

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2009.03.004

基于 SPGD 算法的激光大气传输湍流效应 校正的初步研究

范玲, 乔春红, 冯晓星, 马慧敏, 范承玉

(中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 随机并行梯度下降算法 (SPGD) 是近年来广泛发展的一种无模型优化控制算法, 它具有速度快、无需信标光等优点, 得以运用于自适应光学系统中。利用相位屏法数值模拟激光大气传输过程, 以 61 单元变形镜为校正器, 采用 SPGD 算法对激光大气传输湍流效应进行了初步校正研究, 研究表明: SPGD 算法可以用在自适应光学系统中用于校正激光大气传输湍流效应引起的畸变, 且不同参数如扰动幅度值、增益系数的选取对校正效果有一定影响, 文中给出了不同传输情况下的仿真计算结果。

关键词: 自适应光学; 随机并行梯度下降算法; 变形镜

中图分类号: TN012

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2009)03-0183-07

Elementary Study on Turbulence Effects Resulted from Laser Propagation in the Atmosphere Based on the Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm

FAN Ling, QIAO Chun-hong, FENG Xiao-xing, MA Hui-min, FAN Cheng-yu

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Stochastic parallel gradient descent (SPGD) is a developing model-free optimum control algorithm in recent years, which is used for adaptive optics system for its advantages of inexpensive cost, beacon-free and so on. Laser propagation through atmosphere is simulated by the method of phase-screens, 61-elements deformable mirror is used as corrector, and the aberration caused by turbulence effects is corrected by SPGD algorithm. The numerical simulation results show that SPGD algorithm can be used in the adaptive optics system to correct the aberration caused by turbulence effects, the different perturbation amplitudes and gain coefficients are very important for the last corrected results, and the numerical simulation results on different propagation conditions are also shown.

收稿日期: 2009-04-14; 修改日期: 2009-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助课题 (10574127); 中科院合肥物质科学研究院物质计算中心资助课题

E-mail: kaka2005521@163.com

Key words: adaptive optics; stochastic parallel gradient descent algorithm; deformable mirror

1 引言

激光在湍流大气中传输, 大气的折射率起伏将导致传输光束发生扩展、漂移等一系列大气湍流效应, 使得激光传输质量严重退化, 对激光的工程应用产生不利影响。激光在湍流大气中传输, 所用到的自适应光学系统^[1-2]追求快速、高效、低成本的实时校正效果, 使得到达目标处的激光能量更集中或者激光通讯中的目标图像信息更清晰。目前该领域致力于发展基于系统性能直接优化的自适应光学系统。近年来相继出现了模拟退火^[3-4]、遗传算法^[5]以及模拟退火与遗传算法的各种结合处理方法。大量的文献报道显示: 对于不同的需求目标来说, 这些算法基本可以在不同的程度上得以实现, 然而都存在一些缺陷和不足。1997年 Vorontsov^[6-7]等人参考随机误差下降算法和并行扰动随机逼近算法 (simultaneous perturbation stochastic approximation, SPSA) 提出随机并行梯度下降 (SPGD)^[8-9]算法, 该算法简单、收敛速度快且适用于解决多变量最优化问题。本文把该算法应用到激光大气传输自适应光学校正系统中, 用于校正大气传输中湍流效应引起的畸变, 并对校正结果进行了初步研究。

2 基于 SPGD 算法的仿真自适应系统架构及工作原理

基于 SPGD 算法的仿真自适应系统如图 1 所示, 由变形镜、CCD、分束镜、SPGD 控制系统等组成。系统变形镜的驱动器布局采用三角形布局, 共 61 单元, 如图 2 所示。变形镜影响函数 $R_n(r)$ 为

$$R_n(r) = R_n(x, y) = \exp \left\{ \ln p \frac{[x - x_c(n)]^2 + [y - y_c(n)]^2}{r_d^2} \right\}, \quad (1)$$

式中, $x_c(n)$ 、 $y_c(n)$ 表示第 n 个驱动器位置坐标, r_d 为驱动器的平均间距, p 为耦合系数, 变形镜的面形函数为

$$u(r) = \sum_{n=1}^{61} u_n R_n(r), \quad (2)$$

其中 u_n 是第 n 个驱动器驱动电压。

基于 SPGD 算法的仿真自适应光学 (adaptive optics, AO) 系统工作原理为: 激光经大气传输, 在目标处附近由分束镜分出的部分光, 被高速 CCD 采集, 利用分析得到的光斑性能的变化量 ΔJ 及

