

文章编号: 0258-7025(2003)07-0614-05

利用液晶电视的位相调制特性 补偿畸变波前

李大海, 陈怀新, 陈祯培

(四川大学电子信息学院光电系, 四川 成都 610064)

摘要 分析了液晶电视(LCTV)的位相调制特性,采用将液晶电视和能产生台阶波前畸变的位相物体同时置于环路径向剪切干涉(CRSI)装置入射光路中的方法,在液晶电视屏上输入可产生畸变波前对应的互补波前的灰度图,实现了台阶结构畸变波前的补偿。

关键词 信息光学;液晶电视;环路径向剪切干涉;畸变波前补偿

中图分类号 TH 744.3 **文献标识码** A

Utilizing LCTV's Phase Modulation Characteristics to Compensate Distorted Wavefront

LI Da-hai, CHEN Huai-xin, CHEN Zhen-pei

(Electronic Information Institute, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract LCTV's phase modulation characteristics has been analyzed in this paper. Then a phase plate that can make a plane wave become a step-jump wavefront is inserted into a specific plane of incident light path of a cyclic radial shearing interferometer. And a gray distribution that can produce a conjugated wavefront of the step-jump wavefront was input the LCTV. The experimental result shows that the step-jump wavefront has been compensated ideally.

Key words information optics; LCTV; cyclic radial shearing interferometer(CRSI); distorted wavefront compensation

1 引言

液晶电视(LCTV)作为投影仪的关键部件被广泛用于大屏幕投影显示。由于它具有可实时控制的振幅和位相调制特性及低成本,也被广泛用于实时光学信息处理、光计算、自动目标识别等许多领域。作为空间光调制器的一种,液晶空间光调制器的位相调制特性正被用于高功率激光预放级畸变波前的补偿^[1]和自适应光学畸变波前的校正^[2,3]。研究表明,LCTV同时具有振幅和位相调制特性,并且当它处于偏位相调制状态(phase-mostly)时,可用于校正波前畸变。采用LCTV的位相调制特性校正波前畸变的工作一般是基于马赫-曾德尔^[4]以及泰

曼-格林干涉^[5,6]波前传感技术,它们均属于分振幅的双光束干涉方式来实现畸变波前的测量与补偿,环境对结果将产生一定的影响。本文提出了一种共光路、具有优良防震性的环路径向剪切干涉仪(CRSI)作为波前传感装置的方法,并在此基础上结合LCTV的位相调制特性实现了入射光束中存在台阶状波前畸变的补偿,结果显示,LCTV在偏位相调制状态下可用于激光光束波前畸变的校正以实现激光光束质量的改善。

2 LCTV的位相调制特性

EPSONP13VM125 液晶显示模块是具有位相

收稿日期:2002-01-22;收到修改稿日期:2002-06-04

基金项目:国家自然科学基金和中国工程物理研究院联合基金(编号:10176018)资助项目。

作者简介:李大海(1968—),男,苗族,博士,主要从事光学信息处理、光学干涉计量和波前控制研究。E-mail:dahai_li@sohu.com

和振幅调制功能、可用作空间光调制的电寻址器件，采用 POLY-SITFT 驱动，其面板大小为 $26.88 \text{ mm} \times 20.16 \text{ mm}$ ，对角线长 3.3 mm ，像元总数 640×480 ，单元像素大小 $42 \mu\text{m} \times 42 \mu\text{m}$ ，夹在两导向膜间的液晶分子呈 90° 扭曲向列排列。当它处于两偏振片之间时，采用 Jones 矩阵理论模型，即假设两导向膜间的液晶分子层可看成由多层各向同性的单分子

层构成，每层内的液晶分子排列方向相对于前一层分子的排列方向转过同一角度；在外加电场后，液晶分子朝外电场方向的偏转角大小 θ 与分子所处的位置无关，受影响的仅是液晶分子的非常光折射率 n_e ，并将由 n_e 变成 $n_e(\theta)$ 。其在无外加电压时，强度透过率为^[7,8]

$$T = \left\{ \frac{\alpha}{\gamma} \sin\gamma \sin[\alpha + (\psi_1 - \psi_2)] + \cos\gamma \cos[\alpha + (\psi_1 - \psi_2)] \right\}^2 + \left\{ \frac{\beta}{\gamma} \sin\gamma \cos[\alpha - (\psi_1 + \psi_2) + 2\psi_D] \right\}^2 \quad (1)$$

