

基于液晶空间光调制器的动态哈特曼传感器研究

蔡冬梅 逯培培 贾 鹏 刘建霞 韦宏艳

(太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024)

摘要 微透镜阵列是夏克-哈特曼波前传感器的核心部件。根据液晶空间光调制器(LC-SLM)的相位调制原理,控制 LC-SLM 生成焦距、子孔径尺寸和排布方式可调的微透镜阵列,应用于哈特曼波前传感器,对入射光波进行分割,测量子孔径内波面的平均斜率,复原出入射波面的相位分布,以此为校正信号,对畸变波面进行单步校正,校正前后光波的斯特列尔比值从 0.12 变为 0.59。针对 LC-SLM 产生的微透镜阵列,讨论了透镜焦距、相邻间距、阵列数目及微透镜性能各影响因素。理论和实验结果表明,基于 LC-SLM 的动态哈特曼传感器具有子孔径大小、数目和排布方式根据外界条件变化控制灵活,可动态变化的优点。

关键词 自适应光学;夏克-哈特曼;微透镜;液晶空间光调制器

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.s112001

Research of a Dynamic Hartmann Sensor Using Liquid Crystal Spatial Light Modulator

Cai Dongmei Ti Peipei Jia Peng Liu Jianxia Wei Hongyan

(College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology,
Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract The micro-lens array is the core component of Shack-Hartmann wavefront sensor. According to the phase modulation principle of liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM), the LC-SLM generates dynamic micro-lens array with tunable focal length, aperture size, and arrangement of sub-apertures. Hartmann wavefront sensor based LC-SLM is used to split the incident light. The average slope of each sub-aperture is tested. The phase distribution of wavefront is reconstructed. Then the wavefront aberration is corrected in one step. After aberration, the Strel ratio of the light wave changes from 0.12 to 0.59. For the micro-lens array generated by LC-SLM, their focal length, adjacent spacing, numbers and performance are discussed in theory and experiment. The results show that the dynamic Hartmann sensor using LC-SLM has the advantages of tunable sub-aperture size, numbers and arrangement according to the external conditions.

Key words adaptive optics; Shack-Hartmann; micro-lens; liquid crystal spatial light modulator

OCIS codes 010.1080; 050.1380; 160.3710

1 引 言

在天文望远镜观测、激光光束控制等领域,光波传输过程受大气湍流的影响,光束到达目标时质量变差,需要对成像波前进行探测和校正^[1-3]。目前自适应光学技术中,波前探测主要采用夏克-哈特曼波前传感器^[4-5],其核心部件是一个微透镜阵列,对入射波前分割采样、聚焦,得到子孔径内波面的平均斜率值。传统微透镜阵列的焦距和子孔径不能改

变,当波前扰动增强使光斑质心靠近子孔径窗口边缘或超出窗口范围时,传感器的测量误差增大,如果观测目标极弱,子孔径内光强不足,则传感器的测量精度降低。因此,需要焦距、子孔径尺寸可动态控制的微透镜阵列。

随着液晶技术的发展,电控液晶微透镜阵列越来越受到重视^[6-9]。液晶微透镜阵列具有工作电压低,焦距、子孔径尺寸与排布方式可编程控制等优

收稿日期: 2013-10-20; 收到修改稿日期: 2013-11-13

基金项目: 山西省自然科学基金(2013011006-4)、中国科学院自适应光学重点实验室基金(LAOF201301)

作者简介: 蔡冬梅(1974—),女,博士,副教授,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: dm_cai@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

点。基于液晶光调制的哈特曼波前传感器在光电成像技术领域中受到广泛关注^[5,7]。本文利用德国 Holoeye 公司的商品化 LC-R2500 液晶空间调制器 (LC-SLM),生成焦距、子孔径尺寸和排布方式可调的微透镜阵列,构成哈特曼波前传感器,测量入射波前斜率,复原波面相位,以此作为校正信号,对像差进行校正,验证了基于 LC-SLM 的哈特曼传感器的可行性,对微透镜阵列的影响因素进行讨论。

2 液晶哈特曼基本原理

基于 LC-SLM 的哈特曼传感器原理如图 1(a)所示,图中 LC-SLM 为透射式。畸变波前通过偏振棱镜,入射至 LC-SLM,PC 机控制 LC-SLM 产生微透镜阵列,入射波面经过微透镜阵列聚焦,通过成像透镜,CCD 相机记录光斑阵列的像,成像透镜傅里叶平面的空间滤波器滤除像素结构造成的高阶衍射。

