

基于随机并行梯度下降算法的大口径薄膜拼接镜 失调误差校正

赵璐佳^{1,2,3}, 朱里程^{1,2,3}, 文良华^{1,2,4**}, 杨平^{1,2}, 胡诗杰^{1,2*}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610200;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610200;

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 为了实现大口径拼接薄膜镜失调误差在线校正,建立了由 5 块子镜组成的菲涅耳波带片拼接成像模型,分析了光学系统的点扩展函数 (PSF) 和调制传递函数 (MTF) 与失调误差的关系,并采用随机并行梯度下降算法 (SPGD) 对失调误差进行在线校正仿真。为了验证所提算法的性能,选取远场光强平方和、远场光斑等效半径、桶中功率、MTF 积分和光强二阶矩 5 个性能评价函数作为优化指标,对失调误差进行盲优化校正,并比较了上述评价指标的收敛速度和精度。100 组随机误差的校正结果表明上述指标均能收敛,优化后的波前残差方均根 (RMS) 均小于 0.13λ ,斯特列尔比 (SR) 均大于 0.96,其中 MTF 积分和光强二阶矩指标的收敛速度最快,远场光斑等效半径指标的精度最优。

关键词 薄膜; 拼接镜; 拼接失调误差; 随机并行梯度下降算法; 优化指标

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.193101

Correction of Misaligned Error of Large Aperture Thin Film Splicing Mirrors Based on Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm

Zhao Lujia^{1,2,3}, Zhu Licheng^{1,2,3}, Wen Lianghua^{1,2,4**}, Yang Ping^{1,2}, Hu Shijie^{1,2*}

¹Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610200, China;

²Institution of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610200, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

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

Abstract To achieve the online correction of the misaligned error of large aperture thin film splicing mirrors, an imaging model comprising five pieces of Fresnel lens was established herein. By analyzing the point spread function (PSF) and the modulation transfer function of the optical system in the presence (MTF) of the misaligned error, the relationships between the misaligned error and PSF as well as MTF were obtained. The stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm was used to correct the misaligned error online. To verify the performance of the proposed algorithm, five performance evaluation functions, including sum of square of far-field light intensity, equivalent radius of far-field light spot, power in barrel, MTF integral, and second-order moment of light intensity, were selected as optimization indexes to correct the misalignment error, and the convergence speed and accuracy of evaluation indexes were compared. The correction results of 100 random errors show that the five indexes can convergence, and the root mean square values of the corrected wavefront are less than 0.13λ and the Strehl ratio is greater than 0.96. The MTF integral and the second-order moment of light intensity converge fastest, and the

收稿日期: 2019-12-10; 修回日期: 2020-01-10; 录用日期: 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (61975171)、宜宾学院计算物理四川省高等学校重点实验室开放课题 (JSWL2018KFZ02)

* E-mail: seakeyhul@sina.com; ** E-mail: wlh45@126.com

precision of the equivalent radius of far-field facula index is optimal.

Key words thin films; spliced mirror; misaligned error; stochastic parallel gradient descent algorithm; optimization indexes

OCIS codes 310.6845; 260.1960; 350.4600

1 引言

为了解决大口径望远镜主镜难以加工的问题,国内外普遍采用子孔径拼接技术,例如 KECK 望远镜、欧洲 GTC 望远镜、中国 LAMOST 望远镜以及美国 JWST 望远镜^[1-3]等著名的拼接式反射望远镜。但是,随着主镜的规模不断增大,反射镜受面密度、面型公差等因素的制约愈加明显^[4],这就限制了大口径反射式拼接镜的进一步发展。薄膜衍射光学元件具有质量轻,易加工与复制,可折叠与展开,面型精度要求宽松^[5]等特点,成为了新的研究热点。2010 年法国科林小组研制了口径为 200 mm 的菲涅耳透镜,2011 年美国 LLNL 实验室研制了口径为 0.8 m 的衍射薄膜镜^[6],同年中国科学院光电技术研究所研制了口径为 150 mm 的薄膜镜,2014 年研制了口径为 400 mm 的薄膜望远镜^[7]。2016 年北京空间机电研究所与中国科学技术大学国家同步辐射实验室联合研制了口径为 400 mm 的薄膜衍射透镜^[8]。2017 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制出口径为 300 mm 的衍射成像系统^[7]。文献调研结果表明薄膜衍射望远镜现已成为大口径、轻量化望远镜的重要发展方向。然而,由于薄膜衍射成像元件加工受限,单体薄膜元件口径达不到望远镜所需的米级口径,拼接式薄膜衍射望远镜成像系统应运而生。1998 年美国 LLNL 实验室的“Eyeglass 项目”最早采用拼接式薄膜衍射镜作为望远镜主镜^[9]。2010 年美国 MORIE 成像装置采用 10 m 口径的拼接波带片作为主镜^[10]。国内,2012 年中国科学院光电技术研究所研制了 200 mm 口径的薄膜拼接系统。2016 年中国科学院西安光学精密机械研究所设计了薄膜衍射望远镜的展开结构^[11]。文献调研结果表明拼接式薄膜望远镜现已成为大口径、轻量化望远镜的重要发展方向。

拼接失调误差是拼接式薄膜望远镜成像性能的重要影响因素。拼接失调误差不可避免,且严重影响望远镜的成像质量^[12]。目前国内外已有文献报道传统反射镜失调误差的检测方法,如利用色散条纹仪的共相检测法^[13]、相位差法^[14]、夏克-哈特曼宽

