

基于随机并行梯度下降算法的望远镜静态像差校正

亓波^{1,2,3} 陈洪斌^{1,2} 任戈^{1,2} 边疆^{1,2} 张彩^{1,2,3} 刘琼^{1,2}

¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209
² 中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209
³ 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为校正大口径量子通信望远镜的静态像差, 提高接收信号光的能量集中度, 提出了基于随机并行梯度下降 (SPGD) 算法的静态像差校正方法。该方法不同于经典的自适应光学校正方法, 无需波前传感器, 可有效降低系统的复杂性。对 SPGD 算法进行了分析, 在此基础上利用 64 单元变形镜和 CCD 探测器搭建了校正平台, 并将该校正平台应用到青海湖量子通信地面站望远镜系统, 对 700 mm 望远镜的静态像差进行了校正, 远场光斑直径由校正前的 58 μm 改善为 30 μm , 验证了 SPGD 算法对望远镜波前畸变校正的可行性。

关键词 光学设计; 量子通信; 波前校正; 随机并行梯度下降算法; 变形镜

中图分类号 TP273.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.082201

Wavefront Correction of Telescope Based on Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm

Qi Bo^{1,2,3} Chen Hongbin^{1,2} Ren Ge^{1,2} Bian Jiang^{1,2} Zhang Cai^{1,2,3} Liu Qiong^{1,2}

¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
² Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Aiming at correcting static aberrations of telescope for quantum communication and improving the energy concentration of receiving signal light, the method of static aberration correction based on stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is proposed. Unlike the conventional adaptive optics systems, the SPGD algorithm does not require the wavefront sensor, and can effectively reduce the complexity of system. An adaptive optics aberration correction test-bed is set up with a 64-element deformable mirror (DM) and a CCD detector. The static wavefront aberrations of a 700 mm telescope is compensated, and the far-field diameter is improved to 30 μm from the original value of 58 μm . The feasibility of SPGD algorithm used to correct static wavefront aberrations of telescope is demonstrated.

Key words optical design; quantum communication; wavefront correction; stochastic parallel gradient descent algorithm; deformable mirror

OCIS codes 220.1010; 010.1080

1 引言

量子通信可望大幅度提高信息传输的安全性、信息传输通道容量和效率等, 是未来信息技术发展的重要战略性方向。当今短距离的量子保密通信技术发展已相对成熟, 但无法满足未来技术发展的需求, 因此需要开展星地远距离的量子通信实验, 为将来构建量子通信网路奠定技术基础^[1]。星地量子通信实验在满足微弱能量探测的同时还需要很高的通信效率, 因此地面望远镜系统通常需要大口径的望远镜, 且要有近衍射极限的光学质量。但随着望远镜口径的增大, 望远镜的加工装配误差、大口径主镜和中继反射镜加工过程中带

收稿日期: 2012-04-09; 收到修改稿日期: 2012-04-24; 网络出版日期: 2012-05-22

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (YYJ-0815) 资助课题。

作者简介: 亓波 (1978—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事光束控制技术方面的研究。E-mail: qibo@ioe.ac.cn

导师简介: 陈洪斌 (1953—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光束控制技术方面的研究。E-mail: chbin@ioe.ac.cn

来的误差以及外界温度变化等因素对望远镜系统的影响越来越明显,这些影响都会最终反映到望远镜接收光斑的时空分布上,造成接收功率的下降^[2]。传统的解决方法是通过提高光学系统的加工和装调精度来减小波前畸变的影响,但这势必增加量子通信系统的研制难度和研制成本。自适应光学技术的出现使得望远镜的像差实时校正成为可能,它通过变形反射镜(DM)和波前传感器(WFS)来构成一个闭环系统完成静态和动态像差校正^[3]。但在量子通信领域,面临着如何提高光能利用率的问题,系统设计不能满足夏克-哈特曼波前传感器正常工作的能量要求,这就使得传统的基于变形镜和哈特曼波前传感器的自适应光学系统无法应用。因此,迫切需要一种新的无波前传感器的像差校正方法,以提高望远镜的成像质量。

