

一种大视场望远镜误差校正方法的研究

周龙峰^{1,2} 张 昂¹ 张俊波¹ 鲜 浩¹

¹中国科学院光电技术研究所自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于两镜反射式望远镜系统,以主镜为基准,分析了当非球面次镜由于偏心、倾斜、主次镜间距产生变化时对望远镜系统波前像差的影响。根据理论分析,提出了一种望远镜系统误差校正的方法。该方法先后以轴上视场光斑的半径和全视场光斑的平均半径作为成像质量的评价指标,利用随机并行梯度下降算法对次镜的位置进行调整,最终使全视场光斑半径的平均值收敛到极值,即认为成像质量达到最佳。针对里奇-克列基昂(R-C)结构望远镜系统进行了仿真分析。结果表明,次镜位置调整后能够使视场内所探测的光斑半径的平均值收敛到极值。该方法使望远镜系统误差的校正具有外在标准,能够使望远镜在观测过程中进行校正。

关键词 成像系统; 两镜反射式望远镜; 次镜; 平均半径; 随机并行梯度下降算法

中图分类号 O438 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0611005

An Error Correction Method Research Based on Large Field Reflecting Telescope

Zhou Longfeng^{1,2} Zhang Ang¹ Zhang Junbo¹ Xian Hao¹

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract For a two-mirror reflecting telescope, if the position of primary mirror is set as standard, the influences of de-center, tilt of a aspheric secondary mirror and de-space between primary and secondary mirrors on wavefront aberration of the telescope are analyzed. An error correction method of the telescope is proposed based on the theory. The method firstly uses the radius of spot diagram on axis and secondly uses the mean radius of all fields spot diagrams as performance metric of imaging quality. The position of secondary mirror is adjusted by stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm. Finally, the mean radius of all fields spot diagrams converge to regard as the situation of best imaging quality. The process is achieved in a Ritchey-Chretien (R-C) telescope by computer simulation, and the results show that the correction of secondary mirror makes the mean radius of all fields spot diagrams converge. The method gives the error correcting of the telescope an external standard and can be used to correct error in observation process of the telescope.

Key words imaging systems; two-mirror reflecting telescope; secondary mirror; mean radius; stochastic parallel gradient descent algorithm

OCIS codes 110.6770; 110.1080; 220.1140; 220.1010

1 引 言

理想情况下,里奇-克列基昂(R-C)结构反射式望远镜的系统误差控制在公差范围内才能保证光学系统的成像质量。然而在实际运行过程中,由于受温度、重力、振动等因素的影响,光学系统结构会产生变化,从而使

收稿日期: 2014-12-01; 收到修改稿日期: 2015-01-07

基金项目: 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA04060902)

作者简介: 周龙峰(1988-),男,博士研究生,主要从事大口径望远镜在线调整方面的研究。E-mail: zlfblue@126.com

导师简介: 鲜 浩(1969-),男,硕士,研究员,主要从事自适应光学和光机系统设计方面的研究。

E-mail: xianhao@ioe.ac.cn(通信联系人)

成像质量大大降低^[1]。自适应光学(AO)技术能够减小其对成像质量的影响^[2],然而若系统误差过大,超过了AO校正范围,则无法实现校正,即使不超出AO校正动态范围,校正此类像差将导致波前校正器长期处于同一校正状态,会降低其工作性能。因此,需要更恰当的方式对由于系统误差造成的成像质量变差进行校正。

在望远镜系统中,当主次镜相对位置存在误差时,通常以主镜为参考,对次镜进行调整。根据像差理论^[3-5],次镜垂直光轴的偏移和倾斜主要产生彗差和像散。对于R-C系统理想状态各视场均无彗差,当次镜存在误差时各视场点彗差相同且产生双节点像散现象,轴向偏移则产生离焦和球差。因此,需要对次镜位置进行调整来校正像差。对于视场较小的系统,通过对次镜进行多自由度的调节,当轴上视场远场图像的清晰度函数收敛到极值即可认为望远镜系统误差得到校正。然而随着望远镜系统视场的增大,像散往往变得不可忽略^[6],仅仅依靠轴上视场图像的清晰度函数作为校正依据已经不能完成系统的最佳校正。轴上视场光斑清晰度函数达到极值并不能保证轴外视场光斑清晰度函数达到极值,即大视场望远镜的像差校正需要同时考虑轴上视场和轴外视场。

