

doi:10.3788/gzxb20174610.1011001

基于无波前传感的菲涅耳透镜像差校正实验

文良华^{1,2,3,4}, 杨平^{1,2}, 杨康建^{1,2,3}, 陈善球^{1,2}, 王帅^{1,2}, 刘文劲^{1,2},
孔庆峰^{1,2,3}, 杨静静^{1,2,3}, 许冰^{1,2}

(1 中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

(2 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

(4 宜宾学院 物理与电子工程学院, 四川 宜宾 644000)

摘 要:为提高薄膜菲涅耳透镜成像性能,采用无波前传感的自适应光学系统对菲涅耳透镜点目标成像的波前像差进行实验校正.像差校正控制采用随机并行梯度下降算法,以远场光斑像清晰度函数为优化指标,算法迭代数十次后收敛.系统闭环校正后,焦平面光斑等效半径缩小了 43%,二阶矩为 0.997 5,接近理想极限 1,像清晰函数值和峰值光强提高了一倍,光强的半高全宽达到 1.2 倍衍射极限,调制传递函数的中频分量显著提高.实验结果表明该方法结构简单,能快速、有效地校正菲涅耳透镜波前像差,改善系统的成像性能,可应用于大口径、轻量化的空间望远镜.

关键词:菲涅耳透镜;波前畸变;无波前传感自适应光学;像差校正;成像系统;空间望远镜

中图分类号:TP273.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)10-1011001-7

Experiments of the Aberrations Correction for Membrane Fresnel Lens Based on Wavefront Sensorless

WEN Liang-hua^{1,2,3,4}, YANG Ping^{1,2}, YANG Kang-jian^{1,2,3}, WANG Shuai^{1,2}, CHEN Shan-qiu^{1,2},
LIU Wen-jing^{1,2}, KONG Qing-feng^{1,2,3}, YANG Jing-jing^{1,2,3}, XU Bing^{1,2}

(1 *The Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

(2 *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

(3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(4 *School of Physics and Electronic Engineering, Yibin University, Yibin Sichuan 644000, China*)

Abstract: To improve the imaging quality of Fresnel lens, a wavefront sensorless adaptive optics system is used to compensate the wavefront aberrations in Fresnel lens imaging system for point source. During the aberrations correction, the stochastic parallel gradient descent algorithm is adopted to optimize the image clarity evaluation function, which is converged after dozens of correction iterations. The performance of Fresnel Lens imaging system is improved notably by adaptive optics, that the efficient radius of far-field is reduced by 43%, the corresponding second moment is 0.9975 near to the theoretical limit value 1, the image clarity and the peak value of intensity are enhanced more than once, the corresponding FWHM is upto 1.2DL, and more sufficient medium frequencies are raised up in Modulation Transfer Function (MTF). The results demonstrate that the aberrations in Fresnel lens imaging system for point source is fastly and effectively compensated by the wavefront sensorless adaptive optics system, which is can be applied to the space telescope due to its simple implementation structure.

基金项目:国家自然科学基金(No.60978049),中国科学院创新基金(No.CXJJ-16M208),中国科学院青年创新促进会项目(No.2012280)和中国科学院卓越青年科学家项目资助

第一作者:文良华(1980-),男,副教授,博士研究生,主要研究方向为自适应光学控制与信号处理. wlh45@126.com

导师(通讯作者):杨平(1980-),男,研究员,博士,主要研究方向为自适应光学控制与信号处理. Email: pingyang2516@163.com

收稿日期:2017-05-31; **录用日期:**2017-07-07

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Fresnel lens; Wavefront aberrations; Wavefront sensorless adaptive optics; Aberration corrections; Imaging system; Space telescope

OCIS Codes: 110.1085; 220.1000; 350.1260; 310.6845; 110.1080; 080.1235; 010.0280

0 引言

薄膜菲涅耳透镜具有厚度薄、质量小、易复制、易集成、成本低且可折叠与展开等特点,为轻量化米级大口径空间望远镜的运载与空间布置提供了有利条件.2010年美国启动了大口径薄膜衍射技术的 MOIRE 项目,旨在实现视场超过 100 km^2 ,帧频为 1 帧每秒的成像系统^[1-2],是继美国劳伦斯-利弗莫尔实验室(LLNL) Eyeglass 项目^[3]之后的又一空间望远镜计划. LLNL 实验室在大口径、轻量化薄膜镜的设计与制造工艺等方面取得了一系列进展^[4-5];2014年 L. Koechlin 等人完成了超紫外线 UV 波段、直径为 20cm 的菲涅耳透镜成像系统实验测试并获得了预期结果^[6].目前对菲涅耳透镜的研究主要集中在材料制备与光学特性、光学设计、制造工艺,宽带及色差补偿等方面,并逐步由实验室走向工程化阶段^[7-8].