美国陆军研究院的 Vorontsov 等^[4,5]提出了随机并行梯度下降(SPGD)控制算法,促进了无波前探测自适应光学技术的发展和應用。基于 SPGD 的像差校正方法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价函数,系统性能评价函数可以直接通过望远镜跟踪系统的 CCD 传感器获取。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,可达到间接校正波前畸变的目的。该技术不需要进行波前测量及相应的波前重构,所有关于波前畸变的信息转化为一个标量性能指标。在量子通信系统中,性能指标可以是误码率,也可以是耦合效率,以迭代方式对性能指标进行优化,最后可能得到较好的校正效果。

目前,国内对基于 SPGD 算法的校正技术的研究仍处于起步阶段。文献[6]以 32 单元变形镜为校正器,采用 SPGD 算法建立了自适应光学系统仿真模型,讨论了算法增益系数、随机扰动幅度与收敛速度的关系。文献[7]基于 32 单元变形镜、CCD 成像器件等建立自适应光学系统 SPGD 控制算法实验平台,考察了算法增益系数和扰动幅度对校正效果和收敛速度的影响,验证 SPGD 算法的基本原理。这些工作^[6-8]仅仅是通过仿真和实验室实验来开展研究,而无论是仿真波前还是实验室模拟的扰动波前都和实际系统的像差成份有一定差别。本文将 SPGD 算法的校正平台应用到实际的望远镜系统,在实际系统中考察 SPGD 算法的可行性,实现了青海湖量子通信地面站望远镜的波前畸变校正,验证了 SPGD 算法的有效性。

2 随机并行梯度下降算法

SPGD 算法作为一种无模型优化算法,适用于控制变量较多、受控系统比较复杂、无法建立准确数学模型的最优化控制过程。SPGD 算法的工作原理是:首先由性能指标分析模块计算性能指标 J 的变化量 δ_j ,SPGD 模块根据 δ_j 计算出 $\mathbf{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$,并施加到波前校正器的各驱动器上,再由梯度评价模块计算校正相位后残余波前的系统性能指标。如此迭代进行,直至满足系统对指标的要求为止。迭代的过程则是参量空间中寻找最佳电压向量 $\mathbf{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$,使得波前校正器逐步生成一个趋于原始波前反相的波前,从而使残余波前最小,系统性能指标趋于最优。SPGD 算法的迭代表达式为

$$\mathbf{u}^{(n+1)} = \mathbf{u}^{(n)} - \mu \delta_j^{(n)} \delta \mathbf{u}^{(n)}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{u}^{(n)}$ 为当前变形镜的驱动电压向量; μ 为迭代增益; $\delta \mathbf{u}^{(n)}$ 为当前施加的扰动电压向量,其中元素相互独立且服从伯努利分布; $\delta_j^{(n)}$ 为像质评价函数的梯度估计,

$$\delta_j^{(n)} = J(\mathbf{u}^{(n)} + \delta \mathbf{u}^{(n)}) - J(\mathbf{u}^{(n)} - \delta \mathbf{u}^{(n)}). \quad (2)$$

3 实验结果及分析

3.1 实验装置

为验证 SPGD 算法的校正可行性,在实验室搭建了校正平台,光路如图 1 所示。系统主要由 635 nm 光纤激光器、聚焦透镜 L1、反射镜 M1、分光镜、反射镜、CCD 探测器、Shack-Hartmann 波前传感器、计算机、高压放大器及变形镜组成,其中计算机内有图像采集卡和数/模(D/A)转换卡,利用机内软件完成 SPGD 控制算法。光源从光纤激光器发出,经分光镜 BS1 和透镜 L1 准直成为平行光,经过变形镜反射到达反射镜 M1,经 M1 反射返回,经变形镜、分光镜 BS2 进行分束,一部分光至 CCD

