi, \eta)] \exp[-j2\pi(m\xi + n\eta)] d\xi d\eta, \quad (4)$$

实际上,因为调制器都是一个像素用一个电压驱动,所以任何一个像素(比如第  $k$  行第  $l$  列)内相位为常数,从而有  $\varphi(\xi, \eta) = \varphi_{k,l}$ , 而不同的像素其相位值可以不相同,于是可以对相位进行离散化的优化设计。远场光强度  $I(I = |A|^2)$  取决于每一像素点的相位值,如何选取相位  $\varphi_{k,l}$  的值,使得用该相位值获得的远场衍射图更加逼近所预期的图形,是一个优化过程。即如何使得给定的正数  $\epsilon$  使式(5)达到全局最小,

$$||\bar{I} - I|| = \epsilon, \quad (5)$$

其中  $\bar{I}$  是  $I$  的估计值。

## 3 相位特性测试

由前面的分析,远场衍射图取决于液晶调制器像素上相位值的分布,因而,如果调制器的相位值有和所加的电压不对应的情况,就会产生不理想的衍射图,在应用之前应对调制器的相位特性

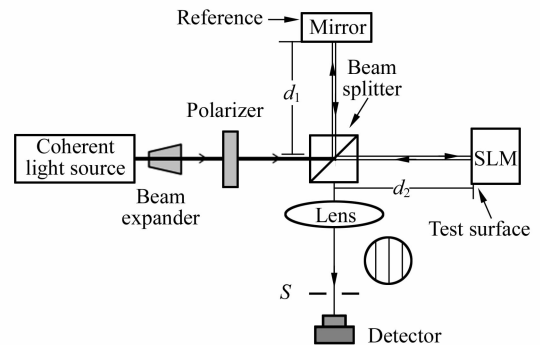


图 1 泰曼-格林干涉仪进行 SLM 相位特性测试

Fig. 1 Twyman-Green interferometer for testing the phase characterization of SLM

进行测试。这里采用泰曼-格林干涉(迈克尔逊干涉系统)系统<sup>[7]</sup>进行相位差测量,其原理图如图 1 所示。干涉图像的光强被光电二极管接收。

图 2 为测量结果对比图。(b)图是将图 1 中“Detector”改为 CCD 后接收的图像,左图为加入调制器的相位灰度,上半部为渐变灰度图,与其对应的干涉条纹数比零灰阶(下半部)产生的条纹(16 条)减少一条(15 条),产生了干涉条纹的位错。该图说明空间光调制器对入射光波可以完成  $0-2\pi$  的相位调制。

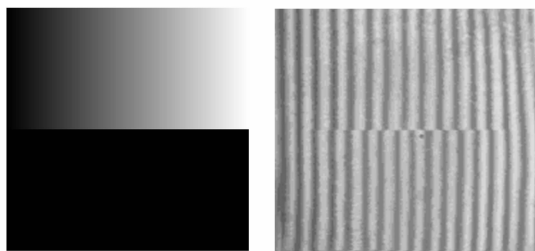


图 2 干涉图例。左图上部为 0~255 灰阶渐变图,下部为 0 灰阶的参考灰度图,右图为干涉条纹位错图。

Fig. 2 Interference results. left: 0~255 along the top of the SLM, and 0 along the bottom of the SLM; right: result

由干涉理论,易得出像平面上各点的光强分布为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta, \quad (6)$$

其中,  $I_1, I_2$  分别为参与干涉的两路光的强度,  $\delta = \delta_1 + \delta_2 = \delta_1 + \frac{2\pi}{\lambda} n' \cdot d$  为两路光的相位差,  $\delta_1$  由物理距离产生(当光路对称时该项为零),  $\delta_2$  由液晶层产生(当光路对称时该项为零),  $n'$  是液晶等效折射率,  $d$  为液晶层的厚度。测量过程中,固定二极管的位置不动,每次在

