

引用格式: LIU Yu, HUANG Jianhua, ZHAO Chuanjian, et al. Experimental Study on Background Noise Suppression When Focusing through Scattering Medium[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(1):0129001

刘宇, 黄建华, 赵传江, 等. 透过散射介质聚焦时背景噪声抑制的实验研究[J]. 光子学报, 2023, 52(1):0129001

透过散射介质聚焦时背景噪声抑制的实验研究

刘宇, 黄建华, 赵传江, 郭翠霞, 黄峰

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350108)

摘要: 针对波前整形的背景噪声问题, 提出了一种有效抑制背景噪声的算法。首先搭建闭环波前整形聚焦系统, 并基于传统遗传算法进行聚焦实验以验证系统的有效性。然后从增强信噪比的目的出发, 提出与以往的多目标优化遗传算法不同的迭代方法, 即采用增强倍数而不是绝对强度的判别式来评估目标点的聚焦质量。实验结果表明, 改进后的遗传算法将显著噪点亮斑的面积减少了 70.4%, 聚焦光斑的圆度由 0.83 提升到 0.93。基于实验结果提出背景平均光强与调控面积之间的量化关联模型, 并通过量化关联模型对统计实验数据进行拟合, 验证了该模型的有效性, 实现对聚焦后背景噪声的定量表述。

关键词: 光场调控; 波前整形; 反馈优化算法; 散射介质; 光聚焦; 背景噪声

中图分类号: O439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235201.0129001

0 引言

光在经过内部结构复杂的随机散射介质时, 介质中的微粒会改变光子的传播方向, 光在其中发生多次散射进而形成无规则的随机散斑^[1]。尽管所得到的斑点图案似乎表现出高度无序的随机强度分布, 但多次光散射行为是一个确定性过程, 可以使用麦克斯韦方程组精确描述^[2]。近年来, 研究人员通过波前整形和光学相位共轭等方法, 成功地克服了多次散射的影响, 实现了光在无序介质内部或通过无序介质聚焦和成像^[3-6]。此外, 对于散射介质传输的本征通道的研究, 进一步扩展了研究人员对光在随机散射介质中传输的微观过程的理解^[7-10]。

通过波前处理控制光传播的一个典型例子是基于反馈优化的波前整形技术。该技术最早由 VELLEKOOP I M 于 2007 年提出, 利用空间光调制器结合逐点调制相位的连续序列算法 (Continuous Sequence Algorithm, CSA) 实现光透过二氧化钛强散射介质的聚焦^[5]。但是 CSA 耗时较长, 并且聚焦效果不够理想。随后, 许多学者纷纷投入到基于反馈优化的波前整形技术的研究中, 通过使用不同的优化算法, 如粒子群优化算法^[11]、遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)^[12, 13] 和模拟退火算法^[14] 等, 运算速度和聚焦质量有了很大的提升。波前整形一般指高分辨光波相位调控技术, 该技术与散射介质组合可以有效地作为透镜来使用。这种“散射透镜”系统已经在许多领域得到应用, 如动态超分辨率成像^[15]、可调超表面透镜^[16] 和无镜头成像^[17] 等。然而, 利用“散射透镜”聚焦时往往忽视了背景的杂散光, 在某些情况下, 背景亮点的光强甚至能超过目标点的 1/3。为解决此问题, 本文采用增强倍数的判别式来评估目标点的聚焦质量, 该方法同时考虑了目标点和背景噪声的光强, 可实现对背景噪声的显著抑制, 并提出量化关联模型对聚焦后背景噪声进行定量表述。

基金项目: 国家自然科学基金 (No.62105068)

第一作者: 刘宇, liuyu19@fzu.edu.com

通讯作者: 黄峰, huangf@fzu.edu.com

收稿日期: 2022-07-18; 录用日期: 2022-09-01

<http://www.photon.ac.cn>

1 实验系统

基于反馈优化的波前整形聚焦系统原理如图1所示,采用反射式液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM) (PLUTO-2-VIS-096, HOLOEYE)搭建反射式光路,入射光与反射光的夹角为 17.2° 。用毛玻璃进行原理性验证是波前整形领域的常规方法^[8-10],所以实验选择毛玻璃(GCL-201101, Daheng Optics)作为强散射介质。实验系统分为光源部分和聚焦部分。光源部分采用波长为635 nm连续激光器产生的单色光,经衰减片和空间滤波器进行衰减滤波以提高光束质量。随后经扩束器(Beam Expander, BE) (GCO-2503, Daheng Optics)准直放大后照射到液晶空间光调制器LC-SLM上。在聚焦部分,单色光在经过LC-SLM调制后,经透镜L2缩放并成像于显微物镜O1的入射光阑处,通过显微物镜O1 (20 \times , NA=0.40)聚焦到毛玻璃上,透过毛玻璃的散射光由显微物镜O2 (20 \times , NA=0.40)收集,最后由互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)相机采集散斑图像。其中,透镜L1和L2的焦距分别为50 mm和150 mm,显微物镜O1和O2的焦距均为10.2 mm。LC-SLM的分辨率为 $1\ 920\times 1\ 080$,为了便于划分区域并节省时间,仅使用LC-SLM中间部分的 1024×1024 像素区域,将其分为若干个调制单元,它们的相位变化范围为 $[0, 2\pi)$ 。CMOS相机的分辨率为 2448×2048 ,出于相同的原因只选取 300×300 像素区域的散斑图像进行单点聚焦。

