

基于混合粒子群算法的相位差波前探测技术

熊文尚^{1,2,3}, 王继红^{1,2,3*}

¹中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 光学望远镜系统内部温度分布不均匀, 镜面热变形等因素导致的离焦、球差等低阶大像差会严重降低光学系统的探测能力。给出了相位差法结合离焦光栅进行波前探测的原理, 提出了权重线性递减的粒子群优化结合禁忌搜索的混合粒子群算法, 并通过仿真验证了该算法的优化性能。采用相位差法结合离焦光栅采集两幅图像, 然后通过混合粒子群算法求解目标函数, 就可以重构波前, 估计出波前像差。仿真结果表明, 该算法可以实现对波前像差 RMS 值在 0.859λ 以下的目标函数的优化求解, 优化后的波前残差达到 10^{-3} 量级, 并且迭代 3 次左右即可以完全收敛, 满足低阶大像差的校正精度要求。

关键词 几何光学; 波前探测; 混合粒子群算法; 低阶像差; 相位差

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.030801

Phase Diversity Wavefront Detection Technique Based on Hybrid Particle Swarm Algorithm

Xiong Wenshang^{1,2,3}, Wang Jihong^{1,2,3*}

¹Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;

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

Abstract Lower-order large aberrations, such as defocusing and spherical aberrations, caused by uneven temperature distribution inside an optical telescope system and mirror thermal deformations, seriously reduce the detection capability of an optical system. Herein, a method for wavefront detection that combines the phase diversity method with defocusing grating is introduced. In addition, a hybrid particle swarm algorithm that combines a linear descending weight particle swarm optimization with tabu search is proposed. The optimization performance of the algorithm is verified by simulation. Two images are acquired using a combination of the phase diversity method and defocusing grating, enabling the wavefront to thereafter be reconstructed and the wavefront aberration to be estimated by solving the objective function using hybrid particle swarm algorithm. The simulation results show that the proposed algorithm can solve the objective function for the wavefront aberration with an RMS value below 0.859λ . After optimization, the wavefront residual error reaches the order of 10^{-3} and convergence is achieved after approximate 3 iterations. This result satisfies the correction accuracy of low-order large aberration.

Key words geometric optics; wavefront detection; hybrid particle swarm algorithm; low-order aberration; phase diversity

OCIS codes 080.1010; 110.2970; 100.5070

收稿日期: 2019-07-25; 修回日期: 2015-07-29; 录用日期: 2019-08-12

基金项目: 四川省杰出青年基金(2019JDJQ0012)

* E-mail: wangjihong19@sina.com

1 引言

在利用光学望远镜系统对目标进行跟踪观测过程中,由激光造成的系统内部温度分布的变化,以及因镜面吸热产生的热变形等因素,都会造成入射光束在经过光学系统后含有离焦、球差、像散等低阶大像差。研究表明,由上述因素产生的低阶像差中球差最大,离焦次之,慧差最小。像差的存在使得入射光束波前发生畸变,影响系统的探测能力及跟踪精度^[1]。根据探测到的模糊图像进行相位恢复以及像差的提取,对于控制像差补偿元件进行像质补偿,从而提高系统的探测能力及跟踪精度具有重要意义。

相位差法(PD)的概念最早是由 Gonsalves 等^[2]于 1979 年正式提出的。在国外已被广泛应用于自适应光学等领域中的波前探测^[3-4]。国内中国科学院光学技术研究所、国防科技大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等单位也利用相位差法进行了望远镜像差检测、高分辨率成像等方面的研究^[5-7],但研究内容以波前像差 RMS 约为 0.4λ 居多,而且目前国内对波前的探测还主要依赖于哈特曼波前传感器、剪切干涉仪等传统波前传感器^[8-9]。

相位差法探测未知波前像差的实质就是对目标函数的非线性最优化求解。目前,得到广泛应用的优化算法包括最速下降法、牛顿法、拟牛顿法、共轭梯度法、随机并行梯度下降(SPGD)算法等^[10-11]。

