

DOI: 10.12086/oe.2018.170691

## 基于光纤耦合的光纤激光阵列像差探测

李枫<sup>1,2</sup>, 耿超<sup>1,2</sup>, 黄冠<sup>1,2,3</sup>, 杨燕<sup>1,2,3</sup>,  
李新阳<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

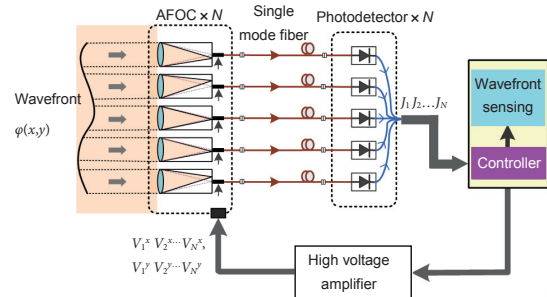
**摘要:** 提出了一种基于光纤耦合的光纤激光阵列像差探测方法, 介绍了其结构和波前复原过程, 采用数值仿真模拟其复原湍流像差的过程, 并进行了7单元自适应光纤准直器(AFOC)阵列复原静态像差的实验。仿真结果表明, 本文提出的波前传感方法能够有效复原出湍流畸变波前, 且对于不同单元数的六边形排布阵列, 存在不同的最优复原阶数。阵列填充因子的降低会增大复原残差, 填充因子大于0.8可保证复原残差RMS相较于填充因子为1时的增幅不超过10%。实验结果表明, 利用填充因子为0.875的7单元AFOC阵列, 复原以离焦为主的低阶像差时, 初始畸变波前RMS为0.433  $\mu\text{m}$ , 复原残差小于0.075  $\mu\text{m}$ 。仿真和实验结果验证了本文提出的基于光纤耦合的光纤激光阵列像差探测方法的有效性。该技术有望在激光阵列大气传输及湍流校正等系统中得到进一步应用。

**关键词:** 波前探测; 自适应光学; 光纤激光阵列; 光纤耦合器

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

引用格式: 李枫, 耿超, 黄冠, 等. 基于光纤耦合的光纤激光阵列像差探测[J]. 光电工程, 2018, 45(4): 170691



## Wavefront sensing based on fiber coupling of the fiber laser array

Li Feng<sup>1,2</sup>, Geng Chao<sup>1,2</sup>, Huang Guan<sup>1,2,3</sup>, Yang Yan<sup>1,2,3</sup>, Li Xinyang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** A new method of wavefront sensing based on fiber coupling in the fiber laser array has been proposed. The scheme and the recovery process of this sensor are introduced. Numerical simulations of detecting the turbulence-induced aberrations utilizing such method and experiments of recovering static aberrations with 7-element adaptive fiber optics collimator (AFOC) array are presented. Numerical results show that such sensor could effectively recover the wavefront with turbulence-induced aberrations. For hexagonal array with different units, the optimum reconstructed Zernike mode is also different. Smaller array filled factor leads to larger recovery residual error. Compared with array filled factor of 1.0, value of 0.8 is easy to obtain and brings in recovery residual error increment less than 10%. Experimental results reveal that RMS less than 0.075  $\mu\text{m}$  of the recovery residual error is obtained

收稿日期: 2017-12-15; 收到修改稿日期: 2018-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61675205); 中国科学院实验室创新基金(CXJJ-15S096)

作者简介: 李枫(1991-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究光纤激光阵列相干合成及其像差校正。E-mail: whu\_lifeng@126.com

通信作者: 李新阳(1971-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为自适应光学。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

when detecting the static aberration with 7-element AFOC array with filled factor of 0.875. The aberration is with RMS of 0.433  $\mu\text{m}$  and mainly includes Zernike modes of low orders like defocus. Results here validate the effectiveness of the wavefront sensing method proposed here. Such method would get further application in systems like laser array propagating and turbulence aberrations correcting.

**Keywords:** wavefront sensing; adaptive optics; fiber laser array; fiber coupler

**Citation:** Li F, Geng C, Huang G, et al. Wavefront sensing based on fiber coupling of the fiber laser array[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(4): 170691

## 1 引言

受限于光纤的模式不稳定及热效应等物理机制，在实现单根单模光纤输出光功率提升的同时保证较好的光束质量是十分困难的<sup>[1]</sup>。近几年来，随着主控振荡器的功率放大器(master oscillator power-amplifier, MOPA)结构的提出，光纤激光相干合成技术突破了单根光纤最高输出功率的限制，可实现高亮度、高光束质量的激光输出，是未来高能激光系统的重要发展方向之一<sup>[2-3]</sup>。光纤激光阵列技术，作为多光束相干合成方法的典型代表，也得到了持续发展。光纤激光阵列技术目前还处于实验室相干合成的研究阶段，未来需要面对实际大气湍流下远距离传输应用的挑战，对光纤激光阵列大气传输过程中的全程像差进行校正<sup>[4]</sup>。而以光纤相位调制器和自适应光纤准直器(adaptive fiber optics collimator, AFOC)为代表的光纤像差校正器件的进一步发展<sup>[5-6]</sup>，使得光纤激光阵列大气传输的像差校正得到了初步探索。当前，在基于 MOPA 结构的主动式相干合成系统中，目前可见报道的只有以目标在回路为代表的盲优化校正方法对大气湍流波前进

行校正<sup>[7-8]</sup>，但随着合成单元数目的增多，迭代算法的收敛速率将会变慢，控制带宽急剧下降<sup>[9-11]</sup>。此时，需要寻求湍流像差探测的方法，并将该方法与光纤激光阵列相结合。传统望远镜系统需要对整体光束进行缩放和分光，进而能够在小的空间尺度上进行波前操控，而基于光纤准直器的阵列系统，阵列单元相互独立，不存在空间上的整体缩束和分光。因此，传统自适应光学系统中已经成熟应用的波前传感方法不能够直接应用于光纤激光相干合成系统，因此需研究出新构架的、且能够与光纤激光阵列紧密结合的波前传感器。

