

文章编号:1004-4213(2010)06-1014-7

LCOS 液晶波前校正器的色散研究*

刘肇楠^{1,2}, 李抄^{1,2}, 夏明亮^{1,2}, 李大禹¹, 宣丽¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:对液晶波前校正器的色散问题进行了研究, 测定了 250D 离焦、250D 像散两种像差镜和 650 nm、670 nm、710 nm、840~860 nm、835~865 nm、830~870 nm 五种滤光片下的色散. 结果表明: 可见到近红外波段内 20~30 nm 带宽的光是液晶自适应光学系统的理想光源, 可实现系统较大的能量利用率和较小的色散. 对于中心波长 850 nm 的近红外光, 当光源的带宽低于 30 nm 时, LCOS 的色散对系统像差影响较小, 可以忽略, 系统的光能利用率又较大; 一旦光源带宽高于 40 nm, LCOS 的色散会对系统的像差产生明显的影响, 使成像分辨率大大降低.

关键词:自适应光学; 液晶波前校正器; 色散; 能量

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103906.1014

0 引言

自 1953 年, Babcock 首次提出自适应光学的概念以来, 自适应光学技术已被广泛应用于提高对天体目标成像的分辨力和视网膜细胞尺度的观察等领域^[1-2]. 自适应光学系统主要由波前探测器、波前控制器和波前校正器组成, 典型的自适应光学系统是使用波前传感器探测入射光波前畸变, 然后通过控制器向波前校正设备发出控制信号, 控制可变形反射镜镜面的动作, 使镜面发生形变. 当镜面形状与畸变相位满足相位共轭关系时, 畸变就会被抵消掉, 从而波前得到恢复, 成像分辨率得到提高. 目前应用较为广泛的波前校正器包括: 压电陶瓷变形镜波前校正器, 液晶波空间光调制器(Liquid Crystal Spatial, LCOS)和微机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)波前校正器^[3].

LCOS 是一种反射式液晶波前校正器^[4-7], 与其他波前校正器相比, 它的优势主要体现在: 液晶工艺比较成熟^[8-9]、空间分辨率高、校正量大、加工周期短、体积小重量轻、无机械运动、价格低廉等方面. 但同时, LCOS 液晶波前校正器也存在着一些不足, 其中 LCOS 的色散是一个很主要的问题.

LCOS 的色散主要又两方面原因引起: 1) 由于液晶材料的色散^[10]而引起 LCOS 波前校正器的色

散; 2) 入射光波长偏离造成液晶校正器校正准确度和衍射效率的降低而引起的色散. 液晶材料的色散主要是由于液晶对不同波长光线的折射率不同引起的, 选定合适的中心波长是解决液晶材料色散的有效方法; 入射光波长偏离造成的色散是由于入射光具有一定带宽而引起的色散, 通常来说选择较窄带宽的入射光或者是单色光可以有效抑制这种色散, 但是窄带滤光会大大降低系统的光能利用率, 降低图像的对对比度, 因此选取适宜的带宽是最合理的解决方法.

1 液晶材料的色散特性

液晶材料的色散特性一直限制着液晶器件只能使用单色光源, 也促使很多人一直在研究液晶色散特性.

1.1 色散理论

S. T. Wu 利用量子力学理论推导得到液晶双折射色散公式^[11]

$$\Delta n = G(T) \frac{\lambda^2 \lambda^{*2}}{\lambda^2 - \lambda^{*2}} \quad (1)$$

Δn 是液晶分子长轴方向与短轴方向的折射率差值, T 是温度, λ^* 为电子振动跃迁波长, λ 为光照波长, $G(T) = gNZS(f_{\parallel}^* - f_{\perp}^*)$, g 是不依赖液晶的比例常量, N 是单位体积的液晶分子个数, S 是液晶的有序参量, Z 为 σ 或 π 电子数, 为电子沿分子轴向和径向的振动强度差. 这些参量单独确定是很困难的, 而通过实验确定 G 与 λ^* 是比较容易的.

式(1)可展开为

$$\Delta n \approx G\lambda^{*2} \left[1 + \left(\frac{\lambda^*}{\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\lambda^*}{\lambda} \right)^4 + \dots \right] \quad (2)$$

* 国家国家高技术研究发展计划(2007AA703417)、国家重点基金项目(60736042)和吉林省科技厅重点项目(20050321-2)资助

Tel: 0512-88606822

Email: IBM3162003@sina.com

收稿日期: 2009-01-06

修回日期: 2009-03-27

若入射的光波在红外,由于 $\lambda \gg \lambda^*$,可把式(2)写为 $\Delta n \approx G\lambda^{*2}$.只要利用实验测出两组 Δn 与 λ ,即可根据式(2)确立方程组,确定 G 与 λ^* .

