

高分辨率空间光学系统位置误差的无波前传感综合校正

韩杏子 胡新奇 俞 信

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 高分辨率三反射式空间光学系统的三个镜子之间的相对位置误差会影响整个系统的性能,需要进行空间在轨调校。提出一种新的无波前传感综合校正方法,将随机并行梯度下降算法、相位变更法和灵敏度矩阵反演法相结合,既保留了灵敏度矩阵反演法的校正精度,又大大提高了可校正误差的动态范围。该方法无须使用波前传感器,系统简单,实现容易。对一个典型的三反射式空间光学系统进行了大动态范围位置误差在轨综合校正的计算机仿真,结果表明,该方法大大提高了可校正误差范围,同时实现了很高的校正精度。

关键词 光学遥感;在轨调校;无波前传感法;随机并行梯度下降算法;相位变更法;灵敏度矩阵反演法

中图分类号 TB133 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0626003

Precisely Integrated Wavefront Sensorless Calibration of High-Resolution Space Optical System with Large Position Errors

Han Xingzi Hu Xinqi Yu Xin

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Relative position errors among mirrors in a three-mirror reflective system can seriously degrade the performance of the whole space optical remote sensing system, so we have to calibrate these errors in orbit. A new wavefront sensorless calibrating method that integrates stochastic parallel gradient descent control algorithm, phase-diversity method and sensitive matrix inversion algorithm is proposed. This method retains the high resolution of sensitive matrix inversion algorithm and largely increases the dynamic range of stochastic parallel gradient descent control algorithm. Additionally, it does not need wavefront sensors to measure the wavefront error, thus simplifies the whole system, making it more feasible. Through computer simulation of a typical high-resolution space optical system in orbit and calibration of its relative position errors of the three mirrors using this integrated method, significantly improved calibrating range and high calibration precision are demonstrated, thus the merits of the new method are proved.

Key words optical remote sensing; in-orbit calibration; wavefront sensorless; stochastic parallel gradient descent (SPGD) control algorithm; phase-diversity method; sensitive matrix inversion algorithm

OCIS codes 260.3060; 280.4788; 250.0040

1 引 言

三反射式消像散系统是高分辨率空间光学遥感器中应用较多的一种结构^[1],该系统主要由三个非球面镜组成,结构紧凑,具有较强的消像差能力。高

分辨率空间光学系统具有大口径、长焦距、轻量化的特点,但在经过地面装调达到像质要求以后,在运载和发射过程中,由于振动、冲击、空间微重力环境和热环境等因素的影响,系统会再次发生失调,还需要

收稿日期: 2010-10-21; 收到修改稿日期: 2011-02-14

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724006)资助课题。

作者简介: 韩杏子(1983—),女,博士研究生,主要从事无波前传感自适应光学方面的研究。E-mail: xingerdu@sohu.com

导师简介: 俞 信(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事自适应光学及空间光学等方面的研究。

E-mail: yuxin@bit.edu.cn

进行在轨调校。目前研究较多的是三反射式光学系统的地面调校。传统的方法是借助装调人员的经验和测量仪器,通过多次尝试逐步减小误差。而现在主要采用计算机辅助装调法,通过干涉仪测得出瞳波像差与调整量之间的关系,建立灵敏度矩阵,再用灵敏度矩阵反演法解算出误差。1999年, Ball 公司对 QuickBird 空间望远镜进行了计算机辅助装调,系统波像差均方根(RMS)值由 0.45λ 调整到 0.04λ ^[2]。李旭阳等^[3]用计算机辅助装调方法对同轴三反射式光学系统进行装调,装调完毕后系统像差 RMS 值达到 0.07λ 。对于三反射式光学系统的在轨调校,目前少有研究。Huang Yifan 等^[4]对一个 4 m 口径的三反射式光学系统用灵敏度矩阵反演的方法进行在轨调校;韩杏子等^[5]提出利用随机并行梯度下降(SPGD)算法对二镜的 6 个位置自由度进行优化,初步实现了空间光学系统的无波前传感在轨调校。

随着科学技术的发展,目前已经出现了若干可折展式高分辨率空间光学系统,例如 1996 年由欧洲航天局(ESA)、美国航空航天局(NASA)和加拿大航天局(CSA)共同研制的下一代太空望远镜(NGST),2002 年改名为詹姆斯-韦伯太空望远镜(JWST),口径为 6.5 m ^[6,7]。随着大口径可折展式高分辨率空间望远镜的发展,系统口径及焦距越来越大,相应的对轻量化的要求也越来越高,各反射镜在轨位置误差也将进一步增大。因此,在保证高精度校正的条件下,要求可校正的误差动态范围增大,同时对系统设计、结构和热控等方面的要求也更为严格,必须保证在轨位置误差控制在可调范围以内。