哈特曼-夏克(Hartmann-Shack, H-S)波前传感器是传统自适应光学系统中应用最为广泛的一种实时波前测量装置，其主要特点是利用微透镜阵列将入射光束的畸变波前按子孔径区域分割，通过一定手段获取子孔径上的波前斜率，再采用一定的复原算法，得到畸变光束的整体波前。由 AFOC 组成的光纤激光阵列在结构上与 H-S 类似，也同样具有对波前按孔径排布进行分割的功能，因此同样可实现波前测量的功能。本文以自适应光纤耦合技术为基础，提出了一种基于 AFOC 阵列的波前传感器。采用数值仿真来模拟该方

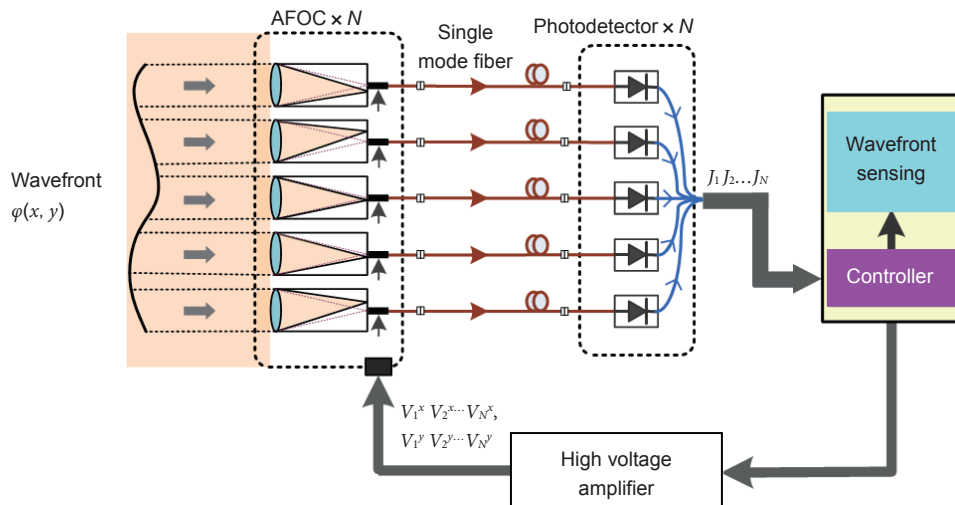


图 1 基于自适应光纤准直器阵列的波前传感器的结构示意图

Fig. 1 Scheme of the wavefront sensor based on adaptive fiber optics collimator array

法复原湍流畸变波前的过程，并进行了 7 单元 AFOC 阵列复原低阶像差的实验。

## 2 系统方案

### 2.1 基于自适应光纤准直器阵列的波前传感器结构

基于 AFOC 阵列的波前传感器结构示意图如图 1 所示，主要包括 AFOC 阵列、传输光纤、光电探测器阵列、高压放大器和控制平台。其中控制平台又包括 AFOC 控制器和波前重构这两个功能模块。这里将 AFOC 逆向应用，使其实现光束由自由空间至光纤波导的耦合功能。AFOC 阵列将入射激光束的波前进行分割、聚焦，并利用其内光纤耦合接收聚焦光束。光电探测器将耦合接收光束转化为相应的电压信号。采用接收电信号为指标，AFOC 控制器模块采用优化控制算法(SPGD 等)产生驱动电压，该电压经高压放大后，各自作用于 AFOC 阵列单元上，使各路耦合接收的光强最大化；控制平台的波前重构功能模块对每路 AFOC 耦合接收光能量最大化时对应的驱动电压进行反演，可计算得到整体波前在各子孔径上的波前斜率，并据此采用一定的波前复原算法，如模式法、区域法等，即可重构畸变波前的相位。

图 2 为 AFOC 对空间激光束进行耦合接收的示意图。已有的研究表明，对 AFOC 采用优化控制算法使其每路耦合接收光能量最优化，此时的光纤端面位置与分割后的子光束经聚焦形成的光斑质心位置直接相对应。与此同时，AFOC 内置光纤端面在焦平面上的位置  $\Delta x$ (或  $\Delta y$ )与施加其上的驱动电压  $V_x$ (或  $V_y$ )大小之间的关系，在忽略机械结构及执行器件的迟滞效应情况下，可认为是简单线性关系。根据以上两点，可以从驱动电压值的变化量直接得到由波前倾斜造成的子孔径内聚焦光斑的质心偏移。实际上，可通过在 AFOC 器件上加设位移传感器的办法来精确测定光纤端面的位移量。其优点是能够保证精度，但会增加系

统的成本和复杂度。电压反演虽然精度相对较低，但是结构简单。

### 2.2 波前复原过程

这里以 Zernike 模式法为例，介绍波前复原的计算过程。模式法是将圆孔径内的波前相位展开成各阶相互正交的 Zernike 模式，并基于全孔径内的波前相位斜率测量数据去求解各阶模式的系数，进而得到完整的波前相位展开式。

入射光波前  $\varphi(x, y)$ 可展开为 Zernike 模式系列：

$$\varphi(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} a_m Z_m(x, y) \quad (1)$$

其中： $m$  为 Zernike 模式的阶数， $a_m$  为 Zernike 模式系数。测量得到的子孔径波前斜率  $s_j^x$  和  $s_j^y$  可表示为

$$\begin{aligned} s_j^x &= \frac{1}{S_{\text{sub}}} \iint_{\Omega_j} \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} dx dy \\ &= \frac{1}{S_{\text{sub}}} \sum_{m=1}^{\infty} a_m \iint_{\Omega_j} \frac{\partial Z_m(x, y)}{\partial x} dx dy \\ &= \sum_{m=1}^{\infty} a_m G_{j,m}^x \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_j^y &= \frac{1}{S_{\text{sub}}} \iint_{\Omega_j} \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} dx dy \\ &= \frac{1}{S_{\text{sub}}} \sum_{m=1}^{\infty} a_m \iint_{\Omega_j} \frac{\partial Z_m(x, y)}{\partial y} dx dy \\ &= \sum_{m=1}^{\infty} a_m G_{j,m}^y \quad (3) \end{aligned}$$