1.2 液晶材料色散特性

图1是液晶在不同电压下的近紫外、可见光、近红外波段的色散特性.从图中可以看出,随着电压的升高 Δn 在逐渐减少,随着波长的增加 Δn 值在逐渐减少,在近紫外波段 Δn 变化比较陡峭,而在可见到红外波段变化比较缓慢.并且短波长的 Δn 值比长波长的 Δn 值大.说明液晶波前校正器在近紫外波段只能用于单色光的校正,在可见光区可以对一定程度的带宽进行校正及成像,而在近红外可以实现较宽波段的校正.由此得出结论,液晶校正器可以用于可见、近红外波段的一定带宽波段的校正.

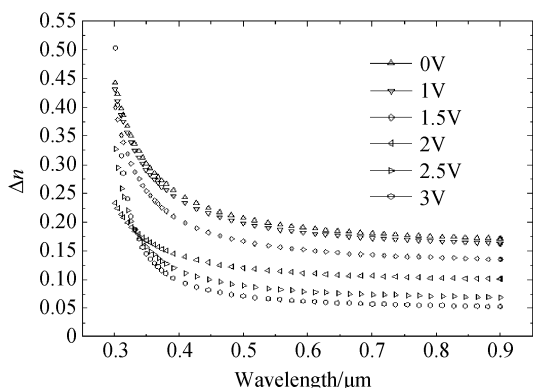


图1 液晶的色散特性
Fig.1 Dispersion of LC

2 LCOS 波前校正器的色散特性

液晶波前校正器是利用衍射光学的原理来实现波前校正的,且衍射特性决定器件的校正准确度.由于液晶材料存在色散特性,所以 LCOS 液晶波前校正器在对宽波段入射光进行校正时必然造成衍射效率和校正准确度的降低,导致成像清晰度降低.因此,为了在提高成像系统的能量利用率的同时又不降低系统的成像清晰度,选择适当带宽的入射光便显得尤为重要.

搭建基于 LCOS 液晶波前校正器的室内自适应光学成像系统,如图2.系统采用光纤作为照明光源和校正成像物体,光纤的线芯直径 $25\mu\text{m}$,系统衍射极限分辨率 $21\mu\text{m}$.光学系统中均采用双胶合消色差透镜,因此可认为光学系统本身不存在色散现象,图像的色散完全由 LCOS 引起.在光纤前加入滤光片对系统光源的带宽进行调节;由于 LCOS 色

散的影响和初始象差有关,象差越大,色散影响越大,因此在滤光片后面加入不同的像差镜,观察色散对波前校正准确度和成像清晰度的影响;由于 LCOS 液晶校正器只能对偏振光进行调制,在像差镜后加入偏振分光棱镜;为提高系统的光能利用率,在 LCOS 前的透镜采用了偏心的设计.在光路中,通过改变滤光片和像差镜进行 LCOS 的色散实验,实验分为离散波长和连续波长两部分.

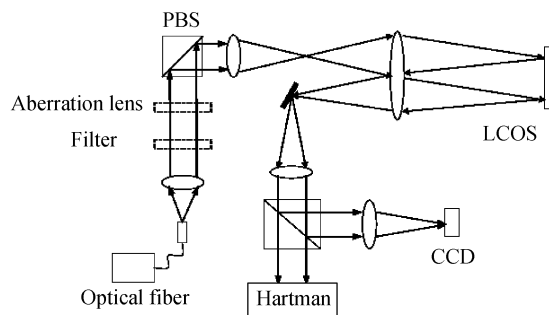


图2 液晶自适应光学系统光路
Fig.2 Optics design of LC AOS

2.1 离散波长

为观察不同像差对色散的影响,分别选用 250D 离焦和 250D 像散两种像差镜,分别进行校正实验,进行观察比较,从而使得出的结论更全面、客观.

2.1.1 离焦像差

在像差镜位置加入 250D 离焦像差镜.首先选用 670 nm 的滤光片,带宽 10 nm,将 670 nm 作为中心波长,此时 CCD 的成像效果和波前如图 3(a).然后进行自适应校正,得到的光纤图像及波前如图 3(b).校正前的 RMS 值是 1.55λ ,校正后的 RMS 值是 0.06λ .

将滤光片分别换为 650 nm 波长和 710 nm 波长,对 LCOS 施加此前针对 670 nm 波长的校正信号,分别对 650 nm 和 710 nm 光进行相对校正,得出他们的波前差.图 4(a)是 650 nm 波长校正后的光纤图和和相对测量波前图,可见校正后的光纤图与 670 nm 本身校正后的光纤图差别不大,波前的 RMS 值为 0.07λ ,像差很小,由此可见,使用 670 nm 波长的校正波面来校正 650 nm 的波前是完全可以实现的,色散影响不明显.图 4(b)是 710 nm 波长校正后的光纤图和相对测量波前图,可见校正后的光纤图与 670 nm 本身校正后的光纤图差别明显,波前的 RMS 值为 0.38λ ,像差较大,由此可见,使用 670 nm 波长的校正波面来校正 710 nm 的波前是不适合的,会产生较大的像差,色散现象明显.

