

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200610063698.7

[51] Int. Cl.

G02B 26/06 (2006.01)

G01J 9/00 (2006.01)

G02B 27/00 (2006.01)

[43] 公开日 2008 年 5 月 14 日

[11] 公开号 CN 101178477A

[22] 申请日 2006.12.29

[21] 申请号 200610063698.7

[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 130031 吉林省长春市东南湖大路 16 号

[72] 发明人 宣 丽 胡立发 李大禹 曹召良
穆全全 彭增辉 刘永刚 鲁兴海

[74] 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所
代理人 南小平

权利要求书 4 页 说明书 7 页 附图 2 页

[54] 发明名称

快速向列液晶自适应光学系统

[57] 摘要

本发明属于自适应光学领域，是一种快速向列液晶自适应光学系统。由 PBS 分束镜、第一透镜、第二透镜、波前探测器、第三透镜、第四透镜、LCOS 屏、反射镜、第五透镜、第六透镜、CCD 相机和计算机构成，其中 PBS 分束镜是能将自然光中的 P 偏振分量和 S 偏振分量分开的分束器。第一透镜与第二透镜安装在 PBS 分束镜和波前探测器之间，第三透镜与第四透镜安装在 PBS 分束镜和 LCOS 屏之间。在第三透镜和第四透镜之间、第四透镜的反射光路焦点处放置反射镜。在反射镜和 CCD 相机之间，依次安装有第五透镜和第六透镜。波前探测器、LCOS 屏、CCD 相机均与计算机 13 相连。

1、一种快速向列液晶自适应光学系统，其特征是由 PBS 分束镜 (2)、第一透镜 (3)、第二透镜 (4)、波前探测器 (5)、第三透镜 (6)、第四透镜 (7)、LCOS 屏 (8)、反射镜 (9)、第五透镜 (10)、第六透镜 (11)、CCD 相机 (12) 和计算机 (13) 构成；第一透镜 (3) 与第二透镜 (4) 安装在 PBS 分束镜 (2) 和波前探测器 (5) 之间，第三透镜 (6) 与第四透镜 (7) 安装在 PBS 分束镜 (2) 和 LCOS 屏 (8) 之间，在第三透镜 (6) 和第四透镜 (7) 之间、第四透镜 (7) 的反射光路焦点处放置反射镜 (9)，在反射镜 (9) 和 CCD 相机 (12) 之间，依次安装有第五透镜 (10) 和第六透镜 (11)；波前探测器 (5)、LCOS 屏 (8)、CCD 相机 (12) 均与计算机 (13) 相连；准单色平行光 (1) 在到达 PBS 分束镜 (2) 时分成 P 和 S 两束光，其中透过的 P 光通过第一透镜 (3)、第二透镜 (4) 后进入波前探测器 5 中；反射的 S 光通过第三透镜 (6) 与第四透镜 (7) 后，以 $1\sim 2^\circ$ 入射角进入 LCOS 屏 (8)，从 LCOS 屏 (8) 反射回来的光再通过第四透镜 (7) 与入射光束分离后通过反射镜 (9)，经第五透镜 (10)、第六透镜 (11) 形成汇聚光到达 CCD 相机 (12) 成像。

2、根据权利要求 1 所述的快速向列液晶自适应光学系统，其特征是计算机 (13) 首先对波前探测器 (5) 获得的微透镜光点列阵进行拟合，给出波面函数和数值解，并转换为 LCOS 屏 (8) 上的灰度级分布，其中灰度级对应驱动电压值；然后驱动 LCOS 屏 (8)；当 LCOS 屏 (8) 完成波面校正时计算机 (13) 还要驱动 CCD 相机 (12) 立即曝光摄像，然后去除 LCOS 屏 (8) 上的电压，保持 $15\text{ms}\sim 20\text{ms}$ 使液晶回归为初始状态，并在此期间令 CCD 相机 (12) 不摄像，对 CCD 相机 (12) 进行时钟控制；最后计算机 (13) 显示出 CCD 相机 (12) 所拍摄的像。