这些优化算法在大像差情况下计算量比较大,且容易陷入局部极值,造成迭代停滞、收敛精度低。对于其他的全局智能优化算法,如遗传算法等也有在相位差波前探测中的应用研究^[12-13]。但是在大像差情况下这些算法收敛速度慢、效率低,且大像差情况下这些算法的相关研究很少。

针对现有优化算法在大像差情况下存在的不足,本文提出一种基于群智能的结合权重线性递减粒子群优化(PSO)算法和禁忌搜索(TS)算法的混合粒子群(HPSO)算法。该算法可以通过求解目标函数,恢复目标图像和波前相位,提取波前像差信息。相较于传统的最优化算法,本算法具有搜索能力强、收敛速度快、精度高等优点,而且结合了相位差法,可以实现对点目标和扩展目标的波前探测。

2 基本原理

2.1 相位差波前探测

将相位差法与离焦光栅相结合,对图像进行采集,如图 1 所示。相位差法的基本原理是在光学成像系统焦面及离焦面同时采集两幅图像,离焦量是已知的,则两幅图像之间的相位差就是确定的,根据这两幅图像的关系就可以恢复出光瞳处的波前相位及目标图像。采用离焦光栅可以实现用一个 CCD 相机同时采集到这两幅图像,大大简化了实验条件,提高了实验的速度及精度。

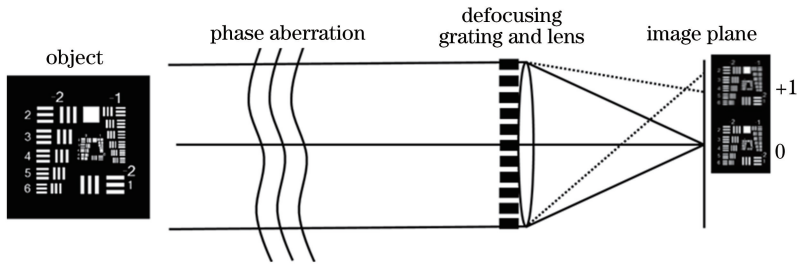


图 1 相位差法结合离焦光栅采集图像示意图

Fig. 1 Image acquisition schematic of phase diversity method combined with defocusing grating

对于一个线性空不变非相干成像系统,像平面光强分布 $I_i(x_i, y_i)$ 可以用理想像的光强分布 $I_g(x_0, y_0)$ 与系统点扩展函数 $h_k(x_i, y_i)$ 的卷积来表示,表达式为

$$I_i(x_i, y_i) = I_g(x_0, y_0) * h_k(x_i, y_i), \quad (1)$$

式中: i, g 分别表示像平面和理想像平面; (x_i, y_i) 表示像平面光场坐标; (x_0, y_0) 表示理想像平面光场坐标。点扩展函数的具体形式为

$$h_k(x_i, y_i) = |\mathcal{F}^{-1}\{A(x, y) \times \exp\{j[\varphi(x, y) + \theta_k(x, y)]\}\}|^2, \quad (2)$$

式中: \mathcal{F}^{-1} 表示傅里叶逆变换; k 表示不同的光学通道; $A(x, y)$ 表示孔径函数; $\varphi(x, y)$ 为系统中待求的未知波前像差; $\theta_k(x, y)$ 表示离焦面引入的已知

