

文章编号: 1672-2892(2010)03-0331-05

## 基于自适应光学的大气光通信波前校正实验

夏利军<sup>1</sup>, 李晓峰<sup>2</sup>

(1.电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054; 2.电子科技大学 空天科学技术研究院, 四川 成都 610054)

**摘要:** 为了缓解大气光通信中由于大气湍流的影响而产生的波前畸变、反射等严重影响通信质量的现象, 文章采用了自适应光学技术, 即对畸变波前进行重构后再利用反射变形镜进行修正的方法, 从理论分析、实验研究方面开展了自适应光学修正传输波前的研究工作。研究结果表明: 在相同实验条件下, 在保持链路误码率定量为( $1 \times 10^{-6}$ )时, 使用自适应光学技术比不使用时系统发射功率减小了 50%。在近地大气激光通信中, 自适应光学技术在增加系统增益, 减小系统误码率方面效果显著。

**关键词:** 自适应光学; 波前畸变; 波前校正; 发射功率; 误码率

**中图分类号:** TN929.1

**文献标识码:** A

## Transmission Wave-front correction of atmospheric optical communication based on adaptive optics technology

XIA Li-jun<sup>1</sup>, LI Xiao-feng<sup>2</sup>

(1.School of Physical Electronics, UESTC, Chengdu Sichuan 610054, China; 2.Institute of Astronautics & Aeronautics, UESTC, Chengdu Sichuan 610054, China)

**Abstract:** In order to address the issues such as wave-front distortion, reflection and other phenomena in atmospheric optical communication, which seriously affect the communication quality, the Adaptive Optics(AO) technology was used to reconstruct the distorted wave-front, then reflective mirrors were used to amend the aberrations. Theoretical analysis, simulation and experiments were performed. The result indicated that under the same experimental conditions, as the Bit Error Ratio(BER) of the system kept the value of  $1 \times 10^{-6}$ , the system transmitting power when using adaptive optics technology had been reduced by half than that when not using adaptive optics technology. In the Near-earth atmospheric laser communications, the effects of AO in increasing the system gain and reducing the system bit error rate are significant.

**Key words:** Adaptive Optics; wave-front aberrations; wave-front correction; transmit power; Bit Error Ratio

无线光通信作为一种快捷的宽带网实现方式, 已经逐步成为现实。作为一种可快速方便部署的基础设施, 能够满足用户数量的快速增长和下一代高带宽无线通信应用的需求, 近年来得到了快速的发展。但大气湍流对近地无线光通信的通信质量有很大的影响, 主要表现在两方面: 第一是使通过大气传输的波前产生畸变; 第二是使到达目标处的能量受到较大的损失。自适应光学系统能实时感知由大气扰动、环境温度起伏、光轴抖动等因素造成的波面畸变, 并通过调整光学系统而实现实时畸变的补偿。近年来关于自适应光学技术在无线光通信中的应用在国内外得到了广泛的研究, 并应用到了除军事领域外的即时通信、信息获取、无线组网等领域。

俄罗斯现已在国内开始使用基于自适应光学技术的半导体激光大气通信系统, 并已向国外少量出口。在 2000 年悉尼奥运会期间, 美国的 Terabeam 公司在水上中心与演播中心之间建立了 8 波道的无线数据通信链路, 运行期间始终保持畅通, 效果良好。我国自适应光学方面的研究尽管起步较晚, 但发展迅速。中科院光电所“863”计划自适应光学重点实验室因其建立了国际上也不多见的从关键器件研究到系统研制的全面基础技术, 从而拓展了从高分辨率天文观测到光波大气传输校正、民用等广阔的应用领域, 被国际同行专家称为“世界上规模最大的自适应光学技术研究群体”。但是在整体上和处于领先的发达国家相比, 尤其是自适应光学技术在近地光通信领

收稿日期: 2009-10-22; 修回日期: 2009-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60978050)

域中的应用还有一定的差距。

自适应光学应用在星地激光通信方面的文献也有很多。本文探讨的是自适应光学技术在近地光通信中的应用,主要是研究 AO 对经过大气调制后的畸变波前的相位补偿和对系统的增益。从接受误码率和波前校正角度给出了无线光通信中改善通信质量的一种方法。

