

基于改进型粒子群优化算法的畸变光斑校正仿真研究

刘珍^{1,2}, 竹孝鹏^{1,2*}, 毕德仓^{1,2}, 刘继桥^{1,2}, 陈卫标^{1,2**}¹中国科学院上海光学精密机械研究所航天激光工程部, 上海 201800;²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 相干探测激光雷达作为一项重要的光学探测技术,在实际应用中面临着大气湍流的影响:大气湍流会导致光斑发生畸变,从而降低探测性能。为解决这一问题,笔者提出了基于改进型粒子群优化算法的畸变光斑校正方法。该方法通过引入 Metropolis 准则以一定的概率接受劣质解,达到了更高的收敛极限。另外,改进型粒子群优化算法对惯性参数的取值不敏感。对于不同的惯性参数,随着迭代次数增加,所提算法最终都能够达到相同的收敛极限,这说明改进型粒子群优化算法的鲁棒性较好。在中强湍流和强湍流下,对比分析了随机并行梯度下降 (SPGD) 算法、粒子群优化 (PSO) 算法和改进型 PSO 算法的校正结果。仿真结果表明:在收敛速度方面,SPGD 算法用时最长,其次是 PSO 算法,改进型 PSO 算法用时最短。在收敛极限方面,对于中强湍流,三种算法都能够使斯特列尔比提高到 0.8 以上,可以认为畸变校正达到了理想效果;对于强湍流,SPGD、PSO 和改进型 PSO 算法使斯特列尔比分别提高了 1.2、2.6、3.2 倍(与校正前相比)。综合来看,相比 SPGD 和 PSO 算法,改进型 PSO 算法更有利于提高相干探测激光雷达的性能,尤其是在强湍流条件下。

关键词 相干光学; 相干探测激光雷达; 自适应光学; 畸变光斑校正; 改进型粒子群优化算法

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231118

1 引言

相干探测激光雷达作为一种重要的光学探测技术,已经在气象预报、风能发电等领域获得了广泛应用^[1-5]。然而,在实际应用中,大气湍流会对相干探测激光雷达的性能产生显著影响^[6-7]。湍流会引起光学路径的随机变化,导致光束在传输过程中产生波前畸变,降低回波光束质量^[8]。

为了解决上述问题,研究人员对波前校正方法进行了广泛而深入的研究^[8-10]。无波前探测自适应光学(AO)技术具有设备结构简单、成本低的优点,其核心思想是通过优化算法控制变形镜以产生与波前畸变相位共轭的相位,从而实现波前畸变的补偿^[11]。其中,优化算法是系统校正的核心。随机并行梯度下降 (SPGD) 算法是目前应用较为广泛的方法^[12-15],其在梯度下降算法的基础上引入了随机性,以增加搜索的多样性。由于 SPGD 算法引入了随机扰动,因此其收敛速度相对较慢。Kennedy 和 Eberhart 提出的粒子群优化 (PSO) 算法具有快速收敛、简便易行、不依赖导数信息和并行运算等优点^[16],备受人们欢迎。然而,这两种算法都易陷入局部最优,尤其是在解空间较大或求解复杂问题时。

笔者提出了一种改进型 PSO 算法,即在 PSO 算法的基础上引入 Metropolis 准则,以一定概率接受效果较差的解,有助于其跳出局部最优,从而达到更高的收敛极限。在中强湍流和强湍流下,将 SPGD、PSO 和改进型 PSO 算法分别以斯特列尔比 (SR) 为评价函数时的校正结果进行了对比,以期寻求一种高效、准确且稳定的畸变光斑校正方案,提高相干探测激光雷达的探测性能。

2 相干探测自适应校正系统基本原理

2.1 无波前相干探测 AO 系统的原理

在定标校正中,笔者设计了一个收发同轴无波前相干探测 AO 系统,并使用闭环控制系统对波前畸变进行实时补偿,如图 1 所示。该系统的工作原理为:激光器发射出的激光经过扩束镜组 1 后变为准直光,接着,偏振分光棱镜 1 (PBS1) 把准直光分成偏振方向相互垂直的 P 偏振光和 S 偏振光,其中 S 偏振光即本振光被分光面反射后与原方向成 90° 出射,而 P 偏振光透过 PBS1 后,依次通过 PBS2、四分之一波片和扩束镜组 2 发射到硬目标上;随后,光束经过大气湍流信道产生畸变并被扩束镜组 2 接收,之后再次经过四分之一波片,此时 P 偏振光变为 S 偏振光;S 偏振光入射到变

收稿日期: 2023-08-18; 修回日期: 2023-09-11; 录用日期: 2023-10-11; 网络首发日期: 2023-11-13

基金项目: 上海市科技创新行动计划(22dz1208700)

通信作者: *xp_zhu@siom.ac.cn; **wbchen@siom.ac.cn

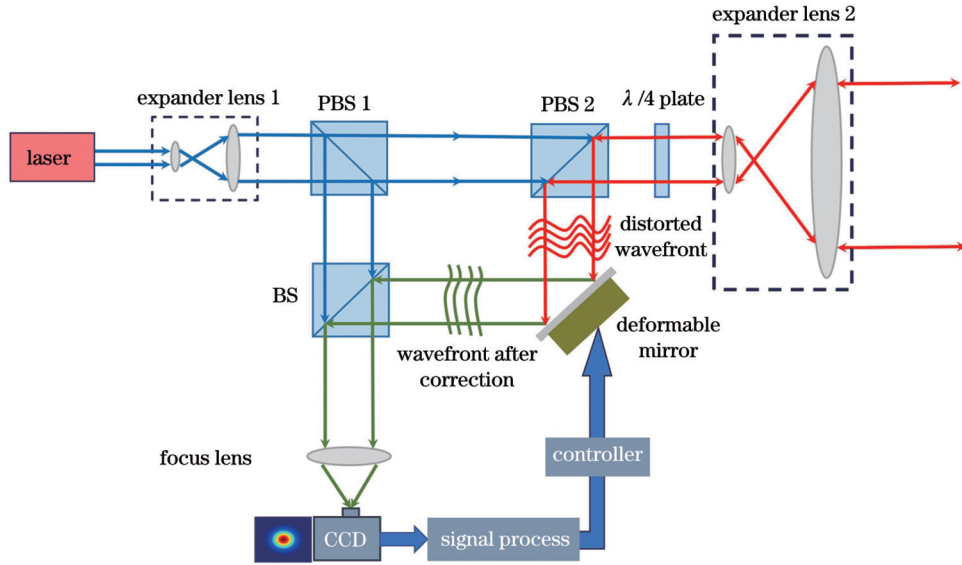


图 1 无波前相干探测 AO 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wavefront sensorless for coherent detection AO system

形镜 (DM) 表面后被反射到达分光镜 (BS), 并在此处与本振光混合, 之后进入聚焦透镜, 聚焦透镜将含有畸变信息的光束输入到光电探测器; 光电探测器将得到的畸变信号输入到波前控制单元 (包括图像采集模块、优化算法模块和 D/A 转换模块), 波前控制单元通过优化算法计算相应的像质评价函数, 并不断迭代得到 DM 的最优校正电压, 将其作为变形镜的电压控制信号来产生畸变共轭相位, 即可补偿大气湍流带来的波前畸变。

