

## 角锥阵列相位精密调整机构设计及锁相实验

余 焘<sup>1,2,3</sup>, 李新阳<sup>1,2</sup>, 李 枫<sup>1,2</sup>, 耿 超<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;
2. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 为了校正角锥棱镜阵列中子孔径的 piston 误差, 设计了一种多单元一维相位精密调整机构, 提出了一种基于相干合成原理的角锥棱镜阵列 piston 误差检测、调整方法。首先, 设计了一种机械装置使单个角锥棱镜能够进行一维相位调整; 其次, 利用远场成像原理, 分析了角锥阵列 piston 误差对远场衍射成像的影响; 最后, 基于远场光斑的不同, 提出了一种角锥阵列 piston 误差的检测、调整方法。实验结果表明: 角锥阵列相位精密调整机构能够达到 0.1  $\mu\text{m}$  级的调整精度, 通过观测角锥棱镜阵列反射光束远场衍射图像, 调整角锥棱镜单元相对位置, 将反射光束 PIB 提升至 0.49, 远场图像接近仿真结果, 基本实现了角锥棱镜阵列子孔径的 piston 误差的校正, 提升了角锥棱镜阵列使用效率, 扩展了角锥棱镜阵列使用场景。

**关键词:** 角锥棱镜阵列; 相位精密调整; 相干合成; 锁相控制

**中图分类号:** TN243 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190568

## Design of the phase precise adjustment mechanism of the CCR array and its phase-locked experiment

Yu Tao<sup>1,2,3</sup>, Li Xinyang<sup>1,2</sup>, Li Feng<sup>1,2</sup>, Geng Chao<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to correct the piston phase error of the corner cube reflector (CCR) array, a multi-element one-dimensional phase precise adjustment mechanism was designed, and a method of piston phase error detection and adjustment based on the coherent synthesis principle was proposed. Firstly, a mechanical device was designed to adjust the phase of a single corner cube reflector. Then, based on the principle of far-field imaging, the influence of piston phase error on far-field diffraction imaging was analyzed. Secondly, based on the difference of far-field facula, a method of measuring and adjusting the piston phase error of pyramid array was proposed. The experimental results show that the phase precise adjustment mechanism of the CCR array can achieve the adjustment accuracy of 0.1  $\mu\text{m}$  level. By observing the far-field image of the reflected beam of the CCR array, adjusting the relative position of the CCR array, the PIB of the reflected beam is raised to 0.49, and the far-field image is close to the results of simulation. The piston phase error correction of the sub aperture of the CCR array is basically realized, and it improves the use efficiency of CCR array and expands the use scenarios of CCR array.

收稿日期: 2019-12-15; 修订日期: 2020-02-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (61675205)

作者简介: 余焘 (1995-), 男, 硕士生, 主要从事自适应光学控制方面的研究工作。Email: ucasyutao@qq.com

导师简介: 李新阳 (1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事自适应光学方面的研究工作。Email: xyli@ioe.ac.cn

**Key words:** corner cube reflector array; phase precise adjustment; coherent beam combining; phase control

## 0 引言

角锥棱镜是一种回射光束的玻璃元件,后半部分是一个顶角为直角的三棱锥,与之相连的三个面为反射面,两两互相垂直,光线经过三次反射,射出的反射光线与入射光线平行。且射入光束的光线在棱镜内的光程相等,理想的角锥棱镜对光束的反射应该使光束内光线相位共轭。由于角锥棱镜反射功能是基于互相垂直的玻璃面实现的,角锥棱镜的精度很大程度上取决于玻璃角的误差,在实际应用中常要求这些玻璃角的误差必须在几秒精度以内。受限于机械加工精度与角锥本身结构的原因,大孔径的角锥在玻璃角的加工精度上以及角锥重量体积上往往表现不佳,因此市面上常见的角锥口径往往只有一、两英寸大小,这显然不能满足一些实际工程的要求。因此,当需要使用大口径角锥时,常采用多个角锥阵列的方式组成一个大口径的光学后向反射器。

角锥阵列反射光束的相差主要由三个部分组成<sup>[1]</sup>:入射光束的共轭相位,加工误差引起的角锥棱镜阵列的附加相位差以及各子孔径之间的 piston 误差。其中,对于角锥棱镜本身存在的二面角误差与反射面面型误差已经有相当多的讨论了,研究方法包括实验、仿真等。研究表明,角度误差在一定范围内是可以被忽略的<sup>[2]</sup>,面型误差通过一些技术手段可以将影响降到最低<sup>[3]</sup>。而对于角锥阵列子孔径之间的 piston 误差,在已有应用中不敏感,还没有对其进行专门的研究。