其中： $\Omega_j$  表示第  $j$  个子孔径区域， $j=1, \dots, N_{\text{sub}}$ ，其中  $N_{\text{sub}}$  为阵列单元数， $S_{\text{sub}}$  为子孔径在单位圆上的等效面积。

$$G_{j,m}^x = S_{\text{sub}}^{-1} \iint_{\Omega_j} [\partial Z_m(x, y) / \partial x] dx dy \quad (4)$$

$$G_{j,m}^y = S_{\text{sub}}^{-1} \iint_{\Omega_j} [\partial Z_m(x, y) / \partial y] dx dy \quad (5)$$

式(2)和式(3)可以统一表示成矩阵形式，如式(6)所示：

$$s = Ga \quad (6)$$

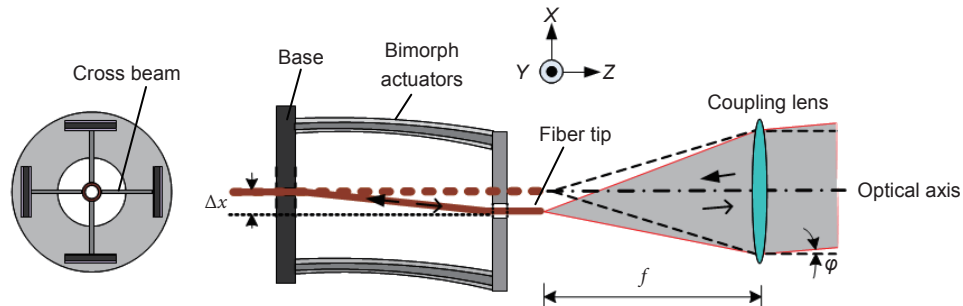


图 2 自适应光纤准直器的结构示意图

Fig. 2 Structure of the adaptive fiber optics collimator

式(6)建立了从 Zernike 模式系数向量到子孔径波前斜率向量的转换关系矩阵。当自适应光纤准直器阵列结构确定后,  $G$  也就唯一确定。在得到畸变波前在各子孔径上的波前斜率向量  $s$  后, 通过求解方程获得 Zernike 模式系数向量  $a$ , 进而复原出整个波前。实际上由于有限孔径数的限制, 复原出的 Zernike 模式的阶数  $N$  是有限的, 一般可复原出的 Zernike 模式阶数  $N$  应小于或等于  $2N_{\text{sub}}$ 。用向量  $b=\{b_1, \dots, b_m, \dots, b_N\}$  表示实际复原出的模式系数向量。复原模式系数  $b$  的求解表达式如式(7)所示:

$$b=G^+s, \quad (7)$$

其中:  $G^+$  为关系矩阵  $G$  的广义逆矩阵, 具体如式(8)所示, 其中  $G^T$  为  $G$  的转置矩阵:

$$G^+=(G^T G)^{-1} G^T. \quad (8)$$

将式(7)求得的系数带入式(1)即可得到完整的波前相位。

### 3 湍流像差探测的数值仿真

用放置于阵列孔径平面处的符合 Kolmogorov 统计特性的单相位屏来模拟大气湍流造成的畸变波前, 并模拟最优化耦合方法测量畸变波前在单孔径上波前斜率, 进而复原畸变波前的整个过程。

#### 3.1 AFOC 阵列结构参数的选择

影响 AFOC 阵列复原波前过程的结构参数有: 阵列总体孔径  $D$ 、工作波长  $\lambda$ 、子孔径数  $N_{\text{sub}}$ 、阵列排布方式、阵列填充因子  $\tau$ 、子孔径直径  $d$ 、准直透镜焦距  $f_c$  和耦合接收光纤的模场半径  $\omega_0$ 。这里仅研究六边形排布的 AFOC 阵列, 如图 3 所示, 阵列单元数  $N_{\text{sub}}$  取 7、19 和 37, 阵列填充因子  $\tau=d/l$  在 0.4 至 1.0 内变化。

要使得空间平行光束至光纤耦合最优化, 需合理设置 AFOC 的结构参数, 使其满足式(9)所示条件<sup>[12]</sup>。仿真过程中, 波长  $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ , 模场半径为  $\omega_0=5.5 \mu\text{m}$ 。并假定整体尺寸  $D$  不变, 根据阵列单元数  $N_{\text{sub}}$  和填充因子  $\tau$  来确定单元尺寸  $d$  的大小, 并根据式(9)来确定焦距值  $f_c$ 。

$$\pi d \omega_0 / (2 \lambda f_c) = 1.12. \quad (9)$$

#### 3.2 子孔径波前斜率的探测

以 AFOC 中空间光至单模光纤耦合效率为性能指标, 采用 SPGD 方法对光纤端面的偏移量进行迭代。在耦合效率最优化时, 光纤端面偏移量对应的斜率即为畸变波前在单元孔径上的平均斜率。

采用功率谱反演的方法产生湍流相位屏, 如图 4(a) 所示, 对应湍流强度  $D/r_0=10$ , 其中  $r_0$  为大气 Fried 参

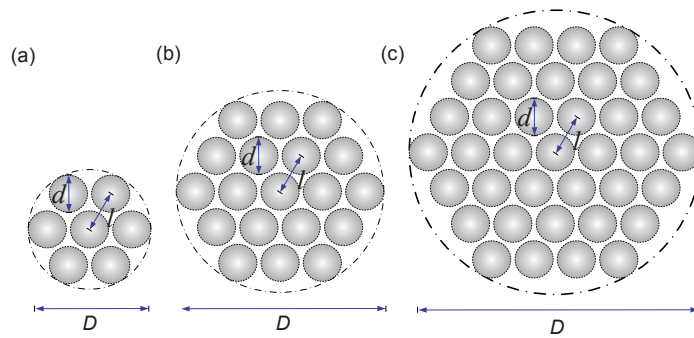


图 3 不同单元数的正六边形排布的 AFOC 阵列。(a) 7 单元; (b) 19 单元; (c) 37 单元  
Fig. 3 Hexagonal AFOC array with different element number. (a) 7-element; (b) 19-element; (c) 37-element