传统的灵敏度矩阵反演法使用的前提是误差必须控制在一定范围内,以保证其与调整量之间的线性关系,从而建立灵敏度矩阵,不适用于在轨误差较大的环境。另外,该方法需要借助干涉仪测量误差,干涉仪对使用环境要求严格,同时需要引入相应的光学元件,增加了系统的复杂性。而单纯的随机并行梯度下降算法虽然系统简单,可调动态范围较大,但是当失调量较大时,调校精度会受到一定影响。因此,需要寻求一种新的位置误差在轨校正方法,在保证很高的校正精度的同时,扩大可校正的三反射式系统相对位置误差的动态范围,既满足在轨位置误差校正范围增大的需求,又可以降低对系统设计、热控等方面的要求。

本文提出一种对大范围高分辨率空间光学遥感器位置误差的高精度校正方法,以一个典型的三反射式空间遥感器为例,进行了该方法的仿真研究。

首先通过实例详细介绍了该方法的实现过程,然后进行了 50 次随机误差校正,给出了统计结果,有效地验证了该方法的可行性。

2 大动态范围位置误差无波前传感综合校正方法

提出一种新的三反射式空间光学系统的综合校正方法:首先用 SPGD 算法进行大位置误差校正,将误差减小到灵敏度矩阵反演法的适用范围内,然后利用相位变更法(PD)测量此时的波前误差,根据此误差和事先建立的灵敏度矩阵,解算出位置误差,从而进行校正。整个校正流程如图 1 所示。

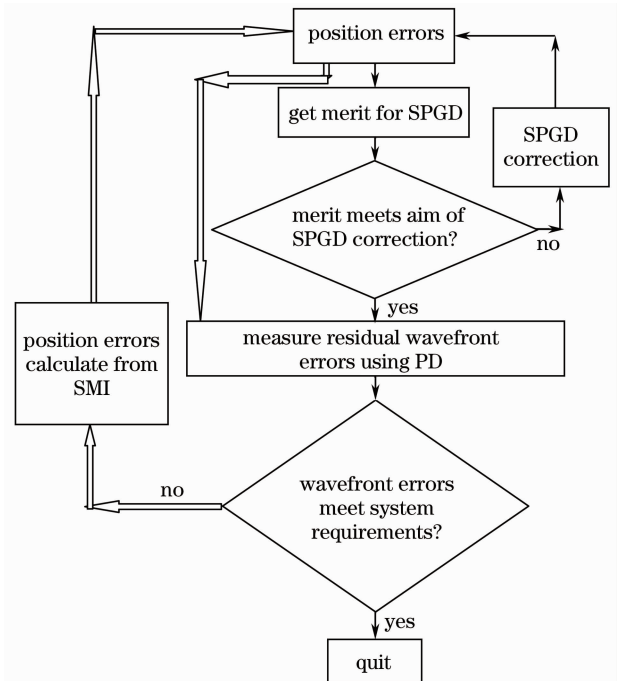


图 1 综合校正方法流程图

Fig. 1 Flow chart of integrated correction method

该方法综合利用了 SPGD 算法大动态范围及 PD、灵敏度矩阵反演法的高精度特点,实现了空间光学系统的大动态范围位置误差无波前传感精确校正。

2.1 SPGD 算法原理

SPGD 算法是一种基于系统性能指标直接优化的算法,以像清晰度函数作为评价依据,不断对控制参量进行优化,从而实现误差校正,满足系统像质要求。

设目标函数 J 为控制矢量 $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_N)$ 的函数,即 $J(\mathbf{u}) = J(u_1, u_2, u_3, \dots, u_N)$, N 为控制矢量的个数。为了确定多元函数 $J(\mathbf{u})$ 达到极值时的控制矢量 \mathbf{u} ,首先给定 \mathbf{u} 一个初始值 \mathbf{u}^0 ,然后从 \mathbf{u}^0 出发,沿着 $J(\mathbf{u})$ 减小(变大)的方向逐步修正 \mathbf{u} 值

