

# 基于自适应遗传算法的背向散射光场调控\*

段美刚<sup>1)†</sup> 张晨龙<sup>1)</sup> 赵映<sup>2)</sup> 王建敏<sup>1)</sup> 左浩毅<sup>2)‡</sup>

1) (太原科技大学应用科学学院, 太原 030024)

2) (四川大学物理学院, 成都 610065)

(2025年4月8日收到; 2025年5月16日收到修改稿)

调控经散射介质散射后的光场在生物组织成像、军事反恐和光信息传输等领域具有潜在的应用价值。然而, 经散射介质反射后的光子传播方向变得无序, 导致携带光信息的波前被扰乱。将一种新的波前振幅调制方法即自适应遗传算法 (self-adaption genetic algorithm, SAGA) 引入到背向散射光场调控中。根据环境变化, 种群自适应的选择基因的突变或交叉, 极大地提高了寻找最优解的收敛速度。通过实验研究验证了 SAGA 在背向散射光场调控方面的有效性, 并表明相较于遗传算法 (genetic algorithm, GA), SAGA 在调控速度和抗噪声方面都存在明显优势。研究表明, SAGA 在较少的迭代次数内即可获得高对比度的光聚焦和图像投影, 并收敛于最优解。相较于 GA, 其在进行散射聚焦和图像投影时的调控速度分别快 8.3 倍和 14.38 倍。这种快速的散射光场调控技术为光信息传输领域的研究提供了新思路, 具有广泛的应用潜力。

**关键词:** 散射介质, 波前整形, 聚焦, 图像投影**PACS:** 42.25.-p, 42.25.Fx, 42.30.-d, 42.30.Wb**DOI:** 10.7498/aps.74.20250455**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250455

## 1 引言

光在复杂的散射介质中, 如生物组织、云和雾、多模光纤、白纸等传播时会产生无序的散射, 进而扰乱入射光的波前<sup>[1,2]</sup>。散射现象一直是光学成像和信息有效传输的主要障碍<sup>[3,4]</sup>。为了克服光散射的影响, 研究者们提出利用波前整形技术对经过散射介质散射的光场进行调控, 通过操纵多重散射光的干涉进行散射场的重聚焦<sup>[5-11]</sup>, 进而实现高分辨成像<sup>[12-14]</sup>。波前整形技术在通信领域也扮演着重要角色, 通过增大相机接收散射光的强度, 完成低功耗快速的非视域光信息传输<sup>[15]</sup>。此外, 该技术还可对多模光纤的输出模式进行选择<sup>[16,17]</sup>, 以及调控非线性输出场的光谱<sup>[18,19]</sup>。因此, 越来越多的

散射波前整形技术被相继提出并得到广泛关注。

根据求解校正波前的方式, 散射光场调控技术主要有四种: 传输矩阵 (transmission matrix, TM)、光学相位共轭 (optical phase conjugation, OPC)、基于优化算法的波前整形技术和人工智能 (artificial intelligence, AI) 辅助散射波前整形。其中, 基于迭代优化的波前整形技术已被广泛用于散射光场的调控, 该技术利用优化算法对入射波前的相位或振幅不断调整, 直到找到所需光场对应的波前相位或振幅分布, 实现散射光场的聚焦或成像。迭代算法对散射光场调控的实验系统简单, 鲁棒性强, 但迭代过程较耗时。此外, 该方法无需考虑散射介质的散射特性, 可以根据散射特性的变化进行实时反馈的优点。2007年, Vellekoop 和 Mosk<sup>[20]</sup> 开创性提出迭代波前整形技术可以实现散射光场

\* 国家自然科学基金 (批准号: 62475176)、山西省基础研究计划 (批准号: 202403021212259)、山西省高等学校科技创新项目 (批准号: 2024L215) 和山西省来晋工作优秀博士奖励基金项目 (批准号: 20242077) 资助的课题。

† 通信作者。E-mail: duanmg.sxu@foxmail.com

‡ 通信作者。E-mail: zuohaoyi@scu.edu.cn

重聚焦, 越来越多的研究者加入该领域研究工作中. 同时, 国内研究者们对该领域也产生了极大的兴趣. Liu 等<sup>[21]</sup>首次采用双加权反馈的迭代相位恢复方法实现对物体强度和相位信息的恢复, 使经过散射介质检索物体信息的精度和稳定性得到进一步提高. Wan 等<sup>[22]</sup>同样将皮尔逊相关系数作为 GA 的适应度函数, 分别通过数值模拟和实验实现了目标图案的恢复. 其在数值模拟中取得了较好的恢复效果, 在实验中由于噪声的干扰, 恢复图形的质量较差, 几乎淹没在背景散斑中. Peng 等<sup>[23]</sup>报道了一种改进的 GA 算法用于混浊介质中的粒子的动态光学处理, 成功实现了实时操纵散射介质后微粒, 并使其沿着预先设计的一维和二维轨迹运动. Yang 等<sup>[24]</sup>针对散射光场调控能力和快速迭代能力不足的问题提出了一种新的高速散射光场调控技术, 通过用多像素联合编码方法解决数字微镜阵列 (digital-micromirror device, DMD) 调控离散度大的问题, 用可分离的自然进化策略 (separable natural evolution strategies, SNES) 提高迭代算法的全局搜索效率, 同 GA 相比, 将光透过散射介质完成单点聚焦的速率提高 179 倍, 聚焦点光斑的亮度提高 16 倍, 为实现生物组织的“光学透明化”迈出巨大一步. Wang 等<sup>[25]</sup>利用 GA 对散射光场中的焦点进行再优化, 实现透过散射介质超出光学记忆效应 (memory effect, ME) 5 倍范围的焦点扫描, 该研究克服了基于 ME 扫描方法的局限性, 扩大了散射成像的可用视场. 上述一系列研究表明, GA 在散射光场调控方面有较强的抗噪声能力, 也被认为是迭代波前整形领域最受欢迎的方法<sup>[26-29]</sup>. 但是, 传统 GA 中, 表现优秀的个体基因在迭代后期可能发生突变, 导致优质基因无法传递给下一代, 从而限制了最优解的搜索效率.