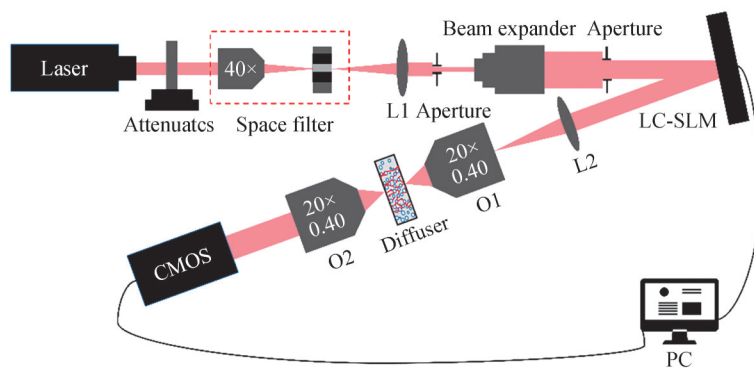


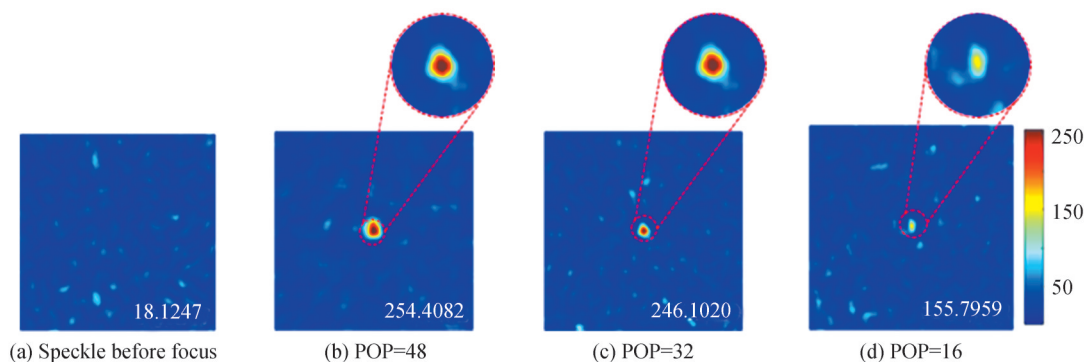
图1 随机散射介质聚焦系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of the random scattering medium focusing system

2 基于GA的透过散射介质聚焦实验

结合GA进行单色光穿透强散射介质的聚焦实验,验证实验系统的可靠性。实验中,GA的初始参数设置为初始变异率0.1,最终变异率0.002 5,衰减因子200,最大迭代次数100^[12, 18]。不同初始种群规模下GA的聚焦结果如图2所示,其中POP表示种群规模,右下角数字表示聚焦区域的平均光强。实验所用CMOS相机的色彩空间为8位,其分辨率的灰度值范围为 $[0, 255]$,超过255像素视为255。

采用GA时不同种群规模下迭代次数与目标区域光强的关系如图3所示。可以看出,种群数规模为16时的收敛结果比较不理想,这是由于种群规模过少,迭代陷入局部最优。种群规模为32和64时,在达到最大迭代次数前都能实现收敛,且收敛的目标区域光强都要明显优于种群规模为16的结果。在收敛速度方面,