窄带法^[15]等,但鲜有薄膜拼接镜失调误差校正的报道。国内方面,苏金炎^[16]和周旭东^[17]对两块子镜的薄膜拼接镜失调误差进行了分析测量;苏金炎^[16]先用自准直干涉仪检测子镜的倾斜误差,然后再通过拼接镜的点扩展函数检测子镜沿 X 、 Y 、 Z 方向的平移误差;周旭东^[17]采用干涉的方法记录干涉条纹,并对干涉条纹进行分析得到平移和倾斜误差。上述失调误差检测方法是在实验室环境下对拼接失调误差进行离线检测,无法用于空间在线布置和调整,且光路复杂,不适用于空间在轨条件下大口径拼接薄膜镜失调误差在线校正。

为了实现大口径拼接望远镜失调误差的在线校正,本文采用基于随机并行梯度下降 (SPGD) 算法对拼接失调误差进行在线校正。首先,介绍了由 5 块子镜组成的菲涅耳波带片拼接成像模型,分析了拼接失调误差对成像系统的点扩展函数 (PSF) 以及调制传递函数 (MTF) 的影响;其次,根据失调误差与 PSF 和 MTF 的关系,提出了一种采用 SPGD 算法在线校正拼接薄膜镜失调误差的方法;最后,进行 SPGD 算法失调误差校正的数值仿真研究。

2 菲涅耳透镜拼接模型及失调误差分析

拼接式薄膜望远镜将小口径衍射成像元件(子镜)组合在一起,以增大望远镜口径。美国的拼接薄膜镜 MORIE 成像装置如图 1 所示。该拼接薄膜镜成像装置采用菲涅耳波带片成像元件,主镜由内、外圈共 36 个圆形菲涅耳波带片子镜组成,口径达到 20 m,可由机械结构在空展开。为了使拼接薄膜镜成像系统实现同等口径单体薄膜镜的成像效果,需要各子镜保持共焦同相。而失调误差的存在使子镜偏离理想位置,不能共焦同相,拼接系统的成像质量严重下降。因此,失调误差的校正尤其重要。失调误差主要包括子镜间沿光轴方向(z 方向)的平移误差、沿 x 、 y 方向的平移误差和沿 x 、 y 方向的倾斜误差。为了研究拼接薄膜望远镜失调误差对光学系统成像性能的影响,建立了如图 2 所示的由 5 块子镜组成的菲涅耳波带片拼接成像模型。

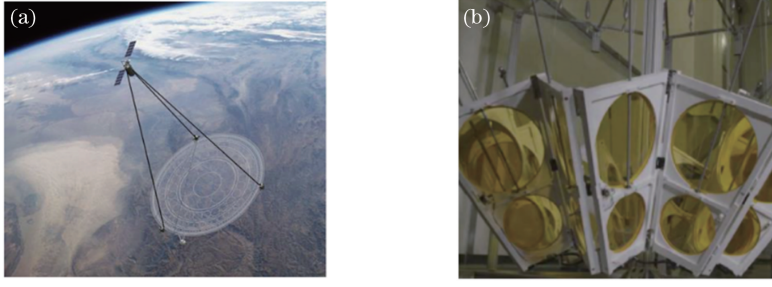


图1 MORIE实时成像系统^[10]。(a) MORIE成像系统示意图;(b) MORIE系统拼接结构示意图

Fig. 1 MORIE real-time imaging system^[10]. (a) Diagram of the MORIE imaging system; (b) diagram of splicing structure in the MORIE system

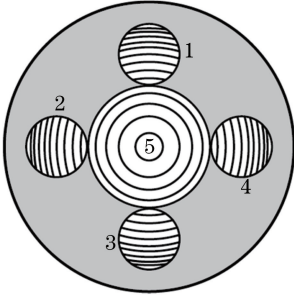


图2 菲涅耳波带片拼接模型

Fig. 2 Splicing model of FZP

菲涅耳波带片拼接模型为可折叠与展开的共次型拼接薄膜镜模型,其5块子镜都来自同一块菲涅耳波带片,在空间位置上子镜1~4沿着子镜5圆周方向均匀排布。其中子镜5的直径是其余4块子镜的2倍且由机械结构固定,不存在失调误差,可作为参考波前。该拼接薄膜镜成像模型受到其余4块子镜展开时平移和倾斜误差的影响。在平移和倾斜误差下该成像模型的PSF和MTF分析如下文所示。

失调误差与波前相位的关系^[16]可表示为

$$\delta_i(\Delta z) = \frac{2\pi}{\lambda} [\sqrt{x^2 + y^2 + (f - \Delta z)^2} + \Delta z - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2}], \quad (1)$$

$$\delta_i(\Delta x) = \frac{2\pi}{\lambda} [\sqrt{(x + \Delta x)^2 + y^2 + f^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2}], \quad (2)$$

$$\delta_i(\Delta y) = \frac{2\pi}{\lambda} [\sqrt{x^2 + (y + \Delta y)^2 + f^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2}], \quad (3)$$

$$\delta_i(\theta_x) = \frac{2\pi}{\lambda} [\sqrt{x^2 + (y \cos \theta_x)^2 + (f - y \sin \theta_x)^2} + y \sin \theta_x - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2}], \quad (4)$$

$$\delta_i(\theta_y) = \frac{2\pi}{\lambda} [\sqrt{y^2 + (x \cos \theta_y)^2 + (f - x \sin \theta_y)^2} + x \sin \theta_y - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2}], \quad (5)$$

$$\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \sqrt{[(x + \Delta x) \cos \theta_y]^2 + [(y + \Delta y) \cos \theta_x]^2 + [f - \Delta z - \sqrt{(y \sin \theta_x)^2 + (x \sin \theta_y)^2}]^2} + \Delta z + \sqrt{(y \sin \theta_x)^2 + (x \sin \theta_y)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2} \right\}, \quad (6)$$

