

文章编号: 0258-7025(2010)10-2520-06

成像系统噪声对无波前探测自适应光学校正效果的影响

杨慧珍¹ 李新阳²

(¹ 淮海工学院电子工程学院, 江苏 连云港 222005)
(² 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610029)

摘要 大气湍流和成像系统噪声的存在使得观测的扩展目标图像退化、扭曲,进而无法辨认其细节。目前,常采用自适应光学技术实时去除由于大气湍流带来的像差。以 61 单元变形镜作为校正器,随机并行梯度下降算法作为无波前探测自适应光学系统的控制算法,扩展目标图像灰度值的方差函数作为控制算法优化的性能指标函数,建立无波前探测自适应光学系统仿真模型,分析成像系统噪声对无波前探测自适应光学校正效果的影响。结果表明,当像差较小且图像信噪比大于 20 dB 时,自适应光学技术的校正效果几乎不受影响;但随着信噪比的减小,校正效果对比无噪声时明显变差。相同的信噪比条件下,像差越大,成像效果受噪声的影响越大。

关键词 大气光学;扩展目标;自适应光学系统;图像质量评价;随机并行梯度下降

中图分类号 TP273+.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103710.2520

Effects of Imaging System Noise on the Correction Capability of Adaptive Optics without a Wavefront Sensor

Yang Huizhen¹ Li Xinyang²

(¹ Department of Electronic Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang, Jiangsu 222005, China)
(² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610029, China)

Abstract The atmosphere turbulence and imaging system noise can degrade and distort the imaging of the extended object. Adaptive optics technology is usually used to mitigate the wave-front aberrations caused by the atmosphere turbulence. An adaptive optics (AO) system with stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm and a 61-element deformable mirror is simulated to restore the image of a turbulence-degraded extended object and the gray level variance function is used as the optimized object by controlling algorithm. Based on the above simulation mode, effects of imaging system noise on the correction capability of adaptive optics are discussed. The results show that the correct capability is not affected when the signal noise ratio (SNR) is bigger than 20 dB for relative small turbulence, while the correction capability becomes worse obviously as the SNR decreases. Under the same SNR, the stronger the turbulence, the bigger the effect on the correction capability.

Key words atmospheric optics; extended object; adaptive optics system; image quality assessment; stochastic parallel gradient descent

1 引 言

由于大气湍流和成像系统噪声的影响,使得观测到的扩展目标图像退化、扭曲,进而无法辨认其细节,大气湍流是降低扩展目标图像分辨率的主要因素^[1]。目前常采用自适应光学技术^[2]来克服大气湍

流对成像质量的影响。和常规自适应光学技术相比,无波前探测自适应光学^[3]无需进行波前测量,把波前校正器所需控制信号作为优化参数,以成像清晰度、接收光能量等应用系统所关心的系统性能指标作为控制算法的目标函数,优化得到接近理想的

收稿日期:2010-01-15;收到修改稿日期:2010-02-24

基金项目:中国科学院自适应光学重点实验室(LAOF201004)和淮海工学院引进人才科研启动基金(KQ09035)资助课题。

作者简介:杨慧珍(1973—),女,博士,讲师,主要从事自适应光学技术及其应用方面的研究。

E-mail: yanghz526@126.com

校正效果。因而系统复杂性大大降低,该控制方法适用于大多数类型的自适应光学系统,而且在波前无法探测的应用环境中(如自由空间光通信、扩展目标成像等)有其独特的优势。

快速而有效的控制算法和合适的性能指标函数是该技术成功实现的关键。在众多的随机并行优化控制算法里面,随机并行梯度下降(SPGD)^[4-9]控制算法以其实现简单、校正效果好等特点,被认为是适应光学应用领域最有前途的算法之一^[10,11]。性能指标的选择与具体的应用环境有关,选取的原则一般基于以下两点:1)当算法收敛时,所选取的系统性能指标应能达到极值点;2)系统性能指标的测量或计算时间应小于湍流畸变发生变化的时间。