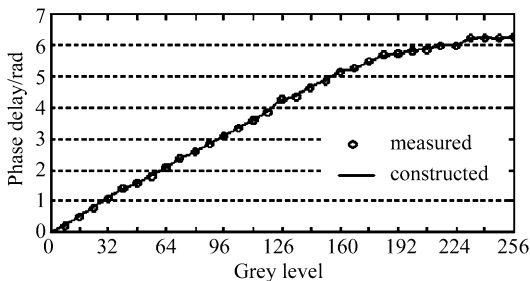


图 3 相位与灰度的特性曲线

Fig. 3 Relation curve between the phase delay and the voltage grey

SLM 所有像素上加递增电压灰度(单次测量时 SLM 所加像素灰度相同),通过光电二极管测出干涉图样的强度,然后求出该灰度所对应的相位差,多次测量可拟合出一条相位差和电压灰度关系响应曲线,如图 3。该曲线一经测准,就可建立一个相位和灰度图的映射关系 - 查找表,从而可以直接通过控制灰度变化来改变相位值。

### 4 任意远场衍射图产生

以下进一步对调制器纯相位调制器特性进行研究,利用 SLM 产生任意衍射图。流行的优化设计算法有很多,其中有模拟退火和遗传算法等,但是以上算法复杂费时,适于离线的精确设计相位。为了满足扫描的动态实时性要求,需要选择一种能够快速收敛的优化算法。

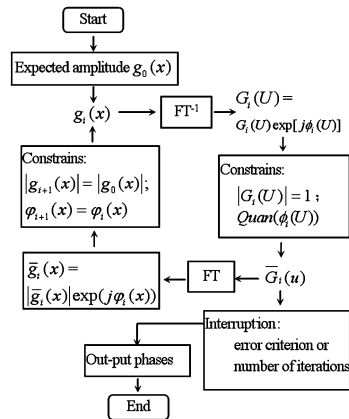


图 4 用于相位恢复的 G-S 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of G-S algorithm for phase retrieval

G-S 算法(Gerchberg-Saxton)<sup>[8]</sup>及其改进算法<sup>[9]</sup>已在诸多领域取得成功,该算法有较好的快速收敛性,具体算法流程<sup>[10]</sup>如图 4 所示。算法流程中  $Quan(\phi U)$  表示把相位值进行分级次量化,本算法是一个迭代逼近优化算法,程序最后输出期望强度函数  $g_0(x)$  的相位信息的优化值。

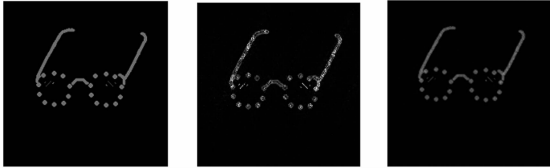
为了得到算法误差随迭代次数下降曲线,特定义强度平均误差百分数为

$$\bar{E}_{error} = \frac{\sum_{\Omega} (I_{ij} - \bar{I}_{ij})}{\sum_{\Omega} \bar{I}_{ij}} = \frac{\sum_{\Omega} (r_{ij}^2 - \bar{r}_{ij}^2)}{\sum_{\Omega} \bar{r}_{ij}^2} \times 100\%, \quad (7)$$

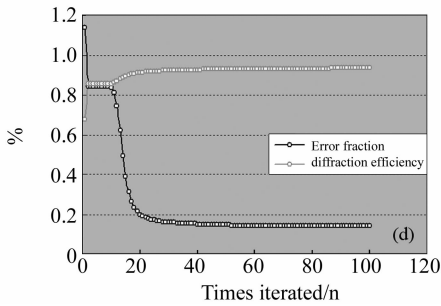
定义平均衍射效率为

$$\bar{E}_{\text{eff}} = \frac{\sum_{\Omega'} I_{pq}}{\sum_{\Omega} I_{ij}} = \frac{\sum_{\Omega'} r_{pq}^2}{\sum_{\Omega} r_{pq}^2} \times 100\%, \quad (8)$$