## 1 自适应光学实验系统

典型的自适应光学系统组成如图 1 所示。其中 H-S(Hartman-Shack)传感器能实时测量波前误差,并把检测到的波前误差传送给波前处理器。波前处理器对波前误差进行处理后转换为变形镜的控制电压。变形镜接收来自波前处理器的控制电压,从而在光路中通过自身形变来改变当前光束波前的形状,校正波前误差,将校正后的光束波前输出到成像系统成像<sup>[1]</sup>。

本文建立了如图 2 所示的自适应光学闭环实验系统,其基本工作原理可描述为:激光发射机发射一束经准直整形处理的激光束,发射端设置光功率监测装置,发射端光功率监测装置接收由分光片定量分光后的分光光束;接收端接收经大气信道传输(受到大气扰动调制并存在波前畸变现象)的光束,此光束经变形镜反射后由分光片分成 2 路:一束进入误码仪,由误码仪测试当前误码率;另一束进入 H-S 传感器用于测量波前斜率, H-S 传感器将测量出的波前斜率数据传递给波前处理机进行处理(包括大气扰动畸变和光学组件本身所引起的像差),并将其转换成变形镜控制信号,最后将变形镜控制信号传递给变形镜控制器,通过变形镜控制器改变驱动电极电压,控制变形镜变形,从而校正波前畸变<sup>[2]</sup>。

测试原理:在一定强度的大气湍流条件下,让接收端的误码率保持在  $1 \times 10^{-6}$ ,测试当使用 AO 和不使用 AO 时激光传输波前和激光发射机的发射功率的变化情况。最后通过测得的数据进行比较得出结论。

## 2 自适应光学波前重构算法

波前重构算法是自适应光学实验系统中的重要算法,由 H-S 传感器测得的离散波前斜率恢复出连续的波前形状,从而计算出波前校正器的控制电压,或者直接从斜率数据计算出控制电压的算法,常见的有模式法、区域法和直接斜率法<sup>[3]</sup>。

当被测波前为圆域时常采用模式法进行波前重构,对于方形或不规则形状的被测波前常采用区域法。本文建立的自适应光学系统的光瞳是圆形的,所以不用区域法。又因为将直接斜率法与模式法波前重构原理进行比较,可以很明显地看出直接斜率法实际上是模式法波前重构算法<sup>[4]</sup>。直接斜率法虽然简单,快捷,对系统依赖性小,但是对大气湍流和噪声强度的变化没有自适应性。而 Zernike 多项式在单位圆域内正交完备,它的低阶模式和光学像差相对应,在表述光学波前方面具有优势(任意形状孔径,经过多项式正交化之后,也可以使用 Zernike 多项式表征其波前相位<sup>[5]</sup>)。在大气激光通信中,一方面采用低阶的前 20 项 Zernike 多项式就可以达到精度要求<sup>[6]</sup>,算法简化,减少了计算时间,从而增强了系统的实时性;另一方面,在模式法波前重构中使用 Zernike 多项式能简化利用微机电技术加工的可变形反射镜(MEMS\_DMS)电极控制电压的计算过程。Zernike 矩具有噪声不敏感特性和旋转不变性<sup>[7]</sup>,所以将 Zernike 矩方法引入自适应光学系统中作为一种前置预处理器,在概念和技术上是自然的,相对容易实现的。由此能获得稳定的系统表现,即减小系统受背景噪声影响程度,降低对哈特曼波前传感器中阵列板和 CCD(Charge-Coupled Device)装配精度的要求。