相位差异函数, (x, y) 表示离焦面光场坐标。Blanchard 等^[14]证明了离焦光栅每一级衍射光引入的相位差异函数可表示为

$$\theta_k(x, y) = m \frac{2\pi W_{20}}{\lambda R^2} (x^2 + y^2), \quad (3)$$

式中: m 表示衍射级次; W_{20} 表示光栅的离焦能力; R 表示光栅半径; 本文所有 λ 都表示光波长。通常, 将 $\varphi(x, y)$ 表示成一系列 Zernike 多项式的加权和的形式, 即

$$\varphi(x, y) = \sum_{j=1}^J \alpha_j \varphi_j(x, y), \quad (4)$$

式中: α_j 表示第 j 项 Zernike 多项式系数; φ_j 表示不同项像差的波前相位; J 表示多项式的总项数。所以只要求得各项 Zernike 多项式的系数就可以求得系统中的像差分布情况。而对于(1)式的求解, 通常是确定一个目标函数, 然后采用最优化算法求解目标函数的极值, 从而可估计出物信息和波前畸变信息。根据文献[2], 双通道光学成像系统的目标函数在频域上可以表示为

$$E(f_x, f_y, \alpha) = \sum_{k=1}^K \sum_{f_x, f_y} [D_k(f_x, f_y) - O(f_x, f_y) H_k(f_x, f_y)]^2, \quad (5)$$

式中: $K=2$; (f_x, f_y) 表示二维频率坐标; $D_k(f_x, f_y)$ 表示在 k 通道采集到的图像的傅里叶变换; $O(f_x, f_y)$ 为待求物平面目标光强的傅里叶变换; $H_k(f_x, f_y)$ 为 k 通道的光学传递函数。发展最优化算法求得目标函数最小值, 就可以求得 Zernike 多项式系数, 从而可以重构波前, 得到系统的波像差分布。

2.2 算法原理

粒子群优化算法是 Kennedy 等^[15]于 1995 年根据鸟群捕食行为而提出的一种基于群智能的生物进化算法。相较于前面提到的传统优化算法, 该算法的优点在于并行计算、算法简单、收敛速度快、全局搜索能力强等。标准粒子群算法首先初始化一组随机粒子, 包括粒子的位置和速度两个变量。粒子的位置代表波前像差的 Zernike 系数, 决定着相位差法目标函数值的大小, 目标函数值在标准粒子群算法中称为适应度, 适应度越小, 代表相位恢复精度越高。粒子速度决定着粒子每次迭代的步长和搜索方向, 然后通过跟踪两个适应度最小的最优值粒子进行迭代寻优。两个最优值包括粒子本身多次迭代过程中的个体位置最优值 P_{best} , 以及整个种群的全局位置最优值 G_{best} 。根据这两个最优值, 粒子通过以下两个公式

$$v(t+1) = \omega v(t) + c_1 r_1 [P_{\text{best}}(t) - m(t)] + c_2 r_2 [G_{\text{best}}(t) - m(t)], \quad (6)$$

$$m(t+1) = m(t) + v(t+1), \quad (7)$$

更新自己的速度 v 和位置 m , 以确定下一步的搜索方向和距离。式中: t 表示当前迭代步数; c_1, c_2 为正的学习因子, c_1, c_2 的大小决定着粒子个体本身的最优 Zernike 系数和整个种群的最优 Zernike 系数对该粒子下一步搜索方向和步长的影响能力, $c_1 > c_2$, 则粒子的搜索过程更加依赖于自身经验, 否则全局经验的影响力更大一些; r_1, r_2 为 0 到 1 之间均匀分布的随机数; ω 为惯性权重, 决定粒子当前适应度对下一步搜索方向和步长的影响。较大的惯性因子有利于算法跳出局部极小点, 便于全局搜索, 而较小的惯性因子则有利于对当前的搜索区域进行精确局部搜索, 便于算法收敛, 所以本次采用线性递减权重法, 使惯性权重随着迭代次数的增加, 从最大值 ω_{max} 线性递减到最小值 ω_{min} 。 ω 的变化式为

$$\omega = \omega_{\text{max}} - \frac{t(\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}})}{t_{\text{max}}}, \quad (8)$$