菲涅耳透镜应用于空间望远镜系统设计面临一个复杂多变的动态空间轨道环境^[9];诸如真空、热交变、原子氧、紫外辐照、高能粒子、电磁辐射等.在空间环境中,如何保证材料性能的稳定性、光学成像参数的精确性,以及成像质量要求的持续可靠性是菲涅耳透镜应用于大口径、轻量化空间望远镜所面临的一个极大挑战.此外,由于制作工艺的限制,菲涅耳透镜在制造加工过程中不可避免的环带结构误差^[10],以及菲涅耳透镜在空间布置阶段难以避免的光学系统误差都将导致成像质量退化.对菲涅耳透镜应用于空间成像所面临的诸多问题,有研究者提出用自适应光学系统进行波前像差补偿^[11].天基空间望远镜不受大气湍流的影响,自适应光学系统主要校正菲涅耳透镜等诸多光路元件引入的慢变化波前像差.无波前传感自适应光学实现结构简单、体积小,有利于空间望远镜飞船载荷和空间布置;且避免了因哈特曼传感器(SH)探测波前畸变的系统非共光路问题,是菲涅耳透镜空间成像系统波前畸变校正的理想方法.

本文针对菲涅耳透镜多级次衍射导致的低信噪比应用场景^[12],介绍了无波前传感自适应光学校正菲涅耳透镜成像光束波前像差的理论基础和相关算法.通过分析无波前传感自适应光学校正前后远场光斑的实验数据,从远场光斑的形态、等效半径、二阶矩、峰值光强、像清晰函数和光学系统传递函数等多个系统成像指标,对无波前传感自适应光学校正菲涅耳透镜像差的效果和速度进行讨论.

1 菲涅耳透镜成像校正原理

为提高菲涅耳透镜应用于空间望远镜的成像质量,须对菲涅耳透镜因加工缺陷、空间环境和系统集成误差等因素导致成像光束波前的畸变进行补偿.成像系统性能可用点扩散函数(Point Spread Function, PSF)及其空域变换的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)综合评价.成像系统的 PSF 可用点目标成像的远场光斑量化,故无波前传感自适应光学对菲涅耳透镜点目标成像波前畸变的校正是改善菲涅耳透镜成像系统性能的基础.

无波前传感自适应光学像差校正模型如图 1,主要由控制器、变形镜(Deformable Mirror, DM)和成像光电探测器(CCD)组成.点目标成像光束经过成像主镜的菲涅耳透镜时,携带其波前畸变 $\varphi(x', y')$,通过 DM 和透镜在焦平面的 CCD 相机成像;控制器根据 CCD 采集的远场光斑获取成像性能指标,采用寻优算法产生

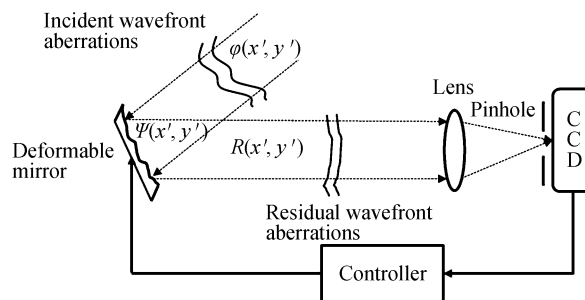


图 1 无波前传感自适应光学系统原理

Fig.1 The Schematic of the wavefront sensorless AO system

控制电压并作用于 DM,DM 产生相应的面形,实现成像光束波前畸变的闭环校正,即通过迭代寻优算法使菲涅耳透镜产生的波前畸变 $\varphi(x',y')$ 和变形镜补偿 $\Psi(x',y')$ 之差 $R(x',y')$ 最小.无波前传感自适应光学寻优控制算法众多,实验采用基于像差模式的随机并行梯度下降(Stochastic Parallel Gradient Descent, SPGD)算法^[13-14].光束的波前像差可展开为任意正交基函数的多项式之和.