2.2 DM 物理模型

DM 是 AO 系统的重要元件。根据表面连续性, DM 可以分为分立表面变形镜和连续表面变形镜两大类^[17]。后者具有可以获得连续面型、波前像差补偿度高等优点, 因而在 AO 系统中得到了广泛应用。连续面型 DM 的镜面由各驱动器共同作用, 一般情况下, 可以近似将电压对变形镜驱动器的影响看作是线性的^[19]。因此, 由 DM 产生的补偿相位总形变量可以表示为

$$\psi(r) = \sum_{j=1}^N V_j S_j(r), \quad (1)$$

式中: N 为 DM 驱动器的个数 (根据驱动器间隔与大气湍流相干长度的对应关系, 使用 69 单元的 DM 对波前畸变进行校正, 能够实现波前校正效果与系统复杂度的较好折中); V_j 为施加在第 j 个驱动器上的控制电压; $S_j(r)$ 为第 j 个驱动器的影响函数, 服从高斯分布^[18]。 $S_j(r)$ 可以表示为

$$S_j(r) = S_j(x, y) = \exp \left\{ \left[\ln(\omega_a) \right] \left[\frac{1}{d} \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} \right]^a \right\}, \quad (2)$$

式中: ω_a 为驱动器的交连值 (根据 Pearson 经验数据^[19], 理想的交连值在 5%~12% 之间, 文中取 $\omega =$

8%); d 是驱动器之间的归一化间距; (x_j, y_j) 为第 j 个驱动器的坐标; α 为高斯指数, 文中取 $\alpha = 2$ 。图 2 为 69 单元变形镜驱动器排布示意图。

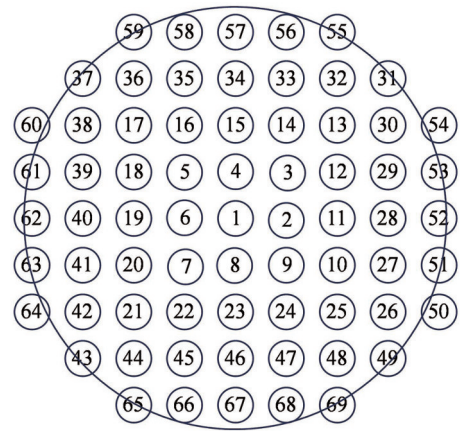


图 2 69 单元变形镜驱动器排布示意图

Fig. 2 Layout diagram of 69 units deformable mirror driver

2.3 大气湍流模型

大气湍流可以利用功率谱反演法模拟随机相位屏的形式进行等效。具体来说, 利用复高斯矩阵对大气扰动的功率谱进行滤波, 然后进行傅里叶逆变换, 得到大气扰动的相位。这一过程^[20-21]可以表示为

$$\phi(x, y) = C \sum_{\kappa_x} \sum_{\kappa_y} \mathbf{R}(k_x, k_y) \sqrt{F_\phi(k_x, k_y)} \cdot \exp[j(k_x x + k_y y)], \quad (3)$$

式中: C 为常数, 来源于标度因子 $(k_x, k_y)^{1/2}$; k_x 和 k_y 分别为 x 方向和 y 方向的波数, $k_x = m' \Delta k_x$, $k_y = n' \Delta k_y$, 其中 Δk_x 和 Δk_y 为采样间隔, m' 和 n' 为整数; \mathbf{R} 是均值为零、方差为 1 的复高斯随机矩阵; $F_\phi(k_x, k_y)$ 是大气折射率引起的相位畸变的近似功率谱密度。文中采用的是修

正 Von Karman 谱模型下的功率谱密度^[22], 可以表示为

$$F_{\phi}(k_x, k_y) = 0.49r_0^{-5/3} \exp\left[-(k_x^2 + k_y^2)/k_m^2\right] (k_x^2 + k_y^2 + k_0^2)^{-11/6}, \quad (4)$$

式中: r_0 为大气湍流相干长度, $r_0 = \left[0.432k^2 \sec \theta \int_z^{z+\Delta z} C_n^2(\epsilon) d\epsilon\right]^{-3/5}$, 其中 θ 为系统天顶角, $C_n^2(\epsilon)$ 为折射率结构参数; $k_m = 5.92/l_0$, $k_0 = 2\pi/L_0$, 其中 l_0 和 L_0 分别为湍流的内尺度和外尺度。

相应地, 在空域中, $x = m\Delta x$, $y = n\Delta y$, x 和 y 为相位屏的大小, Δx 和 Δy 为采样间隔, m 和 n 为整数。为了计算简便, 根据 $k = 2\pi f$ (f 表示空间频率), 将式(3)转换到空间频域中进行计算, 此时畸变相位可以表示为

$$\phi(m, n) = \sum_{m'=-N_x/2}^{N_x/2-1} \sum_{n'=-N_y/2}^{N_y/2-1} \mathbf{a}(m', n') \sqrt{\Phi_{\phi}(m', n')} \exp\left[i2\pi\left(\frac{m'm}{N_x} + \frac{n'n}{N_y}\right)\right], \quad (5)$$

式中: N_x 和 N_y 分别为 x 和 y 方向上的取样点数; \mathbf{a} 为复高斯随机矩阵; $\Phi_{\phi}(m', n')$ 为大气功率谱密度。

式(5)不包含低频分量, 因此需要进一步对其进行低频补偿。通常可以采用次谐波法进行补偿^[17], 次谐波法的数学表达式为

$$\phi_{SH}(m, n) = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{m'=-1}^1 \sum_{n'=-1}^1 \mathbf{a}(m', n') f(m', n') \exp\left[i2\pi 3^{-p}\left(\frac{m'm}{N_x} + \frac{n'n}{N_y}\right)\right], \quad (6)$$

式中: $f(m', n') = C3^{-2p} r_0^{-5/6} (f_{lx}^2 + f_{ly}^2)$, $f_{lx} = 3^{-p} m' \Delta f_x$, $f_{ly} = 3^{-p} n' \Delta f_y$; p 表示次谐波级数。

式(5)和式(6)之和构成了符合大气湍流实际情况的总相位屏。图 3 展示的是仿真得到的随机相位屏, 相位屏大小取 0.4 m, 采样点数为 256。

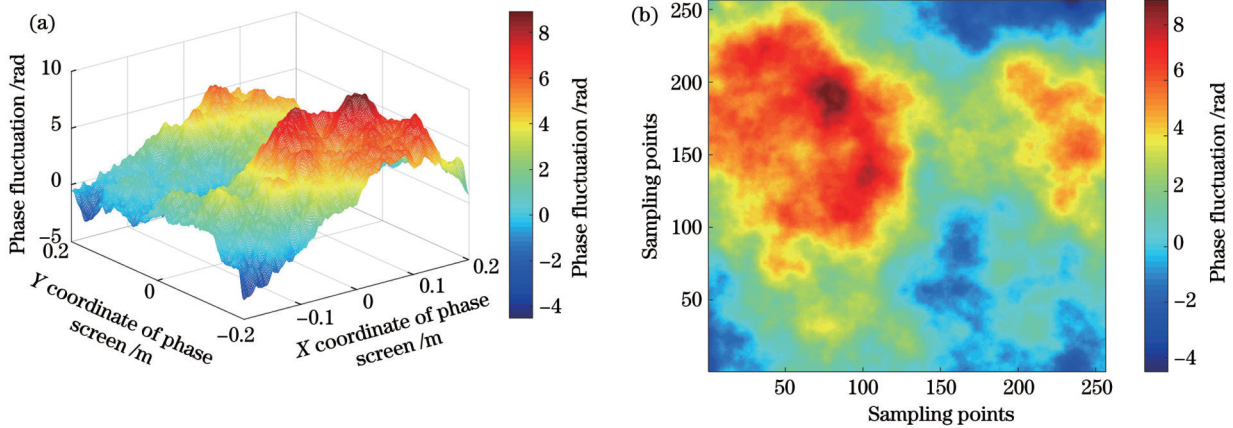


图 3 随机湍流相位屏。(a) 三维图; (b) 二维图

Fig. 3 Random turbulence phase screen. (a) Three-dimensional diagram; (b) two-dimensional diagram