H-S 传感器(见图 3)有 127 个子透镜。该算法中波前斜率矩阵  $B$  是通过计算  $(E - F) / d = B$  得到的,其中  $F$

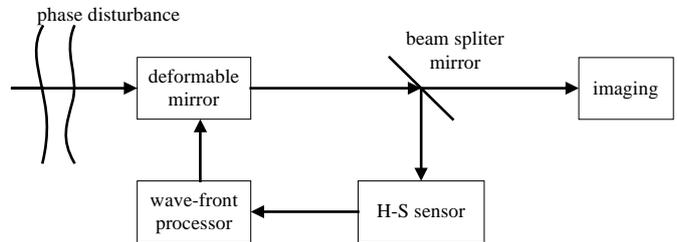


Fig.1 Diagram of the basic principles of AO technology  
图 1 AO 技术基本原理框图

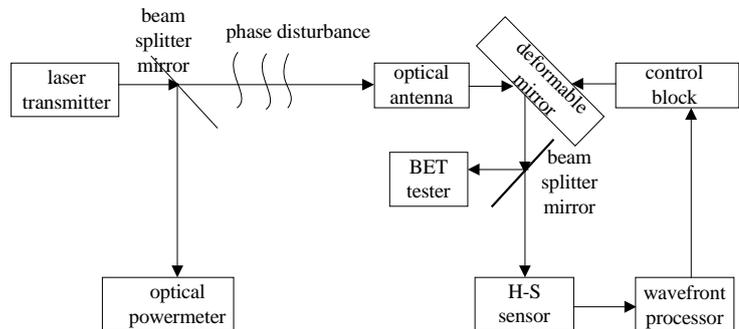


Fig.2 Test schematic of AO module  
图 2 AO 模块测试原理图

是参考点的 H-S 传感器子区域内光斑质心坐标矩阵； $E$  是入射光信号波前在 H-S 传感器子区域内光斑质心坐标矩阵； $d$  为 H-S 传感器微透镜阵列到 CCD 的距离。

自适应光学系统需矫正的畸变波前可用 Zernike 多项式分解为不同阶次项。一个完整的带有畸变的波前  $\phi(x, y)$  可以表示成一系列 Zernike 多项式的线性组合<sup>[8-9]</sup>，即：

$$\phi(x, y) = a_0 + \sum_{k=1}^n a_k Z_k(x, y) + \xi \quad (1)$$

式中： $a_0$  为平均相位波面； $a_k$  为第  $k$  项 Zernike 多项式系数； $Z_k(x, y)$  为第  $k$  项 Zernike 多项式； $\xi$  为波前测量误差。

Zernike 多项式的偏导数代表了被测波前斜率，于是哈特曼传感器第  $i$  个子孔径在  $x$  和  $y$  方向的波前斜率可以用式(2)来表示：

$$\begin{cases} B_x(i) = \sum_{k=1}^n a_k \frac{\iint_{S_i} \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial x}}{S_i} + u_i = \sum_{k=1}^n a_k Z_{xk}(i) + u_i \\ B_y(i) = \sum_{k=1}^n a_k \frac{\iint_{S_i} \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial y}}{S_i} + v_i = \sum_{k=1}^n a_k Z_{yk}(i) + v_i \end{cases} \quad (2)$$

式中： $(x, y)$  表示第  $i$  个子孔径重心坐标； $S_i$  是 Hartman 传感器上第  $i$  个子孔径的面积； $u_i$  和  $v_i$  是伴随着采样测量的噪声。用矩阵来表示：

$$\begin{bmatrix} B_x(1) \\ B_y(1) \\ B_x(2) \\ B_y(2) \\ \vdots \\ B_x(m) \\ B_y(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{x_1}(1) & Z_{x_2}(1) & \dots & Z_{x_n}(1) \\ Z_{y_1}(1) & Z_{y_2}(1) & \dots & Z_{y_n}(1) \\ Z_{x_1}(2) & Z_{x_2}(2) & \dots & Z_{x_n}(2) \\ Z_{y_1}(2) & Z_{y_2}(2) & \dots & Z_{y_n}(2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{x_1}(m) & Z_{x_2}(m) & \dots & Z_{x_n}(m) \\ Z_{y_1}(m) & Z_{y_2}(m) & \dots & Z_{y_n}(m) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \vdots \\ \lambda_{2m-1} \\ \lambda_{2m} \end{bmatrix} \quad (3)$$

可以记为： $B = Z \cdot A + \eta$ 。

式中： $A$  是 Zernike 多项式系数矩阵； $\eta$  是测量误差矩阵； $Z$  是 Zernike 多项式各阶偏导数矩阵。文中用到了前 20 项 Zernike 多项式来求偏导数矩阵  $Z$ 。如表 1 所示。

