

# 基于光学传输矩阵的迭代聚焦方法

张也, 韩伟, 辛煜\*, 王林

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 在光学传输矩阵的基础上, 提出一种基于 weighted Gerchberg-Saxton (GSW) 算法的迭代聚焦方法。将利用传输矩阵求解调制相位的过程抽象为相位恢复问题, 将传输矩阵与均方优化算子作为散射系统变换算子来迭代优化调制相位。通过仿真和实验证明, 相比相位共轭法、均方优化算子, 所提方法具有更显著的多点聚焦效果, 为光场能量调控领域提供了新的思路。

**关键词** 散射; 传输矩阵; 相位调制; 多点聚焦

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.212901

## Iterative Focusing Method Based on Optical Transmission Matrix

Zhang Ye, Han Wei, Xin Yu\*, Wang Lin

School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210094, China

**Abstract** In this paper, we propose an iterative focusing method based on a weighted Gerchberg-Saxton (GSW) algorithm using an optical transmission matrix. The process of solving the modulation phase by using the transfer matrix is abstracted as a phase recovery problem, and the transmission matrix and mean square optimization operator are used as transformation operators of the scattering system to iteratively optimize the modulation phase. Simulations and experiments confirm that the proposed method has a more significant multi-point focusing effect than the phase conjugation method and the mean square optimization operator. The proposed method provides a new idea for light field energy regulation.

**Key words** scattering; transmission matrix; phase modulation; multi-point focusing

**OCIS codes** 290.7050; 120.7000; 060.5060

## 1 引言

相干光在生物组织、雾霾等介质中发生的多重散射使出射光波形成随机散斑, 这极大制约了经散射介质的成像能力和信息传递能力。经散射介质后实现光束聚焦在医学无伤检测、荧光成像、光动力学及光学镊子等领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。而由于光场振幅与相位的完全扰乱, 难以利用自适应光学方法实施光场调控。为了实现经散射介质的聚焦, 近年来研究人员开发了许多光场调制技术, 包括基于反馈的波前整形法<sup>[2]</sup>、光学相位共轭法<sup>[3]</sup>、传输矩阵法<sup>[4]</sup>等。基于反馈的波前整形法是根据探测的反馈

信号来不断迭代调制光场进行聚焦, 目前已有逐点调制法、分区调制法<sup>[5]</sup>、遗传算法<sup>[6]</sup>及粒子群算法<sup>[7]</sup>等诸多算法应用于反馈调制技术, 但这些算法实现一次聚焦需要很长的迭代时间。光学相位共轭法基于光波的时间反演性, 利用生成的相位共轭波快速实现聚焦或成像<sup>[8]</sup>, 但所使用的实验装置较为复杂, 并且需要对实验器件进行精确校准。当每次聚焦的目标或位置发生变化时, 反馈调制技术和光学相位共轭法均需要重新调制, 极大地限制了聚焦的灵活性。

散射介质的传输矩阵表征输入光场与输出光场的线性关系, 描述整个散射系统的完备信息。通过测量散射介质的传输矩阵并利用时间反演法可实现

收稿日期: 2020-02-18; 修回日期: 2020-02-22; 录用日期: 2020-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(61675098, 61107011)

\* E-mail: yxin@njust.edu.cn

聚焦<sup>[9]</sup>。这种方法的优势在于测量完传输矩阵之后,可根据目标变化调制输入光场,无需再次测量便可在不同位置的多点聚焦,展现了更加灵活的应用前景。但是散射介质的多点聚焦不可避免地存在不同焦点强度不一致、与背景散斑的对比度较低等问题,这是因为测量的传输矩阵中存在噪声,求解的调制相位不够准确,一般使用的空间光调制器(SLM)仅能调制相位。

本文提出一种结合传输矩阵法和 weighted Gerchberg-Saxton(GSW)算法的光场调控方法。把调制相位的求解视为相位恢复问题,引入 GSW 算法,将传输矩阵和均方优化算子(MSO)作为散射系统的变换算子,在输入面和输出面之间进行系统变换迭代,并施加振幅约束求解调制相位。最后通过仿真和实验,验证了 GSW 算法比相位共轭法、均方优化算子具有更好的聚焦效果,尤其在焦点均匀性上,调控效果更为明显。

## 2 基本原理与实验仿真

### 2.1 光学传输矩阵

光学传输矩阵描述光经散射介质的传播,对于稳定的散射介质,传输矩阵  $\mathbf{T}$  可将输入光场  $\mathbf{E}^{\text{in}}$  与输出光场  $\mathbf{E}^{\text{out}}$  联系起来,表达式<sup>[4]</sup>为

$$\mathbf{E}^{\text{out}} = \mathbf{T}\mathbf{E}^{\text{in}}. \quad (1)$$

分别将输入光场和输出光场划分为  $N$ 、 $M$  份,第  $m$  个输出光场可表示为

$$\mathbf{E}_m^{\text{out}} = \sum_{n=1}^N t_{mn} \mathbf{E}_n^{\text{in}}, \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{E}_n^{\text{in}}$  为第  $n$  个输入光场;  $t_{mn}$  为传输矩阵  $\mathbf{T}$  的元素,遵循复高斯分布,传输矩阵  $\mathbf{T}$  的尺寸为  $M \times N$ 。使用 SLM 并结合全场干涉测量法测量散射介质的传输矩阵,实验测量获取的传输矩阵与真实的传输矩阵并不完全相同,用  $\mathbf{T}_{\text{obs}}$  表示。利用所测量的传输矩阵求解调制相位,便可对经散射介质的光场进行调控。