2.4 多相位屏传输原理

激光在大气湍流中的传播可以看作是真空和相位屏两者相互交替的过程。应用菲涅耳衍射理论模型模拟激光在真空中的传输, 而激光通过相位屏时振幅保

持不变, 由湍流引起的相位变化附加在光场上, 如此循环进行多相位屏的传播(如图 4 所示), 最后在接收平面上得到畸变光场。激光从 z_i 平面传输到 z_{i+1} 平面时, z_{i+1} 平面的光场^[23]可以表示为

$$u(r, z_{i+1}) = \text{IFFT} \left\{ \text{FFT} \left[u(r, z_i) \exp[iS(r, z_i)] \exp\left(-i \frac{k_x^2 + k_y^2}{2k} \Delta z_{i+1}\right) \right] \right\}, \quad (7)$$

式中: S 为湍流引起的畸变相位; Δz_{i+1} 为 z_i 平面与 z_{i+1} 平面之间的间距; u 表示在 z_i 处的光场; FFT 表示快速傅里叶变换; IFFT 表示快速傅里叶逆变换。

2.5 像质评价函数

像质评价函数可以反映光束波前的畸变情况, 选择合适的评价函数能够有效提高波前校正系统的性能。评价函数一般需要满足两个条件: 1) 评价函数要能够随着波前畸变的校正逐渐收敛到全局唯一的最大

值或最小值; 2) 评价函数的计算时间须短于湍流冻结(泰勒假设)时间, 以便于使当前计算出的波前补偿控制电压与当前的湍流情况具有一定的相关性。根据实际观测资料的验证结果, 泰勒假设在边界层中是适用的。人们常用 SR(在公式中将其记为 S_R) 作为性能评价函数, 其定义为有畸变时光斑强度最大值与无畸变时光斑强度最大值之比^[24]。当 $S_R > 0.8$ 时, 认为波前校正达到了理想效果。SR 评价函数的表达式为

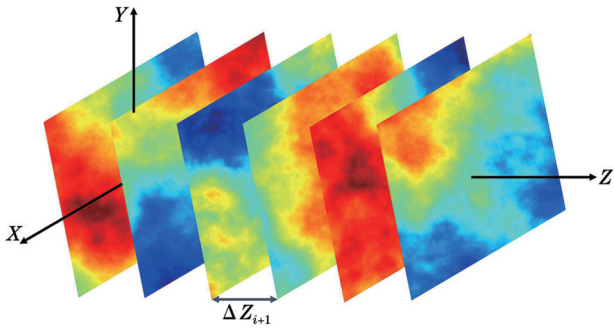


图 4 多相位屏传输原理

Fig. 4 Schematic diagram of multi-phase screen transmission

$$S_R = \frac{I_a(x_0, y_0)}{I(x_0, y_0)}, \quad (8)$$

式中: $I_a(x_0, y_0)$ 为存在畸变时光斑强度的最大值; $I(x_0, y_0)$ 为不存在畸变时光斑强度的最大值。

3 优化算法的基本原理

3.1 PSO 算法

PSO 算法通过模拟个体间信息的交流和合作来

优化问题^[25]。将该算法应用到光斑畸变校正中, 整个运算过程可以描述为: DM 随机生成一组电压, 并赋予其随机的电压增量; 接着计算每个 DM 单元的初始评价函数值, 并得到初始个体和全局最优评价函数值。在每一次迭代中, 计算本次和上次评价函数的差值 ΔJ , 只有当 $\Delta J > 0$ 时才接收当前电压值。随着迭代次数的增加, 每个 DM 单元记录自身寻找到的最优电压, 并计算当前电压的评价函数值, 更新其历史最优电压, 与此同时, 纵观整个 DM 单元的评价函数值, 更新全局历史最优电压。电压增量和电压的更新公式分别为

$$\Delta v_j^{n+1} = \omega \Delta v_j^n + c_1 r_1 (p_j^n - v_j^n) + c_2 r_2 (p_g^n - v_j^n), \quad (9)$$

$$v_j^{n+1} = v_j^n + \Delta v_j^{n+1}, \quad (10)$$

式中: ω 为惯性参数; c_1 和 c_2 分别为调节 DM 单元靠近自身历史最优电压的步长和靠近全局历史最优电压的步长, 本文将它们称为学习因子; r_1 和 r_2 为 0~1 之间的随机数; p_j 为 DM 单元的历史最优电压; p_g 为全局历史最优电压。PSO 算法的流程图如图 5 所示。

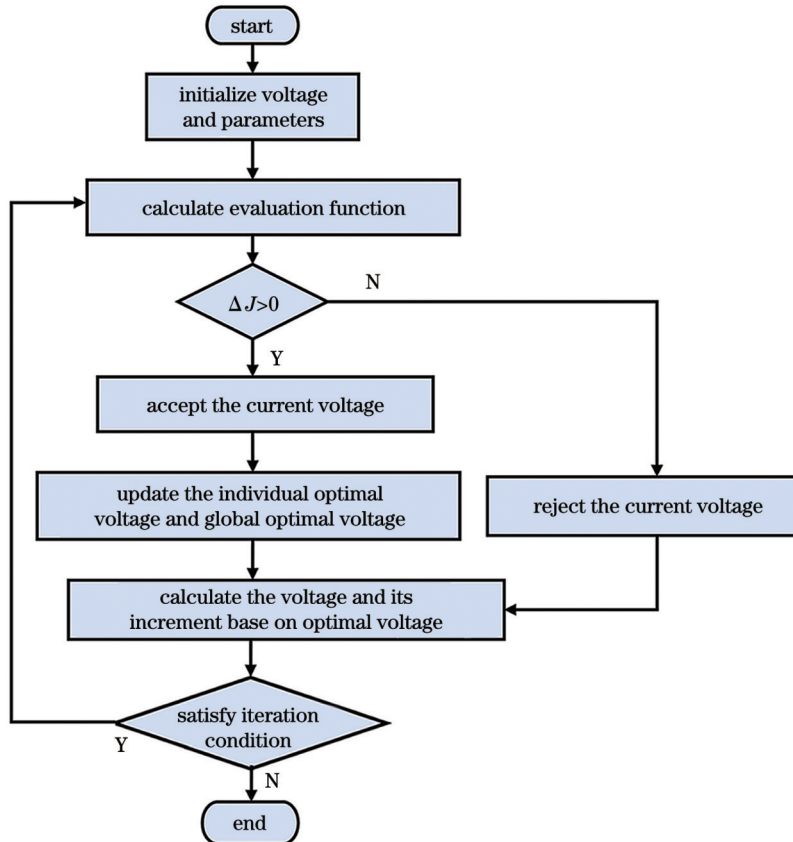


图 5 PSO 算法流程图

Fig. 5 Flow chart of PSO algorithm

3.2 改进型 PSO 算法

为了确保局部搜索的性能, PSO 算法的搜索步长不会太大, 因此对于包含局部最优的较复杂的问题, 该算法可能会陷入局部最优解。Metropolis 准则可以以

一定的概率接受劣质解^[26], 有助于算法跳出局部最优, 从而达到更高的收敛极限。将 Metropolis 准则与 PSO 相结合的算法称为改进型 PSO 算法, 将该算法应用到波前畸变校正中可以进一步提高校正性能。具体来