当光波与非均匀介质中粒子相互作用时, 散射角小于  $90^\circ$  的光波称为正向散射, 散射角大于  $90^\circ$  的光波称为背向散射. 目前, 虽然已有大量关于前向散射光场调控的研究, 但背向散射光场的调控也是一个值得关注的研究领域, 其对非视距光信息传输具有重要意义. 寻求一种高效的背向散射光场调控方法对于相关应用的突破也至关重要. 因此, 一种改进遗传算法即自适应遗传算法 (self-adaption genetic algorithm, SAGA) 被用于快速背向散射光场调控. 在之前的研究中已有大量关于 SAGA 的优化工程问题, 但其大多集中在对交叉率或变异率

的自适应变化<sup>[30,31]</sup>. 例如, 根据适应度值的变异率自适应更新<sup>[32]</sup>、交叉率和变异率的自适应改变<sup>[33]</sup>以及变异率和种群大小的自适应变化<sup>[34]</sup>等. 但是, 在这些算法中, 每一次迭代中基因交叉和基因突变都要被执行. 而本文所提 SAGA 在执行过程中, 基因交叉和变异被分开执行, 其根据迭代次数对执行基因交叉和基因突变的可能性进行自适应调整. 从实验上研究了 SAGA 和 GA 在背向散射光聚焦和图像投影方面调控速度和调控质量方面的差异. 结果表明, SAGA 在背向散射场调控方面具有较好的稳定性, 且能高质量地完成光聚焦和图像投影.

## 2 原理与方法

光子在散射介质中传输时, 与粒子发生随机碰撞, 使经过散射介质后的光子传播方向变得杂乱无章, 图 1(a) 是电荷耦合器件 (charge coupled device, CCD) 接收到的反射光场强度分布图, 即

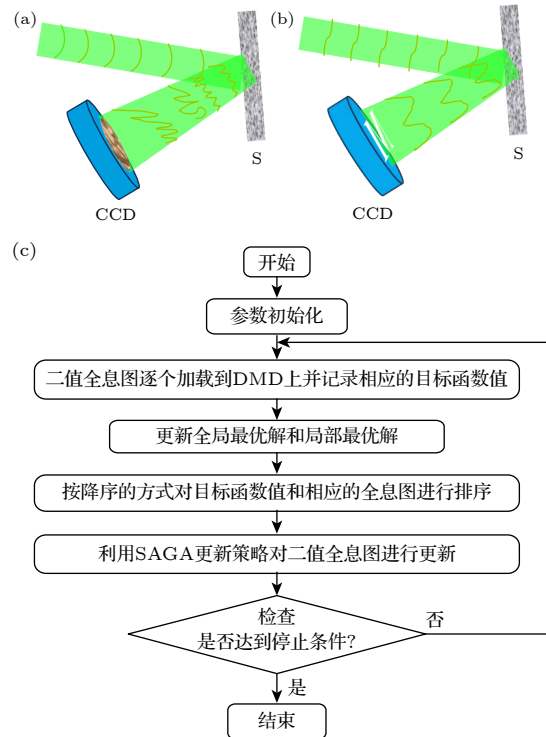


图 1 背向散射光场调控原理图 (a) 经散射介质反射的光场分布; (b) 调制后的反射光场分布; (c) SAGA 散射波前整形流程图

Fig. 1. Schematics of modulation of backscattering field: (a) Distribution of light field reflected by scattering medium; (b) distribution of the reflected light field after modulation; (c) flowchart of SAGA.

散斑模式. 基于 DMD 对入射光波前的振幅不断优化, 在 CCD 上可获得如图 1(b) 所示的目标输出模式. 其中, 入射光波和出射光波的关系表示为

$$E_m^{\text{out}} = \sum_{n=1}^N t_{mn} E_n^{\text{in}}, \quad (1)$$

式中,  $E_m^{\text{out}}$  和  $E_n^{\text{in}}$  分别表示第  $m$  个输出通道和第  $n$  个输入通道的复振幅分布; 其中,  $E_n^{\text{in}} = A_n \exp(i\varphi_n)$ ,  $A_n$  和  $\varphi_n$  分别表示调制过程中第  $n$  个输入通道上的振幅值和相位值;  $t_{mn}$  为第  $n$  个输入通道经过散射介质后在第  $m$  个输出通道的传输矩阵元. 因此, 基于振幅调制的散射光场调控是寻找最优输入通道的振幅  $A_n$ .

