

文章编号: 0253-2239(2010)07-2027-05

# 主振荡功率放大器结构光纤激光相干合成系统对谱线需求的实验研究

周 朴 马阎星 王小林 马浩统 许晓军 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 主振荡功率放大器(MOPA)结构光纤激光相干合成通常被认为需要种子源保持单频输出,而由此引入的非线性效应限制了单链路光纤激光的输出功率。采用宽谱种子源和多波长种子源是抑制非线性效应的有效方式。利用随机并行梯度下降法对三路宽谱光纤放大器和三路多波长光纤放大器相干合成进行了实验研究,取得了理想的相干合成效果。实验结果表明,谱线宽度不是制约 MOPA 结构相干合成的因素,宽谱放大器和多波长放大器的使用有望使 MOPA 结构光纤激光相干合成系统获得更高功率的输出。

**关键词** 相干合成;多波长;宽谱线;随机并行梯度下降

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.2027

## Experimental Study on Linewidth Requirement for Coherent Beam Combination of Fiber Amplifiers in MOPA Configuration

Zhou Pu Ma Yanxing Wang Xiaolin Ma Haotong Xu Xiaojun Liu Zejin

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense

Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Single-frequency radiation is often considered to be indispensable for coherent beam combination (CBC) of fiber amplifiers in master oscillator power amplifier (MOPA) configuration. Nevertheless, the single-frequency radiation limits the output power of each single fiber gain due to low stimulated Brillouin scattering (SBS) threshold. Wide linewidth and multi-wavelength radiations are two effective approaches to mitigate SBS effects in fiber amplifiers. Coherent beam combination of three wide-linewidth fiber amplifiers and three multi-wavelength fiber amplifiers are both experimentally demonstrated using stochastic parallel gradient descents (SPGD) algorithm. The experimental results show that single radiation is not indispensable for CBC in MOPA configuration, the application of wide-linewidth and multi-wavelength amplifiers present the potential in achieving a much higher output power in MOPA configuration.

**Key words** coherent beam combination; multiple wavelength; wide linewidth; stochastic parallel gradient descent (SPGD)

## 1 引 言

对多路光纤激光进行相干合成已成为激光技术领域的研究热点<sup>[1]</sup>,主振荡功率放大器研究人员已经提出了多种相干合成的实现方式<sup>[2~9]</sup>,其中合成路数最多、输出功率最高的是基于主振荡功率放大器(MOPA)结构的主动相位控制方案<sup>[6~9]</sup>。在 MOPA 结构相干合成系统中,通常认为种子源激光器需要保持单频窄线宽输出<sup>[10,11]</sup>,保证各路光束之间的时间相干

性,但由此引入的非线性效应使得单频光纤放大器的输出功率受限,目前最高输出功率为 500 W 量级<sup>[12]</sup>。种子源采用宽谱线激光<sup>[13~15]</sup>和多波长输出<sup>[16~19]</sup>被认为是抑制非线性效应、提高非线性效应阈值,提高光纤放大器输出功率的有效手段。如果采用宽谱线或多波长激光作为 MOPA 结构的种子激光源,并能成功实现多路放大器的相干合成,那么 MOPA 结构光纤激光相干合成系统有望获得更高功率输出。本文利用随机并

收稿日期: 2009-07-15; 收到修改稿日期: 2009-09-29

基金项目: 国防科学技术大学研究生创新基金(B070701)资助课题。

作者简介: 周 朴(1984—),男,博士,讲师,主要从事光纤激光器及光束合成等方面的研究。

E-mail: jnck621@163.com

导师简介: 刘泽金(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: zejinliu@vip.sina.com

行梯度下降(SPGD)法对三路宽谱光纤放大器和三路多波长光纤放大器相干合成进行实验研究,论证MOPA结构光纤激光相干合成系统采用宽谱线或多波长激光作为种子激光源的可行性。

## 2 宽谱光纤放大器相干合成

宽谱光纤放大器相干合成系统中的种子源采用实验室自制全保偏环形腔激光器,其腔体结构如

图 1(a)所示,由一台 980 nm 的抽运源,一个保偏波长复用器(WDM)、一段长度为 50 cm 的单包层掺镱(Yb)保偏光纤、两个保偏隔离器(ISO)、一个保偏 2×2 耦合器(coupler)和一个 1064 nm 高反保偏光纤光栅(FBG)组成。该环形腔激光器的最大输出功率为 30 mW,光谱图如图 1(b)所示,3 dB 线宽约为 0.1 nm(30 GHz)。

