

## 面向自由空间光通信波前校正的改进模拟退火算法

李洪利 刘欣悦 杜博军 曹景太 张恒

### Improved simulated annealing algorithm for wavefront correction in free-space optical communication

LI Hong-li, LIU Xin-yue, DU Bo-jun, CAO Jing-tai, ZHANG Heng

引用本文:

李洪利, 刘欣悦, 杜博军, 曹景太, 张恒. 面向自由空间光通信波前校正的改进模拟退火算法[J]. *中国光学*, 2025, 18(4): 784–793. doi: 10.37188/CO.2025-0028

LI Hong-li, LIU Xin-yue, DU Bo-jun, CAO Jing-tai, ZHANG Heng. Improved simulated annealing algorithm for wavefront correction in free-space optical communication[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(4): 784–793. doi: 10.37188/CO.2025-0028

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0028>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 适用于近地面成像的自适应光学系统研究

An adaptive optics system suitable for near-ground imaging

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(4): 843 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0230>

#### 基于焦面复制方法的自适应光学系统静态像差校正技术

Static aberration correction technique for adaptive optics system based on focal-plane copy approach

*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(3): 545 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0182>

#### 双波长视网膜成像自适应光学系统的轴向色差补偿方法

Longitudinal chromatic aberration compensation method for dual-wavelength retinal imaging adaptive optics systems

*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(1): 79 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2021-0009>

#### 高波前拟合精度的紧凑型音圈变形镜

Compact voice coil deformable mirror with high wavefront fitting precision

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(6): 1463 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0001>

#### 同步辐射用36单元压电变形镜研制及其面形调控研究

Development of a 36-element piezoelectric deformable mirror for synchrotron radiation and its surface control ability

*中国光学 (中英文)*. 2021, 14(6): 1362 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0103>

#### 一种基于定标的非均匀性校正改进算法

An improved non-uniformity correction algorithm based on calibration

*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(3): 498 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0231>

文章编号 2097-1842(2025)04-0784-10

# 面向自由空间光通信波前校正的改进模拟退火算法

李洪利<sup>1,2</sup>, 刘欣悦<sup>1</sup>, 杜博军<sup>3</sup>, 曹景太<sup>1</sup>, 张恒<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国人民解放军 63850 部队, 吉林 白城 137001)

**摘要:**为了补偿大气湍流对相干自由空间光通信的影响, 本文研发了一种基于改进模拟退火算法的自适应光学系统, 旨在优化系统的混频效率和降低误码率, 从而提升整体系统性能。首先, 介绍了含无波前自适应光学部分的相干光通信系统的组成, 并重点分析了混频效率和误码率等关键参数。随后, 详细阐述了改进模拟退火算法的工作原理及其在自适应光学系统中的应用。为了验证算法的有效性, 进行了数值模拟分析, 并与传统算法进行了对比分析。最后, 在实验平台上收集实际数据以进一步评估算法性能。实验结果表明: 改进模拟退火算法相比于普通模拟退火算法, 迭代次数减少 50% 的情况下, 误码率降低到  $10^{-9}$ , 混频效率提高到 0.9。改进模拟退火算法可以减少传统自适应光学系统的迭代次数, 提高波前校正精度, 满足通信系统的需求。

**关键词:**波前校正; 自适应光学; 无波前传感; 混频效率; 误码率

中图分类号: O436

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2025-0028

CSTR: 32171.14.CO.2025-0028

## Improved simulated annealing algorithm for wavefront correction in free-space optical communication

LI Hong-li<sup>1,2</sup>, LIU Xin-yue<sup>1</sup>, DU Bo-jun<sup>3</sup>, CAO Jing-tai<sup>1</sup>, ZHANG Heng<sup>1\*</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China;

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

3. Unit 63850 of the People's Liberation Army, Baicheng 137001, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhangheng@ciomp.ac.cn

**Abstract:** To compensate for atmospheric turbulence-induced wavefront distortion in coherent free-space optical communication, we develop an adaptive optical system based on the improved simulated annealing algorithm. The system seeks to optimize mixing efficiency and reduce the bit error rate, ultimately enhancing

收稿日期: 2025-02-26; 修订日期: 2025-03-19

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2023YFB3905703); 吉林省科技发展计划项目 (No. 20210101468JC); 中国科学院海洋大科学研究中心重点部署项目 (No. COMS2020J09)

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB3905703); Science and Technology Development Project of Jilin Province, China (No. 20210101468JC); the Key Deployment Project of Centre for Ocean Mega-Research of Science, Chinese Academy of Sciences (No. COMS2020J09)

overall system performance. First, we describe the structure of a coherent optical communication system without a wavefront adaptive optics component, focusing on key parameters such as mixing efficiency and bit error rate. Next, the paper implements a detailed explanation of the working principles of the improved simulated annealing algorithm and its application in adaptive optical systems. To validate the proposed algorithm's effectiveness, numerical simulations are performed and compared against traditional algorithms. Finally, real-world data is collected from an experimental platform to further assess the algorithm's performance. Experimental results demonstrate that, in comparison to the standard simulated annealing algorithm, the improved simulated annealing algorithm reduces the iteration count by 50%, decreases the bit error rate to  $10^{-9}$ , and increases the mixing efficiency to 0.9. Overall, the improved simulated annealing algorithm effectively reduces the iteration count in traditional adaptive optical systems, enhances wavefront correction accuracy, and satisfies communication system requirements.