式中, 设整个 ( $256 \times 256$  像素) 像平面区域为  $\Omega$ , 点  $(i, j) \in \Omega$ ;  $I_{ij}$  为  $(i, j)$  点的优化设计强度,  $\bar{I}$  为所设计的期望强度;  $\Omega'$  为  $\Omega$  内感兴趣的研究区域, 其中点  $(p, q) \in \Omega'$ 。根据以上两式, 计算出误差和衍射效率, 可得出它们与迭代次数的特性曲线。



(a)源图 (b)迭代 2 次效果图 (c)迭代 20 次效果图  
(a)original image (b)result by GS (c)result by GS  
with iteration=2 with iteration=20



(d)算法特性曲线

(d)Curve of  $\bar{E}_{\text{error}}$  and  $\bar{E}_{\text{eff}}$  to times iterated

图 5 算法特性图例

Fig. 5 Algorithm characteristics

迭代效果如图 5 所示, 其中图(a)是一幅强度归一化后的  $256 \times 256$  像素源图(整幅强度总和为 65535)。有限次迭代后的效果图为图(b), 图(c); 图(d)为相应迭代特性曲线。由图可见, 该算法在开始迭代后, 用较少次迭代就可进入收敛的平滑区, 在迭代次数超过 20 次以后误差几乎没有太大变化, 衍射效率接近 95%。实际应用中, 在牺牲不太多的衍射效率情况下, 可以考虑采用较少的迭代次数(20 次)以节省运算时间。

衍射图产生的过程如图 6 所示, 当进行实际图形发生时, 先根据期望图形, 由算法计算出相位优化信息: 即相位灰度, 再将相位图输入到 SLM 的控制单元, 控制单元按查找表将相位灰度图转化为 SLM 的每一像素上相位值。这样, 光束经

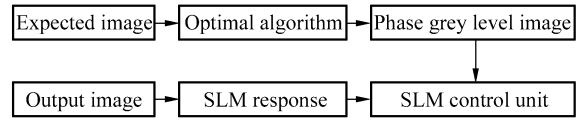


图 6 衍射图产生过程

Fig. 6 Experimental process of generating diffraction

过空间光调制器就会被相位调制, 在远场可接收到相应的夫朗和非衍射图。该衍射图应该与设计中的期望图相似, 否则, 调制器就没有完成纯相位调制功能。发生装置的原理如图 7 所示。

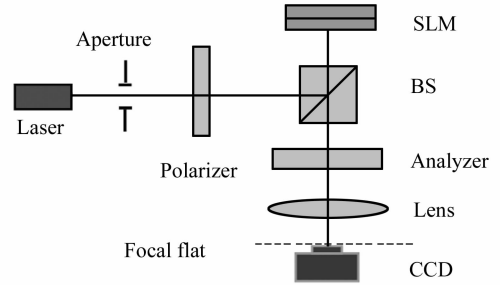


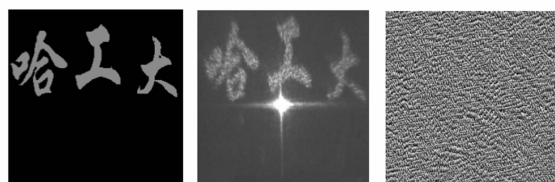
图 7 远场衍射图发生装置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of experimental setup

在图 7 中采用的 SLM 是反射式的, 激光光源是波长为 633 nm 的扩束准直激光, CCD 置于正透镜(焦距 70 mm)的焦平面上, 可接受到经 SLM 调制后投射出来的远场夫朗和非衍射图形。起偏器是为了使入射偏振光的偏振方向与调制器的液晶主轴方向一致, 使纯相位调制效果达到最好。检偏器可以调节进入 CCD 的光强。

