

在光学相关器中测试滤波空间光调制器的相位调制特性

胡文刚, 王永仲, 华文深

(军械工程学院 光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

摘 要:研究了在范德卢格特型光电混合相关器中,利用朗奇光栅图像替代实物光栅测试滤波空间光调制器相位调制特性的原理和方法.对 XGA2L11 型空间光调制器的相位调制特性进行了现场测试,并对测试结果进行了误差分析和光学相关实验验证.结果表明,该方法不需要单独构建测量装置而是完全在相关器的工作状态下测试,保证了空间光调制器的特性测试结果和实际工作性能的一致性.

关键词:信息光学;空间光调制器;相位调制;范德卢格特相关器

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2007)09-1602-4

0 引言

空间光调制器(Spatial light modulator)是范德卢格特型光学相关器中场景和滤波器的输入载体.但是由于一般的商用空间光调制器主要是应用于投影显示系统^[1-2],其光学调制是一种振幅和相位的耦合调制,不能直接用于光学信息处理系统.对此许多学者进行了研究,采用不同方法来实际测试相应型号的空间光调制器的光学调制特性.目前,对空间光调制器相位调制特性的测量方法主要有双缝干涉法^[3-4]、马赫-泽德(Mach-Zehnder)干涉仪法^[5]、泰曼干涉仪法^[6]及环路径向剪切干涉法^[7].上述测量方法的最大缺点是测试时脱离了光学相关器的实际工作环境而单独搭建测试装置.由于空间光调制器的相位调制特性与其在相关器中的使用状态有关,特别是和相关器中激光器性能、起偏器和检偏器的角度、驱动电压、环境温度、光学成像系统和摄像机等组件的性能密切相关,因此测试结果很难和实际工作特性相一致,特别是空间光调制器被外力紧紧地固定在小型化相关器内部的时候.为此 Danny Roberge、Octavio Lopez Coronado 和 Richard D. Juday 分别在 1995 年、1998 年和 2002 年提出了在光学相关器中现场测试空间光调制器的调制特性的思想^[8-10].但是上述研究者提出的测试方法需要在相关器光路中增加反射镜、余弦光栅和复合分析信号,测试过程复杂并且较难操作.本文在范德卢格特型光电混合相关器中利用计算机产生朗奇光栅图像替代实物光栅,并采用光学双缝干涉原理对

XGA2L11 型空间光调制器的相位调制特性进行了测试.结果表明,该方法严格保证了测试环境和使用环境的一致性,具有很强的可操作性和实用性.

1 测试原理

Soutar 等人提出的空间光调制器相位调制特性的测试方法是利用放置在输入平面上的朗奇光栅(Ronchi grating)获得用于双缝干涉的两束相干光^[8].本文介绍的测试方法不需要朗奇光栅实物,而是利用计算机绘图程序产生朗奇光栅图像,将其输入到设置成高对比度状态的场景空间光调制器上产生两束干涉光.在图 1 的范德卢格特型光电混合

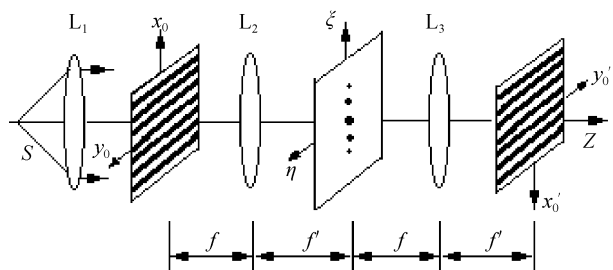


图 1 测试系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

相关器中,设物为计算机产生的一维栅状物图像-朗奇光栅图像,该光栅由无数个宽度为 a ,间距为 d 的狭缝组成,如输入平面所示.其透过率函数为一组矩形函数^[11]

$$t(x_0) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{rect} \left[\frac{(x_0 - md)}{a} \right] \quad (1)$$

它实际上是矩形函数 $\text{rect}(x_0/a)$ 和梳状函数 $\text{comb}(x_0/d)$ 的卷积

$$t(x_0) = \left(\frac{1}{d} \right) \text{rect} \left(\frac{x_0}{a} \right) * \text{comb} \left(\frac{x_0}{d} \right) \quad (2)$$