式中: t_{max} 表示最大迭代步数。禁忌搜索算法是一种具有记忆功能的、局部搜索能力较强的智能算法^[16-17]。禁忌搜索算法在初始解的邻域中选择若干目标函数值较小的位置 x 作为候选解, 若最优候选解优于目前最优解就将其替换, 并将该最优候选解加入禁忌表, 并修改禁忌表中各解的任期, 在禁忌表中的解不考虑, 这样可以避免盲目搜索。若候选解达不到上面的条件就选择非禁忌最优解作为新的当前最优解, 然后重复上述过程。禁忌搜索算法特有的“禁忌表”和“释放准则”可以避免优化过程陷入局部极值。所以为了更精确求得目标函数极值, 将这两种算法结合起来, 发展出 HPSO 算法, 可以达到优势互补的效果。

2.3 算法实现

利用 HPSO 算法优化目标函数, 首先需要设定算法的主要参数, 包括决定算法搜索能力的种群规模, 代表 Zernike 像差项数的粒子维数, 初始化 Zernike 系数、粒子速度、学习因子、惯性权重、禁忌表和禁忌长度等, 具体算法流程如图 2 所示。首先进行 PSO 搜索, 更新粒子的位置和速度, 计算适应度之后确定个体和群体的最优值, 如果群体最优值小于满足迭代精度要求的参考值 δ , 则迭代终止, 说明当前群体最优值的位置 m 就是待求波前像差的 Zernike 系数, 可以恢复目标图像及波前相位。如果不满足终止条件就要判断是否陷入局部最优, 如果没有陷入局部最优, 根据(6)~(8)式更新个体位置最优值 P_{best} 和群体最优值 G_{best} , 继续 PSO 搜索直至收敛, 否则就进入 TS 搜索过程。TS 搜索在 PSO

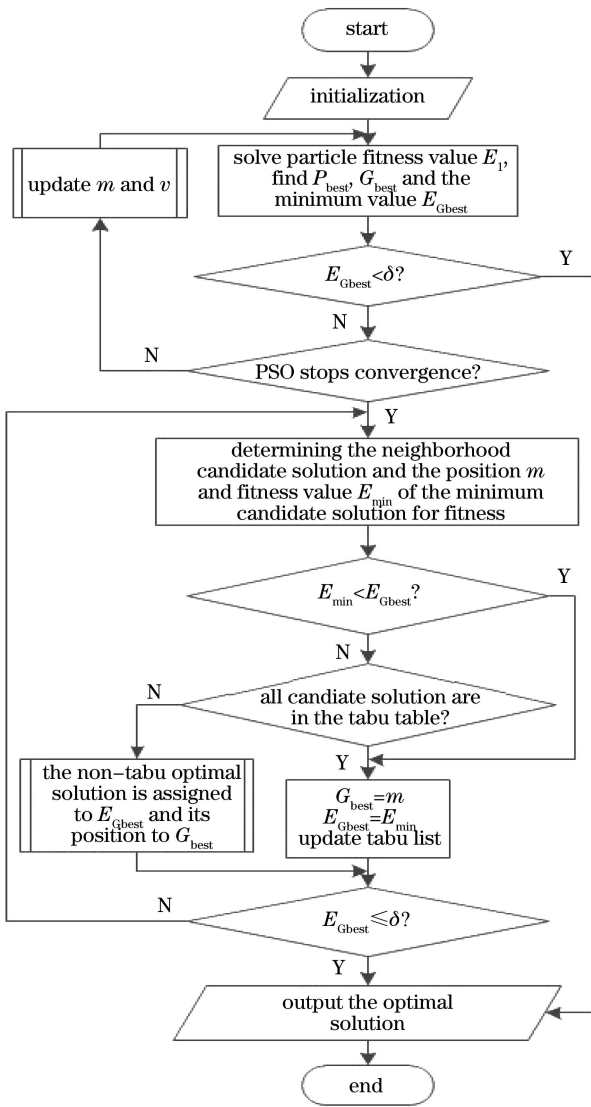


图2 HPSO 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of HPSO algorithm

算法迭代停滞时发挥作用,避免陷入局部极值。TS 算法首先以 G_{best} 为中心选择一组邻域候选解,然后求得相应目标函数值,如果候选解目标函数值的最小值 E_{min} 小于目前种群最优适应度值 $E_{G_{best}}$,则将该