说, Metropolis 准则可以表示为: 当 $\Delta J < 0$ 时, 表示新状态劣于当前状态。如果 $\exp(\Delta J/T_n) > \text{rand}(1)$, 仍然会接受劣质解, 反之拒绝劣质解。其中 T_n 为第 n 次

迭代时的温度, 其计算公式为, $T_{n+1} = aT_n$, a 为退温系数。随着迭代次数增加, 劣质解被接受的概率逐渐减小。该算法的具体流程如图 6 所示。

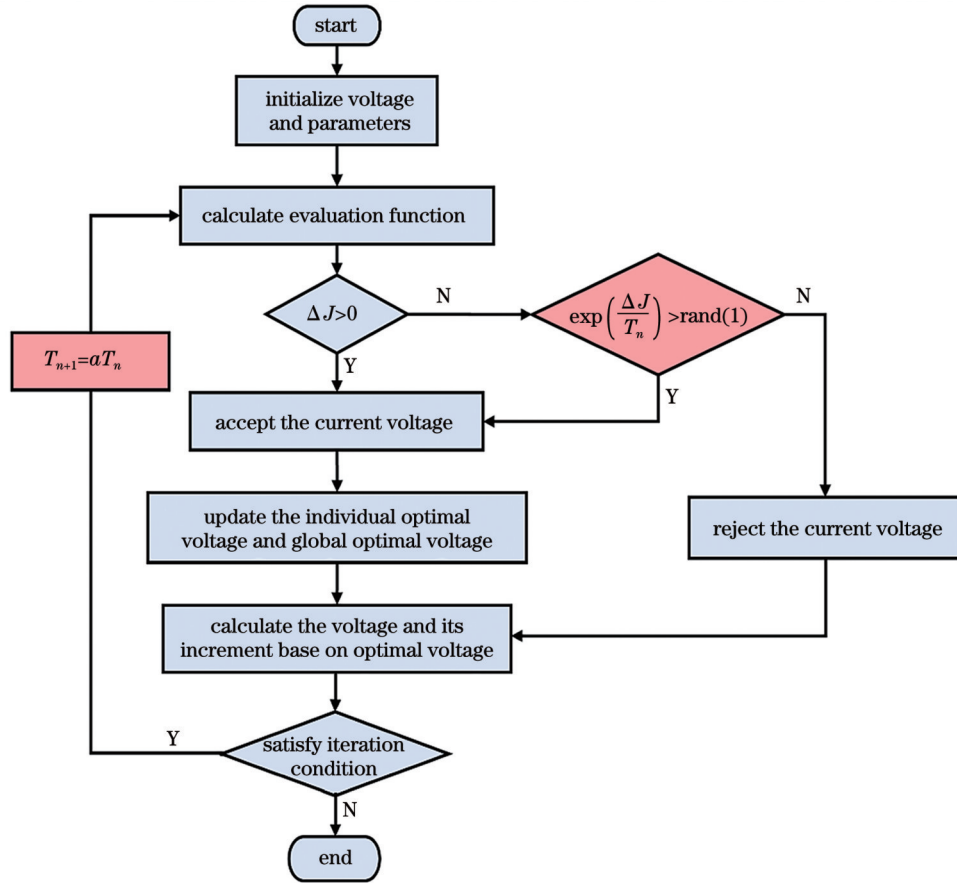


图 6 改进型 PSO 算法的流程图
Fig. 6 Flow chart of improved PSO algorithm

3.3 SPGD 算法

SPGD 算法是 AO 系统中比较常用的方法。为了进一步说明改进型 PSO 算法在优化性能方面的先进性和有效性, 有必要将该算法与 SPGD 算法对畸变光斑的校正结果进行比较。SPGD 的具体原理^[12]为: 在第 j 次迭代中, 施加到 N 个变形镜驱动器上的电压可以表示为 $\mathbf{V}_j^{(n)} = [v_j^{(1)}, v_j^{(2)}, \dots, v_j^{(N)}]$, 得到系统的评价函数 $J[\mathbf{V}_j^{(n)}]$ 。在第 $j+1$ 次迭代中, 产生随机扰动电压 $\Delta \mathbf{V}_j^{(n)} = [\Delta v_j^{(1)}, \Delta v_j^{(2)}, \dots, \Delta v_j^{(N)}]$, 然后将扰动电压 $\mathbf{V}^+ = \mathbf{V}_j^{(n)} + \Delta \mathbf{V}_j^{(n)}$ 和 $\mathbf{V}^- = \mathbf{V}_j^{(n)} - \Delta \mathbf{V}_j^{(n)}$ 分别施加到变形镜上, 并得到此时系统的评价函数 $J(\mathbf{V}^+)$ 和 $J(\mathbf{V}^-)$, 那么评价函数变化量 ΔJ 为 $\Delta J = J(\mathbf{V}^+) - J(\mathbf{V}^-)$ 。根据 SPGD 算法的电压更新公式, 可以得到第 $j+1$ 次迭代的电压 $\mathbf{V}_{j+1}^{(n)}$ 为

$$\mathbf{V}_{j+1}^{(n)} = \mathbf{V}_j^{(n)} + \gamma \Delta \mathbf{V}_j^{(n)} \Delta J, \quad (11)$$

这里, γ 为增益系数, 其正负取决于评价函数的优化方向: 若优化方向为评价函数的极大值, 取正数, 否则取负数。SPGD 算法的流程图如图 7 所示。

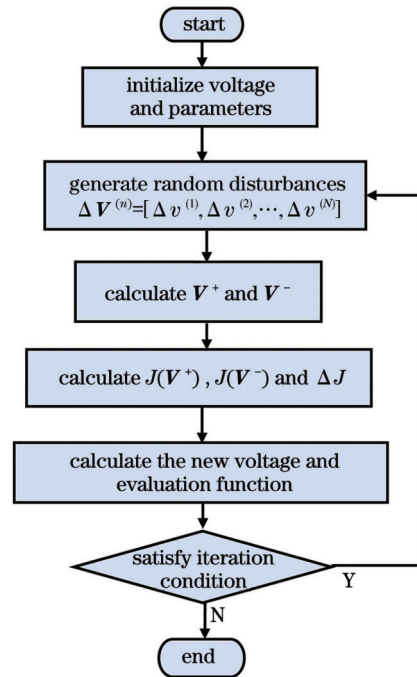


图 7 SPGD 算法流程图
Fig. 7 Flow chart of SPGD algorithm

4 SPGD、PSO 和改进型 PSO 算法校正结果的仿真与分析

通过仿真得到了中强湍流和强湍流下 SPGD、PSO 和改进型 PSO 算法(均以 S_R 为评价函数)的校正结果。具体仿真参数如表 1 所示。其中,湍流强度

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Wavelength / μm	1.064
Waist radius / mm	10
Phase screen distance / m	1000
Phase screen number	6
Phase screen size / m	0.4
Sample number	256
Iteration	1000