设栅状物总宽度为 B ,式(2)还应多乘一个因子

$$t(x_0) = \frac{1}{d} \left[\text{rect} \left(\frac{x_0}{a} \right) * \text{comb} \left(\frac{x_0}{d} \right) \right] \text{rect} \left(\frac{x_0}{B} \right) \quad (3)$$

把栅状物放置在系统输入面上,可在频谱面上得到它的傅里叶变换谱

$$T(\xi) = \mathfrak{F}\{t(x_0)\} = \left(\frac{aB}{d} \right) \left\{ \sin c(B\xi) + \sin c \left(\frac{a}{d} \right) \cdot \sin c \left[B \left(\xi - \frac{1}{d} \right) \right] + \sin c \left(\frac{a}{d} \right) \sin c \left[B \left(\xi + \frac{1}{d} \right) \right] + \dots \right\} \quad (4)$$

式中 $\xi = x/(\lambda f')$, x 是在频谱面上的位置坐标, ξ 是同一平面上用空间频率表示的坐标. 式(4)表示在频谱面上的振幅分布,其中第一项为零级谱,第二、三项分别为正、负一级谱,后面各项依次为高级谱. 这样在频谱面上出现一系列亮点,如图 1,它实际上是栅状物的夫琅和费衍射图样,每一个亮点是一个 $\sin c$ 函数,其中心分别位于 $\xi = m/d (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$.

在频谱面上放置一个双狭缝滤波器,该滤波器只允许正、负一级频谱通过,则通过狭缝的光场为

$$T(\xi)F(\xi) = \frac{aB}{d} \sin c \left(\frac{a}{d} \right) \left\{ \sin c \left[B \left(\xi - \frac{1}{d} \right) \right] + \sin c \left[B \left(\xi + \frac{1}{d} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

可见当只允许正、负一级频谱通过时,就构成了用于双缝干涉的两束相干光源,于是在像面上的光场分布为

$$t(x'_0) = \frac{2a}{d} \text{rect} \left(\frac{x'_0}{B} \right) \sin c \left(\frac{a}{d} \right) \cos \left(\frac{2\pi x'_0}{d} \right) \quad (6)$$

液晶空间光调制器的相位调制由输入图像信号的灰度值来实现. 首先将狭缝滤波器中的两条狭缝的灰度值都设置为 255,采集其干涉图样作为参考组;然后保持双狭缝滤波器中的一条狭缝的灰度值不变,逐渐减小另外一条狭缝的灰度值,再采集其干涉图样作为测试组,随着测试组相位相对于参考组相位的变化,两组干涉条纹之间产生相对移动,并且条纹移动与相对相位之间存在如下关系

$$\delta = 2\pi(\Delta/\Lambda) \quad (7)$$

式中 δ 是相对相位, Δ 和 Λ 分别为条纹的相对移动量和条纹周期宽度,两者都是利用 CCD 相机测量的.

2 测试装置及数据处理方法

采用图 2 的范德卢格特型光电混合相关器 (Vander Lugt Correlator) 作为空间光调制器相位调制特性的测试装置,光源为 HNK-250 型单模氦氖激光器,波长为 632.8 nm,功率为 2.5 mW;透镜 L_1 和 L_2 实现激光的扩束准直; L_3 和 L_4 为傅里叶透镜,焦距为 400 mm,口径为 100 mm;处在物平面