表 1 用于求偏导数的前 20 项 Zernike 多项式

Table 1 First 20 Zernike polynomials for seeking partial derivative

number of terms $i$	rectangular coordinates expression of $Z_i(x, y)$	number of terms $i$	rectangular coordinates expression of $Z_i(x, y)$
1	1	11	$-3x^2+4x^4+3y^2-4y^4$
2	$x$	12	$1-6x^2+6x^4-6y^2+12x^2y^2+6y^4$
3	$y$	13	$2(-3xy+4x^3y+4xy^3)$
4	$x^2-y^2$	14	$4x^3y-4xy^3$
5	$-1+2x^2+2y^2$	15	$x^4-6x^2y^2+y^4$
6	$2xy$	16	$5x^4y-10x^2y^3+y^5$
7	$x^3-3xy^2$	17	$10x^4y+20x^2y^3+10y^5-12x^2y-12y^3+3y$
8	$3x^3+3xy^2-2x$	18	$10x^5+20x^3y^2+10xy^4-12x^3-12xy^2+3x$
9	$3x^2y+3y^3-2y$	19	$5x^5-10x^3y^2-4x^3-15xy^4+12xy^2$
10	$3x^2y-y^3$	20	$x^5-10x^3y^2+5xy^4$

根据奇异值分解法可以得到  $Z$  的广义逆矩阵  $Z^+$ 。进而可以得出最小二乘解： $A = Z^+ \cdot B$ 。对于布局确定的子孔径， $Z^+$  也是确定的，从而能够重构被测波前。

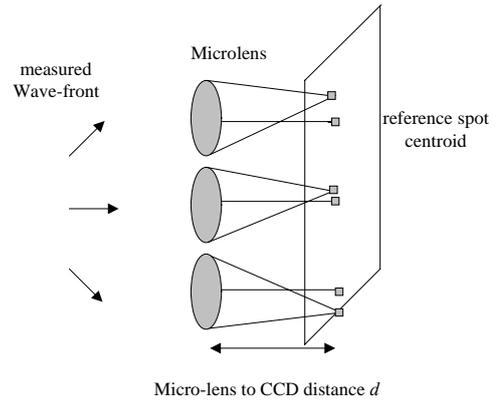


Fig.3 Schematic of Hartman-Shack sensor wave-front detector  
图 3 H-S 波前探测器原理图

### 3 实验步骤及结果分析

设大气复相位扰动为  $\psi(t, \rho)$ ，则实验系统接收光学天线实际接收到的信号为：

$$u(t, \rho) = u_0(t, \rho)e^{j\psi(t, \rho)} \quad (4)$$

其中  $u_0(t, \rho)$  是未经过大气调制时接收端接收到的信号，将  $\psi$  分为实虚两部，即：

$$\psi(t, \rho) = \phi(t, \rho) + jA(t, \rho) \quad (5)$$

将式(5)代入式(4) 后得：

$$u(t, \rho) = u_0(t, \rho)e^{-A(t, \rho)}e^{j\phi(t, \rho)} \quad (6)$$

未采用 AO 功能条件下，实验系统实测的传输光束相位分布状态如图 4 所示，光波经过大气随机信道后，由于大气湍流相位扰动在原始信号上的乘性干扰使被测波前发生畸变。其中的相位噪声使原始信号相位起伏变大，波前变形。从图中的数据可以看到波峰到波谷相位有很大的相位起伏，其值为  $peak\text{-to-valley}=1.925$  waves，(1 wave= $2\pi$  弧度)而此时的平均相位值为  $RMS=0.306$  waves。相比之下波峰到波谷相位值远大于平均相位值，表明被测波前相位起伏很大，被测波前产生了畸变。

调整此时的激光发射机的发射功率，使接收端误码仪显示误码率为  $1 \times 10^{-6}$ 。在此情况下测得的激光器输出功率随时间变化的曲线如图 5 所示。其中光学接收天线口径小于等于 50 cm；被测波波长为 850 nm。

开启 AO 功能条件下，实验系统实测经校正后的传输光束相位分布状态如图 6 所示。经过 AO 相位的实时补偿，相对于不开启 AO 时测得的畸变波前波峰到波谷相位 ( $peak\text{-to-valley}=1.925$  waves)，经 AO 相位补偿后的波峰到波谷相位起伏 ( $peak\text{-to-valley}=0.068$  waves) 已经调整得很好，此时的波峰到波谷相位起伏值与平均相位 ( $RMS=0.02$  waves) 的偏差明显减小。

