

# 光纤激光阵列目标在回路自适应光学系统的数值模拟

陶汝茂 司 磊 马阎星 邹永超 周 朴\*

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 研究了光纤激光阵列目标在回路自适应光学系统在实际大气环境中的传输。从光纤激光阵列、激光在大气中的传输、目标和优化算法四个方面,建立了光纤激光阵列目标在回路自适应光学系统的理论模型。在不同强度大气湍流下,对系统补偿大气湍流影响的效果进行了研究,并对系统控制参数优化进行了简单探讨。结果表明,目标在回路闭环控制结构能够有效补偿大气湍流引起的能量扩散,使目标靶面能量集中度提高,在强湍流情况下,可使目标光斑的平均半径收敛 9%;该结构的传输性能受大气湍流强度的影响,大气湍流强度增强,系统的控制效果减弱;控制算法收敛速率受参数设置的影响,实际应用中需进行优化;探测器的信噪比(SNR)对于系统的闭环控制性能也有一定影响。

**关键词** 光纤激光阵列;目标在回路;大气湍流;自适应光学

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1114002

## Numerical Simulation of Target-in-the-Loop Adaptive Optic Systems Based on Fiber-Laser Array

Tao Rumao Si Lei Ma Yanxing Zou Yongchao Zhou Pu

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** The performance of target-in-the-loop adaptive optical systems based on fiber laser array in atmospheric environment has been investigated. A theoretic mode of target-in-the-loop adaptive optical systems based on fiber laser array has been set up. The effects of the systems on turbulence compensation under different turbulence intensity are studied and the optimization of the control algorithm is discussed briefly. It is shown that the system can compensate the effect of turbulence effectively and improve the power density concentration by reducing the mean radius of the spot on the target by 9%. The performance of the system is affected by the intensity of the turbulence and the convergence rate of the control algorithm depends on the parameters of the algorithm. Finally the signal-to-noise ratio (SNR) of the detector also affect the performance of the system.

**Key words** fiber-laser array; target in the loop; atmospheric turbulence; adaptive optics

**OCIS codes** 140.3510; 230.2285; 060.2320; 060.2380

## 1 引 言

光纤激光器具有转换效率高,光束质量好,热管理方便,结构紧凑等优点<sup>[1]</sup>,尤其是进入 21 世纪以来,随着高功率半导体激光器抽运技术和双包层光纤制作工艺的发展,光纤激光器的输出功率逐步提高,基模千瓦级的光纤激光器已经实现商用化,其在高能激光系统中的巨大应用潜力也被一致看

好<sup>[2~6]</sup>。然而,由于受到掺杂光纤的非线性效应、光学损伤及热损伤等物理机理的限制,要想大幅度地提高单个激光器的功率是相当困难的<sup>[7]</sup>。采用光纤激光阵列相干合束,既能提高总的激光功率,还能保持光纤激光良好的光束质量,同时为整个系统的热管理提供了便利<sup>[2]</sup>,是目前研究的热点。在激光技术方面取得的进展,使制造装载在各种移动平

收稿日期: 2011-02-15; 收到修改稿日期: 2011-06-10

作者简介: 陶汝茂(1987—),男,硕士研究生,主要从事高能激光技术等方面的研究。E-mail: taorumao@sohu.com

导师简介: 司 磊(1971—),男,博士,研究员,主要从事高能激光方面的研究。E-mail: w\_zt@163.com

\* 通信联系人。E-mail: zhoup203@163.com

台上的紧凑型、高功率激光系统成为可能。然而,光纤激光阵列光束在传输过程中仍不可避免的会受到大气湍流的影响<sup>[8~11]</sup>,甚至会破坏相干性,所以对于实际的激光系统,消除大气对激光传输的影响是一个亟待解决的问题。自适应光学作为从天文成像应用中发展起来的、对大气湍流引起波前畸变的动态实时补偿技术,被认为是消除大气湍流对光学系统传输效果影响的最有效工具之一<sup>[12]</sup>,得到了广泛研究。传统自适应光学都是基于合作目标,由合作目标提供信标。而实际的高能光纤激光阵列系统应用的场合将是非合作目标,因此是一个目标在回路中的系统。这方面的研究较少,国内几乎没有相关报道。本文中,对光纤激光阵列目标在回路自适应光学系统进行了研究,建立了理论模型,采用数值模拟,研究了该系统补偿大气湍流对阵列激光束传输影响的效果,并对不同大气湍流环境下系统的性能进行了对比,讨论了控制算法的优化,为高能光纤激光阵列系统的工程应用提供了参考。

