



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102073136 A

(43) 申请公布日 2011. 05. 25

(21) 申请号 201010605114. 0

(22) 申请日 2010. 12. 24

(71) 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130033 吉林省长春市东南湖大路
3888 号

(72) 发明人 宣丽 穆全全 曹召良 胡立发
彭增辉 刘永刚 李大禹 鲁兴海

(74) 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所 22210

代理人 赵炳仁

(51) Int. Cl.

G02B 26/06 (2006. 01)

G01J 9/00 (2006. 01)

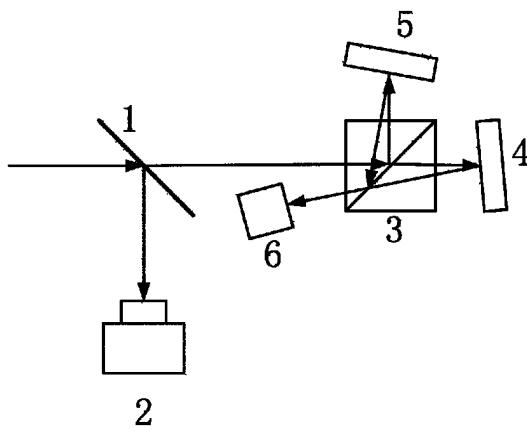
权利要求书 2 页 说明书 5 页 附图 2 页

(54) 发明名称

液晶自适应光学系统能量优化分配方法

(57) 摘要

本发明属于自适应光学领域，涉及液晶自适应光学系统中校正成像支路与波前探测支路之间的光能量优化分配方法。基本思想是将探测支路与校正成像支路的偏振分光设计改为光谱分光，按照两支路接收端器件的响应信号强度比为1：1计算分光波长。将波段较宽易产生色散的、波前畸变变化速度较快的短波段光能分给探测支路，而将波段较窄不易产生色散的、波前畸变变化速度相对缓慢的长波段光能分给校正成像支路。进入校正成像支路的光再用PBS偏振分束器分为两路偏振光，相应设置两个液晶校正器；校正后合束成像。本发明可以大幅提高液晶自适应光学系统的探测能力，并相对提高其校正速度。



1. 一种液晶自适应光学系统能量优化分配方法,其特征是:

将探测支路与校正成像支路的偏振分光方法改为光谱分光,根据探测支路与校正成像支路中接收端器件的曝光时间以及量子转化效率,按照器件的响应信号强度比为1:1计算分光波长;将波段较宽易产生色散的、波前畸变变化速度较快的短波段光能分配给探测支路,将波段较窄不易产生色散的、波前畸变变化速度相对缓慢的长波段光能分配给校正成像支路;

据此,所使用的基本光路主要包括:长波通分色片(1),哈特曼波前探测器(2),PBS偏振分束器(3),第一液晶校正器(4),第二液晶校正器(5),成像CCD(6);通过长波通分色片(1)将望远镜接收的光分为两束,反射的短波段光束进入色散效应可以忽略的哈特曼波前探测器(2),透射的长波段光束进入PBS偏振分束器(3)后,又被分成透射P偏振光和反射S偏振光;在平行P偏振方向放置第一液晶校正器(4),在S偏振方向放置第二液晶校正器(5),并使第一液晶校正器(4)的液晶取向方向对应P偏振光的偏振方向,第二液晶校正器(5)的液晶取向方向对应S偏振光的偏振方向;经两个校正器校正后的P、S偏振光束被反射回PBS偏振分束器(3),出射后两光轴重合合束,且以反向2°~3°的倾斜角到达成像CCD(6)成像。

2. 根据权利要求1所述的液晶自适应光学系统能量优化分配方法,其特征是:

将第一液晶校正器(4)和第二液晶校正器(5)校正后出射的两束光精确合束,第一、第二液晶校正器与哈特曼波前探测器(9)精确对准;

