

文章编号: 0258-7025(2008)05-0680-05

无波前传感自适应光学技术及其 在大气光通信中的应用

杨慧珍^{1,2} 蔡冬梅^{1,2} 陈波^{1,2} 李新阳¹ 姜文汉¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 无波前传感自适应光学(AO)系统不依赖波前传感器可直接对系统性能进行优化。基于随机并行梯度下降(SPGD)算法, 32 单元变形镜, CCD 成像器件等建立了无波前传感自适应光学系统实验平台。实验结果表明, 参量选取合适时, 系统对畸变波前具有较好的校正能力, 但受限于较低的 CCD 采样频率, 仅能校正静态或缓慢变化的像差。根据实验结果讨论了基于随机并行梯度下降控制算法的无波前传感自适应光学技术在大气光通信中的应用可能和应用方法, 指出采用高速光电探测器、高速数据处理及响应速度高的波前校正器与随机并行梯度下降算法相配合可用于补偿大气光通信中的大气湍流扰动。

关键词 自适应光学; 随机并行梯度下降; 大气光通信

中图分类号 TP 273.2; TN 929.12 **文献标识码** A

Analysis of Adaptive Optics Techniques without a Wave-Front Sensor and Its Application in Atmospheric Laser Communications

Yang Huizhen^{1,2} Cai Dongmei^{1,2} Chen Bo^{1,2} Li Xinyang¹ Jiang Wenhan¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The adaptive optics (AO) technique without a wave-front sensor can optimize the system performance directly, while being independent of wave-front sensor. Based on stochastic parallel gradient descent (SPGD) control algorithm, an adaptive optics test-bed without a wave-front sensor was built with a 32-element deformable mirror and a CCD. Experimental results show the test-bed can correct distorted wave-front successfully when parameters of the SPGD algorithm are appropriate for distorted wave-front. The test-bed only can correct static or slowly varied aberrations due to the slow sample frequency of CCD. Several implemental methods in atmospheric laser communications were discussed. SPGD control algorithm can be used to correct aberrations in atmospheric laser communication if being combined with high speed photodetector, high speed data processing and high response frequency wave-front corrector.

Key words adaptive optics; stochastic parallel gradient descent; atmospheric laser communications

1 引言

常规自适应光学(AO)技术采用波前传感器探测畸变波前相位信息, 由波前控制器根据畸变波前相位信息重构出波前, 再使用波前校正器校正畸变波前。对它的研究结果均表明^[1~4], 常规自适应光学技术在较强的振幅起伏情况下, 光束波前产生不连续性, 给波前探测带来很大的误差, 无法实现基于

相位共轭的补偿, 补偿效果显著受限制。无波前传感自适应光学技术可不受闪烁效应等畸变条件的限制, 把波前校正器所需控制信号作为优化参量, 以成像清晰度、接收光能量等系统性能指标直接作为优化算法的目标函数, 优化得到接近理想的校正效果。与常规自适应光学技术相比, 无波前传感自适应光学系统复杂性大大降低, 且由于无需进行波前测量,

收稿日期: 2007-09-05; 收到修改稿日期: 2007-11-16

基金项目: 国家高技术激光领域资助项目。

作者简介: 杨慧珍(1973—), 女, 河南人, 博士研究生, 主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: yanghz526@126.com

导师简介: 李新阳(1971—), 男, 四川人, 博士, 研究员, 主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

比较适用于闪烁效应较为严重的大气光通信等应用领域。无波前传感自适应光学系统技术早期采用的多元高频振动法^[5]对系统的带宽要求高、信噪比低且硬件实现复杂,而爬山法^[6]收敛速度太慢。随机并行梯度下降(SPGD)算法^[7,8]为自适应光学技术在强闪烁条件下的应用打开了新局面,它并行控制波前校正器各个控制通道,使得收敛速度大大提高。