的大小^[8]。这里以双边扰动 SPGD 方法为例,具体过程如下:

$$\begin{aligned} u_l^+ &= u_l^{(m)} + \delta u_l / 2, \\ u_l^- &= u_l^{(m)} - \delta u_l / 2, \\ \delta J^+ &= J(u_l^+) - J, \\ \delta J^- &= J(u_l^-) - J, \\ \delta J &= \delta J^+ - \delta J^-, \\ u_l^{(m+1)} &= u_l^{(m)} - \gamma \delta J \delta u_l^{(m)}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $u_l^{(m)}$ 为第 m 次迭代时第 l 个控制单元的电压, δu_l 为第 l 个控制单元施加的扰动电压, J 为初始评价函数值, γ 为增益系数。

在三反射式高分辨率空间光学系统的调校中,主镜中心镜作为调校的基准不动。三镜与主镜的连

接比较紧密,位置相对稳定,且三镜位置误差对整个系统的影响不是很大。二镜的位置十分特殊,它通过几个支杆与主镜相连,距离主镜较远,容易偏离其中心位置,同时,二镜的位置自由度对系统像差十分敏感,其微小扰动就会对整个系统产生较大的影响。所以,这里的控制矢量选择二镜 x, y, z 方向的平移 (D_x, D_y, D_z) 和 x, y 方向的旋转 (T_x, T_y) 这 5 个位置自由度(仿真中经光学系统分析及验证,发现 z 向旋转对系统没有影响,所以不予考虑),即

$$\mathbf{u} = (D_x, D_y, D_z, T_x, T_y), \quad (2)$$

$$J(\mathbf{u}) = J(D_x, D_y, D_z, T_x, T_y). \quad (3)$$

评价函数选择 SPGD 算法中优化效果较好的像斑 RMS 半径^[9],计算公式如下^[10]:

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\Delta x_{i,j})^2 (\omega_{i,j} / \omega_{\text{total}}) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\Delta y_{i,j})^2 (\omega_{i,j} / \omega_{\text{total}})}, \quad (4)$$

式中 $\Delta x_{i,j}, \Delta y_{i,j}$ 分别为像面某点到中心点在 x 和 y 方向的距离, $\omega_{i,j} / \omega_{\text{total}} = p_{i,j} / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{i,j}$, p 为归一化的点扩展函数。

2.2 PD 方法原理

PD 法波前检测技术^[11],主要是利用在焦面和离焦位置上同时采集的一对图像,对光瞳上的波前相位分布进行恢复,同时也可以对目标进行恢复。图 2 是一个典型的使用 PD 方法的成像系统。扩展目标经过会产生波前畸变的介质,在系统的焦面和离焦面上成像。其中离焦量的大小是已知的,这样,两个通道成像的相位差异就是已知的。PD 方法就是根据各个通道的图像信息以及已知的离焦相位信息,进行优化计算,最终得到波前畸变相位信息。用这种方法测得波前畸变,不需要额外的波前探测装

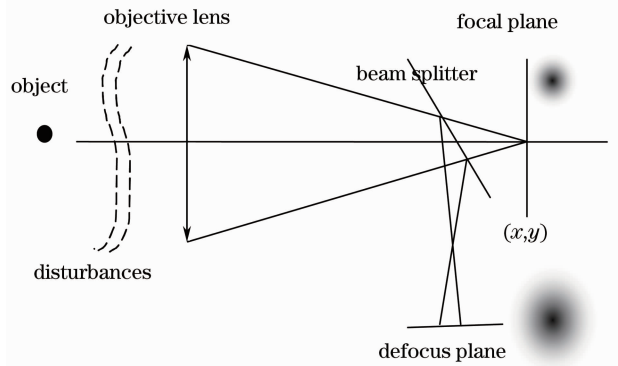


图 2 PD 成像系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of PD imaging system

置,是一种有效的无波前传感器波前测量法。

2.3 灵敏度矩阵反演法原理

灵敏度矩阵反演法的原理^[12]简述如下。若光学系统的像差用 F_i 表示,最常用的是圆域正交泽尼克(Zernike)多项式为

$$\left. \begin{aligned} Z_q &= (n+1)^{1/2} R_n^0(\rho), & m &= 0 \\ Z_q &= [2(n+1)]^{1/2} R_n^m(\rho) \cos m\theta, & q &= 2j \\ Z_q &= [2(n+1)]^{1/2} R_n^m(\rho) \sin m\theta, & q &= 2j-1 \end{aligned} \right\} m \neq 0, \quad (5)$$