## 2 理论模型

目标在回路自适应光学系统的结构如图 1 所示。光纤激光阵列出射的激光经扩束准直后,平行发射到目标上。由于大气湍流的作用,入射到目标上的波前发生畸变,导致目标平面上光强不是衍射极限分布,产生光强的扩散效应。一部分光从目标表面散射,经湍流后传回自适应光学系统,用一透镜接收从目标表面散射的光并在成像探测器如 CCD 相机上形成一个激光强度分布的像。根据 Van Cittert-Zernike 理论<sup>[13]</sup>,接收器平面的散斑场空间相关半径(散斑尺寸) $a_s$ 与目标靶面的光束特征大小  $b$  成反比,即有  $a_s \cong \lambda L/b$ ,其中  $L$  为传播路径长度, $\lambda$  为波长。利用优化算法将接收器上所成图像的能量集中度提高,则目标靶面的能量集中度亦提高。对该结构的理论建模主要分为:光纤激光阵列模型、激光在大气中的传输模型、目标模型以及优化

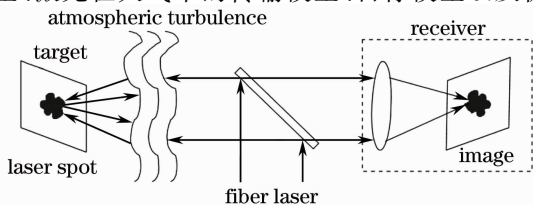


图 1 目标在回路自适应光学系统结构图

Fig. 1 Optical scheme of a target-in-the-loop laser AO system

控制算法。

### 2.1 激光阵列系统结构

光纤激光阵列采用平行发射<sup>[14]</sup>的形式,系统结构如图 2 所示。主振荡光纤激光器的输出光束经过初级预放后由分束器分成  $N$  路子光束。光束经过相位控制器后被放大器放大至较高功率,再经光束准直器扩束准直输出。每路子光束的相位可以利用随机并行梯度下降(SPGD)算法向相位控制器输出相应的控制电压信号分别进行控制。

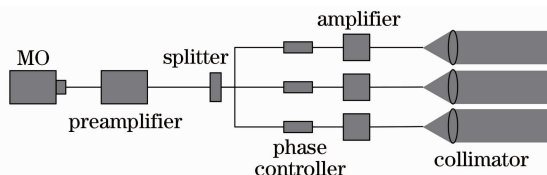


图 2 光纤激光阵列系统结构图

Fig. 2 System configurations of fiber laser array

每路子光束经扩束准直后口径为  $d$ ,整个激光阵列的口径为  $D$ 。假设单元光束的光强为高斯分布,则其在出射端的复振幅分布为

$$E_n(x, y, 0) = \exp \left\{ - \frac{[(x - a_n)^2 + (y - b_n)^2]}{(d/2)^2} \right\}, \quad (1)$$

式中  $a_n, b_n$  为第  $n$  束激光的中心坐标位置。

激光阵列在出射端总的光场复振幅分布为

$$E(x, y, 0) = \sum_{n=1}^N E_n(x, y, 0), \quad (2)$$

$N$  为合成的光纤激光束数目。

### 2.2 激光在湍流大气中的传输

采用标量衍射理论,将激光在湍流大气中的传播利用“多相位屏”法模拟<sup>[15]</sup>;把传输路径  $z$  分为  $i$  段,在每一段距离  $\Delta z$  中近似将本段大气湍流对传输光束的影响作为一个放在中间的薄屏,光束通过屏时,只有相位受折射率随机起伏的影响,产生强烈的相位调制,振幅保持不变,即光束在经过  $\Delta z/2$  的自由空间传输后,加上本段大气湍流对相位造成的畸变,再传播  $\Delta z/2$  的自由空间,完成了本段的传输。其中,自由空间传播利用角谱传播模拟。在传输方向上从  $z_{i-1}$  的平面到达  $z_i = z_{i-1} + \Delta z$  平面的光场复振幅分布可描述为

$$E(x, y, z_i) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \exp \left[ - \frac{j\Delta z}{2k} (K_x^2 + K_y^2) \right] \cdot \mathcal{F} \left\{ \exp [j\phi(x, y, z_i)] E(x, y, z_{i-1}) \right\} \right\}, \quad (3)$$

式中  $\phi(x, y, z_{i-1} + \Delta z)$  即为该段路径对应的相位调制,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为激光波长,  $K_x, K_y$  为空间

波数在  $x$ 、 $y$  方向的分量,  $\mathcal{F}^{-1}$ 、 $\mathcal{F}$  分别表示逆傅里叶变换和傅里叶变换。

受大气湍流影响的光学波前可以认为是服从一已知模式和统计规律的二维函数, 这些函数可以被分解为在圆域内正交的 Zernike 多项式形式<sup>[16]</sup>

$$a_i a_j = \begin{cases} \frac{2 \cdot 2698 (-1)^{n_i+n_j-2m_i/2} \sqrt{(n_i+1)(n_j+1)} \Gamma[(n_i+n_j-5/3)/2] (D/r_0)^{5/3}}{\Gamma[(n_i+n_j+17/3)/2] \Gamma[(n_i-n_j+17/3)/2] \Gamma[(n_i+n_j+23/3)/2]}, & i-j \text{ 为偶数,} \\ 0, & i-j \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $m, n$  为泽尼克(Zernike)多项式的角向次数和径向次数,  $D$  为光束口径,  $r_0$  为大气相干长度, 平面波的大气相干长度为<sup>[18]</sup>