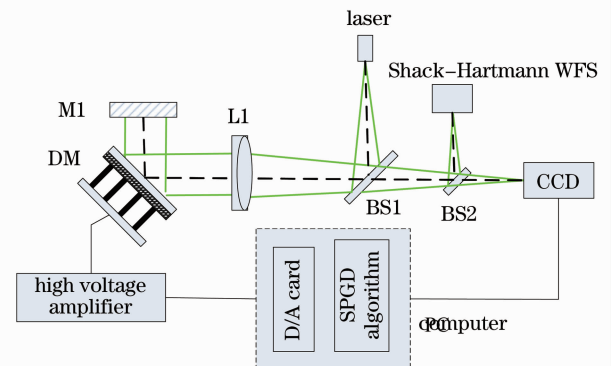


图 1 实验光路及系统控制回路

Fig. 1 Optical path and system control loop

成像。计算机从 CCD 探测器采集畸变波前对应的光强信号,系统根据 SPGD 算法计算出控制变形镜面形变化的电压信号。另一部分光至 Shack-Hartmann 波前传感器,用来测量系统波像差,用来评价 SPGD 算法的校正效果。变形镜口径 100 mm,透镜 L1 焦距 900 mm,CCD 的型号为 Basler A311f,分辨率为 659 pixel×494 pixel,1394 输出接口,帧频 73 Hz。控制电压通过一个 64 通道的 PCI 总线 DA 卡并行输出,电压范围为 ±10 V,再经过高压放大到 ±400 V 驱动 64 单元变形镜。

3.2 性能指标的选取

SPGD 算法的校正效果一定程度上依赖于系统性能指标的选取。根据具体的应用场合,系统性能指标的选取要求也不同,一个总的原则就是波前畸变消除后性能指标函数达到极值。文献[9]总结了基于像平面或接收孔径上光强而定义的几种性能指标函数,主要有强度分布的平方和、环围能量和斯特雷尔比、平均半径等。由于斯特雷尔比等一些性能指标在实际系统中不容易得到,所以在实际的点目标成像系统中通常采用强度分布的平方和、环围能量和平均半径作为性能指标。文献[8]对比分析了 SPGD 算法采用上述三种实用性能指标时的收敛速度和校正效果,结果表明取平均半径作为系统性能指标进行优化时,收敛速度最快,而且校正过程较为平稳,因此我们亦选用平均半径作为性能指标,其定义如下。

像平面质心坐标

$$x_0 = \frac{\iint xI(x,y)dx dy}{\iint I(x,y)dx dy}, \quad y_0 = \frac{\iint yI(x,y)dx dy}{\iint I(x,y)dx dy}, \quad (3)$$

则平均半径为

$$R_m = \frac{\iint |(x,y) - (x_0,y_0)| I(x,y)dx dy}{\iint I(x,y)dx dy}, \quad (4)$$