在扩展目标成像应用环境中,各种图像清晰度指标成为系统控制算法优化的首选性能指标。文献[12]分别从时域、频域比较了多种图像清晰度指标的校正效果。结果表明基于图像灰度值的方差函数最优,其校正能力接近最小二乘法。但是这些传统的各类指标并未对噪声作特殊的考虑,而实际的观测目标成像除了大气湍流的影响还存在噪声的污染。噪声的存在影响着图像清晰度指标的计算,而图像清晰度作为系统控制算法优化的对象,将会直接影响到自适应光学技术的校正效果。自适应光学技术主要用于减小或抑制大气湍流对成像效果的影响,消除不了噪声对图像的影响,但噪声的污染却影响着自适应光学系统的校正能力。因此为了使自适应光学系统校正能力达到最大,有必要分析噪声对自适应光学技术校正能力的影响,以便寻找更为有效地适合于扩展目标成像的图像清晰度指标。

本文以 61 单元变形镜作为校正器、随机并行梯度下降算法作为无波前探测自适应光学系统的控制算法、扩展目标图像灰度值的方差函数作为控制算法优化的性能指标函数,建立无波前探测自适应光学系统仿真模型,分析成像系统噪声对无波前探测自适应光学校正效果的影响。

2 仿真模型

2.1 扩展目标成像

地基大口径望远镜光学系统对天体目标成像,所记录的图像数据中包含了大气湍流的影响,图像中各点的变量随时间而随机变化,属于非相干成像系统。为了研究问题的方便,可把从目标到望远镜光学系统的成像面作为一个系统,用大气点扩散函数表示它的传输特性,综合代表光波传输路径上所

有影响目标图像分辨率的因素。在大气成像满足线性空间不变性的条件下,所记录的目标图像是目标函数和大气点扩散函数的卷积结果

$$f(x, y) = I(x, y) * h(x, y), \quad (1)$$

式中 (x, y) 代表像平面点的坐标, $I(x, y)$ 表示目标函数, $h(x, y)$ 为成像系统的点扩散函数, $f(x, y)$ 表示目标函数经过大气后在光学系统上所成的像。为简单化,省略了放大因子。数值实现时,把较清晰的现有图像作为目标函数 $I(x, y)$,点扩散函数 $h(x, y)$ 通过畸变波前的快速傅里叶变换得到。像平面 $f(x, y)$ 和目标函数 $I(x, y)$ 都为灰度图像,即点 (x, y) 的值归一化到 $0 \sim 255$ 之间。仿真中所使用的原始图像如图 1(a)所示。根据通常望远镜成像系统的口径 D ,探测波长 λ ,目标距离等参数的范围,不失一般性地假定望远镜成像系统的衍射极限角 $\theta = \lambda/D$ 对应 5 个像素点,则望远镜系统的成像全视场(FOV)约为 24 倍衍射极限角 θ 。图 1(b)为在本文望远镜参数条件下无像差时的理想成像效果。

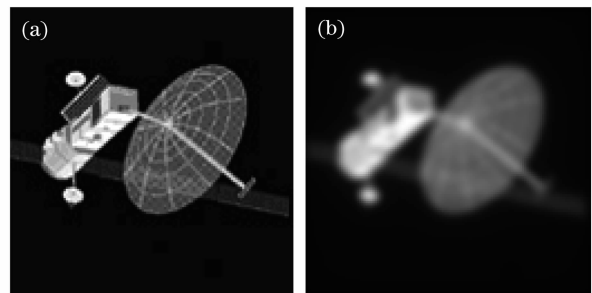


图 1 原始图像(a)和理想成像效果(b)
Fig. 1 Original image (a) and the ideal imaging result (b)

