

文章编号: 0258-7025(2009)05-1091-06

基于随机并行梯度下降算法的多级波前校正技术

王三宏 梁永辉 龙学军 于起峰 谢文科

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 为提高基于随机并行梯度下降(SPGD)算法的高分辨率自适应光学(AO)系统的有效校正带宽,提出了分级SPGD波前校正的方法。在每一级SPGD波前校正中,将高分辨率波前校正器的控制单元按位置分成多组,每一组都施加相同的控制电压作为一个控制变量。采用的校正级越高,独立的控制变量的数目也越多。多级SPGD自适应光学系统按从低到高的等级顺序对畸变波前进行校正。以一个具有 16×16 控制单元的分立活塞式波前校正器为基础建立了基于3级SPGD波前校正的自适应光学系统的数值模型,并针对大气湍流引起的某一帧随机相位屏做了模拟校正实验。结果表明采用分级波前校正后收敛速度提高了23%,此方法确实提高了基于随机并行梯度下降算法的自适应光学系统的有效校正带宽。

关键词 自适应光学; 随机并行梯度下降算法; 多级波前校正; 高分辨率波前校正器; 有效校正带宽

中图分类号 TP273.2 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093605.1091

Multilevel Wavefront Correction Technique Based on Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm

Wang Sanhong Liang Yonghui Long Xuejun Yu Qifeng Xie Wenke

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

Abstract A multilevel wavefront correction technique is proposed to improve the effective correction bandwidth of a high-resolution adaptive optics system based on stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm. At every level of wavefront correction based on SPGD, the control elements of the high-resolution wavefront corrector are subdivided into many clusters according to their locations. The control elements in each cluster are driven by the same control voltage which is treated as a control variable in SPGD algorithm. The higher the correction level is, the bigger the number of independent control variables is. The multilevel SPGD adaptive optics system corrects the distorted wavefront in the sequence from low level to high level. The numerical model of a 3-level SPGD adaptive optics system with a pixelated piston-type wavefront corrector having 16×16 control elements was built, and the simulation correction experiments for a certain stochastic phase screen introduced by atmospheric turbulence were performed on the system. The numerical simulation results demonstrate that the convergence rate of multilevel SPGD wavefront correction is increased by 23% than that of conventional SPGD wavefront correction. It indicates that the multilevel wavefront correction technique can indeed improve the effective correction bandwidth of adaptive optics system based on SPGD algorithm.

Key words adaptive optics; stochastic parallel gradient descent algorithm; multilevel wavefront correction; high-resolution wavefront corrector; effective correction bandwidth

1 引 言

控制单元数目高达数百甚至数百万的波前校正

器(如:液晶空间光调制器及微电子机械系统(MEMS)变形镜)的出现正促使自适应光学(AO)

收稿日期: 2008-10-27; 收到修改稿日期: 2009-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(60708029)资助项目。

作者简介: 王三宏(1977—),男,博士研究生,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: sanhongwang@gmail.com

导师简介: 于起峰(1958—),男,博士,教授,主要从事光测图像处理与自适应光学技术方面的研究。

E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

系统从低分辨率向高分辨率升级。但是对基于相位共轭原理的传统自适应光学系统来说,波前传感器进行数据处理所需要的时间随着控制单元数目的平方而增加^[1],造成从开始测量相位到计算出波前校正器控制信号之间的延时较长,因此实时性成为这种自适应光学系统向高分辨率扩展的难以克服的困难。而随着遗传算法^[2]以及随机并行梯度下降(SPGD)算法的引入,基于系统性能评价函数优化的自适应光学研究则取得了较大的进展,特别是基于SPGD算法的自适应光学系统显示了很好的应用前景^[3~12]。但是这种SPGD AO系统由于其控制算法的迭代本质,依然面临向高分辨率升级时有效校正带宽不足的问题。不过,SPGD AO系统所具有的诸多优点仍然激发人们寻求新的方法来改进标准的SPGD AO流程以提高系统的带宽^[13, 14]。全局耦合法^[13]通过同步控制一个低分辨率的模式变形镜与一个高分辨率的波前校正器来提高系统的收敛速度,但是这种方法存在一个缺点,两个波前校正器之间存在的耦合也会导致彼此干扰。为避免波前校正器之间的干扰,本文提出一种新的分级校正的方法以进一步提高系统的有效校正带宽。