和频谱面上的 SLM_1 和 SLM_2 分别为场景和滤波空间光调制器,主要作用是将待识别图像及空间匹配滤波器输送到相干光路中进行光学信息处理. 本实验采用的电寻址液晶型空间光调制器是由英国 CRL 公司生产的 XGA2L11 型空间光调制器(该空间调制器需要附加起偏器和检偏器),两片均为 1024×768 像素,灰度等级为 256 级,像素间隔为 $36 \mu\text{m}$,刷新速率为每秒 60 帧. 干涉条纹图像的采集由 CCD 摄像机和 OKC21 图像采集卡完成. 测试过程为:①首先将场景空间光调制器调整为高对比度状态^[12],利用计算机向场景空间光调制器输入图 3(a)所示的朗奇光栅图像,该图像大小为 1024×768 像素,图案为 80 对黑白相间的直线条纹;②利用计算机向滤波空间光调制器输送图 3(b)的含有双缝的滤波图像,调整图 3(b)的位置,使图 3(a)在频谱面上的 ± 1 衍射亮斑分别从图 3(b)的两个狭缝中通过,然后利用开孔的黑色相纸挡住图 3(a)在频谱面上的除 ± 1 衍射亮斑以外的其它衍射级;③将图 3(b)中一条狭缝的灰度值设置为 255,并且在测试过程中保持该灰度值不变,另外一条狭缝的灰度值从 255 开始递减,间隔为 10,一直减到灰度值为 5. 通过双缝的两束相干光发生干涉,若以灰度值为 255 的两狭缝的干涉条纹图像为基准,则其它条纹图像会产生相对位移,在上述测试过程中利用 CCD 摄像机和 OKC21 图像采集卡在每种情况下采集五幅干涉条纹图像,如图 3(c). 为了从这些干涉条纹图像中获得高准确度的相对相位改变,必须对这些数据进行多组采样和平均,如图 4,然后根据找到的最大值点位置,利用式(7) 求出相对相位变化.

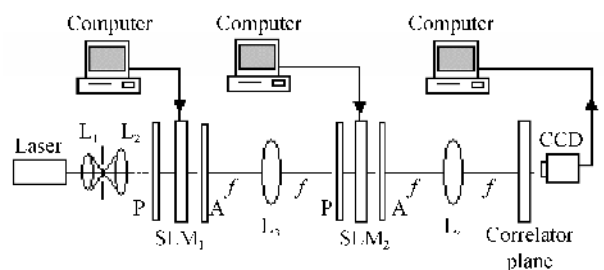


图 2 VLC 光电混合型相关识别系统原理图
Fig. 2 Schematic diagram of overall hybrid VLC system

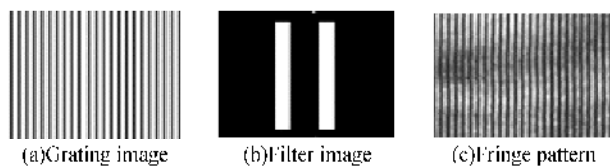


图 3 测试过程中采用的朗奇光栅图像、双缝滤波器图像及采集的干涉条纹图像

Fig. 3 Ronchi grating image, filter image of double slits and grabbed the fringe pattern

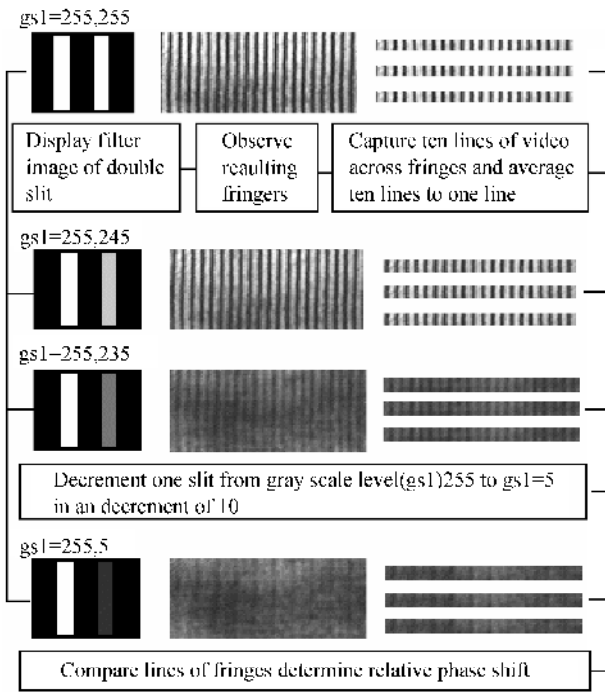


图 4 相位测量过程原理
Fig. 4 Diagram of phase measurement process

图 5 为实际测得的 XGA2L11 型空间光调制器的相位调制变化曲线,图中离散点为实验测得的数据值,曲线为根据数据拟合而得,从图中可以看出 XGA2L11 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.

