

## 基于 SPGD 算法的自适应光纤耦合器阵列技术研究

李 枫<sup>1,2,3,4</sup>, 耿 超<sup>1,3</sup>, 李新阳<sup>1,3</sup>, 罗 文<sup>1,3,4</sup>, 邱 琪<sup>2</sup>

1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;
2. 电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054;
3. 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 自适应光纤耦合器(AFC)是一种可实现高稳定、高效的空域光至光纤耦合的新型自适应光学器件。研究了 AFC 阵列作为空间激光通信系统接收光端机的可行性。在不同的大气湍流强度下,利用 SPGD 算法,仿真研究了不同子孔径数 AFC 阵列的闭环控制过程。研究表明,AFC 阵列技术可缓解大气湍流影响,改善光纤耦合效率并提高耦合过程的稳定性;当等效接收口径一定时,随着阵列子孔径数的增加,光纤耦合效率及控制算法收敛速率都相应提升。

**关键词:** 自由空间光通信; 自适应光纤耦合器; SPGD 算法; 阵列技术

**中图分类号:** TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2156-06

## Technical research of adaptive fiber coupler array based on SPGD algorithm

Li Feng<sup>1,2,3,4</sup>, Geng Chao<sup>1,3</sup>, Li Xinyang<sup>1,3</sup>, Luo Wen<sup>1,3,4</sup>, Qiu Qi<sup>2</sup>

1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;
3. The Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Adaptive fiber coupler (AFC) is a new kind of fiber-based adaptive-optics device which can achieve high and steady efficiency in coupling laser beam from space into fibers. Analysis on the feasibility of adopting AFC array as receiver in free space laser communications was studied. Simulation research on the closed-loop control process of AFC array with different number of sub-units using SPGD algorithm under different turbulence conditions was achieved. Simulation results show that: (1) adopting AFC array as receiver can realize high and stable coupling efficiency and alleviate the effects of atmospheric turbulences; (2) coupling efficiency and the algorithm convergence rate promote as the number of the array increases, where the equivalent aperture of the receiver is certain.

**Key words:** free space optic communications; adaptive fiber coupler; SPGD algorithm; array technology

收稿日期: 2014-11-08; 修订日期: 2014-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(61205069, 61138007)

作者简介: 李枫(1991-), 男, 博士生, 主要从事自由空间激光通信方面的研究。Email: whu\_lifeng@126.com

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

邱琪(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信等方面的研究。Email: qqiu@uestc.edu.cn

## 0 引言

空间激光通信技术具有带宽高、天线尺寸小、保密性好等特点,近年来得到了越来越多的关注,有望成为星地间海量数据传输的有效手段。目前,欧洲、美国及日本都利用卫星搭载激光通信设备进行了星地激光通信的实验研究<sup>[1]</sup>。在空间激光通信系统中,激光接收端机的性能决定了整体通信性能的优劣。受制于大气链路中湍流等因素的影响,空间光至单模光纤的耦合效率大大降低,进而导致严重误码<sup>[2]</sup>。因此,如何消除大气湍流的影响、改善接收端的光耦合效率,是空间激光通信领域孜孜以求的目标<sup>[3-4]</sup>。

2013 年,中国科学院自适应光学重点实验室在自适应光纤准直器的研究基础上,提出了自适应光纤耦合器(Adaptive Fiber Coupler, AFC)的概念,并进行了相关的单模光纤自适应耦合仿真与实验研究<sup>[5-9]</sup>。研究表明,结合 SPGD 优化算法,AFC 器件可以自适应地校正大气湍流导致的入射光到达角起伏(光波前倾斜像差),提高激光接收端机的单模光纤耦合效率及稳定性<sup>[6]</sup>;但是,随着湍流强度的增强,单路 AFC 对单模光纤耦合效率的改善作用有限,建议采用阵列式接收方案<sup>[9]</sup>。已有学者从理论上分析了空间光至单模光纤阵列的耦合情况,并得出了相比于单路耦合,阵列耦合方式具有更优的接收耦合效率的结论<sup>[10-11]</sup>。因此,将 AFC 器件与阵列接收技术相结合,有望极大地提升空间激光通信系统中光接收端机的耦合效果。

文中将讨论 AFC 阵列用作空间激光通信的接收光端机,提升光纤耦合效率的可行性。以 SPGD 算法作为优化控制策略,仿真研究不同湍流强度及不同阵列子孔径数下,控制系统对光纤耦合效率的优化迭代过程。

