

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0369-04

# 角锥棱镜阵列对波前传感器探测精度的影响

胡诗杰<sup>1,2</sup>, 陈善球<sup>1</sup>, 杨平<sup>1</sup>, 张翔<sup>1</sup>, 杨伟<sup>1</sup>, 许冰<sup>1</sup>, 吴健<sup>2</sup>

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

**摘要** 阐述了角锥棱镜阵列作为伪相位共轭波器件的原理, 仿真分析了角锥棱镜的单元形状、哈特曼-肖克波前传感器的缩束误差等因素对哈特曼-肖克波前传感器的波前复原能力的影响, 指出了圆形角锥棱镜阵列具有较好的波前保真度。同时, 也分析了角锥棱镜阵列本身的面形误差对哈特曼-肖克波前传感器复原精度的影响, 给出了消除角锥棱镜阵列本身面形误差的方法。

**关键词** 光学器件; 角锥棱镜阵列; 波前传感器; 伪相位共轭; 复原精度

**中图分类号** O439; TN247 **文献标识码** A

## Retroreflector Array Effect on Measurement Precision of Hartmann-Shack Wavefront Sensor

HU Shi-jie<sup>1,2</sup>, CHEN Shan-qiu<sup>1</sup>, YANG Ping<sup>1</sup>, ZHANG Xiang<sup>1</sup>,  
YANG Wei<sup>1</sup>, XU Bing<sup>1</sup>, WU Jian<sup>2</sup>

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

**Abstract** The theory of retroreflector array used as pseudophase conjugator was presented. The simulation about the ability that Hartmann-Shack wavefront sensor reconstruct wavefront was done when Hartmann-Shack wavefront sensor was affected by outline of single retroreflector and the beam-size reduced error of wavefront sensor etc. The circular retroreflector array possessed relatively better wavefront fidelity. Meanwhile the reconstruction precision of Hartmann-Shack wavefront sensor was analyzed when it was affected by its surface shape error and the correction method was presented.

**Key words** optical devices; retroreflector array; wavefront sensor; pseudophase conjugator; reconstruction precision

### 1 引言

角锥棱镜阵列是一种具有空间定向反射特性的伪相位共轭器件, 经它反射的后向反射波前是入射波前的伪相位共轭波<sup>[1~3]</sup>。该伪相位共轭波可以消除所经光路的波前畸变, 将入射波前很好地恢复<sup>[4,5]</sup>。角锥棱镜阵列的这种特性成为其应用于自适应光学的基础。在全光路像差校正自适应光学系统中, 角锥棱镜阵列的单个角锥棱镜与哈特曼-肖克传感器的微透镜阵列在单元数目、形状、排布严格匹配, 且单元位置对齐, 其探测结果才能作为伪相位共轭波的信息使用<sup>[6,7]</sup>。但是, 由于哈特曼-肖克传感器不可避免地存在调整误差, 角锥棱镜阵列也存在

加工误差, 如何在系统中避免这些误差对波前探测精度的影响是值得研究的问题。

### 2 角锥棱镜阵列作为伪相位共轭器件的原理

角锥棱镜是一种无源光学器件, 由三个互成直角的反射面构成。而角锥棱镜阵列是由若干个角锥棱镜构成的阵列, 经其反射后的光束波前  $E_2(x, y)$  可以近似认为是入射波前的  $E_1(x, y)$  相位共轭波, 这种波前称为伪相位共轭波<sup>[1~3]</sup>

$$E_2(x, y) = E_1^*(x, y)P(x, y), \quad (1)$$

**作者简介:** 胡诗杰(1973—), 男, 四川大竹人, 助理研究员, 电子科技大学博士研究生, 主要从事自适应光学的研究。

E-mail: seakeyhu@yahoo.com.cn

其中

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^n \exp\{i[2\phi(x_0^i, y_0^i)]\} \times t(x - x_0^i, y - y_0^i),$$