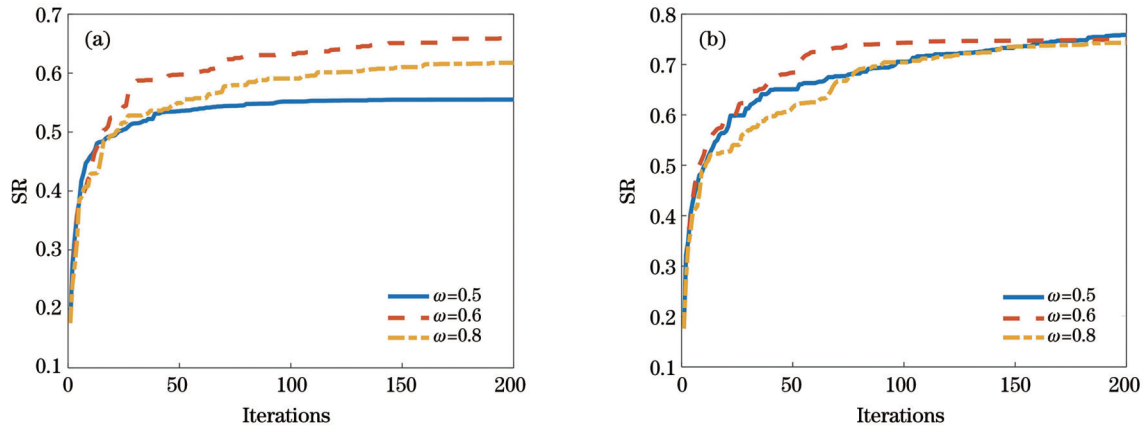
图 8 不同惯性参数 ω 下的优化结果。(a) PSO 算法; (b) 改进型 PSO 算法

Fig. 8 Optimization results under different inertial parameters. (a) PSO algorithm; (b) improved PSO algorithm

4.2 扰动系数和增益系数对优化结果的影响

同样, SPGD 算法的收敛速度和收敛极限也会受到增益系数和扰动幅度的影响。在相同的畸变光斑

根据望远镜有效直径 D 与大气相干长度 r_0 的比值 D/r_0 进行表征^[27], 中强湍流和强湍流的 D/r_0 分别为 5 和 10。由于校正过程具有一定的随机性, 本文采用了对同一畸变光斑进行多次优化后再取平均的处理方式。

4.1 惯性参数对优化结果的影响

惯性参数不同会导致算法的优化性能受到影响, 因此, 在算法优化之前需要先对惯性参数进行优化, 使算法处于最优状态。针对同一畸变光斑, 在不同的惯性参数取值下, 实施了多次优化并进行了统计。图 8 展示了不同惯性参数 ω 下 PSO 和改进型 PSO 算法的优化效果。可以看出: 在不同的惯性参数下, PSO 算法所能够达到的最优值不同, 当 $\omega = 0.6$ 时, PSO 算法取得最大收敛值 0.65; 改进型 PSO 算法对惯性参数的取值不敏感, 随着迭代次数增加, 该算法最终都能够达到相同的收敛极限。这一结果说明改进型 PSO 算法的鲁棒性更好。

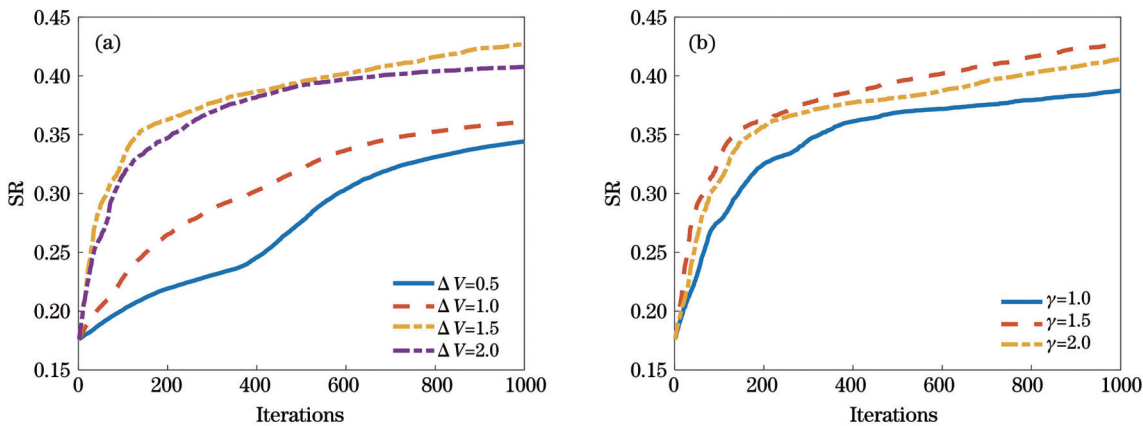


图 9 优化结果。(a) 不同扰动幅度下的优化结果; (b) 不同增益系数下的优化结果

Fig. 9 Optimization results. (a) Optimization results under different disturbance amplitudes; (b) optimization results under different gain coefficients

结果;当扰动幅度 $\Delta V = 1.5$ 时,SPGD 算法能够达到较好的优化结果。接着,固定扰动幅度,仿真得到了增益系数 γ 对优化结果的影响,如图 9(b) 所示。可以看出,虽然不同增益系数 γ 下收敛速度几乎相同,但 γ 取值过大或过小都不利于算法达到较好的优化结果。从图 9(b) 可以看出,当 $\gamma = 1.5$ 时,SPGD 算法的优化结果最好。

4.3 中强湍流和强湍流下 SPGD、PSO 和改进型 PSO 算法的校正结果

为了验证改进型 PSO 算法的先进性和有效性,根据表 1 所示的仿真参数,对比了中强湍流和强湍流下 SPGD、PSO、改进型 PSO 算法的校正结果。图 10 和图 11 所示分别为 $D/r_0 = 5$ 和 $D/r_0 = 10$ 条件下畸变光斑的校正仿真结果和 SR 优化曲线。