## 1 系统方案

### 1.1 自适应光纤耦合器

AFC 器件的工作原理如图 1 所示<sup>[6]</sup>,其由基座(Base)、双压电驱动器(Bimorph actuator)、十字梁(Cross beam)及耦合透镜(Coupling lens)组成。AFC 工作时,在外加电压的驱动下,相对的两组双压电驱动器带动十字梁在由 X、Y 轴组成的耦合透镜后焦平

面内平移,进而带动穿过十字梁中心圆孔的光纤端面(Fiber tip)平移,使得光纤在不同焦面位置处实现光耦合。

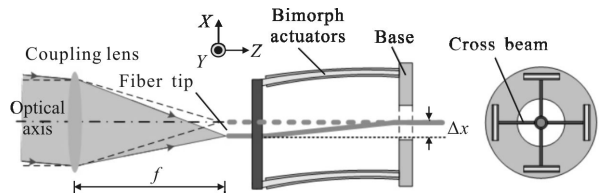


图 1 自适应光纤耦合器的原理图

Fig.1 Schematic of the adaptive fiber coupler

### 1.2 控制系统

基于 AFC 阵列的光接收控制回路如图 2 所示,包括 AFC 阵列、连接 AFC 的单模光纤、光电探测器(PD)、SPGD 控制器和高压放大器等。仿真方案采用基于 FFT 的功率谱反演并叠加次谐波的办法,生成不同湍流强度条件下的符合 Kolmogorov 统计规律的相位屏,以此作为 AFC 阵列接收口径处的输入光波前。带有畸变光波前相位信息的近似平面波投射到 AFC 阵列的接收口径处,平面波前被耦合器阵列的子孔径分割成子光束,而后各子孔径内的光束被耦合透镜聚焦并在后焦平面上形成聚焦光斑。假设 AFC 阵列的主光轴与入射平面波的波矢方向基本一致,将有部分入射光被耦合进耦合透镜后焦平面处的单模光纤内,多路耦合光束经多路单模光纤传输至光电探测器,转换为对应的电信号,并被送至控制平台,经 SPGD 算法迭代运算后得到控制 AFC 阵列的多路驱动电压,再经高压放大器放大后驱动 AFC 内置光纤端面在各自耦合透镜的后焦平面处搜索耦合效率最大值点,实现耦合效率的优化。

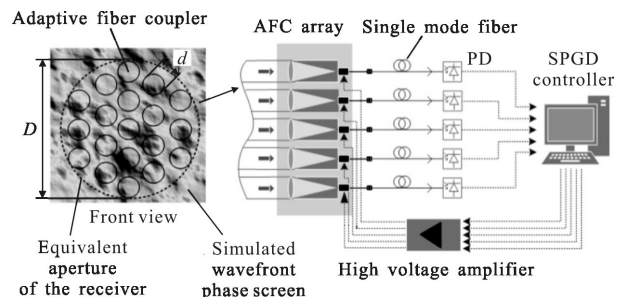


图 2 基于 AFC 阵列的控制系统的示意图

Fig.2 Schematic of control system based on the AFC array

### 1.3 SPGD 控制过程

仿真采用双边扰动的 SPGD 控制策略<sup>[7,12]</sup>对 AFC 阵列的各子孔径内耦合光强进行优化。如图 2 所示, AFC 阵列子单元的控制过程彼此相互独立, 即并行控制。SPGD 控制过程为二维优化过程, 以单模光纤耦合效率为性能指标, 对施加到每路 AFC 器件 X、Y 轴方向上的驱动电压  $V_x$ 、 $V_y$  进行迭代运算, 控制光纤端面实现精确定位, 使得单模光纤耦合效率达到最大。这里, 各子单元的耦合效率  $\eta$  定义为耦合进单模光纤的光功率与接收孔径处光功率的比值<sup>[9]</sup>。

单路 AFC 的控制过程具体表示如下:

(1) 生成一组符合零均值、伯努利分布的扰动电压值  $\delta V_x$ 、 $\delta V_y$ ;

(2) 将电压值  $V_x^{k-1} + \delta V_x$ 、 $V_y^{k-1} + \delta V_y$  ( $k$  为迭代次数) 经高压放大器放大后, 施加到 AFC 器件对应 X、Y 轴方向的驱动器上, 得到单模光纤耦合效率  $\eta_+$ ;