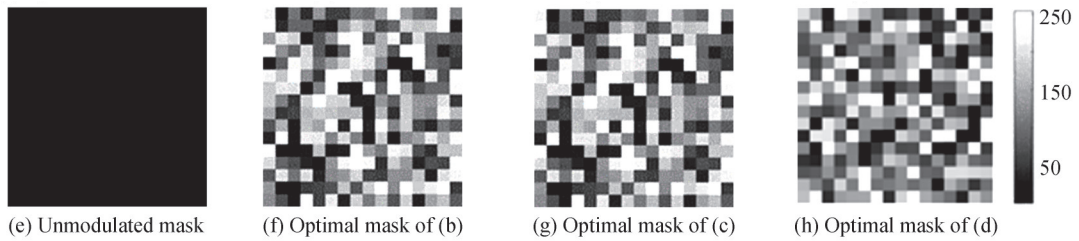


图 2 不同种群规模下 GA 的聚焦结果

Fig. 2 Focusing results of GA for different population scales

种群规模为 48 时最快达到收敛,但种群规模为 32 的迭代时间最短。综合考虑,种群规模为 32 时 GA 的聚焦性能最佳。

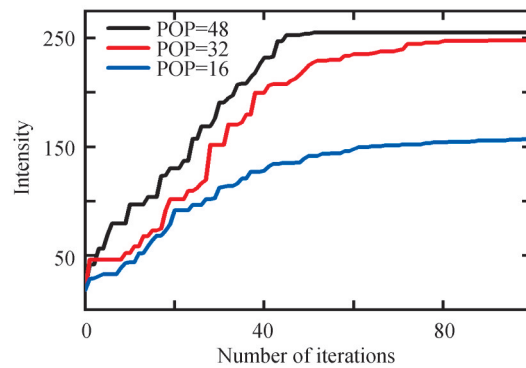


图 3 不同种群规模下 GA 的光强增长曲线

Fig. 3 Light intensity increasing curve of GA under different population scale

为了探究 LC-SLM 上划分的调制单元个数对 GA 聚焦结果的影响,分别选取调制单元个数 $N=4 \times 4$ 、 8×8 、 16×16 、 32×32 和 64×64 进行实验,实验结果如图 4 所示。同样地,LC-SLM 上所有调制单元的初始相位均设置为零。相机采集到的散斑图像如图 4 (a) 所示,待聚焦区域的平均光强为 17.4898。经相位调制后,采用 64×64 、 32×32 、 16×16 、 8×8 和 4×4 调制单元个数的聚焦散斑图分别如图 4 (b)~(f) 所示。当调制单元个数 $N=4 \times 4$ 时,目标区域光强略有增强,但相较于背景区域光强不太明显,聚焦结果较差。考虑是因为 $N=4 \times 4$ 时,每个超像素即单个调制单元的尺寸过大,不能精确地调制光波,迭代完成后的相位掩模如图 4 (1),与理想的最优相位掩模相差较大,因此无法实现有效聚焦。当调制单元个数达到一定数量时,如在 $N=8 \times 8$ 的情况下,可以看到目标区域具有明显的聚焦点,且能较容易地从背景区域中区分出来。当调制单

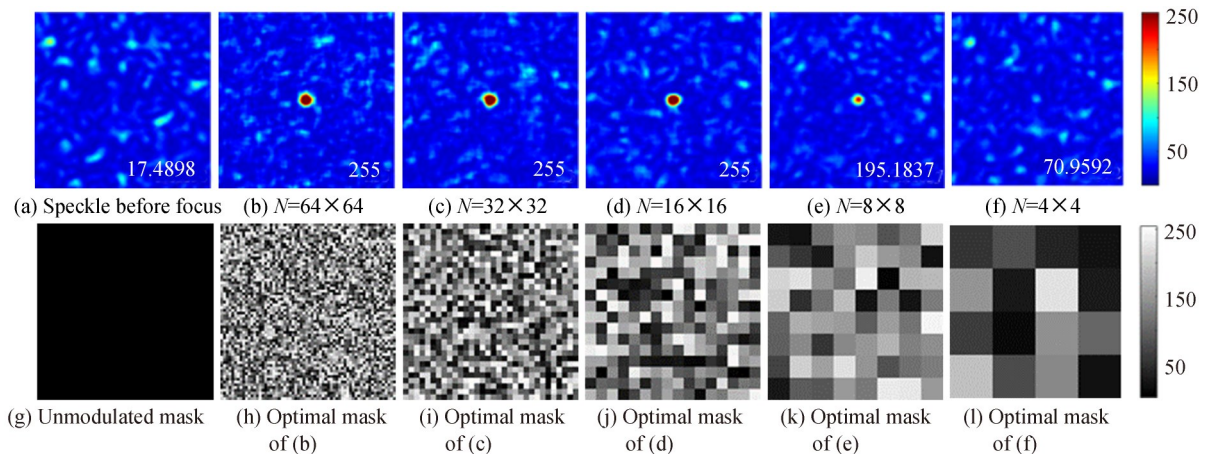


图 4 不同调制单元下 GA 的聚焦结果

Fig. 4 Focusing results of GA with different modulation units

元个数 N 超过 16×16 以后, 经过波前整形, 散斑图中目标区域的光强值均能达到 CMOS 相机采集到的最大值 255。

采用 GA 时不同调制单元个数下迭代次数与目标区域光强的关系如图 5 所示。从图中可以看出, $N=4 \times 4$ 时不到 30 次迭代就能收敛, 但是收敛时的增强因子很小。而 $N=8 \times 8$ 、 16×16 、 32×32 和 64×64 时, 达到收敛需要 60 次迭代, 但是除了 $N=8 \times 8$ 的情况, 最终的收敛值均能达到 255。此外, $N=16 \times 16$ 的收敛耗时相对更短。因此, 选择 $N=16 \times 16$ 作为后续实验的种群规模。