采用 N. Roddier 提出的方法^[13]生成不同湍流强度的相屏,相屏由前 65 阶 Zernike 像差组成,大小为 128×128 网格。用这种方法生成的相屏其统计属性符合 Kolmogorov 谱,且相屏之间不具有相关性。实际应用中两个方向的倾斜像差一般使用倾斜镜来校正,并由单独的控制回路控制。数值仿真中,假设倾斜误差已经得到补偿,即像差中已经没有倾斜误差。湍流强度的大小可以使用 D/r_0 和波前远场光斑的斯特列尔比(SR) R_{SR} 来表示,其中 r_0 为大气相干长度。通过快速傅里叶变换分别计算畸变波前和理想平面波前对应的远场光斑,将畸变波远场光斑峰值光强与理想平面波远场光斑峰值光强相比则可得到 R_{SR} 。

改变仿真程序的参数大小可以获得不同湍流强度的相屏,仿真中分别对 3 个不同 D/r_0 时的湍流情

况进行了考查,即 $D/r_0 = 5, 10, 20$ 。每种情况下通过对 20 个不同相屏的有关数据做系综平均得到该湍流情况下的各种数据(相当于长曝光图像)。

在高光子水平或者以 CCD 读出噪声为主的情况下,噪声满足加性高斯模型,大气湍流退化过程可表示为

$$f(x, y) = I(x, y) * h(x, y) + n(x, y). \quad (2)$$

在上述 3 种不同湍流条件下,分析信噪比 (SNR) R_{SN} 为 5, 10 和 20 dB 时,噪声的存在对自适应光学系统的校正能力的影响。信噪比的计算公式为

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{\sum_{(x,y)} [I(x, y) * h(x, y)]^2}{\sum_{(x,y)} n(x, y)^2}. \quad (3)$$

2.2 高分辨率成像自适应光学系统模型

高分辨率成像自适应光学系统模型如图 2 所示,由 4 部分组成:成像系统,图像质量分析,SPGD 控制算法和一个 61 单元变形镜。成像系统用来记录图像平面 $f(x, y)$,图像质量分析部分按照相应的公式计算图像质量指标,SPGD 算法根据图像质量分析部分的数据计算变形镜 61 个驱动器的驱动信号。成像 $f(x, y)$ 按照(1)式使用目标函数和系统的点扩散函数计算获得。所使用的 61 单元变形镜驱动器位置排布如图 3 所示,影响函数近似为高斯分布,取其交连值设为 0.08,高斯指数设为 2。在仿真中,没有考虑变形镜的校正量的限制,即认为变形镜的校正量足够大。

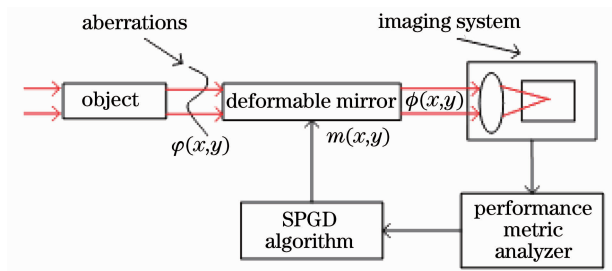


图 2 高分辨率成像自适应光学系统模型

Fig. 2 Schematic diagram of a high resolution imaging model

SPGD 算法中,图像质量指标 F 的变化量

$$\Delta F^{(k)} = F_+^{(k)} - F_-^{(k)}, \quad (4)$$

式中 $F_+^{(k)}$ 和 $F_-^{(k)}$ 分别计算为: $F_+^{(k)} = F[\mathbf{u}^{(k)} + \Delta \mathbf{u}^{(k)}]$, $F_-^{(k)} = F[\mathbf{u}^{(k)} - \Delta \mathbf{u}^{(k)}]$ 。电压参数 \mathbf{u} 的迭代计算公式

$$\mathbf{u}^{(k+1)} = \mathbf{u}^{(k)} + \gamma \Delta \mathbf{u}^{(k)} \Delta F^{(k)}, \quad (5)$$

式中上标 (k) 表示第 k 次迭代, $\Delta \mathbf{u}^{(k)} = \{\Delta u_1, \Delta u_2, \dots, \Delta u_{61}\}$ 为第 k 次迭代时施加的扰动电压向量, γ 为增益系数,在实际的应用中,如使目标函数向极大方