(3) 将电压值  $V_x^{k-1} - \delta V_x$ 、 $V_y^{k-1} - \delta V_y$  经高压放大器放大后, 施加到 AFC 器件对应 X、Y 轴方向的驱动器上, 得到单模光纤耦合效率  $\eta_-$ ;

(4) 按公式(1)更新施加到光纤耦合驱动器上的电压值, 并转到步骤(1)继续执行, 直到迭代次数达到指定值或接收光功率达到预期值为止。其中,  $\gamma$  为增益因子。

$$\begin{aligned} V_x^k &= V_x^{k-1} + \gamma \delta V_x (\eta_+ - \eta_-) \\ V_y^k &= V_y^{k-1} + \gamma \delta V_y (\eta_+ - \eta_-) \end{aligned} \quad (1)$$

## 2 仿真

当等效接收口径一定时, 数值仿真了不同湍流条件下、不同子孔径数的 AFC 阵列利用 SPGD 算法优化光纤耦合效率的迭代过程。

### 2.1 仿真参数

仿真时, 工作波长设定为  $\lambda=1\ 064\ \text{nm}$ , 子孔径按正六边形紧密排列, 孔径填充因子为 1(填充因子定义为子孔径直径与相邻子孔径间距之比), 子孔径数  $N_{\text{sub}}$  的取值在 1、7、19 和 37 变化。子孔径的排列方式如图 3 所示, 其中,  $d$  为子孔径直径,  $l$  为相邻子孔径的中心间距。

图 3 中所示阵列的子孔径间有空隙, 会造成整

体接收光功率的下降。假定入射口径处光波为等振幅分布, 则整体耦合效率  $\eta_{\text{tot}}$  与各子孔径耦合效率  $\eta_j$  ( $j=1, \dots, N_{\text{sub}}$ ) 的关系如公式(2)所示, 其中  $N_d$  为阵列沿横向的最大子孔径数。

$$\eta_{\text{tot}} = \sum_{j=1}^{N_{\text{sub}}} \eta_j / N_d^2 \quad (2)$$

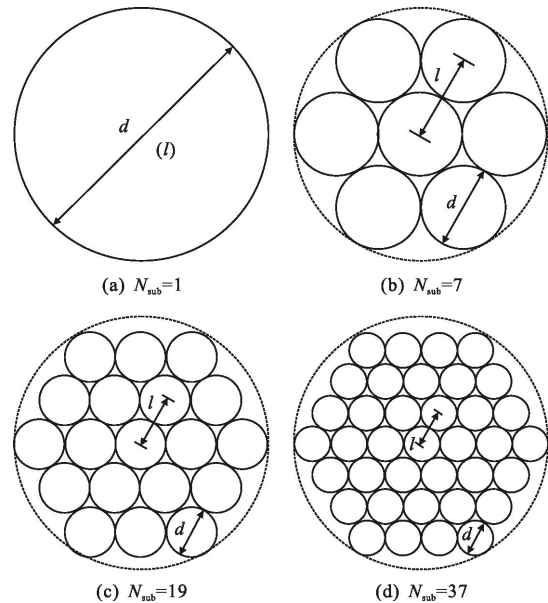


图 3 等效接收口径(虚线)一定时, AFC(实线)阵列的排列方式  
Fig.3 Arrangement of the AFC (solid line) array, where the equivalent aperture (dot line) of the receiver is certain

根据相关参考文献[9, 12]的结果, 当子孔径直径  $d$ 、单模光纤模场半径  $\omega_0$ 、耦合透镜焦距  $f$  满足公式(3)时, 可实现最优的单路单模光纤耦合效率  $\eta=0.81$ , 即:

$$\pi d \omega_0 / 2 \lambda f = 1.12 \quad (3)$$

结合公式(2)可得到对应子孔径数  $N_{\text{sub}}=1、7、19$  和 37 的阵列整体耦合效率  $\eta_{\text{tot}}$  的最大值分别为 0.81、0.63、0.62 和 0.61。虽然单孔径没有间隙因而有着更大的理论耦合效率, 但后续仿真结果表明, 湍流的影响会极大降低单孔径的接收耦合效率。

### 2.2 耦合过程

以 AFC 阵列作为光通信接收端机时, 每路 AFC 的自适应耦合优化控制过程是独立且并行的。因此, 先研究单路 AFC 基于 SPGD 算法的单模光纤耦合效率优化收敛过程。