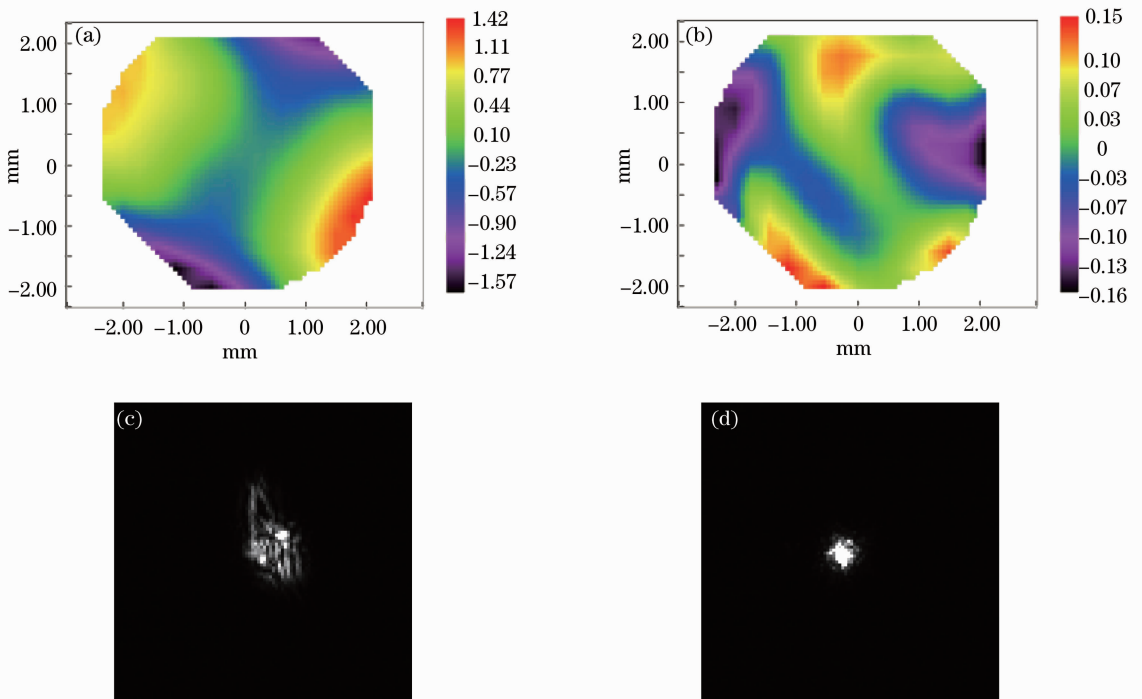


图 2 校正前后波像差云图和 CCD 像面光强分布图。(a)校正前波像差云图;(b)校正后波像差云图;
(c)校正前 CCD 像面光强分布;(d)校正后 CCD 像面光强分布

Fig. 2 Comparisons of wavefront and intensity distribution before and after SPGD correction. (a) Wavefront before correction; (b) wavefront after correction; (c) intensity distribution before correction; (d) intensity distribution after correction

式中 $I(x, y)$ 为畸变波前远场光斑光强分布, (x_0, y_0) 为光斑质心。具体实现时,以像面质心为中心截取 $100 \text{ pixel} \times 100 \text{ pixel}$ 像面大小进行计算。 $|(x, y) - (x_0, y_0)|$ 指的是点 (x, y) 和质心 (x_0, y_0) 之间的距离。当像差减小时,平均半径朝着减小的方向变化。

3.3 实验结果

量子通信望远镜主次镜系统采用双旋转抛物面结构,中继光路为库德光路,系统一共有 8 块反射镜,在装车间内利用 Zygo 干涉仪对全系统像差进行了测量,像散是像差的主要成份,因此 SPGD 算法实验室校正实验主要通过变形镜模拟望远镜的静态像差。每次校正实验一开始,利用前 35 项泽尼克多项式模拟静态像差,然后波前控制器对变形镜输出一组控制电压以产生大像散波前畸变,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,直至完成校正。图 2 给出了一组实验结果。图 2(a)为校正前系统的波像差云图,波像差峰谷(PV)值为 $3.165 \mu\text{m}$,均方根(RMS)值 $0.585 \mu\text{m}$ 。图 2(b)是 SPGD 算法校正后系统的波像差云图,波像差 PV 值为 $0.310 \mu\text{m}$,RMS 值为 $0.066 \mu\text{m}$ 。图 2(c)给出的是 CCD 相机采集的校正前远场光斑,图 2(d)为 CCD 相机采集的校正后远场光斑,可以看出远场光斑形态明显变好,能量更加集中。图 3 给出了性能指标随迭代步数变化的曲线。

3.4 量子通信望远镜校正实验

为验证 SPGD 算法对实际望远镜系统的校正能力,将搭建的实验平台和青海湖量子通信地面站望远镜进行集成,实验光路如图 4 所示。光源从光纤激光器发出,经分光镜 BS2 和透镜 L1 准直成为平行光,经过变形镜耦合进入望远镜系统,经次镜 SM、主镜 PM 传输变换后到达标准平面反射镜 M2,从 M2 反射返回,经 PM、SM、M1、变形镜、L1 和分光镜 BS1,经分光镜 BS2 进行分束,一部分光至 CCD 成像。计算机从 CCD 探测器采集畸变波前对应的光强信号,系统根据 SPGD 算法计算出控制变形镜面形变化的电压信号。另一部分光至光束质量分析仪,用来测量激光光斑直径和分布,以评价 SPGD 算法的校正效果。望远镜和标准平面反射镜 M2 的全口径为 700 mm 。