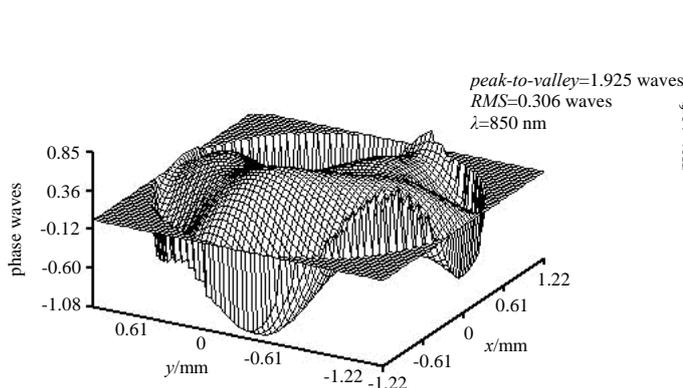


Fig.4 Measured wave-front distortion without using AO  
图 4 不开启 AO 时测得的畸变波前

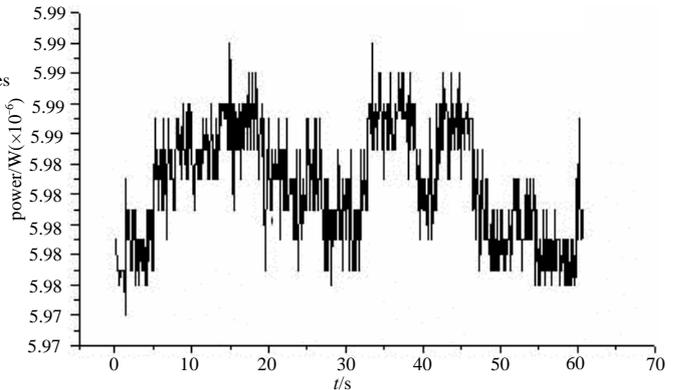


Fig.5 Launch optical power changed over time without using AO  
图 5 不开启 AO 时发射光纤功率随时间变化图

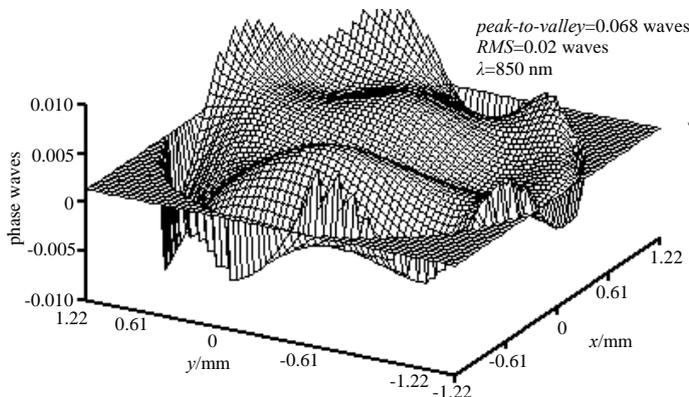


Fig.6 Measured wave-front distortion by using AO  
图 6 开启 AO 时测得的矫正后的波前

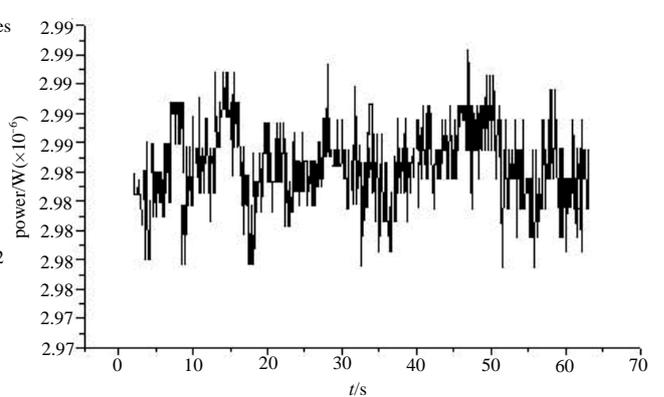


Fig.7 Launch optical power changed over time by using AO  
图 7 开启 AO 时发射光纤功率随时间变化图