$$r_0 = (1.4572 \bar{C}_n^2 k^2 L)^{-3/5}, \quad (6)$$

$k$  为波数,  $\bar{C}_n^2$  为平均折射率结构常数,  $L$  为传输距离。  $\Gamma_a$  可以进行奇异值分解:

$$\Gamma_a = \mathbf{U}^{-1} \mathbf{S} \mathbf{U}, \quad (7)$$

系数向量  $\mathbf{a}$  可表示为

$$\mathbf{a} = \mathbf{U}^{-1} \mathbf{b}, \quad (8)$$

$\mathbf{b}$  是满足均值为 0, 方差为  $S$  对角线上对应元素值的一组随机数。根据(8)式可以求出任意相干长度下 Zernike 多项式系数, 代入(4)式即可构造相应的相位屏。模拟中, Zernike 多项式取到第 51 阶。在实际模拟时, 常采用叠加的多层随机相位屏来模拟大气湍流<sup>[19]</sup>, 实现更多的空间分布组合。

精确模拟相位屏之间激光的传输, 对连续光场进行正确的取样是必不可少的。若取样间隔为  $\Delta x$ , 湍流相关长度<sup>[20]</sup>  $l_{\text{turb}} = 3.44^{-3/5} r_0$ , 则

$$\Delta x \leq l_{\text{turb}}/3, \quad (9)$$

同时根据尼金斯特(Nyquist)采样定律<sup>[21]</sup>, 可得

$$\Delta x \leq \frac{2\lambda f_l}{3D}, \quad (10)$$

式中  $f_l$  为望远系统焦距长度, 这里取为到目标的距离,  $D$  为激光发射系统的直径。

由(9)、(10)式可知

$$\Delta x \leq \min\left(l_{\text{turb}}/3, \frac{2\lambda f_l}{3D}\right), \quad (11)$$

只要取样间隔满足(11)式, 就可以对激光在大气湍流中的传输进行足够精确的模拟。

### 2.3 目标模型

假设目标为一垂直于入射光束的平面扩展目标, 而且目标尺寸远大于激光光斑大小。若入射光波为  $U_i(x, y, z)$ , 则从目标上散射的光波  $U_r$  表示为<sup>[13]</sup>

$$\phi = \sum_{i=1}^{\infty} a_i Z_i(x, y), \quad (4)$$

式中  $Z_i(x, y)$  为各阶 Zernike 多项式,  $a_i$  为第  $i$  阶 Zernike 多项式系数。系数向量  $\mathbf{a}$  的协方差矩阵  $\Gamma_a$  的元素为<sup>[18]</sup>

$$U_r^- = U_i(x, y, z) T(x, y, z), \quad (12)$$

其中复散射系数  $T(x, y, z) = \gamma_0 \exp[ik\xi(x, y, z) + ikS]$ ;  $\gamma_0$  为反射系数, 设其为常数;  $S$  为反射后的相移; 函数  $\xi(x, y, z)$  描述表面粗糙度函数引起的随机相位。假设  $\xi(x, y, z)$  为一个零均值的严格静态各向同性随机过程, 其相关长度  $l_0$  远小于入射场波动的特征大小。因此可以将目标表面视为光学粗糙的, 其随机粗糙度相位函数  $\xi(x, y, z)$  用在  $(-\pi, \pi)$  上均匀分布的白噪声表示。

### 2.4 随机并行梯度下降(SPGD)优化

目标在回路控制是基于湍流引起畸变的校正可以通过对测得的性能评价函数  $J$  的直接优化实现这一思想的。梯度下降优化算法是寻找函数极值的最简单方法之一。而 Voronstov 等<sup>[16]</sup> 提出的 SPGD 算法具有实现容易、控制参数的所有维并行计算的特点, 能大大提高算法的收敛速率。其基本思想为

施加的补偿相位  $u(x, y, t)$  与泛函  $J(u)$  存在如下关系:

$$\tau \frac{\partial u(x, y, t)}{\partial t} = -\delta_n J, \quad (13)$$

式中  $\tau$  为时间常数。(13)式的时间离散形式可表示为

$$u_j^{(m+1)} = u_j^{(m)} - \mu \frac{\partial J(u_1^{(m)}, \dots, u_N^{(m)})}{\partial u_j^{(m)}}, j = 1, \dots, N, \quad (14)$$

上标  $(m)$  对应迭代过程中的第  $m$  步。实际自适应光学系统中无法直接得到  $\partial J / \partial u_j$ , 只能通过微扰法对其估计值进行测量。在 SPGD 算法中, 同时对所有控制信号同时施加微扰  $\{\delta u_j\}$ , ( $j = 1, \dots, N$ ), 相应的性能评价函数的改变量为  $\delta J$ , 以  $\delta J \delta u_j$  作为  $\partial J / \partial u_j$  的估计值, 即  $\delta J \delta u_j \approx \partial J / \partial u_j$ , 代入(14)式可得

$$u_j^{(m+1)} = u_j^{(m)} - \mu \delta J^{(m)} \delta u_j^{(m)}, j = 1, \dots, N, \quad (15)$$