$$\varphi(x',y') = \sum_{i=1}^{N_1} \alpha_i Z_i(x',y') \quad (1)$$

$$\Psi(x',y') = \sum_{i=1}^N \beta_i Z_i(x',y') \quad (2)$$

式中, $Z_i(x',y')$ 为任意正交基函数, α_i 和 β_i 为其系数,入射光瞳坐标为 (x',y') ,文中采用泽尼克多项式作为像差模式.基于模式的 SPGD 算法直接对像差模式的系数进行迭代求解,通过像差模式与 DM 面形影响函数的关系矩阵,将求解的模式系数转换成电压并作用于 DM.基于像差模式的 SPGD 算法原理为

$$\boldsymbol{\alpha}^{(k+1)} = \boldsymbol{\alpha}^{(k)} + \gamma \cdot \Delta \boldsymbol{\alpha}^{(k)} \cdot \Delta \mathbf{J}^{(k)} \quad (3)$$

$$\Delta \mathbf{J}^{(k)} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\alpha}^{(k)} + \Delta \boldsymbol{\alpha}^{(k)}) - \mathbf{J}(\boldsymbol{\alpha}^{(k)} - \Delta \boldsymbol{\alpha}^{(k)}) \quad (4)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{C}_{zv} \boldsymbol{\alpha} \quad (5)$$

式中, $\boldsymbol{\alpha}^{(k)} = (\alpha_1^{(k)}, \alpha_2^{(k)} \cdots \alpha_N^{(k)})$ 为 K 时刻的泽尼克多项式系数矢量, $\boldsymbol{\alpha}^{(k+1)}$ 为 $K+1$ 时刻的系数矢量, $\Delta \boldsymbol{\alpha}^{(k)}$ 为 K 时刻服从伯努利分布的泽尼克多项式随机系数矢量, γ 为增益步长, $\Delta \mathbf{J}^{(k)}$ 为向 DM 施加 $(\boldsymbol{\alpha}^{(k)} + \Delta \boldsymbol{\alpha}^{(k)})$ 和 $(\boldsymbol{\alpha}^{(k)} - \Delta \boldsymbol{\alpha}^{(k)})$ 泽尼克模式系数矢量对应的电压后的系统优化指标量之差,即 K 时刻 $\mathbf{J}^{(k)}$ 的梯度估计. $\mathbf{v} = (v_1, v_2 \cdots v_M)$ 是 DM 驱动器电压矢量, \mathbf{C}_{zv} 是维数为 $M \times N$ 的模式系数矢量转电压的关系矩阵.SPGD 算法向控制指标量梯度方向迭代寻优完成像差的校正.实验采用 SPGD 算法的控制指标量 J 为远场光强 $I(x,y)$ 的像清晰度函数^[15-16].根据傅里叶光学可知残余波前像差 $R(x',y')$ 与焦平面光强分布的关系^[17] 为

$$J = \frac{\iint_s I(x,y)^2 dx dy}{\left(\iint_s I(x,y) dx dy \right)^2} \quad (6)$$

$$I(x,y) = \left| \iint A(x',y') \cdot \exp[jR(x',y')] \cdot \exp \frac{jk[(x'-y)^2 + (y'-y)^2]}{2z} dx' dy' \right| \quad (7)$$

式中, (x,y) 为焦平面坐标, $A(x',y')$ 为入射光波振幅, z 为正透镜焦距, j 为虚数单位, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为成像波长.在点目标成像中,当 $R(x',y')$ 为零时 $I(x,y)$ 为衍射极限的艾丽斑,成像效果最好.无波前传感自适应光学校正菲涅耳透镜成像系统像差,系统成像性能的改善可用点扩展函数 PSF 和调制传递函数 MTF 评价,其收敛速度可采用远场光斑 $I(x,y)$ 的等效半径 R_0 、二阶矩 M_0 ,归一化像清晰函数 J 等指标评价.

$$R_0 = \frac{\iint_s \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} I(x,y) dx dy}{\iint_s I(x,y) dx dy} \quad (8)$$

$$x_0 = \frac{\iint_s x \cdot I(x,y) dx dy}{\iint_s I(x,y) dx dy}, y_0 = \frac{\iint_s y \cdot I(x,y) dx dy}{\iint_s I(x,y) dx dy} \quad (9)$$

$$M_0 = \frac{\iint_s I(x,y) (1 - r^2/R^2) dx dy}{\iint_s I(x,y) dx dy} \quad (10)$$