式中 q 为模序数, m 和 n 为整数,并满足关系

$$n - m = 2p, \quad p = 0, 1, 2, \dots,$$

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+m)/2 - s]! [(n-m)/2 - s]!} \rho^{n-2s}, \quad (6)$$

则波像差可以表示成

$$\sum_q a_q Z_q(\rho, \theta). \quad (7)$$

如果可调整变量用 x_i 表示,则可调整变量与像差之间的关系可以表示成

$$\mathbf{A} \Delta \mathbf{X} = \Delta \mathbf{F}, \quad (8)$$

式中

$$\Delta \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_{01} \\ \vdots \\ x_n - x_{0n} \end{bmatrix},$$

$$\Delta \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \vdots \\ \Delta F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 - F_{01} \\ \vdots \\ F_n - F_{0n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \dots \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} \dots \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix},$$

F_{01}, \dots, F_{0n} 为设计系统的像差值, F_1, \dots, F_n 为实际系统的像差值, x_{01}, \dots, x_{0n} 为设计系统的调整变量值, x_1, \dots, x_n 为实际系统的调整变量值。

失调量为

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{A}^+ \Delta \mathbf{F}, \quad (9)$$

式中 \mathbf{A}^+ 表示 \mathbf{A} 的 Moore-Penrose 广义逆, 称为系统的灵敏度矩阵, 根据具体系统建立。

按照(8)式中矩阵 \mathbf{A} 的表达式建立具体光学系统的灵敏度矩阵, 即可由(9)式计算系统的失调量, 从而进行调校。

2.4 综合校正方法的实现

基于以上 SPGD, PD 及灵敏度矩阵反演法原理, 提出综合校正方法, 其具体实现过程如下: 1) 以二镜的 5 个位置自由度 (D_x, D_y, D_z, T_x, T_y) 作为控制参量, 从像面获取像斑 RMS 半径作为评价函数, 利用 SPGD 算法对控制参量进行优化, 从而实现位置误差的初步校正。每次循环结束后, 判断评价函数是否满足粗调要求, 即误差是否控制在灵敏度矩阵反演法的有效范围内, 如果不满足, 继续进行循环优化, 否则进行下一步; 2) 利用 PD 方法对 SPGD 粗调以后的剩余波前误差进行测量, 如果剩余波前误差已经满足系统成像要求, 则退出整个校正过程, 否则根据 PD 测量的波前误差, 利用灵敏度矩阵反演法反算出此时剩余的二镜位置误差, 并且通过二镜自身的位置致动器对该误差进行校正, 由于 PD 方法是通过系统焦面和离焦面的信息进行波前恢复, 故该步仍然不需要波前传感器。

3 系统仿真

如前所述, 三反射式光学系统因其结构紧凑、消像差能力强等原因, 越来越多地应用于空间遥感中, 又由于其系统分辨率与人瞳口径成正比, 目前多采用分块可折展式主镜以增大系统口径, 从而实现高分辨率。因此, 以一个三反射式空间光学遥感系统作为仿真平台, 利用综合校正的方法对其进行了在轨调校的仿真研究。

3.1 仿真模型

在 Zemax 软件里建立三反射式光学系统, 如图 3 所示, 该系统口径为 5 m, 焦距为 43.2 m, 主要由一个

拼接主镜和非球面二、三镜组成。主镜在在轨调校过程中作为调校基准不动, 二镜的位置误差是影响系统成像的主要原因, 是综合校正过程中的主要调节对象, 三镜的位置误差在一定范围内对像质影响不大, 故在在轨调校时保持三镜初始误差位置不动。该系统在 x 方向视场为 1° , 在 y 方向为线视场, 这里取 $(0^\circ, 0.32^\circ), (0.5^\circ, 0.32^\circ)$ 两个视场进行仿真。

