文章编号: 0253-2239(2008)04-0613-06

随机并行梯度下降光束净化实验研究

梁永辉 王三宏 龙学军 于起峰

(国防科学技术大学光电科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要 利用自适应光学技术进行光束净化是高能激光系统中一项重要的研究内容。为实现光束净化系统的小型 化和低成本,基于系统性能评价函数无模型最优化的波前畸变校正方法是适合的技术方案。就随机并行梯度下降 (SPGD)最优化算法在光束净化系统中的应用展开研究。针对高能激光束常见的像差分布进行了 SPGD 波前校正 的数值模拟,在此基础上构建了 37 单元自适应光学光束净化实验平台,讨论了双边扰动梯度估计和迭代增益系数 自适应变化对算法收敛特性的影响。数值模拟与实验结果验证了 SPGD 算法对不同程度波前畸变的校正能力,表 明了 SPGD 光束净化方案的可行性。

关键词 自适应光学;光束净化;随机并行梯度下降;系统性能评价函数;无模型最优化;数值模拟 中图分类号 TP273.2 **文献标识码** A

Experimental Explorations of the Laser Beam Cleanup System Based on Stochastic Parallel-Gradient-Descent Algorithm

Liang Yonghui Wang Sanhong Long Xuejun Yu Qifeng

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

Abstract: Realizing beam cleanup using adaptive optics technique is an important research field of the high energy laser systems. To arrive at the aim of miniaturizing and low cost of the beam cleanup system, the method of wavefront distortion correction based on model-free optimization of the system performance metric is an appropriate scheme. This paper researches the application of the stochastic parallel gradient descent (SPGD) optimization algorithm on the beam cleanup system. Numerical simulations of the SPGD wavefront correction of phase aberrations commonly found in high energy laser beams were first carried out. Above this, an experimental 37-element adaptive optics beam cleanup system was set up and the influences of the two-sided perturbation method and the adaptive change of the iterative gain coefficient were studied on the convergence performance of the algorithm. The results of the numerical simulation and experiments verify the ability of the SPGD wavefront control method to correct different strengths of wavefront distortions and indicate the feasibility of the SPGD beam cleanup method.

Key words adaptive optics; beam cleanup; stochastic parallel gradient descent; system performance metric; modelfree optimization; numerical simulation

1 引 言

在高能激光系统中,激光介质折射率分布的不 均匀性、激光谐振腔的失调以及由于加工精度受限 和光能吸收后的热变性所引起的谐振腔中各光学器 件的面形误差等因素都会导致激光器输出光束的波 面发生畸变,从而大大降低光束质量。因此,必须采 取光束净化措施校正激光器出射光束的波前畸变以 提高光束质量,这是自适应光学技术的重要应用之一。光束净化分为激光腔内光束净化和激光腔外光 束净化两种方案。除了采用基于波前测量和波前重 构算法的波前畸变校正技术之外,两种方案均可采 用基于系统性能评价函数直接最优化的波前畸变校 正策略^[1]。该方法不使用波前传感器,而是根据入 射光波的远场光强分布定义一个标量的系统性能评

收稿日期: 2007-06-27; 收到修改稿日期: 2007-09-24

作者简介:梁永辉(1972一)女,副教授,博士,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: yonghuiliang@sina.com

价函数,通过利用迭代算法控制变形镜的校正电压 循环递进来实现评价函数的最优化,达到间接校正 波前畸变的目的。

从系统结构的紧凑性和算法实现的简便性上来 说,最优化自适应光学系统更适合在光束净化上应 用,特别是对于腔内净化来讲。不过传统的最优化 方法收敛速度慢,限制了系统工作的实时性^[3]。 1997年美国陆军实验室首次将随机并行梯度下降 (SPGD)算法引入最优化自适应光学成像系统的波 前控制^[4],大大提高了系统的收敛速度。目前他们 将该技术应用于自由空间激光通信实验系统的实时 波前畸变校正,得到了很好的校正效果^[5~10]。本文 提出了将 SPGD 波前控制算法应用于高能激光器 光束净化系统的思想,并针对这一问题进行了数值 模拟和实验研究,验证了方法的可行性和算法的有 效性。