(15)式即为算法的实际执行方式。如使评价函数向极大方向优化,  $\mu$  取负值; 反之  $\mu$  取正值。在实际模

拟中,为了提高算法精度,采用双向扰动<sup>[16]</sup>, $\delta u_j$  相互独立且服从伯努利分布。

适用于目标在回路控制的用于衡量目标靶面能量集中度的性能评价函数有

1) 斯特雷尔比( $R_S$ )

$$R_S = I(0,0,0)/I^d(0,0,0), \quad (16)$$

式中  $I^d(\mathbf{x})$  是在没有湍流的情况下达到的衍射极限激光强度分布。

2) 环围能量( $E_E$ )

$$E_E = \int_D I(x,y,z) dx dy, \quad (17)$$

式中  $D$  是激光热斑的面积,其中包含能量的最大值。

3) 像清晰度( $S_{mn}$ )

$$S_{mn} = \int \left| \frac{\partial^{m+n} I(x,y,z)}{\partial^m x \partial^n y} \right| dx dy, \quad (m+n) = 0,1,\dots, \quad (18)$$

4) 平均半径( $\bar{R}$ )

$$\bar{R} = \frac{\int_D \sqrt{(x-\bar{x})^2 + (y-\bar{y})^2} |I(x,y,z)| dx dy}{\int_D I(x,y,z) dx dy}, \quad (19)$$

式中  $D$  为光斑分布面积,  $(\bar{x}, \bar{y})$  为强度分布中心,且

$$\bar{x} = \frac{\int_D x I(x,y,z) dx dy}{\int_D I(x,y,z) dx dy}, \quad (20)$$

$$\bar{y} = \frac{\int_D y I(x,y,z) dx dy}{\int_D I(x,y,z) dx dy}, \quad (21)$$

分析(16)~(21)式,由于平均半径能够直接反映能量的集中度,而且是能够反映整个强度分布,通常选取其作为性能评价函数,本文亦选取平均半径作为性能评价函数。

### 3 数值分析

根据理论模型,对 19 单元光纤激光阵列进行模拟,阵列排布如图 3 所示。模拟系统结构如图 4 所示,且只考虑近地面水平传输。模拟均为静态模拟,不考虑湍流的动态特性对系统的影响且目标为高速旋转的扩展平面目标。扩束准直后单路光束的口径取  $d = 6 \text{ cm}$ ,整个激光阵列的口径为  $D = 30 \text{ cm}$ , CCD1 前透镜直径为  $30 \text{ cm}$ 。发射孔径距目标表面距离为  $z = 10 \text{ km}$ ,在此段传输路径上设置 9 个相位屏,  $\Delta z = 1 \text{ km}$ 。为了评价该结构在不同强度的湍流大气中的传输性能,研究了折射率结构常数  $\bar{C}_n^2$  取  $1 \times 10^{-15}$ ,  $5 \times 10^{-15}$  和  $1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  的 3 种情形。由(11)式,垂直于传播方向上光场的复振幅分布用大小为  $128 \times 128$  的网格来描述,  $\Delta x = 0.0074$ ,由于计算时间的限制,取样点数较少。为防止传输过程中由于随机散射作用造成的能量溢出<sup>[1]</sup>,在计算网格周围设置与网格同样大小的零能量“防护墙”,实际计算时网格大小为  $256 \times 256$ 。

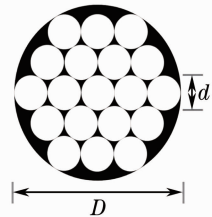


图 3 19 单元光纤激光阵列平行发射

Fig. 3 Scheme of the 19-fiber parallel-lanching laser array

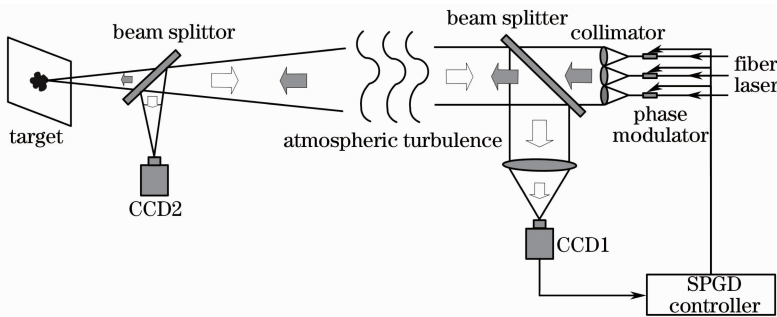


图 4 阵列光纤激光目标在回路闭环控制结构图

Fig. 4 Closed-loop configurations of a target-in-the-loop fiber laser AO system

#### 3.1 基于目标上光斑的 SPGD 控制

为了获得一个后续模拟的参考,基于目标上激光强度分布,即 CCD2 上激光光斑,对平均半径进行

最小化。通过这种控制方法,可以获得系统控制性能的极限。扰动幅度取为 0.1。为了提高 SPGD 算法的收敛速度,提高系统的精度,下降算法的步长  $\mu$

定义为

$$\mu_t = \mu_0 (J_t + C), \quad (20)$$

初期  $J_t$  大, 步长  $\mu_t$  大, 算法收敛速度快, 随着  $J_t$  变小, 步长  $\mu_t$  变小, 收敛精度提高.  $C$  为防止因  $J_t$  趋近