本文建立了无波前传感自适应光学系统实验平台,根据实验结果分析基于随机并行梯度下降控制算法的无波前传感自适应光学技术在大气光通信中的应用可能和应用方法。

2 实验

2.1 实验装置

图1为实验采用的光路及系统控制图,主要由激光器,扩束系统,CCD探测器,个人计算机,高压放大器及变形镜(deformable mirror,DM)组成。其中计算机内的软件、图像采集卡和模/数(D/A)转换卡共同完成随机并行梯度下降控制算法。光源从激光器发出,经反射镜 M_1, M_2 ,透镜 L_1 ,棱镜,反射镜 M_3, M_4 ,透镜 L_2 扩束成为 $\phi 120$ mm的平行光,经过像差传输后,再从变形镜返回,经 L_2, M_4, M_3 ,棱镜,放大镜头 L_3 至CCD成像。图像采集卡从CCD探测器采集畸变波前对应的光强信号,系统根据随机并行梯度下降控制算法计算出控制变形镜面形变化的电压信号。控制电压通过一个32通道的扩展接口总线数/模转换卡并行输出,电压范围为 ± 5 V,再经过高压放大到 ± 500 V驱动32单元变形镜各驱动器。再次由CCD探测经变形镜面形校正后的残余畸变波前,进入下一个控制循环。系统以上述迭代方式对变形镜进行控制,校正像差,使成像CCD上最终得到接近衍射极限的成像效果。图2为32单元变形镜驱动器位置排布图。

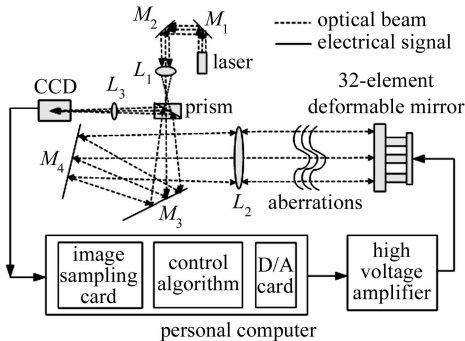


图1 实验光路及系统控制回路

Fig. 1 Optical path and system control loop

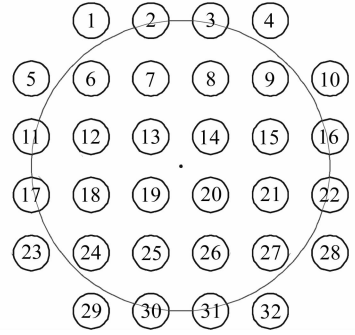


图2 32单元变形镜驱动器位置排布

Fig. 2 Actuators location of 32-element DM

编程环境为VC++6.0,采集卡的图像信息处理、控制算法的实现以及整个校正过程的监控都在计算机上实现。另经测量定标,成像系统在所使用光源波段等效焦距为8.86 m,理论极限半峰全宽(FWHM)为4.57 pixel。以CCD像面质心为中心截取 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 像面,把所有像素点的灰度值 I 分别平方然后求和^[9],就可得到实验采用的性能指标 J

$$J = \sum_{x=1}^{256} \sum_{y=1}^{256} I^2(x, y). \quad (1)$$

2.2 算法实现

随机并行梯度下降算法利用性能指标测量值的变化量 ΔJ 与控制参数的变化量 $\Delta \mu$ 进行控制参数的梯度估计,以迭代方式在梯度下降方向上进行控制参数的搜索。第 k 次迭代时,电压向量 $\mathbf{u}^{(k)} = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ (n 为波前校正器单元数)的计算公式为

$$\mathbf{u}^{(k)} = \mathbf{u}^{(k-1)} + \gamma \Delta \mathbf{u}^{(k)} \Delta J^{(k)}, \quad (2)$$

式中 $\Delta \mathbf{u}^{(k)} = \{\Delta u_1, \Delta u_2, \dots, \Delta u_n\}^{(k)}$ 为第 k 次迭代时施加的扰动电压向量,单位为V,各 Δu_i 相互独立且同为伯努利分布^[10],即各分量幅值相等 $|\Delta u_j| = \delta$, $\Pr(\Delta u_j = \pm \delta) = 0.5$; γ 为增益系数,实验中性能指标向极大方向优化, γ 取正值。性能指标 J 的变化量 $\Delta J^{(k)}$ 为

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

式中

$$J_+^{(k)} = J[\mathbf{u}^{(k)} + \Delta \mathbf{u}^{(k)}], \quad (4a)$$

$$J_-^{(k)} = J[\mathbf{u}^{(k)} - \Delta \mathbf{u}^{(k)}], \quad (4b)$$

随机并行梯度下降算法的执行过程(第 k 次迭代时):

1) 随机生成扰动向量 $\Delta \mathbf{u}^{(k)} = \{\Delta u_1, \Delta u_2, \dots, \Delta u_n\}^{(k)}$;