目前,国内外研究存在多种对望远镜系统误差进行校正的方法。车驰骋等^[7-8]利用矢量波像差理论,建立了系统失调量和波前Zernike像差系数的关系,通过像差系数的测量而反向计算出次镜位置误差,实现望远镜系统的校正。该方法需对波前信息进行测量,波前探测可以使用夏克-哈特曼波前传感器、曲率传感器等,也可利用图像信息进行波前复原^[9-10]。然而,波前探测增加了系统复杂度,且校正范围较小。Luna^[11]提出利用离焦星点图对位置误差进行校正,该方法通过光斑形态与失调量之间的对应关系求解失调量,其校正精度较低。国内孙敬伟等^[12]也对该方法进行了仿真分析和实验研究。Kim等^[13]利用优化函数衰减法对某一特定望远镜系统进行了校正,该算法将实测的波前像差与其光学系统模型的像差进行对比,通过一定的算法寻找两者最接近时的系统状态,该状态即为系统的失调状态。该方法同样需要对波前信息进行测量且迭代收敛时间不确定。张晓明等^[14]利用基于像散分解的对准方法,该方法将波前信息的像散项用于误差的求解。本文提出一种望远镜系统误差校正方法。该方法利用远场光斑的清晰度函数作为目标函数,将随机并行梯度下降(SPGD)算法^[15]作为优化控制算法,对次镜的位置进行优化。与其他各种波前测量方法相比,该方法无需进行系统波前测量,而是以视场内光斑的清晰度函数作为评价标准,相比而言是一种半定量的、简单实用的方法。仿真分析表明该方法具有可行性。

2 理论基础

2.1 次镜位置误差对系统的影响

根据像差理论,对次镜位置变化所造成的波前像差影响进行分析。若以次镜设计位置中心顶点作为坐标系原点,光轴为 z 轴,垂直光轴沿 x,y 轴方向建立直角坐标系,则次镜的偏差可以定义为 z 方向的平移 D_z , x 、 y 方向的平移 D_x 、 D_y 以及绕 x 、 y 轴的旋转 T_x 、 T_y 共5个参量,图1为 D_y 、 T_x 、 D_z 偏差示意图。

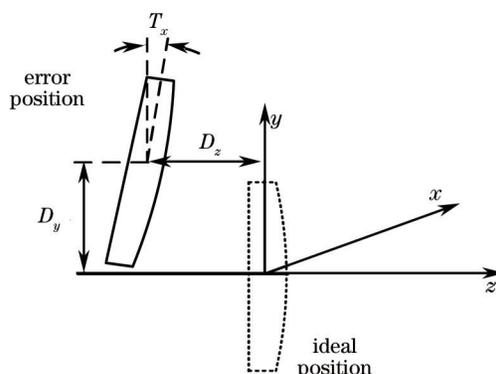


图1 次镜位置偏差示意图

Fig.1 Schematic diagram of secondary mirror position error

根据三阶矢量波像差理论,对于R-C结构的望远镜系统,次镜处于理想位置时波前彗差和像散分别为

$$W_{\text{coma}} = \left(\sum_j W_{131j} H \cdot \rho \right) (\rho \cdot \rho), \quad (1)$$

$$W_{ast} = \frac{1}{2}(\sum_j W_{222j} H^2) \cdot \rho^2, \quad (2)$$

式中 j 是光学系统中光学元件的表面数, W_{131j} 和 W_{222j} 分别为第 j 面系统波像差的三阶彗差和像散系数, H 为归一化视场向量, ρ 为归一化光瞳向量,向量示意如图2所示。