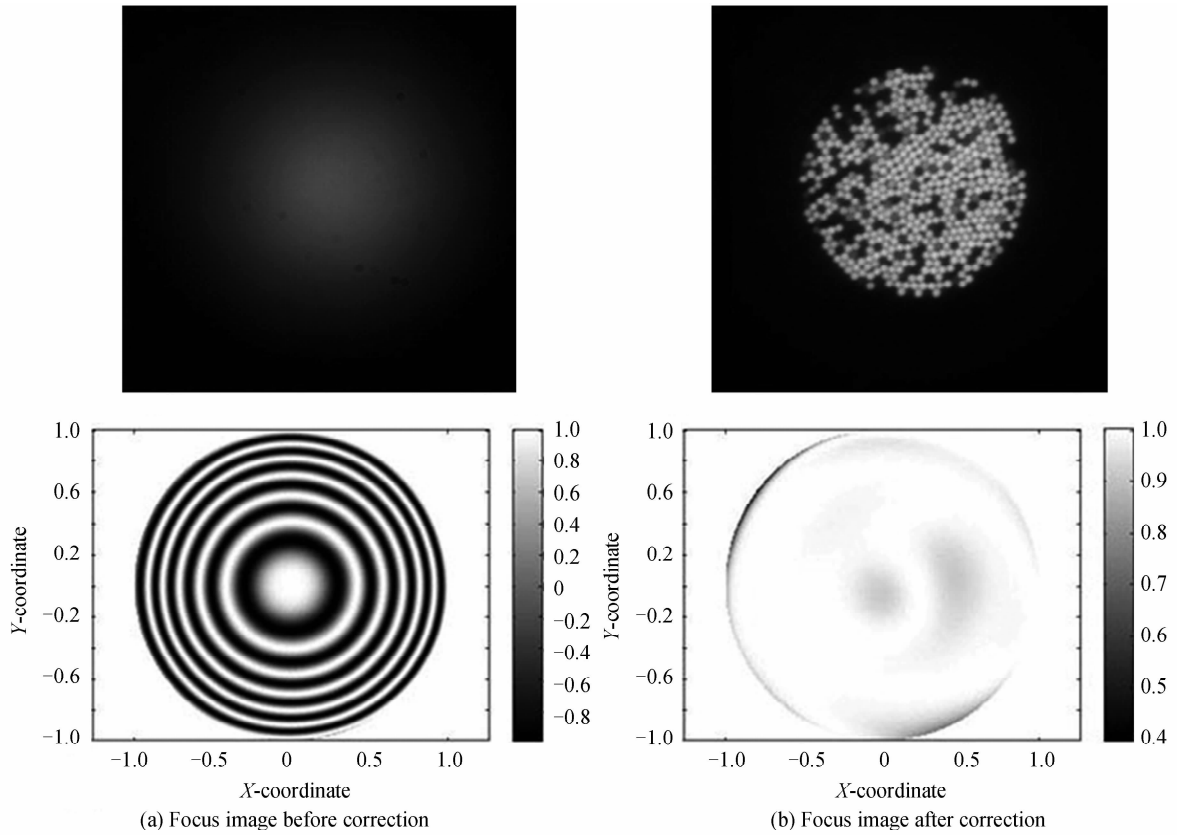


图3 670 nm 波长离焦像差自适应校正图

Fig. 3 After adaptive correction for focus in 670 nm

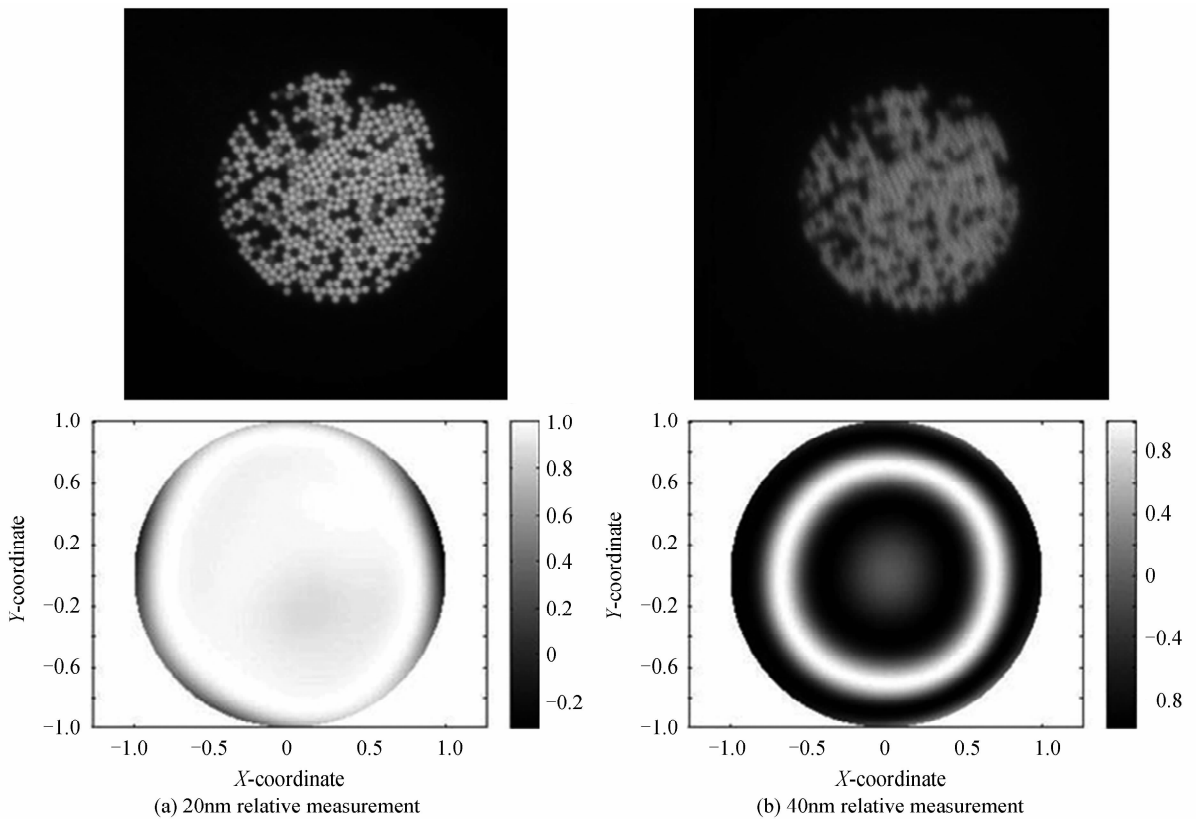


图4 650 nm、710 nm 离焦像差相对测量校正

Fig. 4 Relative measurement for focus in 650 nm, 710 nm

2.1.2 像散像差