相移为

$$\delta = \beta + \tan^{-1} \frac{\frac{\beta}{\gamma} \sin\gamma \cos[\alpha - (\psi_1 + \psi_2) + 2\psi_D]}{\frac{\alpha}{\gamma} \sin\gamma \sin[\alpha + (\psi_1 - \psi_2)] + \cos\gamma \cos[\alpha + (\psi_1 - \psi_2)]} \quad (2)$$

这里， α 即为扭曲向列液晶的扭曲角， $\beta = \frac{\pi d}{\lambda}(n_e - n_o)$ ， $\gamma = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$ ， d 为导向膜间液晶层厚度， n_o 为液晶分子的寻常光折射率， ψ_1, ψ_2, ψ_D 表示起偏器和检偏器的偏振方向以及液晶分子导向器方向分别与 x 轴方向间按反时针方向确定的夹角，如图 1 所示。在外加电场后，(1)，(2) 两式中的 β 变为 $\beta = \frac{\pi d}{\lambda}[n_e(\theta) - n_o]$ ，因此在其他参数不变的条件下，LCTV 的相移与外加电场有确定关系。

在适当的偏置电压下，如果在 LCTV 屏上有规律地输入不同灰度等级的信号，就可以得到 LCTV 的位相调制特性曲线。

3 环路径向剪切干涉波前传感原理

环路径向剪切干涉术^[9]是采用被检畸变波前经分束器后，其中一束光沿某方向被放大，另一束光沿另一方向被缩小后，再使其相遇并在相互重叠区域发生干涉而对光学元件或激光系统输出波前进行测量的一种技术，基本光路如图 2 所示。图中 BS， M_1 和 M_2 分别为分束镜，反射镜， L_1, L_2 构成一开普勒望远系统，从分束镜透射沿逆时针方向传播的光波被 L_1, L_2 组成的望远系统缩小形成物光束 ($f_1 > f_2$)，由分束镜表面反射沿顺时针方向传播的光波被该望远系统放大形成参考光束，最后再汇合于分束镜的表面而产生干涉，根据干涉条纹的花样和适当的波前重建算法就可实现入射波前的检测^[10]。

为了采用 LCTV 对畸变波前进行补偿，按图 2 布置了如图 3 所示的光路。波长为 $0.633 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光经扩束准直并通过一矩形光阑后进入该闭环光路，根据傅里叶变换处理条纹图的方法^[11]，事先使分束镜产生一微小倾斜以获得一组理想的载频直条纹，然后将位相板 P 和不加电信号的 LCTV 都置于图 3 的入射光路中 (P 与 LCTV 紧贴)，并调整起偏器和检偏器的角度使 LCTV 处于位相调制状态。图 3 中的 P 是一台阶位相板，经干涉显微镜测试其“台阶高度”近似为 0.6π ，它能使被

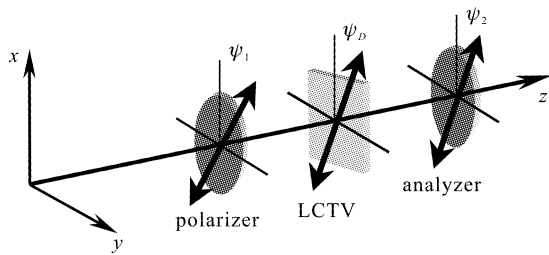


图 1 夹在起偏、检偏器间 LCTV 的坐标图

Fig. 1 Schematic diagram of the coordinate systems for the polarizer-LCTV-analyzer sandwich

调节 ψ_1, ψ_2, ψ_D ，当 $\psi_1 = \psi_D$ 并且 $\psi_2 = \psi_D + \alpha$ 时，(1)，(2) 式分别变成

$$T = 1 - \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 \text{sinc}^2 \frac{\gamma}{\pi} \quad (3)$$

$$\delta = \beta + \tan^{-1} \left(\frac{\beta}{\gamma} \tan\gamma \right) \quad (4)$$

由 (3)，(4) 式可以看出，当 $\gamma > \pi$ 或 $\beta > (\pi^2 - \alpha^2)^{1/2}$ ， T 的变化很小，LCTV 此时便处于偏位相调制状态。

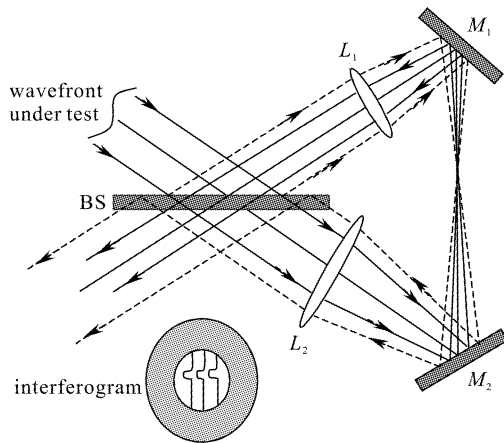


图 2 环路径向剪切干涉仪

虚线表示扩大波前,实线表示缩小波前

Fig. 2 Cyclic radial shearing interferometer which the dashed and the solid lines denote, the expanded and contracted wavefront, respectively