2 标准 SPGD AO 系统

为了方便讨论,只针对接收系统进行研究。一束平面光波经过湍流大气之后被成像透镜接收并成像在 CCD 上,根据 CCD 图像提取随波前畸变程度单调递变的标量性能评价函数,然后采用 SPGD 最优化算法控制波前校正器对畸变波前的相位进行补偿以优化系统性能评价函数,使其达到唯一极值,从而消除系统中的波前畸变。系统结构示意图如图 1 所示。

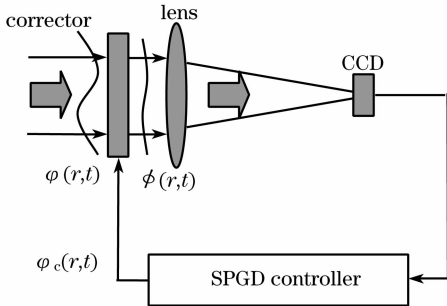


图 1 SPGD AO 接收系统示意图

Fig. 1 Schematic of SPGD AO receiver system

选取系统性能评价函数 J 为 Strehl 比: $J = I_{\max} / I_{0, \max}$, 其中 $I_{0, \max}$ 为无波前畸变时远场光斑的衍射极限峰值强度, I_{\max} 为存在波前畸变时远场光斑

的实际峰值强度。在 t 时刻, J 为残余相位的函数: $J(t) = J[\phi(r, t)]$, 残余相位 $\phi(r, t) = \varphi(r, t) + \varphi_c(r, t)$, 其中 $\varphi(r, t)$ 为畸变波前的相位, 而 $\varphi_c(r, t)$ 为波前校正器产生的补偿相位。 N 单元波前校正器产生的补偿相位可以表示为: $\varphi_c(r, t) = \sum_{j=1}^N u_j(t) S_j(r)$, 其中 $S_j(r)$ 为第 j 个校正单元的影响函数, $u_j(t)$ 为加在该单元上的控制电压。根据“冻结湍流”假说, 动态变化的畸变相位之间存在时间相关性, 只要在足够短的时间 T 内 ($T < 1/f_G$, f_G 为 Greenwood 频率), 畸变相位随时间的变化可以忽略^[15], 从而可将 J 仅表示为波前校正器控制电压 $u = (u_1, u_2, \dots, u_N)$ 的函数 $J = J(u)$ 。

对于一个固定分布的畸变波前的相位 $\varphi(r)$, 按照 SPGD 算法流程, 在每次迭代过程中, 先对所有控制变量同时施加统计独立的随机扰动 $\delta u = (\delta u_1, \delta u_2, \dots, \delta u_N)$, 然后再施加反向的扰动 $-\delta u = (-\delta u_1, -\delta u_2, \dots, -\delta u_N)$, 利用两次扰动后 J 的变化量 $\delta J = J(u + \delta u) - J(u - \delta u)$ 可以得到 J 关于各分量的梯度的随机估计 $\delta J \delta u$ 。将其代入梯度下降算法的迭代公式即可得到 SPGD 算法的基本迭代公式

$$u^{(n+1)} = u^{(n)} + \gamma \delta J^{(n)} \delta u^{(n)}, (n = 0, 1, \dots), \quad (1)$$

其中 γ 为迭代增益系数, 上标 n 表示迭代步数。当经过多步迭代后, J 趋于极值。

显然, 只要在小于 T 的时间内, 针对固定的波前畸变采用 SPGD 算法控制波前校正器使 J 迅速趋于最大值, 则该方法也可以用于校正大气湍流产生的动态波前畸变。因此, 针对固定的波前畸变, 研究能使 J 更快速地收敛的方法是提高 SPGD AO 系统有效校正带宽的关键。