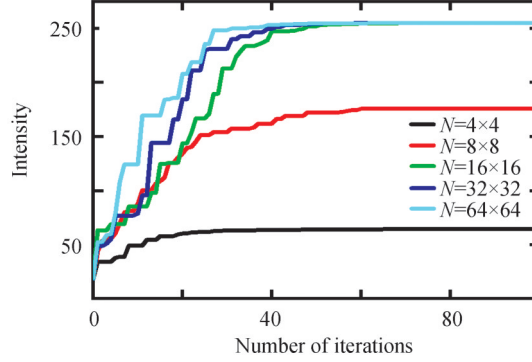


图 5 不同调制单元下 GA 的聚焦增强曲线
Fig. 5 Focus enhancement curve of GA with different modulation units

3 抑制背景噪声的算法改进

根据第 2 节的实验结果可知, 基于 GA 的透过散射介质聚焦实验在聚焦强度和收敛速度上有不错的结果, 但未能考虑到背景区域的噪声影响, 在聚焦后的散斑图中, 背景噪声的最大值超过目标点光强的 $1/3$ 。而在实际应用中, 底噪对成像质量的影响不能忽视, 在医学成像环境中, 斑点会降低有效的空间分辨率, 掩盖散射特性的细微差异, 甚至使信号完全被噪声掩盖^[19]。在光学相干断层成像中, 应用波前整形来抑制斑点噪声可以显著提高穿透深度和成像质量^[20]。

本文基于 GA 提出了提高目标区域光强和抑制背景光强的多目标优化函数。多点聚焦的多目标优化遗传算法^[21]中采用权重法, 因为目标光强和背景光强之间并非线性关系, 使用固定权重系数 M 将二者联系起来的实验结果并不能像多点聚焦一样效果显著。此外, 具有固定权重系数 M 的判别式实际上无法确保焦点的强度均匀。通常, 增强越高, 信噪比和目标点的强度就越高。因此, 设计一个采用增强倍数而不是绝对强度的判别式来评估目标点的聚焦质量, 具体表示为

$$f = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_n \right) / \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m I_m \right) \quad (1)$$

式中, I_n 和 I_m 分别表示目标区域和背景区域的像素点的光强值, n 和 m 分别表示目标区域和背景区域的总像素数。目标区域和背景区域的定义分别为

$$R_{\text{target}}: \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \leq r_1 \quad (2)$$

$$R_{\text{background}}: \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \leq r_2 \cap \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \geq r_1 \quad (3)$$

式中, (x_0, y_0) 表示目标点的圆心坐标, r_1 和 r_2 分别表示聚焦目标区域和背景区域的半径。

不同半径参数下 GA 对背景噪声的抑制结果如图 6 所示, 其中 R 表示所考虑背景区域的像素半径 (整个背景区域为 300×300 的矩形), 图中左下角的数字表示背景区域的标准差 (Standard Deviation, STD) 和光强平均值 A , 其计算表达式如式 (4) 和 (5) 所示。圆圈框选出 $R=115$ 的圆形区域, 以便于直观地看出改进 GA 与直接聚焦的差异。GA 的参数采用第 2 节所得到的最佳参数。

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

$$A = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m I_i \quad (5)$$

式中, X_i 和 \bar{X} 分别表示背景区域的像素点的光强值以及算数平均数, I_i 表示第 i 个像素点的光强值。

为了评估光斑的质量,对散斑图像进行二值化处理,提取出聚焦光斑的轮廓特征,然后根据圆度公式(6),计算图6(a)~(d)中光斑的圆度,圆度越接近1则图形越接近圆形。图6(a)~(d)的圆度分别为0.88、0.93、0.86和0.83,因此,可以认为优化后的光斑的形状更趋于圆形。