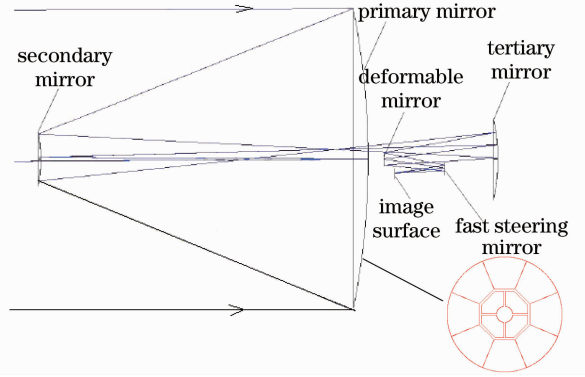


图 3 三反射式光学系统

Fig. 3 Three-mirror optical system

用上述综合校正方法对图 3 所示三反射式光学系统进行在轨空间调校, 仿真中假设各个位置致动器的控制和致动均无误差。

高分辨率空间光学系统总体分析给出以主镜中心镜做为测量调校基准, 二、三镜在轨位置误差的合理限值如表 1 所示。平移和绕 x, y 轴的旋转。

表 1 三反射式空间光学系统展开误差限值

Table 1 Limit position errors of three-mirror optical system in orbit after deploying

	D_x/mm	D_y/mm	D_z/mm	$T_x/(\text{^\circ})$	$T_y/(\text{^\circ})$
Second mirror	± 1	± 1	± 1	± 0.08	± 0.08
Tertiary mirror	± 0.05	± 0.05	± 0.05	± 0.01	± 0.01

3.2 随机位置误差校正实例

在表 1 给定误差限内, 按照平均分布随机产生二镜、三镜位置误差, 以其中一次随机误差作为初始误差, 并以此为例进行综合校正。

3.2.1 初始位置误差

在表 1 误差范围内按照平均分布随机产生的二镜、三镜位置误差如表 2 所示, $D_{x2}, D_{y2}, D_{z2}, T_{x2}, T_{y2}$ 分别代表二镜的 x, y, z 方向平移误差和 x, y 方向的倾斜误差, $D_{x3}, D_{y3}, D_{z3}, T_{x3}, T_{y3}$ 分别代表三镜的 x, y, z 方向平移误差和 x, y 方向的倾斜误差。

表 2 随机产生的二镜和三镜位置误差
Table 2 A set of random position errors of second and tertiary mirror

D_{x2} /mm	D_{y2} /mm	D_{z2} /mm	T_{x2} /($^{\circ}$)	T_{y2} /($^{\circ}$)	D_{x3} /($^{\circ}$)	D_{y3} /mm	D_{z3} /mm	T_{x3} /($^{\circ}$)	T_{y3} /($^{\circ}$)
0.8530	-0.6221	-0.8510	0.0800	0.0465	-0.0307	-0.0405	0.0418	0.0013	-0.0018

3.2.2 综合方法校正过程及结果

1) 初始波像差及 SPGD 算法粗调结果

表 3 给出初始波像差及 SPGD 算法粗调后的结果,经 SPGD 算法粗调以后,二镜剩余位置误差为 $[D_{x2}, D_{y2}, D_{z2}, T_{x2}, T_{y2}] = [1.0485, 0.1308, -0.0021, -0.0065, 0.0363]$.

表 3 初始误差及 SPGD 算法粗调后的波像差

Wave-front aberration	Field ($0^{\circ}, 0.32^{\circ}$)		Field ($0.5^{\circ}, 0.32^{\circ}$)	
	PV / λ	RMS / λ	PV / λ	RMS / λ
Before SPGD correction	18.3518	4.3944	18.3403	4.2212
After SPGD correction	0.7369	0.1385	1.5188	0.3061

2) PD 法测量剩余误差

SPGD 算法粗调后的剩余波像差已经满足 PD 法测量条件^[11],考虑到 PD 方法的测量精度,仿真中加入了 PD 法测量误差[峰谷(PV)值为 0.0461λ , RMS 值为 0.0051λ],得到 SPGD 方法粗调后 PD 测量出瞳波像差。

3) 灵敏度反演法解算剩余位置误差

根据(8)式,系统设计像差值已知,SPGD 方法粗调后的剩余波前误差由第 2)步中 PD 方法测得,建立仿真系统灵敏度矩阵 \mathbf{A} 的过程为:先计算该光学系统不含误差时各阶 Zernike 多项式系数 f_0 ,然后给二镜第 i 个位置自由度(总共 5 个位置自由度)施加微小扰动 δx_i ,计算含有微小扰动时的 Zernike 系数 f_i ,则灵敏度矩阵 \mathbf{A} 的第 i 列为

$$A(i) = \frac{\delta f_i}{\delta x_i} = \frac{f_i - f_0}{\delta x_i} \quad (10)$$