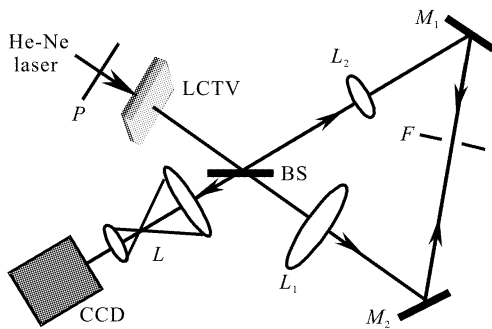


图 3 用 LCTV 补偿光束畸变波前的环路径向剪切干涉系统

Fig. 3 Cyclic radial shearing interferometer of using LCTV to compensate wavefront

扩束并严格准直成为平面波的 He-Ne 透射光场产生一如图 4 所示的台阶波前畸变。为了得到该入射波前无畸变的干涉条纹图,或为了实现 CRSI 装置前某一确定位置上波前的测量,位相板 P 和 LCTV 被同时置于 L_1, L_2 的物方焦平面上 (L_1, L_2 的焦距分别为 550 mm 和 360 mm), 此时待测波前沿顺时针或逆时针方向经过的均是一中继成像系统, 并成像于图 3 中另一像传递系统 L 的前一透镜的物方焦平面上, 这个像经 L 后被正处于其另一透镜的像方焦平面的 CCD (512×512 像素) 所记录, 得到图 5 所示的干涉条纹。图中上半部呈顺时针旋转 90° 后的“几”字形条纹由台阶畸变波前引起 (它与该波前的普通双光束干涉有差异), 而条纹整体偏离理想直条纹的弯曲因 LCTV 的非理想构造形成。在图 3 中的望远系统的焦平面加一空间滤波器 F 避免了图 5

的干涉条纹因 LCTV 的网格结构带来的影响, 同时, 为了光路调整方便, 所有元件均处于光具座上。由于扩大波前中重叠区域之外的部分对干涉无贡献, CCD 只采集了有条纹的重叠区域。

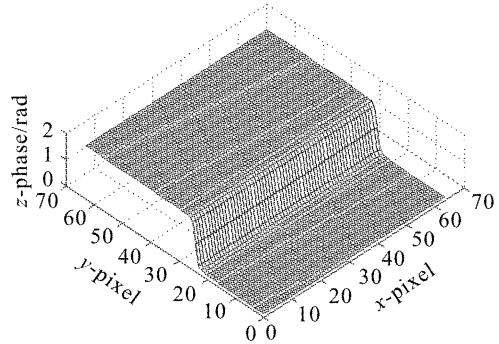


图 4 模拟的台阶波前

Fig. 4 Simulated step wavefront

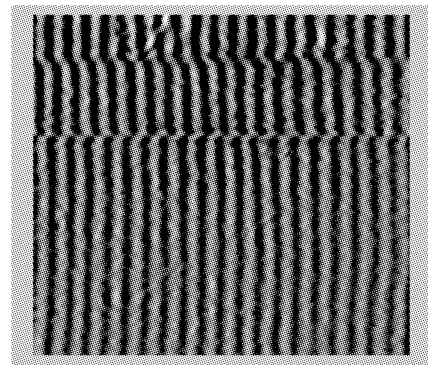


图 5 台阶位相板的畸变条纹图

Fig. 5 Cyclic radial shearing interferogram of step-jump wavefront

设图 3 中的入射波前的畸变因位相板 P 的台阶结构和未加电信号 LCTV 的非理想构造引起, 在极坐标系下它们分别表示为 $W_P(r, \phi)$ 和 $W_{LC}(r, \phi)$, 此时对应的光场复振幅分布为 $E(r, \phi) = A(r, \phi) \exp\{ik[W_P(r, \phi) + W_{LC}(r, \phi)]\}$, 故图 3 所示光路中重叠区域的干涉图强度分布为

$$I\left(\frac{r}{s}, \phi\right) = \left| A\left(\frac{r}{s}, \phi\right) \exp\left\{ik\left[W_P\left(\frac{r}{s}, \phi\right) + W_{LC}\left(\frac{r}{s}, \phi\right)\right]\right\} + A(rs, \phi) \exp\left\{ik\left[W_P(rs, \phi) + W_{LC}(rs, \phi)\right]\right\} \right|^2 = \left| A\left(\frac{r}{s}, \phi\right) \right|^2 \times \left\{ 2 + 2\cos\left[kPHD_P\left(\frac{r}{s}, \phi\right) + kPHD_{LC}(rs, \phi)\right] \right\} \quad (5)$$

