

## LC-SLM 调制传递函数的实验研究

陈海云<sup>1,2</sup>, 施雪辉<sup>2</sup>, 许富洋<sup>2</sup>, 钱惠国<sup>1,2</sup>

(1. 浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004; 2. 浙江师范大学数理与信息工程学院, 浙江 金华 321004)

**摘要:**根据液晶空间光调制器调制传递函数的定义和测量方法,建立了测量 LC-SLM 调制传递函数的实验系统,对 EPSON 0.9 in L3D09H-41C00 型液晶空间光调制器的调制传递函数进行了测量,得到了调制传递函数曲线,并对实验测量结果进行了分析和讨论。

**关键词:**信息光学;液晶空间光调制器(LC-SLM);调制传递函数(MTF);光栅;空间频率

**中图分类号:**0438 **文献标识码:**A

### Experimental study on the modulation transfer function of liquid crystal spatial light modulator

CHEN Hai-yun<sup>1,2</sup>, SHI Xue-hui<sup>2</sup>, XU Fu-yang<sup>2</sup>, QIAN Hui-guo<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;

2. College of Mathematics, Physics and Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

**Abstract:** According to the definition and measuring method for the modulation transfer function of the liquid crystal spatial light modulator, the experimental system was designed and set up to measure the MTF of LC-SLM. Furthermore, the MTF of the LC-SLM of EPSON L3D09H-41C00 with the size of 0.9 inch was measured. The curve of MTF was obtained and the experimental results were analyzed and discussed.

**Key words:** information optics; liquid crystal spatial light modulator(LC-SLM); modulation transfer function; grating; spatial frequency

#### 1 引言

空间光调制器指的是在信源信号的控制下能对光波的某个参量进行调制的器件,例如通过吸收调制振幅,通过折射率调制相位,通过偏振面的旋转调制偏振态等,从而将信源信号所荷载的信息写进光波之中<sup>[1]</sup>。空间光调制器在现代光学领域中具有越来越重要的地位和价值,它是光学、光电混合系统进行光互连、光学相关、光计算、模式识别、光学控制、光学检测、图像处理、显示技术等中的基本构件和关键器件<sup>[2-8]</sup>。目前使用的空间光调制器主要有液晶空间光调制器(LC-SLM)、数字微镜器件(DMD)、声光调制器(AOM)、磁光调制器等,而液晶空间光调制器在空间光调制器的应用中已经占有主导地位,它可对光束的相位、偏正态、振幅或强度进行一维或二维分布的实时调制。随着对液晶空间

光调制器的深入研究,它以其成本低、驱动电压低、调制幅度大等诸多优点而得到了广泛应用<sup>[9]</sup>。

对光学信息处理系统来讲,其中空间光调制器的调制特性起着重要的作用,调制传递函数(MTF)可以用于有效地表征空间光调制器的调制能力,本文根据液晶空间光调制器调制传递函数的定义和测量方法,建立了测量 LC-SLM 调制传递函数的实验系统,对 EPSON 0.9 in L3D09H-41C00 型液晶空间光调制器的调制传递函数进行了测量,得到了调制传递函数曲线,并对实验测量结果进行了分析和

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 60877002);浙江省教育厅科研计划(No. Y200805422)资助。

**作者简介:**陈海云(1977-),男,讲师,硕士,研究方向为光电技术与全息立体显示。E-mail:chy@zjnu.cn

**收稿日期:**2009-05-25

讨论。实验结果对于如何正确应用液晶空间光调制器和提高液晶空间光调制器的调制能力有一定的指导意义。

### 2 LC-SLM 的调制传递函数

系统的调制传递函数反映的是系统对从输入信号到输出信号的调制深度的传递能力。实验上我们可以输入一个简单光栅,通过测量输出信号的调制深度来表征一个系统的调制传递函数。对于液晶空间光调制器,它的调制传递函数可以被定义为显示在上面的光栅图样的衍射效率<sup>[10]</sup>,即在空间光调制器的傅里叶谱面上测量一级衍射光强和零级衍射光强,两者的比值即 MTF 值,由此可知,调制传递函数实际上反映了空间光调制器对不同空间频率信号的显示能力。

理论上,液晶空间光调制器的调制传递函数可以通过傅里叶级数展开方法计算得到。如图 1 所示是显示在液晶空间光调制器上的垂直光栅条纹,每条垂直线是通过液晶像素产生的,开口率为  $r$ ,像素大小归一化为 1。亮像素表示对应的液晶像素处于“开”态,暗的像素表示液晶像素处于“关”态,阻挡了光线的通过。