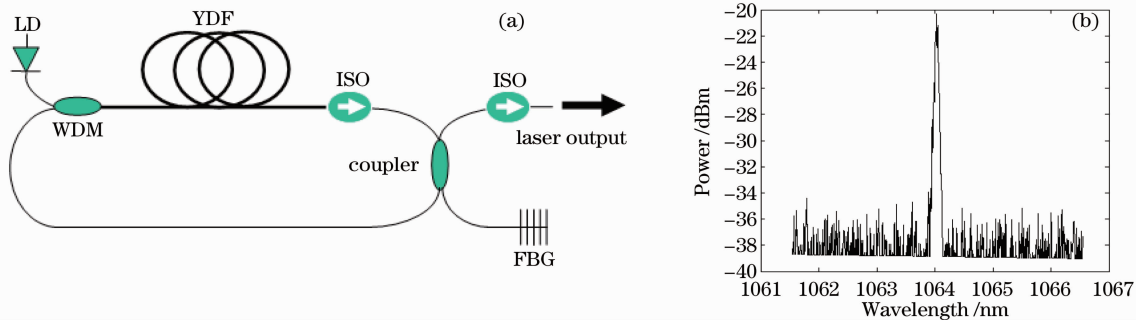


图 1 用于相干合成的种子源激光器。(a)环形腔激光器;(b)激光光谱

Fig. 1 Seed laser for coherent beam combination. (a) ring-cavity laser structure; (b) laser spectrum

宽谱光纤放大器相干合成系统结构如图 2 所示,种子源激光器(MO)发出的光束通过分束器(Splitter)后被分为三路,每一路均含有一个钽酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)相位调制器(PM)和一个光纤放大器(AMP)。相位调制器和光纤放大器分别起到相位控制和功率放大的作用,种子光进入放大器前接隔离器(ISO)加以保护。光纤放大器为保偏放大器,最大输出功率超过300 mW。各路光束经过准直器(CO)后形成阵列光束,准直器输出的三路光束腰斑半径均为 3.5 mm,排成“品”字形分布,光束中心距离约为 7 mm。阵列光束经过分光镜后被分成两部分,一部分光束经透镜聚焦,透镜的焦距为 1 m,光

电探测器放置于透镜的后焦平面上,紧贴于探测器前端放置一直径为 50 μm 的小孔(根据文献[20]中的准则,小孔的口径大小适合于相干合成闭环控制)。探测器探测到的信号经 A/D 转换后输入数字信号处理器(DSP),DSP 根据采集到的信号执行随机并行梯度下降(SPGD)算法,并将计算得到的相位控制信号经 D/A 转换和放大电路后施加给 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器用于相位控制,完成整个系统的闭环。阵列光束经过分光镜的另一部分光束经过透镜聚焦,红外相机放置在透镜的后焦平面上,用来观察光束的远场图样及相干合成的效果。

系统的工作过程为<sup>[20~22]</sup>:定义探测器探测到的

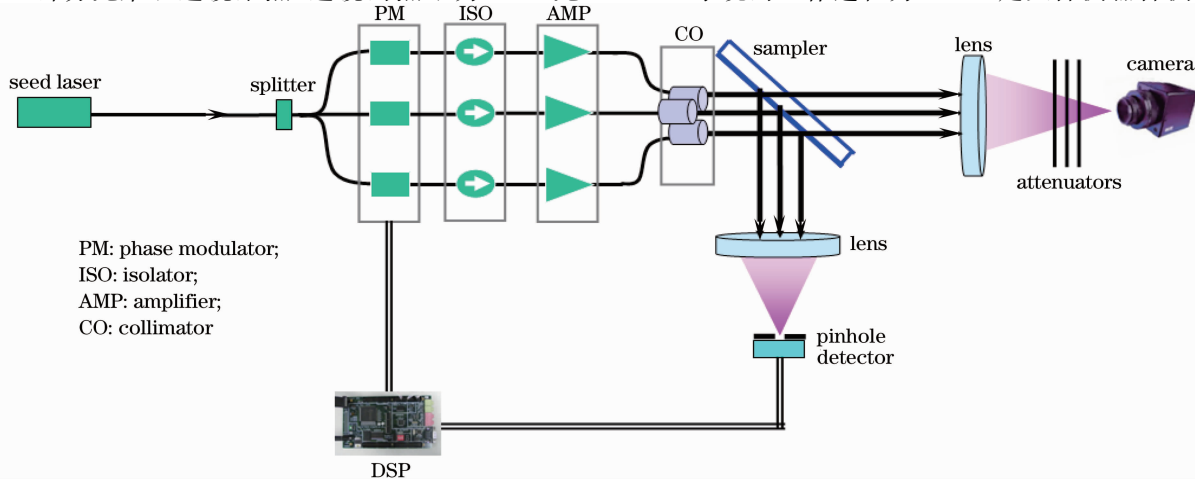


图 2 三路宽谱光纤放大器相干合成的系统结构

Fig. 2 System setup for coherent beam combination of three wide linewidth fiber amplifiers