值更新为 E_{min} ,其所在位置更新为 G_{best} ,更新禁忌表,判断结束还是继续循环。否则选择非禁忌最优解作为当前最优解,若候选解都处于禁忌状态,则选择目标函数值最小的作为当前最优解,判断该最优解是否满足精度要求或迭代完成,从而判断结束循环还是继续循环直至满足终止条件或迭代完成,输出结果。

3 仿真分析

本文研究的对象是系统内部空气吸热以及镜面热变形等产生的波前 RMS 值在 λ 以下的低阶大像差系统,仿真选择 Zernike 多项式的离焦、像散、球差等六项低阶像差项,参数选择如下:粒子维数为 6,兼具优化速度及精度,粒子规模选择 20,学习因子 $c_1 = c_2 = 2.05$,惯性权重 $w_{max} = 0.6, w_{min} = 0.4$,最大迭代次数为 200,禁忌长度为 10,候选解个数为 8。为了获得精确的波前探测结果,离焦面引入的离焦像差 PV(peak to valley)值一般为 $(1 \pm 1/2)\lambda$,所以本文所引入的离焦像差 PV 值为 λ 。图 3(a)为模拟的扩展目标,图 3(b)、(c)为扩展目标通过理想光学系统后得到的焦面及离焦面像。仿真选择的透镜焦距为 10 cm,工作波长为 632.8 nm。

系统通过 Zernike 多项式加入低阶像差,包括从第四项开始的离焦、像散、慧差和第十一项的球差,相应的波前 PV 值为 5.23λ ,RMS 值为 0.859λ 。算法恢复波前相位的好坏通过波前残差来衡量,残差值越小则代表恢复的波前与加载的波前拟合程度越高,恢复的波前越接近真实波前。图 4(a)、(b)分别为加载像差之后得到的焦面及离焦面图像,由于加载像差较大,图像非常模糊。

图 5 为波前的仿真图形,图 5(a)~(c)分别为加载波前,HPSO 算法优化之后恢复的波前,以及波前残差的三维图像, p, q 为波前频域坐标,其中波

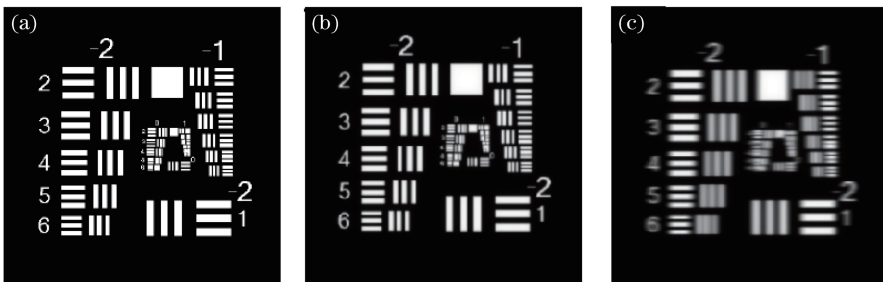


图3 扩展目标及通过光学系统后的焦面和离焦面像

Fig. 3 Extended object and focal plane and defocusing plane images after passing through optical system.

(a) Extended object; (b) focal plane image; (c) defocusing plane image

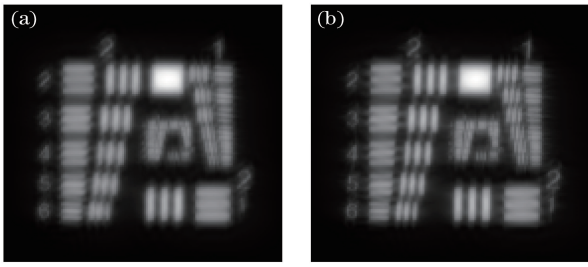


图4 加载像差后的焦面和离焦面图像。(a)焦面图像;
(b)离焦面图像

Fig. 4 Focal and defocusing images containing aberrations.