加入 250D 像散像差镜, 采取与离焦像差同样

的方法. 首先选用 670 nm 的滤光片, 此时 CCD 的成像效果和波前如图 5(a). 然后进行自适应校正, 得

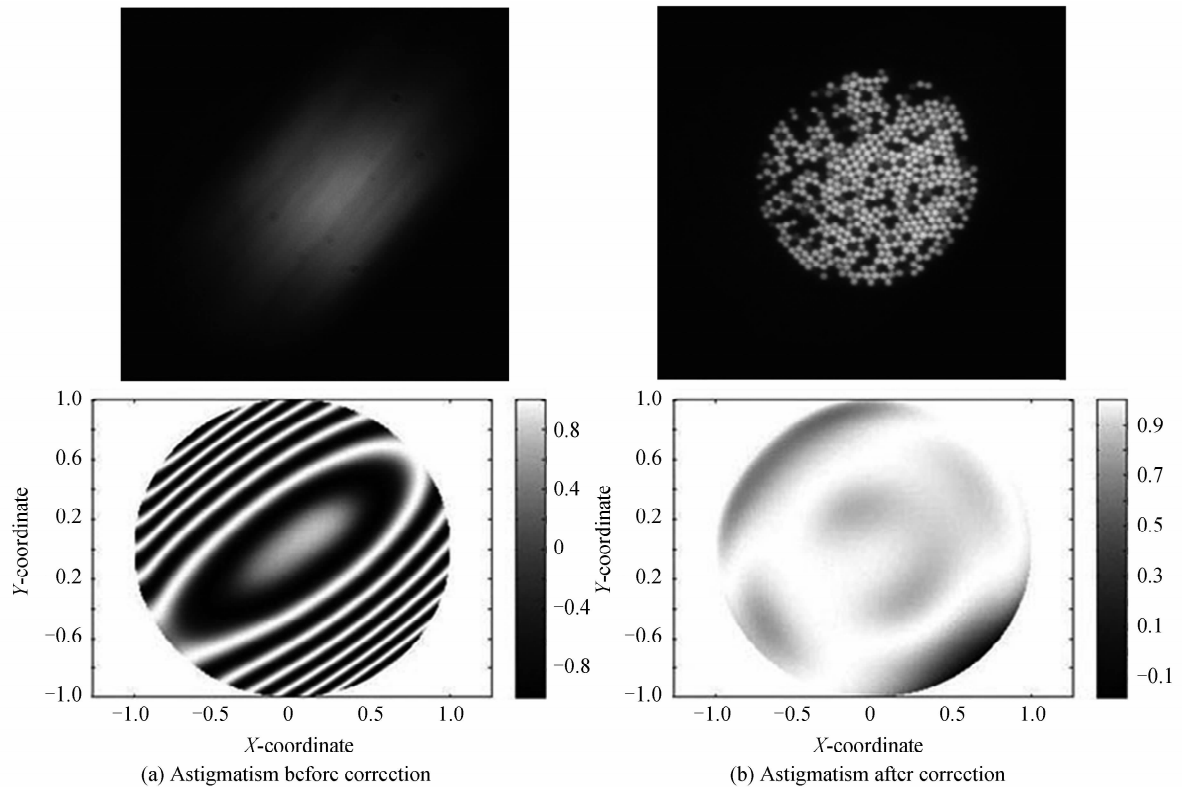


图 5 670 nm 波长象散自适应校正图

Fig. 5 After adaptive correction for astigmatism in 670 nm

到的光纤图像及波前如图 5(b). 校正前的 RMS 值是 1.44λ , 校正后的 RMS 值是 0.06λ , 可见系统的像差基本被消除.