这里振幅 $A(r, \phi)$ 被近似认为是缓变的, 且分束镜的

透反比为

$$T/R = (f_2/f_1)^2 \quad (6)$$

其中 R, T 分别表示图 3 中分束镜 BS 所用表面的反射率和透过率。用(5)式表示的干涉条纹将有最大的对比度,(5)式中的

$$PHD_P\left(\frac{r}{s}, \phi\right) = W_P\left(\frac{r}{s}, \phi\right) - W_P(rs, \phi) \quad (7)$$

$$PHD_{LC}\left(\frac{r}{s}, \phi\right) = W_{LC}\left(\frac{r}{s}, \phi\right) - W_{LC}(rs, \phi) \quad (8)$$

$W\left(\frac{r}{s}, \phi\right), W(rs, \phi), PHD\left(\frac{r}{s}, \phi\right)$ 分别表示缩小波前、扩大波前和它们在相互重叠区域上的位相差函数。其中 $PHD_{LC}\left(\frac{r}{s}, \phi\right)$ 对干涉条纹的整体弯曲有贡献, 而 $PHD_P\left(\frac{r}{s}, \phi\right)$ 在此基础上增加了条纹顺时针向右旋转 90° 的“几”字形弯曲。根据(4)式, 如果在 LCTV 上写入适当的电信号, 使其产生与位相板 P 的透射波前 $W_P(r, \phi)$ 互补的波前 $-W_P(r, \phi)$, 则在入射波前中将只会含有 $W_{LC}(r, \phi)$, 图 5 条纹图中的顺时针向右旋转 90° 的“几”字形弯曲就会被补偿。

4 LCTV 补偿畸变波前

如前所述, 为了由干涉条纹图重建入射波前的方便, 事先引入了载频直条纹, 图 5 则是(7),(8)两式表示的入射波前的位相差函数共同调制的结果。通过另一幅未加载位相板 P 的干涉条纹图(未加电信号的 LCTV 仍在光路中), 能由图 5 求出位相板 P 的位相差函数 $PHD_P\left(\frac{r}{s}, \phi\right)$, 然后再经过波前重建算法^[10], 可以得到图 6 所示的位相板 P 的透射波前。采用我们的 CRSI 装置事先对 EPSONP13VM125 液晶显示模块位相调制特性的测试结果, 当写入到其上的灰度图是图 7 所示且白色和黑色区域的灰度值分别为 235 和 0 时能产生位相板 P 的互补波前。图 8(a)中的条纹图的下部呈顺时针向右旋转 90° 后的“几”字形弯曲就是图 7 灰度图的黑白分界线在入射光场的下部时引起的。根据台阶波前的环路径向剪切干涉图性质, 即台阶波前的阶跃位置在光场的上半部和下半部的干涉条纹弯曲的方向将相反, 所以, 当图 7 中的黑白分界线向上移动超过光场中央时将产生与图 8(a)所示弯曲方向相反的条纹, 如图 8(b)所示。分界线继续向上移动, 实现了图 8(c)所示的部分条纹弯曲的校正。当黑白分界线的位置与位相板 P 中跃变位置重合

时, 图 8(d)显示了位相板 P 在入射光场中引起的台阶畸变波前被 LCTV 产生的波前所完全补偿(剩余的条纹整体弯曲因 LCTV 本身的构造引起)的结果, 这证实了前面理论预期的结果。图 9 是图 6 所示的台阶畸变被补偿后的三维显示结果, 图中剩余的起伏由位相板 P 的面形和 LCTV 构造及其光学不均匀性误差所引起, 不超过 $\lambda/10$ 。