(a) Focal image; (b) defocusing image

前相位的单位都是 λ 。从波前残差图可以看出,经

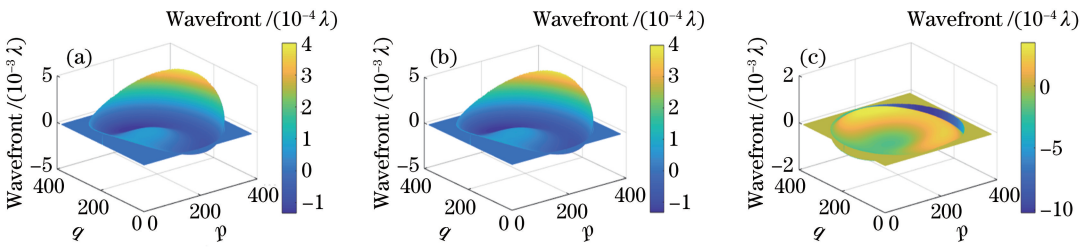


图5 仿真波前图。(a)加载波前;(b)恢复波前;(c)波前残差

Fig. 5 Simulated wavefront. (a) Loaded wavefront; (b) restored wavefront; (c) wavefront residual

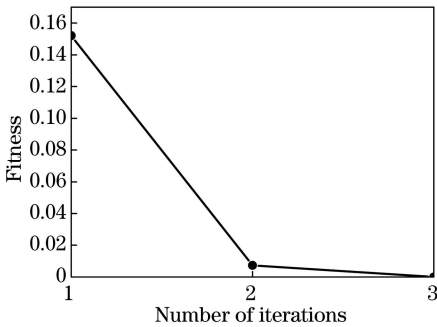


图6 HPSO 算法迭代曲线

Fig. 6 Iteration curve of HPSO algorithm

对于不同幅值的像差量,算法迭代收敛的精度是不同的。为了探究像差大小对 HPSO 算法收敛精度的影响,仿真分析了波前像差 RMS 值分别为 0.144λ 、 0.245λ 、 0.347λ 、 0.449λ 、 0.546λ 、 0.644λ 时,波前残差 RMS 值的分布情况。每个像差值都仿真了五次,取残差的平均值绘图,可以消除优化算法随机性的影响。这 6 组像差对应的平均波前残差 RMS 分别占相应像差 RMS 的 0.97% 、 0.94% 、 1.04% 、 1.06% 、 0.86% 、 1.07% 。不同像差对应的波前残差均值折线图如图 7 所示。在算法参数不变的条件,所加载的波前像差越大,复原之后的波前残差一般也越大,但是不同像差波前残差的占比都在 1% 左右,说明 HPSO 算法对不同像差的校正能力

过 HPSO 算法优化之后,波前残差可以达到 10^{-3} 量级,其波前残差 RMS 值为 0.0046λ ,说明该算法能够完全恢复波前像差 RMS 值在 $0\sim 0.859\lambda$ 范围内的波前相位,满足实际需求中低阶大像差的校正要求。

图 6 为 HPSO 算法迭代曲线,该算法经过 3 次迭代之后就可以完全收敛,适应度值接近 0,收敛精度很高。HPSO 算法搜索精度及速度和粒子数目有很大的关系,粒子数目越多,用时越长,但是由于搜索的范围更加密集,搜索能力更强,因此可以在有限次的迭代步数内快速收敛到目标解。在实际应用过程中应该根据算法搜索精度和速度的要求,综合均衡考虑粒子数目的取值。