3 分级 SPGD 波前校正

3.1 波前畸变的空域及时域特性

对于光波在大气中传播的研究, 常采用科尔莫戈罗夫(Kolmogorov)大气湍流模型。在惯性子区, 畸变相位的空域功率谱可以表示为

$$\Phi(\kappa) = (0.023/r_0^{5/3}) \kappa^{-11/3}, \quad (2)$$

其中 κ 为空间频率, r_0 为弗里德(Fried)常数。显然, 空间频率越高, 该频率成分在畸变相位中所占的比例越小, 空间频率越低, 该频率成分在畸变相位中所占的比例则越大。这说明在大空间尺度区域上的相位起伏大, 在小空间尺度区域上的相位起伏小。

而畸变相位的时域功率谱则服从指数定律, 图

2 引自 Greenwood 关于波前补偿系统时间带宽讨论的经典文献[16]。图中纵坐标为归一化的时间功率谱： $H_\varphi(x) = F_\varphi(f) 0.481 f_0 (r_0/D)^{5/3}$ ，横坐标为归一化的时间频率 $x = f/f_0$ ，其中 $F_\varphi(f)$ 是直径为 d 的子孔径内波前畸变的平均相位的时间功率谱， f 为时间频率， $f_0 = v/(\pi D)$ ， v 为风速， D 为波前校正器直径(如图 1 所示，也是成像透镜直径)。该文献还指出：随着子孔径的尺度越大，在高频处其时间功率谱曲线向下偏折越厉害。也就是说，如果用子孔径尺度较大的波前校正器去补偿畸变相位，则所需要的时间带宽可以比用子孔径尺度较小的波前校正器所需要的时间带宽降低。

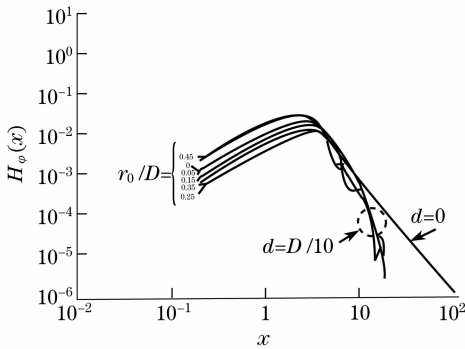


图 2 整体倾斜去除后子孔径内平均相位的归一化时间功率谱

Fig. 2 Normalized temporal power spectra of phase averaged in a subaperture for overall tilt removed

综合上述畸变波前相位的空域及时域特点，可以得到结论：空间上大尺度区域内的波前相位畸变较大，但是其平均相位变化慢；小尺度区域内的波前相位畸变较小，但是其平均相位变化快。

3.2 分级波前校正

鉴于波前畸变的空域及时域特点，若能更迅速地补偿大相位畸变，则会提高 J 的收敛速度。利用 SPGD 算法的收敛速度随控制变量数目的平方根递减的特性^[17]，可以先用控制单元数较少而子孔径尺度较大的波前校正器快速校正大相位畸变，然后再换用分辨率更高的波前校正器校正残余的小相位畸变，此即分级波前校正的思想。

对于固定的波前畸变，首先用 SPGD 算法控制子孔径尺度为 d_1 的波前校正器去补偿，理论上， J 将收敛到唯一极值。此时每个校正单元上残余相位畸变的方差^[16](去除整体平移及整体倾斜之后)为

$$\sigma^2 = 0.14(d/r_0)^{5/3}, \quad (3)$$

其中子孔径直径 $d = d_1$ 。若其校正效果尚不能满足对相位残差的要求，则换用子孔径尺度为 d_2 ($d_2 < d_1$)