2 基于 SPGD 波前控制算法的光束 净化系统方案

定义系统性能(光束质量)评价函数 J 是施加在 变形镜所有驱动器上的控制电压信号的函数,即: $J = J(\mathbf{u}) = J(u_1, u_2, \dots, u_N), N$ 是校正单元数。 SPGD 算法采用并行随机扰动方案对 J 的梯度分量 进行估计并完成算法迭代,即每次迭代过程中,先对 所有的控制变量同时施加统计独立的随机扰动{ δu_i } ($j=1,\dots,N$),然后利用扰动前后 J 的变化量

$$\delta J = J(u_1 + \delta u_1, \cdots, u_j + \delta u_j, \cdots, u_N + \delta u_N) - J(u_1, \cdots, u_j, \cdots, u_N),$$

与单个扰动电压的乘积 $\delta J \delta u_j$ 作为梯度分量 $\partial J / \partial u_j$ 的随机近似,代入梯度下降算法的一般公式就得到 SPGD 算法的基本迭代公式

$$u_{j}^{(n+1)} = u_{j}^{(n)} - \gamma \delta J^{(n)} \delta u_{j}^{(n)}, \qquad (1)$$

$$i = 1, \cdots, N$$

其中 γ 为迭代增益系数, $\gamma > 0$ 对应于函数最小化, $\gamma < 0$ 对应于函数最大化。

利用 SPGD 波前控制算法实现高能激光器腔外 光束净化的系统结构示意图如图 1 所示。为简单起 见,图中未包含光束的稳定控制回路。激光器的出射 光束经变形镜反射后,一部分由分束镜采样并经透镜 聚焦到远场。远场探测器探测采样光束在透镜焦平 面上的光强分布,探测结果用来计算光束质量评价函 数的大小。所得评价函数值输入 SPGD 波前控制器 完成梯度估计和变形镜控制电压的更新。





3 数值模拟结果及分析

本文首先根据高能激光器出射光束的常见像差 分布进行了 SPGD 波前校正的数值模拟。

3.1 模拟条件

入射激光束采用归一化半径,其横截面为圆环 形,遮拦比为1:5,外圆直径设为2,内圆直径为0.4。 光束的计算采样点阵列取为64×64。激光束的初始 波前相位由前10阶圆泽尼克(Zernike)多项式表示:

$$\varphi(\rho,\theta) = \sum_{i=1}^{10} a_i \cdot Z_i(\rho,\theta),$$

其中

波前畸变的校正用 44 单元变形镜完成。变形 镜的驱动器分布与光束横截面的位置关系如图 2 所 示,图上的圆点表示驱动器位置。变形镜每个驱动 器的影响函数取如下形式:



图 2 44 单元变形镜与光束横截面的位置关系 Fig. 2 Schematic relative position between the cross section of the laser beam and the deformable mirror

其中(x_j , y_j)为第 *j* 个驱动器的位置坐标,d = 1/3为驱动器间距, $\omega = 0.08$ 为驱动器交连值。上式表示施加 5 V 电压引起的驱动器中心位置的校正量为 2π 。

根据图 1 中采样光束的传输路径,按带像差的 光学传递函数的标准方法对光束聚焦过程进行计 算,并以聚焦光斑的斯特列尔比(SR)作为光束质量 评价函数 J。SPGD 波前控制算法中各控制通道的 随机扰动电压{ δu_i }($j = 1, \dots, N$)采用具有伯努利 分布的随机变量形式,即各通道的扰动电压幅度相 等 $|\delta u_j| = \sigma = 0.25$ V,每个通道扰动电压取正负号 的概率各为 50%。迭代增益系数 γ 取为具有随系 统状态自适应变化的形式 $\gamma^{(n)} = \gamma_0 / [c+J^{(n)}], \gamma_0 =$ 12, c=0.001。在梯度分量的估计上,采用的是与基 本算法不同的双边扰动估计,即先对变形镜施加一 次扰动,测得扰动后的评价函数值 J_+ ,再将所有扰 动电压反号并测量负向扰动之后的评价函数值 J_- , 然后令 $\delta J = J_+ - J_-$ 代入迭代(1)式。