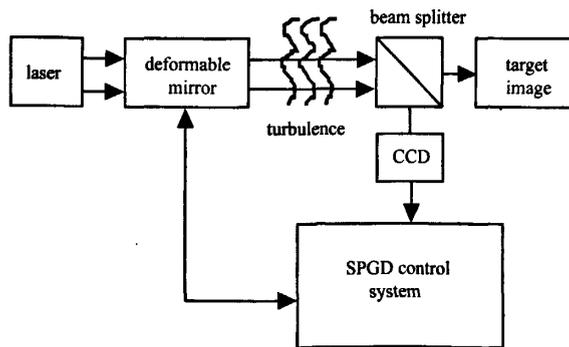


图 1 基于 SPGD 算法的 AO 系统

Fig.1 AO system based on SPGD algorithm

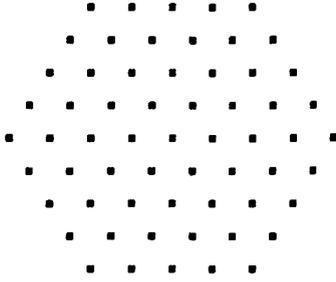


图 2 61 单元变形镜驱动器排布方式

Fig.2 Actuators location of 61-element deformable mirror

随机生成的一组扰动电压向量 Δu , 进行控制参数的梯度估计, 在梯度下降方向上一直进行控制参数的搜索, 得到较优的一组扰动电压值, 这种过程不断迭代进行, 直至生成一组最优的电压向量 $u = \{u_1, u_2, u_i, \dots, u_n\}$, 施加到变形镜上改变变形镜面形, 从而对激光大气传输湍流效应引起的畸变进行校正。当光斑性能变化量 ΔJ 达到一定阈值 (小于一定数值), 可认为对大气湍流校正达到最佳状态。

光斑性能 J 的选取视不同情况而定, 可以选择 Strehl 比 (SR)、像清晰度、散斑场的统计矩等。本文选用的光斑性能 J 是环围能量 SR , 即: 爱里斑半径内光束能量占总能量的比例与其衍射极限之比, 它是描述光束传输到远场 (或焦平面) 的能量集中度的物理量。

远场光斑性能变化量 ΔJ 计算公式为

$$\Delta J^{(k)} = \Delta J_+^{(k)} - \Delta J_-^{(k)}, \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta J_-^{(k)} &= J(u^{(k)} - \Delta u^{(k)}) - J(u^{(k)}), \\ \Delta J_+^{(k)} &= J(u^{(k)} + \Delta u^{(k)}) - J(u^{(k)}). \end{aligned} \quad (4)$$

$J(u) = J\{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}$ 是关于一组电压向量的函数, $\Delta u^{(k)} = \{\Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_i, \dots, \Delta u_n\}^{(k)}$ 为

第 k 次迭代时施加的扰动电压向量, 各 Δu_i 相互独立且同为伯努利分布, 各分量幅值相等

$$|\Delta u_i| = \delta, \Pr(\Delta u_i = \pm\delta) = 0.5. \quad (5)$$

第 $k+1$ 次迭代时, 变形镜上施加的驱动电压向量公式

$$u^{(k+1)} = u^{(k)} + \gamma \Delta u^{(k)} \Delta J^{(k)}, \quad (6)$$

式中, γ 为增益系数, 在实际应用中, 如使目标函数向极大方向优化, γ 取正值; 反之, γ 取负。本文在仿真计算中以施特列耳比极大化为目标, γ 取正值。

3 数值模拟结果与分析

激光大气传输数值计算^[10-11]中传输参数为: 发射口径 0.6 m, 波长 0.6328 μm 的实心平台光束, 聚焦传输 1 km。计算中采用的折射率起伏功率谱为 Von Karman 谱, 湍流内尺度为 0.005 m, 外尺度为 100 m, 传输路径上湍流强度是均匀的。计算网格为 128 \times 128, 网格间距为 0.01 m, 根据非自适应坐标变换, 定标因子取为 3.83, 纵向采样步数为 20。

3.1 扰动幅度值、增益系数的选取研究

在利用基于 SPGD 算法的 AO 系统对湍流畸变进行数值模拟校正的过程中发现, 扰动幅度值、增益系数等参数选取不同, 收敛速度就会不同, 同时校正效果也略有不同, 因此有必要分析讨论当其他传输条件都相同时, 选取不同的扰动幅度值、增益系数对校正效果的影响。