式(6)中  $\phi(t, \rho)$  为实相位扰动，它正是自适应光学系统所要补偿的量。经过 AO 相位补偿后的波前相位起伏较畸变的波前起伏更加均匀。

当开启 AO 后，链路误码性能得到了较大改善，为了基本定量地评估 AO 功能模块的作用，本实验采用了保

持链路误码率为定量  $1 \times 10^{-6}$ , 实时降低信号光发射功率, 实时测试发射光功率并与未采用 AO 模块条件下的光发射功率进行比较的测试方法。开启 AO 后测得的链路发射激光功率随时间变化的曲线如图 7 所示。

表 2 是使用 AO 和未使用 AO 两种情况下分时段激光发射平均功率的对比, 表中采用每 10 s 计算一次平均功率, 平均功率数量级为  $1 \times 10^{-6}$  W。从表中的数据可以看到激光器平均发射功率( $2.983 \times 10^{-6}$  W)较不开启 AO 时平均发射功率( $5.983 \times 10^{-6}$  W)减小了一半。

表 2 使用 AO 和未使用 AO 时激光发射平均功率对比  
Table 2 Laser average power comparison when using and without using AO

sampling time/s	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	total average power/ $10^{-6}$ W
average transmission power without using AO magnitude/ $10^{-6}$ W	5.98	5.99	5.98	5.98	5.99	5.98	5.983
average transmission power by using AO magnitude/ $10^{-6}$ W	2.98	2.99	2.98	2.98	2.99	2.98	2.983

以上数据表明: 在应用 AO 技术对畸变波前校正的条件下, 用更小的发射功率就可以得到更优的通信质量。如果在相同的发射功率的情况下, 使用 AO 技术时系统误码率性能得到了提高。

#### 4 结论

本论文介绍了自适应光学 Zernike 多项式模式算法校正畸变波前的基本原理, 并搭建了采用自适应光学技术的实验测试系统。实验测试数据证明自适应光学技术在增加系统增益、减小系统误码率方面, 效果显著。采用闭环控制的 AO 系统可以矫正大气湍流对波前造成的相位畸变, 有效克服大气湍流造成的光强度闪烁、光束漂移、光斑扩展等效应。随着 AO 技术的不断发展, AO 技术将成为近地大气光通信的一项关键技术, 在近地大气光通信中具有重要的应用价值, 应用前景广阔。

#### 参考文献:

- [1] 叶嘉雄, 余永林. 自适应光学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992. (Ye Jaxiong, Yu Yonglin. Adaptive Optics[M]. WuHan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1992.)
- [2] 周宗仁. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996. (Zhou Zongren. Adaptive Optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996.)
- [3] Becherer R J, Horwitz B A. Adaptive optics systems and technology[C]// International Society for Optical Engineering. Meeting sponsored by SPIE. Proceedings of SPIE-The International Soc. for Opt. Eng., San Diego, CA: [s.n.], 1982, 365: 1-150.
- [4] 侯静. 共光路/共模自适应光学与位相畸变光束变频过程研究[M]. 北京: 国防科技大学出版社, 2007. (Hou Jing. Common Path/Common Mode Adaptive Optics and Frequency Transfer of Aberrated Beams[M]. Beijing: National University of Defense Technology Press, 2007)
- [5] Duan Hafeng, Yang Zeping, Wang Shuqing, et al. Model Wavefront Reconstruction of Shack-Hartmann sensor on arbitrary area and wavefront expression by Zernike polynomials[J]. Chin. J. Lasers, 2002, A29(6): 517-520.
- [6] Noll R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. Opt J Soc. Amer., 1976(66): 207-211.
- [7] Cho-Huak Teh, Roland T. Chin. on image analysis by the methods of moments[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence. IEEE Transactions, 1988, 10(4): 496-513.
- [8] Fred D L. Adaptive optics[J]. Opt J Soc. Amer., 1977, 67(3): 1-422.
- [9] Lane R G, Tallon M. Wavefront reconstruction using a shack-Hartmann Sensor[J]. Applied Optics, 1992, 31(32): 6902-6908.

#### 作者简介:



夏利军(1984-), 男, 湖南省常德市人, 在读硕士研究生, 主要从事自适应光学技术研究方面的工作. email: phugonyin@163.com.

李晓峰(1965-), 男, 四川省巴中市人, 博士, 教授, 中国宇航学会第一届深空探测技术专业委员会委员, 四川省光电子学会委员, 电子科技大学科技领域组专家, 目前主要从事空间光电信息科学与工程领域的科研、教学工作。