在传统 GA 中, 生物系统的交叉和变异是连续进行的, 使群体向更好的方向进化. 也就是说, 在进化过程中, 种群中的个体在一次进化过程既要发生基因变异又要与其他个体进行基因交叉. 然而, 在进化的后期, 这种操作会导致种群中优秀基因的变异, 从而减慢寻找最优解的速度. 因此, 在 SAGA 中的基因交叉和变异被分开执行, 即个体在进化过程中要么进行基因变异, 要么与其他个体进行基因交叉. 初始种群用如下矩阵表示:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,j} & \cdots & x_{1,d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i,1} & \cdots & x_{i,j} & \cdots & x_{i,d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{p,1} & \cdots & x_{p,j} & \cdots & x_{p,d} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, 每一行代表一个个体. 可以看出种群  $\mathbf{X}$  中有  $p$  个个体, 每个个体由  $d$  个元素 (基因) 决定. 在 SAGA 中, 个体的交叉或变异是在进化过程中有选择性地进行的. 在进化的早期, 由于需要适应环境, 种群在进化过程中选择基因变异的概率较高, 选择基因交叉的概率低; 在进化的后期, 由于逐渐适应环境, 种群选择基因变异的概率较低, 选择基因交叉的概率高. 用随机数  $R$  和进化率 (ER) 来判断个体的交叉或变异.  $R$  取值范围为  $[0, 1]$ , ER 取值范围为  $[0.2, 0.8]$ . ER 可表示为

$$\text{ER} = \text{ER}_{\min} + (\text{ER}_{\max} - \text{ER}_{\min}) \cdot \sin \left[ \frac{\pi}{2} \cdot (\text{iter}/\text{iter}_{\max}) \right], \quad (3)$$

式中,  $\text{ER}_{\max}$  为进化速率最大值 0.8;  $\text{ER}_{\min}$  为进化速率最小值 0.2; iter 为当前迭代次数;  $\text{iter}_{\max}$  为最

大迭代次数. 由 (3) 式可以看出, 随着迭代次数的增加, ER 从 0.2 逐渐增大到 0.8.

当  $R < \text{ER}$  时, 基因进行交叉. 更新策略如下: 首先, 从种群中随机选择适合度值在前 20% 的作为父亲. 然后, 随机抽取 50% 的父亲基因, 替换母系相应位置的基因, 遗传给下一代. 因此, 一个新个体的一半基因遗传自其母亲, 另一半遗传自其父亲. 如果  $R > \text{ER}$ , 个体进行基因变异获得新种群. 此时, 通过随机选择 0.2% 基因进行变异, 得到一个新的个体. 在改进算法 SAGA 中, 群体在开始阶段更有可能进行变异, 以增加基因多样性. 在后期种群更有可能进行交叉, 以加快最优模式的搜索速度.

其次, 通过实验验证 SAGA 和 GA 在调制散射光场中的有效性. 在优化过程中, 种群大小为 20, 停止准则为满足最大迭代次数. DMD 被划分为  $64 \times 64$  个元素, 每个元素可以分配的值为 0 或 1. GA 的其他参数如下: 交叉率  $P_c = 0.5$ ; 初始变异率  $P_{\text{im}} = 0.008$ ; 最终变异率  $P_{\text{fm}} = 0.001$ ; 衰减常数  $P_d = 250$ , 变异率在优化过程中随着迭代次数增加自适应减小, 参数设置参考 Woo 等 [27] 的报道.

在散射光场调控中, 组成种群中个体的不同基因代表加载到 DMD 上的调制全息图, 迭代波前整形技术实现散射光场调控的流程如图 1(c) 所示, 可概括如下.

第 1 步: 初始化参数: 种群个数 ( $p$ ), 组成个体的基因数量 ( $n1 \times n2$ ), 最大迭代次数 ( $\text{iter}_{\max}$ ).

第 2 步: 将全息图逐个加载到 DMD 上, 并用 CCD 记录每张全息图对应的光场分布. 将经全息图调制后新获得的适应度值与上一次迭代得到的适应度值进行对比, 并对种群基因进行更新. 如果当前的适应度值更接近于目标值, 适应度值和相应的全息图被更新, 获得新的种群基因; 反之, 适应度值和相应的全息图保持不变. 然后, 将新获得的适应度值按降序的方式进行排列并对全息图的排序进行相应的更新.

第 3 步: 使用相应优化算法的更新规则对种群进行更新.

第 4 步: 检查是否达到最大迭代次数. 若达到, 则输出最优结果. 若没有达到, 则重复第 2 步和第 3 步.

### 3 实验结果与分析

在本节中, 主要实验上研究分析 SAGA 和 GA 对经过散射介质反射散射光场的调制能力, 包括散射光聚焦和图像投影. 实验测量中, 分别基于峰值背景比 (peak-to-background ratio, PBR) 和皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient, Cor) 来评价散射光场的聚焦和图像投影性能.