角锥棱镜阵列子孔径之间的 piston 误差,是由于安装误差导致角锥棱镜工作面不在一个平面造成的。piston 误差会引起反射光束的相差,影响角锥棱镜阵列相位共轭能力,造成远场衍射光强峰值的下降。当入射光为平面波时,由于角锥棱镜工作面不在一个平面,回射光束变为若干存在 piston 误差的光束,光束的 piston 误差可通过远场衍射成像观测。通过观测远场光斑形态进行相位调整的方法在相干合成领域已经有相当成熟的研究<sup>[4-5]</sup>,其中利用 SPGD 算法的相干合成技术研究在单元数<sup>[6]</sup>和长距离<sup>[7]</sup>都表现优异,因此,文中通过观测角锥棱镜反射光束远场衍射光斑的形态,进行角锥棱镜的 piston 误差的检

测与校正。

## 1 角锥棱镜阵列理论分析

在光波叠加区域内不同的点可能会出现光强的变化,具体表现可能为叠加区域光暗存在差异。只要两光波的位相差时恒定的,在叠加区域的光强就是恒定的。这种在叠加区域内出现的光强的稳定的强弱分布现象称为光的干涉。可以把光的相干条件总结为三点<sup>[8]</sup>:频率相同;震动方向相同,或存在相互平行的震动分量;位相差恒定。

对于实际光波来说,只有当光波是由同一个光波剥离出来的时候,也就是来自同一个光源时才可能相干<sup>[8]</sup>。对于角锥阵列来说,在实际应用场景其反射光束均来自同一光源。且角锥棱镜作为后向反射器只改变光束方向,对其他不作改变,入射光线与出射光线之间存在相位共轭关系<sup>[1]</sup>。因此,角锥阵列内不同角锥反射光束为相干光。

对于理想的角锥棱镜,如果入射光束为一束平面波,则反射的光束内光线同样相位相同。那么,如图 1 所示,若多个理想角锥严格的排布在一个平面内,一个大光束经过角锥阵列的反射则变成同等角锥数量的小光束,并且光束之间相位相等。

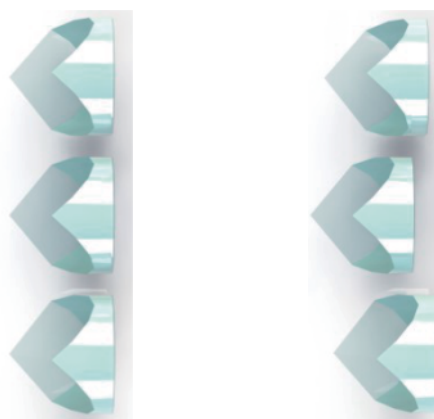


图 1 角锥棱镜阵列

Fig.1 Corner cube reflector array

但在实际的产品中,角锥需要固定在机械结构上,机械结构由于加工误差的原因,角锥固定平面可能会有误差。并且,角锥固定在机械结构的安装过程

中同样可能会有误差。这些误差累加起来,可能会使角锥之间前后之间的距离达到微米级。图 1 中,这些因素综合起来可能会导致角锥阵列实际排布不在一个平面。对于常用的 500~1 000 nm 的激光来说这个误差可能是几倍波长的差距,并且对实际使用造成影响。假设角锥棱镜为理想角锥棱镜,这些误差可以认为角锥棱镜阵列反射光束之间存在一个恒定的相位差,可通过相干光的干涉效应进行分析与仿真。

笔者对角锥回射光束之间不存在相位差的情况以及存在恒定相位差的情况进行仿真,在参考文献 [9] 中可以看到,单路角锥棱镜远场光斑形态接近理想艾里斑形态,文中不考虑角锥本身精度的影响,理想角锥棱镜的回射光束在远场的光强分布可简化为多路光相干合成的问题。