同样的方法, 以 670 nm 波长的校正后波前作

为标准, 分别对 650 nm 和 710 nm 进行相对校正, 得出他们的波前差. 图 6(a) 是 650 nm 波长校正后的光纤图和和相对波前图, 可见校正后的光纤图与 670 nm 本身校正后的光纤图差别不大, 波前的

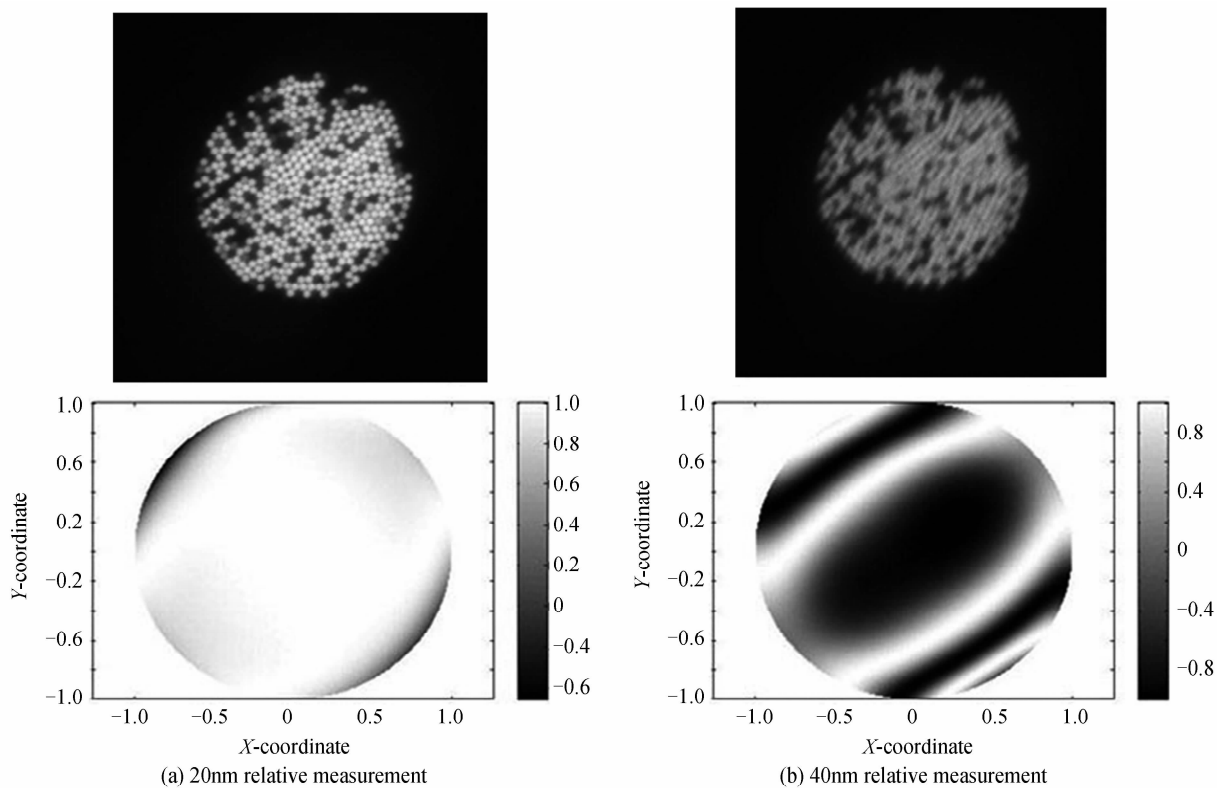


图 6 650 nm、710 nm 象散像差相对测量校正图

Fig. 6 Relative measurement for astigmatism in 650 nm, 710 nm

RMS 值为 0.08λ , 像差很小, 由此可见, 使用 670 nm 波长的校正波面来校正 650 nm 的波前是完全可以实现的, 色散现象不明显. 图 6(b) 是 710 nm 波长校正后的光纤图和波前图, 可见校正后的光纤图与 670 nm 本身校正后的光纤图差别明显, 波前的 RMS 值为 0.36λ , 像差较大, 由此可见, 使用 670 nm 波长的校正波面来校正 710 nm 的波前是不适合的, 会产生较大的像差, 色散现象明显.

2.2 连续波长

实验选取的是离散的单色光, 但在有实用价值的自适应成像系统中为了提高能量利用率, 一般采用的是带通滤光片, 滤出具有一定带宽的连续波段作为系统光源, 因此对连续波长色散的研究对自适应实验有更现实的指导意义.