$(x_0^i, y_0^i)$  是一个角锥棱镜单元的中心位置,  $t(x, y)$  是角锥棱镜单元的孔径函数。

### 3 各种误差对哈特曼-肖克传感器复原精度的影响

在图 1 所示的全光路像差校正<sup>[8]</sup>自适应光学系统中,哈特曼-肖克传感器探测的是经角锥棱镜阵列后向反射的波前相位,所以角锥棱镜阵列自身的单元形状、面形以及哈特曼-肖克传感器光学系统的缩束误差,在一定程度上影响着哈特曼-肖克传感器的波前复原精度。

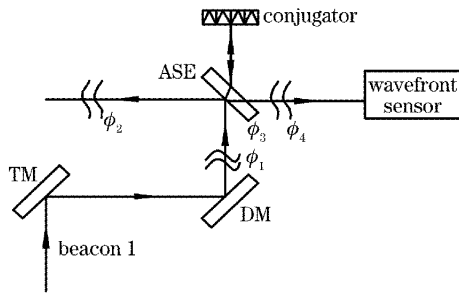


图 1 全光路像差校正自适应光学系统结构示意图  
Fig.1 Configuration of adaptive optics for all light path aberration correction

#### 3.1 角锥棱镜单元形状为圆形、方形时哈特曼-肖克传感器的复原精度

角锥棱镜单元底面形状可以切割为三角形、六边形、圆形和正方形等。从文献[9]可知,六边形和正方形角锥棱镜可以满排布,并且可以与微透镜阵列的子孔径一一对应。但是,从加工的角度看,正方形和六边形的加工难度均大于圆形角锥棱镜的加工难度。在单个角锥棱镜反射的波前与微透镜子孔径一一对应的前提下,分析了两种角锥棱镜阵列对波前的保真度。

选择的哈特曼-肖克传感器的子孔径布局如图 2 所示,图中的方框为子孔径,圆为入射波前的形状。图 3 所示的是哈特曼-肖克传感器对经方形角锥棱镜阵列和圆形角锥棱镜阵列后向反射波前的重构精度,其中像差波前由 Zernike 多项式前 35 阶表征。波前重构精度定义为:残余波前相位均方根误差  $C_{rms}$  与入射波前相位均方根误差  $T_{rms}$  的比值  $t =$

$C_{rms}/T_{rms}$ 。比值  $t$  越小,说明哈特曼-肖克传感器的波前重构精度越高。

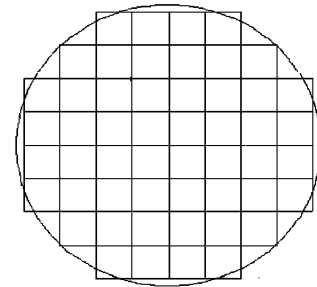


图 2 8×8 布局哈特曼-肖克波前传感器结构示意图

Fig.2 Configuration of subapertures in 8×8 Hartmann-Shack wavefront sensor

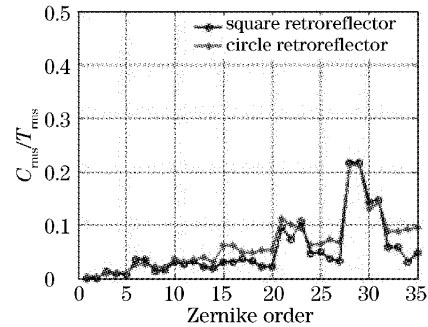


图 3 哈特曼-肖克传感器探测经方形角锥棱镜阵列与圆形角锥棱镜阵列后向反射波前的复原精度

Fig.3 Reconstruction precision of Hartmann-Shack wavefront sensor for wavefront reflected by square retroreflector array and circle retroreflector array