于零而使  $\mu_t$  趋于零的常数. 模拟中,  $\bar{C}_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ,  $\mu_0 = 9000$ ,  $C = 0.0001$ , 可得图 5 所示结果.

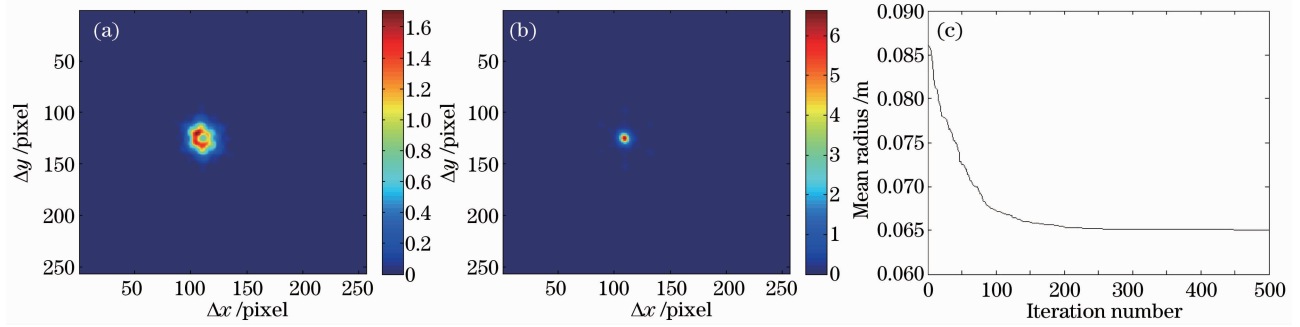


图 5 基于目标上光斑的 500 步双边 SPGD 迭代结果。(a)目标上初始光斑;(b)目标上收敛光斑;  
(c)目标光斑平均半径收敛曲线

Fig. 5 Spot-on-target SPGD adaptation result for 500 two-sided SPGD iterations. (a) Initial intensity distributions on the target; (b) final intensity distributions on the target; (c) the SPGD-optimized convergence histories of the spot on the target

图 5(a), (b)可以看出, 目标靶面能量集中度明显提高, 光斑收敛效果明显, 图 5(c)可以看出, 在迭代 250 步左右即收敛, 光斑平均半径从 8.62 cm 收敛到 6.5 cm, 收敛 25%, 光斑收敛效果显著.

### 3.2 基于接收器图像的 SPGD 控制

为了模拟更实际的情况, 基于自适应光学系统

接收器上获得的受湍流畸变后的激光光斑图像, 提取平均半径进行最小化. 接收器上的形成图像是将 25 个不相关的叠加在平滑目标强度图样上的随机相位实现进行平均后获得的. 由于计算时间的限制, 只取了 25 个散斑实现. 因此, 模拟中测得的用于处理的图像比实际情况中的噪声成分更高. 模拟