一个随机分布的旋转对称型衍射透镜的相位函数为^[10]

$$\phi(r) = 2\pi(a_2 r^2 + a_4 r^4 + \dots), \quad (1)$$

式中 r 为透镜平面内的径向坐标,衍射透镜在第 m 衍射级的光焦度为

$$\frac{1}{f} = -2a_2 \lambda m, \quad (2)$$

其中, λ, f 为入射波长和透镜焦距。令 $m = -1$, 忽略(1)式的高阶项,相位函数为

$$\phi(x, y) = \frac{\pi r^2}{\lambda f} = \frac{\pi(x^2 + y^2)}{\lambda f}, \quad (3)$$

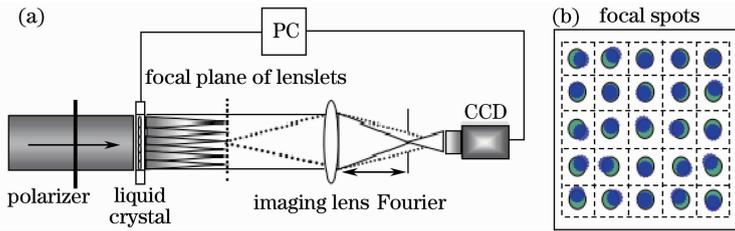


图 1 (a) 夏克-哈特曼传感器原理; (b) 透镜阵列聚焦光斑

Fig. 1 (a) Schematic of Shark-Hartmann sensor; (b) focal spots of lens array

3 液晶哈特曼实验

实验中入射光波长为 633 nm, LC-SLM 采用德国 Holoeye 公司的 LC-R2500 型电寻址器件。LC-SLM 的对角线长为 0.97×25.4 mm, 像素总数为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$, 像素尺寸为 $19 \mu\text{m} \times 19 \mu\text{m}$, 响应时间为 16 ms。PCI 接口控制驱动电路, 分辨率为 8 bit。对 LC-SLM 中的 $768 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 的像素分区控制, 利用(3)、(4)、(6)式, 得到焦距为 50 mm, 16×16 的

式中 x, y 为透镜平面内的直角坐标, 坐标原点为透镜平面的几何中心。

纯相位 LC-SLM 的相位调制深度为 2π , 相位分布函数为

$$\varphi(x, y) = \phi(x, y) \bmod 2\pi. \quad (4)$$

式中 $\bmod 2\pi$ 表示以 2π 为周期取模。LC-SLM 是分立的像素结构, 且单个像素面的相位响应相同。(4)式改为

$$\Phi(x, y) = [\varphi(x, y) \times \text{comb}(x/p_x) \times \text{comb}(y/p_y)] \otimes \text{rect}(x/p_x, y/p_y), \quad (5)$$

式中 p_x 和 p_y 为相邻像素间隔, $\text{comb}(\cdot)$ 为梳状函数, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数。

对相位调制幅度为 2π , 分辨率为 8 bit 的 LC-SLM, 控制信号函数为

$$G(x, y) = \text{round}\left[256 \times \frac{\Phi(x, y)}{2\pi}\right], \quad (6)$$

式中 $\text{round}(\cdot)$ 为取整函数。对 LC-SLM 分区控制, 利用(3)、(4)、(6)式, 确定 LC-SLM 的控制信号, 生成 $n \times n$ 的微透镜阵列, 如图 1(b)所示。入射畸变波面 $W(x, y)$ 经微透镜阵列聚焦, 形成的光斑阵列与标准平面波形成的聚焦光斑偏离。计算畸变波前在子孔径内对标准波面在 x 和 y 方向的平均斜率, 即

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = \frac{\Delta x}{f}, \quad \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = \frac{\Delta y}{f}, \quad (7)$$

式中 $\Delta x, \Delta y$ 为 x, y 方向的偏离量。

微透镜阵列的灰度控制图[图 2(a)], PC 机加载灰度图, 控制各像素电压。平行光入射至 LC-SLM, LC-SLM 对入射波面进行相位调制, 位于微透镜焦点位置的 CCD 接收焦点光斑, 如图 2(b)所示。图 2(c)为光斑的三维(3D)图。LC-SLM 将入射平行光聚焦为 16×16 的光斑阵列, LC-SLM 等效为一个焦距为 50 mm, 子孔径大小为 0.912 mm 的微透镜阵列。单个微透镜的焦距、子孔径尺寸和排布方式可以单独控制。