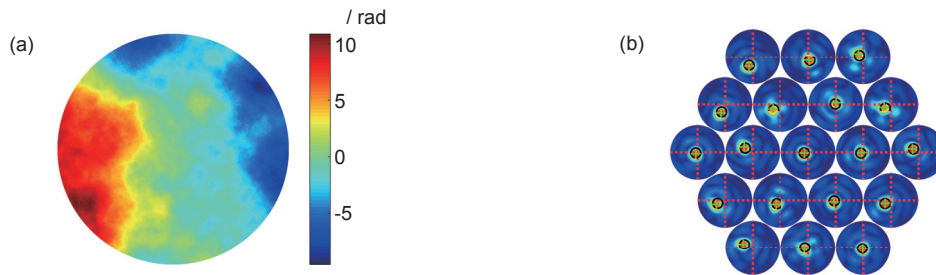


图 4 模拟湍流相位屏及其经 AFOC 阵列聚焦形成的光斑阵列。(a)  $D/r_0=10$  的一帧模拟相位屏; (b) AFOC 内透镜阵列聚焦形成的光斑阵列

Fig. 4 Phase screen and its focal spot array focused by the AFOC array. (a) Simulated turbulence phase screen with  $D/r_0=10$ ; (b) Spot array focused by the lens in the AFOC array

数。采用 19 单元且填充因子为 1 的 AFOC 阵列对该波前光束进行聚焦形成的光斑阵列如图 4(b)所示，图中虚线十字交叉点为各单元孔径视场中心。实线十字交叉点为采用 SPGD 算法得到的最优化耦合时光纤端面中心位置，黑色小圆中心为各单元孔径上聚焦光斑质心的位置。从图 4(b)中同时可以看出，采用 SPGD 算法得到的最优化耦合时光纤端面中心位置与实际的质心位置仅有微小差别。图 5 为质心偏移量对应的子孔径上波前倾斜，以及由最优耦合时光纤端面偏移量反演出的子孔径上波前倾斜，两者在 AFOC 阵列孔径上两者十分接近。

### 3.3 波前复原结果

采用基于 SPGD 算法的最优化光纤耦合接收方法探测出相位屏在 AFOC 阵列单元上的波前倾斜后，根据式(7)复原出 Zernike 模式系数，然后根据式(1)即可复原出整个波前。用  $\sigma_{WR}$  表示波前复原残差的 RMS，以此量来判定复原结果的好坏，其定义为复原出的波

前减去模拟湍流相位后得到的复原残差在阵列孔径圆域上的均方根值。

图 6 给出了不同阵列单元数及不同复原阶数下的波前复原残差 RMS 值  $\sigma_{WR}$ ，其中  $\cdot$  表示对多帧相位屏复原得到结果的平均。复原 Zernike 阶数  $N=0$  表示没有复原波前，此时的复原残差就是初始的畸变波前。 $\sigma_{WR}$  为除以  $N=0$  时  $\sigma_{WR}$  的归一化结果。湍流强度为  $D/r_0=10$ ，阵列填充因子  $\tau=1$ 。图 6 中虚线表示从相位屏中直接去除其前  $N$  阶 Zernike 模式后的残差，该残差可作为一种理想复原的参考。从图 6 中可看出，复原残差是随着复原阶数的增多先降后增，对不同的阵列单元数存在一个最优的复原阶数  $N_{WR}^{BST}$ 。7 单元、19 单元和 37 单元对应的湍流统计特性下的  $N_{WR}^{BST}$  分别为 8、17 和 21，该现象主要由模式耦合和模式混淆效应引起。采用最优复原阶数下，图 7(b)~7(d)分别给出了采用六边形排布的 7 单元、19 单元和 37 单元 AFOC 阵列复原出图 7(a)对应相位屏波前的结果。

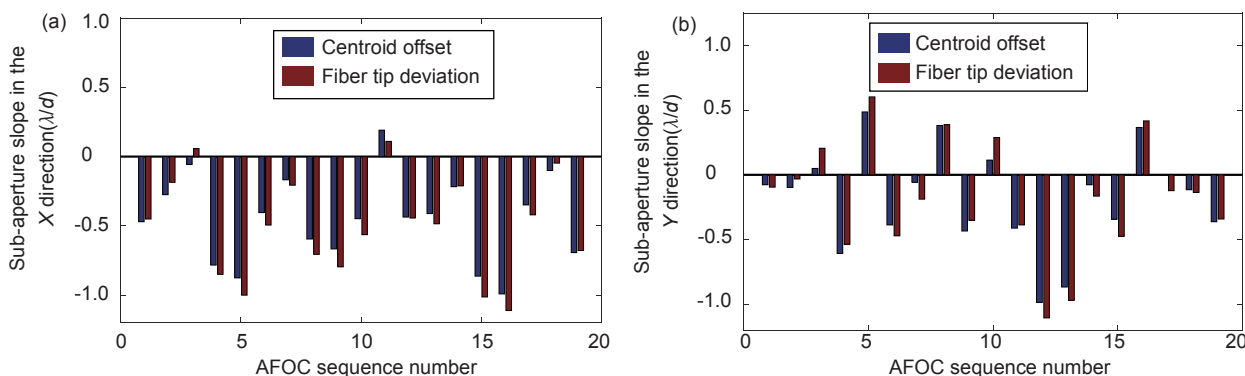


图 5 子孔径波前倾斜量反演结果。(a) X 方向倾斜量; (b) Y 方向倾斜量  
Fig. 5 Results of sub-aperture wavefront slope detected. (a) X-direction; (b) Y-direction

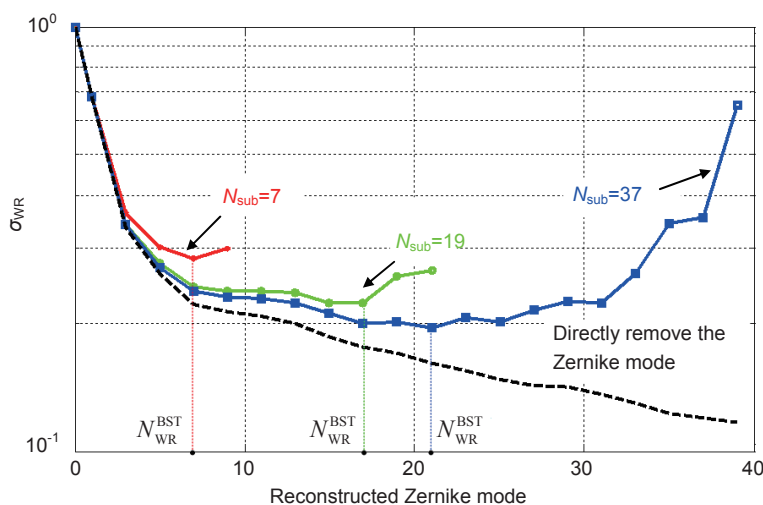


图 6 不同阵列单元数和不同复原阶数下的统计平均波前复原残差 RMS 值  
Fig. 6 Normalized RMS curve of the recovery residual error as a function of array element number and reconstructed Zernike mode