3、根据权利要求 2 所述的快速向列液晶自适应光学系统，其特征是：
所述的 PBS 分束镜 (2) 为偏振分光镜，反射光 S 的消光比小于 1×10^{-3} ；
所述的第一透镜 (3) 与第二透镜 (4) 配合，将透过的 P 光束缩束为与波前探测器 (5) 口径相同的平行光，其畸变的最大峰谷即 PV 值小于二

十分之一波长；

所述的波前探测器（5）为 Hartmann 微透镜阵列探测器，探测的均方根误差 rms 值小于百分之一波长，波面的 PV 值的探测误差小于二十分之一波长，探测频率不低于 500Hz；

所述的第三透镜（6）与第四透镜（7）配合实现合适的缩束比，使反射的 S 光束形成直径与 LCOS 屏（8）口径相等的平行光进入 LCOS 屏（8）；第四透镜（7）焦距为 20~30mm，保证有足够的空间放置反射镜（9），以引入成像光路；

所述的 LCOS 屏（8）为纯位相液晶波前校正器，位相调制深度是光源中心波长的 1.1~1.2 倍，液晶对驱动电压的响应时间 $t_{on} < 5ms$ ，去除电压时液晶恢复初始态的时间 $t_{off} < 20ms$ ，像素数符合应用要求的分辨率；

所述的反射镜（9）位于第四透镜（7）的反射光路焦点处，引入成像光路；

所述的第五透镜（10）、第六透镜（11）焦距相同，使成像光束聚焦后到达 CCD 相机（12）；

所述的 CCD 相机（12）为高灵敏度、低噪声电子倍增型 EMCCD 相机，其信噪比要符合具体应用要求，曝光时间不超过 2ms；

所述的计算机（13）配置 DSP 集成模块，使数据处理占用的时间不超过 2ms。

4、根据权利要求 3 所述的快速向列液晶自适应光学系统，其特征是：

PBS 分束镜（2）的尺寸长×宽×高为 25mm×25mm×25mm；

第一透镜（3）、第二透镜（4）、第三透镜（6）、第四透镜（7）、第五透镜（10）和第六透镜（11）的口径依次为 20mm、10mm、30mm、20mm、20mm 和 20mm，焦距依次为 300mm、60mm、210mm、200mm、200mm 和 200mm，均为消色差透镜，且第一透镜（3）、第二透镜（4）各自引入的波前畸变的 PV 值小于 $\lambda/20$ ；

哈特曼波前探测器（5）探测的均方根误差 rms 值小于 $\lambda/100$ ，波面的 PV 值的探测误差小于 $\lambda/20$ ，探测频率 500Hz，量子效率峰值高达 90%；

LCOS 屏（8）在电场中的上升响应时间为 5ms，下降时间为 7ms，位相调制深度为 800nm；

反射镜(9)表面平整度的PV小于 $\lambda/20$, 反射率大于95%;

CCD相机(12)的量子效率峰值高达90%, 读出噪声在读出速率10MHz时为1~62个电子;

计算机(13)的基本配置: CPU1.8G, 内存256M, 硬盘40G, 法国VP3型DSP板卡, 含有8块TMS320C64的DSP芯片。

5、根据权利要求4所述的快速向列液晶自适应光学系统, 其特征是在计算机(13)内建立拟合波前用的响应矩阵D; 所述的响应矩阵D通过下述方法得到:

根据任意波面 $\Phi(x,y)$ 都可以用Zernike多项式的线性组表示的原理, $\Phi(x,y)$ 写成为:

$$\Phi(x,y) = \sum_{k=1}^{k=M} a_k z_k(x,y)$$

此处 k 对应Zernike项数, a_k 为每一项前面的系数, 选择 $k=2, 3, \dots, 36$, 即采用35项Zernike多项式; 令每一项前面的系数为1, 以波长为单位, 分别解出35项Zernike项的面形位相数值解; 利用事先在LCOS屏(8)上测好的位相-灰度级关系, 将35项 $Z_k(x,y)$ 的面形位相数值转换成LCOS屏(8)上的灰度级分布值; 将35项Zernike项的面形灰度级分布通过计算机(13)逐项施加在LCOS屏(8)上, 在哈特曼面阵探测器(5)上测量出每个子孔径上像点与标定位置的偏移量, 由计算机(13)换算出子孔径光束在 x 轴和 y 轴上的斜率; 由这一系列波前斜率组成一个 $2k$ 行 m 列响应矩阵D

$$D = \begin{pmatrix} S_{x1z1} & S_{x2z1} & \cdots & S_{xmz1} \\ S_{y1z1} & S_{y2z1} & \cdots & S_{ymz1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{x1zk} & S_{x2zk} & \cdots & S_{xmzk} \\ S_{y1zk} & S_{y2zk} & \cdots & S_{ymzk} \end{pmatrix}$$

此处 k 对应Zernike项数, $k=2, 3, \dots, 36$, m 对应哈特曼面阵探测

器上每一行或每一列的子孔径数 $m=1、3、\dots、14$ ；到此得到了响应矩阵 D ，并被自动存入计算机 13。

6、根据权利要求 5 所述的快速向列液晶自适应光学系统，其特征是对于自适应系统哈特曼探测器探测到的任意波面的 2 行 m 列波前斜率矩阵 s ，都有 $s= Da$ ， a 是 Zernike 多项式每一项前面的系数 a_k 构成的向量，由这个等式计算机 (13) 可以解出 a_k ，即可得到所探测波面的 Zernike 方程；然后计算机 (13) 算出波面的位相数值解，并根据波面校正器 LCOS 屏 (8) 的位相与灰度级的关系将位相数值解转换为灰度级分布反馈给自适应系统 LCOS 屏 (8)，就可使畸变波面得到校正。

快速向列液晶自适应光学系统

技术领域

本发明属于自适应光学领域，涉及利用计算机将液晶自适应系统的波前校正速度发挥到最大，具体地说是一种快速向列液晶自适应光学系统。

背景技术

随着天文成像、光通讯及遥感探测等的迅速发展，大气湍流对光传输的干扰越来越引起人们的重视，因此，有必要研制光波前自适应校正系统。光波前自适应校正系统的功能是对入射光的畸变波面进行实时补偿校正，得到理想的光学传输。

液晶器件采用微电子制备技术，百万象素的液晶校正器制备工艺是目前已经成熟的工艺，制备成本低，波面校正精度高，因此基于液晶校正器的自适应系统具有很大的应用潜力。

但目前适用于波前校正的向列液晶的电场响应时间约为 15—30 毫秒，自适应光学系统中其它元件的延迟时间总和为十几毫秒，这使得向列液晶自适应光学系统的工作频率只能在 30Hz 以下。而使用波前校正系统的空间观测必须克服大气层 40Hz 以上湍流对光波面的影响，因此提高液晶校正器的速度，使其电场响应时间缩短到数毫秒，意义极其重大。

1990 年 7 月公开了 Jan Grinberg 等人 1989 年 5 月 11 日申请的美国专利 4943709 “Liquid crystal adaptive optics system”，该专利的第 9 项权利提出用多个液晶校正器叠加在一起来校正畸变波前，这使得每个校正器中液晶层的厚度远小于单独使用一个校正器条件下的液晶层厚度，液晶层厚度减小会使响应时间缩短。但这种方法会遇到几个问题，一是光利用率会有所降低；二是要受限于使用透射式液晶校正器，这样就不能发挥硅基板液晶校正器高象素密度的优势；三是各个校正器间象素的严格对准成为工艺上的困难问题。2002 年美国应用技术协会与空军实验室报道了采用双频液晶材料做成 91 象元的液晶自适应系统，闭环频率达到 40Hz，校正量 1.8