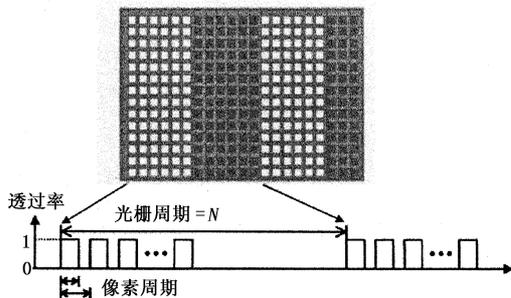


图 1 LC-SLM 上的垂直光栅<sup>[10]</sup>

Fig. 1 vertical grating on the LC-SLM

像素结构光栅的调制传递函数通过傅里叶级数展开得到如下<sup>[10]</sup>：

$$MTF = \frac{4(a^2 + b^2)}{\pi^2 r^2} \quad (1)$$

其中：

$$a = \sum_{n=0}^{N-1} \cos\left[\frac{2\pi}{N}\left(n + \frac{r}{2}\right)\right] \sin\left(\frac{\pi r}{N}\right) \quad (2)$$

$$b = \sum_{n=0}^{N-1} \sin\left[\frac{2\pi}{N}\left(n + \frac{r}{2}\right)\right] \sin\left(\frac{\pi r}{N}\right) \quad (3)$$

其中,  $N$  表示显示在 LC-SLM 上一个光栅周期的像素个数,最小值为 2,此时即“亮”和“暗”像素交替的情况。图 1 所示为  $N = 12$  的光栅。将不同的  $N$  值代入式(1)到式(3),可以计算出 LC-SLM 的 MTF 值, $N$  值可以为(2,4,6,8,⋯,24),空间频率为  $1/N$ ,图 2 所示为  $r = 0.63$  时计算得到的 MTF 曲线,由图

2 可知,开口率一定时 LC-SLM 的 MTF 与输入光栅的空间频率有关,高频时 MTF 高,低频时 MTF 的变化趋于直线,它的转折周期为  $N = 4$ 。

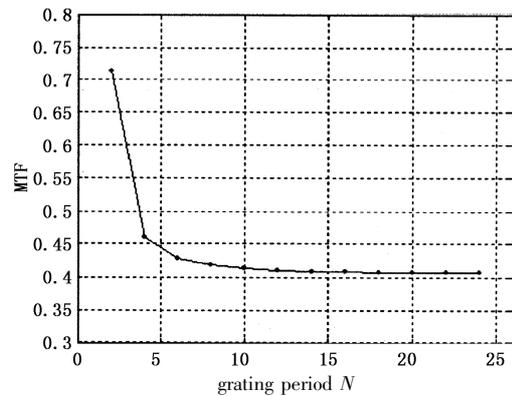


图 2  $r = 0.63$  时的 MTF 曲线

Fig. 2 MTF curve of LC-SLM when  $r = 0.63$

### 3 LC-SLM 调制传递函数的实验测量

#### 3.1 实验系统

图 3 是测量液晶空间光调制器传递函数测量的实验原理图,其中, A 是 He - Ne 激光器,  $L_1$  ( $f = 6.2$  mm) 是扩束透镜,  $L_2$  ( $f = 70$  mm) 是准直透镜,起偏器 S1 和检偏器 S2 的偏振方向相互垂直,使 SLM 工作在振幅调制模式,在 SLM 上通过计算机输入不同空间频率的水平光栅,经扩束和准直的平等光束照射到 SLM 上,经  $L_3$  ( $f = 300$  mm) 作傅里叶变换,在频谱面上用光强探测器接收光强,测量出 1 级衍射光强和 0 级衍射光强,两者的比值即为要测的 MTF 值。图 4 是实验系统图。