式中: (x, y) 为入射光瞳面的坐标; $\Delta z, \Delta x, \Delta y$ 分别表示第*i*($i=1, 2, 3, 4$)块子镜沿 z 轴、 x 轴、 y 轴的平移误差; θ_x, θ_y 分别表示沿 x 轴、 y 轴的倾斜误差; $\delta_i(\Delta z), \delta_i(\Delta x), \delta_i(\Delta y), \delta_i(\theta_x), \delta_i(\theta_y)$ 分别表示第*i*块子镜的 $\Delta z, \Delta x, \Delta y, \theta_x, \theta_y$ 引入的波前相位差; δ_i 表示第*i*块子镜的总波前相位差; f 为薄膜镜的焦距; λ 为菲涅耳透镜设计波长。根据傅里叶光学衍射受限系统理论,在失调误差下的广义光瞳可表示为

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^5 \{P_i(x, y) \exp[i\delta_i(x, y)]\} = |P(x, y)| \exp[i\omega(x, y)], \quad (7)$$

式中: $\delta_i(x, y)$ 为第*i*块子镜误差引起的波前畸变相位; $\omega(x, y)$ 为总波前相位; $P_i(x, y) = p_i(x, y) \times \exp[i\varphi(x, y)]$ 为第*i*块子镜的理想光瞳函数; $\varphi(x, y)$ 为薄膜镜自带的相位函数^[18]; $p_i(x, y)$ 为圆域函数。

$$\varphi(r) = 2\pi \left(m - \frac{r^2}{2\lambda f} \right) (r_m \leq r \leq r_{m+1}), \quad (8)$$

$$p_i(x, y) = \text{circ} \left[\frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{D_i/2} \right], \quad (9)$$

式中: $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$, (x_0, y_0) 为子镜 5 的

圆心坐标; m 为非涅耳透镜环带序数; r_m 为第 m 环的半径; (x_i, y_i) 为第 i 块子镜的圆心坐标; D_i 为第 i 块子镜的直径。拼接镜的 PSF 和 MTF 可表示为

$$P_{\text{st}}(x_f, y_f) = |\mathcal{F}[P(x, y)]|^2 = \left| \mathcal{F} \left\{ \sum_{i=1}^5 \{P_i(x, y) \exp[i\delta_i(x, y)]\} \right\} \right|^2, \quad (10)$$

$$M_{\text{if}}(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[P_{\text{st}}(x_f, y_f)] = P(x, y) \otimes P(x, y) = \sum_{i=1}^5 \{P_i(x, y) \exp[i\delta_i(x, y)]\} \otimes \sum_{i=1}^5 \{P_i(x, y) \exp[i\delta_i(x, y)]\}, \quad (11)$$

式中: (x_f, y_f) 为像平面坐标; \mathcal{F} 表示傅里叶变换; \mathcal{F}^{-1} 表示傅里叶逆变换; \otimes 为自相关运算符。(1)~(11) 式描述的是失调误差与系统的 PSF 和 MTF 的关系, 表明系统 PSF 和 MTF 受失调误差影响, 可通过系统的远场光斑或频域信息来判断失调误差的大小, 从而指导失调误差校正。

3 拼接薄膜镜失调误差的 SPGD 校正

目前已有的关于拼接失调误差的校正方法都是首先测量出失调误差量, 然后通过机械结构控制误差。然而, 在大口径望远镜的在空布置装调过程中, 失调误差难以测量。由第 2 节分析的失调误差与系统 PSF 和 MTF 的关系可知, 系统的远场光斑和频域信息能反映失调误差。失调误差越大, 远场光斑越弥散, 频域积分越小。因此, 可以采用系统的远场光斑或频域信息为指标, 通过盲优化算法直接对拼接失调误差进行调控, 以达到校正失调误差的目的。针对波前像差校正的盲优化算法主要有爬山法、遗传算法、SPGD 算法等^[19-20]。其中 SPGD 算法的收敛速度快, 具有较强的波前像差校正能力^[21], 已经应用于无波前自适应系统中^[22-23]。因此, 本研究使用 SPGD 算法对失调误差进行在线校正。

采用 SPGD 算法实时测量远场成像光斑时, 每次迭代对拼接镜施加拼接失调随机扰动, 根据扰动下远场成像光斑获得优化指标, 计算优化指标的梯度, 使下一次的优化沿着指标的梯度方向迭代, 直到优化指标达到最大值, 即失调误差最小时停止迭代。

SPGD 在线校正拼接镜失调误差的流程如图 3 所示。

$$\boldsymbol{\alpha}^{(k+1)} = \boldsymbol{\alpha}^{(k)} + \gamma \Delta \boldsymbol{\alpha}^{(k)} \Delta J^{(k)}, \quad (12)$$

$$\Delta J^{(k)} = J_+^{(k)} - J_-^{(k)}, \quad (13)$$

式中: $\boldsymbol{\alpha}^{(k)}$ 为第 k 次迭代下优化的失调误差向量; γ 为增益步长; $\Delta \boldsymbol{\alpha}^{(k)}$ 为第 k 次迭代失调误差的随机扰