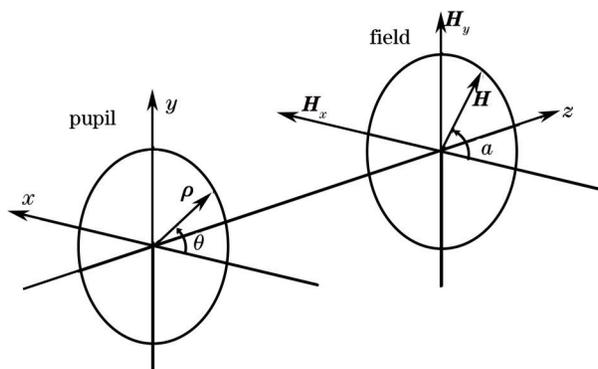


图2 归一化瞳面及像面坐标示意图

Fig.2 Schematic diagram of normalized pupil and field coordinate

由于第 j 面的平移 D_x 、 D_y 或旋转 T_x 、 T_y 会使该面的像差对称中心产生 σ_j 的偏移,从而使彗差和像散公式分别更改为

$$W'_{coma} = [(\sum_j W_{131j} H - \sum_j W_{131j} \sigma_j) \cdot \rho](\rho \cdot \rho), \quad (3)$$

$$W'_{ast} = \frac{1}{2}[\sum_j W_{222j} H^2 - 2H(\sum_j W_{222j} \sigma_j) + \sum_j W_{222j} \sigma_j^2] \rho^2. \quad (4)$$

对于彗差,(3)式中增加一项 $-(\sum_j W_{131j} \sigma_j \cdot \rho)(\rho \cdot \rho)$;对于像散,(4)式中增加 $(1/2)[-2H(\sum_j W_{222j} \sigma_j)] \rho^2$ 和 $\frac{1}{2}(\sum_j W_{222j} \sigma_j^2) \rho^2$ 两项。对于轴上视场, $H=0$, (3)式中仅包含增加项 $-(\sum_j W_{131j} \sigma_j \cdot \rho)(\rho \cdot \rho)$, (4)式仅包含最后一项 $\frac{1}{2} \sum_j W_{222j} \sigma_j^2 \rho^2$ 。若偏差较小,轴上视场像散增加项相对彗差增加项可忽略不计^[6]。对于R-C结构的望远镜系统,当沿光轴方向产生位移时,像差为离焦和球差,此时可以通过次镜沿轴向移动进行校正。当垂直光轴方向产生偏移和倾斜时,视场内产生恒定彗差,此时可以通过次镜垂直光轴的平移或倾斜进行校正。当轴上视场得到校正后 $\sum_j W_{131j} \sigma_j = 0$,轴外视场 $H \neq 0$,则可能存在较大的像散增加项 $H(\sum_j W_{222j} \sigma_j)$ 。此时通过次镜进行校正时需要同时考虑轴上视场和轴外视场。若不考虑镜面面型的变化,望远镜系统误差主要为主次镜相对位置误差,对于轴上视场,若像差得到校正,主次镜中心轴交于零彗差点^[16],如图3所示。

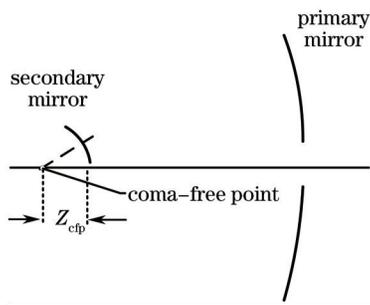


图3 R-C望远镜示意图

Fig.3 Schematic diagram of R-C telescope

零彗差点与理想情况下次镜中心顶点距离 Z_{cfp} 满足

$$Z_{cfp} = \frac{2L(m_2^2 - 1)}{(m_2 + 1)^2 [(m_2 - 1) - (m_2 + 1)b_{s2}]}, \quad (5)$$

式中 L 为理想情况下次镜中心顶点与焦面中心距离, m_2 为次镜放大率, 即系统焦距与主镜焦距之比, 满足 $m_2 = f'/f_1'$, f' 为望远镜系统的焦距, f_1' 为主镜的焦距, b_2 为次镜非球面系数。若绕该点旋转, 次镜的平移 D 和旋转 T 所产生的彗差在轴上视场始终可以相互抵消。因此在轴上视场得到校正后, 可以通过次镜绕零彗差点旋转, 以全视场光斑的清晰度函数作为校正依据, 实现最终的校正。