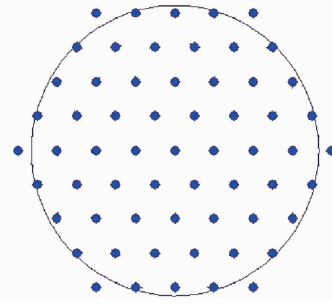


图 3 61 单元变形镜驱动器位置排布图

Fig. 3 Actuator distribution of 61-element deformable mirror

向优化, γ 取正值;反之, γ 取负值。

SPGD 算法的执行过程(第 k 次迭代时):

- 1) 随机生成扰动向量 $\Delta \mathbf{u}^{(k)}$, 各 Δu_i 相互独立且同为伯努利分布;
- 2) 使用(4)式计算目标函数的变化量 $\Delta F^{(k)}$;
- 3) 利用(5)式更新控制参数,进行第 $k+1$ 次迭代,直至满足算法结束条件。

3 结果与分析

3.1 噪声与指标函数的关系

当图像无噪声时,图像灰度值的方差函数表征了图像灰度值的离散程度,方差函数越大,表明图像质量越好。文献[12]的研究结果证明,方差函数在扩展目标成像应用中要优于其他几种指标函数,其校正效果非常接近最小二乘法。随着像差畸变程度的增大,方差函数变小,这种趋势符合实际情况也符合理论分析值。

当图像加上噪声时,保持像差畸变程度不变。直观上,噪声越大,即信噪比越小时,图像越模糊,方差函数值应越小;而噪声越小,信噪比越大时,图像越清晰,方差函数应越大。实验中,针对图 1(b)理想成像,分别叠加上信噪比 R_{SN} 为 5, 10, 15 和 20 dB 的噪声时,方差函数值的变化如表 1 所示。

表 1 方差函数值随信噪比的变化

Table 1 Value of performance metric versus R_{SN}

SNR /dB	∞ (no noise)	20	15	10	5
Performance metric	849	855	867	889	1036

从表 1 中数据可以看出随着信噪比的减小,图像模糊程度增大,但方差函数值却越来越大,这与理论分析不一致,因此噪声的存在使得方差函数值在一定程度上已不能准确地反映出图像质量的好坏。

而就无波前探测自适应光学系统而言,图像质量准则在一定程度上影响到系统校正能力的高低。噪声的存在影响着图像质量指标的大小,从前面自适应光学原理的介绍可知,图像质量指标的大小则直接影响着控制算法的性能。

3.2 噪声对校正效果的影响

在湍流强度分别为 $D/r_0 = 5, 10, 20$ 条件下,信

噪比 R_{SN} 为 5, 10 和 20 dB 时,分析噪声的存在对自适应光学系统的校正能力的影响。以校正后波前远场光斑的 R_{SR} 作为衡量自适应光学系统校正能力的指标。

图 4(a), (b), (c) 分别为 $D/r_0 = 5, 10, 20$ 时不同信噪比的校正情况。图中的曲线为算法 1500 次迭代过程中 R_{SR} 的变化情况。

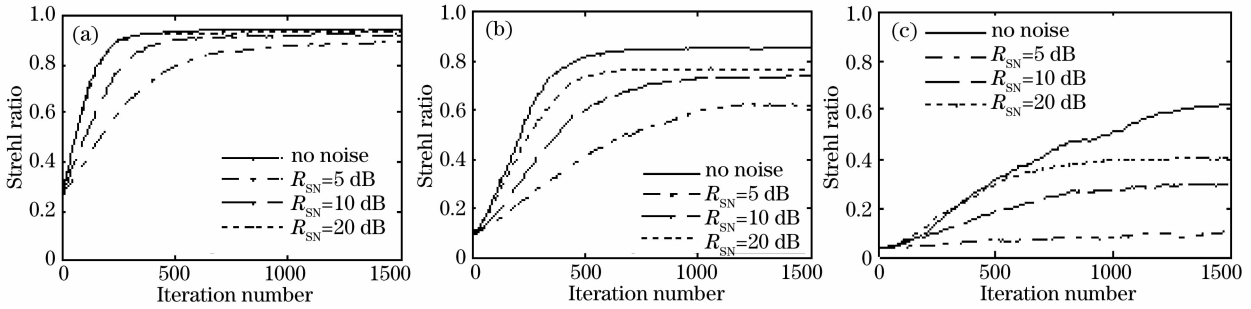


图 4 不同噪声、湍流条件下的 R_{SR} 校正曲线和无噪声时的对比

Fig. 4 Comparison of R_{SR} evolution curves under different R_{SN} and turbulence conditions