$$P = \frac{4 \times \pi \times S}{C^2} \quad (6)$$

式中, P 、 S 和 C 分别表示二值化处理后光斑的圆度、面积和周长。

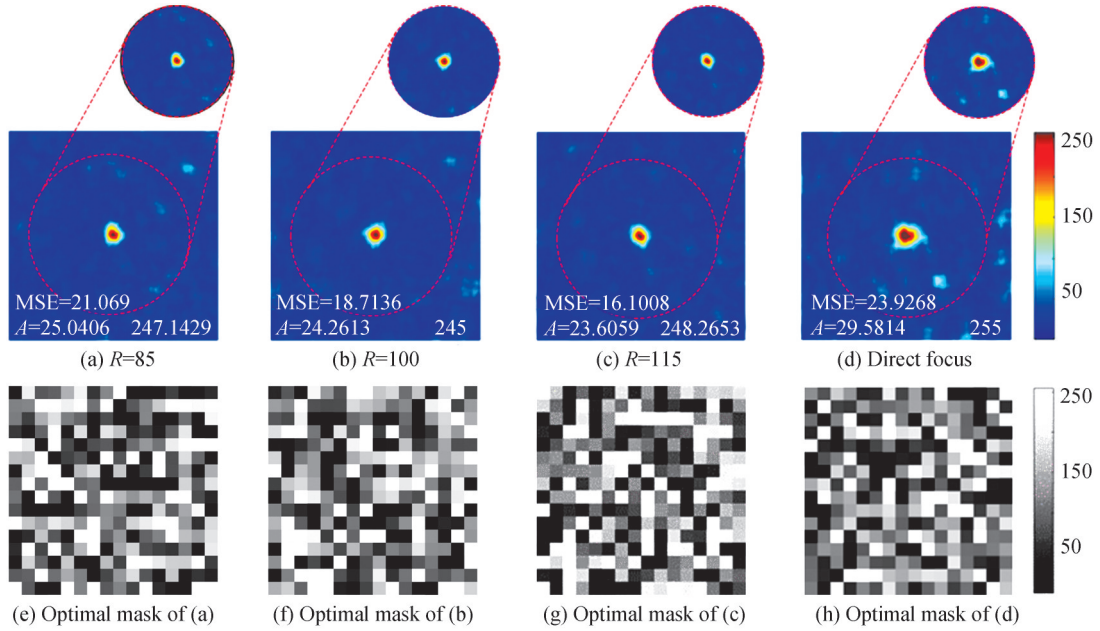


图6 不同半径参数下GA对背景噪声的抑制结果

Fig. 6 Results of GA suppression of background noise with different radius parameters

此外,在实际应用(荧光激发或者激光扫描成像)中,最容易引起误差的是具有显著光强值的噪声亮斑,因此定义半径不小于2像素、区域平均光强值超过目标点强度1/3的区域为显著噪声亮斑。未进行优化的直接聚焦算法在背景区域形成的显著噪声亮斑面积为582像素,如图6(d)所示,而优化后的算法在背景区域形成的显著噪声亮斑面积为172,如图6(c)所示,下降70.4%。因此,使用双目标优化函数(在提高目标区域光强的同时降低背景区域噪声)后,背景噪声被有效抑制。

通过改变被调控背景区域半径 R , 得到标准差和平均光强与被调控背景区域半径 R 的关系,如图7(a)所示。可看出,被调控背景区域半径增加,STD和 A 随之减小。但是当被调控背景区域半径 R 达到一定大小时,STD和 A 趋于稳定,这是由于相机的系统噪声使得STD和 A 无法继续减小。计算半径 R 大于110时STD和 A 平均值分别为16.4和23.8,相较于未优化前的23.9和29.5分别下降了31.3%和19.5%,且基本等同于相机的系统噪声。在无光照的光学暗室条件下用相机连续采集若干张图像,并计算其平均光强,得到相机的暗噪声为15。除此之外,在光照下相机还会产生散粒噪声和热噪声,因此本文认为23.8的平均灰度值基本等同于相机的系统噪声。说明利用所提出的优化函数可以将被调控背景区域的光场噪声抑制至最低水平。

此时,借鉴光线传播过程中的扩散衰减模型^[22],将逐渐减小的背景区域平均光强归因为目标区域光场向外溢出的光逐渐衰减的结果。具体来说,可以假设背景区域的光强是系统固有的底噪与目标聚焦区域溢出光的叠加。那么可以定义半径为 r 的背景区域的平均光强为 $A = I + I_0$,其中, I 表示目标区域扩散到半径为 r 的背景区域的可变光强, I_0 表示系统固有底噪。如果忽略底噪,则向外扩张的 $r + dr$ 圆形区域的平均光