式中, $I(x,y)$ 为远场光强,其质心为 (x_0, y_0) , S 为远场光斑积分面积. R 为光斑圆形区域提取半径, $r^2 = x^2 + y^2$ (若 $x^2 + y^2 > R^2$ 时, $r=0$);远场二阶矩 M_0 定义中的 $1 - r^2/R^2$ 为像素灰度权重因子,使远场光斑中心像素灰度权重最大,光斑边缘灰度权重最小;通过加权提取可有效减小点目标成像中相机噪声的影响^[18].由式(7)表示的像差与远场光强的关系,以及光强等效半径 R_0 、二阶矩 M_0 和清晰化函数 J 的定义可

知:随着自适应光学校正过程中波前像差的减小,二阶矩 M_0 和清晰化函数 J 随着而增大,而等效半径 R_0 则变小^[16-17].

2 实验

菲涅耳透镜成像的波前像差校正实验系统如图 2,主要由平行光源、成像菲涅耳透镜、缩束子系统、倾斜镜 TM_1 、变形镜 DM 、哈特曼复合传感器 SH 、高压放大器、控制计算机和相关数据采集系统组成.无波前传感自适应光学系统由复合传感器的远场探测相机、倾斜镜 TM_2 、变形镜 DM 和控制计算机构成.实验采用的 SPGD 控制算法基于实时 Linux 内核模块构架开发,兼顾电控系统的实时性和灵活性.

菲涅耳透镜非成像的多级次衍射光作为成像系统背景噪声,使系统波前探测的信噪比下降,导致 SH 质心探测精度变差.实验中菲涅耳透镜成像波前的 SH 探测光斑如图 3 所示.非成像级次的衍射光使 SH 探测的中心子孔径光斑弥散,严重影响波前探测精度,如果采用基于波前探测的自适应光学校正菲涅耳透镜波前像差时,将面临波前探测光路调整和算法改进等问题;而无波前传感自适应光学无需波前探测,这是其校正菲涅耳透镜成像系统的慢变化像差的另一优势.

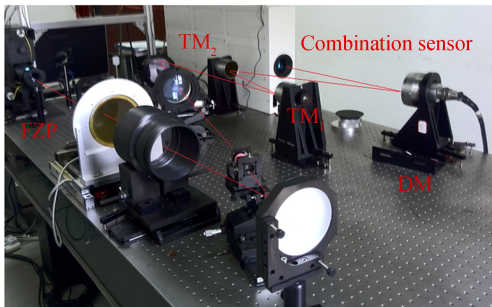


图 2 菲涅耳透镜点目标成像波前校正实验系统

Fig.2 The experimental system for correcting aberrations of Fresnel lens imaging

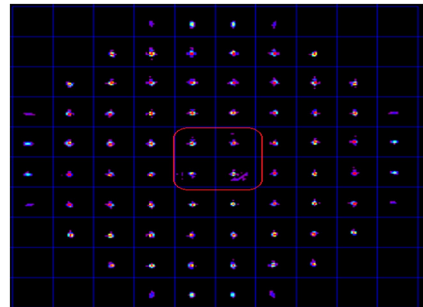
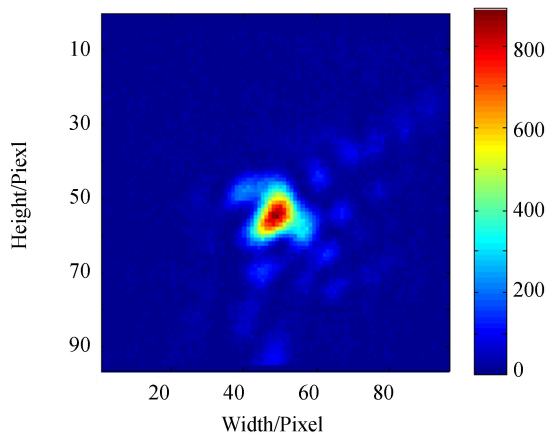