### 3.4 阵列填充因子对湍流像差探测的影响

在实际应用中，受加工和装校的限制，光纤激光阵列的填充因子很难达到 1。我们用数值仿真来研究

阵列填充因子  $\tau$  不足 1 时，对基于光纤耦合的光纤激光阵列像差探测结果的影响。

如图 8 所示，波前复原残差随着填充因子的降低

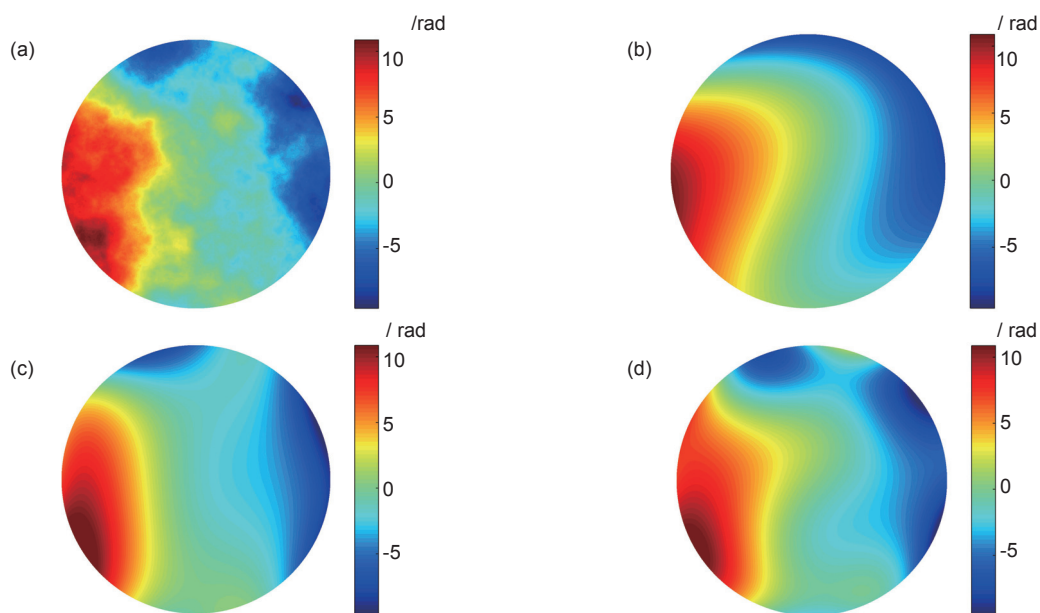


图 7 不同单元数 AFOC 阵列复原出的波前。(a) 湍流相位屏；(b) 7 单元复原结果；(c) 19 单元复原结果；(d) 37 单元复原结果

Fig. 7 Reconstructed wavefront with AFOC array of different element number. (a) Sample phase screen; (b) 7-element; (c) 19-element; (d) 37-element

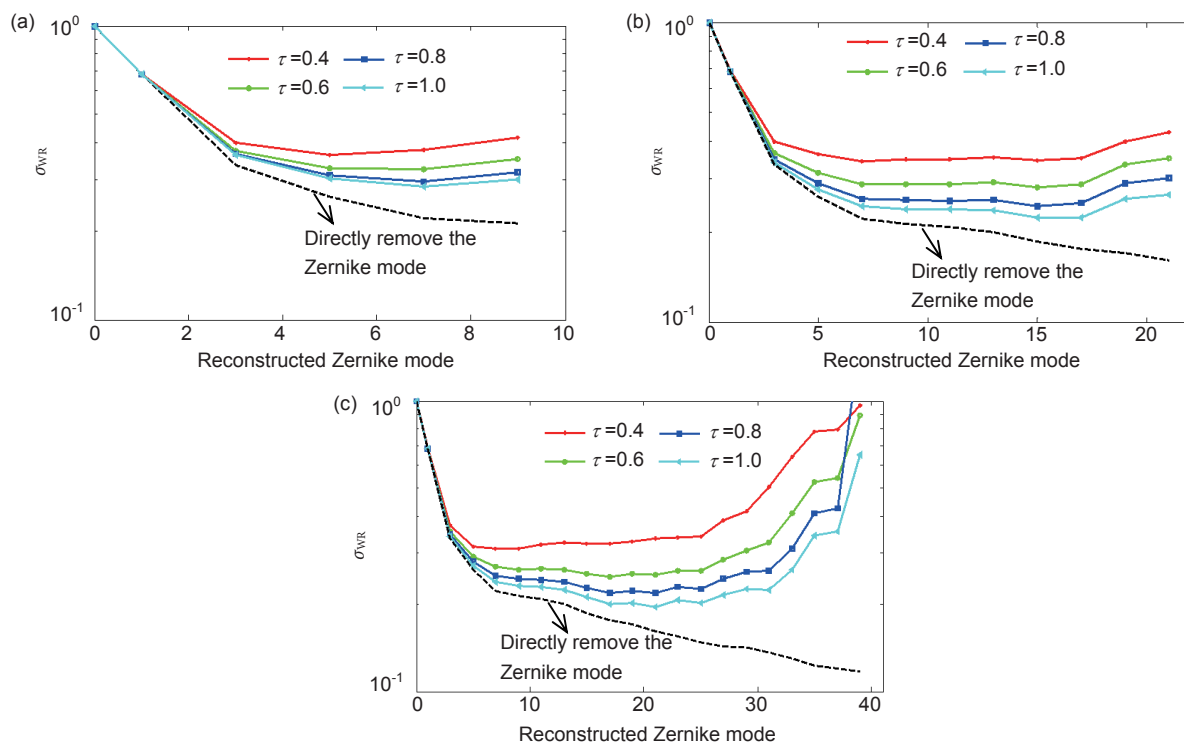


图 8 不同阵列单元数和不同阵列填充因子下波前复原残差的归一化 RMS 值曲线。(a) 7 单元；(b) 19 单元；(c) 37 单元

Fig. 8 Normalized RMS curve of the recovery residual error as a function of array element number and filled factor. (a) 7-element; (b) 19-element; (c) 37-element