所述的精确合束过程,使用的光路还包括:第一透镜(8)、第二透镜(10)、第三透镜(11)、第四透镜(9)、第五透镜(12),第一反射镜(13),存储有自适应控制软件的工控机(14),其中,工控机(14)与哈特曼波前探测器(2)、第一液晶校正器(4)、第二液晶校正器(5)、成像CCD(6)相连;光束通过第一透镜(8)后成为平行光到达长波通第一分色片(1),使短波段的光束反射、长波段的光束透射;被反射的短波段的光束依次通过第二透镜(10)、第三透镜(11)形成直径与哈特曼波前探测器(2)接收口径相同的光束而全部进入哈特曼波前探测器(2),哈特曼波前探测器(2)探测望远镜接收光的波前像差;从长波通第一分色片(1)透射的长波段的光束,依次通过第四透镜(9)、第五透镜(12),使光束调整为直径与第一液晶校正器(4)和第二液晶校正器(5)接收口径相同的平行光,同时第五透镜(12)的轴线相对第四透镜(9)的轴线下移4mm~5mm,即光轴一与光轴二的间距为4mm~5mm,使得通过第五透镜(12)的光束为偏心入射,从第五透镜(12)出射光束产生2°~3°的倾斜;从第五透镜(12)出射光束以2°~3°入射角进入PBS偏振分束器(3)被分成透射P偏振光和反射S偏振光,分别在平行P偏振方向设置第一液晶校正器(4)和在平行S偏振方向设置第二液晶校正器(5)的e光光轴,即液晶取向方向;经第一液晶校正器(4)和第二液晶校正器(5)校正后的P、S偏振光束被反射回PBS偏振分束器(3);从PBS偏振分束器(3)出射后两光束重合合束,且以反向2°~3°的倾斜角再次到达第五透镜(12),此时,光轴二与光轴三的间距为4mm~5mm;在第五透镜(12)与成像CCD(6)之间加入一个与光轴三成45°角的第一反射镜(13),使合束后的光折束90°并聚焦在成像CCD(6)上;工控机(14)存储有自适应控制软件,将哈特曼波前探测器(2)中的波前光学信号读出,处理为Zernike模式表示的波前像差,将波前像差发送给第一液晶校正器(4)和第二液晶校正器(5),使二者分别校正P偏振光和S偏振光中的像差;启动成像CCD(6)拍摄,并控制其曝光

时间；

所述的精确对准过程，使用的光路还包括：第二反射镜（15），纸屏（16）；在成像 CCD（6）前置入与光轴三成 45° 的第二反射镜（15），此时第一反射镜（13）与第二反射镜（15）互相垂直，使聚焦光斑转向垂直方向，并标记焦点位置；将点光源（7）放置在标记的焦点位置处，用短波通分色片（1'）替代长波通分色片（1），使得通过液晶校正器的长波段的光束被短波通分色片（1'）分离出来，使点光源（7）发出的通过第一液晶校正器（4）和第二液晶校正器（5）的短波光束都能到达哈特曼波前探测器（2）；首先将纸屏（16）插入 PBS 偏振分束器（3）和第二液晶校正器（5）之间，截断第二液晶校正器（5）的光束并保证只有第一液晶校正器（4）的光束进入哈特曼波前探测器（2），将第一液晶校正器（4）的响应信号存入工控机（14）的数据库中；然后将纸屏（16）插入 PBS 偏振分束器（3）和第一液晶校正器（4）之间，截断第一液晶校正器（4）的光束并保证只有第二液晶校正器（5）的光束进入哈特曼波前探测器（2），将第二液晶校正器（5）的响应信号存入工控机（14）的数据库中；完成这两个校正器件在标准 Zernike 模式驱动信号下的探测器响应信号测量后，对望远镜的观测目标进行自适应校正成像。

3. 根据权利要求 2 所述的液晶自适应光学系统能量优化分配方法，其特征是所用的长波通分色片（1）和短波通分色片（1'）分色波长 $\lambda = 700\text{nm}$ ，所述的长波段的波长为 $700\text{nm} \sim 950\text{nm}$ 。

4. 根据权利要求 2 所述的液晶自适应光学系统能量优化分配方法，其特征是：

1) 所用的第一透镜（8）、第二透镜（10）、第三透镜（11）、第四透镜（9）均为双胶合消色差透镜，且表面镀有增透膜，口径均为 20mm，焦距分别为 200mm、200mm、100mm、200mm；第五透镜（12）的口径为 50mm、焦距分别为 200mm；