合成光束的目标圆孔内宽度内部包含的能量为评价函数  $J$ 。主动向各路相位调制器施加随机扰动电压  $\delta u$ ，观察随机扰动电压带来的评价函数变化量  $\Delta J$ ，通过运行 SPGD 算法得到下一时刻施加在相位调节器上的电压信号  $\mathbf{u}$  并作用于相位调制器，如此迭代进行，直至算法收敛。

SPGD 算法的具体实现过程如下：

定义评价函数  $J$  的变化量

$$\Delta J^{(k)} = \Delta J_+^{(k)} - \Delta J_-^{(k)},$$

其中

$$\Delta J_-^{(k)} = J[\mathbf{u}^{(k)} - \delta \mathbf{u}^{(k)}] - J[\mathbf{u}^{(k)}],$$

$$\Delta J_+^{(k)} = J[\mathbf{u}^{(k)} + \delta \mathbf{u}^{(k)}] - J[\mathbf{u}^{(k)}],$$

其中上标  $(k)$  表示第  $k$  次迭代。

施加在相位调节器上的电压信号  $\mathbf{u}$  的迭代计算公式为

$$\mathbf{u}^{(k+1)} = \mathbf{u}^{(k)} + \gamma \delta \mathbf{u}^{(k)} \Delta J^{(k)},$$

其中  $\delta \mathbf{u}^{(k)} = \{\delta u_1, \delta u_2, \delta u_3\}^{(k)}$  为第  $k$  次迭代时施加的扰动电压向量， $\gamma$  为增益系数。如使目标函数向极大方向优化， $\gamma$  取正值。

SPGD 算法的执行过程(第  $k$  次迭代时)为：

1) 随机生成扰动向量  $\delta \mathbf{u}^{(k)} = \{\delta u_1, \delta u_2, \delta u_3\}^{(k)}$ ，

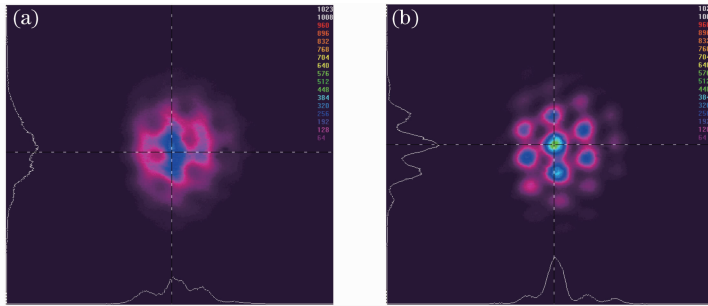


图 3 SPGD 法三路宽谱光纤放大器相干合成实验结果。(a)系统开环;(b)系统闭环

Fig. 3 Experimental results of coherent beam combination of three wide linewidth fiber amplifiers.

(a) open-loop; (b) close-loop

### 3 多波长光纤放大器相干合成

多波长光纤放大器相干合成系统结构与第 2 节介绍的宽谱光纤放大器相干合成系统结构基本一致，如图 4 所示。

主要的差别在于种子源激光器由两个中心波长分别为 1083 nm 和 1064 nm 的单频激光(线宽均小于 1 MHz)和一个保偏耦合器组成。两束单频激光经过保偏耦合器后的光谱如图 5(a)所示，经过功率放大器(AMP)后激光光谱如图 5(b)所示，在两个

各  $\delta u_i$  相互独立且同为伯努利分布，各分量幅值相等，取正负值的概率同为 50%；

2) 计算目标函数的变化量  $\Delta J^{(k)}$ ；

3) 更新控制参数，进行第  $k+1$  次迭代，直至满足算法结束条件。

通过向各路相位调制器施加随机扰动电压并计算评价函数  $J$  变化量  $\Delta J$ ，能够不断更新施加在各路相位调制器上的控制电压信息  $\mathbf{u}$ ，直至评价函数  $J$  取全局极大值，对应 3 路激光相位一致的情形。这样就达到了锁相运行，实现 3 路激光的相干合成输出。

当未执行 SPGD 算法、系统处于开环状态时，远场光强分布形态为动态、模糊的光斑，如图 3(a)所示。而当执行 SPGD 算法系统闭环时，远场光强分布形态为稳定、清晰的高对比度光斑，系统闭环远场光斑中央主瓣内的功率明显提高，如图 3(b)所示。