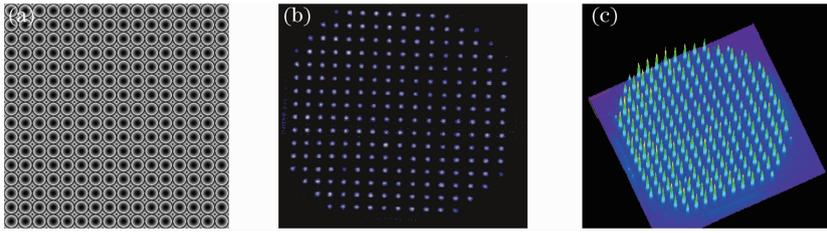

 图 2 (a) LC-SLM 控制灰度图; (b) 16×16 光斑阵列; (c) 光斑阵列的三维分布

 Fig. 2 (a) Control gray scale signal of LC-SLM; (b) image of 16×16 spot array; (c) 3D image of spot array

改变微透镜阵列数目,生成 21×21 的微透镜阵列,在光路中插入像差板引入波前畸变,记录畸变波前经微透镜阵列所成的像,光斑阵列如图 3(a)所示。计算各子孔径内波面的平均斜率,图 3(b)、(c)

分别为各子孔径在 x, y 方向的平均斜率,从斜率出发,采用区域法重构波前相位分布,如图 3(d)所示,复原波面的峰谷(PV)值为 1.738λ ,均方根值为 0.257λ ,斯特列尔比约为 0.12。

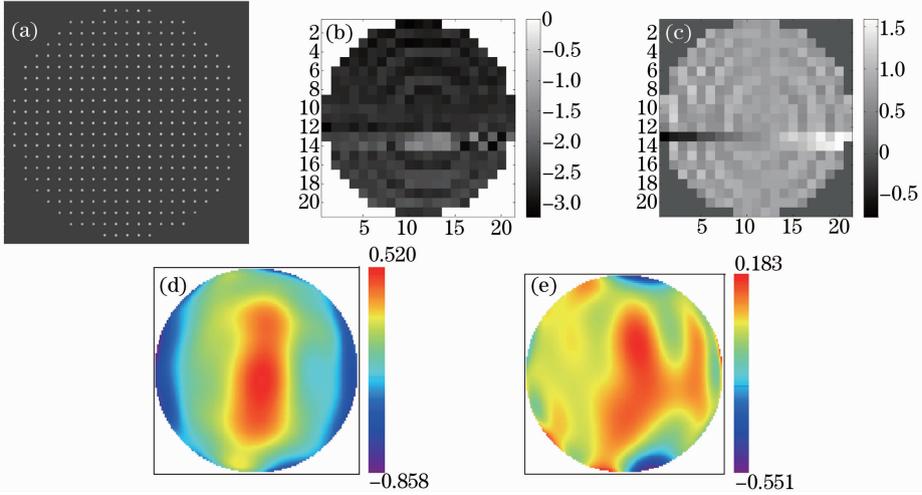

 图 3 (a) 21×21 光斑阵列; (b) x 方向平均斜率; (c) y 方向平均斜率; (d) 复原波面相位分布; (e) 校正后的复原波面

 Fig. 3 (a) Image of 21×21 spot array; (b) average slope of x direction; (c) average slope of y direction;

(d) phase distribution of recovered wavefront; (e) phase distribution of wavefront after correction

将复原波面的共轭作为校正信号,控制 LC-SLM,对波前畸变作单步校正,校正后的复原波面如图 3(e)所示,PV 值和均方根值分别为 0.734λ 和 0.087λ ,斯特列尔比值约为 0.59,校正前后效果明显。LC-SLM 构成的哈特曼传感器可有效测量波前像差。

成的微透镜结构近似是一个变周期光栅。要达到较高的衍射效率,衍射透镜中心波带包含的相位级数至少等于 8,即中心波带半径范围内至少应包含 8 个像素,即

$$\sqrt{2f\lambda} \geq Np, \quad (9)$$

式中 $N=8, p$ 为像素尺寸,则

$$f \geq 16p^2/\lambda. \quad (10)$$

4 液晶哈特曼的限制因素

4.1 微透镜焦距

连续表面浮雕分布衍射透镜的理想衍射效率为 100% ^[10],然而液晶的像素结构使 LC-SLM 生成的衍射透镜具有阶梯状相位分布,实际衍射效率低于理论值。类阶梯光栅的衍射效率取决于 $0 \sim 2\pi$ 范围包含的相位级数 M 。线性光栅的一级衍射效率为

$$\eta = \left[\frac{\sin(\pi/M)}{\pi/M} \right]^2. \quad (8)$$

当级数 M 为 8 时,衍射效率接近 95% 。LC-SLM 生

4.2 相邻微透镜间距

图 4 是焦距为 50 mm 的单透镜的灰度控制图

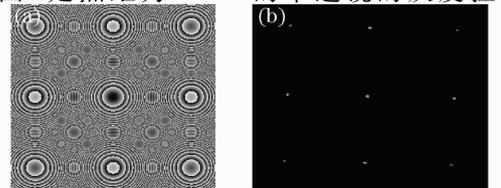


图 4 衍射单透镜的 (a) 灰度控制图和 (b) 焦点光斑图

Fig. 4 Images of (a) control gray scale signal and (b) focal spots of single lens