的波前校正器继续进行补偿，如此逐级增大波前校正器的分辨率直到满足对相位残差的要求。根据斯垂耳(Strehl)比与残余相位方差之间存在的近似关系： $J \approx e^{-\sigma^2}$ (在畸变相位的均方根残差小于 2 rad 时成立)^[18]，可以设置阈值

$$J_i = \alpha_i e^{-0.14(d_i/r_0)^{5/3}}, \quad (4)$$

其中 α_i 为调节参数， $0 < \alpha_i \leq 1$ ，下标 i 表示等级次序。校正过程中通过判断 J 值与各级阈值 J_i 的大小关系以决定采用何种分辨率的波前校正器。

但是对任何实际的 SPGD AO 系统总是存在很多局部极值，因此 J 并非总是收敛到唯一极值，而且根据初始畸变相位的不同， J 的收敛极值可能差别较大。显然，直接按照(4)式设置阈值将不可行。注意到在波前校正过程中可以通过 J 随时间演化曲线的斜率变化来判断 J 的收敛情况，因此可以通过如下方法来确定阈值。连续记录 $M+1$ 步迭代过程中的 J 值 ($J^{(n-M)}, J^{(n-M+2)}, \dots, J^{(n)}$)，令

$$K(n) = (J^{(n)} - J^{(n-M)})/M, \quad (5)$$

表示第 n 步迭代处 J 随时间演化曲线的斜率。使用不同分辨率的波前校正器补偿同一波前畸变，然后在相同湍流强度下变换待补偿波前畸变进行多次实验，得到各自分辨率情况下 J 值的平均演化曲线所对应的斜率曲线，各分辨率条件下斜率曲线的交点即可作为相邻两级之间的分界点。如此确定分界点的原因在于，不同分辨率的波前校正器在初始校正阶段的收敛速度不一样：分辨率低的收敛比较快，其斜率相应要大一些；分辨率高的收敛比较慢，其斜率也相应要小一些。当两条斜率曲线相交时意味着两者的收敛速度已经相同。根据这一关系，可以事先通过实验测得在某大气湍流强度下各分界点所对应的斜率值 $\{K_1, K_2, \dots\}$ 。在校正该大气湍流强度下波前畸变的过程中，当斜率到达各分界点时，记录下各自对应的 J 值即可作为本次校正的分级阈值 $\{J_1, J_2, \dots\}$ 。

3.3 实例

为了更清楚地说明分级波前校正的具体过程，考虑到高分辨率波前校正器的校正单元大多属于分立式，且以活塞型运动为主，因此针对活塞型波前校正器给出一个分级波前校正的例子。

考虑一个二维分布的 $N = 16 \times 16$ 单元的波前校正器，每个单元所对应的光学子孔径都是边长为 a 的正方形。影响函数 $\{S_j(r)\}$ 为中心在 r_j 点处的步进函数 $S_j(r) = S(r - r_j)$ ，其中

$$S(r) = \begin{cases} 1, & |x| < a/2, |y| < a/2 \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (6)$$

将此波前校正器光学表面分成 $N_1 = 8 \times 8$ 个子区域,对每个子区域内的所有 2×2 个控制单元都施加相同的控制电压,则此 $N = 16 \times 16$ 单元的波前校正器相当于一个具有 $N_1 = 8 \times 8$ 校正单元的波前校正器。新波前校正器的每个校正单元的光学子区域是边长为 $2a$ 的正方形,影响函数 $\{S'_j(r)\}$ 为中心在 r'_j 点处的步进函数 $S'_j(r) = S'(r - r'_j)$, 其中

$$S'(r) = \begin{cases} 1, & |x| < a, |y| < a \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (7)$$

不仅是按正方形划分,还可以将 $N = 16 \times 16$ 单元的波前校正器的光学表面分成 $N_2 = 8 \times 16$ 个子区域,每个子区域是 $2a \times a$ 的矩形,影响函数 $\{S''_j(r)\}$ 相应变为中心在 r''_j 点处的步进函数 $S''_j(r) = S''(r - r''_j)$, 其中

$$S''(r) = \begin{cases} 1, & |x| < a, |y| < a/2 \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (8)$$