利用传输矩阵实现光场调控的关键是根据目标输出求解输入光场,这实际上是一个矩阵求解的逆问题,一般有两种直接的方法<sup>[10]</sup>。

1) 传输矩阵的逆矩阵  $\mathbf{T}_{\text{obs}}^{-1}$  (当  $M \neq N$  时,为伪逆矩阵)。根据输出目标光场  $\mathbf{E}^{\text{target}}$  求解的输入调制光场为  $\mathbf{E}^{\text{in}} = \mathbf{T}_{\text{obs}}^{-1} \mathbf{E}^{\text{target}}$ ,理论有效的输出光场为

$$\mathbf{E}^{\text{eff}} = \mathbf{T}\mathbf{T}_{\text{obs}}^{-1} \mathbf{E}^{\text{target}}. \quad (3)$$

在理想情况下,  $\mathbf{T}\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{I}$ , 其中  $\mathbf{I}$  为单位矩阵,可得  $\mathbf{E}^{\text{eff}} = \mathbf{E}^{\text{target}}$ , 即完全还原输出目标光场。然而

噪声使得逆矩阵变得极不稳定,因为  $\mathbf{T}_{\text{obs}}^{-1}$  的奇异值是  $\mathbf{T}_{\text{obs}}$  奇异值的倒数,意味着传输矩阵中低于噪声水平而失真的奇异值在求逆过程中会极大地影响逆矩阵  $\mathbf{T}_{\text{obs}}^{-1}$  的准确性,如果测量的传输矩阵中存在较大噪声,输出光场很可能与目标光场完全不同。

2) 时间反演法。时间反演法应用在单色光时对应的是相位共轭法,是目前求解输入调制相位时最常用的方法。根据  $\mathbf{E}^{\text{target}}$  求解的输入调制光场为  $\mathbf{E}^{\text{in}} = \mathbf{E}_{\text{obs}}^{\text{H}} \mathbf{E}^{\text{target}}$ , 理论有效的输出光场为

$$\mathbf{E}^{\text{eff}} = \mathbf{T}\mathbf{T}_{\text{obs}}^{\text{H}} \mathbf{E}^{\text{target}} = \mathbf{O}\mathbf{E}^{\text{target}}, \quad (4)$$

式中: 时间反演算子  $\mathbf{O} = \mathbf{T}\mathbf{T}_{\text{obs}}^{\text{H}}$ ;  $\mathbf{T}_{\text{obs}}^{\text{H}}$  为  $\mathbf{T}_{\text{obs}}$  的共轭转置矩阵。在传输矩阵存在一定噪声的情况下,相位共轭法的重建效果相对稳定,因为它利用传输矩阵中较大的奇异值来进行最大化能量传输,同时低于噪声水平而失真的奇异值会保持低的通道传输效率,不会对重建效果造成太大影响。 $\mathbf{O}$  具有强对角性,对角线上的元素具有较大值,但其他元素并不为 0,这就意味着利用相位共轭法重建的输出光场与目标光场并不完全相等。

### 2.2 均方优化算子

利用所测量的传输矩阵调制光场,还有一种更有效的方法是使用 MSO。利用 Tikhonov 正则化方法可得到 MSO<sup>[10]</sup>。Tikhonov 正则化最初是用来解决病态逆问题的,求解思路与利用存在噪声误差的传输矩阵求解输入调制光场思路较为相似。MSO 在噪声环境下具有比较好的重建效果。一般采用两种方式构造 MSO, 其用  $\mathbf{W}$  表示。第一种<sup>[10]</sup>为

$$\mathbf{W} = (\mathbf{T}_{\text{obs}}^{\text{H}} \mathbf{T}_{\text{obs}} + \mu^2 \cdot \mathbf{I})^{-1} \mathbf{T}_{\text{obs}}^{\text{H}}, \quad (5)$$

式中:  $\mu$  为正则化参数,  $\mu^2$  表示传输矩阵的噪声估计。第二种<sup>[11]</sup>为

$$\mathbf{W} = \mathbf{V}\mathbf{S}^{\text{H}}\mathbf{U}^{\text{H}}, \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{T}_{\text{obs}} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^{\text{H}}$ , 表示对传输矩阵进行奇异值分解;  $\mathbf{S}^{\text{H}}$  为  $\mathbf{S}$  的共轭转置,  $\mathbf{S}$  是  $M \times N$  对角矩阵, 对角线上的元素是  $\mathbf{T}_{\text{obs}}$  的奇异值;  $\mathbf{U}^{\text{H}}$  为  $\mathbf{U}$  的共轭转置,  $\mathbf{U}$  为  $M$  阶酉矩阵;  $\mathbf{V}$  为  $N$  阶酉矩阵。  $\sigma_i$  为  $\mathbf{S}$  中的第  $i$  个对角元素, 是传输矩阵的奇异值, 对  $\sigma_i$  进行滤波处理, 得

$$\sigma'_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_i^2 + \mu^2}. \quad (7)$$