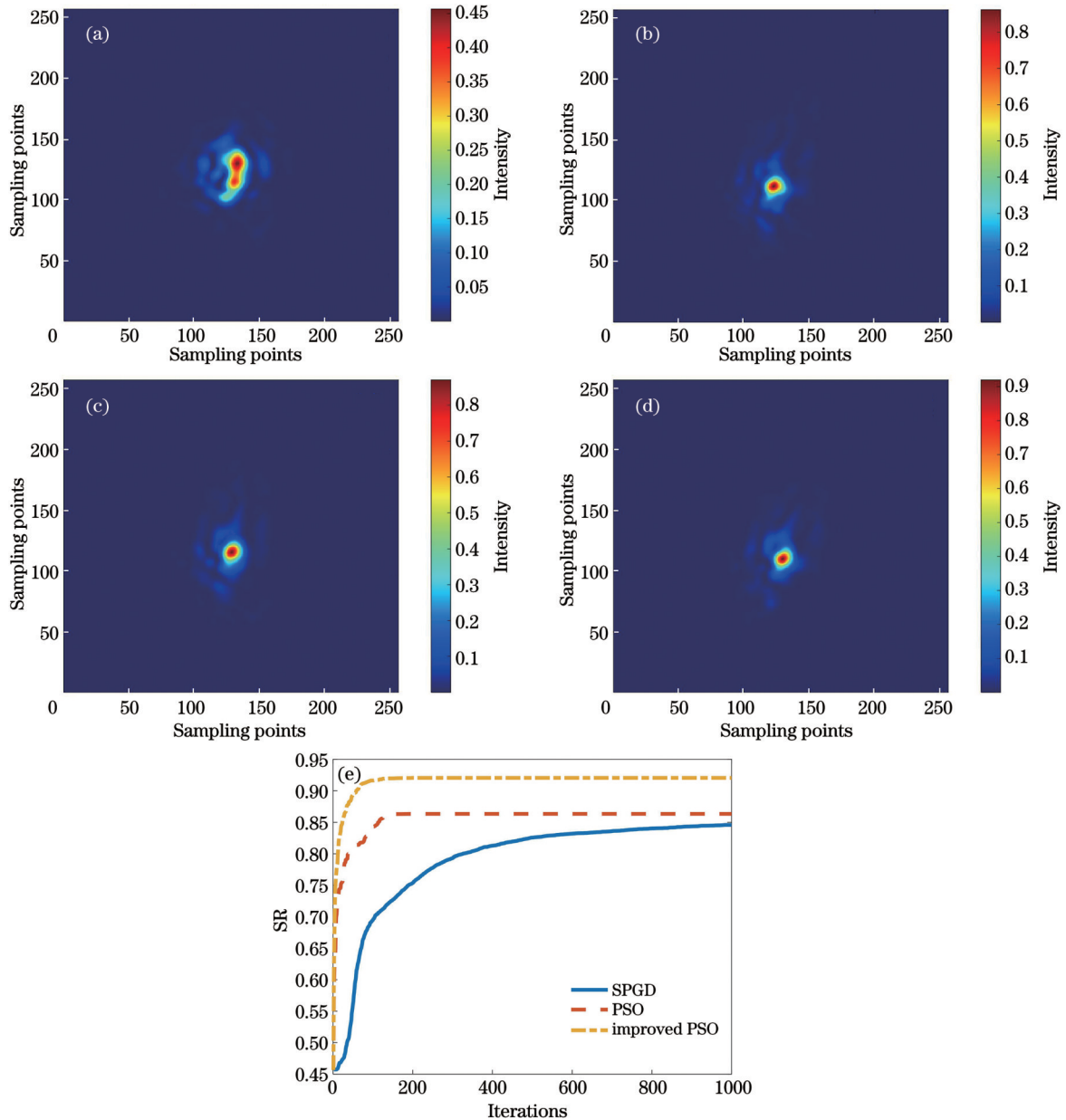


图 10 $D/r_0 = 5$ 时的畸变光斑图和 SR 优化曲线。(a) 未校正;(b)SPGD 算法校正后;(c)PSO 算法校正后;(d)改进型 PSO 算法校正后;(e)SR 优化曲线

Fig. 10 Distorted spot images and SR optimization curves when $D/r_0 = 5$. (a) Before correction; (b) after correction by SPGD; (c) after correction by PSO; (d) after correction by improved PSO; (e) SR optimization curves

可以看出:当 $D/r_0 = 5$ 时,经 SPGD 和 PSO 算法校正后的光强值由未校正时的 0.46 分别提高到 0.84 和 0.86,而经改进型 PSO 算法校正后的光强值由未校正时的 0.46 提高到 0.92;当 $D/r_0 = 10$ 时,经 SPGD 和

PSO 算法校正后的光强值由未校正时的 0.18 分别提高到 0.39 和 0.65,而经改进型 PSO 算法校正后的光强值由未校正时的 0.18 提高到 0.75。数值结果表明: D/r_0 越大,校正前光斑散斑越严重,能量分布越分散,

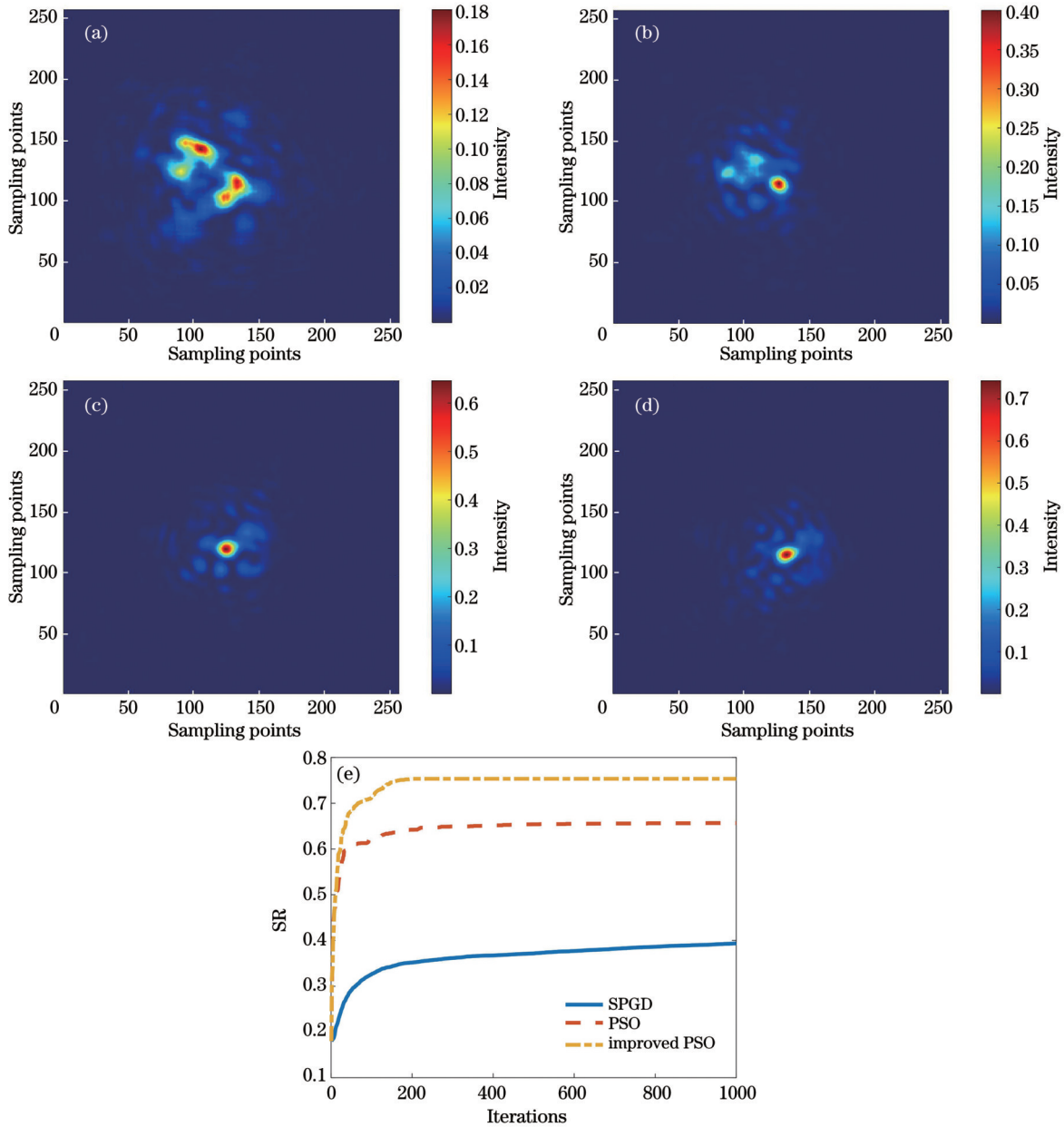


图 11 $D/r_0 = 10$ 时的畸变光斑图和 SR 优化曲线。(a) 未校正; (b) SPGD 算法校正后; (c) PSO 算法校正后; (d) 改进型 PSO 算法校正后; (e) SR 优化曲线

Fig. 11 Distorted spot images and SR optimization curves when $D/r_0 = 10$. (a) Before correction; (b) after correction by SPGD; (c) after correction by PSO; (d) after correction by improved PSO; (e) SR optimization curves

经算法校正后能量更加集中,中心光强值更大。具体来说,相比于 SPGD 和 PSO 算法,改进型 PSO 算法对中强湍流和强湍流下的光斑畸变都有更好的校正能力(在较大的 D/r_0 下校正效果更显著),能够收敛到更高的 SR 值,证明了改进型 PSO 算法的先进性和有效性。

4.4 收敛速度比较

SPGD、PSO 和改进型 PSO 算法迭代 1000 次的总耗时分别为 14.85、49.00、47.95 s。表 2 展示了在中强湍流和强湍流下,三种算法达到收敛极限的迭代次数和时间消耗。从表 2 中可以看出,在同等强度的湍流下,SPGD 算法用时最长,其次是 PSO 算法,改进型