定义光斑可见度：

$$V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}),$$

其中  $I_{\max}$  为光强极大值， $I_{\min}$  为  $I_{\max}$  的临近极小值，算得此时远场光斑的可见度为 81%。

波长的激光输出功率基本保持一致的同时，放大器自发辐射(ASE)得到了很好的抑制。

对于如图 4 所示的三路多波长光纤放大器相干合成系统，当未执行 SPGD 算法、系统处于系统开环时，远场长时间曝光图样分布形态为模糊的光斑，如图 6(a)所示。系统闭环时，远场光强分布形态为稳定、清晰的高对比度光斑，系统闭环远场光斑中央主瓣内的功率明显提高，如图 6(b)所示，此时远场光斑的可见度为 85%。

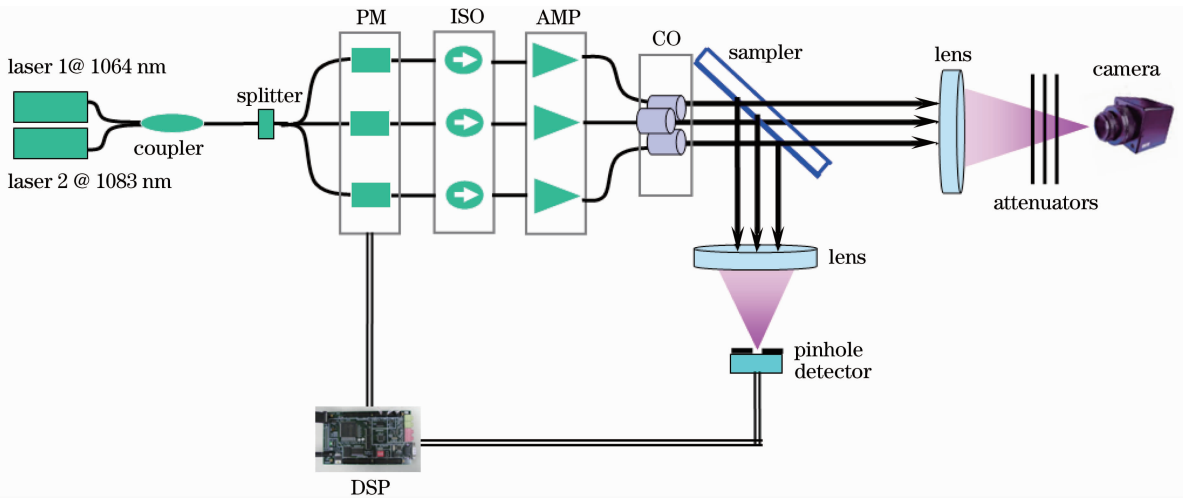


图 4 三路多波长光纤放大器相干合成的系统结构

Fig. 4 System setup for coherent beam combination of three multi-wavelength fiber amplifiers

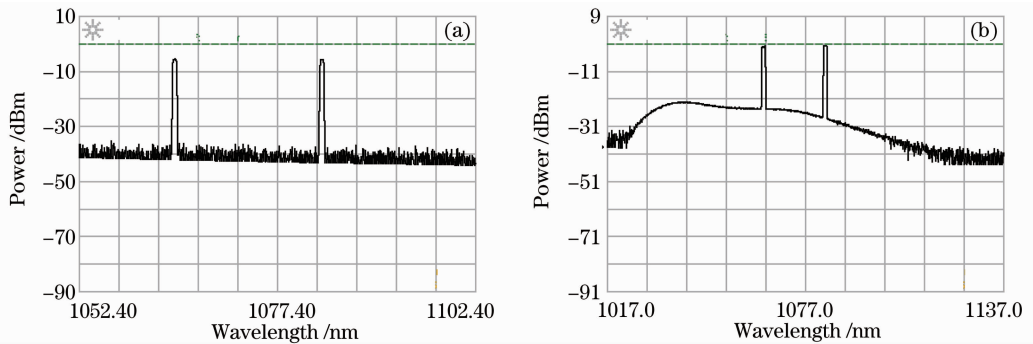


图 5 多波长激光器光谱。(a)放大前;(b)放大后

Fig. 5 Laser spectrum of the multi-wavelength laser source. (a) before power amplification; (a) after power amplification

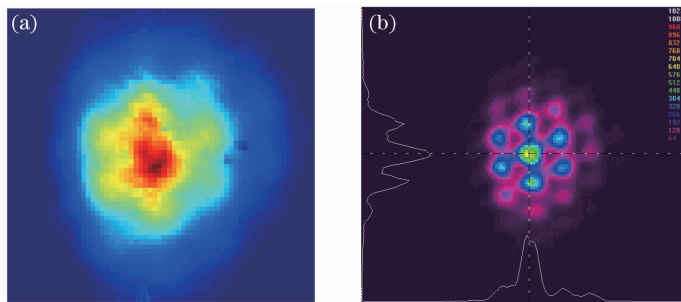


图 6 SPGD 法三路多波长光纤放大器相干合成实验结果。(a)系统开环;(b)系统闭环

Fig. 6 Experimental results of coherent beam combination of three multi-wavelength fiber amplifiers.