在完全不存在噪声的情况下,  $\mu^2 = 0$ ,  $\mathbf{W} = \mathbf{T}_{\text{obs}}^{-1}$ ; 当噪声相当大时  $\mu^2 \gg 0$ ,  $\mathbf{W}$  与  $\mathbf{T}_{\text{obs}}^{\text{H}}$  呈比例。在本文仿真与实验中,  $\mu$  均设置为  $\mathbf{T}_{\text{obs}}$  中最大奇异值的 10%。第一种对 MSO 计算的方式较为耗时, 所以

一般采用第二种形式来构造 MSO。基于 MSO 求解的输入调制光场为  $E^{\text{in}} = WE^{\text{target}}$ ，理论有效的输出光场为

$$E^{\text{eff}} = TWE^{\text{target}} \quad (8)$$

通过数值仿真来更好地说明 MSO 的重建效果。首先生成仿真所用的传输矩阵<sup>[12]</sup>，其尺寸为  $1024 \times 1024$ 。通常采用焦点光强与背景光强的比 (SBR) 来评价单点聚焦质量,但对于多点聚焦,这种评价方式显然不够准确,这里采用皮尔逊相关系数来评估多点聚焦质量。

基于相位共轭法,利用 MSO 对多点和字母掩模进行聚焦仿真。将目标点阵列作为  $E^{\text{target}}$ ,通过相位共轭法和 MSO 重建输出光场。聚焦效果的相关系数随焦点数量增加的变化曲线如图 1 所示。可以看出:MSO 的焦点相关系数一直保持在 0.8 以上,而相位共轭法聚焦的相关系数随焦点数量的增加不断下降;并且 MSO 聚焦的相关系数在整个过程中始终高于相位共轭法。图 2(a)为利用相位共轭法和 MSO 对 64 个聚焦点的仿真结果,可以看出,MSO 具有更加突出的聚焦效果,背景已十分暗淡。将字母“O”作为输出目标的仿真结果如图 2(b)所示,可以看出,相对于相位共轭法,MSO 调制的效果要好很多,字母处强度明显高于背景散斑。数据模拟结果表明,MSO 比相位共轭有更好的聚焦效果。图像尺寸均为  $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 。

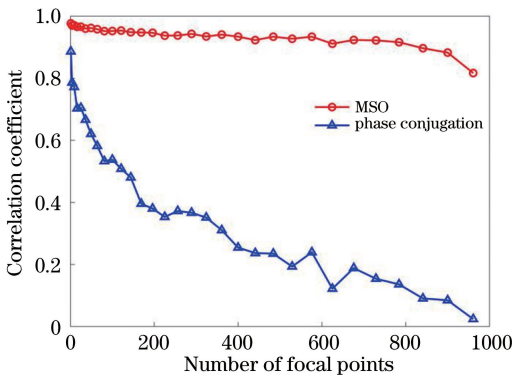


图 1 相关系数随焦点数量的变化曲线

Fig. 1 Change curves of correlation coefficient with number of focal points

### 2.3 GSW 算法

利用 SLM,基于均方优化算子  $W$  的理想输入调制光场为  $E^{\text{in}} = WE^{\text{target}}$ 。而一般所使用的 SLM 是纯相位型的,只能调制输入光场的相位,即

$$E^{\text{in}} = \frac{WE^{\text{target}}}{|WE^{\text{target}}|} \quad (9)$$

实际调制效果将会有所下降,这是由 SLM 的

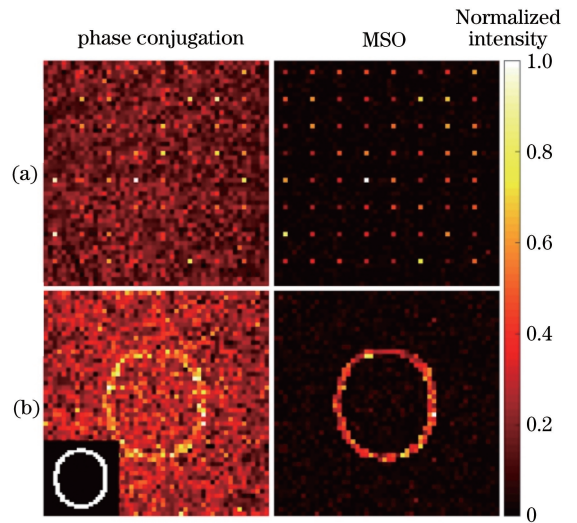


图 2 仿真的聚焦效果。(a)多焦点;(b)字母掩模  
Fig. 2 Simulated focus effect. (a) Multi focal points;  
(b) letter mask

功能所限制的。针对这个问题,将 GSW 算法和 MSO 结合以进一步提高调制聚焦效果。

输出光场满足一定的强度分布要求,即聚焦。而 SLM 一般都是对准直平面光进行相位调制,即输入光场振幅分布均匀。已知输入与输出光场的振幅,基于所测量的传输矩阵来求解输入调制相位,这非常类似于相位恢复问题,于是引入 Gerchberg-Saxton(GS)算法<sup>[13]</sup>。GS 算法最初解决的是从两个平面光强信息中恢复相位的问题,在两个平面之间通过傅里叶变换来回迭代,用已知的振幅信息对迭代进行约束,从而恢复相位。GS 算法过程简单、比较灵活,很容易推广来解决很多问题。广义 GS 算法可用于任何局部约束的问题,已知每个域的部分信息,一般是对象域和傅里叶变换域,在两个域之间来回迭代,先满足一个域的约束,再变换返回到另一个域来满足约束条件。