同样选用 250D 离焦和 250D 像散两种像差镜, 选用中心波长为 850 nm , 带宽分别为 20 nm , 30 nm 和 40 nm 的三种滤光片进行实验, 比较校正波面和校正后的图像效果.

2.2.1 离焦像差

在像差镜位置加入 250D 离焦像差镜, 分别加入中心波长为 850 nm , 带宽为 20 nm , 30 nm , 40 nm 的滤光片, 进行自适应校正. 校正前的光纤图、校正后的光纤图像及校正后的波前如图 7, 校正前波前的 RMS 值为 1.54λ .

图 7(a) 为 20 nm 带宽的校正效果, 可见光纤细节清晰, 校正效果良好, 波前的 RMS 值为 0.065λ , 系统像差基本被消除; 图 7(b) 为 30 nm 带宽的校正效果, 光纤细节较清晰, 校正效果良好, 波前的 RMS 值为 0.07λ , 系统像差与 20 nm 带宽基本相同, 校正效果也很不错. 图 7(c) 为 40 nm 带宽的校正效果, 可见光纤边缘明显出现明显的模糊, 细节不清晰, 校正效果一般, 波前的 RMS 值为 0.20λ , 系统的像差较大, 校正效果不理想. 由此可见, 带宽低于 30 nm 的系统光由色散引起的像差很小, 可以忽略; 带宽高于 40 nm 的系统光由色散引起的像差较大, 不适合自适应校正.

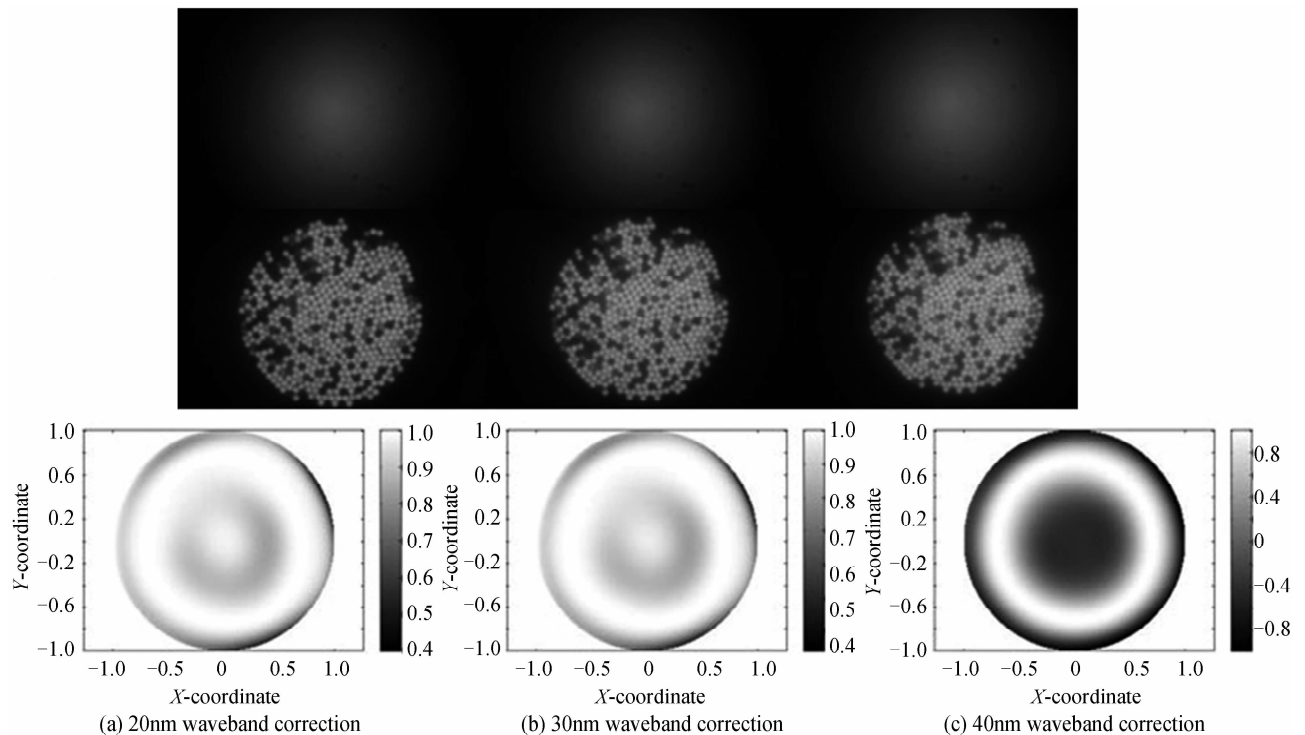


图 7 离焦像差 20 nm , 30 nm , 40 nm 自适应校正图

Fig. 7 After adaptive correction for focus in the waveband of 20 nm , 30 nm and 40 nm

2.2.2 像散像差

同样的方法, 在像差镜位置加入 250D 像散像差镜, 分别加入中心波长为 850 nm , 带宽为 20 nm , 30 nm , 40 nm 的滤光片, 进行自适应校正. 校正前的光纤图、校正后的光纤图像及校正后的波前如图 8.