**Key words:** wavefront correction; adaptive optics; wavefront sensor-less; mixing efficiency; bit error rate

## 1 引言

在现代通信中, 相干自由空间光通信(coherent free-space optical communication, CFSOC)与传统的自由空间光通信相比, 中继距离更长、灵敏度更高, 因此备受关注<sup>[1]</sup>。然而, 由于大气湍流会在接收机处造成强度闪烁和波前相位失真, 从而降低混频效率(mixing efficiency, ME), 并增加CFSOC系统的误码率(Bit Error Ratio, BER)<sup>[2]</sup>。

自适应光学(adaptive optics, AO)技术被用于补偿大气湍流造成的波前像差, 并在许多应用中取得了显著效果<sup>[3]</sup>。Shack-Hartmann波前传感器是传统AO系统中使用最广泛的波前传感器, 它直接决定了CFSOC中AO系统的性能<sup>[4]</sup>。然而, 由于其固有的工作原理缺陷, 在强大气湍流或低光功率情况下, 其测量精度会降低, 从而直接影响系统性能<sup>[5]</sup>。为了克服波前传感器的局限性, 基于优化算法的无传感器自适应光学(wavefront-sensor-less adaptive optics, WLAO)方法被提出<sup>[6]</sup>。它利用信号或图像直接控制可变形镜, 基于图像质量与波前变化的关系进行优化, 不需要波前重建。

在WLAO系统中, 多维优化算法对系统性能具有显著影响。为解决经典SPGD(stochastic parallel gradient descent)算法的不足, 研究者提出了多种改进方案。其中, 王挺峰等人基于性能指标的变化, 提出了具有自适应增益和动量的Adm-

SPGD, 并在光纤激光束合成系统中显著提高了收敛速度、鲁棒性和有效带宽<sup>[7]</sup>。但其不能直接应用于CFSOC系统。同时, 研究人员发现深度学习网络在实时性能提升方面表现优异<sup>[8]</sup>, 然而, 其也存在明显的局限性, 由于卷积层能力受限以及模型计算复杂度较高, 深度学习网络难以有效应对强烈的大气湍流。

鉴于上述问题, 急需选择一种能够在不同湍流强度下同时兼顾CFSOC系统实时性能和通信质量的算法。模拟退火算法借鉴金属退火的物理机制, 通过逐步降温逼近最低能量态, 在复杂搜索空间中展现出寻找全局最优解的独特优势<sup>[9]</sup>。然而, 该算法也存在收敛过早和迭代次数过多的局限性, 制约了其应用效率。针对这些问题, 本文引入了一种改进模拟退火算法(improved simulated annealing, ISA)<sup>[10]</sup>, 该方法可以显著提升波前校正精度和速度。这一改进对于高分辨率成像和激光通信等领域的应用至关重要。

本文首先根据相干通信理论分析了CFSOC系统的关键参数ME和BER。然后对波前进行数值模拟, 使用ISA与其他经典算法对波前像差进行校正。进一步通过实验分析验证了该算法在提高自由空间光通信系统性能方面的有效性。

## 2 系统模型

具有WLAO的典型CFSOC系统的功能框图如图1所示。激光源发射调制的激光作为载波

信号,然后波束通过大气传输到接收终端。接收信号与本振光进行混频,产生中频信号,使用解调器完成后续处理。在激光传输过程中,大气湍流会使激光相位发生畸变。为了补偿大气湍流的影响,在接收端引入了 WLAO 系统。

WLAO 子系统主要由 3 部分组成:包括 CCD 相机、波前控制器和可变形镜<sup>[1]</sup>。首先,通过 CCD

相机捕获散斑图像,其能量集中率能够反映系统当前的性能状况;其次,波前控制器根据图像采用优化算法生成电压控制信号,使用高压放大器将信号放大到合适的电压范围,以控制可变形镜来校正失真的波前。通过变形镜实时校正有效对抗大气湍流带来的干扰。从而确保 CFSOC 系统的性能可以得到提高。

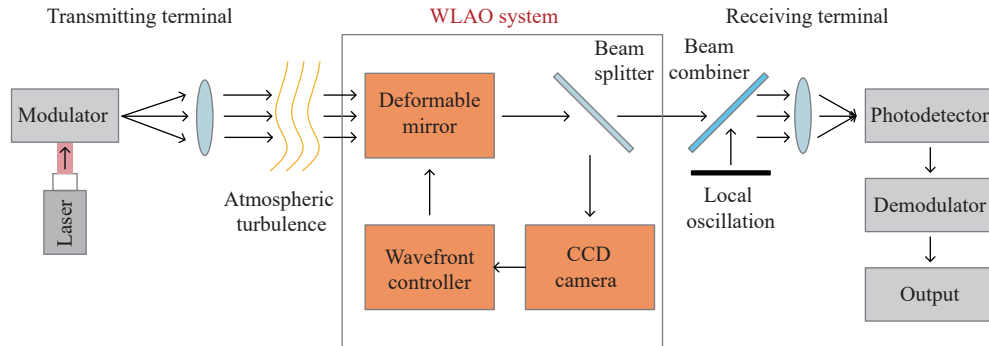


图 1 含有 WLAO 系统的 CFSOC 系统框图

Fig. 1 Schematic diagram of conventional CFSOC system with WLAO

### 3 理论分析

#### 3.1 相干光通信理论

在 CFSOC 系统中,混频效率和误码率是评价系统性能的有效指标。CFSOC 系统零差探测中,混频效率近似于远场光斑图像的斯特列尔比 (Strehl ratio, SR),可表示为<sup>[12]</sup>:

$$ME \propto SR = \frac{\left[ \int A_s A_o \cos(\varphi(r) + \varphi(t)) ds \right]^2}{\int A_s^2 ds \int A_o^2 ds}, \quad (1)$$

式中  $A_s$  和  $A_o$  分别表示接收光信号和本振信号的幅值。函数  $\varphi(r)$  和  $\varphi(t)$  与接收光信号和本振之间的相位差有关。