而增加,这说明小的阵列填充因子不利于波前复原。阵列填充因子不同时,最优复原阶数也略有不同。实际中,填充因子不可能做到 1,而从复原残差值大小来看, $\tau=0.8$  和  $\tau=1.0$  的残差曲线是比较接近的。以 37 单元 AFOC 阵列为例,在最优复原阶数  $N=21$  附近, $\tau$  从 1.0 至 0.8 变化时,波前复原残差 RMS 相对增幅不超过 10%。因此,从波前复原残差的角度看,在实际应用中阵列填充因子做到 0.8 以上是比较合理。

## 4 光纤激光阵列像差探测实验

### 4.1 实验装置

以 7 单元 AFOC 阵列构成的波前传感器对低阶像差进行探测实验,其装置如图 9 所示。AFOC 阵列、光电探测器阵列、多单元高压放大器和控制器共同组成波前传感器的功能模块。AFOC 阵列为六边形排布,子孔径直径  $d=28$  mm,相邻孔径中心间距为 32 mm,因此阵列填充因子为 0.875。AFOC 准直透镜的焦距

$f_c=150$  mm。被测像差由圆形玻璃板引入,主要包括前 9 阶 Zernike 模式。玻璃板的有效孔径和 AFOC 阵列孔径都是 92 mm。信标光束是由光功率 2 W、波长为 1064 nm 的激光源从光纤端面(纤芯直径 10  $\mu$ m)发出,后被焦距为 1.5 m 变换透镜准直成平行光束。当测量开始时,玻璃板由电导轨带动并行进到可刚好覆盖整个 AFOC 孔径的位置。

波前传感的主要过程如下所示:

1) 首先在未放置玻璃板的情况下,进行 7 单元 AFOC 阵列的主动耦合。采用 SPGD 算法,以 PD 探测到的耦合光强信号为性能指标,对 AFOC 的驱动电压进行迭代,使得性能指标最优化。在性能指标收敛后,记录在相互正交的两方向上对每路 AFOC 施加的驱动电压  $V_{j,0}^X$  和  $V_{j,0}^Y$ 。结束后,耦合控制开环而施加电压继续保持;

2) 由步进电机驱动导轨带动玻璃板移至其可覆盖整个 AFOC 孔径的位置,步进电机的执行步数事先

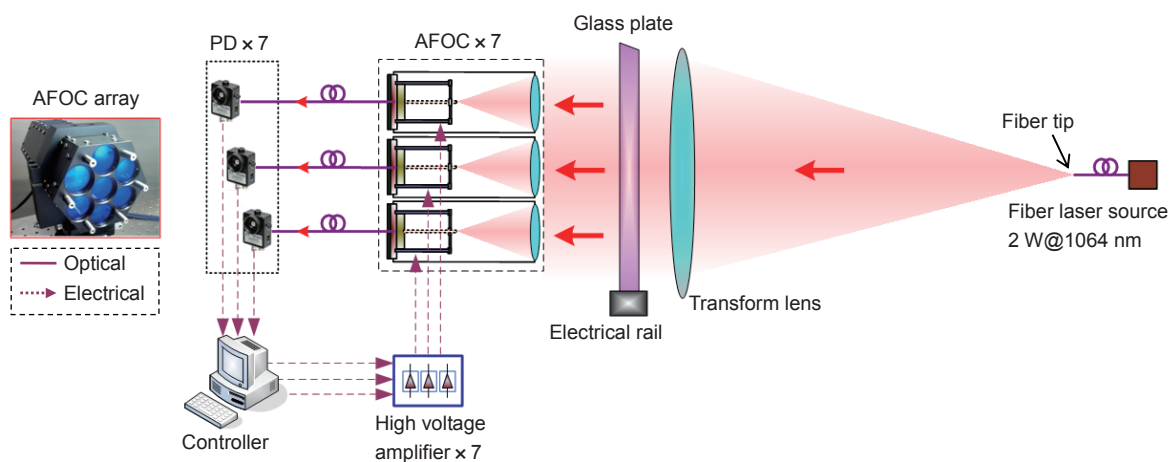


图 9 基于自适应光纤准直器阵列的波前探测实验装置图  
Fig. 9 Experimental setup of the wavefront sensing based on AFOC array

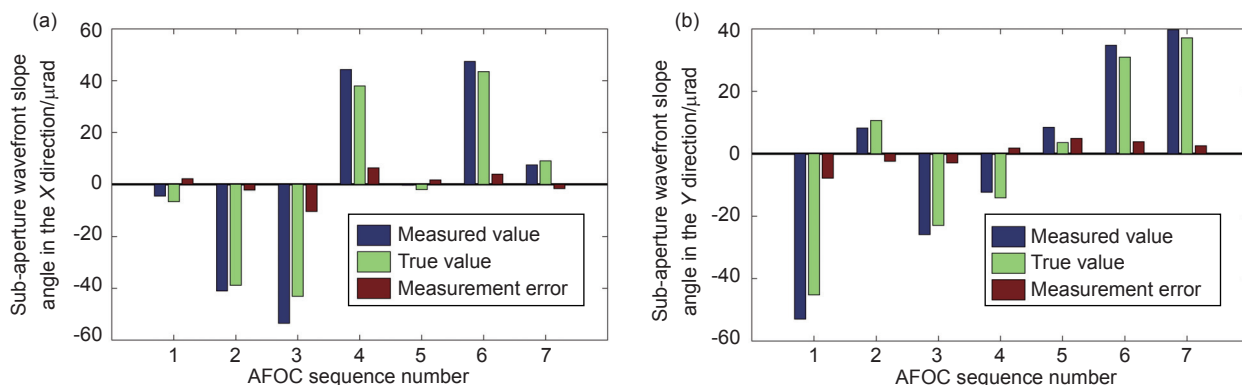


图 10 根据电压反演得到的单孔径上倾斜量测量结果。(a) X 方向; (b) Y 方向  
Fig. 10 Sub-aperture slope detected through the voltages. (a) X-direction; (b) Y-direction