对固定分布的畸变相位 $\varphi(r)$, 首先将 N_1 单元波前校正器的控制电压 $u' = (u'_1, u'_2, \dots, u'_{N_1})$ 作为控制变量,按照 SPGD 算法流程执行校正。随着 J 的升高,按(5)式所计算的斜率值 K 不断下降,当 $K \leq K_1$ 时,将该时刻对应的 J 值作为 J_1 , 同时将 N_2 单元波前校正器的控制电压 $u'' = (u''_1, u''_2, \dots, u''_{N_2})$ 作为控制变量,继续进行相同的过程。当 $K \leq K_2$ 时,将该时刻对应的 J 值作为 J_2 , 并将 N 单元波前校正器的控制电压 $u = (u_1, u_2, \dots, u_N)$ 作为控制变量执行 SPGD 算法流程。需要注意的是,在两级之间发生转换时,前一级波前校正器上的最终校正电压要根据映射关系赋值给下一级波前校正器的控制变量作为初始值,这在实际的物理系统中实现很方便。如此即可形成一个 3 级 SPGD AO 系统。

在对动态变化的畸变相位 $\varphi(r, t)$ 进行校正时,实际测量的 J 常会从一个较高的水平下降到一个较低的水平,此时,就需要多级 SPGD AO 系统能自动调整到前一级较低分辨率的工作状态。

根据上述过程,总结出一个 L 级 SPGD 波前校正的迭代公式

$$\begin{aligned} u_j^{(n+1)} &= u_j^{(n)} + \gamma \delta J^{(n)} \delta u_j^{(n)}, \\ j &= 1, \dots, N_1 \quad \text{for } J < J_1, \\ j &= 1, \dots, N_2 \quad \text{for } J_1 \leq J < J_2, \\ &\vdots \end{aligned}$$

$$j = 1, \dots, N_L \quad \text{for } J_{L-1} \leq J. \quad (9)$$

4 数值模拟

采用功率谱反演法,利用(2)式中的相位功率谱生成随机相位屏^[19],湍流强度设为 $D/r_0 = 10$ 。波前校正器仍采用上节中的例子。

为了比较使用不同分辨率的波前校正器对 SPGD 波前校正过程的不同影响,按图 1 所示的实验系统结构,任取一帧相位屏,在去除了平均相移及整体倾斜后,其方差为 2.77 rad^2 , 分别使用校正单元数为 N_1, N_2 和 N 的波前校正器进行了校正过程的模拟。扰动变量服从伯努利(Bernoulli)分布,扰动幅度为 0.25 rad 。每次经过 2000 步的迭代过程,重复进行 20 次实验,得到以各自单元数标示的 J 值平均演化曲线

$$\begin{aligned} \langle J(n') \rangle &= \frac{1}{20} \sum_{m=1}^{20} J_m(n'), \\ (n' &= 1, 2, \dots, 4000), \end{aligned} \quad (10)$$

及 20 次实验之间 J 值标准偏差的演化曲线

$$\sigma_J(n') = \left\{ \frac{1}{20} \sum_{m=1}^{20} [J_m(n') - \langle J(n') \rangle]^2 \right\}^{1/2}, \quad (11)$$

如图 3 所示。在迭代过程中,由于并不需要测量 $u^{(n)}$ 对应的 $J(u^{(n)})$ 值,因此此处的 $J(n')$ 值是依次记录 $u^{(n)} + \delta u^{(n)}$ 与 $u^{(n)} - \delta u^{(n)}$ 对应的 $J(u^{(n)} + \delta u^{(n)})$ 与 $J(u^{(n)} - \delta u^{(n)})$ 得到的。以

$$\begin{aligned} \langle J(n_{80\%}) \rangle &= \frac{\langle J(4000) \rangle - \langle J(1) \rangle}{2} \times \\ &80\% + \langle J(1) \rangle \end{aligned} \quad (12)$$