研究如何将 GS 算法应用于散射系统中来求解输入调制相位。GS 算法中用傅里叶变换描述系统的变换过程。在研究的散射系统中,采用所测量的散射介质传输矩阵  $T_{\text{obs}}$  来描述系统的正变换过程,同时选取重建效果更好的均方优化算子  $W$  描述系统的逆变换过程。理论上  $T_{\text{obs}}$  与其逆矩阵  $T_{\text{obs}}^{-1}$  (或伪逆矩阵)之积会更好符合单位矩阵,但是前文已经分析,因为实际测量噪声的存在, $T_{\text{obs}}^{-1}$  重建的效果极不稳定,因此  $T_{\text{obs}}^{-1}$  并不能很好地描述散射系统的逆变换过程。因为  $W$  是对  $T_{\text{obs}}^{-1}$  奇异值进行滤波计算得到的,所以  $T_{\text{obs}}$  与  $W$  之积虽并不完全符合单位矩阵,但仍与单位矩阵存在极大的相关性。虽然选

取  $\mathbf{W}$  作为系统逆变换算子时存在一定误差,但在实际测量噪声存在的情况下,相比较于  $\mathbf{T}_{\text{obs}}^{-1}$ ,这是一种更好的解决方案。

具体的处理过程如下:对输入平面光的振幅进行归一化,将输出光场振幅设为目标振幅,将传输矩阵  $\mathbf{T}_{\text{obs}}$  和均方优化算子  $\mathbf{W}$  分别作为散射系统的正变换算子和逆变换算子,并加入权重因子  $w$  来控制输出振幅的均匀性,提高迭代效率。在迭代中加入权重因子的 GS 算法称为 GSW 算法<sup>[14]</sup>,算法原理如图 3 所示。 $\mathbf{E}_1$  和  $\mathbf{E}_2$  表示输入、输出平面光场; $\mathbf{E}'_1$  和  $\mathbf{E}'_2$  表示迭代过程中经过振幅约束处理的输入、输出光场; $\phi_1^k$  和  $\phi_2^k$  分别表示第  $k$  次迭代后输入、输出平面的相位分布; $\mathbf{A}_1$  和  $\mathbf{A}_2$  分别表示经过迭代后输入、输出平面的振幅分布; $\mathbf{A}_{\text{target}}$  表示输出光场振幅。输入光场的初始相位随机估计为  $\phi_1^0$ ,初始权重因子为  $w^0$  (其中元素均设置为 1)<sup>[15]</sup>,GSW 算

法步骤如下:

- 1) 第  $k$  迭代后,输入光场  $\mathbf{E}_1 = \exp(i\phi_1^k)$ ,振幅归一化;
- 2) 经散射介质系统变换,得到输出光场  $\mathbf{E}_2 = \mathbf{A}_2 \exp(i\phi_2^k) = \mathbf{T}\mathbf{E}_1$ ;
- 3) 保留输出光场相位分布  $\phi_2^k$ ,更新权重因子  $w^k = w^{k-1} \langle |\mathbf{A}_2| \rangle / \mathbf{A}_2$ ,并乘以目标振幅  $\mathbf{A}_{\text{target}}$  作为输出光场新的振幅分布,即  $\mathbf{E}'_2 = w^k \mathbf{A}_{\text{target}} \exp(i\phi_2^k)$ ,其中  $\langle |\mathbf{A}_2| \rangle$  表示  $|\mathbf{A}_2|$  的统计平均值;
- 4) 经系统逆变换过程,得到输入光场  $\mathbf{E}'_1 = \mathbf{A}_1 \exp(i\phi_1^k) = \mathbf{W}\mathbf{E}'_2$ ;
- 5) 保留输入光场相位  $\phi_1^k$  并作为下一次迭代的输入光场相位  $\phi_1^{k+1} = \phi_1^k$ ;
- 6) 重复步骤 1)~5),达到迭代次数后,迭代停止,输出最终求解的调制相位  $\phi_1^k$ 。