如图 3(a) 给出的是在折射率结构常数 C_n^2 为 $5.0 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 的大气传输条件下, 增益系数 γ 固定为 30, 随机扰动幅度值分别选取 0.15、0.20、0.25、0.30、0.35 五个不同值所对应的 SR 变化曲线对比图。图中每条曲线反映的都是随着迭代步数的变化远场光斑性能 SR 的动态变化过程。由图 3(a) 可以看出, 这五种情况都能把初始光斑性能从 0.52 左右校正到 0.73 左右, 但校正速度明显不同, 为了便于比较, 取 SR 值都收敛到 0.71 的

情况进行讨论,由数值计算数据可以发现,当 SR 值都被校正到 0.71 时这五种不同扰动幅度值所对应的迭代步数分别是 380、202、138、160、355。图 3(b) 给出了更直观的不同的扰动幅度值对应的不同迭代步数的示意图,由图 3(b) 可以看出扰动幅度值 $|\Delta u_i|$ 取 0.25 时所需的迭代步数最

少为 138。因此从图 3(a)、图 3(b) 可以得出,如果扰动幅度值选取的比较合适,经过较少的迭代步数就能获得同样的校正效果。由此可见在利用基于 SPGD 算法的 AO 系统对激光大气传输湍流效应引起的畸变进行校正时合适的扰动幅度值选取对校正效果有一定影响。

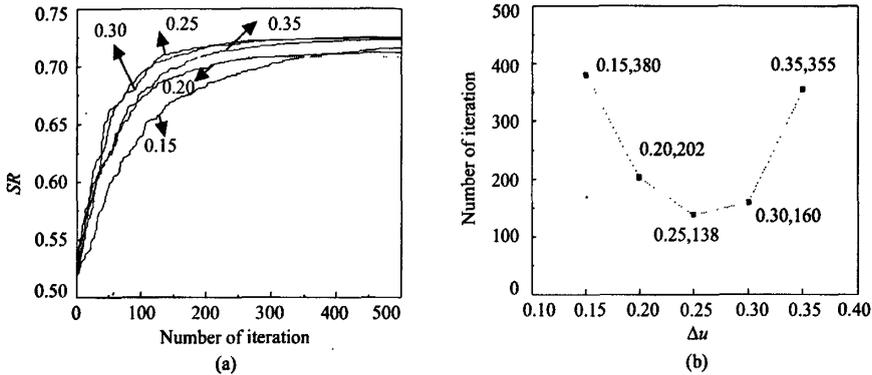


图 3 扰动幅度值不同时的 SR 变化曲线 (a) 及 (b) 不同扰动幅度对应的迭代步数图

Fig.3 Strehl ratio evolution curves (a) and the number of iteration (b) for different perturbation amplitudes

图 4 给出的是在折射率结构常数 C_n^2 为 $2.0 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 的大气传输条件下,随机扰动幅度 Δu 固定在 0.28,增益系数 γ 分别选取 25、30、40、50、65 五个不同值所对应的 SR 变化曲线对比图。图中每条曲线反映的都是随着迭代步数的变化,远场光斑性能 SR 的动态变化过程。从图中五条实曲线均可以看出随着迭代步数的增加, SR 值在逐渐增大,然而对于不同的增益系数, SR 值收敛速度及增长幅度都有所不同,从图中五条曲线的对比可以明显看出增益系数 γ 选取不同对校正影响明显,尤其是当增益系数 γ 选取 25、65 这两种不同值时校正结果对比强烈。选取相对合适值 25~40 时, SR 能从 0.64 校正到 0.80 左右,三条曲线近似重合且校正结果都很理想;当增益系数 γ 选取 50 时, SR 只能从 0.64 校正到 0.75,校正幅度明显下降;而当增益系数 γ 选取 65 时, SR 仅能从 0.64 校正到 0.66 左右,校正幅度非常小,而且在迭代到 150 步左右就开始出

现如图所示的较为严重的抖动现象,说明此时增益系数 γ 的选取已经不再合适。可见在利用基于 SPGD 算法的 AO 系统对激光大气传输湍流效应引起的畸变进行校正时合适的扰动幅度值选取对校正效果也有一定影响。