3.2 结果及分析

图 3 给出了 100 次校正实验的数值模拟结果, 其中每次校正实验中算法的迭代步数都取为 500 步。图 3(a)是 100 次校正实验 J 值的平均收敛曲 线,图 3(b)是 J 值的归一化标准差随迭代步数的变 化曲线。



图 3 100 次波前校正实验的数值模拟结果

Fig. 3 Numerical simulation results of 100 wavefront correction experiments

以J值上升到稳态值(500步迭代后的取值)的 80%所需的迭代步数来衡量算法的收敛速度。可以 看到,在现有像差条件下,算法的平均收敛速度为74 步,最大标准差为3%。图3(b)中的插图从左到右分 别为校正前后光波的相位分布和远场光斑的光强分 布。相位分布的均方根误差由校正前的0.341 rad 降 到了校正后的0.005 rad,光束的SR 由校正前的 0.719提高到了校正后的0.993。数值模拟结果表 明,SPGD 波前控制算法从收敛速度、算法稳定性和 校正效果方面对光束波前畸变的校正都具有很好的 应用前景。

4 光束净化实验

4.1 实验装置

本文对一套包含哈特曼一夏克波前传感器的 37 单元自适应光学系统进行了改造,构建了基于 SPGD 波前控制算法的光束净化模拟实验系统,系 统结构如图 4 所示。



图 4 37 单元光束净化模拟实验系统结构示意图 Fig. 4 Schematic for 37-electrode beam cleanup analog experimental system

He-Ne激光经扩束之后入射到口径为 100 mm 的 37 单元连续面形压电陶瓷变形镜上,经变形镜反 射后由透镜 L聚焦。CCD1 相机用来探测经分束镜 反射的激光束在透镜焦平面上的光强分布,所得图 像输入给在 PC 机上实现的 SPGD 波前控制器用来 计算系统性能(光束质量)评价函数。波前控制器输 出的数字电压经控制电压传输变换通道转换成高压 模拟信号施加到变形镜的驱动器上。CCD2 相机用 来探测经分束镜透射的聚焦光斑,所得图像输入给 另一台计算机作为实时显示。相机 CCD1 和 CCD2 的工作帧频分别为 25 frame/s 和 15 frame/s。

4.2 光束质量评价函数的选取

文献[1]中根据成像面上的光强分布定义了多种像清晰化函数,此处的实验取其中的

$$S_{3} = \left| M(x,y)I(x,y) dx dy \right|,$$

作为光束质量评价函数,式中I(x,y)为成像面上的 光强分布,M(x,y)为定义在成像面上的模板函数。 在前面的数值模拟实验中,M(x,y)取为峰值光强 处的点函数 $M(x_0,y_0)$,但在实际的实验中,单点的 光强取值易受周围环境和光电探测器件噪声的影响 而出现过快的起伏,这会影响算法的收敛速度。故此 处实验中取 S_3 为峰值光强点周围一个小区域内的 光强和,其归一化数字表示式可写为

$$S_{3} = \sum_{i,j \in \delta(r_{
m max},20)} I_{i,j} / ig(\sum_{i=1}^{640} \sum_{j=1}^{480} I_{i,j} ig) ig)$$

其中 $\delta(\mathbf{r}_{max}, 20)$ 表示以图像的最大光强像素点为中心,20 pixel为半径的圆形区域。为了消除相机暗电流噪声的影响,令

$$I_{i,j} = egin{cases} I_{i,j}^{_0}, & I_{i,j}^{_0} > 1 \ 0, & I_{i,j}^{_0} \leqslant 1 \end{cases}$$