所对应的迭代步数 $n_{80\%}$ 表示收敛速度的快慢,计算得到 $n_{80\%}^{N_1} : n_{80\%}^{N_2} : n_{80\%}^N \approx 1 : 2 : 4$, 似乎与 $\sqrt{N_1} : \sqrt{N_2} : \sqrt{N} = 1 : \sqrt{2} : 2$ 的收敛速度规律不符合,但这主要是此处收敛速度的定义方式不同所致,因为分辨率越高 J 最终的收敛极值也越高。由图 3(a) 可以看出,在 A 点之前 N_1 曲线比 N_2 曲线具有较高的 J 值,在 B 点之前 N_2 曲线比 N 曲线具有较高的 J 值,这表明在 A 点之前 N_1 单元的 SPGD AO 系统的校正效果更好,在 A 点与 B 点之间 N_2 单元的 SPGD AO 系统的校正效果更好。从图 3(b) 可以看出,除在初始小段时间之外, σ_J 值随着校正单元数的增加而增大,这说明随着校正单元数的提高 SPGD AO 系统的收敛稳定性也降低了。因此使用分辨率较低的波前校正器在校正大相位畸变阶段确实具有优势。

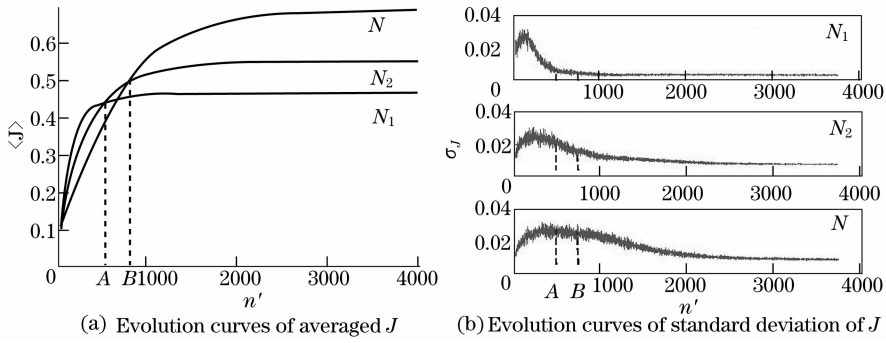


图 3 不同分辨率的 SPGD 波前校正实验的数值模拟结果

Fig. 3 Numerical simulation results of SPGD wavefront correction experiments with different resolutions

为了确定分级所需要的阈值,针对同一随机相位屏,分别使用校正单元数为 N_1, N_2 和 N 的波前校正器进行校正,然后改变随机相位屏重复进行 150 次实验,根据平均 J 值的演化曲线按(5)式计算其斜率演化曲线。由于只记录了 $J(u^{(n)} + \delta u^{(n)})$ 与 $J(u^{(n)} - \delta u^{(n)})$,因此令 $J^{(n)} \approx [J(u^{(n)} + \delta u^{(n)}) + J(u^{(n)} - \delta u^{(n)})]/2$, 并取 $M=20$,斜率演化曲线如图 4 所示。从图中可以看出,在 C 点之前 N_1 曲线比 N_2 曲线具有更大的斜率,在 D 点之前 N_2 曲线比 N 曲线具有更大的斜率,说明在 C 点之前 N_1 单元的 SPGD AO 系统具有更高的校正速度,在 C 点与 D 点之间 N_2 单元的 SPGD AO 系统具有更高的校正速度。因此,可以令 $K_1 = \beta_1 K_C, K_2 = \beta_2 K_D$, 其中 $K_C = 1.58 \times 10^{-3}$ 及 $K_D = 1.08 \times 10^{-3}$ 分别为 C 点及 D 点所对应的斜率; β_1 及 β_2 为调节参数,通常取小于 1 的正数比较好,但不得使 $K_1 \leq K_A, K_2 \leq K_B$ 。