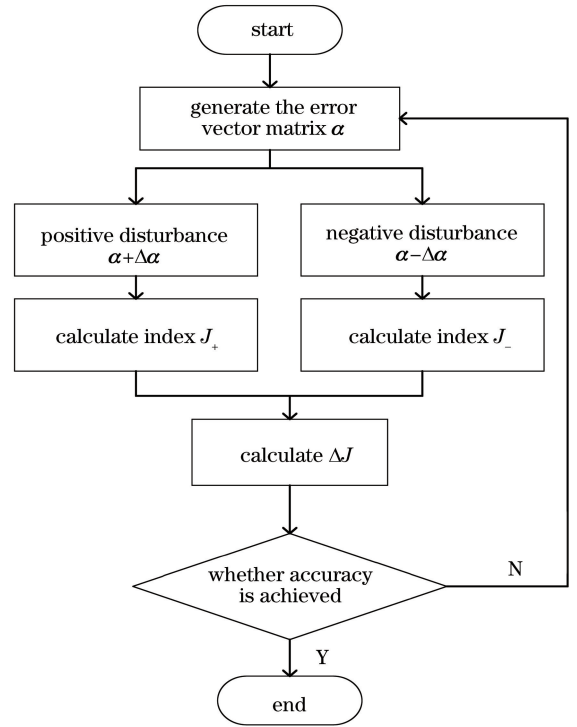


图 3 SPGD 校正拼接镜失调误差的流程图

Fig. 3 Flowchart of SPGD to correct the misalignment error of splicing mirror

动, 服从伯努利分布; $J_+^{(k)}$ 和 $J_-^{(k)}$ 分别为第 k 次迭代正向和负向扰动下的优化指标。

$$\boldsymbol{\alpha}^{(k)} = [a_1^{(k)}, a_2^{(k)}, \dots, a_{20}^{(k)}], \quad (14)$$

式中: $a_{5i-4}^{(k)}$ 为第 k 次迭代的第 i 块子镜 ($i=1, 2, 3, 4$) 沿 z 方向的平移误差扰动量; $a_{5i-3}^{(k)}$ 和 $a_{5i-2}^{(k)}$ 分别为第 k 次迭代的第 i 块子镜沿 x 和 y 方向的平移误差扰动量; $a_{5i-1}^{(k)}$ 和 $a_{5i}^{(k)}$ 分别为第 k 次迭代的第 i 块子镜沿 x 和 y 方向的倾斜误差扰动量。 $k=1$ 时 $\boldsymbol{\alpha}^{(1)} = \mathbf{0}$, 设拼接镜初始失调误差向量 $\boldsymbol{\beta}$ 为

$$\boldsymbol{\beta} = [b_1, b_2, \dots, b_{20}], \quad (15)$$

式中: b_{5i-4} 为第 i 块子镜 ($i=1, 2, 3, 4$) 的初始平移误差; b_{5i-3} 和 b_{5i-2} 分别为第 i 块子镜沿 x 轴和 y 轴的平移误差; b_{5i-1} 和 b_{5i} 分别为第 i 块子镜绕 x

轴和 y 轴的倾斜误差。第 k 次迭代下拼接镜的误差为

$$\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\alpha}^{(k)} = [b_1 - a_1^{(k)}, b_2 - a_2^{(k)}, \dots, b_{20} - a_{20}^{(k)}], \quad (16)$$

式中: $b_{5i-4} - a_{5i-4}^{(k)}$ 为第 k 次迭代第 i 块子镜 ($i=1, 2, 3, 4$) 剩余的平移误差; $b_{5i-3} - a_{5i-3}^{(k)}$ 和 $b_{5i-2} - a_{5i-2}^{(k)}$ 分别为第 k 次迭代第 i 块子镜沿 x 轴和 y 轴的平移误差; $b_{5i-1} - a_{5i-1}^{(k)}$ 和 $b_{5i} - a_{5i}^{(k)}$ 分别为第 k 次迭代第 i 块子镜绕 x 轴和 y 轴的倾斜误差。将 (16) 式代入 (1)~(11) 式可得到系统第 k 次迭代的 PSF 和 MTF。

SPGD 算法的收敛速度和精度与优化指标的选取有关。为获得性能良好的优化指标,本研究选取了如下 5 种 SPGD 常用的优化性能评价函数。

$$J_1 = \frac{\iint I^2(x_f, y_f) dx_f dy_f}{\left[\iint I(x_f, y_f) dx_f dy_f \right]^2}, \quad (17)$$

$$J_2 = \frac{\iint \sqrt{(x_f - x'_f)^2 + (y_f - y'_f)^2} I(x_f, y_f) dx_f dy_f}{\iint I(x_f, y_f) dx_f dy_f}, \quad (18)$$

$$J_3 = \frac{\iint I_{\Omega}(x_f, y_f) dx_f dy_f}{\iint I(x_f, y_f) dx_f dy_f}, \quad (19)$$

$$J_4 = \iint \frac{M_{\text{tf}}(x, y)}{C} dx dy, \quad (20)$$

$$J_5 = \frac{\iint I(x_f, y_f) \left(1 - \frac{r_f^2}{R^2}\right) dx_f dy_f}{\iint I(x_f, y_f) dx_f dy_f}, \quad (21)$$