已经得到校准；

3) 在第一次性能指标收敛后各路 AFOC 驱动电压的基础上,再次进行 7 单元 AFOC 阵列的主动耦合。待各路性能指标收敛后,再次记录相互正交的两方向上对每路 AFOC 施加的驱动电压  $V_{j,1}^x$  和  $V_{j,1}^y$ ；

4) 计算前后两次耦合控制稳定收敛后各路 AFOC 上驱动电压的差值：

$$\Delta V_j^x = V_{j,1}^x - V_{j,0}^x, \Delta V_j^y = V_{j,1}^y - V_{j,0}^y, \quad (10)$$

可算出各单元孔径上波前斜率  $s_j^x$  和  $s_j^y$ ：

$$\begin{bmatrix} s_j^x \\ s_j^y \end{bmatrix} = \frac{k}{f} \begin{bmatrix} T_j^1 & T_j^2 \\ T_j^3 & T_j^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_j^x \\ \Delta V_j^y \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中：参数  $T_j^1$ 、 $T_j^2$ 、 $T_j^3$  和  $T_j^4$  为不同 AFOC 的从执行电压(单位：V)至光纤端面偏移量(单位：μm)之间的变换系数，可事先通过比较标定得到；

5) 根据子孔径空间排布方式和得到的各子孔径波前斜率，采用模式法或区域法等复原算法即可实现波前复原。

#### 4.2 实验结果及分析

静态像差板在阵列孔径上波前斜率的计算结果与真实值如图 10 所示。真实值是指直接根据干涉仪测

量的波前分布和 AFOC 阵列排布方式计算得到的倾斜量。测量误差的 RMS 值为 4.64 μrad。从图中可以看出，倾斜量的测量结果与真实值符号一致，仅在数值上有微小的差别。

图 11 为根据前后两次倾斜闭环的 AFOC 电压差复原得到的前 9 阶 Zernike 模式系数与理想 7 单元复原结果及实际模式系数的对比图。理想 7 单元复原结果直接从干涉仪测得的像差分布中得到子孔径波前斜率信息，并采用模式法复原出的 Zernike 模式系数。从图中可以看出，理想 7 单元复原结果很好地吻合了实际模式系数，且存在微小的差异。电压反演测量结果在第 3 阶至第 9 阶的主要 Zernike 模式上，与实际模式系数有较好的一致性。

图 12(a)为干涉仪测量得到的像差板实际像差，图 12(b)和图 12(c)分别为根据耦合控制电压反演倾斜量经模式法复原得到的复原波前及其复原残差，复原残差 RMS 值为 0.0749 μm，是像差板原始像差 RMS 值 (0.433 μm) 的 0.173 倍。因此根据耦合控制电压反演测量波前畸变在单孔径上的波前斜率，再经模式法得到的复原波前很好地吻合了被测像差，说明了本文提出的新型波前探测方法的有效性。

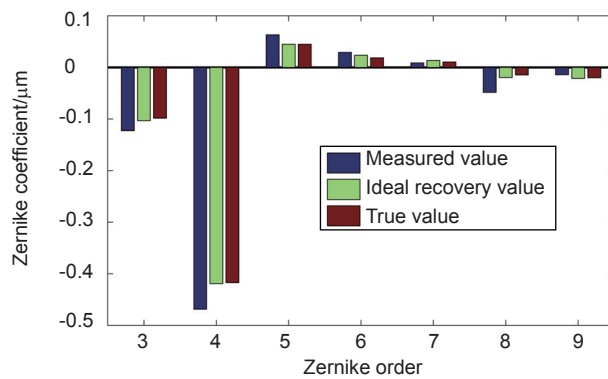


图 11 电压反演得到的 Zernike 模式系数

Fig. 11 Zernike coefficients detected through the voltages

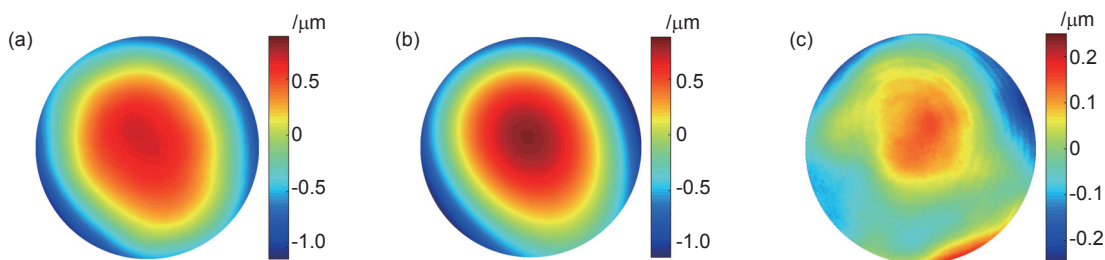


图 12 像差复原结果。(a) 实际像差；(b) 复原波前；(c) 复原残差

Fig. 12 Wavefront recovery results. (a) Actual aberrations; (b) Reconstructed wavefront; (c) Recovery residual error



## 5 结 论

本文首次提出了一种基于光纤耦合的光纤激光阵列像差探测方法,采用与传统哈特曼波前传感器相类似的结构,以自适应光纤准直器阵列为基础,实现对整体波前的孔径分割与斜率探测,并最终复原出畸变波前相位。采用数值仿真计算的方法,模拟其复原湍流像差的过程,并采用7单元AFOC阵列,来进行复原静态像差的实验。仿真和实验结果验证了本文提出的基于光纤耦合的光纤激光阵列像差探测方法的有效性。该方法,摆脱了光纤激光阵列系统中无法进行分光 and 缩束的限制,能够与激光阵列传输系统紧密结合。与此同时,AFOC阵列的单元耦合是低维控制且是并行的,收敛速度不会随着阵列单元数的增多而降低,因此具备对动态湍流像差进行实时探测的潜力。该方法有望在光纤激光阵列的传输系统中,比如无线激光通信和定向能等方面,得到进一步的应用。下一步将展开对动态像差进行探测和校正的实验研究,并解决初始光斑未落到纤芯内情况下的寻优问题。