2) 所用的哈特曼波前探测器（2）的接收孔径为 3mm；

3) 所用的第一反射镜（13），面积 $15\text{mm} \times 15\text{mm}$ ，厚度为 1.5mm，反射率大于 98%；

4) 所用的第一液晶校正器（4）、第二液晶校正器（5）均为 LCOS 型液晶校正器， $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的方形窗口，象素数 256×256 ，位相调制深度是入射光中心波长的 $0.95 \sim 1.1$ 倍；

5) 所用的 PBS 偏振分束器（3），尺寸为 $25\text{mm} \times 25\text{mm} \times 25\text{mm}$ ，分光波段在 $680\text{nm} \sim 980\text{nm}$ ；

6) 所用的成像 CCD（6）为英国 ANDOR 公司生产的型号为 DV897，像素数 512×512 ，在波长为 950nm 处量子转换效率还有 25%；

7) 所用的长波通分色片（1）和短波通分色片（1'），口径均为 20mm；

8) 指令工控机（14）依据响应矩阵处理哈特曼波前探测器（2）给出的系统像差，分别驱动第一液晶校正器（4）和第二液晶校正器（5）校正 P 偏振光和 S 偏振光中的像差。

液晶自适应光学系统能量优化分配方法

技术领域

[0001] 本发明属于自适应光学技术领域,涉及液晶校正器、哈特曼波前探测器、自适应光学控制器、分色片和 PBS 分束器等光学元件的组合,具体地说是一种在液晶自适应光学系统中使校正成像支路与波前探测支路之间的光能量优化分配方法。

背景技术

[0002] 光波前自适应校正系统的功能是对入射光的畸变波前进行实时补偿校正,得到理想的光学成像。

[0003] 液晶自适应光学系统的液晶校正器采用微电子技术,利用液晶器件高像素密度的特点,校正精度高,制备工艺成熟,因此液晶校正器的自适应系统具有很大的应用潜力。但液晶校正器须在偏振光中工作,如果自适应系统设计为通常的闭环自适应校正模式,能量利用率将减低 50%。在“无偏振光能量损失的液晶自适应光学系统”(中国专利, ZL 200610173382) 中提出了一项开环液晶自适应光学系统的技术,解决了液晶自适应光学系统 50% 的偏振能量损失问题。

[0004] 所说的闭环自适应校正系统是光束先通过偏振片、校正器,然后被分为两路,一路用于探测,一路用于成像,且两路的能量均为入射光能的 25%。而开环自适应校正系统是用 PBS 偏振分束器先将入射光分为两路偏振光,则大约 50% 的能量用于探测,另外 50% 的能量用于波前校正后进入 CCD 成像。所以开环液晶自适应校正系统能量利用率较高。

[0005] 但是,开环自适应校正系统中测量液晶校正器对 Zernike 模式的响应矩阵时,需将前述的自适应校正系统中的 PBS 偏振分束器做一次旋转以将光路切换至内置光源,待响应矩阵测试完成后再将 PBS 旋转复原。由此带来的复位误差对成像效果影响比较大。要减小这个影响,需对转动器件的转动结构精度提出很高要求,很难做到。为此,在专利公报上公开的“兼具开环与闭环的液晶自适应光学系统”的技术方案(公开号 CN101726848A),解决了这个问题。

[0006] 尽管如此,液晶自适应校正系统能够成像的星等仍然比预想的低,即要求成像物体的光强度较高,暗星看不到。进一步寻找造成这种结果的根源,是校正成像支路与波前探测支路之间的光能量分配不合理,没有考虑两支路上的接收器即相机的曝光极限时间不同。

[0007] 大气湍流的变化速度通常在 50Hz 上下,那么自适应系统的校正速度需在湍流速度的 6 倍以上才能看到明显的校正效果。自适应系统的工作步骤主要有三步,即:波前探测器的信号探测——信号的传输与处理——驱动波前校正器工作,这一周期的时间延迟通常要短于 3ms,当然每个步骤也只能有 ms 级的耗时,因此波前探测器的曝光时间即限定为 1ms 左右。然而成像相机是位于波前校正器之后的,接收的是校正好的成像光,按照被成像物体的运动速度通常可以曝光上百 ms。既然探测器与成像相机的曝光时间有近百倍的区别,那么对探测支路与校正成像支路的分光就不应该是 1 : 1 的,而应该有一个光能量的优化分配。