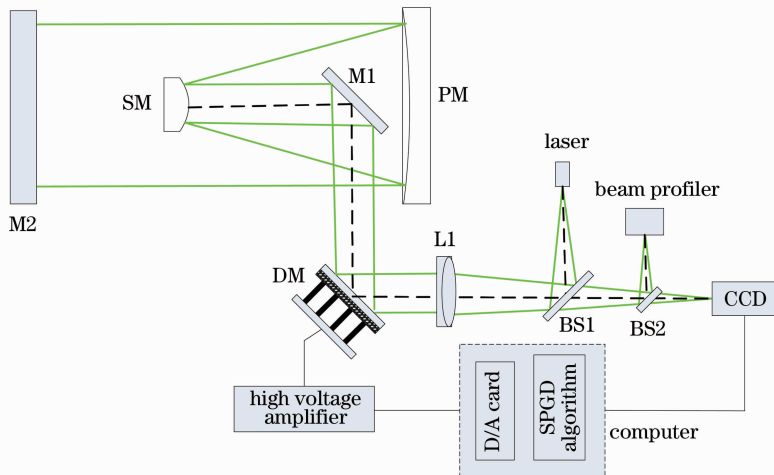


图 4 望远镜像差校正实验平台

Fig. 4 Experimental setup of quantum communication telescope

利用 SPGD 算法对整个望远镜系统的静态像差,包括变形镜初始像差进行了校正,图 5 为系统性能指标 J 变化曲线。从图中可以看出,经过 SPGD 闭环校正,远场光斑平均半径从 4.1 pixel 下降到 2.8 pixel 。THORLABS BC106-VIS 光束质量分析仪测量结果如图 6 所示,可见闭环前有效光斑直径为 $58 \mu\text{m}$ 。闭环后有效光斑直径为 $30 \mu\text{m}$,从光斑的形态(图 7)也可以看出经 SPGD 校正后有明显改善。

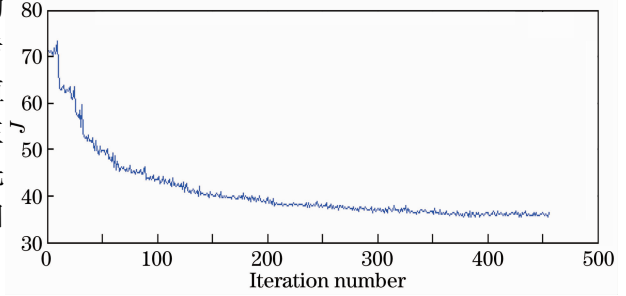


图 3 性能指标 J 的收敛曲线

Fig. 3 Evolution curve of J versus iteration number

4 讨论与分析

以上两个实验都验证了 SPGD 控制算法对静态畸变的波前校正能力。从静态实验可以看出, SPGD 算法收敛后, 远场光斑有了明显改善, 基本验证了该算法的有效性。青海湖的量子通信实验主要在近地面完成远距离的量子通信实验, 包括 50 km 的纠缠分发和 100 km 密钥传输两类实验, 水平湍流造成光斑扩展的影响都比较大。地面站望远镜接收端通过光纤耦合的方式将望远镜焦斑耦合进入单光子探测器, 光纤直径 105 μm 。在不同天气情况下, 实测激光经过水平远距离传输后的光斑直径可以从几十微米到 200 μm 变化, 因此增加 SPGD 校正模块可有效压缩望远镜焦斑直径, 进而提高通信效率, 降低误码率。从 Shack-Hartmann 波前传感器测量的结果可以看出, 校正后的波像差残差仍有 0.310 μm , 没有达到完全校正的效果, 但可以看到远场光斑的分布和能量集中度明显提高。从望远镜的像差校正实验看出, SPGD 收敛后, 系统有效光斑直径为 30 μm 。而在 635 nm 波段, 系统的理论衍射极限光斑直径仅为 14 μm , 也就是说 SPGD 算法还没有校正到接近衍射极限的效果。分析其原因, 校正效果与系统的初始像差成份有很大关系, 实验室模拟的像差 PV 值达到了 3.165 μm , 而且从远场光斑也看出光斑的旁瓣比较多。从外场校正实验看, 系统的像差成份更加复杂, 校正前的远场光斑几乎破碎成几个光斑, 这些高阶的像差成份都限制了 SPGD 算法的校正效果。因此下一步实验将针对不同像差成份选取不同的校正方法和评价因子来开展校正实验。

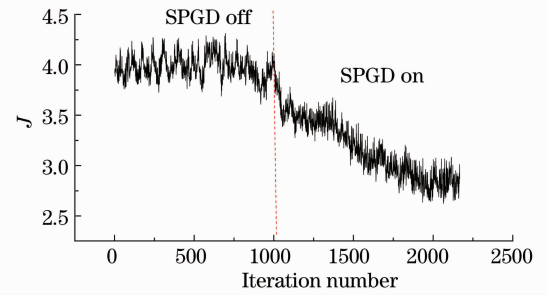


图 5 SPGD 闭环前后的性能指标 J 的收敛曲线
Fig. 5 Evolution curve of J versus iteration number with SPGD off and on