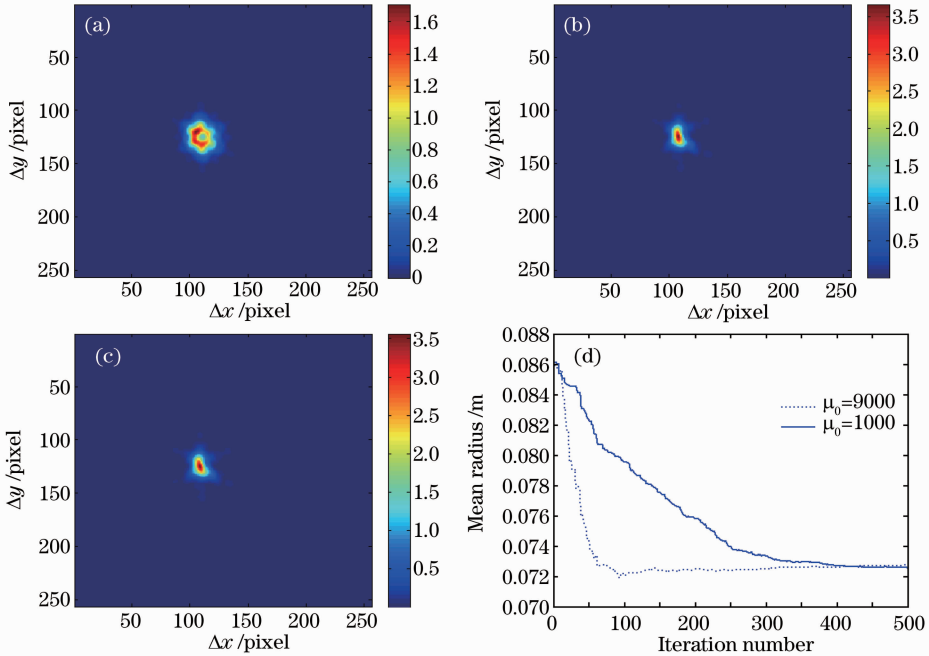


图 6 基于接收器光斑的 500 步双边 SPGD 迭代结果。(a)目标上初始光斑;(b)  $\mu_0 = 9000$  时, 目标上收敛光斑;  
(c)  $\mu_0 = 2000$  时, 目标上收敛光斑;(d)目标上光斑平均半径收敛曲线

Fig. 6 Spot-on-receiver SPGD adaptation result after 500 two-sided iterations. (a) Initial intensity distributions on the target; (b) final intensity distributions on the target when  $\mu_0 = 9000$ ; (c) final intensity distributions on the target when  $\mu_0 = 2000$ ; (d) the SPGD-optimized convergence histories of the spot on the target

中,  $\bar{C}_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ,  $\mu_0$  分别取 2000 和 9000, 进行了 500 步双边 SPGD 迭代, 计算结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 基于光斑平均半径的闭环远距离反馈 SPGD 目标在回路闭环控制能有效补偿大气湍流引起的畸变。图 6(d) 中, 目标上光斑平均半径从 8.62 cm 减小到 7.28 cm, 光斑平均半径收敛了 16%。对比不同步长情况下, 光斑平均半径收敛曲线可知: 当  $\mu_0 = 9000$  时, 200 次双边 SPGD 迭代后, 目标上光斑平均半径即收敛, 而当  $\mu_0 = 2000$  时, 进行 500 次双边 SPGD 迭代, 目标上光斑平均半径仍未收敛。可见, SPGD 算法的收敛速率与算法参数设置有关, 需要根据模拟进行合理设置。

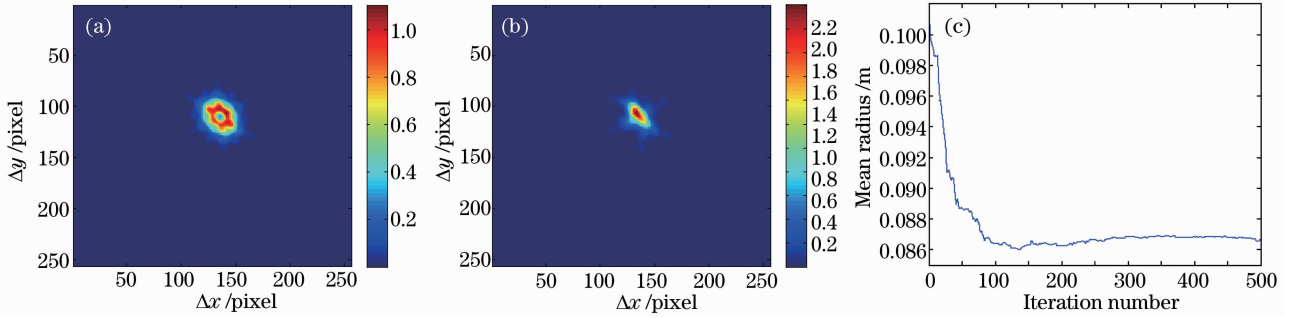


图 7 基于接收器光斑的 500 步双边 SPGD 迭代结果,  $\bar{C}_n^2 = 5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ,  $\mu_0 = 9000$ 。(a) 目标初始光斑; (b) 目标上收敛光斑; (c) 目标上光斑平均半径收敛曲线

Fig. 7 Spot-on-receiver SPGD adaptation result after 500 two-sided iterations,  $\bar{C}_n^2 = 5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ,  $\mu_0 = 9000$ . (a) Initial intensity distributions on the target; (b) final intensity distributions on the target; (c) the SPGD-optimized convergence histories of the spot on the target

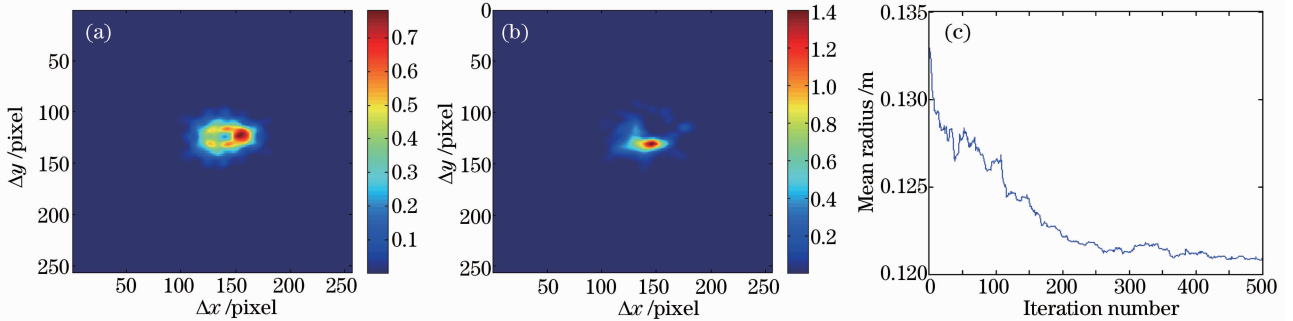


图 8 基于接收器光斑的 500 步双边 SPGD 迭代结果,  $\bar{C}_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ,  $\mu_0 = 9000$ 。(a) 目标初始光斑; (b) 目标上收敛光斑; (c) 目标上光斑平均半径收敛曲线