发明内容

[0008] 综上分析,为了解决在液晶自适应光学系统中探测支路与校正成像支路的时间问题,本发明提出在校正成像支路与波前探测支路之间的光能量优化分配模式,目的是提供一种液晶自适应光学系统能量优化分配方法,使液晶自适应光学系统的校正成像支路与波前探测支路之间的光能量分配合理,可以大幅提高液晶自适应光学系统的探测能力,并相对提高其校正速度。

[0009] 本发明的基本思想是:将探测支路与校正成像支路的偏振分光方法改为光谱分光。考虑两支路接收端器件的曝光时间以及量子转化效率,按照两器件的响应信号强度比为1:1计算分光波长。由于哈特曼波前探测器的色散很小、响应速度相对液晶校正器快得多,故将波段较宽易产生色散的、波前畸变变化速度较快的短波段光能分给探测支路,而液晶校正器的色散较严重、响应速度相对哈特曼波前探测器慢,故将波段较窄不易产生色散的、波前畸变变化速度相对缓慢的长波段光能分配给校正成像支路。进入校正成像支路的光再用PBS偏振分束器再次分为两路偏振光,在两路偏振光路上分别设置液晶校正器。校正后的偏振光合束,然后进入成像相机成像。

[0010] 为了更好地理解本发明,下面详述本发明使用的光路,如图1所示。考虑望远镜接收的光谱范围在可见光-近红外波段,而对应可见-近红外波段有很成熟的CCD相机,因此光谱范围选择可见光-近红外波段。将望远镜接收的光首先通过长波通分色片1进行短波和长波的两段光谱分光,短波段的光能全部进入哈特曼波前探测器2,而长波段的光能全部进入校正成像光路。短波段与长波段的光能分配通过改变长波通分色片1的分光波长来优化控制,即在考虑探测器与成像相机的曝光时间的条件下,按照两支路接收端器件的响应信号强度比为1:1原则计算长短波段的分光波长。哈特曼波前探测器2给出短波段的畸变位相波前,由于哈特曼波前探测器2的色散很小,通常可以忽略,即可将短波段的畸变位相波前等同于校正成像光路的长波段的畸变位相波前。在校正成像光路上,由于液晶校正器只能对偏振光即e光进行校正,而对o光没有校正效果,首先通过PBS偏振分束器3将入射到校正成像光路的光分成S偏振光和P偏振光,并分别在平行S偏振方向和P偏振方向设置第一液晶校正器4和第二液晶校正器5的e光光轴即液晶的取向方向。最后将从第一液晶校正器4和第二液晶校正器5出射的校正后的两束光束合束,使合束光进入成像CCD6成像。

[0011] 本发明的关键技术是从液晶校正器校正后出射的两光束精确合束、以及两液晶校正器分别与哈特曼波前探测器的精确对准方法。为此提出如图2所示的光路设计方法:考虑望远镜接收的光谱范围在可见光-近红外波段,望远镜的出射焦点与第一透镜8的前焦点重合即共焦,因此光束通过第一透镜8后成为平行光,并将望远镜的出瞳成像到长波通第一分色片1上,长波通第一分色片1使短波段的光束反射、长波段的光束透射。被反射的短波段的光束依次通过第二透镜10、第三透镜11形成直径与哈特曼波前探测器2的接收口径相同的光束而全部进入哈特曼波前探测器2,哈特曼波前探测器2的作用是探测望远镜接收光的波前像差。另外从长波通第一分色片1透射的长波段的光束,依次通过第四透镜9、第五透镜12,使光束调整为直径与第一液晶校正器4和第二液晶校正器5接收口径相同的平行光,同时第五透镜12的轴线相对第四透镜9的轴线下移4mm~5mm,即光轴一与

