

液晶校正器漏光对闭环校正波前探测准确度的影响*

曹召良¹, 胡五生², 穆全全¹, 胡立发¹, 李大禹¹, 彭增辉¹, 刘永刚¹, 鲁兴海¹, 宣丽¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

(2 济源职业技术学院, 河南, 济源 454650)

摘要:研究了液晶分子排列对哈特曼波前探测器探测及闭环校正的影响. 首先分析了分子排列对液晶校正器产生漏光强度的影响. 详细探讨了在闭环校正过程中漏光对波前探测及校正准确度影响, 当漏光比为 40% 时, 产生的探测偏离误差为 0.4; 对于 8% 的漏光比, 探测误差仅为 0.08, 可以忽略. 最后分别做了扭曲和平行排列液晶校正器对静态畸变的闭环校正实验. 对于漏光比为 40% 的扭曲液晶校正器, 校正前后的 PV 和 RMS 值分别为: 1.11 μm 、0.25 μm 和 1.08 μm 、0.24 μm , 说明漏光对闭环校正产生了严重影响. 对于漏光比为 8% 的平行排列液晶校正器, 通过闭环校正, 波前的 PV 和 RMS 分别从 1.58 μm 和 0.22 μm 降到 0.095 μm 和 0.03 μm , 同时获得清晰的光纤束的像. 结果表明, 如果能够控制液晶波前校正器的漏光占总光强的比在 8% 以下, 则可以获得高校正准确度.

关键词:光学器件; 自适应光学; 分子排列; 液晶波前校正器

中图分类号: TH74

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)08-2001-5

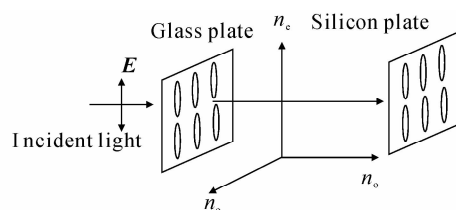
0 引言

液晶波前校正器由于具有驱动单元多、结构紧凑、无机械运动以及价格低廉而被人们广泛研究^[1-6]. 液晶波前校正器是利用液晶分子各向异性特性来实现对光的位相调制, 液晶分子的排列对液晶自适应光学系统影响较大. 比如扭曲排列液晶校正器^[7-9]同时对位相和光强进行调制, 而平行排列液晶校正器仅对位相进行调制. 作者已经分析了扭曲排列会产生不可调制漏光, 以至于影响液晶自适应光学系统的校正准确度和稳定性^[10]. 为此, 本文首先分析了液晶分子不同排列状态时产生漏光的原因和强度. 接着分析在闭环校正过程中液晶校正器漏光对哈特曼探测器探测波前准确度的影响, 给出了哈特曼探测器对漏光的容限误差. 最后利用实验验证分析的正确性. 通过该研究工作, 给出了液晶校正器的漏光容许条件, 为液晶校正器的使用提供依据.

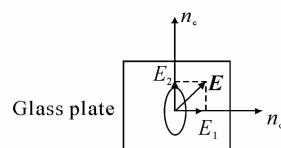
1 液晶校正器产生漏光原因分析

1.1 理论分析

液晶校正器利用液晶分子的转动来改变光的位相, 分子排列对液晶校正器特性影响极大. 本节从液晶分子平行排列入手, 分析液晶校正器产生漏光的原因, 给出分子排列形式与产生漏光的关系. 为了便于分析, 利用反射式硅基液晶屏作为分析模型如图 1.



(a) Structure of the parallel aligned liquid crystal wavefront corrector



(b) Electric field vector has an angle θ with the slow axis

图 1 平行排列液晶的位相调制

Fig. 1 Phase modulation of parallel alignment liquid crystal

对于平行排列的液晶分子(图 1(a)), 如果入射光的偏振方向平行于传播方向和液晶分子长轴组成的平面, 那么通过液晶层的光波保持线偏振状态、即以 e 光出射, 液晶校正器可以对该偏振光实现完全调制. 如果偏振方向与该平面成一定夹角(图 1(b)), 电矢量在垂直于该面的方向上便会有分量, 通过液晶层的光波变为椭圆偏振光, 从而导致入射光不能被完全调制, 产生不可调制漏光. 因此, 对于平行排列液晶校正器, 使用中应当保证入射光的偏振方向在液晶分子和传播方向组成的面内, 以消除漏光. 此外, 由于液晶分子本身的排列及运动特性, 其不可能形成完全一致的排列, 因此即使是入射光的偏振方向在液晶分子和传播方向组成的面内, 也会产生少量漏光.