式中: $I(x_f, y_f)$ 为远场光斑; (x'_f, y'_f) 为远场光斑的质心; Ω 为远场靶面选取的中心区域; C 为 MTF 最大值; R 为远场提取区域的半径, 为衍射极限的整数倍; $r_f = \sqrt{(x_f - x'_f)^2 + (y_f - y'_f)^2}$; J_1 表示归一化远场光强平方和; J_2 表示远场光斑归一化的等效半径; J_3 表示桶中功率; J_4 表示归一化的 MTF 积分; J_5 表示远场光强的归一化二阶矩。将上述 5 个指标代入 (12)~(13) 式的校正过程, 可对失调误差进行在线校正。

4 数值仿真分析

为了验证 SPGD 优化失调误差的性能并比较 5 种优化指标的收敛速度和精度, 随机选取 100 组失调误差进行仿真。根据失调误差容限与薄膜镜 F 数之间的关系, 在 F 数为 5 的情况下选取误差 Δz 、 Δx 、 Δy 、 θ_x 和 θ_y 分别在 $[-0.03 \text{ rad}, +0.03 \text{ rad}]$ 、 $[-50\lambda, +50\lambda]$ 、 $[-30\lambda, +30\lambda]$ 、 $[-0.05 \text{ rad}, +0.05 \text{ rad}]$ 和 $[-0.03 \text{ rad}, +0.03 \text{ rad}]$ 范围内均匀分布。

此 100 组误差的峰谷 (PV) 值、波前方均根 (RMS) 和斯特列尔比 (SR) 直方图分布如图 4 所示。由图 4 可知, 初始波前的 PV 值分布在 $0.8\lambda \sim 2.6\lambda$ 范围内, RMS 值分布在 $0.25\lambda \sim 0.6\lambda$ 范围内, 均大于 0.25λ , 不满足瑞利判据, 波前 SR 分布在 $0.55 \sim 0.89$ 范围内。

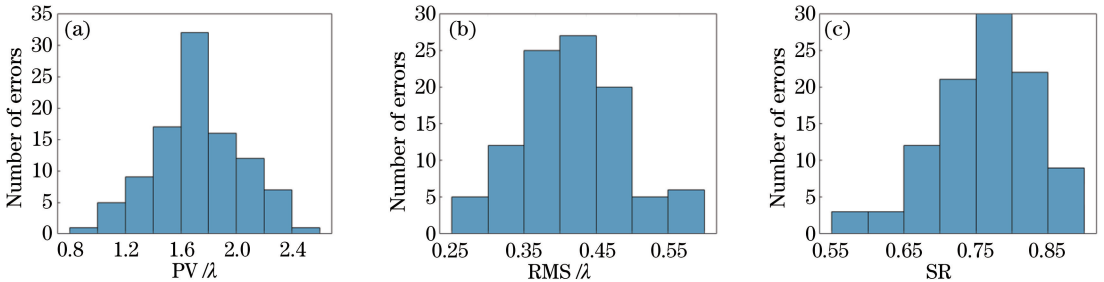


图 4 初始波前统计信息。(a) PV 值分布图; (b) RMS 值分布图; (c) SR 分布图

Fig. 4 Statistical information of initial wavefront. (a) PV distribution diagram; (b) RMS distribution diagram; (c) SR distribution diagram

分别采用 5 种优化指标对上述 100 组失调误差进行校正, 调整增益系数使迭代速度在对应优化指

标下最优, 其增益步长和无失调误差下的理想值如表 1 所示。

表1 5种优化指标增益步长和理想值

Table 1 Gain step size and the ideal value of five optimization indexes

Optimization index	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5
Gain step	260	-10	10	0.125	340
Ideal value	0.0089	6.1021	0.6599	117.0801	0.9523

对于桶中功率指标,远场靶面的采样点数量为 64×64 , Ω 为远场靶面中心的矩形区域,其采样点数量为 10×10 。调整迭代终止条件,使算法可收敛且精度最优。5种指标的迭代终止条件为各指标分别达到理想值的0.999999、1.000001、0.999999、0.999999、0.9997。在上述参数和迭代终止条件下,5种指标的迭代优化曲线如图5所示。

5种指标100组误差的统计平均优化迭代曲线如图6所示。由图5和图6所示的指标迭代优化曲线可知,5个优化指标在达到目标精度下均能收敛,但收敛速度不同。 J_1 收敛度最慢,平均迭代次数为500次, J_4 和 J_5 平均迭代次数为200次, J_3 、 J_2 分别为300次和400次。由数值仿真结果可知,基于MTF积分和光强二阶矩指标的SPGD优化算法收敛速度最快。