光轴二的间距为 4mm ~ 5mm,使得通过第五透镜 12 的光束为偏心入射,从第五透镜 12 出射光束产生 $2^\circ \sim 3^\circ$ 的倾斜。从第五透镜 12 出射光束以 $2^\circ \sim 3^\circ$ 入射角进入 PBS 偏振分束器 3 被分成透射 P 偏振光和反射 S 偏振光,分别在平行 P 偏振方向设置第一液晶校正器 4 和在平行 S 偏振方向设置第二液晶校正器 5 的 e 光光轴,即液晶取向方向。经第一液晶校正器 4 和第二液晶校正器 5 校正后的 P、S 偏振光束被反射回 PBS 偏振分束器 3,从 PBS 偏振分束器 3 出射后两光束重合合束,且以反向 $2^\circ \sim 3^\circ$ 的倾斜角再次到达第五透镜 12,此时,光轴二与光轴三的间距为 4mm ~ 5mm。为了将从第五透镜 12 出射的光束经过一段距离后能与入射光束分开,加入一个与光轴三成 45° 角的第一反射镜 13,使合束后的光折束 90° 并聚焦在成像 CCD 6 上。上述光路中的哈特曼波前探测器 2、第一液晶校正器 4 和第二液晶校正器 5、成像 CCD 6 均与工控机 14 相连。工控机 14 存储有自适应控制软件,其作用是:将哈特曼波前探测器 2 中的波前光学信号读出,处理为 Zernike 模式表示的波前像差;将波前像差发送给第一液晶校正器 4 和第二液晶校正器 5,使二者分别校正 P 偏振光和 S 偏振光中的像差。启动成像 CCD 6 拍摄,并控制其曝光时间。

[0012] 本发明需要使校正器与探测器的几何位置严格对准。因此在进行自适应波前校正成像之前,需要分别测量第一液晶校正器 4 和第二液晶校正器 5 在标准 Zernike 模式驱动信号下的探测器响应信号。调整光路如图 3 所示,在成像 CCD6 前置入与光轴三成 45° 的第二反射镜 15,此时第一反射镜 13 与第二反射镜 15 互相垂直,使聚焦光斑转向垂直方向,并标记焦点位置;再将点光源 7 移至标记的焦点位置处;将长波通第一分色片 1 替换为具有相同分色波长的短波通分色片 1'。图 3 所示的光路可使通过第一液晶校正器 4 和第二液晶校正器 5 的光束都能到达哈特曼波前探测器 2;由于第一液晶校正器 4 和第二液晶校正器 5 的响应信号会有所不同或根本不同,故分别测量二者的响应信号。首先用纸屏 16 插入 PBS 偏振分束器 3 和第二液晶校正器 5 之间,以截断第二液晶校正器 5 的光束并保证只有第一液晶校正器 4 的光束进入哈特曼波前探测器 2,将第一液晶校正器 4 的响应信号存入工控机 14 的数据库中;然后将纸屏 16 插入 PBS 偏振分束器 3 和第一液晶校正器 4 之间,以截断第一液晶校正器 4 的光束并保证只有第二液晶校正器 5 的光束进入哈特曼波前探测器 2,将第二液晶校正器 5 的响应信号存入工控机 14 的数据库中;完成了这两个校正器件在标准 Zernike 模式驱动信号下的探测器响应信号测量,将光路恢复为图 2 所示的形式,即可对望远镜的观测目标进行自适应校正成像。

[0013] 本发明相对原来探测支路与校正成像支路各取一半偏振光的设计来说有如下优点:1) 转移了校正成像支路的过剩光能量,提高了液晶自适应系统的探测灵敏度;2) 两个支路的光波谱段都大幅窄化,有利于探测器和成像相机的量子转换效率发挥;3) 校正成像支路的光波谱段中去除了短波谱段,波前畸变频率在长波谱段会相对缓慢,因此可以减小校正后的残差,提高校正效果。

附图说明

[0014] 图 1 是本发明使用的光路示意图,也是摘要附图。其中 1 为长波通分色片,2 为哈特曼波前探测器,3 为 PBS 偏振分束器,4 为第一液晶校正器,5 为第二液晶校正器,6 为成像 CCD。