* 国家自然科学基金(60736042、60578035 和 50473040)资助
Tel: 0431-86176319 Email: caozlok@yahoo.com.cn
收稿日期: 2008-06-05 修回日期: 2008-07-09

对于液晶分子的扭曲排列如图 2, 其分子长轴方向随着液晶层厚而改变. 假设入射光垂直于液晶屏且偏振方向与表层的液晶分子长轴方向一致, 那么入射光在表面液晶层可以被完全调制. 但是到了其它液晶层, 由于分子长轴方向改变, 导致入射光在这些层里不能被完全调制, 从而产生漏光.

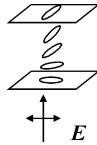


图 2 线偏振光入射的扭曲液晶波前校正器

Fig. 2 Twisted liquid crystal wavefront corrector with a polarized light

1.2 液晶校正器漏光测定

为了验证上述分析, 进行了液晶校正器的漏光测量实验. 为了分离出不可调制漏光, 预先在液晶校正器上施加一个闪耀光栅, 这样可调制光被衍射到一级, 漏光由于没有被调制, 仍然在零级位置. 然后利用小孔滤出一级和零级分别测量光强, 从而得到漏光所占的比例. 测量光路如图 3, 激光器发出 633 nm 的偏振光, 经小孔滤波器后变为球面波并被透镜准直, 然后入射到液晶校正器上; 液晶校正器把光反射到分束器并再次被分束器反射, 该反射光经透镜汇聚并经过小孔最后被光功率计探测.

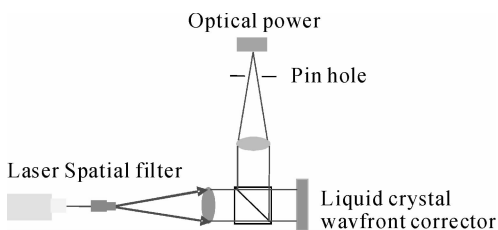


图 3 液晶校正器的光能利用率检测光路

Fig. 3 Optical layout for measurement of the utilization ratio of energy of the liquid crystal wavefront corrector

首先测量扭曲排列的液晶校正器的漏光, 测量结果显示漏光占总光强的 40%, 说明液晶分子扭曲排列产生漏光非常严重. 然后更换为平行排列液晶校正器, 再次测量后发现漏光占总光强的 8%, 可以看出平行排列时产生的漏光比例较小. 实验表明液晶分子的排列确实对漏光比例影响较大, 且平行排列产生漏光明显少于扭曲排列, 与预测相符.

2 漏光对闭环校正波前探测准确度的影响

2.1 哈特曼探测器工作原理

目前在自适应光学系统中应用最广泛的波前探测器是哈特曼波前探测器, 其由微透镜阵列和 CCD 相机组合而成. 哈特曼探测器是通过探测微透镜阵列焦点位置的偏移量来确定波前位相的分布. 如图

4, 以单个微透镜为例说明哈特曼的工作原理, 一束理想的平面波入射到微透镜并聚焦到后面的 CCD 面阵上, 其焦点位置可以根据微透镜像面处的光强分布利用质心算法求出, 然后被记录并存储在计算机里, 该位置称为参考位置. 如果入射的实际波面不是平面波, 其焦点位置便会发生偏移, 根据偏移量的大小及方向便可以计算出整个波面的位相分布. 从哈特曼探测器的工作原理可以看出, 微透镜聚焦成像的位置及光强分布决定探测波前的位相分布.