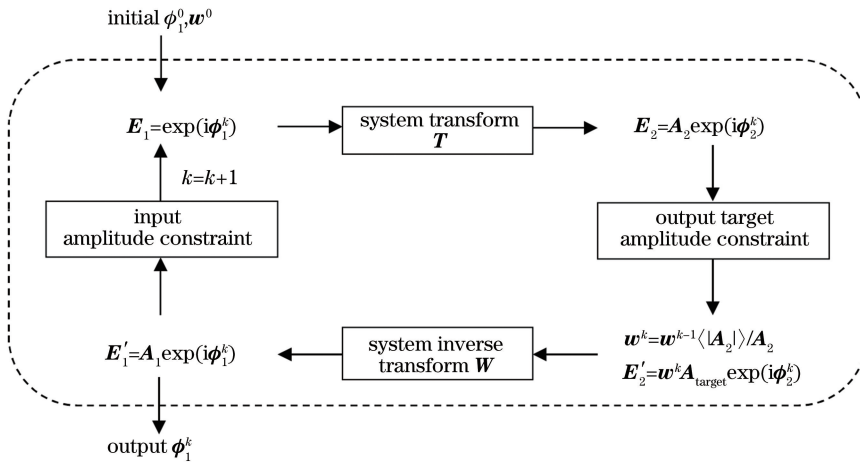


图 3 GSW 算法原理

Fig. 3 GSW algorithm principle

通过数值仿真来说明 GSW 算法对字母掩模聚焦的优化效果,以字母“P”为目标的聚焦仿真结果如图 4 所示。可以看出:相位共轭法和 MSO 得到

的聚焦图案亮度都较弱且不均匀,GSW 算法得到的聚焦图案亮度非常均匀;GSW 算法得到的背景散斑光强比 MSO 得到的聚焦背景较强一些,这是因为

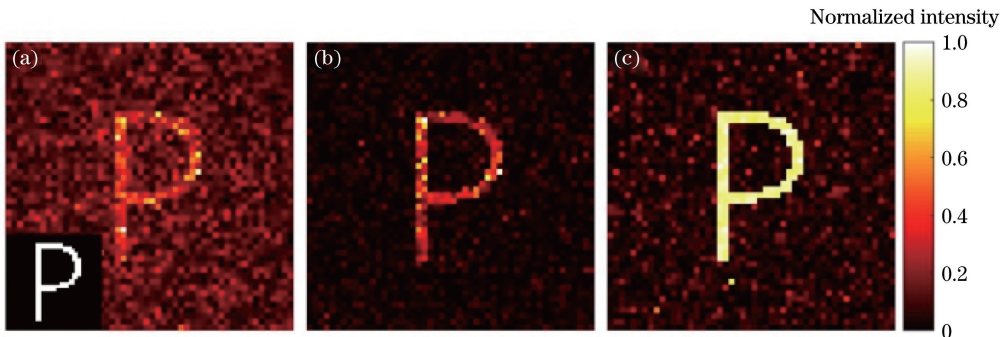


图 4 聚焦仿真结果。(a) 相位共轭法; (b) MSO; (c) GSW 算法

Fig. 4 Simulated results of focusing. (a) Phase conjugation method; (b) MSO; (c) GSW algorithm

MSO 得到的聚焦结果中存在少数亮度极大点,进行亮度归一化处理,整体亮度下降,实际上 MSO 和 GSW 算法得到的聚焦的背景噪声并无太大差别。总体来说,GSW 算法明显好于另外两种方法。GSW 算法仿真结果的相关系数随迭代次数的变化如图 5 所示,在经过 10 次迭代后,相关系数达到了 0.9 左右,曲线就已收敛。因为整个迭代过程都在计算机上完成,GSW 算法的迭代速度不依赖于 SLM 的刷新速率和相机的采集速率,只取决于传输

矩阵的大小和计算机的运算速度等。

### 3 实验与分析

首先测量散射介质的传输矩阵。使用 SLM,以哈达玛矩阵为基,编码输入光,并以移相干涉的方式测量输出光场,通过求解线性方程组来获取散射介质的传输矩阵。实验装置示意图如图 6 所示。激光器(希爱 MGL-III-532,长春新产业光电)发出的绿色激光(波长 532 nm)经滤波和准直扩束后被分为两束平面光。用衰减片调整经分束镜棱镜的光的强度,并将其作为测量传输矩阵的参考光。用偏振片调整从分束镜反射的平面光的偏振方向,使其与 SLM(PLUTO-VIS-016, Holoeye 公司)调制方向保持一致,经过 SLM 调制后,通过透镜聚焦在散射介质上形成散射光。散射光经物镜(10×,数值孔径 NA = 0.25)、透镜、偏振片在相机(CS2100M, Thorlabs 公司)探测平面上形成与参考光干涉的散斑图案。然而 SLM 的衍射效率并不是 100%,照射在 SLM 上的光束并未被全部调制,部分未经相位调制的光束经散射介质后形成背景散斑噪声,影响了聚焦的对比度,因此需要分离并滤除其中未经调制的光。采用 Lee 全息法生成载频相位调制光束,并控制光束反射的偏转角度<sup>[16]</sup>。

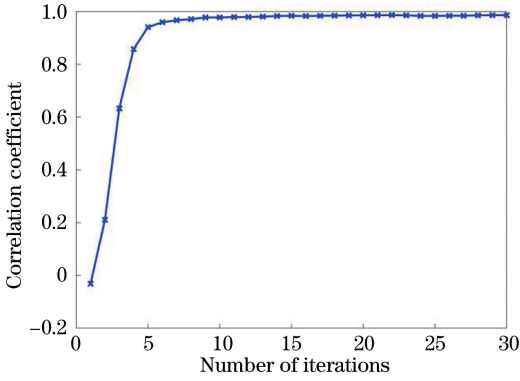


图 5 基于 GSW 算法仿真结果的相关系数随迭代次数的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of correlation coefficient of simulation results based on the GSW algorithm with number of iterations