#### 3.1 实验装置

光经过散射介质的反射光场调控实验装置如图 2 所示. 首先, 波长为 532 nm 的固体激光器 (MSL-FN-532 nm-200 mW, CNI) 产生一束准直光束, 准直后的激光束由显微物镜 OL(40×,  $NA = 0.65$ ) 和置于 OL 的焦点处直径为 25  $\mu\text{m}$  的小孔 PH 进行滤波, 使光线的中心部分通过小孔. 将透过小孔的光束传输到透镜 L1( $f = 250$  mm) 并产生一束平行光, 该平行光束照射 DMD(型号: V-6501, Aunion Tech Co., Ltd.) 的整个工作区域, 其中 OL 和 L1 组成一个 4*f* 扩束系统. 放置在 DMD 和 L1 之间的偏振片 P 可用于调节照射在 DMD 上的光强度. 经 DMD 调制后的光束通过一个 4*f* 缩束系统, 该缩束系统由 L2( $f = 200$  mm) 和 L3( $f = 50$  mm) 组成, 缩束后的光波照射到毛玻璃 (S) 的前表面. 最后, 经毛玻璃散射后的散射光通过透镜 L4 ( $f = 50$  mm) 后由 CCD (型号: MER-231-41U3M-L, 12 bit) 收集. DMD 的分辨率为 1920 pixel×1080 pixel, 每个像素的大小为 10.8  $\mu\text{m}$ ×10.8  $\mu\text{m}$ . CCD 的分辨率为 1920 pixel×1200 pixel, 每个像素的大小为 5.86  $\mu\text{m}$ ×5.86  $\mu\text{m}$ . 实验过程中, DMD 和 CCD 的工作区域分别为中心像素周围 1024 pixel×1024 pixel 和 256 pixel×256 pixel 的范围. 其中,

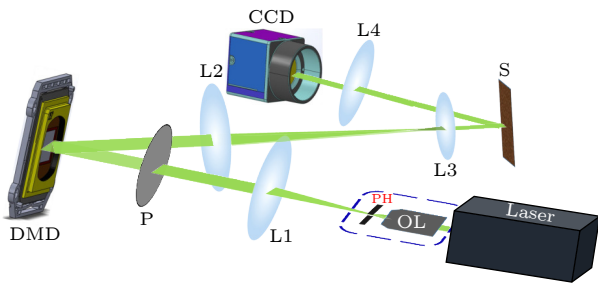


图 2 实验装置图

Fig. 2. Experimental setup.

DMD 的工作区域通过像素合并被划分为 64×64 个调制段, 且每个调制段可被随机分配的值为 0 或 1.

#### 3.2 聚焦

为了验证 SAGA 和 GA 对经过毛玻璃反射散射场的调控能力, 首先进行散射光重聚焦实验. 在实验中, 聚焦点的目标区域大小是 CCD 中心周围 3×3 的像素, 目标函数 PBR 的表达式如下:

$$\text{PBR} = \frac{I_{\text{out}}^{\text{target}}}{I_{\text{ref}}}, \quad (4)$$

式中,  $I_{\text{out}}^{\text{target}}$  是目标区域的光强度值,  $I_{\text{ref}}$  是优化前的背景场平均强度.

图 3 是 SAGA 和 GA 在经过不同迭代次数后得到的散射重聚焦实验结果. 为了降低随机性引起的测量误差, 每个实验都进行 10 次测量并取平均结果. 图 3(a1) 是在未优化前光经过散射介质反射后 CCD 拍摄到的光强度分布图, 其目标区域的 PBR 为 15.8. 图 3(a2) 和图 3(a3) 分别是 SAGA 和 GA 在 1000 次迭代过程中的最佳聚焦模式. 通过对比可以发现, SAGA 的聚焦点的亮度明显优于 GA. 可以看到 SAGA 获得的聚焦模式中散斑噪声已被淹没形成尖锐的焦点, 而 GA 获得的聚焦结果存在很强的散斑背景噪声. 为了进一步测试 GA 对反射散射场的聚焦能力, 迭代次数增加到 3000 次, 图 3(a4) 是 GA 在 3000 次迭代过程中的最佳聚焦模式. 由图 3(a4) 可以看出, 随着迭代次数的增加, GA 的聚焦效果越来越好, 但随之带来的结果是实验测量时间大幅增加. 图 3(b) 是 SAGA 和 GA 在 1000 次迭代过程中 PBR 随迭代次数的变化曲线. 由图 3(b) 可以清楚地看到, 此过程中 SAGA 和 GA 达到的最大 PBR 分别为 475.7 和 77.4, 而且 SAGA 的变化曲线大概在第 820 次测量时趋于收敛, 主要归因于 SAGA 聚焦点的强度已达到 CCD 的动态饱和范围. 另外, SAGA 和 GA 的 PBR 值达到 77.4 分别在 119 和 993 次测量, 也就是说 SAGA 的背向散射光聚焦调控速度大约要比 GA 快 8.3 倍. 值得说明的是, 由于受 CCD 采集速率的影响, 实验中 SAGA 和 GA 迭代 1000 次消耗时间几乎相同. 图 3(c) 是 GA 在 3000 次迭代过程中 PBR 随迭代次数的变化曲线. 通过与图 3(b) 对比可以发现, 当迭代次数增加之后, GA 获得的最终 PBR 也随之