误码率是衡量系统传输效率的重要指标。湍流引起的波束偏差对该参数影响较大,导致误码率增加,通信可靠性降低。在大气湍流下,二进制相移键控 (binary phase shift keying, BPSK) 接收系统的误码率可以表示为<sup>[13]</sup>:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{2\delta N_p \cdot ME}), \quad (2)$$

式中,  $N_p$  表示单个比特接收到的光子数,  $\delta$  表示探测器的量子效率,  $\operatorname{erfc}$  表示互补误差函数,  $ME$  表示系统的混频效率。

#### 3.2 改进模拟退火算法

在改进模拟退火算法中,采用了包含  $m$  个个体的种群作为优化的基础框架。每个个体独立执行基于改进模拟退火的搜索策略。该方法受到日本古代铸剑术的启发,提出了两种新的操作机制——折叠和再加热。折叠是对搜索空间的压缩,再加热机制是对冷却过程的重新初始化。新机制显著提升了传统模拟退火算法的探索能力和利用效率。该方法的操作分为 4 个不同的部分:初始化;原始模拟退火;折叠;再加热。

##### (1) 初始化

首先需要初始化种群和搜索空间的上下限。同时与其他元启发式算法类似,改进的模拟退火算法也有一些重要的配置参数,具体包括以下几点:种群规模,用于平衡搜索的多样性与计算效率;每次折叠前的模拟退火迭代次数,以确保每轮折叠操作之前能够充分探索解空间;退火效率,用于控制退火过程中温度的降低速率;最大折叠次数,用于限制搜索空间压缩的频率和范围。本文种群规模为 10,模拟退火迭代次数为 4,退火效率为 0.45,最大折叠次数为 100。这些设置经过大量实验验证,能够在全局搜索和局部优化之间实现有效协同,从而确保算法的高效性和稳定性。

(2) 原始模拟退火算法:

SA 算法的工作原理是通过定义目标函数, 从提出的任意解决方案中评估全局最优解。算法中, 解  $s^k$  和相应的目标函数值  $f(s^k)$  可分别视为金属在退火过程中的状态和相应的能量, 最优解是能量最低的状态。在高温条件下, 该算法允许在搜索空间中进行大规模移动, 接受差解的概率更高。在这种机制下, 避免算法陷入局部解。在低温条件下, 接受较差解的概率大大降低, 有利于找到最优解。

温度降低过程如式(3)所示, 其中  $\lambda$  代表退火效率。

$$T_k = \lambda T_{k-1} \quad (3)$$

首先从初始解  $s^0$  开始, 启动迭代过程。在此过程中, 对于每个迭代  $k$ , 通过随机扰动生成一个接近当前解  $s^k$  的邻居解  $s'$ 。根据 Metropolis 准则<sup>[14]</sup>, 接受解  $s'$  作为新解  $k+1$  的概率为  $p^k$ , 由式(4)给出:

$$p^k = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(f(s') - f(s^k))}{T_k}\right) & \text{if } f(s') - f(s^k) > 0 \\ 1 & \text{if } f(s') - f(s^k) \leq 0 \end{cases}, \quad (4)$$

$$f = \begin{cases} foldLL + k \cdot \frac{foldUL - foldLL}{maxFolds} & \text{if } k < \frac{maxFolds}{2} \\ foldUL & \text{otherwise} \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, maxFolds \quad (7)$$

(4) 再加热

折叠操作完成后, 执行再加热过程。在再加热过程中, 重新初始化当前温度  $T$ 。该操作将重启模拟退火算法的搜索容量。

$$T = T_0 \quad (8)$$

表 1 详细描述了用于校正系统的改进模拟退火算法的实现过程。

表 1 算法伪代码

Tab. 1 Algorithm pseudocode

算法: 改进模拟退火算法

输入: 种群数量, 最大迭代次数 MaxIter, 最大退火次数 MaxCooling, 初始温度  $T_0$ , 退火效率  $\lambda$

输出: 最优解 BestSolution

- 1: 初始化种群中的个体
- 2: for 1 iter from 1 to MaxIter

无论是否采用新的解, 温度都会降低。这一过程不断重复, 直到温度达到规定的最终温度。

(3) 折叠

折叠过程通过减少搜索空间的长度或宽度, 最终定义一个新的、更小的搜索空间。为了降低计算复杂度, 搜索空间的缩小通过线性缩减实现。新边界通过折叠因子  $f$  来计算, 从而缩小原始搜索空间的尺寸。这种缩减模型如下:

$$\begin{aligned} fb^{low} &= b^{low} / f \\ fb^{high} &= b^{high} / f \end{aligned}, \quad (5)$$

其中,  $fb^{low}$  和  $fb^{high}$  分别代表缩小后搜索空间的下限和上限,  $b^{low}$  和  $b^{high}$  代表原始搜索空间的范围。折叠过程在温度达到最终温度后进行。随后, 选取最优的个体  $\varphi_{best}$ , 并以其位置为中心缩小搜索空间。由此计算得出新的搜索范围:

$$range = \begin{bmatrix} \varphi_{best} - \frac{(fb^{high} - fb^{low})}{2} \\ \varphi_{best} + \frac{(fb^{high} - fb^{low})}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} foldLL \\ foldUL \end{bmatrix}. \quad (6)$$

折叠因子  $f$  的计算公式如式(7)所示,  $f$  从下限  $foldLL$  开始, 直到当前折叠迭代  $k$  为  $maxFolds/2$  时,  $f$  值达到上限  $foldUL$ 。