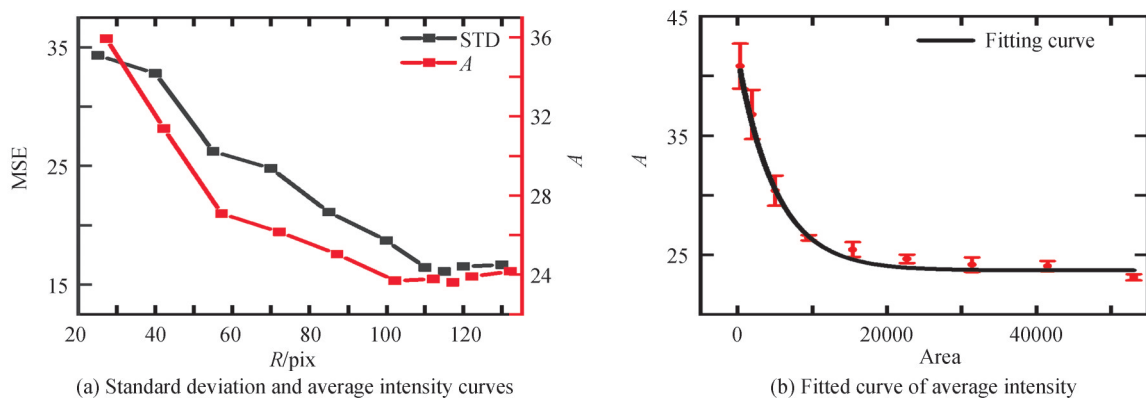


图7 不同调控半径下的光强标准差和平均光强曲线

Fig. 7 Standard deviation and average intensity curves under different regulation radii

强为 $I + dI$ 。目标区域溢出光场如图8所示。此时,参考光学扩散理论^[22],并引入类扩散系数 c ,则半径为 $r + dr$ 圆形背景区域的平均噪声对比半径为 r 圆形背景区域的平均噪声变化值为

$$dI = -c \cdot 2\pi r \cdot I \cdot dr \quad (7)$$

求解式(7)得

$$I = \alpha e^{-cS} \quad (8)$$

式中, α 是常数,可以通过数据拟合确定, $S = \pi r^2$ 表示背景区域面积。将式(5)所代表的可变光强加上散射系统的固有底噪,可以得到背景区域的平均光强为

$$A(r) = \alpha e^{-cS} + I_0 \quad (9)$$

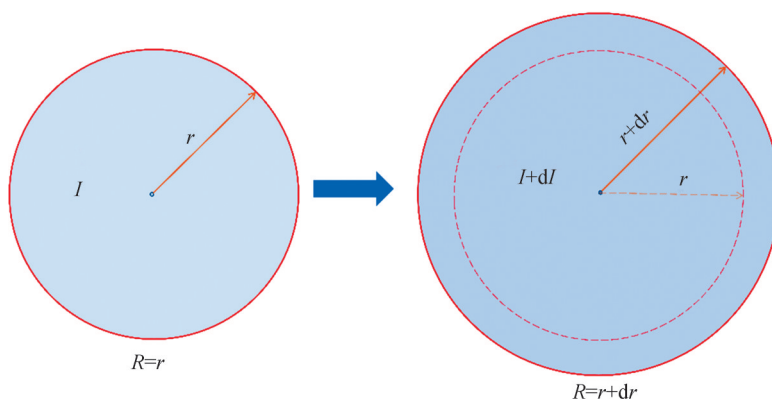


图8 调控背景区域溢出光场的示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the overflow light field in the modulated background area

利用式(6)对图7(b)的统计实验数据进行拟合,拟合确定系数达到0.99,拟合参数 α 为17.88,类扩散系数 c 等于0.0002,散射系统固有底噪为23.70。其中,系统固有底噪取决于所使用的毛玻璃性质和入射光功率,拟合参数 α 和类扩散系数取决于波前反馈聚焦系统本身。

由于实验系统的底噪不是本次实验所考虑的,因此将目标区域溢出部分的平均光强提取出来进行单独分析。从图6可以看出,没有进行算法优化时的光斑面积 s' 大于优化后的面积 s ,此时,假设被调控区域的背景噪声的可变部分正是来源于聚焦光斑多出来的这一部分面积 ($\Delta s = s' - s$) 光强。通过改变被调控背景区域的面积, Δs 内的总光强变化值为 $\Delta s \times \alpha \times e^{-cS}$,而 s' 内的总光强变化值为 $s' \cdot \alpha \cdot e^{-cS}$,这一部分光强的变化会降低聚焦区域的平均光强 I_f ,则平均光强 I_f 可以表示为

$$I_f = I_f^0 - s' \cdot \alpha \cdot e^{-cS} / s \quad (10)$$

式中, I_f^0 代表聚焦区域的饱和平均光强值, α 和 c 的取值与图7(b)的拟合结果相同。实验测量了被调控背景区域半径从10增加至130时目标聚焦区域的强度统计结果,如图9所示。利用式(7)对图9的结果进行拟