图 8(a) 图为 20 nm 带宽的校正效果, 可见光纤细节清晰, 校正效果良好, 波前的 RMS 值为 0.07λ ,

系统像差基本被消除; 图 8(b) 图为 30 nm 带宽的校正效果, 光纤细节较清晰, 校正效果良好, 波前的 RMS 值为 0.075λ , 系统像差与 20 nm 带宽基本相同, 校正效果也很不错. 图 8(c) 图为 40 nm 带宽的校正效果, 可见光纤边缘出现明显的拖尾, 细节不清晰, 校正效果一般, 波前的 RMS 值为 0.31λ , 系统的像差较大, 校正效果不理想. 由此可见, 带宽为低于

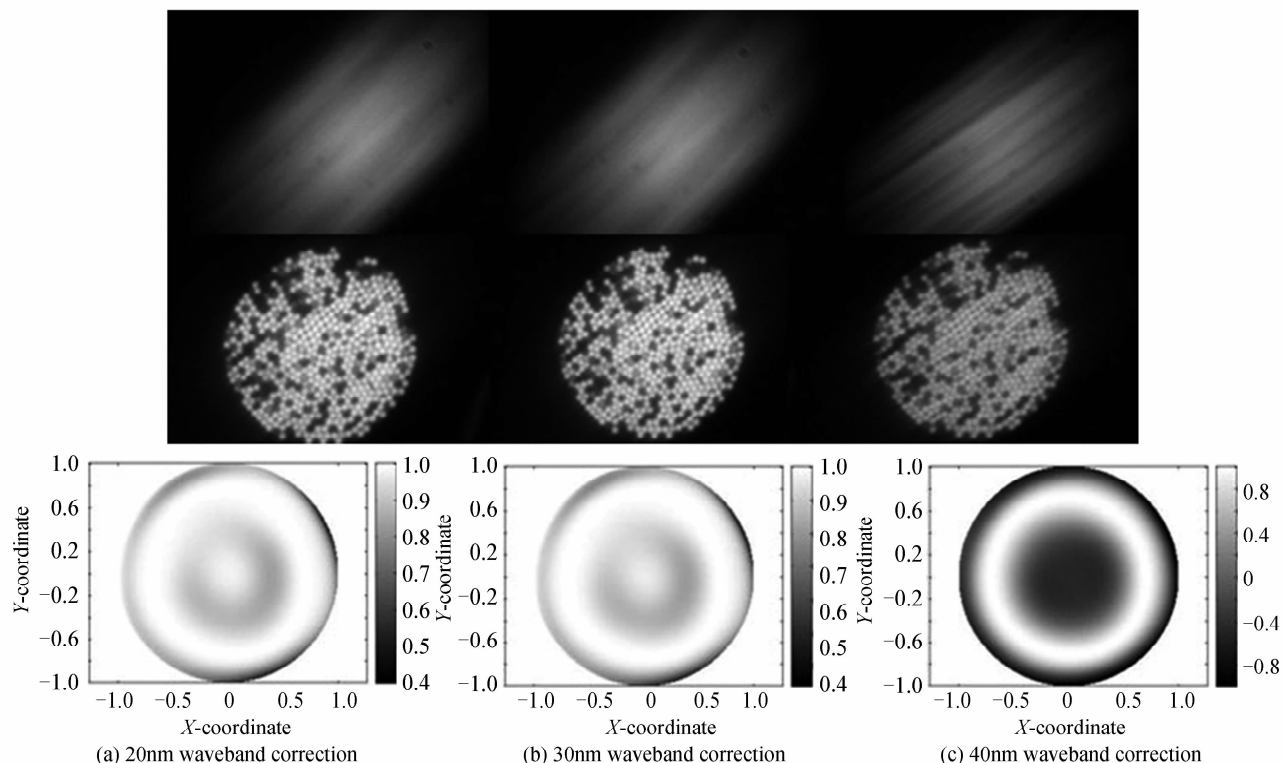


图 8 象散像差 20 nm、30 nm、40 nm 自适应校正图

Fig. 8 After adaptive correction for astigmatism in the waveband of 20 nm, 30 nm and 40 nm

30 nm 的光由色散引起的像差很小,可以忽略;带宽高于 40 nm 的光由色散引起的像差较大,不适合自适应校正。

3 结论

使用宽波段光源作为 LCOS 液晶自适应系统的照明光源,能有效的提高系统的能量利用率,提高成像的对比度.通过理论分析得出可在大部分的可见光区域内实现对宽波段光线进行自适应校正.经实验测得,对于中心波长 850 nm 的近红外光,当光源的带宽低于 30 nm 时,LCOS 的色散对系统像差影响较小,可以忽略,系统的光能利用率又较大;一旦光源带宽高于 40 nm,LCOS 的色散会对系统的像差产生明显的影响,使成像分辨率大大降低.此外,液晶材料在可见到近红外区的色散特性很接近,由此得出,带宽介于 20 nm~30 nm 的可见光及近红外光是 LCOS 液晶自适应系统的理想照明光源这一结论,对 LCOS 液晶自适应实验具有现实的指导意义。