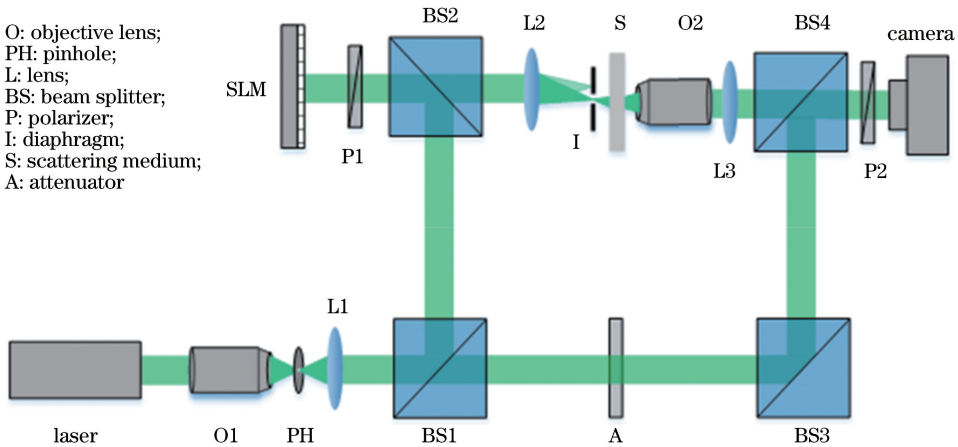


图 6 测量传输矩阵的实验装置示意图

Fig. 6 Schematic of experimental setup for measuring transmission matrix

首先生成载频相位  $\phi_{\text{carrier}}$ , 将其叠加于原有的调制相位  $\phi_{\text{load}}$  上, 得到加载于 SLM 的相位, 表达式为

$$\phi_{\text{SLM}} = \phi_{\text{load}} + \phi_{\text{carrier}}, \quad \phi_{\text{carrier}} = 2\pi\left(\frac{\alpha_x}{\lambda}x + \frac{\alpha_y}{\lambda}y\right), \quad (10)$$

式中:  $(x, y)$  为 SLM 上的位置坐标;  $\lambda$  为光的波长;  $\alpha_x$  和  $\alpha_y$  分别为控制光束沿  $x$  轴和  $y$  轴偏转的角度

参数。经 SLM 调制后的光通过透镜(图 6 中的 L2)后会在其傅里叶平面上与未调制的光发生分离, 用光阑过滤掉其他杂散光即可。实验中用毛玻璃(DG10-600-MD, Thorlabs 公司)作为散射介质。

实验中所用的 SLM 分辨率为  $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ , 选取其中  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$  的区域并划分为 4096 个调制单元, 选取相机中  $100 \text{ pixel} \times$

100 pixel 区域作为输出光场。所测量的传输矩阵尺寸为  $4096 \times 10000$ , 因此采用的哈达玛矩阵尺寸为  $4096 \times 4096$ 。以哈达玛矩阵的列向量为基, 并叠加载频相位, 编码输入光, 通过移相干涉测量的方式检索相机探测平面上的输出光场, 以获取散射介质的传输矩阵。测量传输矩阵的时间大约为 16 min, 测量速度主要由所测量的传输矩阵尺寸、SLM 的刷新速率及相机的图像采集时间决定。观测实验结果时, 遮挡住参考光, 可以获得更高的聚焦对比度。

图 7 展示了基于相位共轭法、MSO、GSW 算法调制的单点和多点聚焦效果。图 7(a) 展示对单点的聚焦效果, 各方法调制的焦点相对于背景散斑都很突出, 聚焦效果良好; 图 7(b) 展示对 25 个点的聚焦效果, 相位共轭法调制的焦点只有几个可以分辨, MSO 调制的焦点与背景散斑对比度较高, 但也有一些焦点的亮度较弱, 无法分辨出来, GSW 算法调制

的散斑背景虽然较 MSO 强一些, 但能够分辨出的焦点更多; 图 7(c) 展示对 100 个点的聚焦效果, 因为点数量较多, 相位共轭法调制的焦点已经几乎分辨不出来了, MSO 调制的焦点大多数可以分辨出来, 但各点光强的差别较大, 仍有一部分融入背景散斑中, GSW 算法调制的聚焦效果最好, 几乎可分辨出所有的点。由于散斑光场存在相关性, 一个焦点并不只是一个像素点, 而是具有一定的尺寸, 在本实验中, 单个焦点实际尺寸大约为  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 。图 8 为相位共轭法、MSO、GSW 算法调制的聚焦光强分布与目标相关系数的变化曲线, 可以看出: 随着焦点数量逐渐增加, 三种方式聚焦效果也随之下降; 但 GSW 算法聚焦的相关系数几乎始终高于 MSO 与相位共轭方法。因此基于以上实验结果可以看出, 相比于相位共轭法和 MSO, GSW 算法可以分辨出更多的焦点, 极大提高了多点聚焦的均匀性。