(a) open-loop; (b) close-loop

### 4 结 论

MOPA 结构光纤激光相干合成系统输出功率长期受限于单频种子源引入的非线性效应。针对采用宽谱种子源和多波长种子源两种有效抑制非线性效应的方式,本文利用 SPGD 法对三路宽谱光纤放大器和三路多波长光纤放大器相干合成进行实验研究。实验结果表明,系统处于闭环状态时,远场相干

图样的对比度分别为 81% 和 85%, 获得了理想的相干合成效果。因此,谱线宽度不是制约 MOPA 结构相干合成的因素,宽谱放大器和多波长放大器的使用有望使得 MOPA 结构光纤激光相干合成系统获得更高功率输出。

### 参 考 文 献

1 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance

- sources [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2005, **11**(3): 567~577
- 2 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1154~1158  
何 兵, 楼祺洪, 周 军等. 两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1154~1158
- 3 Li Jianfeng, Duan Kailiang, Wang Jianmin *et al.*. Experiment on coherent-locking of two photonics crystal fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 923~926  
李剑峰, 段开棕, 王建明等. 两光子晶体光纤激光器相干锁定的实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 923~926
- 4 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin *et al.*. Mutual-injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 77~81  
程 勇, 刘 洋, 许立新等. 角锥腔互注入锁相光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 77~81
- 5 Zhou Pu, Liu Zejin, Ma Yanxing *et al.*. Simulation and experimental investigation on coherent beam combining of two fiber amplifiers based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 431~436  
周 朴, 刘泽金, 马阎星等. 随机并行梯度下降算法模拟两路光纤放大器相干合成与实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 431~436
- 6 J. Anderegg, S. Brosnan, E. Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays[C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U1~5
- 7 T. M. Shay, V. Benham, J. T. Baker *et al.*. Self-synchronous and self-referenced coherent beam combination for large optical arrays [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2007, **13**(3): 480~486
- 8 L. Liu, M. A. Vorontsov. Phase-locking of tiled fiber array using SPGD feedback controller [C]. *SPIE*, 2005, **5895**: 58950P1~9
- 9 J. E. Kinsky, C. X. Yu, D. V. Murphy *et al.*. Beam control of a 2D polarization maintaining fiber optic phased array with high-fiber count[C]. *SPIE*, 2006, **6306**: 63060G1~11
- 10 J. Limpert, F. Röser, S. Klingebiel *et al.*. The rising power of fiber lasers and amplifiers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2007, **13**(3): 537~545
- 11 J. C. Knight. Towards 100 kW fiber laser systems (2006) [Online]. Available: <http://www.crystalfiber.com>
- 12 Y. Jeong, Member, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2007, **13**(3): 546~551
- 13 J. W. Dawson, M. J. Messerly, R. J. Beach *et al.*. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 13240~13266
- 14 S. J. Augst, T. Y. Fan, A. Sanchez. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(5): 474~476
- 15 E. J. Bochove, S. A. Shakir. Analysis of a spatial-filtering passive fiber laser beam combining system[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2009, **15**(2): 320~327
- 16 I. Dajani, C. Zeringue, T. Justin Bronder *et al.*. A theoretical treatment of two approaches to SBS mitigation with two-tone amplification[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(18): 14233~14247
- 17 I. Dajani, C. Zeringue, T. Shay. Investigation of nonlinear effects in multitone-driven narrow-linewidth high-power amplifiers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2009, **15**(2): 406~414
- 18 P. Weßels, P. Adel, M. Auerbach *et al.*. Novel suppression scheme for Brillouin scattering[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(19): 4443~4448
- 19 Y. Liu, Z Lü, Y. Dong *et al.*. Research on stimulated Brillouin scattering suppression based on multi-frequency phase modulation [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 29~31
- 20 P. Zhou, Z. Liu, X. Wang *et al.*. Coherent beam combining of fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm and its application[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2009, **15**(2): 248~256
- 21 M. A. Vorontsov, V. P. Sivokon. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction [J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1998, **15**(10): 2745~2758
- 22 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart, J. C. Ricklin. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(12): 907~909