图 8(a)是实际产生的远场衍射图, 图 8(b)是加在 SLM 上用以产生图 8(a)的相位图(黑色灰阶表示 0 相位)。该相位图通过优化算法计算得出, 算法程序运行在配置为 2.8 GHz Pentium IV 处理器、1 GB 内存的 Window 2000 操作系统下, 迭代次数固定为 20 次时, 耗时小于 150 ms, 空间光调制器的响应时间小于 50 ms, 整个远场衍射图形产生时间小于 200 ms, 可以满足动态要求不高情况下的连续光束偏转要求。

在图 8(a)中的中心十字亮斑是零级衍射亮点(因为空间光调制器的有效反光面为  $4.61 \text{ mm} \times 4.61 \text{ mm}$  的正方形)。该装置可以产生逼真的图像, 说明了该空间光调制器具有良好的纯相位调制特性。不足之处是图像的衍射效率不够高



(a)期望图 (b)CCD 远场接收结果 (c)a 图的相位图恢复图

(a)Expected image (b)Far field diffraction pattern received by CCD (c)Retrieval phases of a image

图 8 衍射图实验结果

Fig. 8 Experimental results of generating diffractive pattern

(以光功率计检测,中心亮斑能量占总能量百分比接近 70%),中心亮斑的能量过大。这是由于液晶空间光调制器,像素分辨率有限(目前为

256256 像素),且电极之间有间隔造成相邻电极之间存在一定电场干扰;另外液晶调制器加的驱动电压为阶梯电压,这引入了相位的阶梯量化误差。这些都影响了衍射效率的因素,今后需进一步的研究这些影响因素的定量影响,以及寻找收敛性特性更好的算法以提高衍射效率。

## 5 结 论

采用泰曼-格林干涉系统,对 BNS 公司的纯相位空间光调制器成功地进行了光学相位特性测试,得到了调制器相位与灰度之间的查找曲线。搭建了衍射图形发生试验装置,根据相位优化设计方法,成功复现了所期望的远场衍射图形。本研究对空间目标的无机械扫描以及相控阵激光雷达等领域都有重要的研究意义。

## 参考文献:

- [1] MCMANAMON P F, DORSCHNER T A, CORKUM D L, *et al.* *Optical phased array technology* [C]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84 (2): 268-298.
- [2] HALLSTIG E, SJOQVIST L, LINDGREN M. Characterization of a liquid crystal spatial light modulator for beam steering[J]. *SPIE*, 2002, 4632: 187-196.
- [3] 李育林,傅晓理. 空间光调制器及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1996.  
LI Y L, FU X L. *The spatial light modulator and its application* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996. (in Chinese)
- [4] 王玉荣,徐鹏,王青圃,等. 光电混合联合变换相关器中各元器件结构参数之间的关系[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(3): 376-384.  
WAN G Y, XU P, WANG Q P, *et al.* Relationship between parameters in hybrid optical/ electronic joint transform correlator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(3): 376-384. (in Chinese)
- [5] 胡晓改. LCD 光学纯位相效应的研究 [D]. 北京理工大学,2003.  
HU X G. *The research of optical phase-only effects of LCD* [D]. Beijing Institute of Technology: Beijing Institute of Technology, 2003. (in Chinese)
- [6] 胡立发. 用平行向列液晶空间光调制器制作相息图的研究[J]. *液晶与显示*, 2005, 20(2): 93-98.  
HU L F. Kinoform using parallel-aligned nematic liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2005, 20(2): 93-98. (in Chinese)
- [7] BASS M. *Handbook of optics (2nd ed)* [M]. McGRAW-HILL, INC, 1995.
- [8] GERCHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, 35: 237-246.
- [9] FIENUP J R. Phase retrieval algorithms; a comparison [J]. *Appl. Opt.*, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [10] 杨国桢,顾本源. 衍射光学元件的设计方法 [J]. *物理*, 1994, 23(4): 200-205.  
YANG G ZH, GU B Y. An approach for the design of diffractive optical elements [C]. *Physics*, 1994, 23(4): 200-205. (in Chinese)

作者简介:刘伯哈(1972—),男,哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所博士研究生,主要研究方向为光电测试,空间光学信息处理,液晶显示与图像处理。