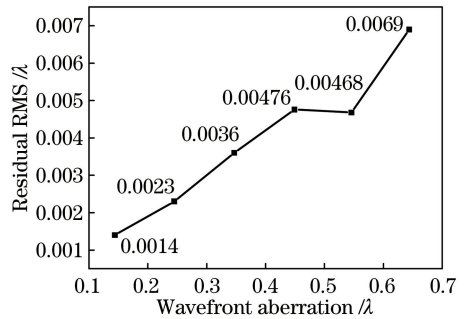


图7 不同像差条件下波前残差均值折线图

Fig. 7 Line chart of wavefront residual mean value for different aberration

是一样的,都能满足实际应用中的校正精度要求。

在波前像差 RMS 为 0.144λ 时,分别采用 HPSO 算法和 SPGD 算法优化目标函数得到波前残差数据对比折线图,如图 8 所示。图 8 中横坐标代表仿真的次数,纵坐标代表两种算法收敛后的波前残差 RMS 值,5 次波动幅度较大的虚线代表 SPGD 算法的波前残差曲线,而 5 次仿真后波前残差都接近 0 的实线是 HPSO 算法的仿真结果曲线。通过 5 次仿真可知,HPSO 算法和 SPGD 算法得到的波前残差 RMS 均值分别为 0.0014λ 、 0.0591λ ,波前残差 RMS 的占比分别为 0.97% 、 41.04% ,HPSO 算法的校正精度约是 SPGD 算法的 42 倍。通过

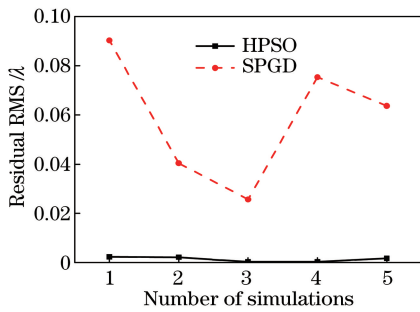


图 8 像差 RMS 值为 0.144λ 时, HPSO 算法和 SPGD 算法对应的波前残差折线图

Fig. 8 Line charts of wavefront residual of HPSO algorithm and SPGD algorithm when the RMS value of aberration is 0.144λ

图 8 可以发现 HPSO 算法复原之后的残差值明显低于 SPGD 算法的复原残差。

接下来验证该混合算法的收敛速度, 在波前 PV 值为 5.23λ 、RMS 值为 0.859λ 的情况下, 连续进行 8 次迭代计算, 表 1 列举了 8 次仿真情况下 HPSO 算法的波前残差 RMS 值, 以及算法在满足

表 1 8 次仿真情况下 HPSO 算法迭代结果

Table 1 HPSO algorithm iteration results in eight simulation cases

Number of simulations	1	2	3	4	5	6	7	8
Residual RMS / λ	0.005	0.0068	0.0057	0.0116	0.0124	0.0021	0.0121	0.012
Number of iterations	2	3	3	2	3	4	3	2

参 考 文 献

- [1] Peng Q. Analysis and research of imaging quality of telescope for tracking and launching [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2012: 19-21.
彭起. 跟踪发射望远镜成像质量分析与研究 [D]. 成都: 中国科学院大学, 2012: 19-21.
- [2] Gonsalves R A, Chidlaw R. Wavefront sensing by phase retrieval [J]. Proceedings of SPIE, 1979, 207: 32-39.
- [3] Bolcar M R, Fienup J R. Method of phase diversity in multi-aperture systems utilizing individual sub-aperture control [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5896: 58960G.
- [4] Georges J A, Liskow D, Naik V, et al. High-speed closed-loop dual deformable-mirror phase-diversity testbed [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6711: 671105.
- [5] Li Q, Shen M Z. Wavefront sensing using phase diversity method [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(11): 114-119.