其中 *I*^{*i*}_{*i*,*j*} 为 CCD1 像面上第 *i* 列第 *j* 行像素上的光强灰度值。

4.3 实验方法

实验中激光光束的像差是由变形镜自身引入 的。每次校正实验一开始,波前控制器先对变形镜 输出一组随机控制电压以产生随机波前畸变,之后 再利用 SPGD 算法对控制电压进行循环更新以逐步消除这一初始畸变,直至完成规定的迭代次数。

取变形镜的随机自像差产生电压{ V_j }(j=1,...,N)在[$-\sigma_0,\sigma_0$]内满足均匀分布, σ_0 >0 是随机控制电 压的最大取值。闭环系统开始工作时,{ V_j }(j=1, ...,N)就是迭代算法中各控制电压的初始值。已知 变形镜的平均校正量程为±3 μ m/±450 V,变形镜 高压驱动器的放大倍数为 100。要实现 1 个波长的 最大波前变化,施加到高压放大器上的控制电压最 大幅度为

$$\sigma_0 = \frac{1 \times 0.6328}{3} \times \frac{450}{100} \approx 0.95 \text{ V}.$$

为方便起见,以下关于驱动电压的叙述均指高压放 大器的输入电压。

与数值模拟过程类似,实验中各控制通道的随机扰动电压{ ∂u_i }($j=1,\dots,N$)的取值满足伯努利分布。

4.4 实验结果及分析

兼顾算法的收敛速度和稳定性,实验中取各通 道的随机扰动电压幅度 $\sigma=0.03$ V。

图 5 和图 6 给出了三组不同初始波前畸变下的 实验结果,三组实验分别对应于自像差产生电压参 数 $\sigma_0 = 0$ V,0.3 V 和 0.5 V 的情况,其中迭代增益 系数 γ 取自适应变化表达式 $\gamma = 9/(0.01+J)$ 。图 5 (a)给出的是不同像差条件下 10 次实验 J 值的平均 收敛曲线,图 5(b)是对应条件下 J 值的归一化标准 差变化曲线。图 6(a)~图 6(c)分别给出的是三种 像差条件下某一次校正实验前后在透镜焦平面上的 归一化二维光强分布,其中的插图是 CCD 相机输出 的原始图像。



图 5 时的 J 值收敛曲线 Fig. 5 Evolution curves of J for $\sigma_0 = 0$ V, 0.3 V and 0.5 V



图 6 $\sigma_0 = 0$ V, 0.3 V and 0.5 V 时单次校正前后聚焦光束的光强分布

Fig. 6 Intensity distributions of the focused laser beams before and after being corrected in single experiments respectively for $\sigma_0 = 0$ V, 0.3 V and 0.5 V

度为 579 步,比前两者都要快。这是由于此时系统

更容易收敛到评价函数的局部极值,导致最终收敛

下,分别进行的固定增益系数和增益系数随系统状

态自适应变化的校正实验结果。固定增益系数实验

取 $\gamma=15$,增益系数自适应变化实验仍取 γ 的表达

图 7 给出了在自像差产生电压取为 0V 的条件

状态较差,但达到这一状态的用时反而更少。

由实验结果可以看到, SPGD 波前控制算法对 不同程度的波前畸变都具有较好的校正效果。其中 畸变越严重,系统的最终收敛状态越差,收敛过程的 离散性也越大。但在实验的三种像差条件下系统的 收敛速度差异并不太大,甚至出现了一些"异常"。 图 5(a)中 $\sigma_0 = 0$ V 和 0.3 V 时系统的平均收敛速度 分别为 590 步和 808 步,但 $\sigma_0 = 0.5$ V 时的收敛速