2.2 校正流程

2.1 节的分析表明, 对于 R-C 结构的望远镜系统的校正可以分为两个步骤: 1) 轴上视场校正; 2) 全视场校正, 利用双边扰动随机并行梯度下降算法(B-SPGD)迭代寻找远场光斑目标函数 J 出现极值的次镜位置。算法基本思想为系统性能优化指标 J 可认为是控制参量 U 的函数, 即 $J=J(U)$, 其中 $U=(u_1, u_2, u_3, \dots, u_n)$, 共包括 n 个变量, 对于次镜误差的校正, U 为次镜的位置参量。对控制参量分别施加正扰动 $\{+\delta u_1, +\delta u_2, \dots, +\delta u_n\}$ 和负扰动 $\{-\delta u_1, -\delta u_2, \dots, -\delta u_n\}$, 分别得到扰动后的目标函数 J_+ 和 J_- , 其中 $\{\delta u_1, \delta u_2, \dots, \delta u_n\}$ 中 n 个参量的正负满足伯努利分布。若定义 $\delta J = J_+ - J_-$, 则第 k 次迭代后控制变量 U^{k+1} 与前一次 U^k 满足

$$U^{(k+1)} = \{u_j^{k+1}\} = \{u_j^k - r \cdot \delta J \cdot \delta u_j\}, \quad (6)$$

式中 j 表示第 j 个变量, 共 n 个。 r 为增益系数, 若 J 收敛到极小值, 则 r 为正, 反之为负。由于 z 方向和 x, y 方向同时迭代时存在耦合, 目标函数可能会收敛到局部极值, 因此将 z 方向和 x, y 方向分别进行迭代, 其中 z 方向迭代时仅包含一个扰动量 δu_z 。对于轴上视场校正, x, y 方向的扰动量为 $\delta u_x, \delta u_y$ 。对于全视场的校正, x, y 方向的扰动量为绕零彗差点的旋转参量 $\delta u_{rx}, \delta u_{ry}$, 校正过程如图 4 所示。对轴上视场进行校正, 分别通过对 z 方向和 x, y 方向的平移使轴上视场清晰度函数收敛到极值。对全视场进行校正, 分别通过 z 方向的平移以及 x, y 方向绕零彗差点的旋转使全视场清晰度函数收敛到极值, 最终使次镜达到最优位置。

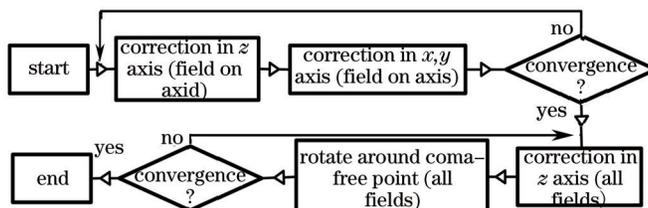


图 4 R-C 望远镜误差校正流程图

Fig.4 Flow chart of position error correction of R-C telescope

对望远镜所探测的多视场光斑依次进行编号, 分别为 $k=0, 1, 2, \dots, m$, 定义轴上视场编号为 0。对于光斑的清晰度函数^[17], 定义每个视场点光斑的半径为

$$R_k = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \sqrt{(x_i - x')^2 + (y_j - y')^2} I_{ij}}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p I_{ij}}, \quad (7)$$

式中 I_{ij} 为 CCD 靶面第 (i, j) 个像素点灰度值, 假设靶面为正方形, 行、列方向像素个数均为 p , 定义正方形靶面边长为 2, 以靶面中心沿边长方向建立直角坐标系, 则可定义第 (i, j) 个像素点的坐标值 (x_i, y_j) , 从而可以计算出该定义下 (7) 式中光斑半径大小, x', y' 为质心坐标值, 满足

$$x' = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p x_i I_{ij}}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p I_{ij}}, \quad y' = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p y_j I_{ij}}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p I_{ij}}. \quad (8)$$