平行光经过角锥棱镜阵列反射为若干束平顶光,其近场光束可表示为:

$$E_{near} = Ae^{i\varphi} \quad (1)$$

式中:  $A$  是振幅;  $\varphi$  是相位对其做傅里叶变换即可得到远场复振幅。

$$E_{far} = \mathcal{F}(E_{near}) \quad (2)$$

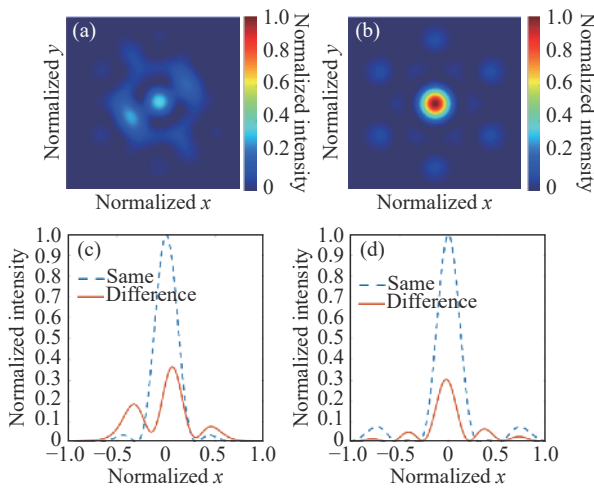


图 2 七路仿真远场光斑图像分布。(a) 随机相位差远场光斑图像分布, (b) 无相位差远场光斑图像分布, (c) 横轴远场光强截面图, (d) 纵轴远场光强截面

Fig.2 Simulation of seven units far field intensity distribution. (a) Random piston phase difference far field intensity distribution, (b) No piston phase difference far field intensity distribution, (c) Horizontal axis light intensity curve, (d) longitudinal axis light intensity curve

仿真结果如图 2 所示,图 2(a) 是存在 piston 误差的七路相干光远场衍射图像,图 2(b) 是没有 piston 误差的七路相干光远场衍射图像,可以看到, piston 误差导致远场衍射光强的能量分散,光斑形态也有差异。图 2(c) 是光强横截面曲线图,可以看到,没有相差的光强峰值是有相差的 3 倍,可以认为,在一些应用领域,角锥棱镜子孔径间的 piston 误差会导致角锥阵列性能下降。

远场光强分布是远场复振幅的平方,则远场光强为:

$$I = |E_{far}|^2 \quad (3)$$

## 2 角锥棱镜阵列 piston 误差检测光路

根据仿真结果可以知道 piston 误差的存在会导致远场衍射图像不同,因此可以设计一个光路,通过检测角锥棱镜阵列反射光束的远场衍射成像,即可检测到角锥棱镜阵列子孔径之间的 piston 误差。

如图 3 所示,激光光源放置在透镜焦点出,激光通过透镜转化为一束平行光,平行光传播至角锥棱镜阵列反射为若干束平行光,平行光经过透镜通过分光镜的反射传播聚焦到 CCD 相机中,连接计算机观测角锥棱镜阵列反射光束的远场衍射光斑形态。

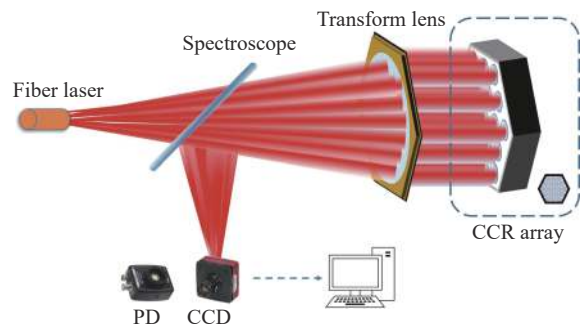


图 3 角锥棱镜阵列反射光束远场光斑检测光路图

Fig.3 Light path of far field intensity distribution of CCR array reflected beam

## 3 角锥阵列相位精密调整机构设计

角锥反射的正面为圆形,背面为三个互相垂直的反射面。目前,角锥棱镜阵列的排布通常有两种,一种是正六边形式的排布,另一种为正方形式的排布。正六边形的排布方式的优点是有效的通光口径大,光能损失小<sup>[10]</sup>。因此文中采用正六边形式的排布方式。

图 4 是文中设计的角锥阵列相位精密调整机构基本原理图,角锥棱镜 1、套筒 2、弹簧 4 以及套筒后盖 5 组成角锥棱镜单元,角锥棱镜单元以正六边形排布的阵列方式安装在阵列体 3 的子孔径中。角锥棱镜通过胶粘固定在套筒上,套筒与阵列体形成圆柱副,有一个转动自由度和一个移动自由度。其中,移动自由度为本次设计需要的自由度,角锥棱镜的原理上对该方向的转动自由度不敏感,可不从结构角度上限制其自由度,从加工采用基孔制设计要求 H7/g6 精度,用于间隙很小的滑动配合,并且不希望自由转动,但可以自由移动和滑动并精密定位。