2) 分别将 $\mathbf{u}^{(k)} + \Delta \mathbf{u}^{(k)}$ 和 $\mathbf{u}^{(k)} - \Delta \mathbf{u}^{(k)}$ 施加到变形镜驱动器,测量 $J_+^{(k)}$ 和 $J_-^{(k)}$ 。根据(3)式计算目标

函数的变化量 $\Delta J^{(k)}$;

3) 利用(2)式更新控制参量,进行第 $k+1$ 次迭代,直至满足算法结束条件。

影响随机并行梯度下降控制算法校正效果和收敛速度的主要参量为扰动幅度 δ 和增益系数 γ 。像差变化不大时,只需把 δ 和 γ 中的一个固定在合适的范围内,调整另外一个^[8]。经过参量优选,把 δ 设定在 0.1 V, γ 取 1.2。

2.3 结果分析

图 3 为算法迭代 1000 次的性能指标 J 变化曲线。 J 初始值为 0.2×10^5 ,校正结束后为 10.6×10^5 ,增大了 53 倍。图 4 为相应的峰值变化曲线,初始峰值为 23,校正结束后为 234。图 5 为校正前后 CCD 像面光强分布对比。

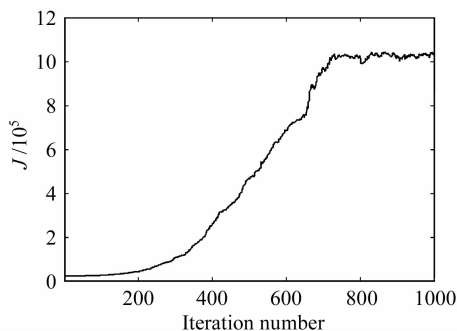


图 3 性能指标 J 随迭代次数的变化曲线

Fig. 3 Performance metric J versus iteration number

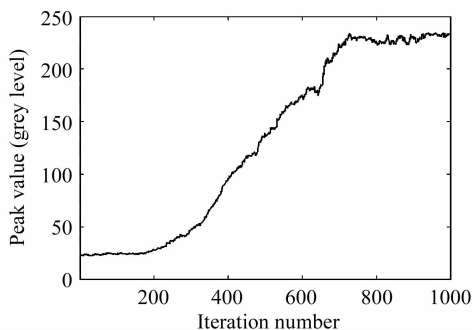


图 4 峰值随迭代次数的变化曲线

Fig. 4 Peak value versus iteration number

从图 3~5 可以看出,性能指标、光强峰值及整个靶面光强分布校正后均有明显改善。实验系统的理论极限半峰全宽为 4.57 pixel,校正后半峰全宽为 5.74 pixel,因此可得到 $5.74/4.57 = 1.25$ 倍衍射极限的校正效果。

为便于分析,把扰动电压施加到变形镜、图像采集、数据处理这样一个流程,称为一个扰动过程。实验完成一次电压扰动实际用时约为 50 ms,即扰动频率为 20 Hz。采集卡的采样频率为 25 Hz,一次图

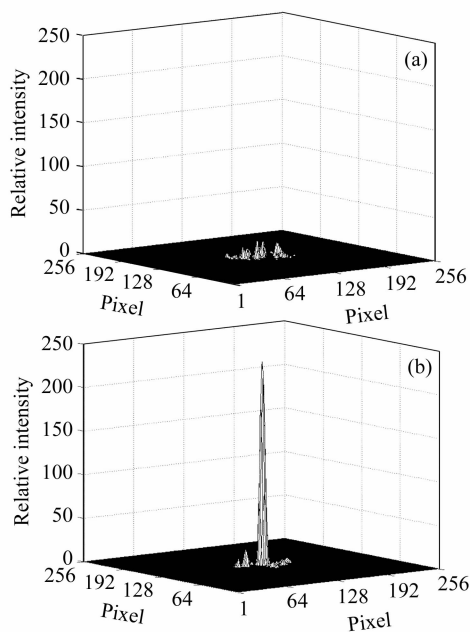


图 5 校正前(a)与迭代 1000 次后(b)CCD 像面的光强分布对比

Fig. 5 Comparison of intensity distribution before correction (a) and after iterated 1000 times (b)