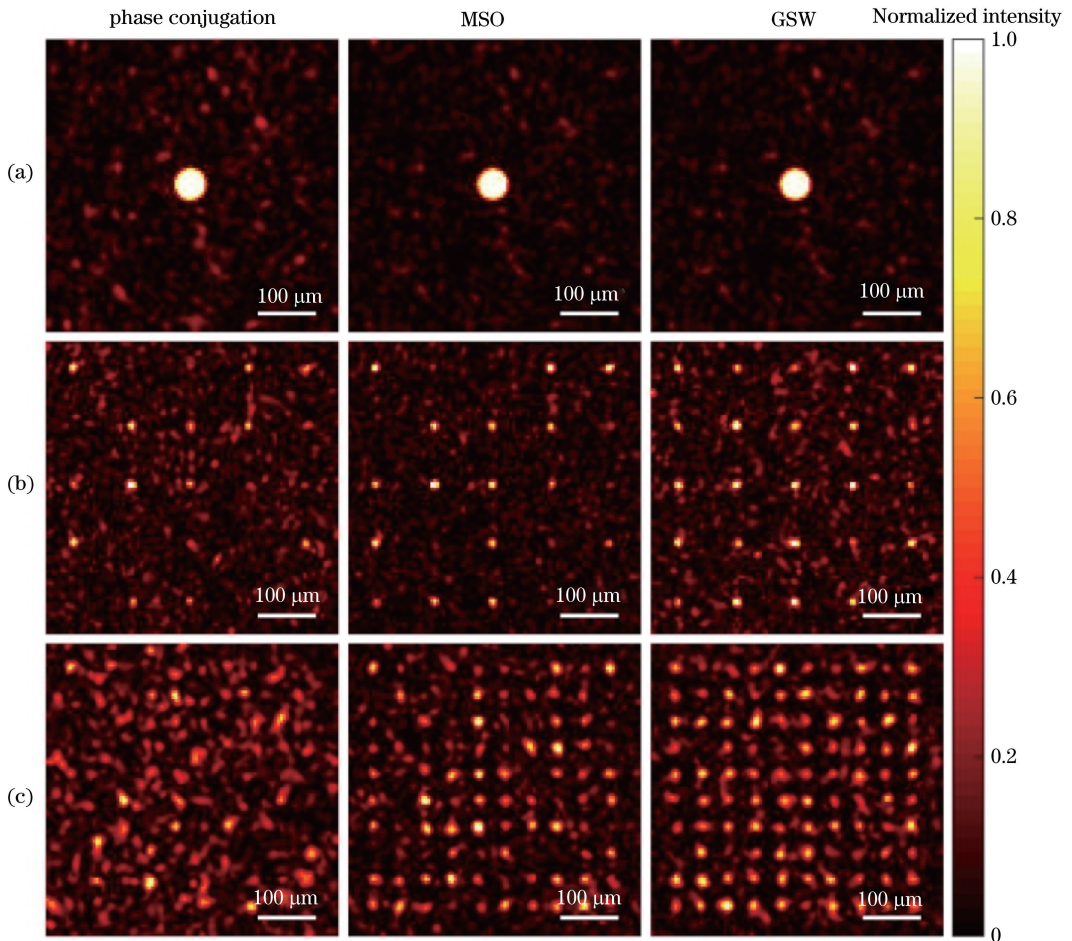


图 7 单点与多点聚焦的实验结果。(a)单焦点;(b) 25 个焦点;(c) 100 个焦点  
Fig. 7 Experimental results of the single- and multi-point focusing. (a) Single focal point;  
(b) 25 focal points; (c) 100 focal points

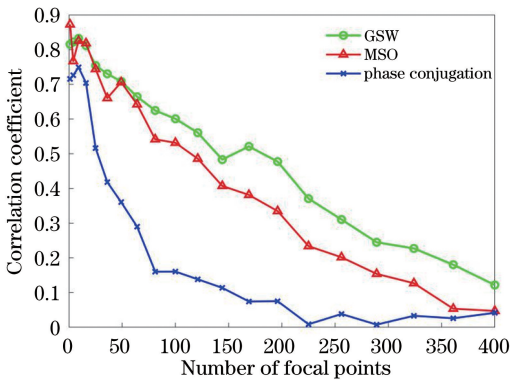


图 8 相关系数随焦点数量的变化曲线

Fig. 8 Change curves of correlation coefficient with number of focal points

将字母掩模作为聚焦目标来验证 GSW 算法的

聚焦均匀性。分别以字母掩模“T”，“N”和“J”为目标，基于 GSW 算法调制的聚焦效果如图 9 所示，可以看出，目标光强分布均匀，基本保持了字母的形状，同时背景散斑光强也较低。图 10 是以字母掩模“H”为目标，分别基于相位共轭法、MSO、GSW 算法调制的聚焦效果图。可以看出：经 MSO 调制后，背景光强更低一些，但与相位共轭法一样存在聚焦的字母图案光强不够均匀、有断点的情况；GSW 算法得到的聚焦图案比较均匀，几乎没有断点，显示效果最好。对多点和字母掩模进行聚焦的实验结果表明，GSW 算法减小了相位共轭法和 MSO 引起的误差，缓解了 SLM 仅能调制相位的功能限制，提高了聚焦图案的光强均匀性和准确性。