## 参考文献

- [1] Goodno G D, Mcnaught S J, Rothenberg J E, et al. Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(10): 1542–1544.
- [2] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(14): 2686–2688.
- [3] Wang X L, Zhou P, Ma Y X, et al. Active phasing a nine-element 1.14 kW all-fiber two-tone MOPA array using SPGD algorithm[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(16): 3121–3123.
- [4] Vorontsov M, Filimonov G, Ovchinnikov V, et al. Comparative efficiency analysis of fiber-array and conventional beam director systems in volume turbulence[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(15): 4170–4185.
- [5] Geng C, Luo W, Tan Y, et al. Experimental demonstration of using divergence cost-function in SPGD algorithm for coherent beam combining with tip/tilt control[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(21): 25045–25055.
- [6] Vorontsov M A, Weyrauch T, Beresnev L A, et al. Adaptive array of phase-locked fiber collimators: analysis and experimental demonstration[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, **15**(2): 269–280.
- [7] Weyrauch T, Vorontsov M A, Carhart G W, et al. Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(22): 4455–4457.
- [8] Weyrauch T, Vorontsov M, Mangano J, et al. Deep turbulence effects mitigation with coherent combining of 21 laser beams over 7 km[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(4): 840–843.
- [9] Li F, Geng C, Li X Y, et al. Co-aperture transceiving of two combined beams based on adaptive fiber coupling control[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(17): 1787–1790.
- [10] Li F, Geng C, Huang G, et al. Experimental demonstration of coherent combining with tip/tilt control based on adaptive space-to-fiber laser beam coupling[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(2): 7102812.
- [11] Li F, Geng C, Li X Y, et al. Phase-locking control in all fiber link based on fiber coupler[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(6): 602–609.  
李枫, 耿超, 李新阳, 等. 基于光纤耦合器的全光纤链路锁相控制[J]. *光电工程*, 2017, **44**(6): 602–609.
- [12] Luo W, Geng C, Wu Y Y, et al. Experimental demonstration of single-mode fiber coupling using adaptive fiber coupler[J]. *Chinese Physics B*, 2014, **23**(1): 014207.

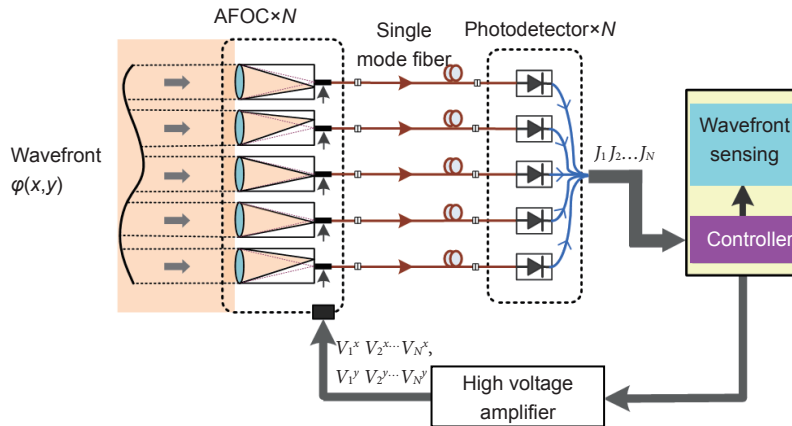
# Wavefront sensing based on fiber coupling of the fiber laser array

Li Feng<sup>1,2</sup>, Geng Chao<sup>1,2</sup>, Huang Guan<sup>1,2,3</sup>, Yang Yan<sup>1,2,3</sup>, Li Xinyang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



Scheme of the wavefront sensor based on adaptive fiber optics collimator array

**Overview:** Coherent beam combining (CBC) of fiber amplifiers with a master-oscillator-power amplifier (MOPA) architecture is a promising way for brightness scaling with excellent beam quality. Fiber laser array, as a typical CBC architecture, has been widely applied in laboratory experiments. Further application aims at eliminating the turbulence-induced dynamic aberrations. The correctable aberrations of the fiber laser array are tip/tilts and pistons distribute on the sub-aperture. Target-in-the-loop (TIL) technique cooperating with optimal method is the only way reported to achieve CBC in atmosphere. Such method suffers from low bandwidth due to large array scale and long air path. Active detecting the atmospheric aberrations becomes necessary. Conventional wavefront sensor, like Hartmann-Shack, needs beam zooming and splitting in the back end of the telescope. Direct spatial beam zooming and splitting in the back end of fiber laser array system is impossible because the system is discrete in space. Meanwhile, setting a splitter large enough to cover the whole array aperture is inconceivable and breaks the compact and flexible character of the fiber laser array architecture. A new method of wavefront sensing based on fiber coupling in the fiber laser array has been proposed. The scheme and the recovery process of this sensor are introduced. Numerical simulations of detecting the turbulence-induced aberrations utilizing such method and experiments of recovering static aberrations with 7-element AFOC array are presented. Numerical results show that such sensor could effectively recover the wavefront with turbulence-induced aberrations. For hexagonal array with different units, the optimum reconstructed Zernike mode is also different. Smaller array filled factor leads to larger recovery residual error. Compared with array filled factor of 1.0, value of 0.8 is easy to obtain and brings in recovery residual error increment less than 10%. Experimental results reveal that RMS less than 0.075  $\mu\text{m}$  of the recovery residual error is obtained when detecting the static aberration with 7-element AFOC array with filled factor of 0.875. The aberration is with RMS of 0.433  $\mu\text{m}$  and mainly includes Zernike modes of low orders like defocus. Results here validate the effectiveness of the wavefront sensing method proposed. Such method would get further application in systems like laser array propagating and turbulence aberrations correcting.

**Citation:** Li F, Geng C, Huang G, *et al.* Wavefront sensing based on fiber coupling of the fiber laser array[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(4): 170691

Supported by the Innovation Foundation of Chinese Academy of Sciences under Grant (CXJJ-15S096) and National Natural Science Foundation of China under Grant (61675205)

\*E-mail: xyli@ioe.ac.cn