像采集约需 40 ms,这样对 CCD 采样时间便占去一次扰动时间的 80%,可见采样频率太低是系统时间上的最大限制因素,仅能校正静态或缓慢变化的像差。根据文献[11],为了校正大气湍流动态像差,随机并行梯度下降控制算法所需扰动频率大约为 20~40 倍的 Nf_G , N 为校正器单元数, f_G 为大气湍流动态像差的 Greenwood 频率,这样扰动频率才能跟得上变化着的波前扰动。如果 $f_G = 10$ Hz,采用实验中的 32 单元变形镜,则需要的扰动频率应为 6400 Hz。所以随机并行梯度下降算法的校正速度要适用于大气湍流的动态像差,很有必要提高扰动频率。

3 无波前传感自适应光学技术在大气光通信中的应用

丁涛等^[12]分析了短距离无线光通信中抑制平台振动对误码率影响的方法,潘峰等^[13]通过跟踪测量恒星研究了下行传输路径中接收光强起伏的统计特性,但这两种情况下的光强闪烁效应相对较弱。当信号光在近地面水平长程传输时,即使是弱湍流条件,随着传播距离的增加,信号光到达接收孔径时依然会产生较强闪烁效应。而闪烁效应相当于一个随机噪声源,可能会导致通信突发性错误,甚至是通信中断,严重影响通信质量。

Weyrauch 等^[14]的无波前传感自适应光学系统实验平台把接收器上接收到的信号强度作为优化的性能指标,其在中等闪烁条件下使用自适应光学技术时的性能指标大约是不使用自适应光学技术的 2 倍,但值得注意的是电压扰动频率受限于变形镜的响应时间,而非随机并行梯度下降算法所能达到的迭代速度。采用高速的光电探测器件、高速的数据处理以及响应速度高的波前校正器与自适应光学算法相配合可用于补偿大气光通信中的大气湍流扰动。如高速的光电探测器件采用针孔、高速的数据处理采用超大规模集成电路、响应速度高的波前校正器基于微机电(MEMS)技术则可组成低成本、低复杂度的自适应光学系统^[15],其电压扰动频率可达波前校正器的工作频率。可见,基于随机并行梯度下降算法的自适应光学系统不但能够在常规自

适应光学技术的弱、中等湍流情况下,且有可能适应强湍流环境。

无波前传感器的自适应光学技术与大气光通信的结合可采用多种方式。图 6 中把自适应光学部分放置在接收端,受大气扰动的光信号经接收天线后进入自适应光学校正部分。自适应光学校正部分把光电探测器的探测信息作为随机并行梯度下降控制算法优化的性能指标 J ,根据 J 计算出波前校正器所需的控制信号 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 并送波前校正器各驱动器,波前校正器面形发生变化补偿畸变波前。经自适应光学校正后的信号再送解调电路解调出通信数据。为增强通信系统吞吐率和利用发展较成熟的光纤通信相关技术,需要把接收到的光束耦合到单模光纤中。这样可把耦合效率作为随机并行梯度下降控制算法优化的性能指标,从而提高耦合效率。

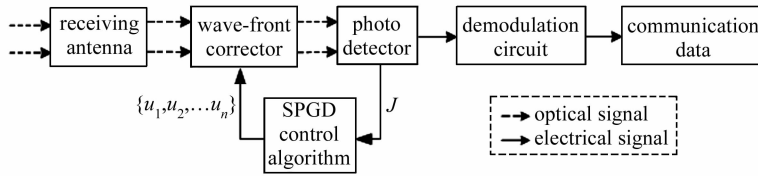


图 6 在接收端使用自适应光学技术的大气光通信系统模型

Fig. 6 Simplified schematic of atmospheric laser communication with AO at the receiver

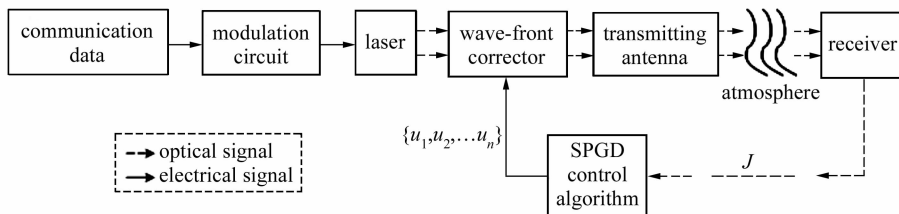


图 7 在发射端使用自适应光学技术的大气光通信系统模型

Fig. 7 Simplified schematic of atmospheric laser communication with AO based at the transmitter