合,拟合结果得到聚焦区域的饱和平均光强为 246.6,优化前的光斑面积 $s' \approx 36\pi$,与图 6 (d)测量结果一致。结果说明,所提出的关联模型不仅可以很好地描述被调控区域面积和背景平均光强之间的关联,而且可以量化聚焦区域光强与被调控区域面积之间的关系。

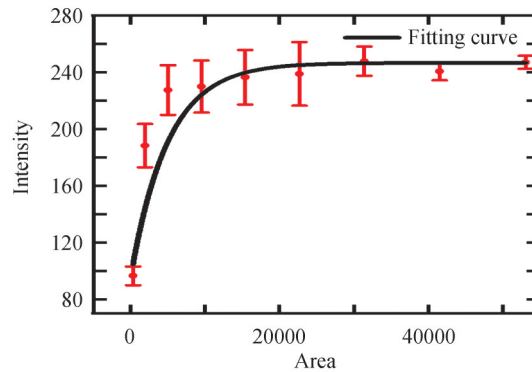


图 9 目标聚焦区域的聚焦强度随被调控背景区域面积变化的实验结果

Fig. 9 Experimental results about the changed focusing intensity of the modulated target region with increasing background area

4 结论

本文搭建了基于空间光调制器的反馈性波前整形实验系统,采用 GA 实现激光穿透强散射介质的聚焦。实验发现聚焦完成后的激光散斑背景噪声点明显,不利于聚焦后相关工作的开展。因此,在聚焦效果最好的 GA 基础上,改进了多目标优化函数。结果表明,对于不同的调控面积,改进后的 GA 在调制半径大于 100 之后,背景区域光强明显降低,基本实现了对背景噪声的抑制。并且聚焦光斑的尺寸更小且形状更接近理想的圆形光斑。最后,基于实验结果提出了背景平均光强与调控面积之间的量化关联模型,并验证了该模型的有效性,实现了对聚焦后背景噪声的定量表述。基于波前整形的透过散射介质聚焦方法具有实验装置简单、优化算法多样和鲁棒性高等优势,该工作可进一步加深对透过散射聚焦时背景噪声的认知,并有助于拓宽其在生物显微成像中的应用。

参考文献

- [1] SEBBAH P. Waves and imaging through complex media [M]. Springer Science & Business Media, 2001.
- [2] ISHIMARU A. Wave propagation and scattering in random media [M]. Academic Press New York, 1978.
- [3] CONKEY D B, CARAVACA-AGUIRRE A M, PIESTUN R. High-speed scattering medium characterization with application to focusing light through turbid media [J]. Optics Express, 2012, 20(2): 1733-1740.
- [4] POPOFF S M, LEROSEY G, CARMINATI R, et al. Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media [J]. Physical Review Letters, 2010, 104(10): 100601.
- [5] VELLEKOOP I M, MOSK A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media [J]. Optics Letters, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [6] YU Zhipeng, XIA Meiyun, LI Huanhao, et al. Implementation of digital optical phase conjugation with embedded calibration and phase rectification [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1537.
- [7] PAI P, BOSCH J, KÜHMAYER M, et al. Scattering invariant modes of light in complex media [J]. Nature Photonics, 2021, 15(6): 431-434.
- [8] CAO Jing, YANG Qiang, MIAO Yusi, et al. Enhance the delivery of light energy ultra-deep into turbid medium by controlling multiple scattering photons to travel in open channels [J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(1): 108.
- [9] RUAN Haowen, XU Jian, YANG Changhui. Optical information transmission through complex scattering media with optical-channel-based intensity streaming [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 2411.
- [10] ZHAO Tianrui, OURSELIN S, VERCAUTEREN T, et al. High-speed photoacoustic-guided wavefront shaping for focusing light in scattering media [J]. Optics Letters, 2021, 46(5): 1165-1168.
- [11] FANG Longjie, ZUO Haoyi, YANG Zuogang, et al. Particle swarm optimization to focus coherent light through disordered media [J]. Applied Physics B, 2018, 124(8): 1-9.
- [12] CONKEY D B, BROWN A N, CARAVACA-AGUIRRE A M, et al. Genetic algorithm optimization for focusing through turbid media in noisy environments [J]. Optics Express, 2012, 20(5): 4840-4849.
- [13] LUO Yunqi, YAN Suxia, LI Huanhao, et al. Focusing light through scattering media by reinforced hybrid algorithms [J].