当系统像差减小时, 半径相应减小, 因此可以用光斑的半径作为其成像清晰度的评判标准。对于轴上视场的校正, 清晰度函数为 $J=J_0=R_0$, 即轴上视场光斑的半径, 当 J_0 收敛到极值即认为轴上视场成像质量达到最佳; 对于全视场的校正, 清晰度函数为 $J=J'$, 即所有视场光斑半径的平均值,

$$J' = \left(\sum_{k=0, 1, 2, \dots, m} R_k \right) / (m + 1). \quad (9)$$

由 (9) 式可知, 当 J' 收敛到极值即认为全视场成像质量达到最佳。

3 仿真分析

基于第2节的理论分析,利用双边扰动随机并行梯度下降算法(B-SPGD)对特定R-C结构望远镜系统误差进行校正。在仿真分析中,假设望远镜系统像差主要为次镜相对位置误差。仿真系统由主镜、次镜以及平面反射镜和像场改正器组成,其结构如图5所示,主次镜参数如表1所示。R-C系统及后组组合焦距 $f'=-5405$ mm,次镜放大率 $m_2=-7.6886$,零彗差点与次镜中心顶点距离 $Z_{cp}=-7.1189$ mm。由于该望远镜系统设计视场为 0.7° ,因此针对该范围光斑进行校正分析。

表1 R-C望远镜结构参数
Table 1 Parameters of R-C telescope

Surface	Semi-diameter /mm	R /mm	d /mm	conic
Primary mirror	880	-5400	-2292	-1
Secondary mirror	142.9	-938	1807	-1.688

根据光学系统成像的傅里叶变换关系可得远场光斑的能量分布为

$$I(x,y) = |E(x,y)|^2 = \left| C \iint E(x_1,y_1) \exp[-i2\pi(f_x x_1 + f_y y_1)] dx_1 dy_1 \right|^2, \quad (10)$$

式中 $I(x,y)$ 、 $E(x,y)$ 分别为像面 (x,y) 的光强和复振幅, C 为与系统及靶面位置相关的参数, $E(x_1,y_1)$ 为光瞳面 (x_1,y_1) 复振幅, f_x, f_y 为系统空间频率。由于光学系统存在三阶球差,其Zernike系数 $Z_{11}=0.088 \lambda$,故光瞳面复振幅为 $E(x_1,y_1)=E_0 \exp(i\Delta\omega)$,其中 $\Delta\omega$ 为三阶球差Zernike多项式。假设CCD探测器读取位数为16位,像素间隔为 $\lambda/2D$,其中波长 $\lambda=0.65 \mu\text{m}$,入瞳直径 $D=1760$ mm,靶面像素数为 200×200 。如果系统处于设计位置时轴上视场远场光斑峰值强度 $I_{\max}=60000$ ADU(ADU为探测器输出灰度值的单位),取靶面中心 $100 \text{ pixel} \times 100 \text{ pixel}$ 区域,则轴上视场远场光斑如图6所示。根据(7)、(8)式可得其平均半径 $J_0=0.05$ 。