如果仅在接收端进行补偿,只能补偿已进入接收孔径内的光波畸变,补偿能力有限。为使接收孔径上接收到的光强最大,可以在发射端使用基于随机并行梯度下降控制算法的自适应光学技术对发射光束进行预补偿,如图 7 所示,把接收端接收到的光强信号反馈回发射端作为随机并行梯度下降控制算法优化的性能指标。随机并行梯度下降控制算法根据 J 的变化计算出波前校正器所需控制信号并施加到波前校正器各驱动器,这样便把预补偿信息添加到了调制后的发射光波上,再经发射天线发射出去。其中,反馈信号可以通过时分或波分方式与通信信息一起从接收端发送回发射端。另外,还可使用来自信标光的信息作为随机并行梯度下降控制算法优化的系统性能指标,这些信息中含有传播路径上的

光波畸变信息,其补偿原理类似于常规自适应光学技术。当路程远时,在发射端使用自适应光学技术会存在一定的延时。

4 结 论

基于随机并行梯度下降控制算法,32 单元变形镜,CCD 成像器件等建立了无波前传感器的自适应光学系统实验平台,考察了系统对畸变波前的校正能力,分析了系统校正速度。实验结果表明,在参量选取合适的情况下,系统对畸变波前具有较好的校正能力,但受限于较低的 CCD 采样频率,仅能校正静态或缓慢变化的像差。讨论了基于随机并行梯度下降控制算法的无波前传感自适应光学技术在大气光通信中的应用,指出采用高速的光电探测器件、高

速的数据处理以及响应速度高的波前校正器与随机并行梯度下降算法相配合可用于补偿大气光通信中的大气湍流扰动。

参 考 文 献

- 1 N. B. Baranova. Wave-front dislocations: topological limitations for adaptive systems with phase conjugation [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1983, **73**(5):525~528
- 2 R. K. Tyson. Bit-error rate for free-space adaptive optics laser communications [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(4):753~758
- 3 C. A. Primmermen, T. R. Price, R. A. Humphreys *et al.*. Atmospheric-compensation experiments in strong-scintillation conditions [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(12):2081~2088
- 4 Wang Yingjian, Wu Yi, Wang Chao *et al.*. Experimental results of atmospheric-compensation in the horizontal propagation path [J]. *Chin. J. Quantum Electronics*, 1998, **15**(2):164~169
王英俭,吴毅,汪超等. 激光实际大气传输湍流效应相位校正一些实验结果[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(2):164~169
- 5 T. R. O'Meara. The multidither principle on adaptive optics [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(3):306~315
- 6 Jiang Wenhan, Huang Shufu, Wu Xubin. Hill-climbing adaptive optics wavefront correction system [J]. *Chinese J. Lasers*, 1988, **15**(1):17~21
姜文汉,黄树辅,吴旭斌. 爬山法自适应光学波前校正系统[J]. *中国激光*, 1988, **15**(1):17~21
- 7 M. A. Vorontsov, V. P. Sivokon. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(10):2745~2758
- 8 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
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
- 9 Zhou Renzhong, Yan Jixiang, Zhao Dazun *et al.*. Adaptive Optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996
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
- 10 J. C. Spall. Multivariate stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation [J]. *IEEE Trans. Automatic Control*, 1992, **37**(3):332~341
- 11 A. J. Masino, D. J. Link. Adaptive optics without a wavefront sensor [C]. *SPIE*, 2005, **5895**:58950T-1~58950T-9
- 12 Ding Tao, Xu Guoliang, Zhang Xuping *et al.*. Control of bit error rate introduced by platform vibration for free space optical communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4):409~502
丁涛,许国良,张旭萍等. 空间光通信中平台振动对误码率影响的抑制[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4):409~502
- 13 Pan Feng, Ma Jing, Tan Liying. Statistical properties of irradiance scintillation for downlink propagation and aperture receiving [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10):1371~1374
潘峰,马晶,谭立英. 下行传输孔径接收光强起伏的统计特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1371~1374
- 14 T. Weyrauch, M. 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
- 15 Li Jie, Chen Haiqing, Wu Peng. Closed-loop adaptive compensation for thermally induced aberration laser beams [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12):1605~1608
李捷,陈海清,吴鹏. 热畸变激光光束的闭环自适应补偿[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12):1605~1608