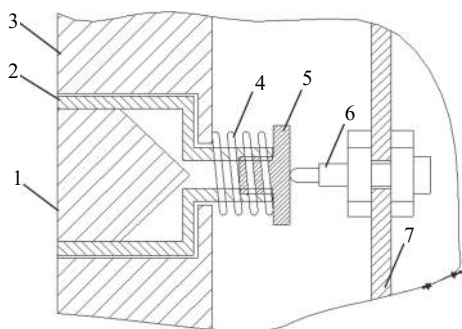


图 4 角锥棱镜阵列相位精密调整机构原理图

Fig.4 Working principles of phase adjustment mechanism of the CCR array

驱动器 6 为角锥棱镜单元提供前进的驱动力,驱动器 6 后退时弹簧 4 释放弹簧的弹力为角锥棱镜单元提供向后的驱动力。机构的调整精度很大程度上取决于驱动器的调整精度,高精度直线驱动器有压电陶瓷、直线电机、微分头、差分调节螺丝等。从初步验证结构可靠性的方面考虑,本次设计以手动控制的差分调节螺丝为主,同时在结构上保留更换其他驱动器的可能性。

如图 5 所示,文中设计了一种手动调节的角锥阵列相位精密调整机构,手动调节角锥阵列的组成部分从左到右依次是角锥载体、角锥棱镜、套筒、载体后盖、压簧、套筒后盖、螺钉、立柱、调节螺丝安装板、差分调节螺丝、螺母。19 单元角锥按正六边形方式排布,兼容 7 路工作方式。并且留有扩展空间,理论上可进行无限的扩展拼接。

最终装配结果如图 6(a) 所示。调节时,将 1/16 in 六角扳手伸入差分调节螺母内部,扳手每旋转一周可

使差分调节螺母前方顶珠前进 25 μm。顶珠与套筒后盖相接,推动套筒与套筒后盖及角锥棱镜组成的角锥单元,并压缩弹簧。顶珠后退时,弹簧回复力推动角锥单元,实现角锥的单自由度位移。

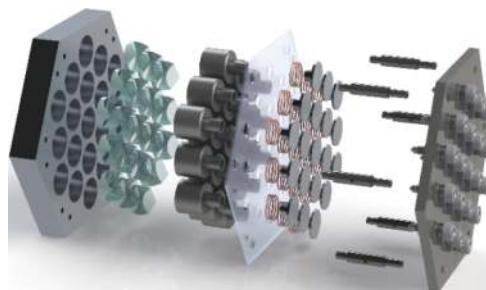


图 5 角锥棱镜阵列相位精密调整机构爆炸图

Fig.5 Exploded diagram of phase adjustment mechanism of the CCR array

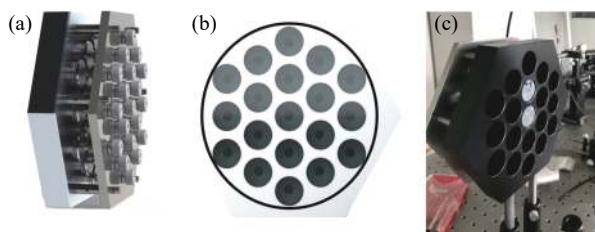


图 6 角锥棱镜阵列相位精密调整机构

Fig.6 Phase adjustment mechanism of the CCR array

角锥阵列一个很重要的评价指标即占空比的计算。通过计算反射光束的面积以及可射入最大面积之比即可得到角锥阵列占空比。光束为圆形,对于此次设计的角锥棱镜阵列,可射入的光束如图 6(b) 所示。有效工作光束最大直径  $D$  为:

$$D = 5 \times d + 4 \times L - 2 \times \frac{1}{2}d \quad (4)$$

式中:  $d=25.4 \text{ mm}$  为角锥口径;  $L=32 \text{ mm}$  为相邻角锥之间的距离,代入解得  $D=153.4 \text{ mm}$ 。则有效工作光束面积为:

$$A = \pi \frac{D^2}{4} = 18481.6 \text{ mm}^2 \quad (5)$$

角锥工作面积为:

$$A_1 = 19 \times \pi \frac{d^2}{4} = 9627.4 \text{ mm}^2 \quad (6)$$

则占空比  $n = \frac{A_1}{A} \times 100\% = 52.1\%$ ,基本满足需求。

最终实物如图 6(c) 所示,机构整体结构合理,机

械精度基本能满足实际需求, 装配简单, 拆装更换配件容易。

### 4 实验结果

在实验平台上, 验证单个角锥棱镜单元反射光束远场衍射光斑形态, 波长为  $1.064\ \mu\text{m}$ , 激光功率  $100\ \text{mW}$ , 曝光时间  $1.5\ \text{ms}$  情况下 CCD 得到的图像如图 7(a) 所示。与仿真得到的图 7(b) 相对比基本一致。可以认为, 多路角锥反射光束在远场的光强分布可简化为多路光相干合成的问题。