续表 1

算法: 改进模拟退火算法

- 3: for 2  $k$  from 1 to MaxCooling
- 4: 随机生成服从伯努利分布的扰动电压
- 5: 计算评价指标
- 6: 根据 Metropolis 准则决定是否接收新的解
- 7: 降低温度
- 8: end for 2
- 9: 找到当前最优个体 pbest, 围绕 pbest 进行折叠
- 10: 再加热
- 11: end for 1

3.3 变形镜

本文采用 97 单元连续表面可变形镜 (continuous surface deformable mirror, CSDM) 作为波

前校正器。CSDM 的工作原理是根据控制电压实时改变反射镜的表面形状以校正波前像差。通常, CSDM 的影响函数由高斯模型近似:

$$S_j(x, y) = \exp \left\{ \ln \omega \left[ \frac{1}{d} \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} \right]^\alpha \right\}, \quad (9)$$

式中,  $\omega$  是相邻执行器的耦合系数,  $(x_j, y_j)$  是第  $j$  个执行器的中心坐标,  $d$  是相邻执行器之间的归一化间隔,  $\alpha$  是高斯指数。由 97 个执行器 CSDM 产生的像差  $\varphi(x, y)$  可表示为:

$$\varphi(x, y) = \sum_{j=1}^{97} u_j S_j(x, y), \quad (10)$$

式中,  $u_j$  是第  $j$  个执行器的电压, 在最大电压范围内均匀分布, 与  $\varphi(x, y)$  成正比。

### 3.4 适应度

在系统中应用优化算法时, 需要建立算法的适应度和系统性能指标之间的关系。将初始波前像差表示为  $\varphi_0(r, \theta)$ , 算法的解为 97 维向量  $\mathbf{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_{97}\}$ , 其中向量中的每个分量表示 CSDM 中每个执行器的控制电压。由此生成的补偿相位表示为  $\varphi_1(r, \theta)$ , 则残余像差可由  $\varphi(r, \theta) = \varphi_0(r, \theta) - \varphi_1(r, \theta)$  给出。通常, 可以将  $\varphi(r, \theta)$  的均方根 (Root Mean Square, RMS) 作为中间变量来评估系统的 ME。根据理论研究可知<sup>[15]</sup>, 在 CFSOC 系统零差探测过程中, 系统 ME 近似等于 SR。对于高斯光束激光光源, 采用 Zernike 多项式描述波前像差, 其 SR 可以近似表示为<sup>[15]</sup>:

$$SR \approx \exp(-RMS^2). \quad (11)$$

为了简化数值模拟中的计算过程, 通过 SR 来近似得到 ME。本研究将 SR 作为算法的适应度, 在接下来的章节中将通过算法获得最优的 SR。

## 4 数值模拟和实验分析

### 4.1 数值模拟

一般采用 Zernike 多项式将波面分解为代表各种像差的加权正交多项式之和。波前相位  $\varphi_0(r, \theta)$  可表示为<sup>[16]</sup>:

$$\varphi_0(r, \theta) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} a_i Z_i(r, \theta), \quad (12)$$

其中,  $a_i$  表示第  $i$  项 Zernike 多项式的系数,  $Z_i$  为第  $i$  项 Zernike 多项式, 本文使用 Noll 的排序。根据 Kolmogorov 理论, 湍流的相结构函数可表示为<sup>[17]</sup>:

$$D(r) = 6.88 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}}, \quad (13)$$

其中,  $r$  是径向变量,  $r_0$  是大气相干长度, 结合相位结构函数和 Zernike 多项式, 任意两项 Zernike 多项式系数  $a_i(n_i, m_i)$  和  $a_{i'}(n_{i'}, m_{i'})$  之间存在时间相关性, 它们的协方差可表示为<sup>[18]</sup>:

$$\langle a_i, a_{i'} \rangle = \frac{K_{zz'} \delta_{mm'} \Gamma \left[ \frac{n+n' - \frac{5}{3}}{2} \right] \left( \frac{D}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}}}{\Gamma \left[ \frac{n-n' + \frac{17}{3}}{2} \right] \Gamma \left[ \frac{-n+n' + \frac{17}{3}}{2} \right] \Gamma \left[ \frac{n+n' + \frac{23}{3}}{2} \right]}, \quad (14)$$

$$K_{zz'} = 2.2698 (-1)^{(n+n'-2m)/2} \sqrt{(n+1)(n'+1)}, \quad (15)$$

其中,  $\Gamma$  是伽马符号,  $\delta_{mm'}$  是 Kronecker 逻辑符号。  $D$  是相机孔径,  $r_0$  是大气相干长度, 通常  $D/r_0$  用来表示湍流强度<sup>[19]</sup>。

在 Zernike 多项式中, 第 0 项代表平移,  $Z_1(r, \theta)$ ,  $Z_2(r, \theta)$  代表沿  $X$  方向和  $Y$  方向的倾斜像差。它们可以通过倾斜校正系统进行校正, 实现较为简单<sup>[20]</sup>。Zernike 多项式的高阶模式在描述复杂波形时展现出更优的拟合精度。在实际传输过程中, 35 阶 Zernike 多项式可以很好地表示波前像差<sup>[21]</sup>。文中选取 Zernike 多项式的第 3 项至第 35 项, 以模拟波前进行分析。

在模拟中, 采用惯用的工作波长 532 nm,  $D/r_0$  分别被设为 15 和 5, 用来模拟强大气湍流和弱大气湍流。生成的 Zernike 系数如图 2 所示。

使用 ISA 算法分别对模拟的强湍流和弱湍流环境进行像差校正。通过多次迭代后, 大部分的波前像差均得到了有效补偿。图 3 (彩图见期刊电子版) 展示了强湍流条件下原始相位图以及经过 ISA 算法校正后的相位图。图 4 (彩图见期刊电子版) 则呈现了弱湍流条件下原始的相位图以及 ISA 校正后的结果。这些图像直观地反映了校正前后相位图的变化情况。