- APL Photonics, 2020, 5(1): 016109.
- [14] FANG Longjie, ZUO Haoyi, YANG Zuogang, et al. Binary wavefront optimization using a simulated annealing algorithm [J]. Applied Optics, 2018, 57(8): 1744-1751.
- [15] PARK C, PARK J H, RODRIGUEZ C, et al. Full-field subwavelength imaging using a scattering superlens[J]. Physical Review Letters, 2014, 113(11): 113901.
- [16] KAMALI S M, ARBABI E, ARBABI A, et al. Highly tunable elastic dielectric metasurface lenses [J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(6): 1002-1008.
- [17] ANTIPA N, KUO G, HECKEL R, et al. DiffuserCam: lensless single-exposure 3D imaging[J]. Optica, 2018, 5(1): 1-9.
- [18] MIRJALILI S. Genetic algorithm [M]. Evolutionary algorithms and neural networks, Springer, 2019: 43-55.
- [19] CURATOLO A, KENNEDY B F, SAMPSON D D, et al. Speckle in optical coherence tomography [M]. Taylor & Francis, 2013.
- [20] YU H, LEE P, JO Y, et al. Collaborative effects of wavefront shaping and optical clearing agent in optical coherence tomography [J]. Journal of Biomedical Optics, 2016, 21(12): 121510.
- [21] CONKEY D B, PIESTUN R. Color image projection through a strongly scattering wall[J]. Optics Express, 2012, 20(25): 27312-27318.
- [22] BISSONNETTE L R. Multiscattering model for propagation of narrow light beams in aerosol media[J]. Applied Optics, 1988, 27(12): 2478-2484.

Experimental Study on Background Noise Suppression When Focusing through Scattering Medium

LIU Yu, HUANG Jianhua, ZHAO Chuanjian, GUO Cuixia, HUANG Feng
(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: When the light passes through a scattering medium, the wavefront of the beam is disturbed due to the multiple scattering phenomena. If the light is coherent, scattered light from different optical paths will interfere, resulting in random speckles, which causes extreme degradation in imaging quality. Using wavefront shaping techniques to focus light through strongly scattering media is significant for optical microscopic active imaging through biological tissues. However, the feedback-based optimized wavefront shaping often ignores the background noise light when focusing, and even in some cases, the light intensity of a background bright spot can even exceed 1/3 of the target point. To solve this problem, this paper proposes a different iterative method from the previous multi-objective optimization genetic algorithm aiming to suppress the background noise. The effect of the population scale of the genetic algorithm and the number of modulation units of the spatial light modulator on the focusing intensity and convergence speed are systematically studied. The experimental results show that the genetic algorithm can converge quickly when the population scale and the number of modulation units reach 32 and 16×16 , respectively. The maximal light intensity of the target region can reach 250 or more. In terms of convergence speed, the fastest convergence is achieved for a population scale of 48, but the shortest iteration time is achieved for a population scale of 32. All target intensities can achieve convergence after 60 iterations when the number of modulation units exceeds 16×16 , and the number of modulation units is positively correlated with the iteration time. Considering above aspects, the best focusing performance of the genetic algorithm is achieved when the population scale and the number of modulation units reach 32 and 16×16 , respectively. After determining the optimal experimental conditions, the study of suppressing background noise is conducted. The experiments aim to enhance the signal-to-noise ratio and propose a different iterative method from the previous multi-objective optimization genetic algorithm. The feedback function is changed to the ratio of target intensity to average background noise. Hence, iterative calculation aims to increase target intensity and suppress background noise simultaneously. The results show that the optimized algorithm significantly reduces the light intensity in the background region after the modulated area is increased. And its optimal value is basically equal to the system noise of the camera, indicating that the optimization function can suppress the light field noise in the modulated background region to the lowest

level. In terms of suppressing the area of significant noise bright spot, the area of the significant noise bright spot formed with the optimized algorithm in the background region decreased by 70.4% compared with that before optimization, indicating that the optimization function can effectively suppress the local noise bright spot. In addition, the quality of the focused spot is evaluated by extracting the contour features of the target region. After obtaining the contour features, the circularities of the initial spot and the optimized spot are calculated separately using the circularity formula. The circularity of the initial spot is 0.83, while the average circularity of the optimized spot is 0.9, indicating that the shape of the optimized focused spot is closer to the ideal circular spot. Finally, a quantitative correlation model between the background average light intensity and the modulated area is proposed based on the experimental results. The experimental data are fitted well using the quantitative model, and the fitting results yield a saturated average light intensity of 246.6 in the focused region, which is consistent with the measurement results of previous experiments. It shows that the correlation model proposed in this paper can not only describe the correlation between the modulated background area and the background mean light intensity well, but also quantify the relationship between the light intensity of the focused area and the modulated background area.

Key words: Light field modulation; Wavefront shaping; Feedback optimization algorithm; Scattering medium; Optical focusing; Background noise

OCIS Codes: 290.4210; 230.6120; 060.5060; 290.5820