微米，在 700—950nm 近红外波段、望远镜 1.12 米的通光口径上对 400 公里轨道上的国际空间站进行了自适应观测，获得了国际空间站太阳能帆板图像（*Optics Express*, Vol.10, No.25, (2002)1508~1519）。2005 年这一研究组又在 SPIE 国际会议上报道了通过改进界面电子学技术使双频液晶自适应系统闭环频率达到 70Hz（*Proceedings of SPIE*, Vol.5894, (2005)58940M-1~58940M-6）。但双频液晶的驱动电压较高，超过集成电路所能承受的负荷，所以驱动不能使用集成电路模块，液晶校正器的象素密度大大降低，此系统只有 91 象素，失去了液晶高象素密度的优势。

液晶的驱动稳定性极好，因为是分子的旋转运动进行位相补偿，而不象常规变形镜自适应系统那样依靠反射镜面的曲率变形、一种机械运动进行位相补偿，所以液晶没有机械运动中在平衡点的阻尼振荡，而且正相反，驱动电压越高，液晶的响应速度越快。由于液晶这种驱动稳定特性，可将液晶校正器的自适应系统做成开环系统。通常自适应系统均为闭环系统，闭环与开环的不同是在光路上光束先通过校正器然后再通过探测器，即先校正波面然后再探测波面，探得的波面残差反馈给校正器，校正器在上一回校正的基础上进行修正，这样当闭环频率大于外界大气湍流干扰频率时，校正器在第二周期所校正的位相量就要比第一周期中校正的位相量小得多，经过一段时间校正器的校正量就会保持在一个较小的平衡量上。闭环自适应很适合变形镜这类校正器，校正量减小会使变形镜校正器很快到达驱动平衡点。开环自适应是先探测波面后校正，因此每一周期都是重新开始，校正器所变动的位相量较大，驱动电压也高，而这正符合液晶校正器的电场响应特点，可以响应速度快、又不失稳定性。

发明内容

本发明的目的是提供一种快速向列液晶波前校正自适应光学系统。

本发明旨在不降低液晶高象素密度优势的条件下，提高液晶自适应系统的校正速度。自适应光学中最关键的技术就是缩短从探测到校正完成的时间，这个时间决定自适应系统所能克服的最大干扰频率，因此本发明针对这一点提出一种快速向列液晶波前校正自适应光学系统设计。

本发明的核心技术是采用开环向列液晶自适应系统，将波前校正做成脉冲式过程，即在 10~15 毫秒的短时间内按顺序完成如下步骤：a)波面探测—波面解析—驱动液晶校正器校正波面—CCD 曝光摄像；b)在 15~20 毫秒内进行去除液晶校正器上的电压使液晶回归为初始状态，同时 CCD 进行曝光后的数据处理与成像显示，此过程 CCD 不摄像。这样往复 a)、b) 过程，向列液晶波前校正开环自适应光学系统可以相当于 65~100Hz 闭环自适应系统的效果，并得到每秒 28~40 张瞬态摄像，给出较连续的动态观测。

本发明由准单色平行光源 1、PBS 分束镜 2、第一透镜 3、第二透镜 4、波前探测器 5、第三透镜 6、第四透镜 7、硅基板上的液晶 (LCOS) 屏 8、反射镜 9、第五透镜 10、第六透镜 11、CCD 相机 12 和计算机 13 构成，其中 PBS 分束镜是能将自然光中的 P 偏振分量和 S 偏振分量分开的分束器。第一透镜 3 与第二透镜 4 安装在 PBS 分束镜 2 和波前探测器 5 之间，第三透镜 6 与第四透镜 7 安装在 PBS 分束镜 2 和 LCOS 屏 8 之间。在第三透镜 6 和第四透镜 7 之间、第四透镜 7 的反射光路焦点处放置反射镜 9。在反射镜 9 和 CCD 相机 12 之间，依次安装有第五透镜 10 和第六透镜 11。波前探测器 5、LCOS 屏 8、CCD 相机 12 均与计算机 13 相连。