和相应的焦点光斑。图中,中心主焦点附近对称分布的高阶衍射焦点使主焦点光强大大降低。

LC-SLM 生成的透镜的焦平面上衍射光的复振幅分布为

$$u(x', y') = \frac{1}{\lambda f} \left(\frac{L_x L_y}{p_x p_y} \right) \sum_{m, n=-\infty}^{+\infty} \left\{ \exp \left[\frac{i\pi(x'^2 + y'^2)}{\lambda f} \right] \times \text{sinc} \left(\frac{L_x}{\lambda f} \left[x - \left(\frac{m\lambda f}{p_x} \right) \right], \frac{L_y}{\lambda f} \left[y - \left(\frac{n\lambda f}{p_y} \right) \right] \right) \right\} \otimes \text{rect} \left(\frac{x}{a}, \frac{y}{b} \right). \quad (11)$$

当 $m=n=0$ 时,透镜主焦点振幅分布为

$$u_{0,0}(x', y') = \frac{1}{\lambda f} \frac{L_x L_y}{p_x p_y} \left[\text{sinc} \left(\frac{L_x x}{\lambda f}, \frac{L_y y}{\lambda f} \right) \right] \otimes \text{rect} \left(\frac{x}{a}, \frac{y}{b} \right), \quad (12)$$

式中 L_x, L_y 和 a, b 分别为 LC-SLM 的大小及单个像素尺寸。

主焦点光斑宽度为 $(2\lambda f/L_x, 2\lambda f/L_y)$, f 越小,光斑焦点越小,透镜聚焦能力越强。(11) 式中,焦平面上 $(m\lambda f/p_x, n\lambda f/p_y)$, $m, n = \pm 1, 2, 3$ 为多级衍射焦点,焦点沿 x, y 方向按周期 $\lambda f/p_x, \lambda f/p_y$ 排列,焦点阵列周期与像素间距成反比。LC-SLM 产生单透镜,可选择合适的空间滤波器滤除高衍射级次,但主焦点光强降低不能避免。当 LC-SLM 形成微透镜阵列时,相邻微透镜间距 s 应满足

$$s \neq \frac{\lambda f}{np}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (13)$$

4.3 微透镜阵列数目

根据菲涅耳波带理论,LC-SLM 生成的衍射透镜应至少包含一个波带数,波带宽度由透镜焦距确定,则透镜的最小口径为

$$d_{\min} \geq 2 \sqrt{2f\lambda}. \quad (14)$$

像素数为 $M \times M$ 的 LC-SLM 生成焦距为 f 的微透镜阵列数 $n \times n$ 为

$$n \leq \frac{Mp}{2 \sqrt{2f\lambda}}. \quad (15)$$

像素大小为 $19 \mu\text{m} \times 19 \mu\text{m}$, 像素总数 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 的 LC-SLM, 生成焦距为 50 mm 的微透镜阵列的数目 $n \leq 29$, 实验中利用 LC-SLM 生成 21×21 单元的微透镜阵列是可行的。

4.4 微透镜质量

根据菲涅耳波带理论,菲涅耳透镜是基于菲涅耳波带片(FZP)的近场衍射,将液晶表面形成的相位分成同心的菲涅耳波带环,第 m 个环带的半径为

$$r_m = \sqrt{mr_p}, \quad r_p = \sqrt{2\lambda f}. \quad (16)$$

波带宽度随波带数增加而变窄,波带宽度最窄等于一个像素的尺寸,即

$$\frac{\sqrt{m} - \sqrt{m-1}}{p} \sqrt{2f\lambda} = 1. \quad (17)$$

菲涅耳带数为

$$m = \frac{f\lambda}{2p^2} + \frac{1}{2} + \frac{p^2}{8f\lambda}. \quad (18)$$

透镜的最大有效半径为

$$r_m = \sqrt{mr_p} = \frac{f\lambda}{p} + \frac{p}{2}. \quad (19)$$

透镜的 F 数由衍射透镜焦距和像素尺寸确定,即

$$F = \frac{f}{2r_m} = \frac{pf}{2f\lambda + p^2}. \quad (20)$$

透镜的空间带宽积为

$$f_{\text{sw}} = \frac{\pi r_m^2}{4p^2} = \frac{N_{\text{pixel}}}{4}, \quad (21)$$