Fig. 8 Spot-on-receiver SPGD adaptation result after 500 two-sided iterations,  $\bar{C}_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ,  $\mu_0 = 9000$ . (a) Initial intensity distributions on the target; (b) final intensity distributions on the target; (c) the SPGD-optimized convergence histories of the spot on the target

前述模拟均未考虑探测器 (CCD 相机) 误差对系统性能影响, 而由于探测器噪声, 测得的信号与实际信号存在一定误差, 必然会对系统的控制性能产生影响。考虑简化的探测器噪声模型, 即直接将 CCD 相机上测量的信号加入一定的噪声或误差, 对

图 7、图 8 给出了不同大气湍流强度下的计算结果, 图 7 对应  $\bar{C}_n^2 = 5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ , 图 8 对应  $\bar{C}_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ,  $\mu_0$  均取 9000。对比图 6 (b)、图 7 (b)、图 8 (b), 可以看出, 随着大气湍流强度增强, 目标上的能量集中度降低, 系统收敛效果下降, 当  $\bar{C}_n^2 = 5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  时, 目标光斑平均半径从 10.1 cm 收敛到 8.7 cm, 收敛 14%; 当  $\bar{C}_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  时, 目标光斑平均半径从 13.3 cm 收敛到 12.1 cm, 收敛 9%。可见, 大气湍流对系统收敛性能影响巨大。

信噪比 ( $R_{SN}$ ) 分别为 30、23 和 20 dB 3 种情况进行了模拟, 结果如图 9 所示 ( $\mu_0 = 6000$ , 其余参数设置同图 6)。由图 9 可以看出, CCD 相机的误差会严重影响控制系统的闭环性能, 当信噪比小于 20 dB 时, 系统已无法实现闭环。

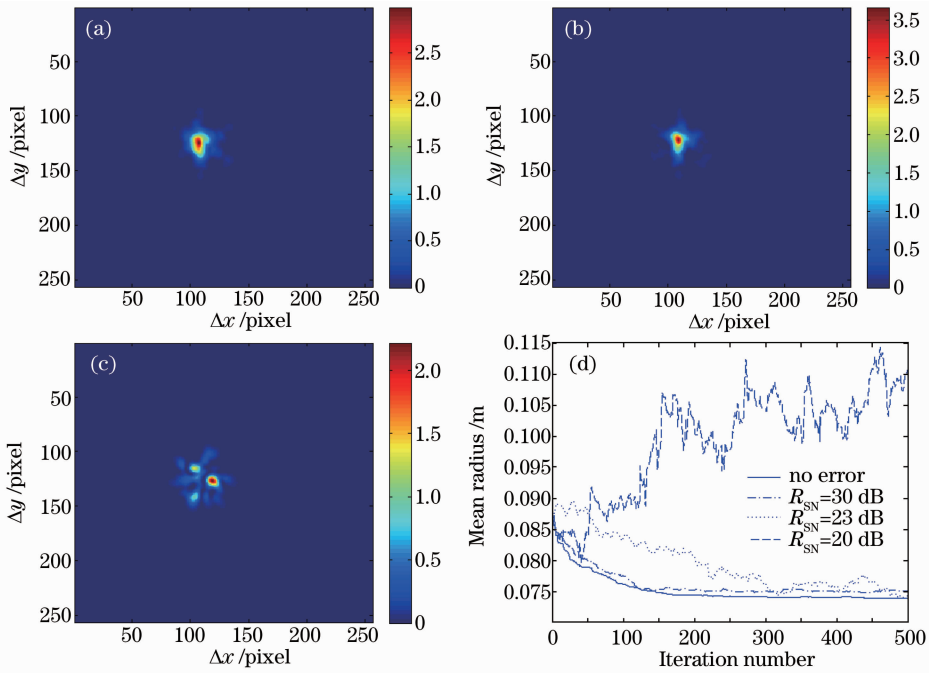


图9 基于接收器光斑的500步双边SPGD迭代结果,  $\bar{C}_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ,  $\mu_0 = 6000$ 。(a)、(b)、(c)为信噪比分别是30, 23和20 dB的目标上收敛光斑, (d)目标上光斑平均半径收敛曲线