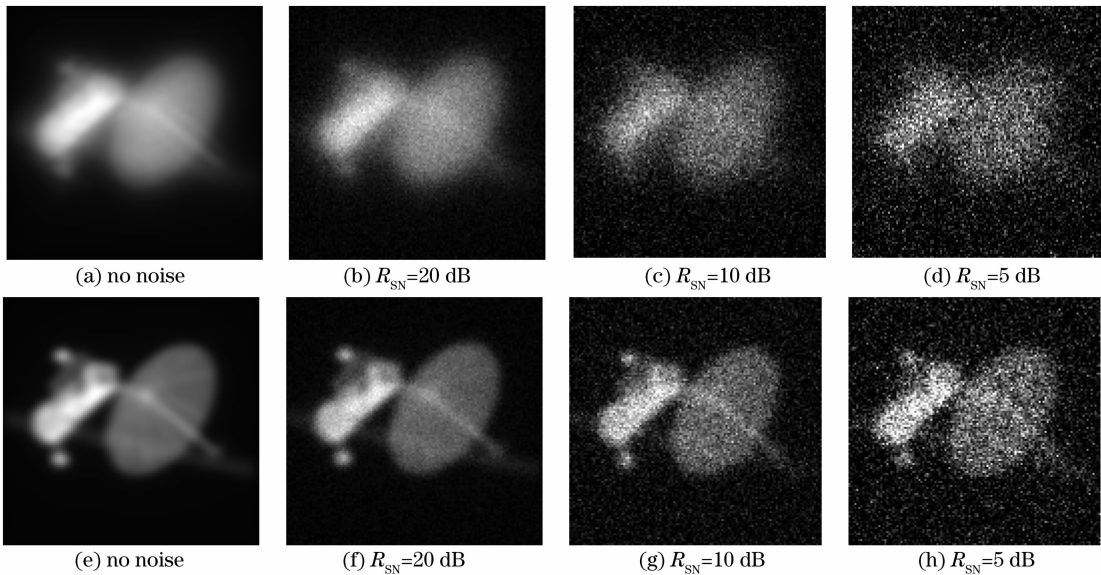


图 5 $D/r_0 = 5$ 时,信噪比分别为 20, 10 和 5 dB 时自适应光学系统校正前后与无噪声时的成像效果对比

(a)~(d) 分别为自适应光学校正前的成像效果, (e)~(h) 分别为自适应光学校正后的成像效果

Fig. 5 Comparison of imaging results before and after adaptive optics correction under $D/r_0 = 5$ and R_{SN} is 20, 10 and 5 dB respectively. (a)~(d) are imaging results before correction, (e)~(h) are imaging results after correction

从图 4 可以看出,虽然有噪声的存在,但系统经过一定次数的迭代后仍然能够收敛。但随着信噪比的减小,收敛速度越来越慢。相同的湍流条件下,有噪声时的校正效果都要差于无噪声存在时,且随着噪声的增大,即信噪比的减小,校正效果越来越差。相同的信噪比时,随着湍流强度的增加,噪声对校正效果的影响也随之增大。如 $D/r_0 = 5, R_{SN} = 20$ dB 时,和无噪声相比, R_{SR} 仅减小了 0.05; 但是 $D/r_0 = 20, R_{SN} = 20$ dB 时, R_{SR} 却降低了 0.2。可见,湍流越