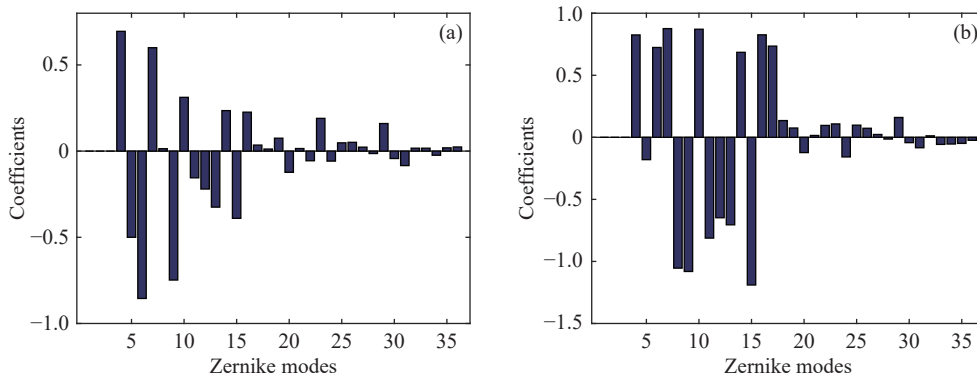


图 2 波前像差的初始 Zernike 系数。(a)弱湍流;(b)强湍流

Fig. 2 Initial Zernike coefficients of the wavefront aberration. (a) Weak turbulence; (b) strong turbulence

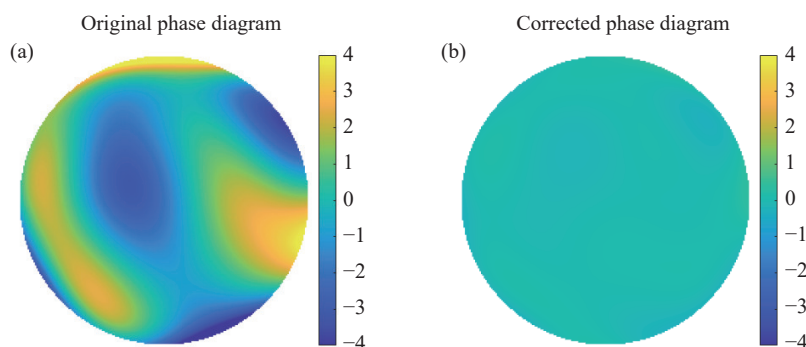


图 3 强湍流下校正前(a)、后(b)的波前相面

Fig. 3 Wavefront phase surfaces before (a) and after (b) correction under strong turbulence

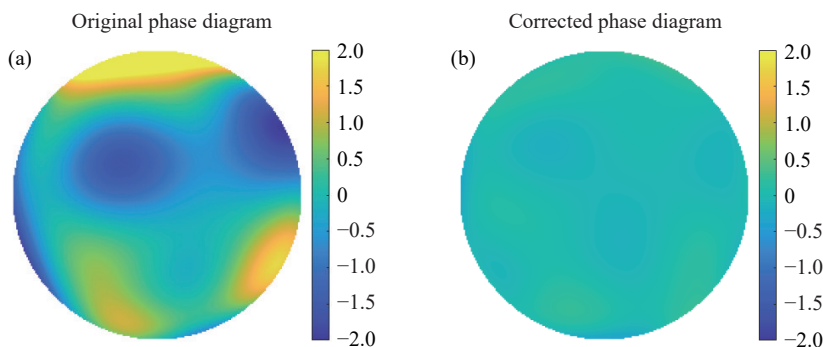


图 4 弱湍流下校正前(a)、后(b)的波前相面

Fig. 4 Wavefront phase surfaces before (a) and after (b) correction under weak turbulence

为了体现 ISA 算法的优势, 将其与经典的 SA (simulated annealing) 算法与 AdamSPGD (Adam stochastic parallel gradient descent) 算法进行对比 [22]。通过多次模拟实验获取各算法的中位数表现, 作为其性能表征指标, 实验结果如图 5 (彩图见期刊电子版) 所示。由于模拟退火算法可以在一定条件下接收差解, 更有利于找到全局最优解, 因此, 在强弱湍流条件下校正性能强于 Adam-

SPGD 算法。在 ISA 中, 引入的折叠操作提高了算法的收敛速度, 在强湍条件下, 达到收敛时, 迭代次数减少了 60%, 弱湍条件下收敛的迭代次数减少了 50%。

鉴于算法本身具有随机性, 故进行多次重复模拟实验对稳健性进行分析至关重要。本研究针对强湍流与弱湍流环境, 分别进行了 100 次独立的模拟实验, 实验结果如图 6 和图 7 所示。

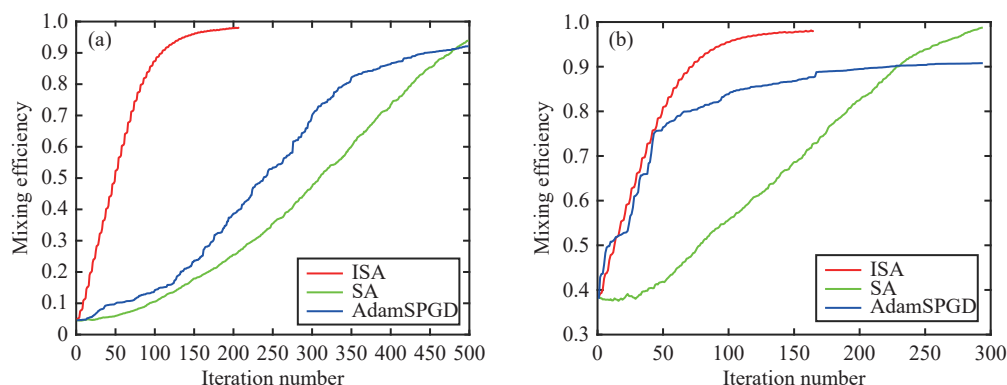


图 5 在(a)强湍流, (b)弱湍流下几种不同算法的性能比较

Fig. 5 Comparison of different algorithms under (a) strong turbulence and (b) weak turbulence