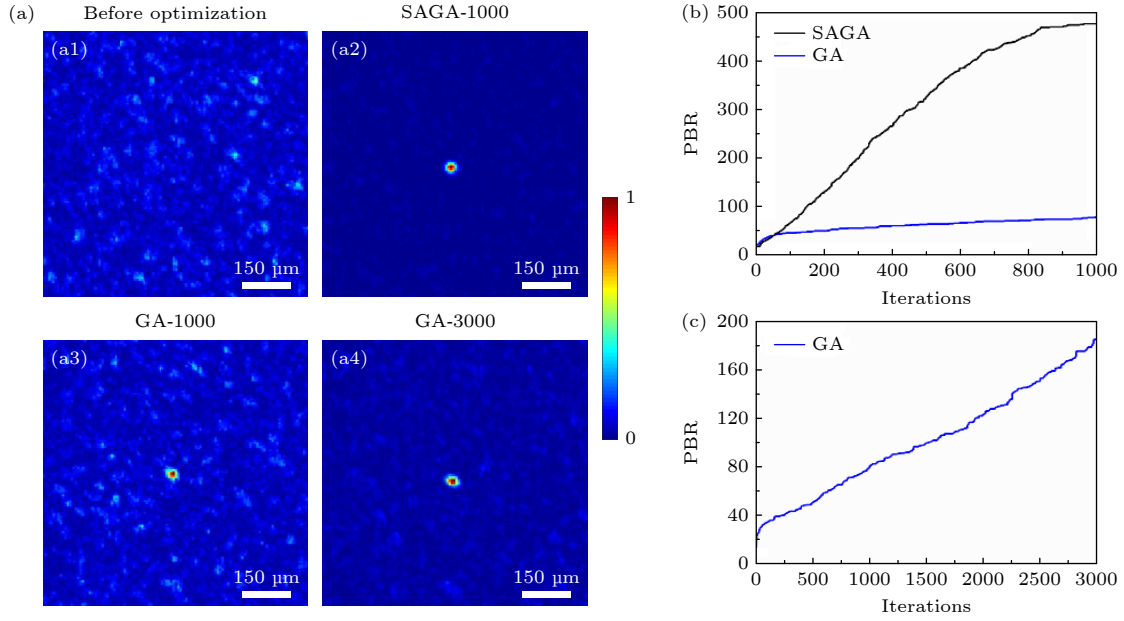


图3 SAGA和GA的背向散射聚焦实验结果 (a) 迭代过程中的最佳聚焦模式; (b) 1000次迭代SAGA和GA的PBR值随迭代次数的变化; (c) 3000次迭代GA的PBR值随迭代次数的变化

Fig. 3. Experimental results of backscatter focusing: (a) Optimal focusing mode in iterative process; (b) variation curve of PBR of SAGA and GA with 1000 iteration times; (c) variation curve of PBR of GA with 3000 iteration times.

增加. 所以, 如果迭代次数继续增加, GA的最终PBR曲线也可以收敛, 并且中心点的聚焦亮度也可能达到CCD的动态饱和范围.

### 3.3 图像信息传输

在本节中, 通过图像信息传输来验证SAGA和GA对经毛玻璃反射后的光场调控性能. 在实验中, 调制的目标区域是CCD中心周围45 pixel×30 pixel, SAGA和GA中的有关参数仍与聚焦实验中的参数保持一致. 目标函数Cor的表达式如下:

$$\text{Cor} = \frac{\sum (x_{i,j} - \bar{x}) \cdot (y_{i,j} - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_{i,j} - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum (y_{i,j} - \bar{y})^2}}, \quad (5)$$

式中,  $x_{i,j}$  为每次测量CCD捕获到目标区域的输出光场;  $y_{i,j}$  为目标图像.  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别是  $x_{i,j}$  和  $y_{i,j}$  的平均值.  $i$  和  $j$  分别是CCD捕获到的图像和目标图像的坐标.

图4展示了图像投影的实验结果. 图4(a)是计算机生成的二值目标图像, 图4(b)和图4(c)是SAGA和GA经过1000次迭代在CCD上投影的目标字母“S”, “C”和“U”. 通过对比可以发现, SAGA的投影图像的清晰度要明显优于GA. 可以看到经过1000次迭代后SAGA获得的目标图像的Cor

值在0.866—0.869之间, 已在CCD上呈现清晰的图像. 而此时GA获得图像信息仍然是散斑模式, Cor值在0.463—0.483之间. 为了进一步测试GA对图像信息的传输能力, 迭代次数增加到5000次, 图4(d)是GA在5000次迭代过程中的最佳图像投影信息. 由图4(d)可以看出, 随着迭代次数的增加, GA的投影效果也越来越好, 最终的Cor值在0.754—0.785之间, CCD也可以获得较清晰的图像信息. SAGA和GA在1000次迭代过程中Cor随迭代次数的变化曲线如图4(e)所示, 可以看出SAGA的Cor曲线大约在第800次迭代收敛于0.867附近. 图4(f)是GA在5000次迭代过程中Cor随迭代次数的变化曲线, 最终结果收敛于0.766附近. 通过与图4(e)对比, SAGA达到0.766大约需要341次迭代, 而GA则需要大约4905次迭代, 也就是说在进行图像投影时, SAGA对背向散射光场的调控速度比GA快约14.38倍.