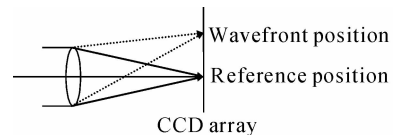


图 4 哈特曼探测器的工作原理

Fig. 4 Principle of the Shack-Hartman wavefront sensor

2.2 漏光对闭环校正影响分析

由前文分析知, 由于液晶分子的排列导致液晶校正器产生不可校正漏光, 其会在闭环校正过程中影响哈特曼的波前探测及闭环校正准确度. 以静态畸变校正为例具体分析如下: 闭环校正时, 先利用哈特曼探测器探测波前畸变量, 控制计算机根据畸变波前计算出控制信号, 然后发送给液晶波前校正器进行畸变的校正. 校正后的残差可以被哈特曼再次探测, 从而可以进行二次校正, 最终获得高校正准确度. 闭环校正开始后, 哈特曼探测第一幅波面时, 液晶波前校正器上没有施加校正信号, 相当于一个反射镜, 此时哈特曼探测器可以精确探测畸变波前, 且微透镜所成的像也只有一个畸变的像, 其位置记为畸变位置(图 5). 控制计算机根据畸变位置算出畸

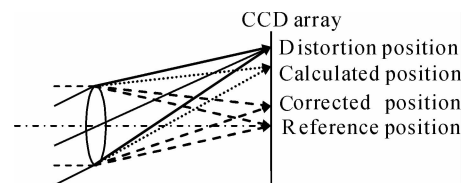


图 5 非调制光对探测的影响

Fig. 5 Effect of the unmodulated light on the detection

变波前, 重构出共轭校正信号, 然后利用该信号驱动液晶波前校正器进行波前校正. 此时由于在液晶波前校正器上施加了校正信号, 便产生了校正光和不可校正光. 对校正光来说, 经微透镜聚焦的位置要偏离畸变位置, 向理想位置移动, 记其位置为校正位置. 对于不可校正漏光, 其聚焦位置仍然在畸变位置处. 这样便发生了校正光和漏光位置的分离. 微透镜焦点位置是按照质心算法计算得到的, 即对调制光和非调制光的光强分布综合积分; 由于漏光的干扰, 使得计算出的焦点位置偏离校正位置, 称之为计算位置. 如果没有漏光干扰, 计算位置偏和校正位置重

合,哈特曼便可以给出正确的波前残差.由于漏光的干扰使计算位置偏离了校正位置,哈特曼探测器无法给出正确的波前,从而给液晶校正器发送错误的校正信号.液晶校正器利用错误校正信号进行二次校正,因此产生更大的校正误差,这样经过多次校正后,误差越来越大.这样便无法获得稳定校正和清晰成像.

2.3 漏光光强对探测准确度的影响

从上边的分析可以看出,由于微透镜焦点位置是先对光强积分再利用质心算法求得,因此漏光对波前探测的影响也可以归结为其光强分布对波前探测的影响.为了简化问题,如图6,把校正光光强

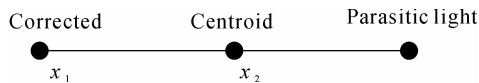


图6 误差分析模型

Fig. 6 Modal for error analysis

分布看成一个点,把漏光光强分布看成另外一个点,记校正光和漏光光强之和为1.根据两点位置及光强求质心,为了简化,仅对 x 坐标方向求质心,公式为

$$\bar{x} = (x_1 I_1 + x_2 I_2) / (I_1 + I_2) \quad (1)$$

式中, x_1 、 I_1 分别为校正光的坐标和光强, x_2 、 I_2 分别为漏光的坐标和光强, $I = I_1 + I_2$. 定义 I_2/I 为漏光比.以质心偏离校正位置的程度来评价漏光对波前探测的干扰程度

$$E_r = |(x_1 - \bar{x}) / (x_1 - x_2)| \quad (2)$$

式中 $|\dots|$ 为取绝对值.

根据式(1)和(2),求得漏光比从0变到1时对探测的影响如图7.可以看出,随着漏光比例增大,偏离误差呈线性增加趋势.当漏光比为8%的平行排列液晶校正器,造成的偏离误差为0.08.扭曲型液晶校正器的漏光比为40%,其产生的偏离误差为0.4.可以看出分子扭曲排列对波前探测的影响比平行排列严重的多.对于平行排列,漏光造成的影响小于0.1,认为可以近似忽略掉.