为便于比较,不失一般性,取与图 3 实验相同的固定相位屏。令 $\beta_1 = \beta_2 = 0.8$,采用 3 级 SPGD 算法进行校正,扰动变量服从 Bernoulli 分布,扰动幅度为 0.25 rad。每次经过 2000 步的迭代过程,重复进行 20 次实验,得到以 Multilevel 标示的 J 的平均值演化曲线及 20 次实验之间 J 值标准偏差的演化曲

线,如图 5 所示。为了更直观地与采用单个波前校正器的 SPGD 波前校正结果比较,将图 3 中的对应曲线也分别画出。从图 5(a)可以看出 Multilevel 曲线显然要比 N 曲线收敛更快,比 N_1 曲线和 N_2 曲线具有更好的收敛末态;同时从图 5(b)可以看出 Multilevel 曲线比 N 曲线具有更好的收敛稳定性。根据(12)式计算表明,采用 3 级波前校正比只使用单个 N 单元波前校正器校正时 J 值收敛速度平均提高了 23%。与此相对应的是,采用分级波前校正,

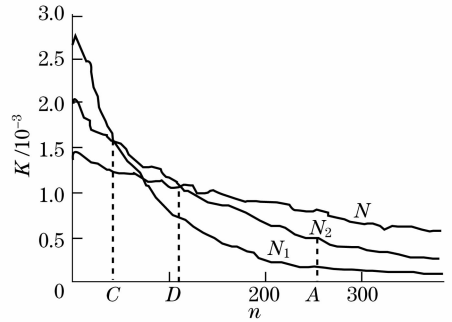


图 4 单元数分别为 N_1, N_2 和 N 的 150 次 SPGD 波前校正实验中平均 J 值的斜率演化曲线
Fig. 4 Evolution curves of slope of averaged J in 150 SPGD wavefront correction experiments with N_1, N_2 and N elements

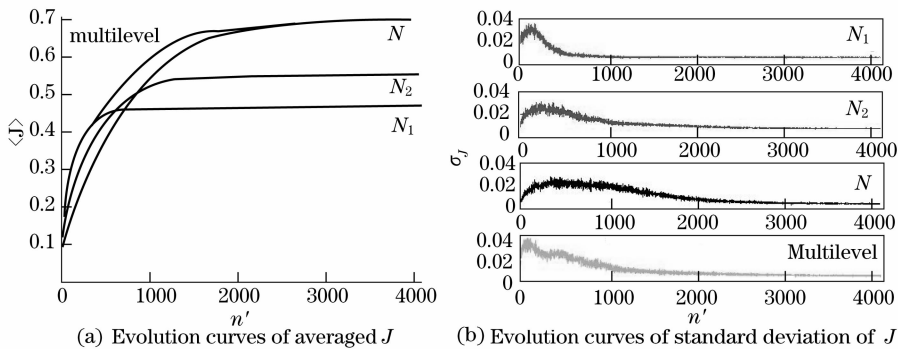


图 5 多级 SPGD 波前校正实验的数值模拟结果

Fig. 5 Numerical simulation results of multilevel SPGD wavefront correction experiment

除了计算斜率需要消耗微不足道的时外不需要任何额外的硬件开销和计算延时,而且如果增加分级的数目还可以进一步提高收敛速度。因此可以得出结论:对固定分布的波前畸变,分级 SPGD 波前校正方法提高了系统的收敛速度,增加了工作稳定性。

在确定了分级阈值之后,对于动态变化的波前畸变,可以按照与校正固定相位畸变相同的过程进行补偿。根据第 2 节的讨论,已经能够说明采用分级校正的方法确实可以改善 SPGD AO 系统的有效工作带宽。