图 3 菲涅耳透镜成像系统波前哈特曼探测

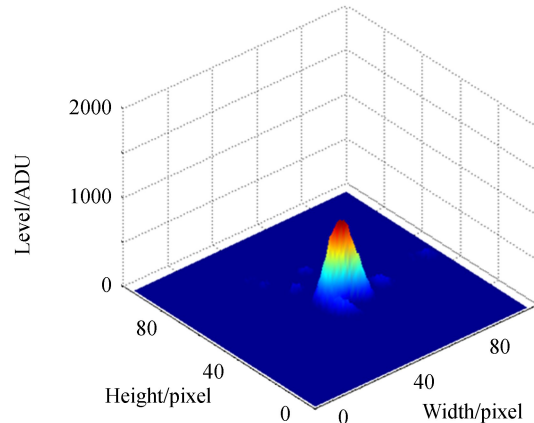
Fig.3 The sample of SH for detecting wavefront of Fresnel lens imaging system

3 实验结果及分析

菲涅耳透镜点目标成像系统实验采用基于 SPGD 算法的无波前传感自适应光学闭环校正其像差;实时采集闭环前后共 1024 帧远场光斑图像,完成菲涅耳透镜成像系统性能分析.在 SPGD 算法实现像差闭环校正前后的远场光斑和光强三维形态如图 4 所示.图 4(a)是闭环前的原始光斑,其三维分布为图 4(b)所示;闭环后的光斑和三维分布分别如图 4(c)、图 4(d)所示.SPGD 闭环收敛后远场光斑形态优化,峰值光强从 768ADU 提高到 1767ADU,获得了 1.2 倍衍射极限的效果.



(a) The far-field spot without aberrations corrections



(b) The intensity in cubic dimensions without aberrations corrections

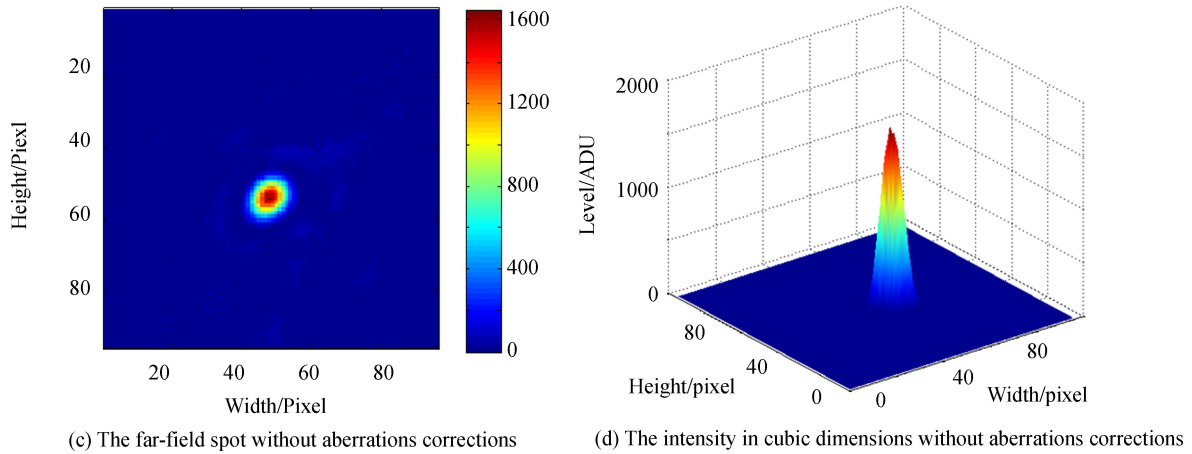


图4 校正前后的远场光强
Fig.4 The far-field intensity

菲涅耳透镜点目标成像系统的 PSF 可用焦平面远场光斑量化,其空域变换形式 MTF 如图 5.无波前传感自适应光学闭环校正后,菲涅耳透镜成像系统的 MTF 中频分量明显提升,MTF 曲线与坐标轴围绕的面积显著增大,菲涅耳透镜的成像质量和性能得到了极大改善.

处理远场光斑的图像数据,计算光斑的等效半径 R_0 、二阶矩 M_0 ,归一化像清晰函数 J 等指标,这些指标表征了无波前传感自适应光学校正菲涅耳透镜成像光束波前畸变的动态过程.远场光斑的二阶矩 M_0 和像清晰函数 J 随波前残差的减小而增大,等效半径 R_0 随波前残差的减小而减小.远场光斑的二阶矩、等效半径和像清晰函数在无波前传感自适应光学闭环校正迭代过程中的收敛特性如图 6~图 8.