依次对二镜 5 个位置自由度进行计算就可以得到该系统的灵敏度矩阵 \mathbf{A} 。然后根据(10)式,用灵敏度矩阵反演法解算出来的剩余位置误差为

$$[D_{x2}, D_{y2}, D_{z2}, T_{x2}, T_{y2}] = [1.0668, 0.1515, -0.0034, -0.0076, 0.0372],$$

与 SPGD 粗调后二镜剩余误差相比可见,利用 PD 法测量结果,灵敏度矩阵反演法可以精确解算 SPGD 粗调后二镜剩余位置误差。

按照解算出来的剩余位置误差进行校正,最终剩余的二镜位置误差为

$$[D_{x2}, D_{y2}, D_{z2}, T_{x2}, T_{y2}] = [0.0183, 0.0207, -0.0013, -0.0011, 0.0009],$$

出瞳的波像差如表 4 所示。

表 4 综合校正后波像差

Wave-front aberration	Field ($0^{\circ}, 0.32^{\circ}$)		Field ($0.5^{\circ}, 0.32^{\circ}$)	
	PV / λ	RMS / λ	PV / λ	RMS / λ
After integrated correction	0.0284	0.0052	0.0478	0.0097

可见,用综合校正方法对三反射式空间光学系统进行位置误差在轨调整后,可以实现很高的校正精度,不只是中心视场误差得到校正,边缘视场的波像差也得到了有效的校正。

以中心视场($0^{\circ}, 0.32^{\circ}$)为例,校正前后出瞳波面如图 4 所示。

由图 4 可以看出,经过综合校正方法对三反射式高分辨率空间光学遥感系统进行在轨调校后,系统波像差得到了有效的抑制,出瞳波像差 RMS 值可以达到 0.006λ 以下,接近系统衍射极限,只存在

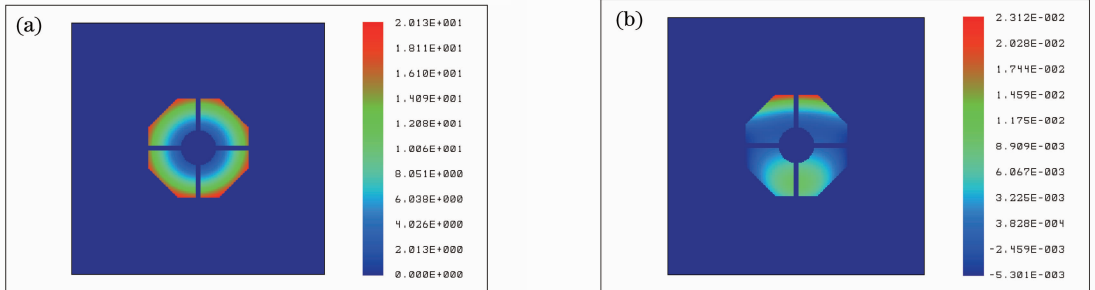


图 4 (a)初始($0^{\circ}, 0.32^{\circ}$)视场波面(PV 值 18.3518λ ;RMS 值 4.3944λ), (b)综合校正后($0^{\circ}, 0.32^{\circ}$)视场波面(PV 值 0.0284λ ;RMS 值 0.0052λ)

Fig. 4 (a) Initial wavefront map before the integrated correction($0^{\circ}, 0.32^{\circ}$) (PV value is 18.3518λ ;RMS value is 4.3944λ), (b) corrected wavefront map after integrated correction ($0^{\circ}, 0.32^{\circ}$) (PV value is 0.0284λ ;RMS value is 0.0052λ)

非常微小的低阶设计误差,主要是像散和彗差。

3.3 综合校正方法的动态范围

随着大口径、长焦距、轻量化高分辨率空间光学系统的发展,系统在轨展开后的位置误差也将进一步增大,同时考虑到如果放宽对高分辨率空间光学系统展开位置误差范围的限制,可以进一步降低对大口径空间光学系统设计、结构和热控等方面的要求。因此,进一步研究了高分辨率空间光学系统可校正位置误差的动态范围。

将表 1 中二镜的位置误差适当放大,对放大后的位置误差取其所有极限组合,即每个位置误差取其正负极限,共有 5 个位置自由度,故极限位置误差组合共有 $2^5=32$ 种。对这 32 种极限误差用上述综合算法进行校正,寻求该方法可以校正的误差范围。仿真结果表明,当二镜 5 个位置误差为表 5 所示时,32 种情况下校正后系统出瞳波像差 RMS 值在 $0.003\lambda\sim 0.0698\lambda$ 之间,具体概率密度分布如图 5 所示。

