

文章编号: 0258-7025(2009)06-1433-04

# 角锥棱镜阵列像差仿真与实验研究

胡诗杰<sup>1, 2</sup> 沈锋<sup>2</sup> 许冰<sup>2</sup> 吴健<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054; <sup>2</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要** 阐述了全光路像差校正自适应光学系统的工作原理, 明确了全系统的校正能力受制于角锥棱镜阵列的面形像差。针对工作在  $0.6328 \mu\text{m}$  波长的全光路像差校正自适应光学系统, 从仿真的角度研究了 3 种角锥棱镜阵列, 研究了角锥棱镜阵列的组成单元——角锥棱镜的综合角误差在  $2''$  以内时, 角锥棱镜阵列的面形像差可以忽略。用 WYKO 干涉仪测量了实际角锥棱镜阵列内每个角锥棱镜的波像差, 根据波像差计算的综合角误差, 拟合了角锥棱镜阵列的面形, 验证了仿真结果。

**关键词** 自适应光学; 全光路像差校正; 角锥棱镜阵列; 伪相位共轭

**中图分类号** O439; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1433

## Study of Simulation and Experiment of the Aberration of Retro Reflector Array

Hu Shijie<sup>1, 2</sup> Shen Feng<sup>2</sup> Xu Bing<sup>1</sup> Wu Jian<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Optoelectronic Information, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China  
<sup>2</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

**Abstract** The principle of the adaptive optics system for all-path aberration correction is presented. And the correction ability of the adaptive optics system for all-path aberration correction is confined by the aberration of the retro reflector array. Three kinds of the retro reflector arrays are numerically simulated for the appointed wavelength adaptive optics system for all-path aberration correction. It is studied that the aberration of the retro reflector array can be neglected while all-angle error of cell of the retro reflector array lies in  $2''$ . The simulation result is approved by the all-angle error based on the aberration of retro reflector in retro reflector array measured by WYKO interferometer.

**Key words** adaptive optics; correction for all-path aberration; retro reflector array; pseudo conjugation

## 1 引言

在全光路像差校正自适应光学系统<sup>[1]</sup>中, 角锥棱镜阵列作为伪相位共轭器件<sup>[2, 3]</sup>, 是一个非常关键的器件<sup>[4, 5]</sup>。根据文献[6]中所述的全光路像差校正自适应光学系统的工作原理, 角锥棱镜阵列的面形质量的好坏直接影响其伪相位共轭的能力, 从而最终影响波前传感器的探测精度<sup>[7]</sup>和全系统的校正能力。角锥棱镜阵列是由许多单个角锥棱镜组成的<sup>[8]</sup>, 单个角锥棱镜的面形加工误差、两面角误差等构成了单个角锥棱镜的综合角误差, 此误差将导致出射光相对入射光的不平行, 从而引起出射波前相对入射波前的倾斜。由于存在综合角误差的角锥棱镜在整个阵列上随机排列, 整个角锥棱镜阵列因为单个角锥棱镜的综

合角误差会出现一定的面形质量误差。

由于角锥棱镜阵列的面形质量直接影响着全系统的校正能力, 所以多大的角锥棱镜阵列面形质量误差对系统的校正效果可以忽略将是本文研究的重点。分别通过仿真和实验对不同综合角误差的角锥棱镜组成的角锥棱镜阵列进行研究, 以确定适合需要的角锥棱镜阵列精度要求。

## 2 全光路像差校正自适应光学系统工作原理

文献[5]中详细阐述了图 1 所示的全光路像差校正自适应光学系统的工作原理, 明确了角锥棱镜阵列在系统中作为伪相位共轭器件, 其面形像差在全系统

收稿日期: 2008-10-16; 收到修改稿日期: 2008-12-25

作者简介: 胡诗杰(1973—), 男, 副研究员, 博士研究生, 主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: seakeyhu@yahoo.com.cn

校正中不能忽略。全系统主要由倾斜反射镜 TM, 变形反射镜 DM, 共孔径分光镜 ASE, 角锥棱镜阵列, 共模波前传感器以及电控系统组成。根据文献[5]对全光路像差校正自适应光学系统的阐述, 共模波前传感器中的 HS1 探测到的波前为

$$\phi_{HS1} = -\phi_1 - \left( \frac{n}{\cos \theta'} + \frac{1}{\cos \theta} \right) d + \phi_r + \phi_4, \quad (1)$$