## 4 结论

本文主要通过对SAGA和GA在背向散射光场调控方面的性能进行分析, 一种调控速度快且光信息保真度高的方法得以开发. 在GA基础上, 将种群进化过程中基因交叉和基因突变分开执行,

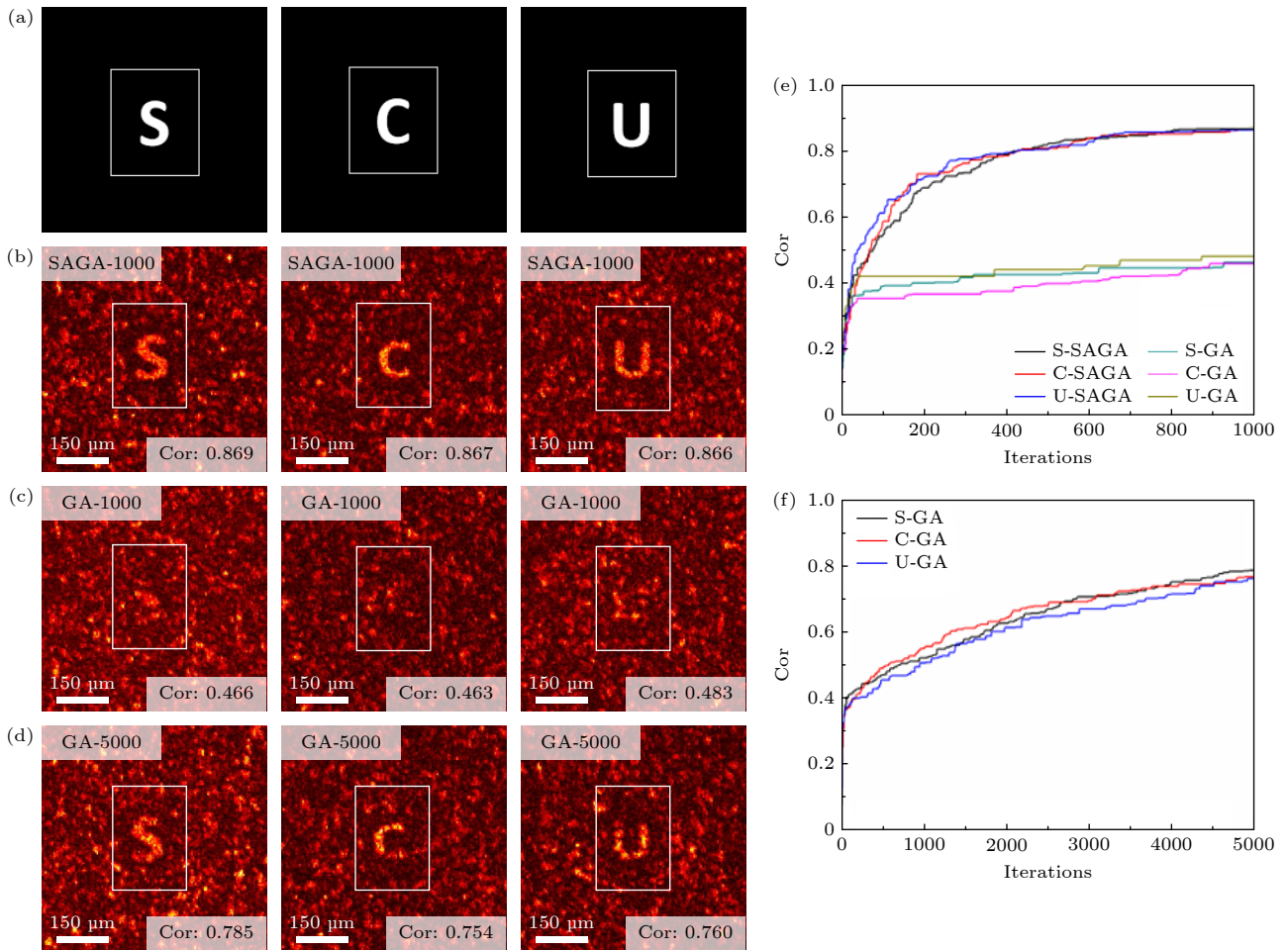


图4 SAGA和GA的图像投影实验结果 (a)目标图像; (b)SAGA在1000次迭代过程中的最佳投影结果; (c)GA在1000次迭代过程中的最佳投影结果; (d)GA在5000次迭代过程中的最佳投影结果; (e)1000次迭代SAGA和GA的Cor值随迭代次数的变化; (f)5000次迭代GA的Cor值随迭代次数的变化

Fig. 4. Experimental results of image projection: (a) Target images; (b) the optimal image projection of SAGA with 1000 iteration times; (c) the optimal image projection of GA with 1000 iteration times; (d) the optimal image projection of GA with 3000 iteration times; (e) variation curve of Cor of SAGA and GA with 1000 iteration times; (f) variation curve of Cor of GA with 5000 iteration times.

一种自适应的选择交叉或者突变的遗传算法 SAGA 被用于散射光场调控. 从实验上将 SAGA 和 GA 两种方法对散射光聚焦和图像投影进行对比, 发现 SAGA 在较少的迭代次数内即可实现对背向散射光场的精准调控. 相较于 GA, SAGA 在光聚焦和图像投影方面的优化速度分别快 8.3 倍和 14.38 倍, 极大提高了散射光场的调控速度. 快速的迭代波前整形散射光场调控技术可发展物体与探测、照明在不同侧进行成像的众多新应用, 为多模光纤成像、非视距成像的研究提供新思路.