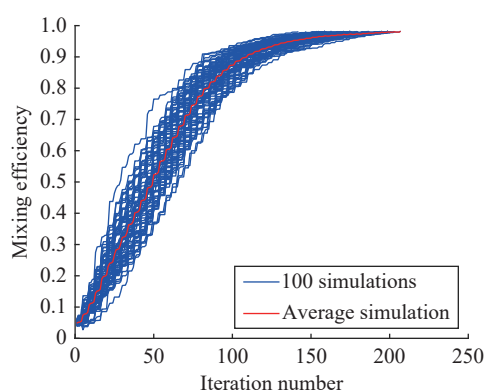


图 6 强湍流下波前校正结果

Fig. 6 Wavefront correction results under strong turbulence

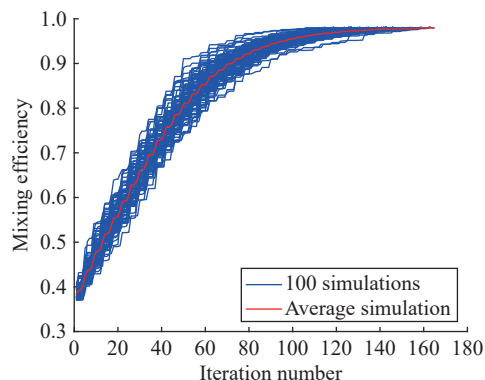


图 7 弱湍流下波前校正结果

Fig. 7 Wavefront correction results under weak turbulence

将 ME 值超过 0.9 界定为理想状态<sup>[23]</sup>。在弱湍流环境中, ISA 算法在至少迭代 50 次后达到收敛, 至多需迭代 90 次, 平均收敛次数为 73 次。而在强湍流条件下, 该算法的最小迭代收敛次数为 81 次, 最大迭代收敛次数达到 130 次, 平均迭代收敛次数则为 110 次。此结果有力地证明了 ISA 算法具有较强的稳定性和可靠性。

假设量子效率 $\delta$ 等于 1,  $N_p$ 为 12, 则误码率可

根据公式(2)计算得到。在强湍流和弱湍流条件下的系统误码率随迭代次数的变化曲线如图 8 (彩图见期刊电子版)所示。在算法对波前相位失真进行补偿后, 误码率性能得到了大幅改善。ISA 经过约 150 次迭代后, 误码率从约  $10^{-2}$  和  $10^{-4}$  降至  $10^{-9}$ 。

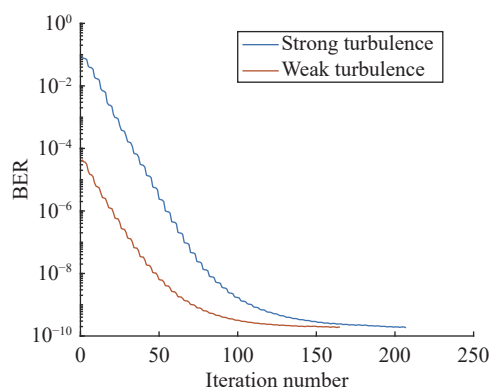


图 8 系统误码率比较

Fig. 8 Comparison of system BER

## 4.2 实验分析

上面通过仿真实验验证了 ISA 算法效果之后, 需进一步验证其对实际像差的校正能力, 在实验平台上采集波前像差数据, 并对其进行分析。尽管实验平台无法完全代表实际系统, 但所采集的数据足以验证所提算法性能。图 9 展示了本文所用的实验平台, 图 10 描述了实验系统的整体框架<sup>[12]</sup>。F1 和 F2 代表反射镜, L1 至 L4 是一组透镜, SW1 和 SW2 是分波接收器。整个 AO 系统由快速转向镜 (fast steering mirror, FSM)、高速捕获相机 (CCD 相机)、Shack-Hartmann 波前传感器和 97 单元连续表面变形镜组成。L1 和 L3 的焦距分别为 400 mm 和 3000 mm, L1 和 L3 的孔径为 76 mm。L2 和 L4 的焦距分别为 3000 mm 和

300 mm, L2 和 L4 的孔径为 80 mm。CSDM 用于校正高阶像差, 执行器的行程为 5  $\mu\text{m}$ 。有效子孔径的数量为 97。微透镜的孔径和焦距分别为 200  $\mu\text{m}$  和 7 mm。

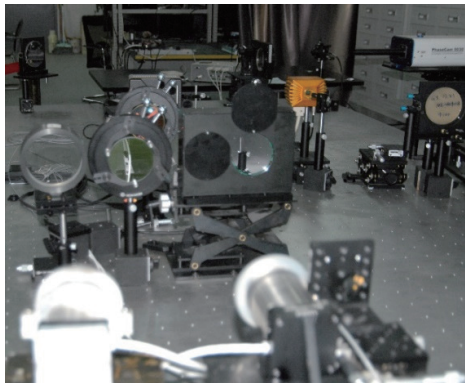


图 9 实验平台照片

Fig. 9 Picture of experimental platform

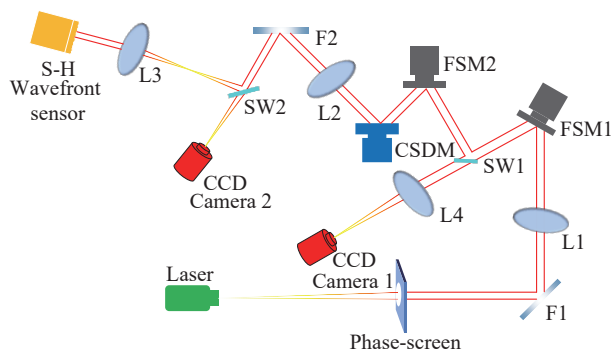


图 10 实验平台系统框架示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the experimental platform system framework