[0015] 图 2 是本发明的与望远镜对接的液晶自适应校正光路示意图。其中 8、10、11、9、12

分别为第一、第二、第三、第四、第五透镜，13 为第一反射镜，14 为存有自适应控制软件的工控机，它与哈特曼波前探测器 2、第一液晶校正器 4、第二液晶校正器 5、成像 CCD 6 相连。

[0016] 图 3 是本发明在启动自适应校正成像之前测量哈特曼波前探测器对第一、第二液晶校正器响应矩阵的光路示意图。其中 1' 为分色波长与分色片 1 相同的短波通分色片，15 为第二反射镜，它将光路折轴，点光源 7 位于折轴后的焦点上，16 为纸屏。

[0017] 图 4 是本发明的室内验证结果，其中 (a) 为自适应校正前光纤束模糊的像，(b) 为自适应校正后光纤束清晰的像。

具体实施方式

[0018] 用光谱与白光较接近的氘灯耦合入一束光纤中，每根光纤芯径 $25 \mu\text{m}$ ，光纤束直径 1mm；将此光纤束光源置于望远镜的焦点处来模拟无穷远处的被成像物体，进行室内的光纤束自适应校正成像实验：

[0019] 1、按照图 2 搭建自适应光学系统，不考虑望远镜的存在，光纤束光源位于第一透镜 8 的前焦点处，形成闭合的自适应系统光路。在第一透镜 8 的后面、光束之下放一 40W 电烙铁作为热干扰源，使光波前发生动态畸变。

[0020] 2、第一透镜 8、第二透镜 10、第三透镜 11、第四透镜 9 均为双胶合消色差透镜，且表面镀有增透膜，口径均为 20mm，焦距分别为 200mm、200mm、100mm、200mm；第五透镜 12 的口径为 50mm、焦距为 200mm。

[0021] 3、哈特曼波前探测器 2 的技术参数：3mm 接收孔径，微透镜阵列为 15×15 ，探测波段从 $350\text{nm} \sim 1000\text{nm}$ ，测量精度达到峰谷值 0.05λ ，均方根值 0.01λ 。

[0022] 4、第一反射镜 13，面积 $15\text{mm} \times 15\text{mm}$ ，厚度 1.5mm，反射率大于 98%。

[0023] 5、第一液晶校正器 4、第二液晶校正器 5 均为 LCOS 型液晶校正器（美国 BNS 公司生产）， $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的方形窗口，象素数 256×256 ，位相调制深度 800nm，位相调制深度是入射光中心波长的 0.95 ~ 1.1 倍，响应时间 5ms，驱动电压的分度值即灰度级有 256 个。

[0024] 6、PBS 偏振分束器 3，尺寸为 $25\text{mm} \times 25\text{mm} \times 25\text{mm}$ ，分光波段在 $680\text{nm} \sim 980\text{nm}$ 。

[0025] 7、成像 CCD 6 为英国 ANDOR 公司 DV897 型号的可见光波段产品，像素数 512×512 ，在波长为 950nm 处量子转换效率还有 25%。

[0026] 8、分色片 1 和分色片 1'，口径均为 20mm，分色波长 $\lambda = 700\text{nm}$ ，分别是长波通分色片和短波通分色片。

[0027] 9、测量哈特曼波前探测器 2 对第一液晶校正器 4 的标准 Zernike 模式驱动响应矩阵：

[0028] 按照图 3 所示位置，在第一反射镜 13 和成像 CCD 6 之间插入与光轴成 45° 的第二反射镜 15，使光轴折角 90° ，标记折轴后光束的聚焦位置，将光纤束光源作为点光源 7 移到标记的折轴光束的聚焦位置。用短波通分色片 1' 替代长波通分色片 1，其分色波长也是 $\lambda = 700\text{nm}$ ，使得通过液晶校正器的 $700\text{nm} \sim 950\text{nm}$ 波段的光束被短波通分色片 1' 分离出来，被反射进入哈特曼波前探测器 2。将纸屏 16 插入第二液晶校正器 5 和 PBS 偏振分束器 3 之间，使得只有通过第一液晶校正器 4 的 $700\text{nm} \sim 950\text{nm}$ 波段的光束进入哈特曼波前探测器 2。指令工控机 14 依次发出前 36 项 Zernike 模式信号驱动第一液晶校正器 4，工控机 14 自动读取哈特曼波前探测器 2 的光学响应信号，并进行数字化处理成为第一响应矩阵，