### 参考文献

[1] Yaqoob Z, Psaltis D, Feld M S, Yang C 2008 *Nat. Photonics* **2** 110

[2] Ni F, Liu H, Zheng Y, Chen X 2023 *Adv. Photonics* **5** 046010  
 [3] Bian Y, Wang F, Wang Y, Fu Z, Liu H, Yuan H, Situ G 2024 *Photonics Res.* **12** 134  
 [4] Duan M G, Zhao Y, Zuo H Y 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 124203 (in Chinese) [段美刚, 赵映, 左浩毅 2024 *物理学报* **73** 124203]  
 [5] Zhang X, Gao J, Gan Y, Song C, Zhang D, Zhuang S, Han S, Lai P, Liu H 2023 *Photonix* **4** 10  
 [6] McIntosh R, Goetschy A, Bender N, Yamilov A, Hsu C, Yilmaz H, Cao H 2024 *Nat. Photonics* **18** 744  
 [7] Wu C, Liu J, Huang X, Li Z P, Yu C, Ye J T, Zhang J, Zhang Q, Dou X, Goyal V K, Xu F, Pan J W 2021 *Nat. Photonics* **118** e2024468118  
 [8] Sun X Y, Liu F, Duan J B, Niu G T, Shao X P 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 224203 (in Chinese) [孙雪莹, 刘飞, 段景博, 牛耕田, 邵晓鹏 2021 *物理学报* **70** 224203]  
 [9] Zhang X C, Fang L J, Pang L 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 104202 (in Chinese) [张熙程, 方龙杰, 庞霖 2018 *物理学报* **67** 104202]  
 [10] Ding C, Shao R, Qu Y, He Q, Liu L, Yang J 2023 *Laser Photonics Res.* **17** 2300104  
 [11] Xiang M, He P, Wang T Y, Yuan L, Deng K, Liu F, Shao X

- P 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 124202 (in Chinese) [相萌, 何飘, 王天宇, 袁琳, 邓凯, 刘飞, 邵晓鹏 2024 物理学报 **73** 124202]
- [12] Shi A D, Wang Z Y, Duan C X, Wang Z, Zhang W L 2024 *Chin. Phys. B* **33** 104202
- [13] Shen Y C, Luo J W, Zhang Z L, Zhang S A 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 1026016 (in Chinese) [沈乐成, 罗嘉伟, 张志凌, 张诗按 2024 光学学报 **44** 1026016]
- [14] Zhu L, Shao X P 2020 *Acta Opt. Sin.* **40** 0111005 (in Chinese) [朱磊, 邵晓鹏 2020 光学学报 **40** 0111005]
- [15] Cao Z Z, Zhang X B, Osnabrugge G, Li J H, Vellekoop I M, Koonen A M 2019 *Light-Sci. Appl.* **8** 69
- [16] Tzang O, Caravaca-Aguirre A M, Wagner K, Piestun R 2018 *Nat. Photonics* **12** 368
- [17] Teġin U, Rahmani B, Kakkava E, Borhani N, Moser C, Psaltis D 2020 *APL Photonics* **5** 030804
- [18] Qiao Y Q, Peng Y J, Zheng Y L, Ye F, Chen X 2018 *Opt. Lett.* **43** 787
- [19] Ni F C, Liu H G, Chen X F 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 1026006 (in Chinese) [倪枫超, 刘海港, 陈险峰 2024 光学学报 **44** 1026006]
- [20] Vellekoop I M, Mosk A P 2007 *Opt. Lett.* **32** 2309
- [21] Liu J, Feng Y, Li W, Xiang M, Xi T, Liu F, Li G, Shao X 2023 *Opt. Lett.* **48** 4077
- [22] Wan L, Chen Z, Huang H, Pu J 2016 *Appl. Phys. B* **122** 204
- [23] Peng T, Li R, An S, Yu X, Zhou M, Bai C, Liang Y, Lei M, Zhang G, Yao B, Zhang P 2019 *Opt. Express* **27** 4858
- [24] Yang J, He Q, Liu L, Qu Y, Shao R, Song B, Zhao Y 2021 *Light- Sci. Appl.* **10** 149
- [25] Wang X, Zhao W, Zhai A, Wang D 2023 *Opt. Express* **31** 32287
- [26] Zhang C, Yao Z, Liu T, Sui X, Chen Q, Xie Z, Liu G 2024 *Opt. Laser Technol.* **169** 110018
- [27] Woo C M, Zhao Q, Zhong T, Li H, Yu Z, Lai P 2022 *APL Photonics* **7** 046109
- [28] Li W, He W, Dai Y, Zuo H, Pang L 2024 *Opt. Laser Technol.* **175** 110740
- [29] Zhao Y, He Q, Li S, Yang J 2021 *Opt. Lett.* **46** 1518
- [30] Li H H, Woo C M, Zhong T T, Yu Z P, Luo Y Q, Zheng Y J, Yang X, Hui H, Lai P X 2021 *Photonics Res.* **9** 202
- [31] Yu H, Yao Z Y, Sui X B, Gu G H, Chen Q 2022 *Optik* **261** 169129
- [32] Deb K, Beyer H G 2001 *Evol. Comput.* **9** 197
- [33] Kivijärvi J, Fränti P, Nevalainen O 2003 *J. Heuristics* **9** 113
- [34] Hinterding R, Michalewicz Z, Peachey T C 1996 *International Conference on Evolutionary Computation—The 4th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, Berlin Germany, September 22–26, 1996 pp420–429