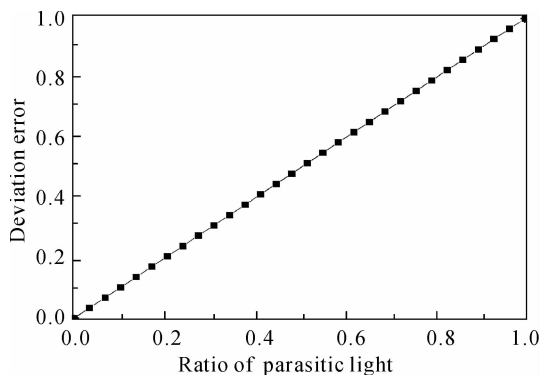


图7 影响光强比和偏离误差的关系曲线

Fig. 7 Deviation error as a function of the ratio of the effect intensity

2.4 扭曲型液晶校正器的闭环校正实验

为了验证分析的正确性,首先进行扭曲液晶校正器对静态畸变的闭环校正实验.扭曲液晶波前校正器为德国 Holoeye 公司 LCR-2500, 1024×768 像素,帧频 75 Hz,像素尺寸 $19 \mu\text{m}$.波前探测器是法国 Imagine Optic 公司的 HASO32.实验光路如图8,光纤输出波长 633 nm 的光经准直透镜后入射到

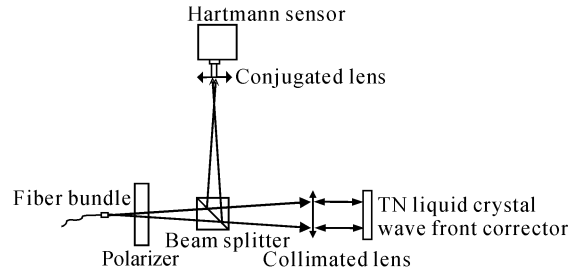
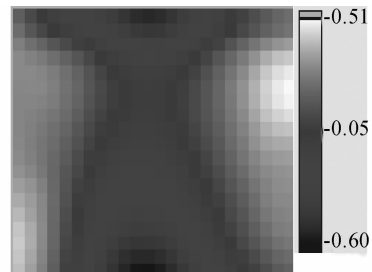


图8 自适应光学系统光路

Fig. 8 Optical layout of an adaptive optics system

液晶波前校正器上,经液晶波前校正器反射后被分束器反射到共轭透镜,最后进入哈特曼波前探测器.校正前,测得畸变波前的 PV 和 RMS 分别为 $1.11 \mu\text{m}$ 和 $0.25 \mu\text{m}$ (图9(a)).然后利用闭环控制



(a) Before correction: PV= $1.11 \mu\text{m}$ and RMS= $0.25 \mu\text{m}$



(b) After correction: PV= $1.08 \mu\text{m}$ and RMS= $0.24 \mu\text{m}$

图9 扭曲型液晶校正器对静态畸变校正的波前

Fig. 9 Static wavefronts corrected with twisted alignment liquid crystal wavefront corrector

软件进行闭环校正实验,图9(b)是校正后的波前, PV 和 RMS 分别为 $1.08 \mu\text{m}$ 和 $0.24 \mu\text{m}$,可以看出其和校正前的波前基本一致,说明没有校正效果.校正过程中波前 PV 的动态变化趋势如图10,可以看出,经第一次校正后 PV 值明显下降,然后校正残差逐渐增大,直到最后和畸变波前基本一致,彻底失去校正效果.分析认为:由于哈特曼探测器探测第一幅畸变波前时,液晶校正器上没有施加补偿信号,因此