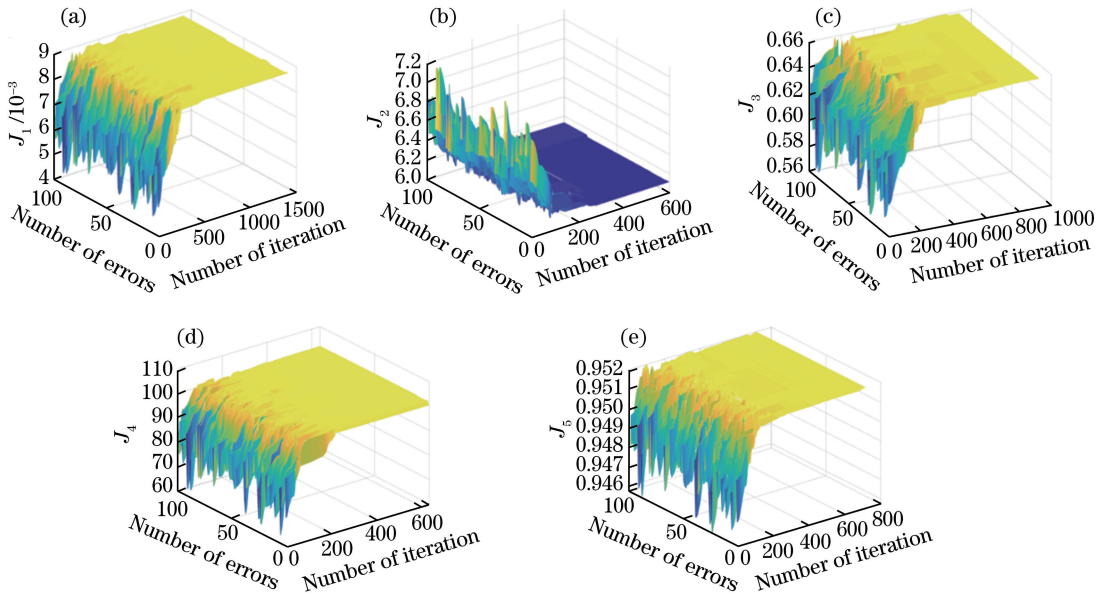


图5 5种优化指标的迭代优化曲线。(a) J_1 迭代曲线;(b) J_2 迭代曲线;(c) J_3 迭代曲线;
(d) J_4 迭代曲线;(e) J_5 迭代曲线

Fig. 5 Optimization curves of five evaluation indexes. (a) Curve of J_1 ; (b) curve of J_2 ; (c) curve of J_3 ;
(d) curve of J_4 ; (e) curve of J_5

5种指标的优化结果如图7和图8所示,其中图7为波前残差的RMS值统计直方图,图8为远场光斑的SR统计直方图。根据图7,5个指标的优化波前残差RMS值均小于 0.13λ ,满足瑞利判据。由图8可知,5个指标优化后的远场光斑SR均大于0.96,可认为优化后的光学系统均是完善的。此外, J_5 指标有61组误差优化后RMS小于 0.06λ , J_2 有67组, J_3 有63组, J_4 有43组, J_5 有7组。由优化结果可知,远场光斑等效半径指标优化的精度最高。

由100组随机误差的优化结果可知,5种优化指标都能校正失调误差,校正后的波前残差均小于 0.13λ ,SR大于0.96。远场光斑等效半径指标的校

正精度最好,MTF积分和光强二阶矩指标收敛速度最快。因此,对于实际系统的在空布置装调,可根据系统的特点选取不同的优化指标,实现空间大口径拼接薄膜望远镜失调误差的在线校正,使成像系统达到同等口径单体薄膜镜的成像效果。

5 结 论

针对大口径薄膜拼接望远镜的失调误差在线校正,建立了由5块子镜组成的菲涅耳波带片拼接成像模型,采用SPGD算法可实现拼接薄膜镜失调误差在线校正。该方法不需要复杂的光路,可适用于大口径拼接薄膜镜在空布置装调。为了验证算法的性能,选取5种优化指标评估了该方法的收敛速度

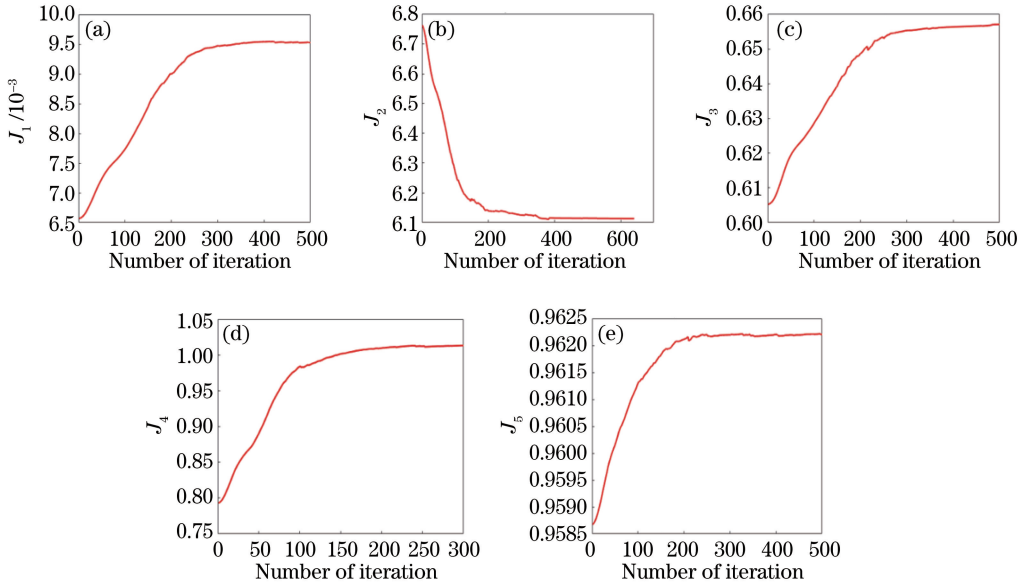


图 6 统计平均优化曲线。(a) J_1 迭代曲线;(b) J_2 迭代曲线;(c) J_3 迭代曲线;
(d) J_4 迭代曲线;(e) J_5 迭代曲线

Fig. 6 Statistical average optimization curves. (a) Curve of J_1 ; (b) curve of J_2 ; (c) curve of J_3 ;
(d) curve of J_4 ; (e) curve of J_5