式中 N_{pixel} 为衍射透镜有效口径内包含的像素总数。

图 5 是焦距为 50 mm 的衍射透镜的 F 数、 f_{sw} 与像素尺寸的关系曲线。焦距一定时,像素尺寸越小,透镜的 F 数越小,透镜的光通量越大,衍射透镜的成像质量越好;空间带宽积随着像素尺寸的增大而急剧下降。液晶器件的像素尺寸越小,空间分辨率越高,LC-SLM 生成的衍射透镜质量越好。

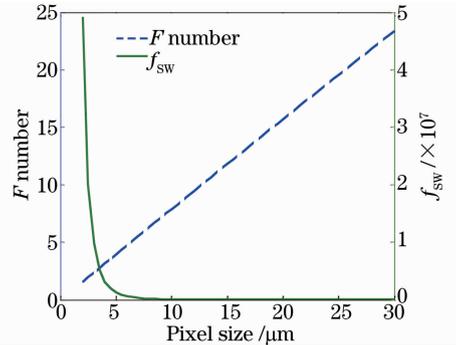


图 5 F 数和 f_{sw} 与像素尺寸关系

Fig. 5 F number and f_{sw} versus pixel size

5 结 论

研究了基于 LC-SLM 的动态哈特曼传感器。对 LC-SLM 的每一像素进行相位控制,得到多级相位分布的微透镜阵列,微透镜阵列的焦距、子孔径大小和排布方式具有极大的灵活性,构建了动态哈特曼波前传感器。液晶的像素越小,透镜可以实现的焦距越小。当焦距一定时,衍射透镜的 F 数随像素尺寸的减小而减小,空间带宽积增大。像素结构及

衍射透镜的光效率要求限制了液晶衍射透镜的最小焦距。像素结构造成的衍射效应一方面使衍射透镜主焦点以外的高阶衍射光损失,同时要求微透镜间距取值合适来避免高阶衍射焦点对主焦点的干扰。

参 考 文 献

- 1 Jiang Wenhan. Adaptive optical technology[J]. Chinese Journal of Nature, 2006, 28(1): 7-13.
姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2006, 28(1): 7-13.
- 2 Zhou Renzhong, Yan Jixiang, Zhao Dazun. Adaptive Optics [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 1996.
周仁忠, 阎吉祥, 赵达尊. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- 3 Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui, *et al.*. Progress on adaptive optics of Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900106.
姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900106.
- 4 Chen Hongli, Rao Changhui. A method on the decision of resolution of Shack-Hartmann sensor according to far-field spot [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1137-1142.
陈红丽, 饶长辉. 根据远场光斑确定夏克-哈特曼波前传感器采样率的一种方法[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1137-1142.

- 5 Zhao Xiangjie, Luo Yongquan, Zhang dayong. The application of liquid crystal microlens array technology in the field of wave front sensor research[J]. Optoelectronic Technology, 2010, 30(3): 145-153.
赵祥杰, 骆永全, 张大勇. 液晶微透镜阵列在波前传感领域的应用概述[J]. 光电技术, 2010, 30(3): 145-153.
- 6 Dou Rensheng, Lin Hai, Hu Jicheng. Programmable lens and lenslet array by operating a liquid crystal device[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(7): 959-964.
窦任生, 林海, 胡继承. 控制液晶期间产生的程控微透镜和微透镜阵列[J]. 光学学报, 2005, 25(7): 959-964.
- 7 Liu Chunsheng, Zhang Tianxu, Zhang Xinyu. Opto-electronic correcting technology based on wavefront modulating[J]. Optical Technique, 2007, 33(s1): 1-3.
刘纯胜, 张天序, 张欣宇. 基于液晶光调制器的夏克-哈特曼波前探测技术[J]. 光学技术, 2007, 33(s1): 1-3.
- 8 P Harrison, G R G Erry, L J Otten, *et al.*. Closed loop adaptive optic comparison between a Shack-Hartmann and a distorted grating wavefront sensor[C]. SPIE, 2004, 5572: 235-246.
- 9 J Ungtae Rha, David G Voelz, Michael K Giles. Reconfigurable Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. Opt Eng, 2004, 43(1): 251-256.
- 10 G J Swanson, W B Velddkamp. Diffractive optical elements for use in infrared system[J]. Opt Eng, 1989, 28(6): 605-608.

栏目编辑:史 敏