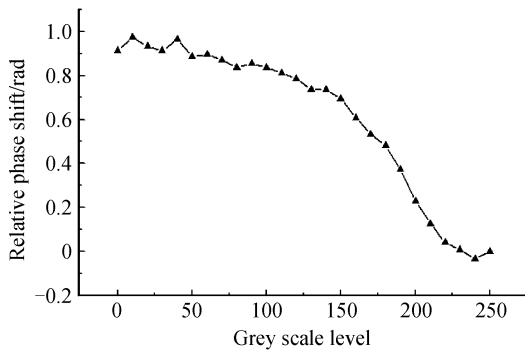


图 5 相位调制特性曲线 ($P=294, A=15$)
Fig. 5 Relative phase modulation characteristics ($P=294, A=15$)

为了评价测试数据的有效性进行误差分析,在滤波空间光调制器的同一位置,加上同一组灰度值 ($gs1=255, 150$)进行了上述 10 次测量,所得数据如表 1.

表 1 同一位置的 10 次测量值

测量次数	1	2	3	4	5
测量数值	0.692	0.685	0.678	0.683	0.701
平均值	6	7	8	9	10
	0.691	0.699	0.701	0.689	0.707

首先利用格拉布斯准则以 5% 的风险概率判断粗大误差,经过计算分析上述数据全部有效,然后按照测量次数为 10 次和置信概率为 0.95 两个条件,

通过计算可得其均方差值为 0.01,测量的不确定度为 0.007.

3 测试结果的实验验证

为了检验上述相位调制特性的测试结果是否满足光学相关器的使用要求,利用图 2 所示的范德卢格特型光电混合相关器进行光学相关识别实验,图 6(a)是待识别物体,大小为 256×256 像素;图 6(b)是图 6(a)的匹配空间滤波器,该滤波器是利用上述测得的滤波空间光调制器的相位调制特性,按照纯相位映射编码方法制作的^[13];图 6(c)是相关输出结果的三维分布图.从输出结果中的相关峰值和信噪比两个判断指标可以看出,测试结果能够满足相关识别系统的准确度要求.

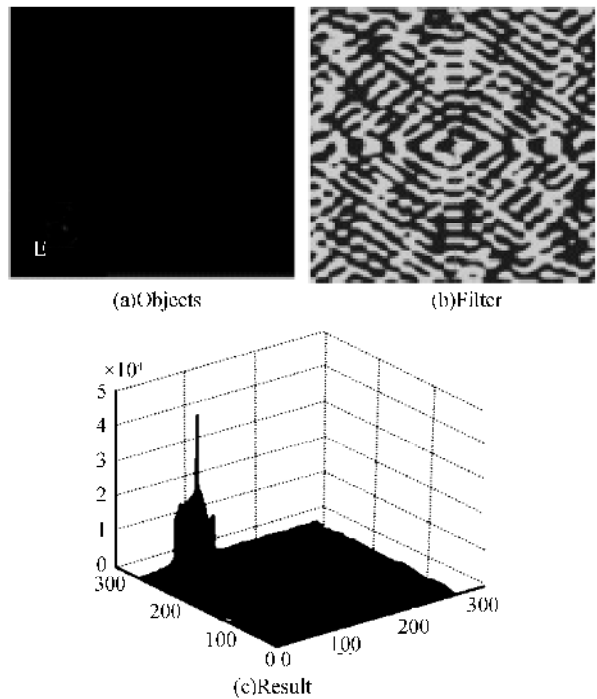


图 6 相关识别
Fig. 6 Correlation recognition

4 结论

本文介绍了利用朗奇光栅图像现场测量滤波空间光调制器相位调制特性的方法,该方法具有三个明显的优点:①测试过程不需要实际的朗奇光栅等外部设施,只需要利用计算机产生朗奇光栅图像即可进行测试,该光栅图像可以利用任意一款绘图程序完成,简单易行;②测试过程完全在相关器的工作状态下实现,不需要将相关器分解或者单独构建测量装置,因此保证了空间光调制器的特性测试结果和实际工作性能的高度一致;③干涉条纹图像的处理采用多行平均的方法,与 Soutar 的利用 ASYST 软件查找单一的最小值位置的方法相比,可以有效地避免孤立噪音点的干扰,提高测试准确度.