其中  $\phi_1$  为信标 Beacon 1 到达 ASE 前携带的像差;  $n$  为 ASE 的折射率;  $\theta$  为信标 Beacon 1 在 ASE 入射面的入射角,  $\theta'$  则为对应的折射角;  $d$  为 Beacon 1 到达 ASE 后引起的 ASE 的波像差  $\phi_3$  对应的变形差;  $\phi_r$  为角锥棱镜阵列的面形像差;  $\phi_4$  为共孔径分光镜到共模波前传感器之间的共光路像差。

HS2 探测到的波前为

$$\phi_{HS2} = \phi_2 - \left( n \frac{d}{\cos \theta'} - \frac{d}{\cos \theta} \right) + \phi_4, \quad (2)$$

其中  $\phi_2$  为信标 Beacon 2 到达共孔径分光镜 ASE 前携带的像差。

所以两波前传感器的差分融合波前为

$$\phi_{HS1} - \phi_{HS2} = -(\phi_1 + \phi_3 + \phi_2) + \phi_r, \quad (3)$$

(3)式中的差分融合波前就是系统中变形反射镜要校正的波前, 校正后的信标 Beacon 1 经共孔径分光镜反射后, 到达目标的将是角锥棱镜阵列本身像差的远场光斑。所以, 角锥棱镜阵列面形像差的好坏将直接影响全系统的校正性能。

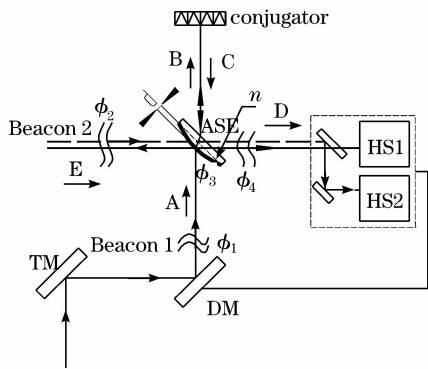


图 1 全光路像差校正自适应光学系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of configuration of adaptive optics system for all-path aberration correction

### 3 角锥棱镜阵列像差研究

由全光路像差校正自适应光学系统的工作原理可知, 角锥棱镜阵列面形像差直接影响全系统的校正效果。将从仿真和实验的角度对单个角锥棱镜的综合角误差引起的角锥棱镜阵列面形像差进行研究。

### 3.1 仿真研究

为了从原理上对角锥棱镜的综合角误差引起的角锥棱镜阵列面形像差有一定的认识, 对图 2 所示的角锥棱镜阵列进行仿真。

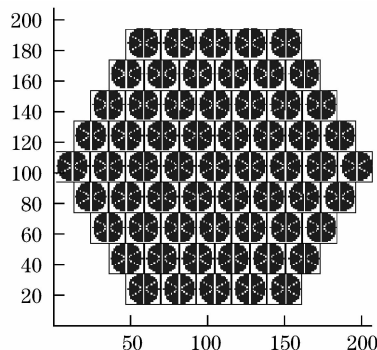


图 2 61 单元角锥棱镜阵列排布结构示意图

Fig. 2 Configuration of 61-element retro reflector array

单个角锥棱镜的综合角误差会引起出射光相对入射光的倾斜。假定入射波前为标准的平面波前, 那么, 在整个角锥棱镜阵列上, 把每个角锥棱镜的倾斜出射波前在整个瞳面上进行波前拟合, 则拟合的波前反映的就是角锥棱镜阵列本身的面形误差。

单个角锥棱镜的综合角误差对整个波前的面形误差影响通过仿真进行验证。将仿真 3 种角锥棱镜阵列, 其所有角锥棱镜的综合角误差分别为  $1''$ ,  $2''$  和  $3''$ 。由于在制作角锥棱镜阵列时, 单个角锥棱镜综合角误差的方向是随机排布的, 所以仿真过程也是对方向随机排布的角锥棱镜组成的角锥棱镜阵列进行仿真。