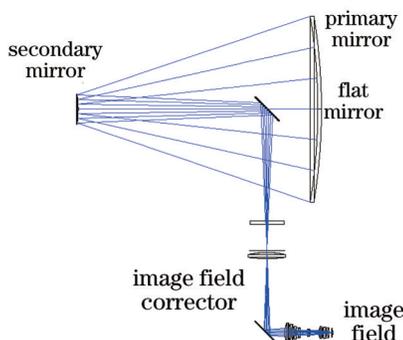


图5 R-C望远镜结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of R-C telescope

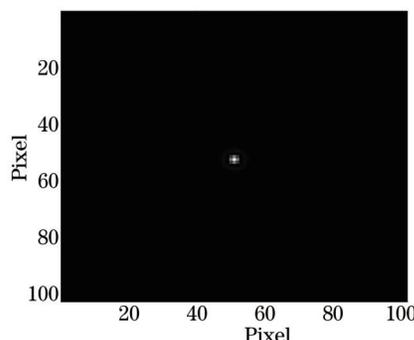


图6 理论情况下轴上视场远场光斑

Fig.6 Far-field spot diagram on axis in theory

3.1 轴上视场校正

利用ZEMAX光学设计软件和Matlab软件对误差校正过程进行仿真分析。仿真中根据实际情况对次镜的扰动大小以及最小步长进行限制,假设 z 方向的扰动大小以及最小步长 $\delta u_z=25 \mu\text{m}$, $dz_{\min}=1 \mu\text{m}$ 。 x,y 方向平移 $\delta u_x=\delta u_y=50 \mu\text{m}$, $dx_{\min}=dy_{\min}=1 \mu\text{m}$ 。绕 x,y 轴旋转分别为 $\delta u_{ix}=\delta u_{iy}=0.005^\circ$,旋转最小步长 $t_{x_{\min}}$ 和 $t_{y_{\min}}$ 满足 $t_{x_{\min}}=t_{y_{\min}}=0.001^\circ$ 。由于系统存在误差后远场光斑峰值强度 I_{\max} 相应减小,当误差过时光强太弱,无法进行探测,因此根据实际情况对误差大小进行设定,使光斑在可探测范围内。假设次镜初始偏移量 $D_x=0.6$ mm, $D_y=0.88$ mm, $D_z=0.08$ mm, $T_x=0.1^\circ$, $T_y=0.03^\circ$, CCD探测器参数如前所述。轴上视场校正中目标函数 J_0 收敛曲线如图7所示,经过一定次数的迭代,光斑半径收敛到稳定值。

校正前轴上视场光斑如图8(a)所示,主要以彗差和离焦为主,目标函数 $J_0=0.65$ 。校正后光斑如图8(b)所示,目标函数约为 $J_0=0.05$,与理论情况下目标函数值近似相同,校正后能够使轴上视场收敛到全局最优。

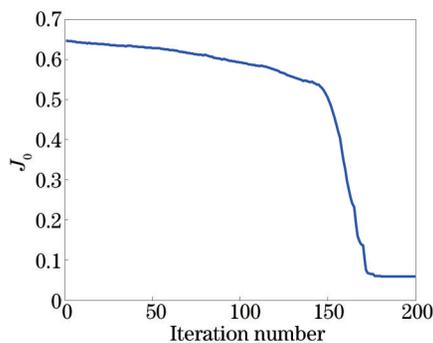


图 7 轴上视场迭代收敛曲线

Fig.7 Field iteration convergence curve on axis

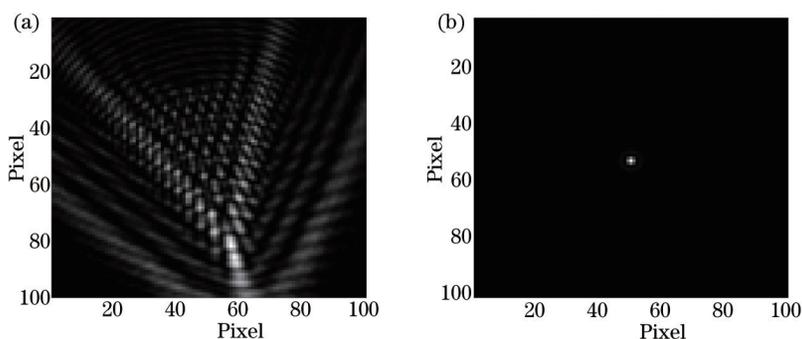


图 8 轴上视场远场光斑。(a) 校正前; (b) 校正后

Fig.8 Far-field spot diagram on axis. (a) Before correction; (b) after correction

3.2 全视场校正

轴上视场得到校正后,须考虑全视场目标函数 J' 的迭代收敛,校正过程包括沿 z 方向平移和 x 、 y 方向绕零彗差点旋转共三个参量,且 z 方向独立迭代校正。在像面位置建立直角坐标系,选取轴上视场点和 4 个轴外视场点,以边缘视场 $\omega=0.35^\circ$ 对视场点进行归一化,则轴外视场位置可表示为: 1) $x=0, y=0.9$; 2) $x=0, y=-0.8$; 3) $x=0.7, y=0$; 4) $x=-1, y=0$, 如图 9 所示。