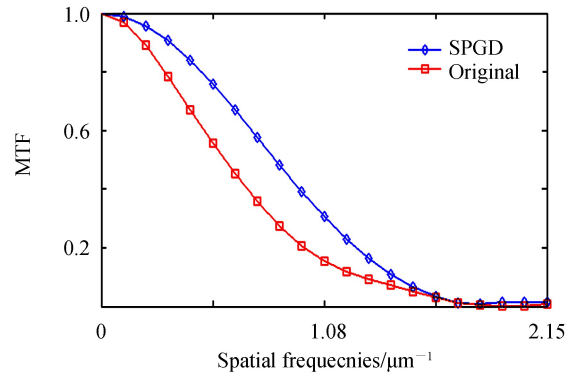


图5 成像系统 MTF 曲线
Fig.5 The MTF curves of imaging system

从远场光斑的二阶矩、等效半径和像清晰函数在闭环过程中收敛情况可知,采用 SPGD 算法的无波前传感自适应光学闭环后,经数十次迭代接近于收敛(一次迭代需要采集 4 帧图像).图 6 所示的远场光斑二阶矩收敛后为 0.9975,接近于衍射极限理论值 1.图 7 所示的远场光斑等效半径闭环收敛后减小了 43%.图 8 所示的像清晰函数值闭环后收敛后提高了 1 倍.通过实验数据分析的 PSF 和 MTF 曲线特性可知无波前传感自适应光学能有效校正菲涅耳透镜的成像光束波前畸变,提高其成像质量;而远场光斑的二阶矩、等效半径和像清晰函数的收敛曲线表明无波前传感自适应光学能快速校正菲涅耳透镜成像光束波前畸变.