由于实验条件限制,本文只分析了较大像差条件下(初始的系统相差 RMS 在 1.5λ 左右)LCOS 的色散情况,由于色散对校正效果的影响与初始像差有关,小像差条件下色散的影响有待于进一步实验研究.对于一个确定的自适应成像系统,当系统最大可能像差较小时,色散的影响将减小,从而可适当加

大系统光谱带宽,提高能量利用率。

参考文献

- [1] BABCOCK H W. The possibility of astronomical seeing[J]. *Publ Astron Soc Pac*, 1953, **65**(10):229-236.
- [2] TANG C W, VANSLYKE S A. Organic electroluminescent diodes[J]. *Appl Phys Lett*, 1987, **51**(12):913-915.
- [3] CHOONG V-EN, SHI S, CURLESS J, *et al.* Organic lightemitting diode with a bipolar transport layer[J]. *Appl Phys Lett*, 1999, **75**(2):172-174.
- [4] LIU Yong-jun, XUAN Li, HU Li-fa, *et al.* The wavefront modulation characteristics of the parallel aligned liquid crystal device [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1):65-68.
刘永军,宣丽,胡立发,等.平行排列液晶器件的波前调制特性[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1):65-68.
- [5] CAO Zhao-liang, HU Wu-sheng, HU Li-fa, *et al.* Application of the liquid crystal kinoform for optical testing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12):1941-1945.
曹召良,胡五生,胡立发,等.液晶全息图用于光学检测[J]. *光子学报*, 2006, **35**(12):1941-1945.
- [6] LIU Yong-jun, HU Li-fa, CAO Zhao-liang, *et al.* Liquid crystal atmosphere turbulence simulator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12):1960-1963.
刘永军,胡立发,曹召良,等.液晶大气湍流模拟器[J]. *光子学报*, 2006, **35**(12):1960-1963.
- [7] WANG Qiong-hua, CHENG Jian-bo. An achromatic twisted nematic liquid crystal polarization switch with a compensated film [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3):357-360.
王琼华,成建波.带有补偿膜的扭曲相列液晶宽带快速偏振光开关[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3):357-360.
- [8] ZHU Si-qi, PAN Wei, WANG Meng-yao. Effect of typical control parameters on ferroelectric liquid crystal optoelectronic velocity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2):218-221.
朱思奇,潘炜,王梦遥.典型控制参量对铁电液晶光电响应速度的影响[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2):218-221.

- [9] SHEN Su, SHE Jun. The optimized configuration for reflective twisted nematic liquid crystal displays by a novel method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 520-524.
申溯, 余俊. 一种反射式扭曲向列型液晶显示优化设计的新方法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 520-524.
- [10] REMENYI J, VARHEGYI P, DOMJANET L, *et al.* Amplitude, phase and hybrid ternary modulation modes of a twisted-nematic liquid-crystal display at 400 nm [J]. *App Opt*, 2003, **42**(17): 3428-3434.
- [11] WU S T. Infrared properties of nematic liquid crystals: an overview[J]. *Opt Eng*, 1987, **26**(2): 120-128.

Dispersion of Liquid Crystal Wavefront Correctors

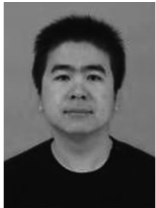
LIU Zhao-nan^{1,2}, LI Chao^{1,2}, XIA Ming-liang^{1,2}, LI Da-yu¹, XUAN Li¹

(1 *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The research on the dispersion of liquid crystal wavefront correctors is introduced, using the lens of 250D focus, 250D astigmatism and the narrow band filter of 650 nm, 670 nm, 710 nm, 840~860 nm, 835~865 nm, 830~870 nm. For the 850 nm near-infrared light, when the waveband below 30 nm, the dispersion of liquid crystal wavefront correctors has little affect to the system, which can be working with high energy; when the waveband over 40 nm, the affect will not be overlooked. Dispersion of liquid crystal of visible light is almost the same as near-infrared. As conclusion, the waveband that the liquid crystal wavefront correctors may correct with high energy and small dispersion is assured to be 30nm to 40 nm at visible range.

Key words: Adaptive optics; Liquid crystal wavefront correctors; Dispersion; Energy



LIU Zhao-nan was born in 1984. Currently, he is working for his M. S. degree, and his research interests focus on liquid crystal optics and adaptive optics.



XUAN Li was born in 1957. She received her Ph. D. degree from Tohoku University in 1998, and her research interests focus on application of liquid crystal optics, adaptive optics, physics of liquid crystal device, synthesis of liquid crystal and photochemistry.