对于这 3 种角锥棱镜阵列, 平面光波前经角锥棱镜阵列后向反射后, 其后向反射波前的 3 组波前如图 3 所示。

由图 3 可知, 当角锥棱镜阵列由综合角误差为  $1''$  的角锥棱镜组成时, 角锥棱镜阵列自身的面形 (Peak-to-peak)  $P_V \approx 0.2\lambda$  ( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ), 均方根 (Root-mean-square)  $R_{MS} \approx 0.045\lambda$ , 该面形所对应的远场光斑的斯特列尔比 (Strehl Ratio)  $S_R > 0.9$ ; 当角锥棱镜阵列由综合角误差为  $2''$  的角锥棱镜组成时, 其面形  $P_V \approx 0.3\lambda$ ,  $R_{MS} \approx 0.07\lambda$ , 该面形所对应的远场光斑的  $S_R$  为  $0.8 \sim 0.9$ ; 而由综合角误差为  $3''$  的角锥棱镜组成角锥棱镜阵列时, 其面形  $P_V > 0.5\lambda$  ( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ),  $R_{MS} > 0.1\lambda$ , 该面形所对应的远场光斑的  $S_R$  为  $0.6 \sim 0.7$ 。由此可知, 对于这 3 种角锥棱镜阵列, 第 1 种阵列本身的像差较小, 是比较理想的角锥棱镜阵列; 第 2 种角锥棱镜阵列的像

差在可以接受的范围之内,也是比较理想的角锥棱镜阵列;第3种角锥棱镜阵列的像差较大。

由此可知,在制作角锥棱镜阵列时,除了对单个角锥棱镜加工面形有严格要求之外,还需要对单个角锥棱镜的综合角误差有严格的要求。经仿真,单个角锥的综合角误差在2"的范围内,才可认为角锥棱镜阵列的面形较好。

### 3.2 实验研究

对已经加工好的角锥棱镜阵列(图4)用WYKO干涉仪进行实际测量,采用WYKO干涉仪进行测量,测量的各个角锥棱镜波像差的 $P_V$ 值如图5(a)所示。忽略单个角锥棱镜本身的高阶像差,只认为其存在倾斜,根据图5(a)中的数据计算的单个角锥棱镜的综合角误差如图5(b)所示。