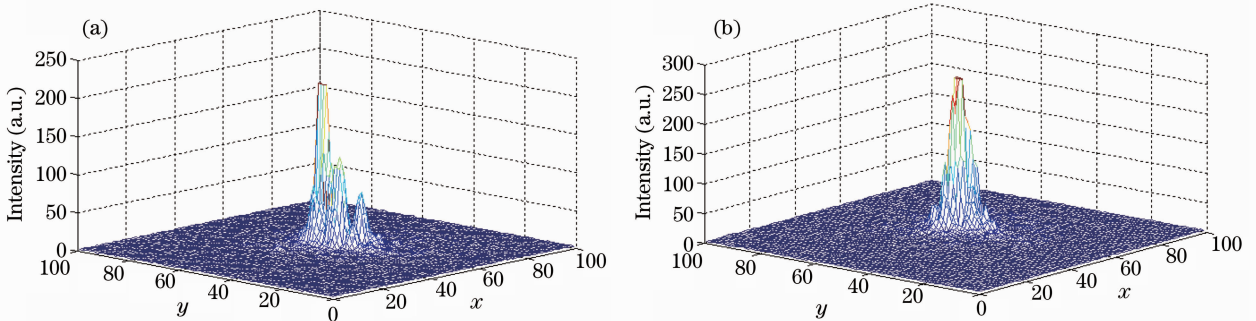


图 6 (a)校正前和(b)校正后 CCD 像面光强分布

Fig. 6 Comparison of intensity distribution (a) before and (b) after SPGD correction

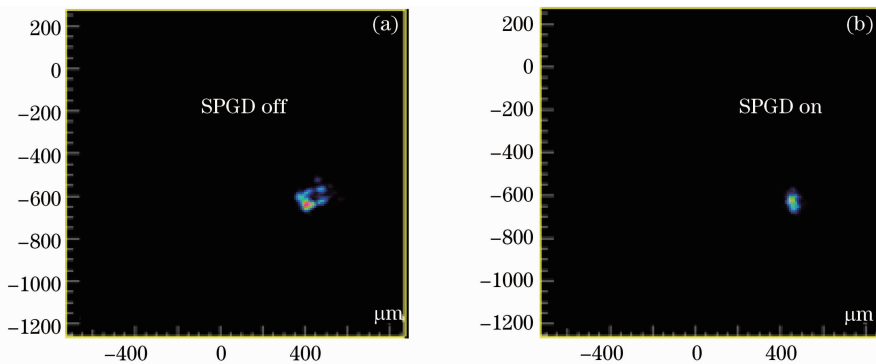


图 7 光束质量分析仪采集的光斑

Fig. 7 Far-field images captured by beam profiler

5 结 论

详细介绍了 SPGD 控制算法的基本原理和实现方法, 开展了 700 mm 量子通信望远镜的静态像差校正

实验。实验结果表明,SPGD 控制算法对静态像差具有较好的校正能力,但需要进行多次迭代才能收敛,获得较好的校正效果。本文仅通过 SPGD 算法实现了望远镜静态像差的校正,下一步将结合量子通信终端开展通信实验,研究望远镜像差和误码率之间的关系。

参 考 文 献

- 1 R. Ursin. Space-QUEST. experiments with quantum entanglement in space [C]. Proceedings of International Astronautical Congress, 2008, A2.1.3
- 2 Liying Tan, Yuqing Yang, Jing Ma *et al.*. Influence of misalignment and aberrations on antenna received power in free-space laser communications [J]. *Opt. Eng.*, 2009, **48**(4): 044201
- 3 H. Hemmati, Y. Chen, I. Crossfield. Telescope wavefront aberration compensation with a deformable mirror in an adaptive optics system [C]. *SPIE*, 2006, **6105**: 61050O
- 4 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
- 5 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
- 6 Yang Huizhen, Li Xingang, Jiang Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm of 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
- 7 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
- 8 Chen Bo, Yang Huizhen, Zhang Jinbao *et al.*. Performances index and convergence speed of parallel gradient descent algorithm in adaptive optica of point source [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1143~1148
陈波, 杨慧珍. 点目标成像自适应光学随机并行梯度下降性能指标与收敛速度[J]. 光学学报, 2008, **29**(5): 1143~1148