图 7 固定 γ 和 γ 自适应变化条件下的 J 值收敛曲线及 J 值的方差变化曲线 Fig. 7 Metric evolution and normalized standard deviation curves for fixed and adaptive γ's 式为γ=9/(0.01+J)。图7(a)中三条J值收敛曲 线分别对应于双边扰动增益自适应变化、双边扰动 增益固定和单边扰动增益自适应变化三种实验过 程,每条曲线都是10次实验结果的平均。图7(b) 中给出的是不同实验条件下10次实验中J值的归 一化标准差变化曲线。可以看到,双边扰动情况下 增益系数的自适应变化对算法的收敛速度提高了 27%。同时,收敛过程的离散性和最终收敛状态都 有改善。另外,对比双边扰动自适应和单边扰动自 适应的结果可以看到,双边扰动对算法的收敛速度 提升了约50%,对收敛过程的离散性和收敛稳态的 提高都有明显的改善,这说明采用双边扰动或是更 精确的梯度估计方法是提高算法性能的关键。

需要说明的是,以上实验中系统的收敛速度较 慢,一般在 600~800 步之间。这主要是由于实验中 所校正的并不是真正意义上的静态误差,而系统的 硬件响应速度太慢造成的。一方面变形镜在工作过 程中会发生失锁,使光斑质量突然变差。另一方面, 实验室附近的建筑施工给实验带来了较大的震动干 扰。这些因素都导致了在实验过程中光束质量评价 函数的取值发生突变。而实验系统完成一次双边扰 动循环至少需要 216 ms 的时间,响应速度跟不上评 价函数的动态变化,这在实验初期曾一度导致算法 不能收敛。后经对 δJ 的测量值加以限制才使实验 得以顺利完成。相信随着实验条件的改善,与数值 模拟结果相接近的算法收敛速度是可以实现的。

5 结 论

本文将 SPGD 波前控制算法引入光束净化问题,针对高能激光束常见的像差分布进行了 SPGD 波前校正的数值模拟,构建了 37 单元自适应光学腔

外光束净化模拟实验系统,验证了 SPGD 波前控制 方法的有效性,讨论了梯度估计实现方法和迭代增 益系数对算法收敛特性的影响。本文的工作为该技 术在实际光束净化系统中的应用奠定了基础。

参考文献

- 1 Su Yi. Physics problems in high energy laser system [J]. *Physics*, 2005, **34**(8): 583~588
- 苏 毅. 高能激光系统中的物理问题[J]. 物理,2005,34(8): 583~588
- 2 R. A. Muller, A. Buffington. Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening[J]. J. Opt. Soc. Am., 1974, 64(9): 1200~1210
- 3 A. Buffington, F. S. Crawford, R. A. Muller *et al.*. Correction of atmospheric distribution with an image-sharpening telescope [J]. J. Opt. Soc. Am., 1977, 67(3): 298~303
- 4 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart, J. C. Ricklin. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(10): 907~909
- 5 M. A. Vorontsov, V. P. Sivokon. Stochastic parallel-gradientdescent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1998, 15(10): 2745~2758
- 6 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart, M. Cohen *et al.*. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2000, 17(8): 1440~1453
- 7 T. Weyrauch, M. A. Vorontsov, T. G. Bifano *et al.*. Microscale adaptive optics: wavefront control with a μ-mirror array and a VLSI stochastic gradient descent controller [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(24): 4243~4253
- 8 Thomas Weyrauch, Mikhail A. Vorontsov. Atmospheric compensation with a speckle beacon in strong scintillation conditions: directed energy and laser communication applications [J]. Appl. Opt., 2005, 44(30): 6388~6401
- 9 Mikhail Vorontsov, Gary Carhart, Matt Banta et al.. Atmospheric laser optics testbed (A LOT): atmospheric propagation characterization, beam control, and imaging results [C]. Proc. SPIE, 2003, 5162: 37~48
- 10 Thomas Weyrauch, Mikhail A. Vorontsov. Free-space laser communications with adaptive optics: atmospheric compensation experiments[J]. J. Opt. Fiber Commun. Rep., 2004, 1: 355~ 379