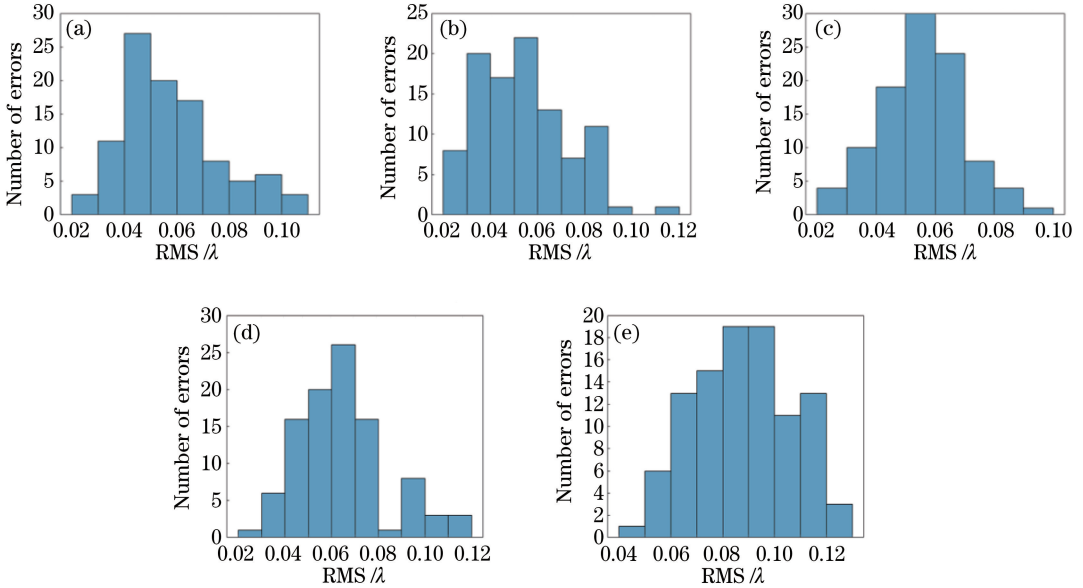


图 7 优化后的波前残差 RMS 统计直方图。(a) J_1 直方图;(b) J_2 直方图;(c) J_3 直方图;
(d) J_4 直方图;(e) J_5 直方图

Fig. 7 Histograms of optimized wavefront residual RMS value. (a) Histogram of J_1 ; (b) histogram of J_2 ;
(c) histogram of J_3 ; (d) histogram of J_4 ; (e) histogram of J_5

和精度。100 组随机误差数值仿真结果表明,5 种指标的 SPGD 算法校正后的波前残差 RMS 值小于 0.13λ ,远场光强 SR 大于 0.96;归一化 MTF 积分指标和远场光强归一化二阶矩指标的收敛速度

最快;远场光斑归一化等效半径指标优化精度最高。仿真结果表明 SPGD 算法能有效校正大口径拼接薄膜镜的失调误差,该结果为后续实验研究提供了初步的算法理论。

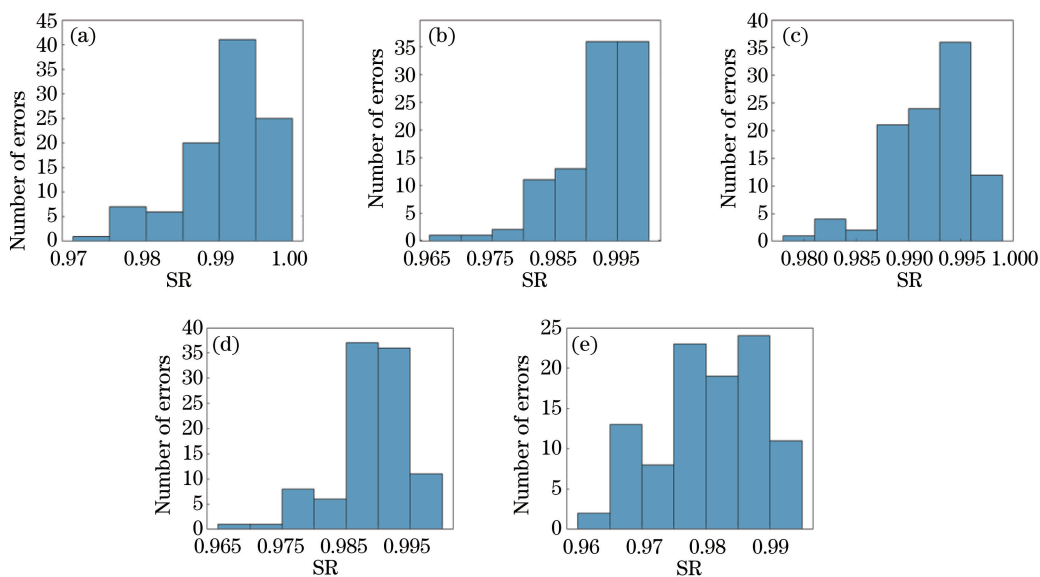


图 8 优化后的波前残差 SR 值统计直方图。(a) J_1 直方图;(b) J_2 直方图;(c) J_3 直方图;
(d) J_4 直方图;(e) J_5 直方图

Fig. 8 Histograms of wavefront residual SR value. (a) Histogram of J_1 ; (b) histogram of J_2 ;
(c) histogram of J_3 ; (d) histogram of J_4 ; (e) histogram of J_5