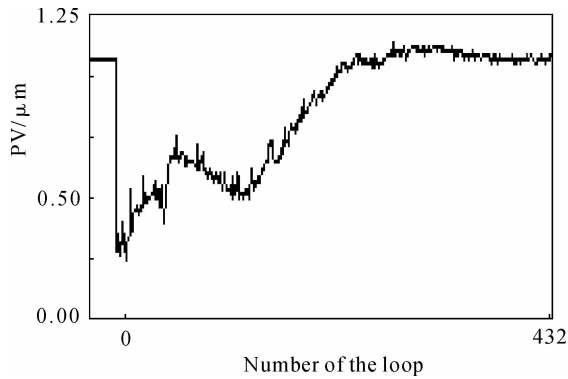


图 10 波前残差 PV 值的变化趋势

Fig. 10 Change trend of PV of the wavefront

可以准确探测出畸变波前. 当控制计算机把探测到的畸变波前转换为校正信号发送给液晶校正器后, 便产生了校正光和漏光的分离, 导致哈特曼探测器探测到的第二幅波前准确度下降, 但是此时校正光和漏光分离的距离较小, 因此虽然有探测误差, 但是和校正前相比, PV 值还是有明显下降趋势. 由于液晶校正器采用相息图技术[11]靠光的衍射来实现波前校正, 因此衍射效率非常关键. 随着校正次数的增加, 探测误差也越来越大, 因此就给液晶校正器施加更大的校正信号, 导致施加在液晶校正器上的相息图的条纹变密, 量化级次减小, 衍射效率急剧降低. 这样校正光的能量便向四周发散, 而漏光不受相息图的影响, 光强不变, 由于校正光减弱, 相当于漏光增强, 因此探测误差加大, 从而导致校正后波前的 PV 值逐渐增大. 最后, 直至校正光几乎完全被发散到四周, 相当于仅探测到漏光, 因此此时校正后的波前和校正前基本一致. 此时液晶波前校正器已经没有校正效果, 因此闭环校正显示出稳定的校正状态, 但是校正后波前残差和闭环校正前的波前畸变基本一致.

2.5 平行排列液晶校正器校正实验

为了对比分析扭曲和平行排列的影响程度, 做了平行排列液晶校正器对静态畸变的闭环校正实验. 实验中用的液晶波前校正器为美国 BNS 公司的 PFP512 液晶空间光调制器, 其漏光比为 0.08. 在实验室进行闭环校正, 校正前测得畸变波前的 PV 和 RMS 分别为 1.58 μm 和 0.22 μm, 同时系统成像模糊不清(图 11(a)). 然后开启闭环控制软件进行闭环校正, 校正后波前残差的 PV 和 RMS 分别为 0.095 μm 和 0.03 μm, 且校正后光纤束的纤芯也清晰可辨(图 11(b)). 这说明, 在漏光比小于 0.08 时, 漏光对探测的影响基本可以忽略, 系统可以获得较好的校正准确度以及清晰的像. 因此, 如果能够控制漏光的光强和总光强之比小于 0.08, 便可以直接对该光束进行探测、校正和成像.

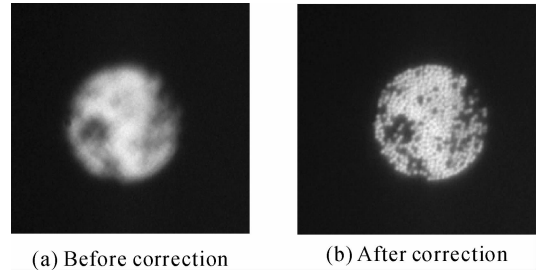


图 11 系统成像

Fig. 11 Image of the object

3 结论

本文主要探讨了液晶分子排列对哈特曼探测器探测准确度以及校正效果的影响. 首先分析了液晶校正器产生漏光的原因, 给出液晶分子排列状态对液晶校正器漏光的影响程度, 并认为扭曲排列产生的漏光较强. 接着结合哈特曼的工作原理以及闭环校正特点分析了液晶校正器漏光对波前探测准确度的影响, 得出在液晶校正器上施加校正信号后会产生校正光和漏光的分离, 从而产生探测误差. 并以两点质心计算模型分析了漏光强度和探测误差之间的关系. 最后, 分别进行了扭曲和平行排列液晶校正器的静态畸变校正实验, 验证了理论分析. 结果表明, 为了避免漏光对闭环校正的影响, 可以通过不同手段来控制液晶波前校正器的漏光, 使得其占总光强的比低于 8%.

本文仅分析漏光对波前探测的影响, 并得到扭曲型液晶校正器漏光严重的结论, 但这并不能说明扭曲型液晶校正器无法使用. 对于扭曲型液晶校正器, 文献[10]提出利用在液晶校正器上施加一闪耀光栅的方法彻底滤除漏光[10]. 但是该方法的缺点是能量利用率低. 因此, 为了获得高能量利用率, 应尽量选取平行排列液晶校正器. 如果能量损失对光学系统没有影响, 如可以人为的加大光坊率来弥补能量损失, 则可以利用扭曲液器校正器获得良好的校正效果.