从图 3 可以看出,波前传感器对经过圆形角锥棱镜阵列后向反射波前的复原精度稍差于方形角锥棱镜阵列的复原精度。但从全局来看,圆形角锥棱镜阵列仍能使哈特曼-肖克传感器有较高的波前重构精度,可以应用于全光路像差校正自适应光学系统中。

#### 3.2 角锥棱镜阵列本身面形误差对哈特曼-肖克传感器复原精度的影响

角锥棱镜阵列不可避免地存在加工误差和装调误差,所以如何消除角锥棱镜阵列本身的面形误差对波前复原带来的影响是我们需要考虑的问题。按照常规消除波前传感器自身误差的标定方法,带着角锥棱镜阵列一起标定哈特曼-肖克传感器,可以消除角锥棱镜阵列本身的面形误差对波前复原的影响。图 4 所示的是带着角锥棱镜阵列标定哈特曼-肖克传感器的结构示意图。使用这种标定哈特曼-肖克传感器的方法,可以增加角锥棱镜阵列面形误

差的冗余度。

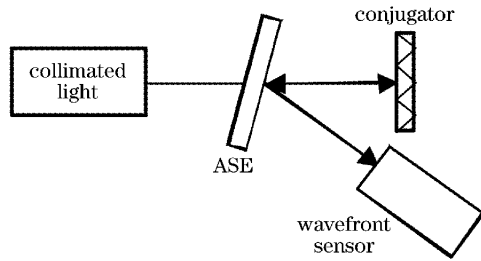


图4 标定哈特曼-肖克传感器结构示意图

Fig. 4 Schematic of Hartmann-Shack wavefront sensor calibrated

### 3.3 缩束光学系统的缩束误差对哈特曼-肖克传感器复原精度的影响

哈特曼-肖克传感器包括缩束光学系统和哈特曼-肖克探头。缩束光学系统的作用是为了使哈特曼-肖克传感器匹配被测光束的口径。当用哈特曼-肖克传感器直接探测待测波前时,缩束光学系统的缩束比可以有一定的容忍度,但是,当哈特曼-肖克传感器探测经角锥棱镜阵列后向反射的波前时,由于每个角锥棱镜都对应一个微透镜子孔径,所以,对哈特曼-肖克传感器有严格的缩束比要求。下面分析缩束光学系统的缩束误差对哈特曼-肖克传感器复原精度的影响。

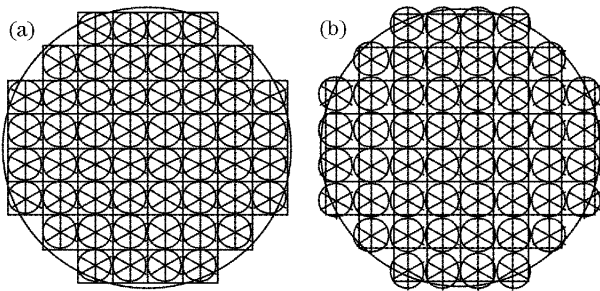


图5 哈特曼-肖克传感器的缩束比为1:1(a)和1.033:1(b)时,角锥棱镜阵列与微透镜对应结构示意图

Fig. 5 Configurations of retroreflector array and microlens array with beam-size reduced ratio of Hartmann-Shack wavefront sensor 1:1 (a) and 1.033:1 (b), respectively

假定哈特曼-肖克传感器缩束后角锥棱镜阵列与微透镜的匹配关系为图5(a)时是最优匹配,图5(b)是缩束比为1.033:1时的情形,图中的圆形为每个角锥棱镜对应的光束孔径,而方形为微透镜子孔径。当缩束光学系统的缩束比为1:1和1.033:1时,哈特曼-肖克传感器的复原精度如图6所示。图中线1,

线2和线3分别表示哈特曼-肖克传感器直接探测理想缩束比光束时的复原精度、哈特曼-肖克传感器直接探测缩束比放大了1.033倍的光束时的复原精度以及哈特曼-肖克传感器探测经角锥棱镜阵列向后反射光束的复原精度。可以看出:

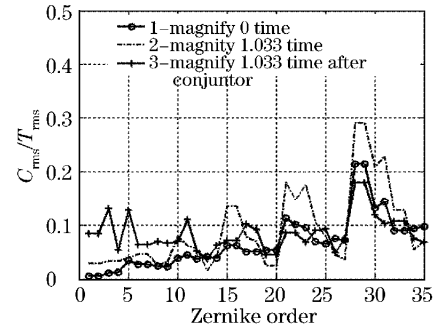


图6 哈特曼-肖克波前传感器的复原精度

Fig. 6 Reconstruction precision when wavefront sensor detects

1)当缩束光学系统缩束比为1.033:1的哈特曼-肖克传感器直接探测待测波前时,其复原精度差于理想缩束比的哈特曼-肖克传感器的复原精度;

2)当缩束光学系统缩束比为1.033:1的哈特曼-肖克传感器探测经角锥棱镜阵列后向反射的波前时,其复原精度受到的影响程度较大。这是因为与微透镜的子孔径对应的波前已经不再是单个角锥棱镜对应的波前,此时的波前是跨越相邻两个角锥棱镜的部分波前,这部分波前经角锥棱镜后向反射后,造成了波前相位的不连续,从而导致了复原精度变差。

所以,对于探测经角锥棱镜阵列后向反射波前的哈特曼-肖克传感器,其缩束光学系统的缩束比有严格的调整要求:单个角锥与微透镜的子透镜一一对应,不存在相位串扰。但是,哈特曼-肖克传感器的缩束调整误差总是存在的,为了减小缩束调整误差对哈特曼-肖克传感器的复原精度影响,在制作角锥棱镜阵列时,单个角锥棱镜的尺寸适当小于理想尺寸,就可以增加缩束光学系统的缩束冗余度。

## 4 结 论

阐述了角锥棱镜阵列的工作原理,仿真研究了哈特曼-肖克传感器对经圆形角锥棱镜阵列和方形角锥棱镜阵列后向反射波前的仿真能力,指出了圆形角锥棱镜阵列对波前的保真度较好,可以用于全光路像差校正自适应光学系统中;同时,在有角锥棱镜阵列的自适应光学系统中,带着角锥棱镜阵列一

起标定哈特曼-肖克传感器可以消除角锥棱镜阵列的面形误差;并且,在制作角锥棱镜阵列时,适当减小单个角锥棱镜的单元尺寸可以增加缩束光学系统的缩束冗余度。

### 参 考 文 献

- 1 H. H. Barrett, S. F. Jacobs. Retroreflective arrays as approximate phase conjugators [J]. *Opt. Lett.*, 1979, **4**(6): 190~192
- 2 Stephen F. Jacobs. Experiments with retrodirective array [J]. *Opt. Eng.*, 1982, **21**(2): 281~283
- 3 Chipman Russel A, Joseph Shamir, H. John Caulfield *et al.*. Wavefront correcting properties of corner-cube arrays [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(15): 3203~3209
- 4 Zhou Renzhong, Yan Jixiang. Adaptive Optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996. 435~440  
周仁忠,阎吉祥. 自适应光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1996. 435~440
- 5 Hu Dongxia, Zhang Xiaomin, Jing Feng *et al.*. Using cube corner arrays to restraining wavefront aberration of low spatial frequency [J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 2003, **15**(11): 1057~1060  
胡东霞,张小民,景峰等. 用角锥棱镜阵列抑制低频波前畸变 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(11): 1057~1060
- 6 Hou Jing, Jiang Wenhan, Ling Ning. Pseudophase 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相位共轭器件的应用分析 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(11): 1326~1330
- 7 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
- 8 Kenneth W. Billman, Bruce A. Horwits, Paul L. Shuttuck. Airborne laser system common path/common mode design approach [C]. *SPIE*, 1999, **3706**: 196~203
- 9 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