强,自适应光学系统的校正效果受噪声的影响越大。

图 5 给出了 $D/r_0 = 5$ 时,自适应光学系统校正前后 R_{SN} 分别为 20, 10 和 5 dB 与无噪声时的成像情况。

对比校正后和校正前的成像结果可以看出,不管是否存在噪声,自适应光学技术都有较为明显的校正效果。尤其当信噪比较小为 5 dB 时,校正后依然可以清晰地看到成像中的目标轮廓。值得说明的是系统中的噪声利用自适应光学技术是无法去除的,自适应光学技术只能去除由于波前像差带来的

畸变,所以校正后噪声依然存在。但是由于很好地去除了造成图像畸变的主要因素,所以成像效果比校正以前有大幅度提高。

图 6 给出了 $D/r_0=20$ 时,自适应光学系统校正前后 R_{SN} 分别为 20,10 和 5 dB 与无噪声时的成像情况。从图 6 可以看出,湍流较强时,不管有无噪声存在,所得目标图像都是一片模糊,几乎分辨不清图中目标为何物。对比图 6(a)和(e)无噪声时校正前后的成像效果,可以发现湍流条件即使在 $D/r_0=20$ 时,自适应光学技术仍然有较强的校正能力,将致使

图像模糊的主要波前畸变部分去除掉。信噪比较大时,如 $R_{SN}=20$ 时,这种校正作用依然很明显。但是当信噪比较小时,从图 6(c)和(d)与图 6(g)和(h)校正后相对应的图像比较可知,校正作用已经十分微弱。因此,对比图 6 中无噪声和有噪声存在时的校正结果可知,此时的噪声已经极大地影响了自适应光学技术的校正效果。对比图 5(c)和(g)与图 6(c)和(g)信噪比 $R_{SN}=10$ dB 时的情况,可以看出湍流越强,自适应光学校正效果受噪声的影响越大。

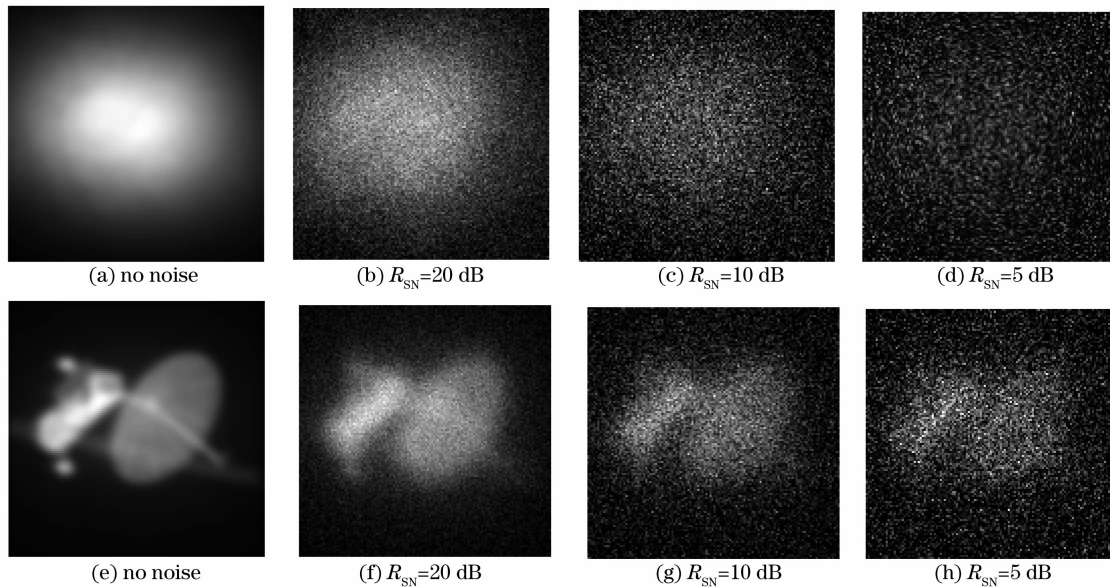


图 6 $D/r_0=20$ 时,信噪比分别为 20,10 和 5 dB 时自适应光学系统校正前后与无噪声时的成像效果对比

(a)~(d)分别为自适应光学校正前的成像效果,(e)~(h)分别为自适应光学校正后的成像效果

Fig. 6 Comparison of imaging results before and after adaptive optics correction under $D/r_0=20$ and R_{SN} is 20, 10 and 5 dB respectively. (a)~(d) are imaging results before correction, (e)~(h) are imaging results after correction