所选用 AFC 器件的性能参数满足公式(3), 因此其理论最优耦合效率为 81%, 其性能参数如下: 接收

口径  $d=22\text{ mm}$ , 耦合透镜焦距  $f=167\text{ mm}$ , 单模光纤模场半径  $\omega_0=5.8\text{ }\mu\text{m}$ 。而理想平面入射光束在 AFC 后焦面处的衍射艾里斑半径  $r$  为:

$$r=1.22\lambda f/d \quad (4)$$

可算得  $r=9.8\text{ }\mu\text{m}$ 。

为了保证 SPGD 优化控制过程的收敛性、稳定性及精确性, 算法中的扰动量幅值  $\delta$  需根据实际应用场合选取, 而增益系数  $\gamma$  需根据实际的迭代过程选取。仿真中拟对 AFC 的光纤端面施加衍射艾里斑尺寸  $1/100$  量级的扰动, 分别选取扰动量幅值  $\delta$  为  $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.4\text{ }\mu\text{m}$  和  $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 。同时分别选取增益系数  $\gamma$  为  $10$ 、 $20$ 、 $40$  和  $80$ 。以  $d/r_0=1$  为例 ( $r_0$  为大气湍流 Fried 参数), 仿真研究了不同 SPGD 控制参数下的自适应耦合优化收敛过程, 如图 4 所示, 其中每条曲线为 10 次迭代过程的平均。由图 4 可知, 不同的 SPGD 控制参数会影响控制过程的收敛性、稳定性及收敛速率。当  $d/r_0=1$  时, 选取  $\gamma=40$ 、 $\delta=0.4\text{ }\mu\text{m}$  的组合可以获得较好的收敛效果, 耦合效率从收敛前的  $0.4$  提升至收敛后的  $0.76$ , 这说明采用 SPGD 控制策略的单路 AFC 作为激光通信光接收端机可有效提升接收耦合效率。

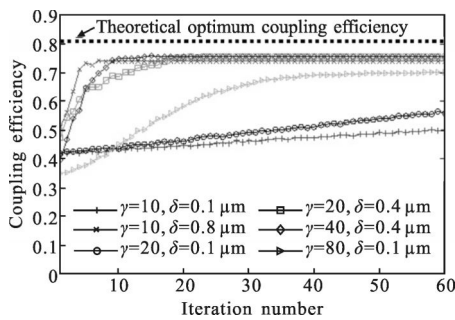


图 4  $d/r_0=1$  时, 不同控制参数下的 SPGD 迭代过程

Fig.4 Coupling efficiency curve as the function of SPGD iteration number with different SPGD parameters when  $d/r_0=1$

### 2.3 阵列耦合仿真结果及分析

通过改变大气湍流 Fried 参数  $r_0$ , 使  $D/r_0$  ( $D$  为 AFC 阵列的等效接收口径) 在  $1\sim 10$  之间变化, 模拟不同强度的大气湍流, 可认为湍流强度从弱湍流向中强湍流演进。AFC 阵列的排布方式如图 3 所示, 仿真过程中,  $D$  保持不变, 根据不同的子孔径数, 对应地改变子孔径的直径  $d$  及耦合透镜的焦距  $f$ , 使其满足公式(3)。