PSO 算法用时最短。SPGD 算法在优化过程中会引入随机电压,优化过程具有随机性,因此收敛速度较慢;而改进型 PSO 算法保持了粒子共享信息的优势,能够加快收敛速度,同时还以一定的概率接受劣质解,减少了在局部最优解周围徘徊的时间,从而能以更快的速度靠近全局最优解。另外,湍流强度越大,三种算法达到收敛值所用的时间越长。改进型 PSO 算法在强湍流下的计算时间是中强湍流下的 2.46 倍。

4.5 收敛极限的比较

从图 12 中可以直观地看出,相比于 SPGD 和 PSO 算法,改进型 PSO 算法的优化结果最好,能够达到更高的收敛值,尤其是在强湍流条件下。对于中强湍流,

表 2 SPGD、PSO 和改进型 PSO 算法的收敛速度对比

Table 2 Comparison of convergence speed among SPGD, PSO and improved PSO algorithms

Optimization algorithm	Convergence iterations		Convergence time /s	
	Medium turbulence intensity	Strong turbulence intensity	Medium turbulence intensity	Strong turbulence intensity
SPGD	813	908	12.07	13.48
PSO	139	200	6.81	9.8
Improved PSO	70	172	3.36	8.25

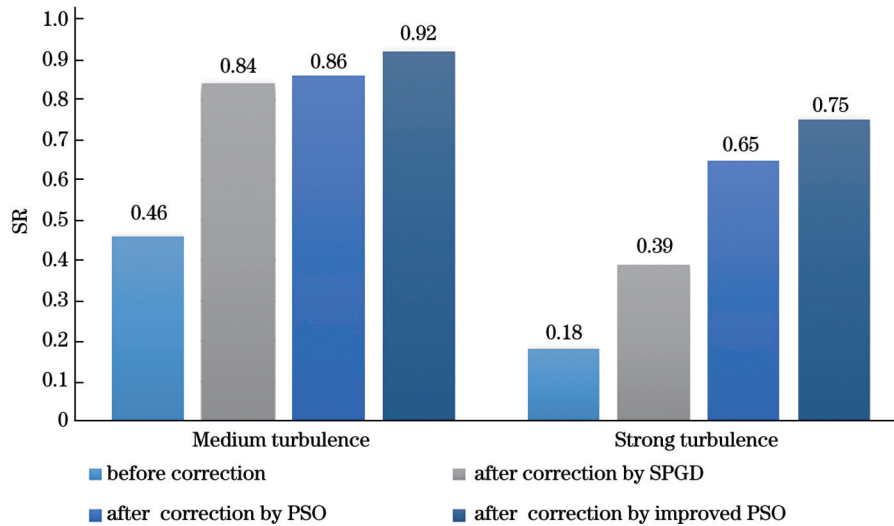


图 12 SPGD、PSO 和改进型 PSO 算法的收敛极限

Fig. 12 Convergence limit among SPGD, PSO and improved PSO algorithms

三种算法都能够使 SR 值提高到 0.8 以上,可以认为畸变校正达到了理想效果;对于强湍流,SPGD、PSO 和改进型 PSO 算法使 SR 值分别提高了 1.2 倍、2.6 倍和 3.2 倍。强湍流会导致严重的光斑畸变,对其进行优化存在局部极值情况时,改进型 PSO 算法的优势会突显出来,能够帮助其跳出局部最优,达到更高的收敛极限,更有利于提高系统的耦合效率,从而有效提高相干探测激光雷达的性能。

5 结 论

在相干探测中,传播光束会受到大气湍流的影响,从而导致光斑畸变,影响探测性能。AO 技术是补偿畸变的有效解决途径,其中智能优化算法的选取对于校正性能至关重要。SPGD 算法具有并行处理的优势,但由于引入了随机电压扰动,其收敛速度较慢; PSO 算法具有并行处理、简单易行、无需求导的优点,而且收敛速度较快。但这两种算法都存在容易陷入局部最优的缺点。针对这一问题,笔者提出了改进型 PSO 算法,通过引入 Metropolis 准则在一定程度上跳出了局部最优,从而达到更高的收敛值。除此之外,该算法具有较好的鲁棒性,对惯性参数的取值不敏感。相比 SPGD 和 PSO 算法,改进型 PSO 算法不仅可使校正后的畸变光斑能量更加集中,SR 值更高,还可以使

收敛时间更短,校正速度更快。该算法更有利于提高系统的探测性能,为相干探测激光雷达波前校正提供了新的解决方案,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 从海胜, 孙建锋, 卢智勇, 等. 调频连续波相干激光雷达的多脉冲频域相干累积研究[J]. 中国激光, 2022, 49(3): 0310003.
Cong H S, Sun J F, Lu Z Y, et al. Multi-pulse coherent accumulation in frequency domain based on frequency-modulation continuous-wave coherent lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(3): 0310003.
- [2] Zhou Y L, Li L, Wang K X, et al. Coherent Doppler wind lidar signal denoising adopting variational mode decomposition based on honey badger algorithm[J]. Optics Express, 2022, 30(14): 25774-25787.
- [3] Yuan J L, Su L, Xia H Y, et al. Microburst, windshear, gust front, and vortex detection in mega airport using a single coherent Doppler wind lidar[J]. Remote Sensing, 2022, 14(7): 1626.
- [4] Jiang P, Yuan J L, Wu K N, et al. Turbulence detection in the atmospheric boundary layer using coherent Doppler wind lidar and microwave radiometer[J]. Remote Sensing, 2022, 14(12): 2951.
- [5] 岳亚洲, 李彬, 雷宏杰. 激光大气运动参数测量技术研究进展及展望(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(4): 0428001.
Yue Y Z, Li B, Lei H J. Advances and prospects of laser measurement technology for air motion parameters (invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4): 0428001.
- [6] Fahey T, Islam M, Gardi A, et al. Laser beam atmospheric propagation modelling for aerospace LIDAR applications[J]. Atmosphere, 2021, 12(7): 918.
- [7] 金效梅, 朱文越, 刘庆. 激光相干测风技术应用研究[J]. 大气与