Fig.9 Spot-on-receiver SPGD adaptation result after 500 two-sided iterations,  $\bar{C}_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ,  $\mu_0 = 6000$ . (a), (b), and (c) is the final intensity distributions on the target for  $R_{SN} = 30 \text{ dB}$ ,  $23 \text{ dB}$ ,  $20 \text{ dB}$ , respectively. (d) SPGD-optimized convergence histories of the spot on the target

## 4 结 论

对光纤激光阵列目标在回路闭环控制结构进行了理论建模,并对实际大气中,基于光纤激光阵列的目标在回路自适应光学系统进行了数值模拟,研究了不同大气湍流强度下,系统的传输性能。研究表明,目标在回路闭环自适应控制结构能够有效补偿大气湍流引起的畸变,使目标上光斑平均半径收敛,提高目标靶面的能量集中度,即使在湍流较强的情况下,  $\bar{C}_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ,亦能使目标上光斑平均半径收敛9%;系统的传输性能受大气湍流影响,随着湍流强度变强,系统传输效果下降;SPGD优化算法的收敛速率与算法中控制参数的选择有关,实际控制时,需优化选择;CCD相机的信噪比会严重影响系统的闭环控制性能,当信噪比小于20 dB时,系统无法实现闭环控制。

## 参 考 文 献

- Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun *et al.*. Propagation performance of adaptive phase-locked fiber laser array in turbulent atmosphere [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1442~1447  
周 朴, 刘泽金, 许晓军等. 自适应锁相光纤激光阵列的湍流大气传输性能[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1442~1447
- Zhou Pu, Ma Yanxing, Wang Xiaolin *et al.*. Tiled-aperture

- coherent beam combining of two high-power fibre amplifiers[J]. *Chin. Phys. B*, 2010, **19**(1): 014202-1~5
- Wang Xiaolin, Zhou Pu, Ma Yanxing *et al.*. Coherent beam combining of hybrid phase control in master oscillator-power amplifier configuration [J]. *Chin. Phys. B*, 2010, **19**(9): 094202-1~5
- A. Galvanauskas. High power fiber lasers[J]. *Opt. & Photon. News*, 2004, **15**(7): 42~47
- Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. Analysis of high energy fiber laser systems[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(11): 1795~1801  
刘泽金, 周 朴, 许晓军. 高能光纤激光系统浅析[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(11): 1795~1801
- Lou Qihong, Zhou Jun, Wang Zhijiang. Analysis of high-power fiber laser weapons [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(3): 161~165  
楼祺洪, 周 军, 王之江. 光纤激光作为激光武器的能力分析[J]. *激光技术*, 2003, **27**(3): 161~165
- J. R. Leger, J. Nilsson, J. P. Huignard *et al.*. Laser beam combining and fiber laser systems [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2009, **15**: 237~239
- Chu Xiuxiang, Liu Zejin, Wu Yi. Propagation of a general multi-Gaussian beam in turbulent atmosphere in a slant path [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(1): 74~79
- Y. Cai, Y. Chen, H. T. Eyyuboglu *et al.*. Propagation of laser array beams in a turbulent atmosphere [J]. *Appl. Phys.*, 2007, **88**(3): 467~475
- Zhou Pu, Xu Xiaojun, Liu Zejin *et al.*. Propagation of coherently combined laser beam in turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2051~2056  
周 朴, 许晓军, 刘泽金等. 相干合成光束在湍流大气中的传输[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2051~2056

- 11 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun. Tolerance on tilt error for coherent combining of fiber lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 39~42
- 12 Piotr Piatrou, Michael Roggemann. Beaconless stochastic parallel gradient descent laser beam control; numerical experiments[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(27): 6831~6842
- 13 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart. Adaptive phase distortion correction in strong speckle-modulation conditions [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(24): 2155~2157
- 14 Zhou Pu. Study on coherent beam combination technology of fiber lasers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. 24~25  
周 朴, 光纤激光相干合成技术研[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009. 24~25
- 15 J. A. Fleck, J. R. Morris. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere[J]. *Appl. Phys.*, 1976, **10**(2): 129~160
- 16 Robert J. Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 207~211
- 17 Nicolas Roddier. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials [J]. *Opt. Engng.*, 1990, **29** (10): 1174~1180
- 18 L. C. Andrews. *Atmospheric Optics*[M]. Washington: SPIE Press, 2004. 28
- 19 Wang Lijin, Li Qiang, Wei Honggang *et al.*. Numerical simulation and validation of phase screen distorted by atmospheric turbulence[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(3): 1~9  
王立瑾, 李 强, 魏宏刚等. 大气湍流随机相位屏的数值模拟和验证[J]. *光电工程*, 2007, **34**(3): 1~9
- 20 W. A. Coles, J. P. Filice, R. G. Frehlich *et al.*. Simulation of wave propagation in three-dimensional random media[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(12): 2089~2101
- 21 M. C. Roggemann, T. J. Schulz. Algorithm to increase the largest aberration that can be reconstructed from Hartmann sensor measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37** (20): 4321~4329

栏目编辑: 谢 婧