收敛精度的情况下循环迭代的次数。根据表 1 的统计结果, HPSO 算法能在 4 步内完全收敛, 收敛速度很快, 并且能够保证高收敛精度。

4 结 论

为了实现低阶大像差条件下的波前重构和像差提取, 本文将相位差与离焦光栅相结合确定一个目标函数, 针对目标函数的优化求解, 提出一种基于群智能的 HPSO 算法。经过仿真分析可知, 该算法可以实现波前像差 RMS 值为 0.859λ 的波前重构, 其收敛后的波前残差达到 10^{-3} 量级。同时, 针对不同像差条件, HPSO 算法校正后的残差 RMS 都在 1% 左右, 是同像差条件下 SPGD 算法的 42 倍, 表明该算法收敛精度要高于目前常用的 SPGD 算法, 说明该算法具有收敛精度高、速度快的优点, 可高精度进行相位恢复和像差信息提取, 为后续控制校正元件补偿像差实验提供了反馈控制标准。下一步将通过实验验证该算法的有效性, 并与仿真结果进行对比, 以便进一步优化改进。

李强, 沈忙作. 基于相位差法的波前检测技术 [J]. 光电工程, 2006, 33(11): 114-119.

- [6] Li F, Rao C H. Study on phase diversity wavefront sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0804001.

李斐, 饶长辉. 高精度相位差波前探测器的数值仿真和实验研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0804001.

- [7] Xu Z H. Research on high-resolution liquid crystal adaptive optics technique with phase diversity [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2018: 88-109.

徐梓浩. 基于相位差法的高分辨率液晶自适应光学技术研究 [D]. 长春: 中国科学院大学, 2018: 88-109.

- [8] Ge R, Shen W, Liu C, et al. Distance-power index weighted centroid detection algorithm for Shack-Hartmann wavefront sensors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 040401.

葛睿, 申文, 刘超, 等. 夏克-哈特曼波前探测器的距离-幂指数加权质心探测算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 040401.

- [9] Li C L, Hu X Q. Study on centroid-of-correlation-

- function approach for estimating sub-image shifts in extended scene Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0928003.
- 李臣亮, 胡新奇. 计算扩展目标夏克-哈特曼波前传感器子图像偏移量的相关函数质心法研究[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0928003.
- [10] Gong C, Wang Z L. Proficient in MATLAB optimization calculation [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 145-153.
- 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2012: 145-153.
- [11] Zhang S, Zhang J W, Mu J, et al. Dynamical phase error control and bandwidth analysis for coherent beam combination based on stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0514003.
- 张森, 张军伟, 母杰, 等. 基于随机并行梯度下降算法的相干合成动态相差控制与带宽分析[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0514003.
- [12] Cao F, Zhao J Y, Wu Z. Detection of piston errors in wavefront sensing using a genetic-algorithm based phase diversity method [J]. Astronomical Research & Technology, 2011, 8(4): 369-373.
- 曹芳, 赵继勇, 吴桢. 基于遗传算法的相位差法波前检测 piston 误差[J]. 天文研究与技术(国家天文台台刊), 2011, 8(4): 369-373.
- [13] Liang S T, Yang J F, Xue B. A new phase diversity wave-front error sensing method based on genetic algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1015-1019.
- 梁士通, 杨建峰, 薛彬. 基于遗传算法的改进相位差法波前误差传感技术研究[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1015-1019.
- [14] Blanchard P M, Greenaway A H. Simultaneous multiplane imaging with a distorted diffraction grating [J]. Applied Optics, 1999, 38(32): 6692-6699.
- [15] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]// Proceedings of ICNN' 95-International Conference on Neural Networks, November 27-December 1, 1995, Perth, WA, Australia. New York: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [16] Zhang X F, Zhang H M. Improved tabu search algorithm for continuous problems [J]. Journal of China University of Metrology, 2010, 21(3): 251-256.
- 张晓菲, 张火明. 基于连续函数优化的禁忌搜索算法[J]. 中国计量学院学报, 2010, 21(3): 251-256.
- [17] Xu N, Li C G, Zhang J, et al. Studies on some modern optimization algorithms [J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(12): 100-103.
- 徐宁, 李春光, 张健, 等. 几种现代优化算法的比较研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(12): 100-103.