5 结 论

针对大气湍流引起的光波波前畸变的时域及空域特性,空间大尺度区域内的相位畸变较大但是平均相位变化较慢,小尺度区域内的相位畸变较小但是平均相位变化较快;并结合随机并行梯度下降算法具有收敛速度随控制变量数目的平方根而递减的特点,提出分级校正的思想:先用低分辨率波前校正器进行校正以补偿大尺度相位畸变,然后逐级提高波前校正器的分辨率以补偿不同尺度的相位畸变,最终达到所需要的校正精度。数值模拟结果表明,针对固定分布的波前畸变,采用 3 级校正的方法使得 SPGD 波前校正的收敛速度提高了 23%。若增加分级数目则有望进一步提高 SPGD 波前校正的收敛速度,从而改善 SPGD AO 系统的有效工作带宽。尽管分级波前校正可以部分提高 SPGD AO 系统的工作带宽,但是较慢的收敛速度仍然是限制高分辨率 SPGD AO 系统用于大气湍流校正的主要障碍,需要继续深入研究。

参 考 文 献

- 1 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart. Adaptive wavefront control with asynchronous stochastic parallel gradient descent clusters [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, **23**(10): 2613~2622
- 2 Yang Ping, Ao Mingwu, Liu Yuan *et al.*. Adaptive optics genetic algorithm based on Zernike mode coefficients[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 367~372
杨平,敖明武,刘渊等.基于泽尼克模式系数的自适应光学遗传算法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 367~372
- 3 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
- 4 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
- 5 T. Weyrauch, M. A. Vorontsov. Free-space laser communication with adaptive optics: Atmospheric compensation experiments[J]. *J. Opt. Fiber. Commun. Rep.*, 2004, **1**(4): 355~379
- 6 T. Weyrauch, M. 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
- 7 M. Aubailly, M. A. Vorontsov. Imaging with an array of adaptive subapertures[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(1): 10~12
- 8 Liang Yonghui, Wang Sanhong, Long Xuejun *et al.*. Experimental explorations of the laser beam cleanup system based on stochastic parallel-gradient-descent algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 613~618
梁永辉,王三宏,龙学军等.随机并行梯度下降光束净化实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 613~618
- 9 Wang Sanhong, Liang Yonghui, Long Xuejun *et al.*. Adaptive optics with stochastic parallel gradient descent based on subzones coupling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 348~352
王三宏,梁永辉,龙学军等.基于分区域耦合的随机并行梯度下降自适应光学[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 348~352
- 10 L. Yonghui, W. Sanhong, L. Xuejun *et al.*. Beam cleanup technique based on stochastic parallel gradient descent wavefront control method[C]. *Proceedings of SPIE*, 2007, **6823**: 68230H
- 11 L. Xuejun, L. Yonghui, W. Sanhong *et al.*. Coherent beam combination of fiber lasers based on stochastic parallel gradient descent algorithm[C]. *SPIE*, 2007, **6823**: 682319
- 12 Yang Huizhen, Cai Dongmei, Chen Bo *et al.*. Analysis of adaptive optics techniques without a wave-front sensor and its application in atmospheric laser communications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 680~684
杨慧珍,蔡冬梅,陈波等.无波前传感自适应光学技术及其在大气光通信中的应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 680~684
- 13 M. A. Vorontsov, V. P. Sivokon. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion corrections[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(10): 2745~2758
- 14 T. Weyrauch, M. A. Vorontsov, T. G. Bifano *et al.*. Adaptive optics system with micromachined mirror array and stochastic gradient descent controller[C]. *Proc of SPIE*, 2000, **4124**: 178~188
- 15 D. P. Greenwood. Bandwidth specification for adaptive optics systems[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(3): 390~393
- 16 D. P. Greenwood, D. L. Fried. Power spectra requirements for wave-front-compensating systems[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 193~206
- 17 G. Cauwenberghs. A fast stochastic error-descent algorithm for supervised learning and optimization[C]. *in Advances in Neural Information Processing Systems. San Mateo: Morgan Kaufman*, 1993, **5**: 244~251
- 18 J. W. Hardy. Adaptive optics for Astronomical Telescopes[M]. New York: Oxford University Press, 1998
- 19 H. -X. Yan, S. -S. Li, D. -L. Zhang *et al.*. Numerical simulation of an adaptive optics system with laser propagation in the atmosphere[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(18): 3023~3031