参考文献

- [1] LOVE G D. Wave-front correction and production of zernike modes with a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(7): 1517-1524.
- [2] LIU Yong-jun, XUAN Li, HU Li-fa, *et al.* The investigation of controllable phase liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1799-1802. 刘永军, 宣丽, 胡立发, 等. 相位可控液晶空间光调制器的研究 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1799-1802.
- [3] 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. 平行排列液晶空间光调制器的光学特性 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 65-68.

- [4] CAO Zhao-liang, MU Quan-quan, HU Li-fa, *et al.* Resolution of the simulated twin stars with liquid crystal adaptive correction [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 785-788.
曹召良,穆全全,胡立发,等. 模拟双星的液晶自适应校正分辨[J]. *光子学报*, 2008, **37**(4): 785-788.
- [5] DAYTON D, BROWNE S, GONGLEWSKI J. Increasing the bandwidth of a liquid crystal phased array adaptive optics system[C]. *SPIE*, 2005, **5894**: 58940M-1-58940M-6
- [6] CAO Z L, MU Q Q, HU L F, *et al.* Diffractive characteristics of the liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Physics*, 2007, **16**(6): 1665-1671.
- [7] GE A M, SUI Z, XU K S. Research on characteristics of amplitude modulation of a reflective liquid crystal on silicon device[J]. *Acta Physica Sinica* 2003, **52**(10): 2481-2485.
- 葛爱明,隋展,徐克瑞. 反射型 LCOS 器件纯相位调制特性的研究[J]. *物理学报* 2003, **52**(10): 2481-2485.
- [8] DOU R, GILES M K. Closed-loop adaptive-optics system with a liquid-crystal television as a phase retarder[J]. *Optics Letters* 1995, **20**:1583-1585.
- [9] YAMAUCHI M, EIJU T. Optimization of twisted nematic liquid crystal panels for spatial light phase modulation[J]. *Opt Commun*, 1995, **115**:19-25.
- [10] CAO Z L, MU Q Q, DOVILLAIRE G, *et al.* Effect of the twisted alignment on the liquid crystal wave-front corrector [J]. *Liquid Crystals*, 2007, **34**(10): 1227-1232.
- [11] CAO Z L, XUAN L, HU L F, *et al.* Effects of the space-bandwidth product on the liquid-crystal kinoform [J]. *Opt Express*, 2005, **13**(14): 5186-5191.

Effect of Parasitic light of Liquid Crystal Wavefront Correctors on the Accuracy of Wavefront Sensing in the Closed Loop Process

CAO Zhao-liang¹, HU Wu-sheng², MU Quan-quan¹, HU Li-fa, LI Da-yu¹, PENG Zeng-hui¹,
LIU Yong-gang¹, LU Xing-hai¹, XUANG Li¹

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

(2 Jiyuan Vocational and Technical Colledge, Jiyuan, Henan 454650, China)

Abstract: Effects of liquid crystal molecules alignment on the detection of Shack-Hartmann wavefront sensor and closed loop correction are investigated. The effect of molecule alignment on the intensity of parasitic light is analyzed. The effect of parasitic light on detection and correction accuracy was specially discussed among the closed loop correction. With the ratio of parasitic light of 40%, the detection deviation error is 0.4; while the ratio of parasitic light is 8%, the deviation error just have 0.08, and it may be neglected. And the closed loop correction of static distortion was individually done with twisted and parallel alignment LC WFC. To the twisted alignment, PV and RMS were changed from 1.11 μm and 0.25 μm to 1.08 μm and 0.24 μm . It indicates that the parasitic light causes the serious effect on the closed loop correction. For parallel alignment, with the closed loop correction, PV and RMS are reduced from 1.58 μm and 0.22 μm to 0.095 μm and 0.03 μm respectively, and the resolvable image of the fiber bundle is also achieved. The results show that, if the intensity of parasitic light is lower than 8%, high correction accuracy can be obtained.

Key words: Optical devices; Adaptive optics; Alignment of molecule; Liquid crystal wavefront corrector



CAO Zhao-liang obtained his Ph. D. degree at 2008. His research interests focus on liquid crystal adaptive optics, optical design and diffractive optics.