参 考 文 献

- [1] Li B. The co-phasing detection of segmented mirror [D]. Chengdu: Institution of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2017: 4-5.
李斌. 拼接镜共相检测技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2017: 4-5.
- [2] Liao Z, Qiu Q, Zhang Y D. The far-field characteristics for large aperture segmented telescope system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(2): 1-8.
廖周, 邱琪, 张雨东. 大口径拼接望远镜成像系统的远场特性[J]. 光电工程, 2015, 42(2): 1-8.
- [3] Gardner J P, Mather J C, Clampin M, et al. The James Webb Space Telescope [J]. Space Science Reviews, 2006, 123(4):485-606.
- [4] Li T J, Wu P, Yang Z, et al. Large aperture membrane diffractive lens deformation error analysis [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(2): 0205002.
李韬杰, 吴鹏, 杨正, 等. 大口径薄膜衍射主镜面形误差仿真分析[J]. 光子学报, 2018, 47(2): 0205002.
- [5] Zhang J, Su M J, Yin G H, et al. Large-diameter membrane Fresnel diffraction elements for space telescope[J]. Optics and Precision Engineering, 2016(6):1289-1296.
张健, 栗孟娟, 阴刚华, 等. 用于太空望远镜的大口径薄膜非涅耳衍射元件[J]. 光学精密工程, 2016(6): 1289-1296.
- [6] Liu T. Development of space-based diffraction imaging system and related technologies [J]. Space International, 2014(8): 46-52.
刘韬. 天基衍射成像系统及相关技术发展研究[J]. 国际太空, 2014(8): 46-52.
- [7] Yang W, Wu S B, Wang L H, et al. Research advances and key technologies of macrostructure membrane telescope [J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(5): 475-482.
杨伟, 吴时彬, 汪利华, 等. 微结构薄膜望远镜研究进展分析[J]. 光电工程, 2017, 44(5): 475-482.
- [8] Wang R Q, Zhang Z Y, Guo C L, et al. Design/fabrication and performance test of a diffractive telescope system with high diffraction efficiency[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(3): 0322001.
王若秋, 张志宇, 国成立, 等. 高衍射效率衍射望远镜系统的设计/加工及成像性能测试[J]. 光子学报, 2017, 46(3): 0322001.
- [9] Hyde R A. Eyeglass. 1. Very large aperture diffractive telescopes[J]. Applied Optics, 1999, 38(19): 4198-4212.
- [10] Acheson P, Domber J, Whiteaker K, et al. MOIRE-ground demonstration of a large aperture diffractive transmissive telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9143: 91431W.
- [11] Zheng Y H, Ruan P, Cao S. Deployable structure design and analysis for space membrane diffractive

- telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 118004.
- 郑耀辉, 阮萍, 曹尚. 空间薄膜衍射望远镜展开结构设计与分析[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(1): 0118004.
- [12] Wang L H, Wu S B, Yang W, et al. Analysis of stitched Fresnel lens segmented mirrors miss-adjustment error[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0712002.
- 汪利华, 吴时彬, 杨伟, 等. 拼接菲涅耳透镜子镜失调误差分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0712002.
- [13] Zhang Y, Zhang L. Simulation study on measuring piston error of segmented mirror using dispersed fringe sensing technology [J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2010, 27(4): 471-479.
- 张勇, 张靓. 色散条纹传感技术用于拼接镜面位移探测的仿真研究[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2010, 27(4): 471-479.
- [14] Smith J S, Dean B H, Haghani S. Distributed computing architecture for image-based wavefront sensing and 2D FFTs[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6274: 627421.
- [15] Chanan G, Troy M, Dekens F, et al. Phasing the mirror segments of the Keck telescopes: the broadband phasing algorithm [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(1): 140-155.
- [16] Su J Y. Analysis and simulation of misalignment error in splicing Fresnel lens [D]. Chengdu: Institution of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2017: 15-44.
- 苏金炎. 菲涅耳透镜拼接失调误差分析与仿真[D]. 成都:中国科学院光电技术研究所, 2017: 15-44.
- [17] Zhou X D. Research on the spliced alignment measurement technology of binary microstructure primary mirror[D]. Chengdu: Institution of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2015: 23-35.
- 周旭东. 二元微结构光学主镜拼接对准检测技术[D]. 成都:中国科学院光电技术研究所, 2015: 23-35.
- [18] Zhang Y C, Xie C Q. Differential-interference-contrast digital in-line holography microscopy based on a single-optical-element[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 5015-5018.
- [19] Wen L H, Huang Q Y, Xu X Q. Optimizing correction algorithm for adaptive optics based on square of wavefront gradient [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24): 240103.
- 文良华, 黄琴英, 徐勋前. 基于波前梯度平方的自适应光学优化校正算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(24): 240103.
- [20] Geng C, Luo W, Tan Y, et al. Experimental study on coherent beam combination of fiber amplifiers using adaptive power-in-the-bucket cost function[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(22): 224202.
- 耿超, 罗文, 谭毅, 等. 基于自适应桶中功率评价函数的光纤放大器相干合成实验研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(22): 224202.
- [21] Yang H Z, Chen B, Li X Y, 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.
- [22] Muller R A, Buffington A. Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1974, 64(9): 1200-1210.
- [23] Vorontsov M A, Carhart G W, Cohen M, et al. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2000, 17(8): 1440-1453.