- 环境光学学报, 2020, 15(3): 161-173.
- Jin X M, Zhu W Y, Liu Q. Application research of laser coherent wind technology[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2020, 15(3): 161-173.
- [8] Yang S J, Xing T, Ke C H, et al. Effect of wavefront distortion on the performance of coherent detection systems: theoretical analysis and experimental research[J]. Photonics, 2023, 10(5): 493.
- [9] Tian Q H, Lu C D, Liu B, et al. DNN-based aberration correction in a wavefront sensorless adaptive optics system[J]. Optics Express, 2019, 27(8): 10765-10766.
- [10] Zhai Y W, Fu S Y, Zhang J Q, et al. Turbulence aberration correction for vector vortex beams using deep neural networks on experimental data[J]. Optics Express, 2020, 28(5): 7515-7527.
- [11] Fried D L. Statistics of a geometric representation of wavefront distortion[J]. Journal of the Optical Society of America, 1965, 55(11): 1427-1435.
- [12] 赵辉, 邝凯达, 吕典楷, 等. 空间光波前畸变校正中 SPGD 方法的自适应优化[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(8): 20210697. Zhao H, Kuang K D, Lü D K, et al. Adaptive optimization of SPGD method in spatial wavefront distortion correction[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(8): 20210697.
- [13] 陈波, 李新阳, 姜文汉. 大气湍流自适应光学随机并行梯度下降算法的优化[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 959-964. Chen B, Li X Y, Jiang W H. Optimization of stochastic parallel gradient descent algorithm for adaptive optics in atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(4): 959-964.
- [14] 陈梅蕊, 姜律, 毛红敏, 等. SPGD 算法高精度静态像差校正方法[J]. 光学学报, 2023, 43(5): 0511001. Chen M R, Jiang L, Mao H M, et al. High-precision static aberration correction method of SPGD algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(5): 0511001.
- [15] 祁家琴, 郑文慧, 江文隽, 等. 激光相干合成系统中基于自适应随机扰动电压的 SPGD 优化算法[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(15): 1514004. Qi J Q, Zheng W H, Jiang W J, et al. Optimization of SPGD algorithm based on adaptive random perturbation voltages in coherent beam combining[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(15): 1514004.
- [16] Zhang P, Wei P, Yu H Y. A novel block matching algorithm based on particle swarm optimization with mutation operator and simplex method[J]. WSEAS Transactions on Systems and Control Archive, 2011, 6: 207-216.
- [17] 林旭东, 薛陈, 刘欣悦, 等. 自适应光学波前校正器技术发展现状[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 337-351. Lin X D, Xue C, Liu X Y, et al. Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics[J]. Chinese Optics, 2012, 5(4): 337-351.
- [18] Freeman R H, Pearson J E. Deformable mirrors for all seasons and reasons[J]. Applied Optics, 1982, 21(4): 580-592.
- [19] 杨桂通. 弹塑性力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980. Yang G T. Elastic-plastic mechanics[M]. Beijing: People's Education Press, 1980.
- [20] 徐光勇. 大气湍流中的激光传输数值模拟及其影响分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2008: 44-47. Xu G Y. Numerical simulation of laser propagation in atmospheric turbulence and its influence analysis[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008: 44-47.
- [21] Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham: SPIE, 2005.
- [22] 张冬晓, 陈志斌, 肖程, 等. 基于修正大气谱的湍流相位屏高精度生成方法[J]. 光子学报, 2020, 49(6): 0601002. Zhang D X, Chen Z B, Xiao C, et al. Generation of high-precision turbulence phase screen based on modified atmosphere spectrum[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(6): 0601002.
- [23] 饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005: 4-9. Rao R Z. Light propagation in the turbulent atmosphere[M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 2005: 4-9.
- [24] 汪建业. 大气光学湍流光学测量方法的研究[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2005. Wang J Y. Research on optical measurement methods of atmospheric optical turbulence[D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [25] 陈敬月, 高一然, 吴钟涵, 等. 100.8 km 大动态零差相干微波光子传输链路[J]. 光学学报, 2022, 42(5): 0506001. Chen J Y, Gao Y R, Wu Z H, et al. Homodyne coherent microwave photonic transmission link with 100.8 km high dynamic range[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 0506001.
- [26] Li Z K, Cao J T, Zhao X H, et al. Atmospheric compensation in free space optical communication with simulated annealing algorithm[J]. Optics Communications, 2015, 338: 11-21.
- [27] Liu C, Chen S Q, Li X Y, et al. Performance evaluation of adaptive optics for atmospheric coherent laser communications[J]. Optics Express, 2014, 22(13): 15554-15563.

Distortion Spot Correction Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

Liu Zhen^{1,2}, Zhu Xiaopeng^{1,2*}, Bi Decang^{1,2}, Liu Jiqiao^{1,2}, Chen Weibiao^{1,2**}

¹Space Laser Engineering Department, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective Coherent detection lidar, a pivotal optical sensing technology, is widely used in various fields, including meteorological forecasting, wind energy generation, and other fields. However, the performance of coherent-detection lidar is significantly affected by atmospheric turbulence in practical applications. Turbulence induces random variations in the optical path, resulting in wavefront

distortion that adversely affects the quality of the received beam. Wavefront distortion correction, achieved through adaptive optics technology, has been proved to be an effective solution. The core of this method involves the use of optimization algorithms to control a deformable mirror, generating a phase that is conjugate to the wavefront distortion, thereby compensating for wavefront aberrations. The stochastic parallel-gradient descent (SPGD) algorithm is widely used for this purpose. However, because of the introduction of random perturbations, it exhibits a slow convergence speed. The particle swarm optimization (PSO) algorithm, proposed by Kennedy and Eberhart, is favored owing to its rapid convergence, simplicity, independence from derivative information, and parallel computation capabilities. However, both algorithms are susceptible to becoming trapped in local optima, particularly when addressing large and complex problem spaces. To address this challenge, we propose an improved PSO algorithm for distortion spot correction.

Methods The improved PSO algorithm introduces the Metropolis criterion to probabilistically accept solutions with relatively low performance, which aids in escaping local optima, thereby achieving a higher convergence limit. The application of this algorithm to wavefront distortion correction further enhances the correction capabilities. First, we simulated the laser transmission through atmospheric turbulence based on the multi-phase screen propagation principle, resulting in the generation of distorted spots. Subsequently, we optimized the inertial parameters in both the PSO and improved PSO algorithms as well as the gain coefficients and perturbation amplitudes in the SPGD algorithm. This is because different parameter values can significantly influence the optimization performance. Hence, these parameters were adjusted to ensure that the algorithms operated at their peak efficiencies. Finally, we conducted a comprehensive comparative analysis of the correction results achieved by the SPGD, PSO, and improved PSO algorithms under medium and strong turbulence conditions, using the Strehl ratio (SR) as the evaluation function.

Results and Discussions The improved PSO algorithm exhibited remarkable insensitivity to the inertial parameters (Fig. 9), indicating its superior robustness. All three algorithms were employed to correct the distorted spots under medium and strong turbulence conditions (Figs. 10 and 11). Based on the correction results, the convergence speed and limit were analyzed. Table 2 lists the convergence iterations and the time required by each of the three algorithms to achieve convergence. Under similar conditions, SPGD converges the slowest, followed by PSO, and the improved PSO converges the fastest. The reason for this discrepancy is the pronounced stochasticity of the SPGD algorithm during the optimization process, resulting in a longer convergence time. Additionally, the improved PSO algorithm concentrated the energy of the corrected distorted spot and achieved a higher SR because it increased the probability of accepting bad solutions (Fig. 12). Under strong turbulence conditions, the SPGD, PSO, and improved PSO algorithms contributed to SR improvements of 1.2, 2.6, and 3.2 times, respectively. Strong turbulence can result in severe spot distortion. When local optima are present during optimization, the advantages of the improved PSO algorithm become particularly prominent, enabling it to attain a higher convergence limit. This is advantageous for enhancing the system coupling efficiency, thereby effectively improving the performance of coherent detection lidar.

Conclusions Coherent detection lidar is affected by atmospheric turbulence. Turbulence results in spot distortion, which reduces the detection performance. AO technology is an effective method for mitigating this distortion, and the selection of an intelligent optimization algorithm is crucial in this process. The SPGD algorithm exhibits parallel processing capabilities; its incorporation of random voltage perturbations results in slow convergence, whereas the PSO algorithm not only offers parallel processing and simplicity but also achieves rapid convergence without the need for derivative information. Nonetheless, both algorithms easily fall into the local optima. To address this problem, this study proposes an improved PSO algorithm that introduces the Metropolis criterion to escape local optima and reach a higher convergence limit. This algorithm is insensitive to the inertial parameters and exhibits better robustness. In comparison with the SPGD and PSO algorithms, the improved PSO algorithm enhances the convergence speed and convergence limit. In summary, the improved PSO algorithm demonstrates a more advantageous capacity for improving the performance of coherent detection lidar, particularly for strong turbulence.

Key words coherence optics; coherent detection lidar; adaptive optics; distortion spot correction; improved particle swarm optimization algorithm