## Backscattered light field control based on self-adaptive genetic algorithm\*

DUAN Meigang<sup>1)†</sup> ZHANG Chenlong<sup>1)</sup> ZHAO Ying<sup>2)</sup>  
WANG Jianmin<sup>1)</sup> ZUO Haoyi<sup>2)‡</sup>

1) (School of Applied Sciences, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

2) (College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

( Received 8 April 2025; revised manuscript received 16 May 2025 )

### Abstract

Modulating the light field scattered by scattering media has potential applications in biological tissue imaging, military anti-terrorism, and optical information transmission. However, light reflected by complex scattering media, such as biological tissues, clouds and fog, multi-mode fiber, and white paper, will produce disorderly scattering, and then disturb the wavefront of incident light. It has always been the main obstacle to optical imaging and effective information transmission. Therefore, the control of backscattered light field is also a research field worthy of attention, which is of great significance for the transmission of non-line-of-sight optical information. It is also very important to find a method of efficiently controlling backscattered light field for the breakthrough of related applications. It has been found that iterative wavefront shaping technology is an

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62475176), the Fundamental Research Program of Shanxi Province, China (Grant No. 202403021212259), the Science and Technology Innovation Plan of Colleges and Universities in Shanxi Province, China (Grant No. 2024L215), and the Project of Award Fund for Excellent Doctoral Work in Shanxi Province, China (Grant No. 20242077).

† Corresponding author. E-mail: [duanmg.sxu@foxmail.com](mailto:duanmg.sxu@foxmail.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [zuohaoyi@scu.edu.cn](mailto:zuohaoyi@scu.edu.cn)

effective solution, which gradually modulates the amplitude or phase distribution of wavefront according to the feedback of the light intensity distribution in the target area of charge coupled device (CCD). An improved genetic algorithm, self-adaptation genetic algorithm (SAGA), is proposed, which can be used to rapidly modulate the backscattered light field. The amplitude distribution of wavefront is controlled, which makes it form the required pattern at the target position through the interference of light. During the implementation of the algorithm, the SAGA performs gene crossover and mutation separately, and selects gene crossover and mutation operations according to the number of iterations. At the beginning of evolution, the probability of selecting gene mutations is higher because the population needs to adapt to the environment, while at the end of evolution, the probability of selecting gene mutations is lower because it gradually adapts to the environment. In the experimental measurement, the effective modulation area of digital-micromirror device (DMD) is  $1024 \times 1024$ , which is divided into  $64 \times 64$  modulation segments by pixel merging. Each segment number is assigned a value of 0 or 1. Focusing and image projection performance of scattered light field are evaluated based on peak-to-background ratio (PBR) and Pearson correlation coefficient (Cor), respectively. By comparing the scattered light focusing and image projection of SAGA and genetic algorithm (GA), it is found that SAGA can accurately control the backscattered light field and converge to the optimal value in a few iterations. After 1000 iterations, the GA still has a clear speckle background. With the increase of iteration times, GA will also show bright focus and clear projection image. Compared with GA, SAGA has a modulation speed that is 8.3 times faster in light focusing and 14.38 times faster in image projection, greatly improving the modulation speed of the scattered light field. The fast control technology for scattered light field can lead to numerous new optical communication applications and offer fresh insights into the study of optics and information science.

**Keywords:** scattering medium, wavefront shaping, focusing, image projection

**PACS:** 42.25.-p, 42.25.Fx, 42.30.-d, 42.30.Wb

**DOI:** [10.7498/aps.74.20250455](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250455)

**CSTR:** [32037.14.aps.74.20250455](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250455)

## 基于自适应遗传算法的背向散射光场调控

段美刚 张晨龙 赵映 王建敏 左浩毅

### Backscattered light field control based on self-adaptive genetic algorithm

DUAN Meigang ZHANG Chenlong ZHAO Ying WANG Jianmin ZUO Haoyi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 164203 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250455

CSTR: 32037.14.aps.74.20250455

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250455>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于迭代算法的不同状态散射光场聚焦

Focusing scattering light field with different states based on iterative algorithm

物理学报. 2024, 73(12): 124203 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231991>

#### 基于数字微镜器件超像素法实现散射介质传输矩阵的自参考干涉测量

Self-reference interferometric measurement of scattering medium transmission matrix based on digital micromirror device superpixel method

物理学报. 2023, 72(22): 224201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230660>

#### 基于导波驱动相变材料超构表面的基波及二次谐波聚焦

Fundamental wave and second-harmonic focusing based on guided wave-driven phase-change materials metasurfaces

物理学报. 2022, 71(3): 034208 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211596>

#### 弧度与旋转共同诱导相位调控太赫兹超表面

Radian and rotation co-induced phase controlling terahertz metasurfaces

物理学报. 2025, 74(2): 028701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241465>

#### 实现散射场强整形的微散射体阵列逆向设计方法

Inverse design method of microscatterer array for realizing scattering field intensity shaping

物理学报. 2021, 70(1): 010202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200825>

#### 计算偏振彩色傅里叶叠层成像: 散射光场偏振特性的复用技术

Computational polarized colorful Fourier ptychography imaging: a novel information reuse technique of polarization of scattering light field

物理学报. 2024, 73(12): 124202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240268>