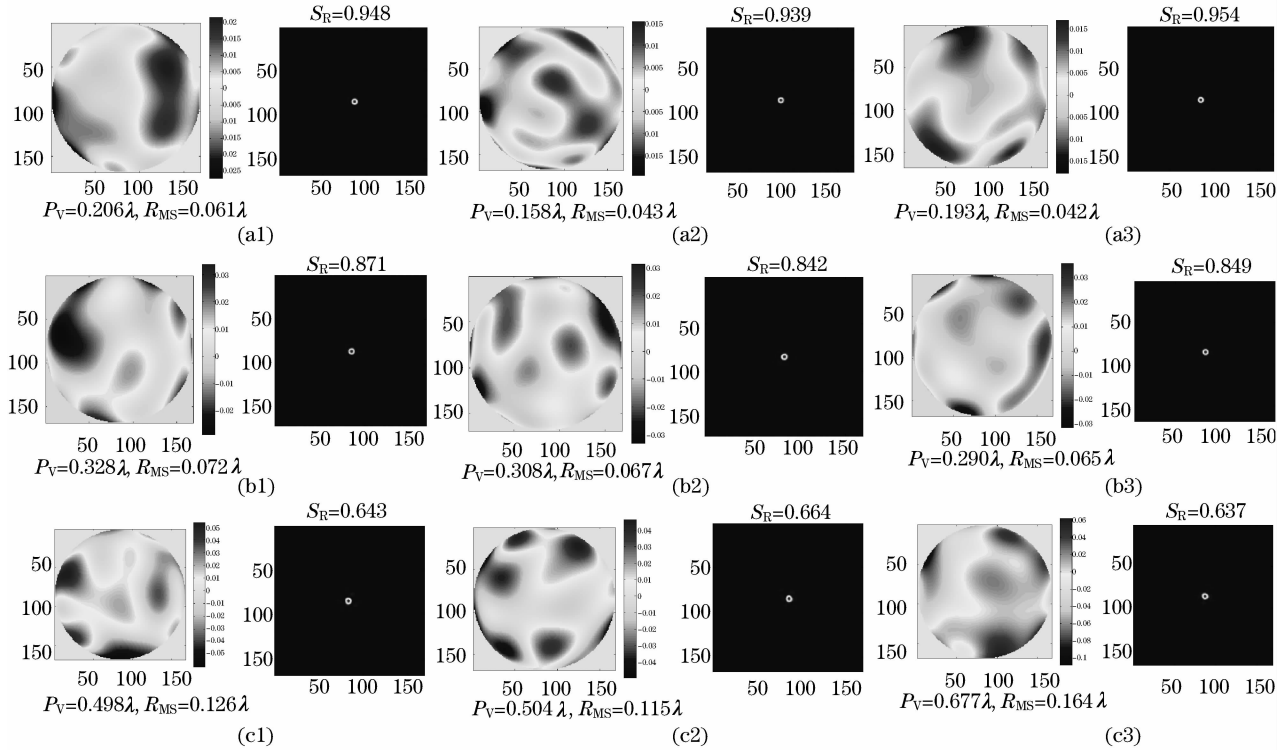


图3 (a)1", (b)2"和(c)3"的角锥棱镜组成的阵列的面形误差及对应的远场光斑质量

Fig. 3 Aberration and far-field spot of the retro reflector array with 1''(a), 2''(b), and 3''(c) retro reflector

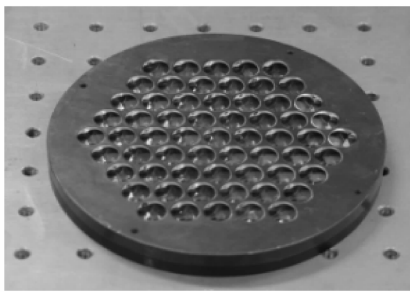


图4 实际测量的角锥棱镜阵列

Fig. 4 Actual retro reflector array

对角锥棱镜阵列中的各个角锥棱镜的综合角误差引起的出射光相对入射光的倾斜在整个瞳面上进行波前拟合,拟合的波前如图6(a)所示,其 $P_V = 0.412\lambda$ ,  $R_{MS} = 0.051\lambda$ 。该波前对应的远场光斑如图6(b)所示,其斯特列尔比为 $S_R = 0.879$ 。由图6可知,单个角锥棱镜出入射光的角度差在 $0.5'' \sim 2''$ 之间的角锥棱镜组成的阵列,其对波前的保真度

可以认为与完善成像相当,这与仿真结果一致。所以,在制作角锥棱镜阵列时,除了严格要求单个角锥棱镜的加工面形以外,还应严格要求单个角锥棱镜的综合角误差。

对于工作在其他波长的全光路像差校正自适应光学系统,其采用的角锥棱镜阵列可以根据以上仿真结果和实验进行仿真和计算,以便选用适合的角锥棱镜。

## 4 结 论

阐述了全光路像差校正自适应光学系统的工作原理,明确了全光路像差校正自适应光学系统的校正能力受制于角锥棱镜阵列的面形像差。然后从仿真的角度研究了对于 $0.6328\mu m$ 波长的全光路像差校正自适应光学系统,综合角误差在 $2''$ 以内的角锥棱镜组成的角锥棱镜阵列的面形质量可以忽略。

针对已经制作好的角锥棱镜阵列,从实验的角度验证了仿真的结果。说明了对于工作在其他波长的全光路像差校正自适应光学系统,其采用的角锥棱镜

阵列可以按照本文的仿真和实验进行仿真和计算,以便选用适合需要的角锥棱镜。

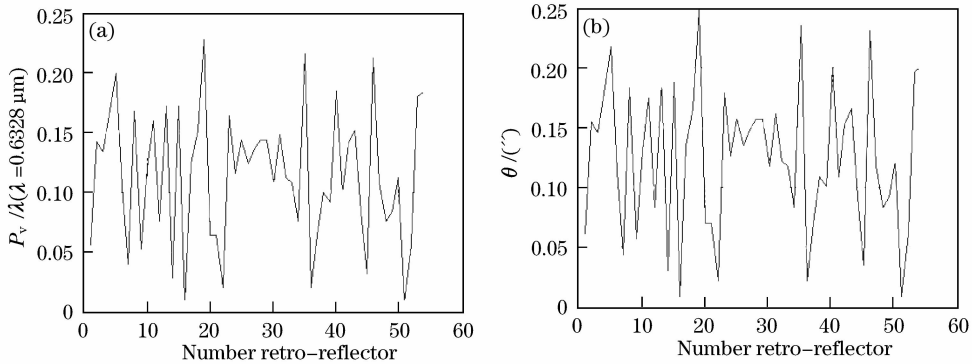


图 5 WYKO 干涉仪测量的各角锥棱镜的波像差(a)及综合角误差(b)