存储在数据库中。将纸屏 16 移到第一液晶校正器 4 和 PBS 偏振分束器 3 之间，使得只有通过第二液晶校正器 5 的 700nm ~ 950nm 波段的光束进入哈特曼波前探测器 2。同样指令工控机 14 依次发出前 36 项 Zernike 模式信号驱动第二液晶校正器 5，工控机 14 自动读取哈特曼波前探测器 2 的光学响应信号，进行数字化处理成为第二响应矩阵，存储在数据库中。

[0029] 10、将光路恢复为图 2 所示的结构，形成以点光源 7 为成像目标的自适应波前校正系统。指令工控机 14 依据响应矩阵处理哈特曼波前探测器 2 给出的系统像差，分别驱动第一液晶校正器 4 和第二液晶校正器 5 校正 P 偏振光和 S 偏振光中的像差，观察成像 CCD 6 上的光纤束成像。

[0030] 结果如图 4 所示，自适应校正前分辨不出光纤芯，而校正后光纤芯清楚显现，表明本发明的设计方法能够获得很高的校正精度，这种液晶自适应系统能量优化分配方法可行。

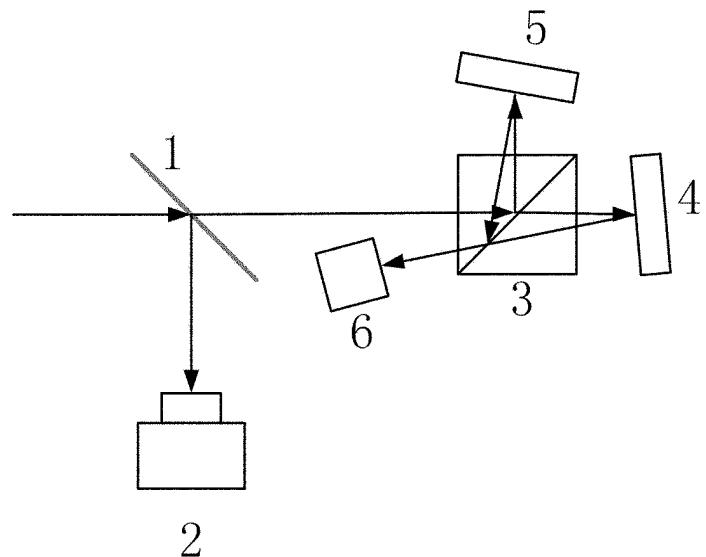


图 1

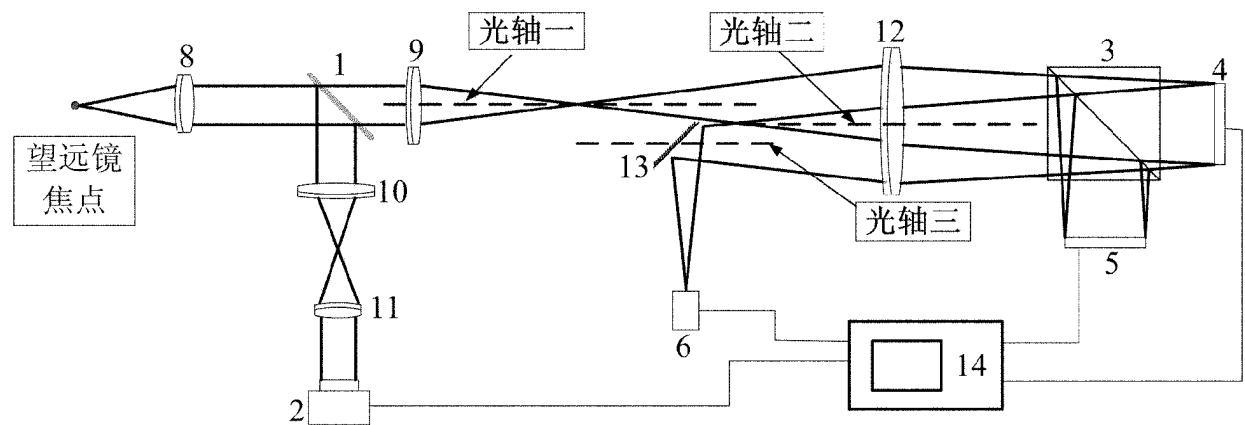


图 2

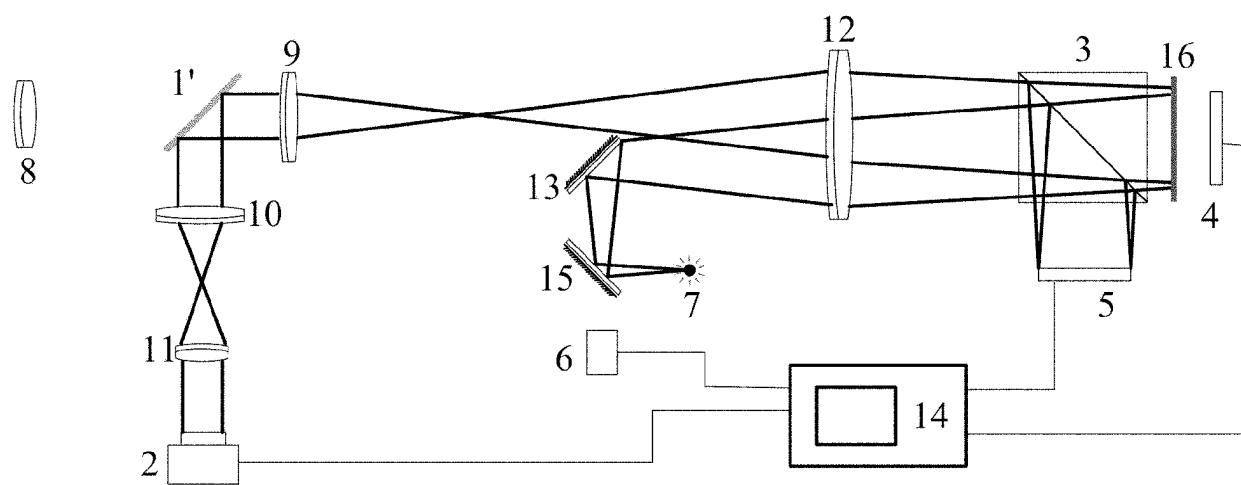


图 3

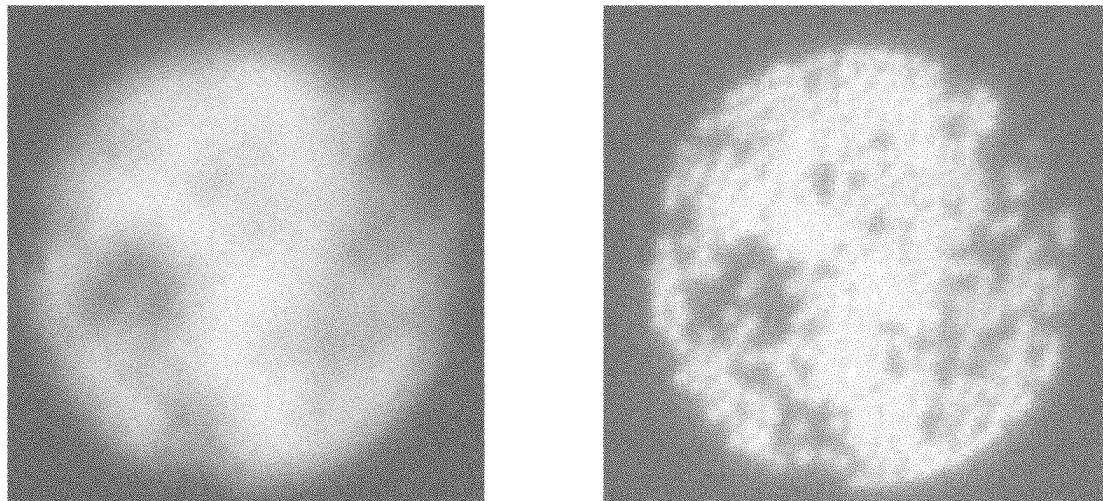


图 4