表 5 综合校正方法二镜动态范围

Table 5 Correction position errors' range of second mirror using integrated mirror

D_x/mm	D_y/mm	D_z/mm	$T_x/(\text{^\circ})$	$T_y/(\text{^\circ})$
± 5	± 5	± 2.8	± 0.8	± 0.8

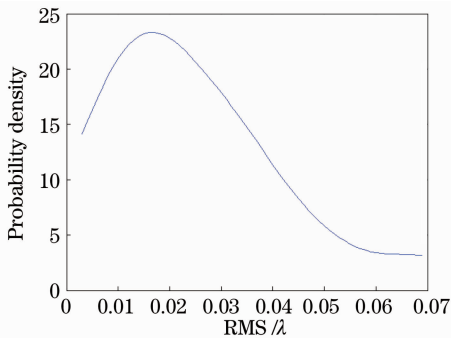


图 5 综合校正后出瞳 RMS 值概率密度分布

Fig. 5 Probability density distribution of exit pupil RMS after integrated correction

由图 5 可见,综合校正方法可校正的二镜位置误差范围大大提高,同时仍然可以达到很高的校正精度。校正后出瞳 RMS 值主要分布在 0.015λ 附近,最大值为 0.0698λ 。另外,轴向平移 D_z 对系统像差较为敏感,误差范围增加相对较小。

4 结 论

提出一种大动态范围空间光学系统位置误差的高精度无波前传感综合校正方法。该方法可在保证

系统高像质(RMS 值在高 0.07λ 以内)的条件下,大大提高可校正系统位置误差动态范围。此外,这种方法无需额外增加高精度波前测量装置,仅依靠系统本身可提供的图像信息就可以实现在轨调校,因此大大降低了高分辨率空间光学系统对设计、结构、热控等方面的要求,在不增加波前传感器等附加光学系统的情况下,实现高分辨率空间光学系统的高精度在轨装调。

参 考 文 献

- 1 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin *et al.*. Design on three-reflective-mirror system used in space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 216~219
常 军, 翁志成, 姜会林 等. 用于空间的三反射镜光学系统设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 216~219
- 2 John W. Figoski. Alignment and test results of the quick bird telescope using the ball optical system test facility[C]. *SPIE*, 1999, **3785**: 99~108
- 3 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen *et al.*. Computer-aided alignment method of coaxial three-mirror-anastigmat system[J]. *J. Appl. Opt.*, 2009, **30**(6): 901~906
李旭阳, 李英才, 马 臻 等. 折轴三反射光学系统的计算机辅助装调技术研究[J]. *应用光学*, 2009, **30**(6): 901~906
- 4 Huang Yifan, Lin Lin, Cao Yinhua. Computer-aided alignment for space telescope optical system [C]. *SPIE*, 2006, **6149**: 61490P
- 5 Han Xingzi, Xin Yu, Bing Dong. Use the stochastic parallel gradient descent control algorithm to calibrate the second mirror in a three-mirror system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 042201
韩杏子, 俞 信, 董 冰. 随机并行梯度下降算法用于次镜校准的仿真研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(4): 042201
- 6 Robert A. Woodruff, Wallace W. Meyer, Richard P. Reinert. System design trades for the next-generation space telescope (NGST)[C]. *SPIE*, 1998, **3356**: 46~58
- 7 Bernard D. Seery. The James Webb space telescope (JWST): hubble's scientific and technological successor[C]. *SPIE*, 2003, **4850**: 170~178
- 8 Liu Jianguo, Li Lin, Hu Xinqi *et al.*. Wavefront error correction with stochastic parallel gradient descent algorithm[C]. *SPIE*, 2007, **6834**: 683413
- 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 Zhang Liangzhong, Jin Weiqi, Zhou Liwei. Computation on root mean square radius and modulation transfer function in imaging system[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, **28**(8): 5~8
张良忠, 金伟其, 周立伟. 成像系统均方根半径及调制传递函数的计算[J]. *电子学报*, 2000, **28**(8): 5~8
- 11 Wang Xin, Zhao Dazun. Extending dynamic range of phase diversity[J]. *J. Beijing Institute of Technology (English)*, 2010, **19**(3): 348~352
- 12 Li Lin, Lin Jiaming. *Engineering Optics*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2003. 25~31
李 林, 林家明. *工程光学*[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2003. 25~31