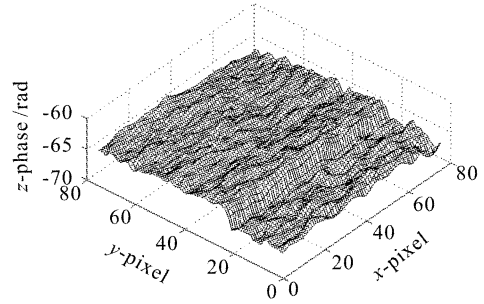


图 6 由图 5 得到的台阶波前

Fig. 6 Reconstructed step-jump wavefront



图 7 液晶电视屏上输入的灰度图

Fig. 7 Signal input gray into LCTV

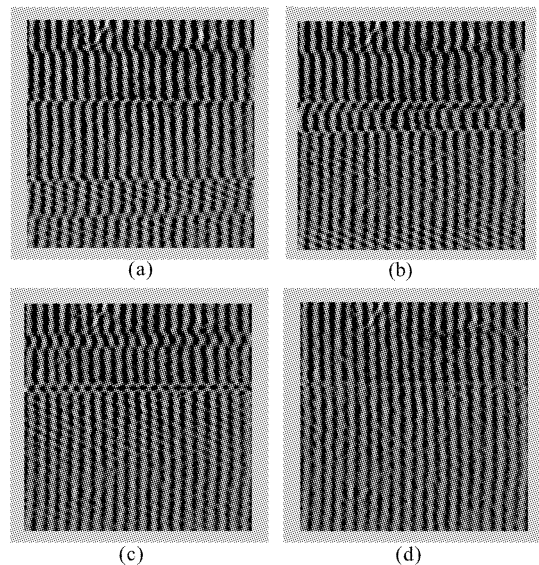


图 8 台阶畸变波前被补偿的条纹图

Fig. 8 Interferograms of step-jump wavefront after compensated

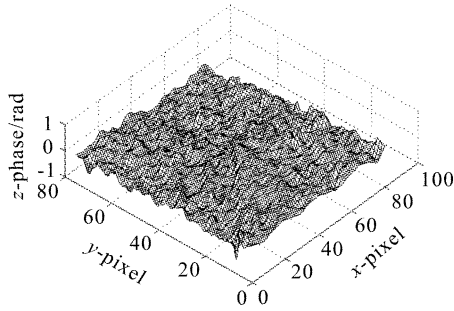


图9 台阶畸变被补偿后的三维波前

Fig.9 3-D plot of step-jump wavefront after compensated

5 结 论

采用环路径向剪切干涉仪作为波前传感装置,实现了入射波前中含有台阶畸变波前的测量,并且利用该装置对 LCTV 位相调制特性的测试结果,在 LCTV 上写入能产生与入射台阶畸变波前互补的波前,对位相延迟为 0.6π 的台阶畸变波前进行了较为理想的补偿。由于环路径向剪切干涉装置的稳定性,能增加测试结果可靠性,说明它可用于现场的测试和实时检验补偿结果。因为 LCTV 可控制像素的尺寸是在数十微米的量级,可以预计采用位相调制动态范围宽、调制和光学均匀性优良的 LCTV 可以实现波前畸变复杂、变化范围大和空间尺度在像素级尺寸的补偿,从而为改善激光光束质量提供帮助。

参 考 文 献

- 1 J. C. Chanteloup, A. Migus, B. Loiseaux *et al.*. Wave-front control of solid state lasers using an optically addressed light valve in an adaptive optics loop and applications to ultra-intense pulse [C]. *SPIE*, 1999, **3492**:702~707
- 2 Rensheng Dou, M. K. Giles. Closed-loop adaptive-optics system with a liquid-crystal television as a phase retarder [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(14):1583~1585
- 3 T. Shirai, T. H. Barnes, T. G. Haskell. Adaptive wave-front correction by means of all-optical feedback interferometry [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(11):773~775
- 4 T. L. Kelly, J. Munch. Phase-aberration correction with dual liquid-crystal spatial light modulators [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(22):5184~5189
- 5 S. R. Restaino, E. L. Gates, R. A. Carreras *et al.*. On the use of electro-optical devices for O. P. L. compensation [C]. *SPIE*, 1994, **2200**:494~500
- 6 R. S. Dou, M. K. Giles. Phase measurement and compensation of a wave front using a twisted nematic liquid-crystal television [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(19):3647~3652
- 7 K. H. Lu, B. E. A. Saleh. Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator [J]. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(3):240~245
- 8 L. G. Neto, D. Rogerge, Y. Sheng. Full-range, continuous, complex modulation by the use of two coupled-mode liquid-crystal televisions [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(23):4567~4576
- 9 M. V. R. K. Murty. A compact radial shearing interferometer based on the law of refraction [J]. *Appl. Opt.*, 1964, **3**(7):853~857
- 10 Li Dahai, Chen Huaixin, Chen Zhenpei *et al.*. Algorithm and accuracy study of wavefront reconstruction with different amplification ratio based on the cyclic radial shearing interferometer [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(6):503~508 (in Chinese)
- 11 M. Takeda, I. Hideki, K. Seiji. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *Optical Society of America*, 1982, **72**(1):156~160