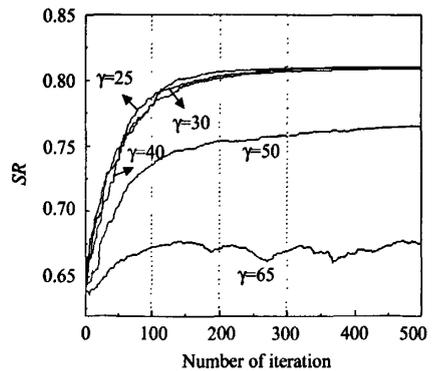


图 4 增益系数不同对应的 SR 变化曲线

Fig.4 Strehl ratio evolution curves for different gain coefficients

3.2 数值模拟计算结果与分析

为了直观的对比, 以下给出了未经过校正的初始远场光斑图像和经过校正远场光斑图像的对比图。图 5 给出的是折射率结构常数 C_n^2 为 $4.18 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 的湍流大气传输情况下校正前后远场光斑图像对比图, 其中图 5 (a) 为未校正远场光斑图像, 图 5 (b) 为校正 500 次后对应的最终光斑图像。由图 5 两幅图的对比可以明显看出校正后远场光斑图像比未校正远场光斑图像能量集中度有明显提高, 这说明校正后光斑性能比初始光斑性能有明显改善。图 6 给出的是折射率结构常数 C_n^2 为 $6.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 的湍流大气传输情况下校正前后远场光斑图像对比图, 其中图 6(a) 为未校正远场光斑图像, 图 6(b) 为校正 500 次后对应的最终光斑图像。由图 6(a)、(b) 的对比也可以看出校正后光斑性能比初始光斑性能有明显改善, 图 5 和图 6 说明对于不同的湍流传输情况, 基于 SPGD 算法的自适应光学系统均能起到很好的校正效果。

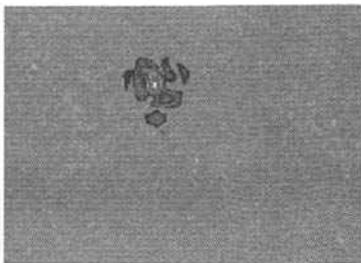
图 7(a) 和图 7(b) 分别对应的是图 5 和图 6 这两种不同湍流传输条件下光斑性能 SR 随迭代步数的变化曲线, 图 7(a) 对应的是 C_n^2 为 $4.18 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 的传输情况下 SR 变化曲线, 图 7(b) 对应的是 C_n^2 为 $6.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 传输情况下的 SR 变化曲线。从图 7(a)、(b) 均可以看出随着迭代步数

的增加, SR 值在逐渐增大, 随着动态校正过程的进行远场光斑性能在逐渐变好, 说明基于 SPGD 算法的自适应系统对激光大气传输中湍流效应引起的畸变有明显的校正效果; 另外, 有文献^[9]表明在运用 SPGD 算法进行自适应校正时校正结果会出现极值收敛情况, 由图 7(a)、(b) 我们也可以得到相同的结论, 即迭代进行一定步数后, SR 开始出现饱和和收敛现象, 进一步的迭代过程中 SR 值增长变化非常小。对于不同的大气湍流情况, SR 值增长幅度也有所不同, 当 C_n^2 为 $4.18 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 光斑性能 SR 从 0.42 可以提升 到 0.65, 当 C_n^2 为 $6.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 光斑性能 SR 可以从 0.34 提升到 0.53。

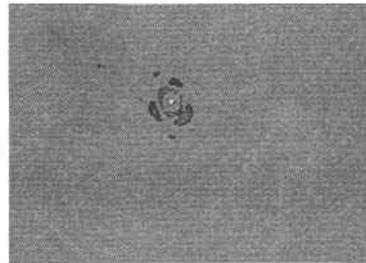
图 5~7 说明用基于 SPGD 算法的自适应光学系统对湍流效应引起的畸变进行校正, 远场光斑图像能量集中度会有明显提高, 校正后远场光斑性能比初始远场光斑性能有明显改善, 即 SPGD 算法可以应用于自适应光学系统中来校正激光大气传输湍流效应引起的畸变, 且校正效果良好。

4 结 论

基于 SPGD 算法的自适应光学系统以 61 单元变形镜为校正器, 对激光大气传输湍流效应引起的畸变进行校正, 并对校正结果进行了初步研究, 研究结果表明: SPGD 算法应用于自适应光



(a)



(b)

图 5 C_n^2 为 $4.18 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 时未经校正 (a) 和经过 SPGD 算法校正后 (b) 的远场光斑图像

Fig.5 Target facula image before (a) and after (b) correction

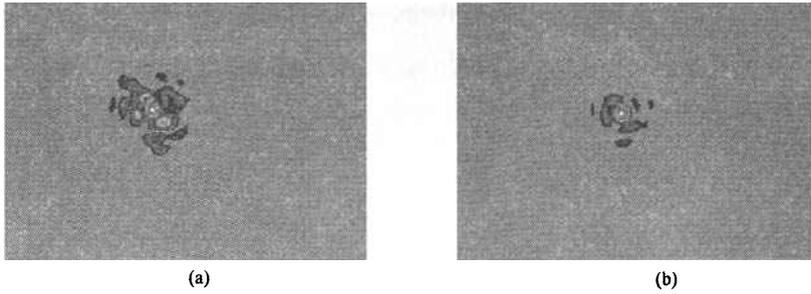


图 6 C_n^2 为 $6.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 时未经校正 (a) 和经过 SPGD 算法校正后 (b) 的远场光斑图像