本发明的结构如图 1 所示：光源 1 的准单色平行光，在到达 PBS 分束镜 2 时分成 P 和 S 两束光，其中透过光为 P 光，进入第一透镜 3、第二透镜 4 成为口径与波前探测器 5 匹配的平行光，然后进入波前探测器 5 中；另一束在 PBS 分束镜 2 上反射的光为 S 光，具有很好的偏振性，进入第三透镜 6 与第四透镜 7 变成口径与 LCOS 屏 8 匹配的平行光，然后以 1~2° 入射角进入 LCOS 屏 8，从 LCOS 屏 8 反射回来的光再通过第四透镜 7 与入射光束分离聚焦在反射镜 9 上，再通过第五透镜 10、第六透镜 11 形成汇聚光到达 CCD 相机 12 成像。与波前探测器 5、LCOS 屏 8、CCD 相机 12 相连接的计算机 13，首先对波前探测器 5 获得的微透镜光点列阵进行拟合，给出波面函数和数值解，并转换为 LCOS 屏 8 上的灰度级分布，其中灰度级对应驱动电压值；然后驱动 LCOS 屏 8；当 LCOS 屏 8 完成波面校正时

计算机 13 还要驱动 CCD 相机 12 立即曝光摄像,然后去除 LCOS 屏 8 上的电压,保持 15ms~20ms 使液晶回归为初始状态,并在此期间令 CCD 相机 12 不摄像,对 CCD 相机 12 进行时钟控制;最后计算机 13 显示出 CCD 相机 12 所拍摄的像。到此完成一个工作周期,之后周而复始。

为了更清楚理解本发明,下面详述本发明系统中各元件的作用与特性参数。

所述的准单色平行光源 1, 其中心波长位于 450-900nm 光谱范围内, 光谱宽度为 50-100nm, 这是因为液晶校正器适合于较短波长的校正, 但又具有较强的色散, 波长越短色散越强, 所以只能在一个较窄的光谱范围内进行中心波长校正。

所述的 PBS 分束镜 2 为偏振分光镜, 反射光 S 的消光比小于 1×10^{-3} 。

所述的第一透镜 3 与第二透镜 4 配合, 将透过光 P 的光束缩束为与波前探测器 5 口径相同的平行光。第一透镜 3 与第二透镜 4 引入的波前畸变不会进入校正器中, 但被波前探测器 5 探测到, 将造成校正器误校, 所以限制其畸变的最大峰谷 (PV) 值小于二十分之一波长。

所述的波前探测器 5 一般使用 Hartmann 微透镜阵列探测器, 用来探测波前畸变, 探测的均方根误差 rms 值应小于百分之一波长, 波面 PV 值的探测误差小于二十分之一波长, 探测频率不低于 500Hz。

所述的第三透镜 6 与第四透镜 7 配合实现合适的缩束比, 使反射光 S 光束形成直径与 LCOS 屏 8 口径相等的平行光进入 LCOS 屏 8; 第四透镜 7 焦距为 20~30mm, 保证有足够的空间放置反射镜 9, 以引入成像光路。

所述的 LCOS 屏 8 为纯位相液晶波前校正器, 位相调制深度是光源中心波长的 1.1~1.2 倍, 液晶对驱动电压的响应时间 $t_{on} < 5ms$, 去除电压时液晶恢复初始态的时间 $t_{off} < 20ms$, 像素数符合应用要求的分辨率。