从图 4 中的自适应光学系统适应曲线及图 5,6 中存在噪声情况下的自适应光学校正效果来看,噪声的存在对自适应光学系统校正能力有着一定程度的影响,尤其当湍流条件较强时,这种影响不容忽视。

时域评价函数是图像处理领域较常用的图像质量评价标准,因为它们计算简单、物理意义明确。但从以上的成像结果可知,如果不加任何修改地使用这些指标作为无波前探测自适应光学系统控制算法的性能评价指标有可能极大地降低自适应光学系统的校正能力。有可能跟这些函数把图像看成是一些单一的点的结合有关,图像中所有的像素点同样对待,而没有考虑到图像像素间的相关性。当像差有较大灰度差别和较多像素点有较小灰度差别时,准确性较差。

4 结 论

建立了无波前探测自适应光学系统仿真模型,分析了成像系统噪声对无波前探测自适应光学校正效果的影响。结果表明,当像差较小且图像信噪比大于 20 dB 时,自适应光学技术的校正效果几乎不受影响;但随着信噪比的减小,校正效果对比无噪声时明显变差。相同的信噪比条件下,像差越大,成像效果受噪声的影响越大,且整个自适应光学系统收敛的速度越慢。因此在将无波前探测自适应光学技术用于噪声较大的空间扩展目标成像时,可以选择对噪声不敏感的图像质量评价标准作为控制算法优化的目标函数;或者在计算性能指标之前,对图像噪声进行过滤,尽可能减小噪声对性能指标值的影响,这些也正是下一步研究工作的方向。

参 考 文 献

- 1 Larry C. Andrews, Ronald L. Phillips. Laser Beam Propagation Through Random Media [M]. The second edition. Bellingham, Washington USA: SPIE Press, 2005
- 2 J. W. Hardy. Active optics; a new technology for the control of light [J]. *IEEE Proc.*, 1978, **66**(6):651~679
- 3 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
- 4 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(8):1440~1453
- 5 Yang Huizhen, Chen Bo, Li Xinyang *et al.*. Experimental demonstration of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2):205~210
杨慧珍,陈波,李新阳等. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法实验研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(2):205~210
- 6 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
- 7 Wang Sanhong, Liang Yonghui, Ma Haotong *et al.*. Beam cleanup experiments for master oscillator power amplifier laser system by adaptive optics based on stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10):2763~2768
王三宏,梁永辉,马浩统等. 随机并行梯度下降自适应光学对主振荡功率放大器激光系统的光束净化实验[J]. 中国激光, 2009, **36**(10):2763~2768
- 8 Zhou Pu, Liu Zejin, Ma Yanxing *et al.*. Simulation and experimental investigation on coherent beam combination 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
- 9 Chen Bo, Yang Huizhen, Zhang Jinbao *et al.*. Performances index and convergence speed of parallel gradient descent algorithm in adaptive optics of point source [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5):1143~1148
陈波,杨慧珍,张金宝等. 点目标成像自适应光学随机并行梯度下降算法性能指标与收敛速度[J]. 光学学报, 2009, **29**(5):1143~1148
- 10 J. A. Perreault, W. Wirth. Survey of adaptive optic techniques [C]. *SPIE*, 2005, **5903**:590307
- 11 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Stochastic parallel gradient descent algorithm for adaptive optics system based on Zernike mode [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(1):11~16
杨慧珍,李新阳,姜文汉. 自适应光学系统几种随机并行优化控制算法比较[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(1):11~16
- 12 Huizhen Yang, Xinyang Li, Chenglong Gong *et al.*. Restoration of turbulence-degraded extended object using the stochastic parallel gradient descent algorithm: numerical simulation [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5):3052~3062
- 13 N. Roddier. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials [J]. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(10):1174~1180