参考文献

- [1] ZHENG Zhen-rong. Color separating multiplayer systems used for TFT-LCD projectors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8):1016-1019.
郑臻荣. TFT-LCD 投影显示中的彩色偏振分色系统[J]. 光子学报, 2002, **31**(8):1016-1019.
- [2] ZHENG Zhen-rong. Tolerance analysis for fly's eye illumination system of LCTV projector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5):593-597.
郑臻荣. 液晶投影显示复眼照明的容差模拟分析[J]. 光子学报, 2004, **33**(5):593-597.
- [3] SOUTAR C, MONROE S E, KNOPP J J. Complex characterization of the Epson liquid crystal television[C]. *SPIE*, 1993, **1959**:269-277.
- [4] DUFFEY J N, JONES B K, LOUDIN J A, *et al.* Optical characterization of the infocus TVT-6000TM LCTV using custom drive electronics[C]. *SPIE*, 1995, **2490**:432-440.
- [5] LU K L, SALEH B E A. Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator[J]. *Opt Eng*, 1990, **29**(3):240-246.
- [6] DOU R S, GILES M K. Phase measurement and compensation of a wave front using a twisted nematic liquid crystal television [J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(19):3647-3652.
- [7] LI Da-hai, TAN Zhe-fu, CHEN Huai-xin, *et al.* Measuring LCTV's phase modulation characteristics based on cyclic radial shearing interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8):970-974.
李大海, 谭泽富, 陈怀新, 等. 采用环路径向剪切干涉法测量液晶电视的相位调制特性[J]. 光子学报, 2002, **31**(8):970-974.
- [8] ROBERGE D, NETO L G, SHENG Y L. Full complex modulation spatial light modulator using two coupled mode modulation liquid crystal televisions[C]. *SPIE*, 1995, **2490**:407-415.
- [9] CORONADO O L, MORENO I, CAMPOS J, *et al.* Full in situ characterization of spatial light modulators in an optical correlator Filter adaptation to operating curves[J]. *Journal of Modern Optics*, 1998, **45**(12):2461-2472.
- [10] JUDAY R D, MONROE S E, ROLLINS J J M. In-situ characterization of a correlator's filter SLM[C]. *SPIE*, 2002, **4734**:44-57.
- [11] YU Mei-wen. Optical holograph and information disposal [M]. 1st ed. Beijing: National Defense Industry Publishing Company, 1984:243-272.
于美文. 光学全息及信息处理[M]. 1 版. 北京:国防工业出版社, 1984:243-272.
- [12] SOUTAR C, MONROE S E, KNOPP J J. Measurement of the complex transmittance of the Epson liquid crystal television [J]. *Opt Eng*, 1994, **33**(4):1061-1068.
- [13] JUDAY R D. Optimal realizable filters and the minimum Euclidean distance principle [J]. *Applied Optics*, 1993, **32**(26):5100-5111.

Characterization of Filter Spatial Light Modulator in Optical Correlator

HU Wen-gang, WANG Yong-zhong, HUA Wen-shen

(Department of Optical and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Received date: 2006-02-20

Abstract: An approach of in-situ measuring the phase modulation property of a filter spatial light modulator was presented in which an image of Ronchi grating substituted for a concrete one. Its principle and testing method have been studied and a typical XGA2L11 spatial light modulator has been characterized. The measurement results were validated by correlation recognition experiment. The way could be applied in Vander Lugt correlator, and it doesn't need any extra independent test bed. The measurement results of the filter spatial light modulator consistent of its operational performance.

Key words: Information optics; Spatial light modulator; Phase modulation; Vander Lugt correlator



HU Wen-gang was born in 1972, in Jilin, China. He received the M. S. degree in 2003 from Optical and Electronic Engineering Department of Ordnance Engineering College. Now he is a candidate of Ph. D. in Ordnance Engineering College. His current research interests include information optics, image processing and optical pattern recognition.