所述的反射镜 9 位于第四透镜 7 的反射光路焦点处, 引入成像光路。

所述的第五透镜 10、第六透镜 11 焦距相同, 使成像光束聚焦到达 CCD 相机 12。

所述的 CCD 相机 12 为高灵敏度、低噪声电子倍增型 EMCCD 相机,

给出波面校正后的清晰图像，其信噪比要符合具体应用要求，曝光时间不超过 2ms。

所述的计算机 13 数据处理量很大，需配置 DSP 集成模块，使数据处理占用的时间不超过 2ms。

本发明可以校正 100Hz 的湍流。

附图说明

图 1 是本发明的结构示意图。图中 1 为准单色平行光源，2 为 PBS 分束镜，3 第一透镜，4 第二透镜，5 波前探测器，6 第三透镜，7 第四透镜，8 为 LCOS 屏，9 反射镜，10 第五透镜，11 第六透镜，12 为 CCD 相机，13 为计算机。

图 2 是本发明中测量拟合波前用的响应矩阵 D 的结构示意图。

具体实施方式

- 1) 选择准单色平行光源 1 的中心波长 λ 为 633nm，光谱宽度 60nm。
- 2) PBS 分束镜 2 的尺寸长 \times 宽 \times 高为 25mm \times 25mm \times 25mm，其中反射光 S 的消光比小于 1×10^{-3} 。
- 3) 第一透镜 3、第二透镜 4、第三透镜 6、第四透镜 7、第五透镜 10 和第六透镜 11 的口径依次为 20mm、10mm、30mm、20mm、20mm 和 20mm，焦距依次为 300mm、60mm、210mm、200mm、200mm 和 200mm，因为允许成像光束有 60nm 的光谱宽度，故这些透镜均为消色差透镜，且第一透镜 3、第二透镜 4 各自引入的波前畸变 PV 值小于 $\lambda/20$ 。
- 4) 委托俄国莫斯科州立大学装配哈特曼波前探测器 5，子孔径阵列为 14 \times 14，探测的均方根误差 rms 值小于 $\lambda/100$ ，波面 PV 值的探测误差小于 $\lambda/20$ ，探测频率 500Hz，量子效率峰值在 500nm 到 600nm 波长处，高达 90%。
- 5) 委托美国 BNS 公司加工了 LCOS 屏 8，在电场中的上升响应时间为 5ms，下降时间为 7ms，反射率 61.5%，像素面积 19 $\mu\text{m} \times 19\mu\text{m}$ ，像素数 512 \times 512，256 灰度级，位相调制深度为 800nm。
- 6) 反射镜 9 的表面平整度 PV 小于 $\lambda/20$ ，反射率大于 95%。
- 7) CCD 相机 12 是美国 ANDOR 公司的产品，型号为 DV897，像素数

512×512，像素面积 16μm ×16μm，量子效率在 500~650nm 波段达到峰值，高达 90%，读出噪声在读出速率 10MHz 时为 1~62 个电子。

8) 计算机 13 的基本配置：CPU1.8G，内存 256M，硬盘 40G，法国 VP3 型 DSP 板卡，含有 8 块 TMS320C64 的 DSP 芯片。

9) 按照图 2 搭建光学系统，以建立拟合波前用的响应矩阵 D 。开启准单色平行光源 1，开启计算机 13；根据任意波面 $\Phi(x, y)$ 都可以用 Zernike 多项式的线性组表示的原理， $\Phi(x, y)$ 写成为：

$$\Phi(x, y) = \sum_{k=1}^{k=M} a_k z_k(x, y)$$

此处 k 对应 Zernike 项数， a_k 为每一项前面的系数，通常选 $M=36$ ，因为第一项为常数在波面拟合中不起作用，故选择 $k=2, 3, \dots, 36$ ，即采用 35 项 Zernike 多项式。令每一项前面的系数为 1，以波长为单位，分别解出 35 项 Zernike 项的面形位相数值解。利用事先在 LCOS 屏 8 上测好的位相—灰度级关系，将 35 项 $Z_k(x, y)$ 的面形位相数值转换成 LCOS 屏 8 上的灰度级分布值。将 35 项 Zernike 项的面形灰度级分布通过计算机 13 逐项施加在 LCOS 屏 8 上，在哈特曼面阵探测器 5 上测量出每个子孔径上像点与标定位置的偏移量，由计算机 13 换算出子孔径光束在 x 轴和 y 轴上的斜率。由这一系列波前斜率组成一个 $2k$ 行 m 列响应矩阵 D