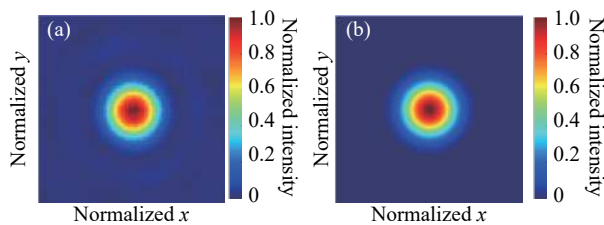


图 7 单路远场光斑图像。(a) 实验远场光斑图像, (b) 理论远场光斑图像

Fig.7 Single far field intensity distribution. (a) Experimental far field intensity distribution, (b) Simulation far field intensity distribution

在三路角锥棱镜 piston 误差校正实验中, 选择一路角锥棱镜作为校正基准, 露出待校正角锥棱镜与基准角锥棱镜, 遮挡其它角锥棱镜, 进行两路角锥棱镜校正。图 8(a) 是校正以前露出的两路光束角锥棱镜反射光束远场衍射图像, 调整待调节角锥棱镜前后位置, 使 piston 误差最小, 即干涉条纹中心光斑最亮, 调整结果如图 8(b) 所示。

用同样的方法调整另一路角锥棱镜, 调整后取下遮挡, 最终结果如图 9(c) 所示。图 9(a)、9(b) 是校正

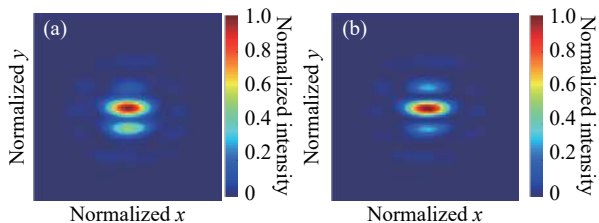


图 8 双路校正远场光斑图像。(a) 校正前远场光斑图像, (b) 校正后远场光斑图像

Fig.8 Two units correction far field intensity distribution. (a) Far field intensity distribution before correction, (b) Corrected far field intensity distribution

后基准角锥棱镜反射光束与另外两路反射光束 CCD 得到的图像, 与图 9(c) 为同一颜色尺度。可以看到, 多路光相干合成能提高远场光强能量峰值。图 9(d) 是无 piston 误差三路光相干合成的仿真结果, 与笔者实验结果基本一致。

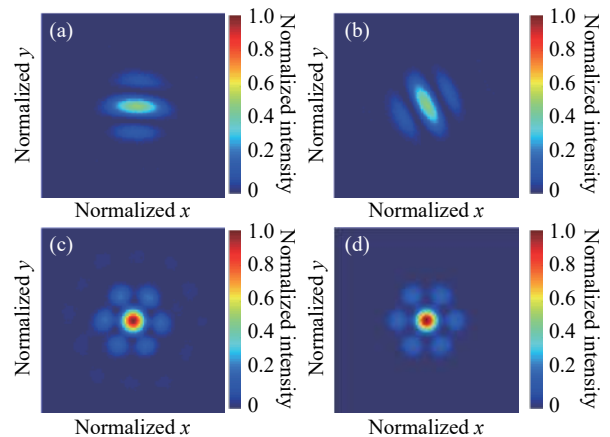


图 9 三路校正实验远场光斑图像。(a)1, 3 路远场光斑图像, (b)1, 2 路远场光斑图像, (c) 实验三路远场光斑图像, (d) 理论三路远场光斑图像

Fig.9 Three units correction experiment. (a)1,3 units far field intensity distribution, (b) 1,2 units far field intensity distribution, (c) Experiment of three units correction far field intensity distribution, (d) Simulation of three units correction far field intensity distribution