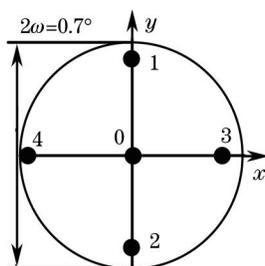


图 9 全视场光斑分布

Fig.9 Spot distribution diagram in all fields

利用图 4 中全视场的校正方法进行仿真分析,目标函数 J' 的收敛曲线如图 10 所示,由 0.2 下降到 0.1,并最终稳定收敛。

全视场校正前后各视场点半径分别如表 2 所示,轴上视场光斑半径有一定的增大,轴外视场光斑半径均得到减小,各个视场点半径的平均值得到降低,即全视场内光斑半径的平均值收敛到极小值。全视场校正前后各个视场远场光斑如图 11 所示。由此可知,对于大视场望远镜次镜位置的校正需要同时考虑轴上视场和轴外视场的光斑。

表 2 全视场校正前和校正后各视场点半径值

Table 2 Radius of the field spot before and after correction in all fields

Field	0	1	2	3	4
Before correction	0.059	0.304	0.228	0.168	0.217
After correction	0.079	0.105	0.106	0.109	0.097

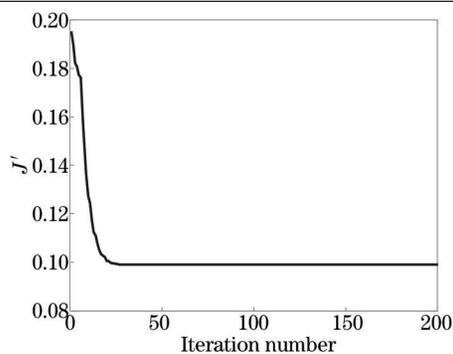


图 10 全视场迭代收敛曲线

Fig.10 Iteration converge curve in all fields

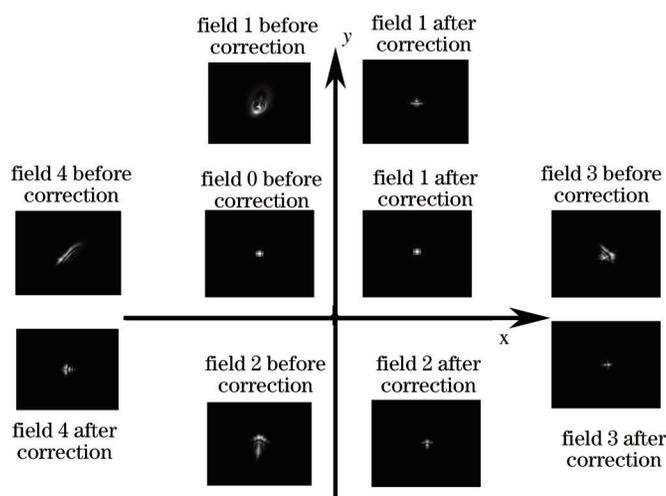


图 11 全视场校正前后不同视场点光斑

Fig.11 Spot diagrams of different fields before and after correction in all fields

在实际校正过程中,可以将次镜所在的六维调整机构、计算机以及 CCD 探测器建立连接。通过计算机的优化算法程序控制六维调整机构对次镜位置进行调整,从而在靶面获取不同视场的光斑分布图。以图像处理的方式对不同视场的光斑进行截取,保证每个子图靶面大小相同并计算其清晰度函数,最后将计算的清晰度函数用于优化算法程序指导次镜进行状态调整,实现优化。