在实验过程中, 使用 Lexitek 公司定制的相位屏来产生波前像差。旋转时激光束会扫描相位

屏的不同区域。然后在系统中引入像差, 它服从大气湍流的 Kolmogorov 理论, 但具有周期性<sup>[24]</sup>。通过调节相位屏的转速, 可以调节引入像差的 Greenwood 频率。激光束通过相位屏和 L1 进行准直, 然后通过双级 FSM。采用高速摄像机和 FSM1 对低频倾斜进行测量和校正, FSM2 根据 S-H 波前传感器测量的倾斜像差对高频倾斜进行补偿。光束通过 CSDM 并被分成两部分。一部分用于成像, 另一部分用于像差测量。通过调整相位屏, 可以得到波前像差数据。

利用采集到的数据, 进行了 20 次基于 ISA 的相位校正实验。图 11 是一组数据校正前后的远场光斑对比图, 从校正后的远场光斑形状可以看出, 光斑的能量高度集中在中心位置。

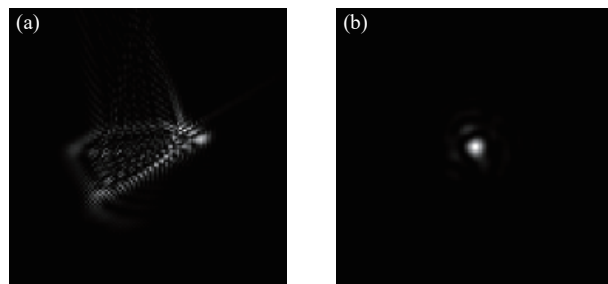


图 11 校正(a)前、(b)后的远场图像

Fig. 11 Far-field images (a) before and (b) after correction

将 CCD 相机捕获的散斑图像的能量集中度作为等效 ME, 以反映系统的性能。图 12 和图 13 (彩图见期刊电子版) 分别显示了大气相干长度  $r_0 = 10 \text{ cm}$  的条件下 20 次实验校正前后的等效 ME 和误码率对比结果。

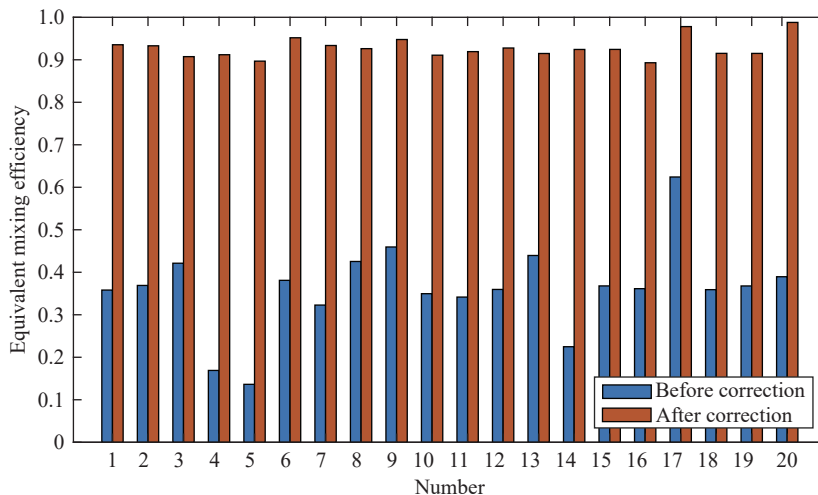


图 12 校正前后的等效 ME 对比

Fig. 12 Comparison of the equivalent ME before and after correction

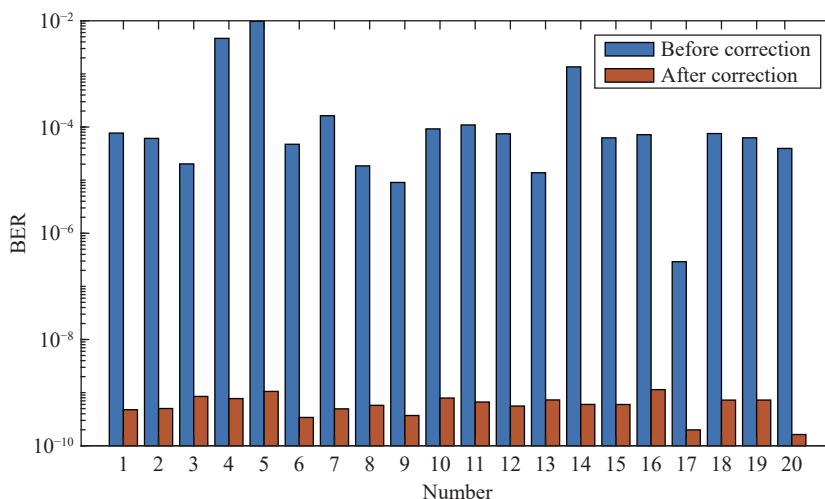


图 13 校正前后的 BER 对比

Fig. 13 Comparison of the BER before and after correction

初始的 ME 平均值为 0.3614, 经过算法校正后的 ME 平均值可达 0.9277。误码率的初始平均值为  $8.394 \times 10^{-4}$ , 而修正后的误码率为  $6.162 \times 10^{-10}$ 。结果表明, ISA 算法具有很强的校正实际像差的能力, 可以有效提高 CFSOC 系统的性能。