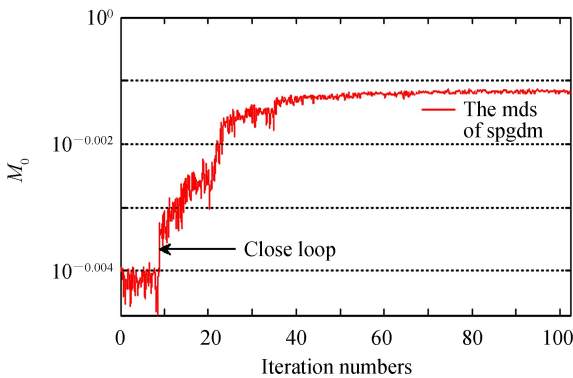


图6 远场二阶矩
Fig.6 The secondary moment of focal spot in iterations

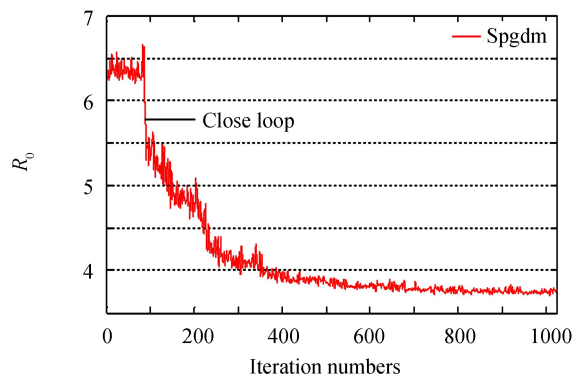


图7 远场等效半径
Fig.7 The efficient radius of focal spot

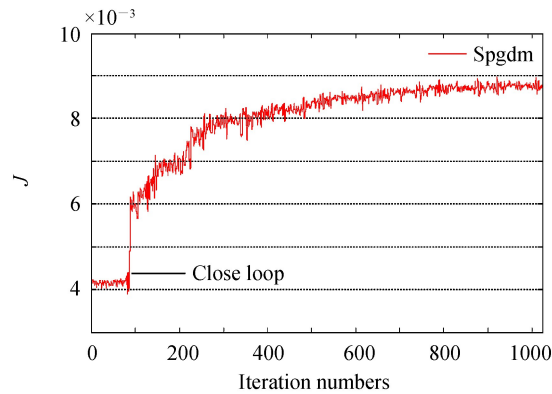


图8 像清晰函数值

Fig.8 The image clarity of focal spott

4 结论

本文针对菲涅耳透镜应用于大口径、轻量化的空间望远镜成像系统所面临的环境因素、环带结构缺陷、低信噪比问题,以及空间望远镜有限载荷的应用场景,介绍了无波前传感自适应光学对菲涅耳透镜成像光束波前畸变的校正实验.通过对实验数据的处理和分析表明,自适应光学系统闭环校正后,菲涅耳透镜成像系统的 PSF 和 MTF 明显改善,菲涅耳透镜成像系统性能获得了 1.2 倍衍射极限的效果.从像清晰函数值、远场光斑的等效半径和二阶矩的收敛曲线得知,SPGD 算法经数十次校正迭代接近收敛,这些指标曲线的动态特性表明,无波前传感自适应光学系统能快速有效的校正菲涅耳透镜成像光束波前畸变.实验结果初步验证了无波前传感自适应光学校正空间望远镜的菲涅耳透镜成像系统波前像差的有效性和可行性.后续将开展无波前传感的自适应光学系统应用于菲涅耳透镜扩展目标成像系统像差校正实验研究.

参考文献

- [1] MACEWEN H A, BRECKINRIDGE J B. Large diffractive refractive apertures for space and airborne telescopes[C]. SPIE Defense Security and Sensing International Society for Optics and Photonics, 2013, **873904**:1-16.
- [2] DOMBER J L, ACTHESON P, KMEMERS J. Ground test bed result for large membrane telescope[C]. AIAA, 2014, **1510**:1-17.
- [3] HYDE R A. Eyeglass L.Very large aperture diffractive telescope[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(19):4198-4121.
- [4] HYDE R A, DIXIT S N, WEISBERG A H. Eyeglass: a very large aperture diffractive space telescope[C]. Astronomical Telescopes and Instrumentation International Society for Optics and Photonics, 2002, **2002**: 28-39.
- [5] ATCHESON P D, STEWART C, DOMBER J, *et al.* MOIRE; initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight optical telescopes[C]. SPIE Astronomical Telescopes Instrumentation International Society for Optics and Photonics, 2012, **84422**:1-14.
- [6] KOECHLIN L, YADALLEE M, RAKSASATAYA T, *et al.* New progress on the Fresnel imager for UV space astronomy[J]. *Astrophys Space Science* 2014, **354**(47):147 - 153.
- [7] DEVER J, MILLER S, MESSER R, *et al.* Exposure of polymer film thermal control materials on the materials international space station experiment[J]. *MISSE* 2002, **32**(11):114-118.
- [8] WANG P, MOHAMMAD N, MENON R. Chromatic-aberration-corrected diffractive lenses for ultrabroadband focusing [J]. *Scientific Report*, 2016, **2**, (21545):1-7
- [9] TRIBBLE A C. The space environment: implications for spacecraft design[M]. Princeton: Princeton University Press, 2003:12-50.
- [10] CHRISTOPH P, REHBEIN S, WERNER S, *et al.* Influence of random zone positioning errors on the resolving power of Fresnel zone plates[J]. *Optics Express*, 2014, **2014**(10): 30482-30491.
- [11] HANSEN R. Developing lightweight optics for space[J]. *Transmissive Diffractive Optics*, 2013, **2**(1):20-23.
- [12] 张斌智.波带片的设计及衍射特性研究[D].杭州:浙江大学,2010:12-65.
- [13] VORONTSOV M A, SIVOKON V P. Stochastic parallel gradient descent technique for high-resolution wave front phase-distortion correction[J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*, 1998, **15**(10):2745-2758.
- [14] VORONTSOV M A, CARHART G W, RICKLIN J C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. *Optics Letters*, 1997, **22**(12): 907-909.
- [15] YANG Hui-zheng, LI Xin-yang, GONG Chen-glong, *et al.* Restoration of turbulence-degraded extended object using

- the stochastic parallel gradient descent algorithm: numerical simulation[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(5):3052-3062.
- [16] 刘文劲.多波前校正器解耦控制技术研究[D].北京:中国科学院大学,2014: 73-80.
- [17] 吕乃光.傅立叶光学[M].第2版.北京:机械工业出版社,2006.
- [18] YANG Hui-zhen, SOLOVIEV O, VERHAEGEN M. Model-based wavefront sensorless adaptive optics system for large aberrations and extended objects [J]. *Optics Express*, 2015, **23** (19): 24587-24601.