4 结 论

简述了望远镜系统中光学元件位置存在偏差对系统像差的影响,表明大视场望远镜系统像差的校正需要同时考虑轴上和轴外视场光斑。利用 B-SPGD 算法,通过对 R-C 望远镜系统次镜位置进行迭代校正分析,实现了全视场光斑平均半径的优化。轴上视场校正中光斑的清晰度函数 J_0 由 0.65 收敛到 0.05,与理论情况下目标函数近似相同。全视场光斑校正后,轴上视场光斑半径增大而轴外视场光斑半径减小,全视场光斑半径的平均值 J' 收敛到极小值。研究表明,通过该方法可以对系统误差进行校正,使成像质量得到提升,且可用于观测过程中的校正。

参 考 文 献

- 1 Li Fei, Rao Changhui. Least square phase retrieval algorithm based on defocusing grating[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2813-2820.
李 斐, 饶长辉. 基于离焦光栅的最小二乘波前复原算法[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2813-2820.
- 2 Ning Yu, Yu Hao, Zhou Hong, *et al.*. Performance test and closed-loop correction experiment of a 20-element bimorph deformable mirror[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(7): 4717-4723.
宁 禹, 余 浩, 周 虹, 等. 20 单元双压电片变形镜的性能测试与闭环校正实验研究[J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4717-4723.
- 3 R A Buchroeder. Tilted Component Optical Systems[D]. Tucson: University of Arizona, 1976.

- 4 R V Shack, K P Thompson. Influence of alignment errors of a telescope system on its aberration field[C]. SPIE, 1980, 251: 146-153.
- 5 K Thompson. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry[J]. Opt Soc Am A, 2005, 22(7): 1389-1401.
- 6 B A McLeod. Collimation of fast wide-field telescopes[J]. The Astronomical Society of the Pacific, 1996, 108:217-219.
- 7 Che Chicheng, Li Yingcai, Fan Xuewu, *et al.*. Research on computer-aided alignment based on vector aberration theory[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(8): 1630-1634.
车驰骋, 李英才, 樊学武, 等. 基于矢量波像差理论的计算机辅助装调技术研究[J]. 光子学报, 2008, 37(8): 1630-1634.
- 8 Shi Guangwei, Zhang Xin, Zhang Ying, *et al.*. Alignment of two-mirror optical system based on vector wavefront aberration[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(3): 540-544.
史广维, 张 新, 张 鹰, 等. 基于矢量波像差理论的两反光学系统装调研究[J]. 应用光学, 2011, 32(3): 540-544.
- 9 Mao Heng, Wang Xiao, Zhao Dazun. Experimental validation and phase retrieval algorithm of complicated pupil wavefront[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 575-581.
毛 珩, 王 潇, 赵达尊. 复杂光瞳波前相位恢复算法与实验验证[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 575-581.
- 10 Cheng Qiang, Yan Feng, Xue Donglin, *et al.*. Wavefront errors testing of off-axis three-mirror anastigmatic system using phase diversity technology[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1008001.
程 强, 闫 锋, 薛栋林, 等. 利用相位差异技术检测离轴三反光学系统的波前误差[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1008001.
- 11 E Luna. Telescope alignment by out focus stellar image analysis[J]. The Astronomical Society of the Pacific, 1999, 111(755): 104-110.
- 12 Sun Jingwei, Chen Tao, Wang Jianli, *et al.*. Computer-aided alignment for primary and secondary mirrors[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 18(10): 2156-2163.
孙敬伟, 陈 涛, 王建立, 等. 主次镜系统的计算机辅助装调[J]. 光学精密工程, 2011, 18(10): 2156-2163.
- 13 S Kim, H S Yang, Y W Lee, *et al.*. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems[J]. Optics Express, 2007, 15(8): 5059-5068.
- 14 Zhang Xiaoming, Chen Hongbin, Wang Jihong, *et al.*. An alignment method of the telescope's primary and second mirrors based on astigmatic decomposition[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512007.
张晓明, 陈洪斌, 王继红, 等. 基于像散分解的望远镜主次镜对准方法[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512007.
- 15 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.
- 16 R N Wilson. Reflecting Telescope Optics I[M]. Berlin:Springer, 1996: 271-272.
- 17 R A Muller, A Buffington. Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening[J]. J Opt Soc Am A, 1974, 64(9): 1200-1210.

栏目编辑: 史 敏