$$D = \begin{pmatrix} S_{x1z1} & S_{x2z1} & \cdots & S_{xmz1} \\ S_{y1z1} & S_{y2z1} & \cdots & S_{ymz1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{x1zk} & S_{x2zk} & \cdots & S_{xmzk} \\ S_{y1zk} & S_{y2zk} & \cdots & S_{ymzk} \end{pmatrix}$$

此处 k 对应 Zernike 项数， $k=2, 3, \dots, 36$ ， m 对应哈特曼面阵探测器上每一行或每一列的子孔径数 $m=1, 3, \dots, 14$ 。到此得到了响应矩阵 D ，并被自动存入计算机 13。后面对于自适应系统哈特曼探测器探测到的任意波面的 2 行 m 列波前斜率矩阵 s ，都有 $s=Da$ ， a 是 Zernike 多项式每一项前

面的系数 a_k 构成的向量，由这个等式计算机 13 可以解出 a_k ，即可得到所探测波面的 Zernike 方程。然后计算机 13 算出波面的位相数值解，并根据波面校正器 LCOS 屏 8 的位相与灰度级的关系将位相数值解转换为灰度级分布反馈给自适应系统 LCOS 屏 8，就可使畸变波面得到校正。

10) 按照图 1 搭建快速向列液晶开环自适应系统，在准单色平行光源 1 和 PBS 分束镜 2 之间、光束之下放置 25W 烙铁作为热扰源。

11) 开启热扰源，使准单色平行光 1 受到大气湍流干扰，自适应系统开始工作：a) 畸变波前经过 PBS 分束镜 2 分成 P 光和 S 光；b) P 光经过第一、第二透镜 3、4 准直和口径匹配后进入波前探测器 5，波前探测器 5 给出 2 行 m 列波前斜率矩阵 s ；c) 计算机 13 在 2ms 内，根据 $s = Da$ ，解出 Zernike 多项式每一项前面的系数 a_k ，然后由 Zernike 方程解出波面数值解，并将其转换为波面校正器 LCOS 屏 8 上的灰度级分布值；d) 驱动 LCOS 屏 8 校正波面的畸变，LCOS 屏 8 的电场响应时间为 5ms；e) PBS 分束镜 2 分出的 S 光经过第三、第四透镜 6、7 准直和口径匹配后入射到 LCOS 屏 8 上，且入射 S 光与 LCOS 屏 8 的基板法线夹 1.5° 的角度，从 LCOS 屏 8 反射的 S 光是校正后没有畸变的平行光；f) 从 LCOS 屏 8 反射的 S 光再通过第四透镜 7 与入射光束分离，聚焦在反射镜 9 上，然后通过第五透镜 10、第六透镜 11 形成星点像到达 CCD 相机 12；g) CCD 相机 12 的曝光时刻由计算机 13 的时钟程序控制，当 LCOS 屏 8 完成波面校正时计算机 13 驱动 CCD 相机 12 立即曝光摄像，然后计算机 13 去除 LCOS 屏 8 上的电压，保持 15ms 使液晶回归为初始状态，并在此期间令 CCD 相机 12 不摄像；h) 计算机 13 显示出 CCD 相机 12 所拍摄的像。到此完成一个工作周期，之后周而复始重复 a) 到 h) 步骤。

上述自适应系统可以校正 100Hz 的湍流。

检验上述自适应系统的校正效果：自适应校正之前计算机 13 显示出的星点像是亮度较低、形状不规则的大尺寸弱光斑；而自适应校正之后所成的像是尺寸很小的园亮斑，说明校正效果良好。