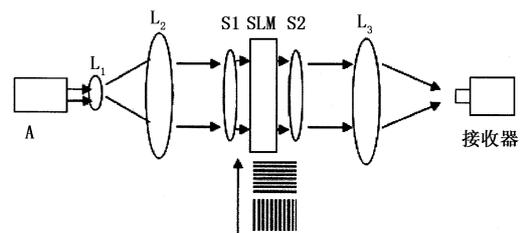


图 3 LC-SLM 的 MTF 测量原理图

Fig. 3 schematic diagram of the system for measuring MTF of LC-SLM



图 4 实验系统

Fig. 4 experimental system

测量系统所用的空间光调制器为 EPSON 0.9 in L3D09H-41C00 型高分辨率扭曲向列型液晶空间光调制器 (TN-LCSLM), 长 18.432 mm, 宽 13.824 mm, 分辨率为  $1024 \times 768$ , 像素尺寸为  $18 \mu\text{m}$ , 开口率为 63%。实验中所用的接收器是型号为 WJF- $\times 10^{-7}$  的数字式检流计, 如图 5 所示, 以电流的形式显示接收到的光强强度, 测量范围为  $1 \times 10^{-10} \text{ A} \sim 1.999 \times 10^{-4} \text{ A}$ 。它的探测器探头里面带有狭缝, 且狭缝的方向可以旋转, 以便于提取 1 级或 0 级光斑。



图 5 光强探测器  
Fig. 5 intensity detector

3.2 实验数据测量

水平方向和垂直方向不同周期  $N(N=2, 4, 6, \dots, 24)$  的光栅利用 MATLAB 软件生成, 并通过计算机输出到 LC-SLM 上, 在频谱面上用光强探测器接收 1 级和 0 级的光强, 读出对应的电流值。对水平方向和垂直方向不同  $N$  值的光栅测量 3 次, 对测量 3 次得到的 MTF 值取平均, 得到的结果如表 1 和表 2 所示, 图 6 和图 7 是相应的 MTF 曲线。

表 1 水平光栅的 MTF 平均值

N 值	MTF 平均值
2	0.6258
4	0.4229
6	0.3984
8	0.3915
10	0.3896
12	0.3889
14	0.3906
16	0.3907
18	0.3938
20	0.3910
22	0.3940
24	0.3942

表 2 垂直光栅的 MTF 平均值

N 值	MTF 平均值
2	0
4	0.2024
6	0.2972
8	0.3320
10	0.3528
12	0.3751
14	0.3687
16	0.3733
18	0.3688
20	0.3728
22	0.3716
24	0.3721

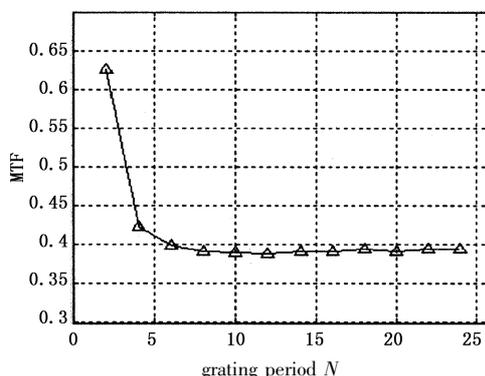


图 6 水平光栅的 MTF 曲线

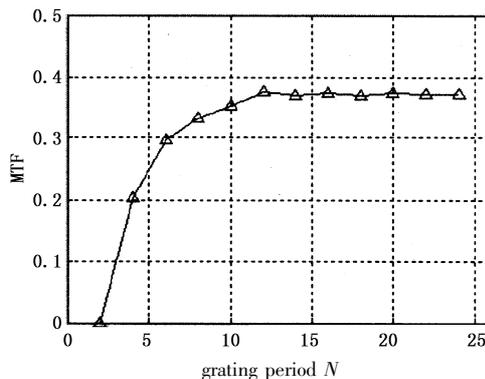


图 7 垂直光栅的 MTF 曲线

3.3 实验结果及分析

从实验角度分析, 实验中的误差可能有三方面的来源, 其一是 SLM 工作模式的偏差, 即起偏器与检偏器的偏振方向是否达到严格垂直, 这会影响到显示图像的对比度; 其二是探测器感光面与谱面位置的偏差, 这会影响到衍射光斑强度的测量精度; 其三是探测器探头内狭缝宽度相对较宽, 在提取低频光栅对应 0 级和 1 级衍射光斑时, 相互之间可能引入一定的串扰, 尤其是在输入垂直光栅时, 这种影响