图 5 为不同子孔径数及不同湍流条件下, 仿真系统的整体耦合效率经 SPGD 算法优化的迭代曲线 (迭代过程取 10 次平均)。仿真结果表明, 随着湍流

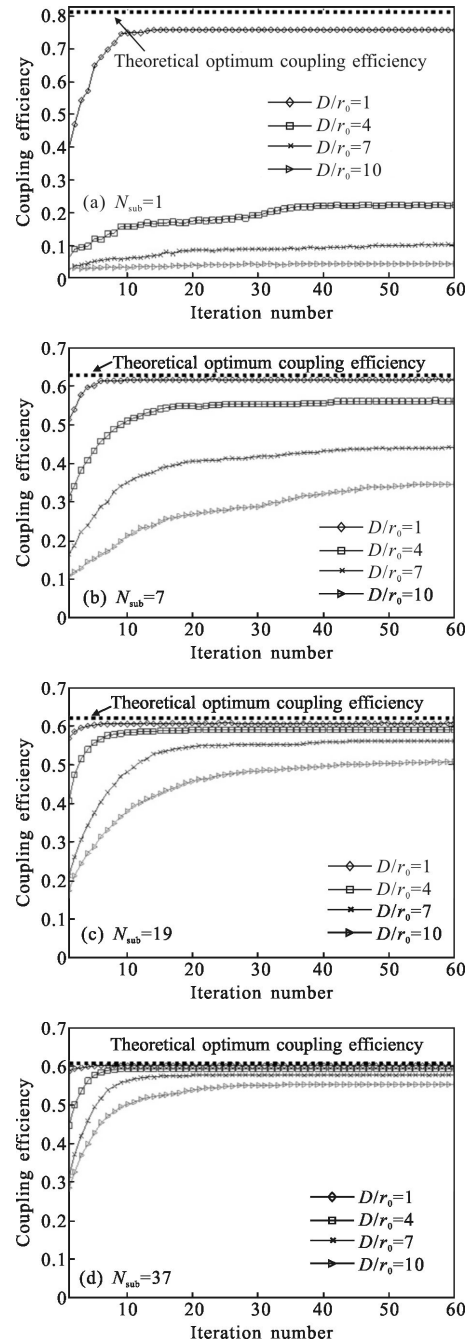


图 5 整体等效口径一定、子孔径数  $N_{\text{sub}}=1$ 、 $N_{\text{sub}}=7$ 、 $N_{\text{sub}}=19$ 、 $N_{\text{sub}}=37$  不同时, 不同湍流条件下的耦合效率经 SPGD 算法优化的迭代曲线

Fig.5 Coupling efficiency curve as the function of SPGD iteration number with different  $D/r_0$  and different sub-unit number  $N_{\text{sub}}=1$ ,  $N_{\text{sub}}=7$ ,  $N_{\text{sub}}=19$ ,  $N_{\text{sub}}=37$ , where the equivalent aperture is certain

强度的增强,SPGD的收敛速度变慢,并且收敛前后的耦合效率都会随之下降。仿真结果同时表明,不同湍流强度条件下整体耦合效率在SPGD算法闭环后都得到明显提升,说明采用SPGD控制方法能够有效提升湍流影响下的整体耦合效率。以图5(b)所示 $N_{\text{sub}}=7$ 为例,当 $D/r_0=1$ (对应于 $d/r_0=0.33$ )时,整体耦合效率从0.51提升到0.62;当 $D/r_0=4$ (对应于 $d/r_0=1.33$ )时,耦合效率从0.31提升到0.55;当 $D/r_0=7$ (对应于 $d/r_0=2.33$ )时,耦合效率从0.17提升到0.44;当 $D/r_0=10$ (对应于 $d/r_0=3.33$ )时,耦合效率从0.11提升到0.34。

图6给出了在SPGD控制开启前后,不同阵列子孔径数下的平均耦合效率随 $D/r_0$ 的变化曲线(取10次迭代结果的平均)。从图中可以看出,SPGD控制开启后,平均耦合效率都有明显提升,进一步说明SPGD控制在AFC阵列接收方式下的有效性。同时可以发现,随着子孔径数的增加,在同等湍流条件下,多阵列接收方式在改善接收耦合效率方面有着更优的效果。因此,在单孔径的耦合效率随着 $D/r_0$ 值增加急剧下降的情况下,增大子孔径数可有效改

善平均耦合效率。从图6(b)中可以看出,施加SPGD控制后,在 $D/r_0=10$ 的情况下,单孔径的平均耦合效率不足0.1,而子孔径数取19或37都可以获得接近60%的耦合效率。在实际设计过程中,考虑到更多的孔径数意味着更难的设计和加工,子孔径数取19比较合适。

### 3 结束语

文中基于数值仿真,研究了基于SPGD优化算法的AFC阵列作为空间激光通信接收光端机的可行性及控制效果。结果表明:阵列耦合的方式可以有效改善空间光至单模光纤的耦合效率,采用SPGD优化控制后,耦合效率有显著改善;当等效接收口径一定时,随着子孔径数目的增多,耦合效率及SPGD闭环收敛速率都相应提升。为今后AFC阵列的研制及其在空间光通信系统中的应用打下了基础。