Fig.6 Target facula image before (a) and after (b) correction

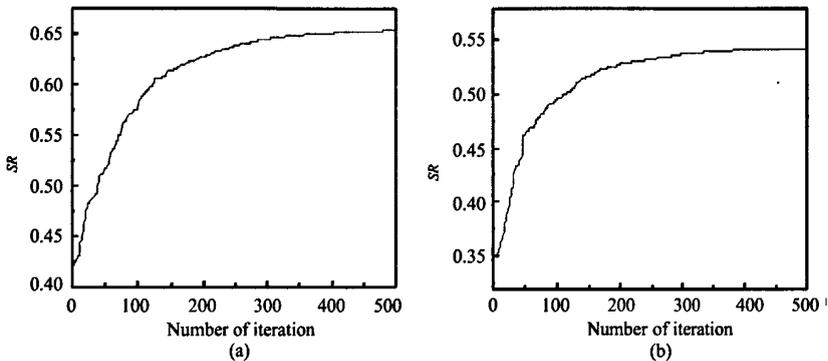


图 7 C_n^2 为 $4.18 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 时 (a) 和 C_n^2 为 $6.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 时 (b) 的 SR 变化曲线

Fig.7 Strehl ratio evolution curves when C_n^2 equals to $4.18 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ (a) and $6.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ (b)

学系统后,对激光大气传输中湍流效应引起的畸变校正效果良好,且当达到一定迭代步数时,反应远场光斑性能的 SR 变化曲线会出现极值收敛现象。另外,当传输条件都相同时,随机扰动幅度值、增益系数选取不同,最终校正效果也有所不同。当扰动幅度值、增益系数的选取比较合适时可以得到更好的校正效果,在利用基于 SPGD 算法的自适应光学系统对激光大气传输湍流效应引起的畸变进行校正时,应尽量选取比较合适的扰动幅度值及增益系数。相对基于信标光的自适应系统来说,本方法具有成本低、结构简单、使用面广等优点。但当该算法运用到外场实验时,需要进行精度很高的硬件系统设计,对系统时序、变形镜、跟踪系统、测量 CCD 等都有很高的要求,需

要专业的总体设计人员及硬件技术人员来实现。

参考文献:

- [1] Tyson R K. *Principle of Adaptive Optics* [M]. San Diego: Academic Press, 1991.
- [2] Zhou Renzhong, Yan Jixiang, Zhao Dazun, et al. *Adaptive Optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996(in Chinese).
周仁忠, 阎吉祥, 赵达尊, 等. 自适应光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [3] Zommer S, Ribak E N, Lipson S G, et al. Simulated annealing in ocular adaptive optics [J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31(7): 1-3.

- [4] El-Agmy R, Bulte H, Greenaway A H, et al. Adaptive beam profile control using a simulated annealing algorithm [J]. *Opt. Exp.*, 2005, 13(16): 6085-6091.
- [5] Mukai R, Wilson K, Vilrotter V. Application of genetic and gradient algorithms to wave-front compensation for the deep-space optical communications receiver [R/OL]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2005. http://tmo.jpl.nasa.gov/progress_report/42-161/161U.pdf.
- [6] Vorontsov M A, Carhart G W. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization [J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(12): 907-909.
- [7] Vorontsov M A, Carhart G W. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration [J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2000, 17(8): 1440-1453.
- [8] Spall J C. Multivariate stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation [J]. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1992, 37(3): 332-341.
- [9] Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(8): 1355-1360(in Chinese).
杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法仿真与分析 [J]. *光学学报*, 2007, 27(8): 1355-1360(in Chinese).
- [10] Wang Yingjian. Some study on the laser propagation in the atmosphere and its phase compensation [D]. Hefei: Doctorial Dissertation of Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1996(in Chinese).
王英俭. 激光大气传输及其相位补偿的若干问题探讨 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士论文, 1996.
- [11] Huang Yinbo, Wang Yingjian. Choosing computing parameters in the numerical simulation of laser propagation effects [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(1): 23-27 (in Chinese).
黄印博, 王英俭. 激光大气传输数值模拟中对计算参量的选取 [J]. *大气与环境光报*, 2007, 2(1): 23-27.

作者简介: 范玲 (1983-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光大气传输及其自适应光学校正研究.