会更大些,因为当输入相同周期的光栅,水平光栅的 0 级和 1 级衍射光斑分离得更开一些。

分析图 6 的 MTF 曲线可知,当输入水平光栅时的 MTF 曲线与图 2 所示由理论计算得到的 MTF 曲线相近,总体 MTF 值略低于理论值。而由图 7 可知,当输入高频垂直光栅时,LC-SLM 的 MTF 比较差,亦即高频的垂直光栅不能够被高保真的显示。其中原因我们可以通过 LC-SLM 的显示机制分析。LC-SLM 上图像信号的显示由两个同步信号的控制,一个用于垂直的扫描,另一个用于水平的扫描,图像以扫描方式从上到下一行一行地被载入到 LC-SLM。图 8 所示为 1024 × 768 分辨率 60 Hz 刷新频率 LC-SLM 的时序图,图像信号以每帧 1/60 s 的帧频显示,每帧信号分为 768 行,每行通过寻址脉冲和驱动脉冲以  $1/60 \times 1/768$  的速率显示,寻址脉冲用于寻址每行中的 1024 个像素,而相应的驱动脉冲用于对每个像素的 TFT 电容充电以决定相应像素的灰度值。当  $N = 2$  即垂直方向亮暗交替显示时,寻址脉冲与驱动脉冲没有完全一致对齐,因而相邻像素之间有串扰,导致垂直方向显示的光栅对比度下降,大大降低了 MTF 值,当  $N$  增大时,这种影响将降低,而当输入水平光栅时,就没有这种相邻像素之间的串扰,因而输入水平光栅时 MTF 相对较理想,输入高频垂直光栅时的 MTF 值很差,但当空间频率降低到一定值时,两个方向光栅对应的 MTF 值比较接近。

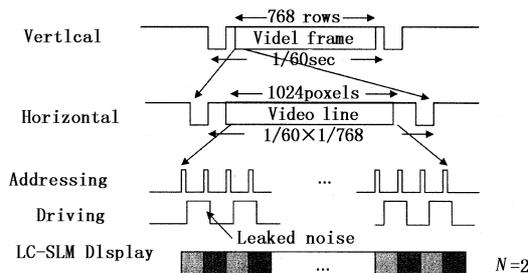


图 8 LC-SLM 的时序图

Fig. 8 timing clocks of LC-SLM

#### 4 结论

调制传递函数(MTF)是描述光学系统性能的重要指标,本文根据液晶空间光调制器调制传递函数的定义和测量方法,建立实验系统,测量了

EPSON 0.9 in L3D09H - 41C00 型液晶空间光调制器的调制传递函数,得到了调制传递函数曲线。分析实验结果可知,电寻址像素化液晶空间光调制器对水平方向高频光栅的调制能力比对垂直方向高频光栅的调制能力强,而对两个方向低频光栅的显示能力比较接近,这是由液晶空间光调制器对视频信号的显示机制决定的。实验结果对于如何正确应用液晶空间光调制器和提高液晶空间光调制器的调制能力有一定的指导意义。当然,要从根本上提高 LC-SLM 的调制传递函数,提高对视频信号的显示能力,有待于液晶空间光调制器制造工艺和驱动电路性能的提高。

#### 参考文献:

- [1] 宋菲君, S Jutamulia. 近代光学信息处理[M]. 北京: 北京大学出版社, 1998.
- [2] Lifa Hu, Li Xuan, Yongjun Liu, et al. Phase-only liquid-crystal spatial light modulator for wave-front correction with high precision[J]. Optics Express, 2004, 12(26): 6403 - 6409.
- [3] Charles W McLauchlin. Progress in projection and large-area displays[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(4): 521 - 532.
- [4] Y Sheng, G Paul-hus. Optical on-axis imperfect phase-only correlator using liquid-crystal television [J]. Appl. Opt., 1993, 32(29): 5782 - 5785.
- [5] Naveen, Kumar Nishchal, et al. Optical phase encryption by phase contrast using electrically addressed spatial light modulator[J]. Opt. Comm., 2003, 217(1-6): 117 - 122.
- [6] 陈怀新, 魏宏刚, 陈祯培, 等. 采用液晶空间光调制器的可控性阵列菲涅耳波带片[J]. 光子学报, 2001, 30(5): 562 - 566.
- [7] 荣振宇, 国承山, 张莉, 等. 液晶光调制计算全息相移器[J]. 中国激光, 2004, 31(6): 693 - 697.
- [8] 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): 94 - 98.
- [9] A Miniewicz, A Gniewek, J Parka. Liquid crystals for photonic applications [J]. Optic Materials, 2002, 21: 605 - 610.
- [10] Mei-Li Hsieh, Ken Y Hsu, Eung-Gi Paek, et al. Modulation transfer function of a liquid crystal spatial light [J]. Optics Communications, 1999, 170: 221 - 227.