Fig.5 Aberration of every retro reflector (a) and all-angle error between ingoing and outgoing (b) beams measured by WYKO interferometer

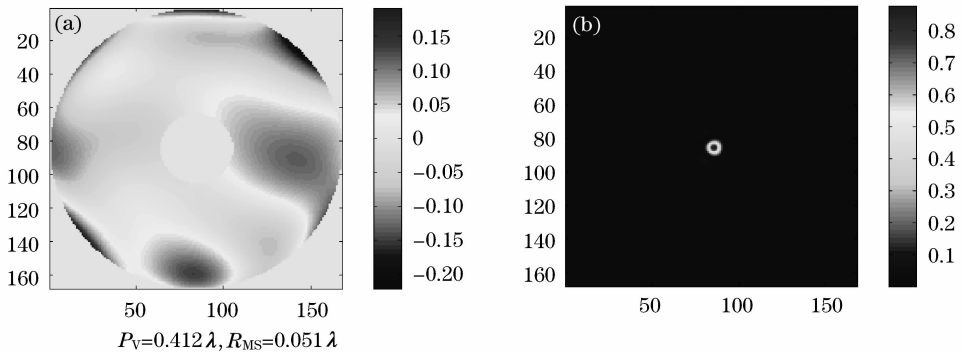


图 6 角锥棱镜阵列的面形(a)及对应的远场光斑(b)

Fig.6 Aberration of retro reflector array (a) and corresponding far-field spot (b)

## 参 考 文 献

- 1 K. W. Billman, Bruce A. Horwits, Paul L. Shuttuck. Airborne laser system common path/common mode design approach [C]. *SPIE*, 1999, **3706**: 196~203
- 2 H. H. Barrett, S. F. Jacobs. Retroreflective arrays as approximate phase conjugators[J]. *Opt. Lett.*, 1979, **4**(6): 190~192
- 3 R. A. Chipman, J. Shamir. Wevfront correcting properties of corner-cube array[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(15): 3203~3209
- 4 Hou Jing, Jiang Wenhan, Ling Ning. The pseudo phase conjugate fidelity analysis of retroreflector array[J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 2001, **13**(3): 287~290  
侯 静,姜文汉,凌 宁. 角锥棱镜阵列作为位相共轭器件的保真度分析[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(3): 287~290
- 5 Hou Jing, Jiang Wenhan, Ling Ning. Pseudo phase conjugator in common path/common mode adaptive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11): 1326~1330  
侯 静,姜文汉,凌 宁. 共光路/共模块自适应光学系统中厩相

- 位共轭器件的应用分析[J]. *光学学报*, 2001, **21**(11): 1326~1330
- 6 Hu Shijie, Yang Ping, Zhang Xuejun *et al.*. The study of calibration method of common mode Hartmann wavefront sensor in adaptive optics system for all-path aberration correction[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**: 28~32  
胡诗杰,杨 平,张学军等. 全光路相差校正自适应光学系统中共模波前传感器标定方法研究[J]. *光电工程*, 2008, **35**: 28~32
- 7 Hu Shijie, Chen Shanqiu, Yang Ping *et al.*. The study of measurement precision of Hartmann-shack wavefront sensor using retroreflector array[J]. *Chinese J. Lsers*, 2006, **33**(suppl): 369~372  
胡诗杰,陈善球,杨 平等. 角锥棱镜阵列对波前传感器探测精度的影响.[J]. *中国激光*, 2006, **33**(suppl): 369~372
- 8 Hou Jing. New concept studies of wavefront detection in adaptive optics[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002  
侯 静. 自适应光学波前探测新概念研究[D].长沙:国防科学技术大学,2002