## 5 结 论

针对自由空间光通信中大气湍流干扰问题, 本文提出了一种基于改进模拟退火算法的自适应

光学系统。文中详细说明了改进算法的工作原理, 并分析了其减少迭代次数的机制。数值模拟结果表明, 改进算法相比原始算法在使混频效率相同的前提下可以减少 50% 的迭代次数。在实际像差校正中, 系统校正后的混频效率平均值达到 0.92, BER 的平均值降至  $10^{-10}$ 。本研究结果可为高性能 CFSOC 系统中 WLAO 系统的设计提供参考。

未来, 我们计划基于 FPGA 开发高性能处理平台, 并将 ISA 算法应用于动态像差校正实验。

### 参考文献:

- [1] 刘智, 蒋青芳, 刘树通, 等. 空间激光通信组网技术与应用研究进展[J]. *中国光学(中英文)*, 2025, 18(3): 429-451. LIU ZH, JIANG Q F, LIU SH T, *et al.*. Research progress of space laser communication networking technology[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 429-451. (in Chinese).
- [2] LARSSON R, SCHRÖDER J, KARLSSON M, *et al.*. Coherent combining of low-power optical signals based on optically amplified error feedback[J]. *Optics Express*, 2022, 30(11): 19441-19455.
- [3] 张天宇, 王钢, 张熙, 等. 基于焦面复制方法的自适应光学系统静态像差校正技术[J]. *中国光学*, 2022, 15(3): 545-551. ZHANG T Y, WANG G, ZHANG X, *et al.*. Static aberration correction technique for adaptive optics system based on focal-plane copy approach[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 545-551. (in Chinese).
- [4] PLATT B C, SHACK R. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2001, 17(5): S573-S577.
- [5] ZHANG SH, WANG R, WANG Y K, *et al.*. Extending the detection and correction abilities of an adaptive optics system for free-space optical communication[J]. *Optics Communications*, 2021, 482: 126571.
- [6] YANG H ZH, LI X Y. Comparison of several stochastic parallel optimization algorithms for adaptive optics system without a wavefront sensor[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(3): 630-635.
- [7] CHE D B, LI Y Y, WU Y H, *et al.*. Theory of AdmSPGD algorithm in fiber laser coherent synthesis[J]. *Optics Communications*, 2021, 492: 126953.
- [8] LIU W, MA X Y, JIN D R, *et al.*. Residual network-based aberration correction in a sensor-less adaptive optics

- system[J]. *Optics Communications*, 2023, 545: 129707.
- [9] KIRKPATRICK S, GELATT JR C D, VECCHI M P. Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, 220(4598): 671-680.
- [10] MORALES-CASTAÑEDA B, ZALDÍVAR D, CUEVAS E, *et al.*. An improved Simulated Annealing algorithm based on ancient metallurgy techniques[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 84: 105761.
- [11] 戴正爽. 自适应光学技术在大气激光通信系统中的应用研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021.  
DAI ZH SH. *Research of adaptive optics technique in atmospheric optical communications*[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021. (in Chinese).
- [12] CAO J T, ZHAO X H, LIU W, *et al.*. Performance analysis of a coherent free space optical communication system based on experiment[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 15299-15312.
- [13] LIU W, YAO K N, HUANG D N, *et al.*. Performance evaluation of coherent free space optical communications with a double-stage fast-steering-mirror adaptive optics system depending on the Greenwood frequency[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13288-13302.
- [14] METROPOLIS N, ROSENBLUTH A W, ROSENBLUTH M N, *et al.*. Equation of state calculations by fast computing machines[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1953, 21(6): 1087-1092.
- [15] LIU C, CHEN M, CHEN SH Q, *et al.*. Adaptive optics for the free-space coherent optical communications[J]. *Optics Communications*, 2016, 361: 21-24.
- [16] ZERNIKE F. Inflection theory of the cutting method and its improved form, the phase contrast method[J]. *Physica*, 1934, 1: 689-704.
- [17] NOLL R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, 66(3): 207-211.
- [18] RODDIER N A. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(10): 1174-1180.
- [19] YANG H ZH, LI X Y, GONG CH L, *et al.*. Restoration of turbulence-degraded extended object using the stochastic parallel gradient descent algorithm: numerical simulation[J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3052-3062.
- [20] 张恒. 相干自由空间光通信无波前传感自适应光学关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2022.  
ZHANG H. *Research on key technologies of sensor-less adaptive optics for coherent free-space optical communication*[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics, and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2022. (in Chinese).
- [21] LIU W, JIN D R, SHI W X, *et al.*. Performance analysis of coherent optical communication based on hybrid algorithm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 149: 107878.
- [22] ZHANG H, XU L, GUO Y F, *et al.*. Application of AdamSPGD algorithm to sensor-less adaptive optics in coherent free-space optical communication system[J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 7477-7490.
- [23] CUI S Y, ZHAO X H, HE X, *et al.*. A quick hybrid atmospheric-interference compensation method in a WFS-less free-space optical communication system[J]. *Current Optics and Photonics*, 2018, 2(6): 612-622.
- [24] ZHANG X Y, CAO ZH L, YANG CH L, *et al.*. Improved bandwidth of open loop liquid crystal adaptive optics systems with a proportional-derivative controller[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 11651-11660.

#### 作者简介:



张恒(1990—), 男, 山东聊城人, 博士, 副研究员, 2015年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 2022年于中国科学院大学获得博士学位, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员, 主要从事无波前传感自适应光学及光电探测技术方面的研究。E-mail: [zhangheng@ciomp.ac.cn](mailto:zhangheng@ciomp.ac.cn)