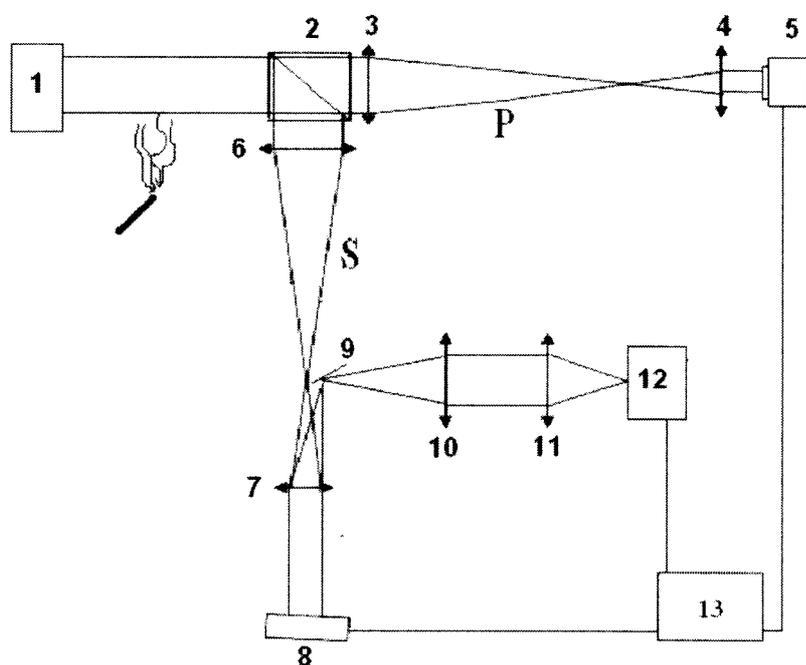


图 1

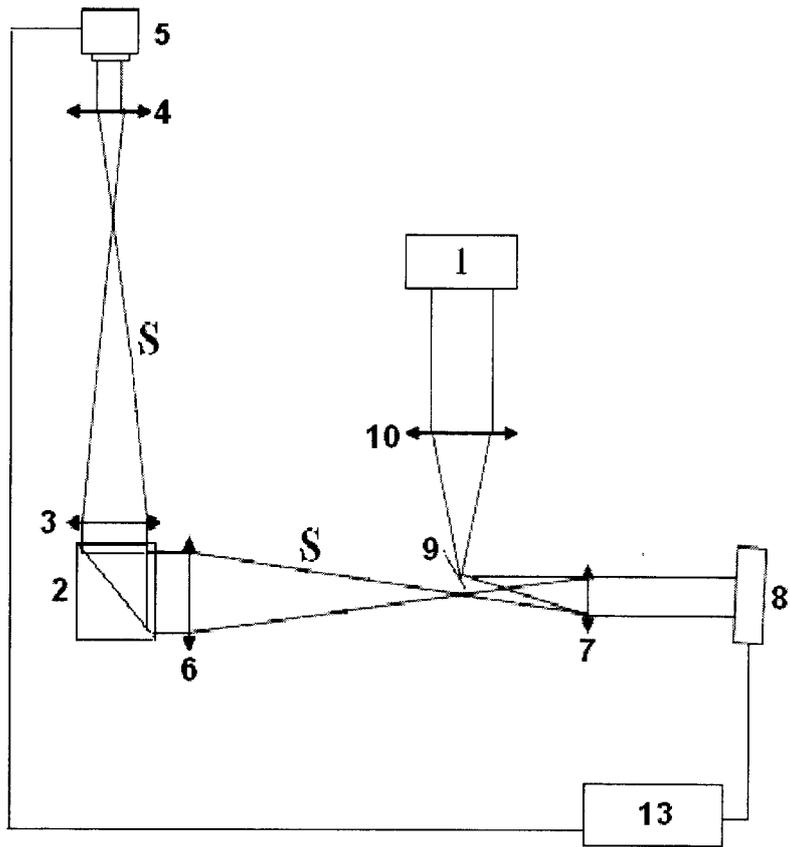


图 2