图 10 是光强归一化后横截面光强曲线图, 可以看到, 实验值和理论值基本吻合。但由于角锥棱镜加工质量的影响, 第二级旁瓣比理论结果更明显一些。

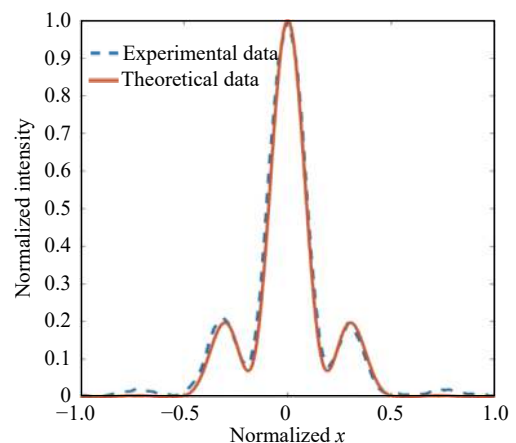


图 10 三路远场光斑光强截面曲线

Fig.10 Curve of three units far field intensity section

实验波长  $1.064\ \mu\text{m}$ , 对角锥棱镜的位置调整两倍体现于反射光束相位上, 可以认为, 文中设计的角锥阵列相位精密调整机构能够实现  $0.1\ \mu\text{m}$  级的相位调整, 通过检测基于相干合成原理的远场衍射图像的方法能够校正角锥棱镜阵列子孔径间的 piston 误差。调整后  $\text{PIB}=0.4971$ , 与仿真结果  $\text{PIB}=0.5361$  相差 7.2%, 实验结果接近仿真结果, 提升了角锥棱镜的使用效率  $x$ 。

## 5 结 论

文中分析了角锥棱镜阵列子孔径间 piston 误差对其反射性能的影响, 基于远场成像原理, 仿真了角锥阵列 piston 误差对远场衍射成像的影响, 结果表明, 该误差会导致角锥棱镜阵列反射光束远场光强能量分散, 造成远场衍射能量峰值下降。为校正角锥棱镜阵列子孔径间 piston 误差, 文中设计了一种机械装置使单个角锥棱镜能够实现前后位移, 实现角锥棱镜阵列单元的相位调整; 然后, 基于相干合成的原理, 设计了一种检测角锥棱镜阵列 piston 误差的方法, 利用远场光斑图像对角锥棱镜单元相位进行调整。实验结果表明: 该方法能够通过观察远场衍射图像, 能够检测角锥棱镜阵列子孔径间 piston 误差, 文中设计的角锥阵列相位精密调整机构能够实现  $0.1\ \mu\text{m}$  级别的位移, 锁相实验将 PIB 提升至 0.497 1, 接近理论结果, 远场光强截面与仿真结果基本吻合。可以认为, 基本实现角锥棱镜阵列 piston 误差的检测与校正, 文中设计的角锥阵列相位精密调整机构能够有效的校正角锥棱镜阵列的 piston 误差, 提升角锥阵列使用效率, 扩展角锥阵列使用场景。

## 参考文献:

- [1] Huang Jian, Xian Hao, Jiang Wenhan, et al. High precision pointing method based on phase conjugate and wavefront detecting technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1754-1757. (in Chinese)
- [2] Hu Shijie, Shen Feng, Xu Bing, et al. Study of simulation and experiment of the aberration of retro reflector array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009(6): 1433-1436. (in Chinese)
- [3] Ye Yidong, Peng Yong, Chen Tianjiang, et al. Numerical simulating of cube corner retroreflector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(4): 485-490. (in Chinese)
- [4] Chen Zilun, Zhou Xuanfeng, Wang Zefeng, et al. Review of all-fiber signal combiner for high power fiber lasers (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103005. (in Chinese)
- [5] Geng Chao, Li Feng, Huang Guan, et al. Research progress of laser phased array technique based on fiber adaptive manipulation (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103003. (in Chinese)
- [6] Su Rongtao, Ma Yanxing, Xi Jiachao. High efficiency coherent beam combing of 60 channel large array fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0133001. (in Chinese)
- [7] Zhi Dong, Ma Yanxing, Ma Pengfei. Efficient coherent beam combining of fiber laser array through km-scale turbulent atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(10): 1005007. (in Chinese)
- [8] Liang Quanting, Liu Cuihong. A Concise Course of Physical Optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.(in Chinese)
- [9] Zhu Mengzhen, Wan Qiang, Liu Xu, et al. Study on coherent characteristic of solid state laser with corner cube resonator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0906008. (in Chinese)
- [10] Li Zhen, Zheng Yun. Evaluation of reflective performance of cube corner array retroreflector [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1995, 16(2): 109-115. (in Chinese)