### 参考文献:

- [1] Liu Liren. Laser communications in space I: optical link and terminal technology [J]. *Chinese J Laser*, 2007, 34(1): 3-20. (in Chinese)  
刘立人. 卫星激光通信 I: 链路和终端技术[J]. 中国激光, 2007, 34(1): 3-20.
- [2] Wang Jiang'an, Zhao Yingjun, Chen Dong, et al. Effect of turbulence sizes on the error rate of turbulence laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 655-659. (in Chinese)  
王江安, 赵英俊, 陈冬, 等. 湍流尺度对大气激光通信系统误码率的影响[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 655-659.
- [3] Xiong Jie, Yuan Xiuhua. Array optical antenna for the mitigation of atmospheric fading [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1969-1973. (in Chinese)  
熊杰, 元秀华. 抗湍流大气衰落的光学阵列天线特性[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1969-1973.
- [4] Wu Yunyun. Application research of adaptive optics technique in atmospheric optical communications[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics), 2013. (in Chinese)  
武云云. 自适应光学技术在大气光通信中的应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学(光电技术研究所), 2013.
- [5] Geng Chao, Zhang Xiaojun, Lin Xinyang, et al. Structural design of adaptive fiber optics collimators [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1682-1685. (in Chinese)

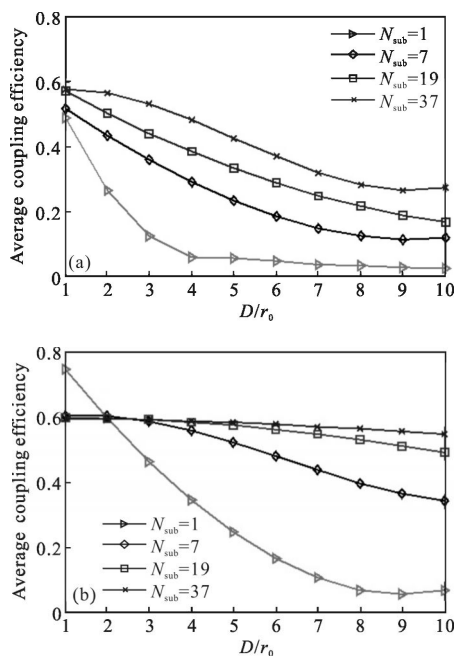


图6 在SPGD控制未开启、开启的情况下,不同阵列子孔径数的平均耦合效率随 $D/r_0$ 变化曲线

Fig.6 Average coupling efficiency curve as the function of  $D/r_0$  with different sub-unit numbers, when SPGD on and SPGD off

- 耿超, 张小军, 李新阳, 等. 自适应光纤光源准直器的结构设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1682-1685.
- [6] Geng Chao, Luo Wen, Li Xinyang, et al. A kind of control system of adaptive fiber coupler or collimator for laser beam transceiving propagation [P]. Chinese Patent: 201310161222.7, 2013. (in Chinese)
- 耿超, 罗文, 李新阳, 等. 一种激光束双向收发的自适应光纤耦合或准直器控制系统[P]. 中国专利: 201310161222.7, 2013.
- [7] Geng Chao, Luo Wen, Tan Yi, 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(2): 25045-25055.
- [8] Luo Wen, Geng Chao, Wu Yunyun, et al. Experimental demonstration of single-mode fiber coupling using adaptive fiber coupler [J]. *Chin Phys B*, 2014, 23(1): 207-214.
- [9] Luo Wen, Geng Chao, Li Xinyang. Simulation and experimental study of single-mode fiber coupling efficiency affected by atmospheric turbulence aberration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0606001. (in Chinese)
- 罗文, 耿超, 李新阳. 大气湍流像差对单模光纤耦合效率的影响分析及实验验证 [J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0606001.
- [10] Gatt P, Costello T P, Heimmermann D A, et al. Coherent optical array receivers for the mitigation of atmospheric turbulence and speckle effects [J]. *Appl Opt*, 1996, 35: 5999-6009.
- [11] Weeks A R, Xu Jing, Phillips R R, et al. Experimental verification and theory for an eight-element multiple-aperture equal-gain coherent laser receiver for laser communications [J]. *Appl Opt*, 1998, 37: 4782-4788.
- [12] Wang Xiong, Wang Xiaolin, Zhou Pu, et al. Experimental research of tilt-tip wavefront and phase-locking control in fiber lasers coherent beam combining [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1443-1447. (in Chinese)
- 王雄, 王小林, 周朴, 等. 光纤激光相干合成中倾斜和锁相同时控制的实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1443-1447.