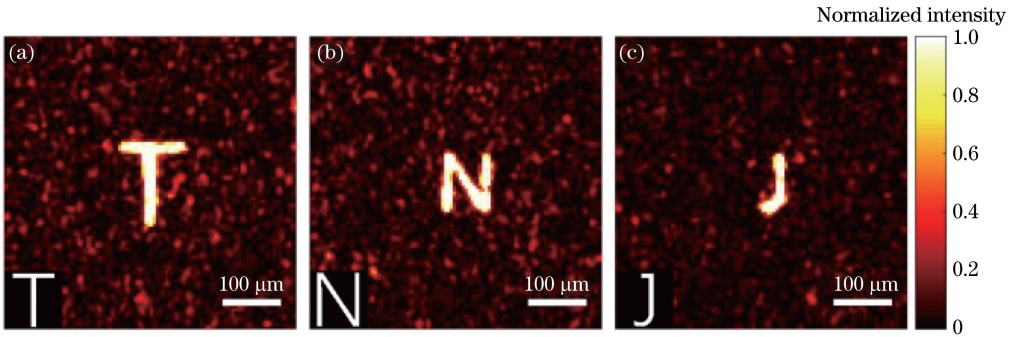


图 9 GSW 算法对字母掩模聚焦的实验结果。(a) “T”；(b) “N”；(c) “J”

Fig. 9 Experimental results of the GSW algorithm focusing on letter masks. (a) “T”；(b) “N”；(c) “J”

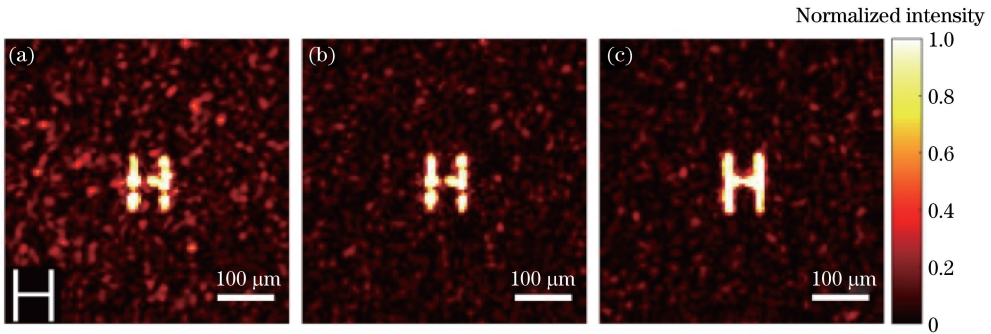


图 10 对字母掩模“H”聚焦的实验结果。(a) 相位共轭法；(b) MSO；(c) GSW 算法

Fig. 10 Experimental results of focusing on the letter mask “H”. (a) Phase conjugation；(b) MSO；(c) GSW algorithm

## 4 讨 论

用实验证明相比相位共轭法、MSO，GSW 算法对多点和字母掩模具有更好的聚焦效果。虽然 GSW 算法的迭代会快速收敛，但入射光场的初始相位是随机估计的，因此迭代结果会存在一定偶然性。因为 GSW 算法利用了 MSO，可以肯定的是，最终调制结果一定优于单纯 MSO 调制的效果，虽然如

此，但实验的聚焦效果与目标仍有一定的差距。如图 10 中基于 GSW 算法调制的结果，聚焦图案的边缘并不是完全齐整的，存在一些瑕疵。可能有几个原因：1) 测量传输矩阵时存在噪声，包括激光强度涨落、散射介质晃动、相机拍摄噪声等，都会使测量的传输矩阵存在一定误差，导致迭代求解的调制相位仍有一定偏差，选取更稳定的激光和相机，减少测量时间，在一定程度上将减小介质抖动对实验的影响；

2)SLM 的调制像元、相机探测像元数量和尺寸是有限的,并不能实现对光场的完全调控和探测,有相关文献对传输矩阵的采样频率进行了研究<sup>[17]</sup>;3)散斑存在相关性,散斑粒都有一定的大小,一个输出光场的强度会影响周围光场的强度,导致不能完全控制单个输出通道,可以通过进一步改进传输矩阵来控制输出散斑粒的大小<sup>[18]</sup>,提高对光场的控制能力。

## 5 结 论

在散射介质光学传输矩阵的基础上,提出了一种采用 GSW 算法对多点目标进行迭代聚焦的方法。分析了基于传输矩阵的相位共轭法通过散射介质的聚焦误差产生原因,结合 MSO 和 GSW 算法优化聚焦效果。通过仿真和实验证明这种迭代方法对多点和字母掩模的聚焦效果均优于相位共轭法和 MSO,聚焦光强的均匀性和相关性均得到提高。GSW 算法的迭代求解过程均在计算机上进行,无需在 SLM 上迭代调制,只需 10 次左右的迭代就可得到较好的结果。所提迭代聚焦方法实现了对散射光场更加精确的调制,在光场能量调控、光学镊子等领域具有重要的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Yang H, Huang Y H, Gong C M, et al. Advances on techniques of breaking diffraction limitation using scattering medium[J]. Chinese Optics, 2014, 7(1): 1-25.  
杨虹, 黄远辉, 龚昌妹, 等. 散射介质超衍射极限技术研究进展[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 1-25.
- [2] Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. Optics Letters, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [3] Cui M, Yang C. Implementation of a digital optical phase conjugation system and its application to study the robustness of turbidity suppression by phase conjugation[J]. Optics Express, 2010, 18(4): 3444-3455.
- [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. Phase control algorithms for focusing light through turbid media [J]. Optics Communications, 2008, 281(11): 3071-3080.

- [6] 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.
- [7] Fang L J, Zuo H Y, Yang Z G, et al. Particle swarm optimization to focus coherent light through disordered media[J]. Applied Physics B, 2018, 124(8): 155.
- [8] Yaqoob Z, Psaltis D, Feld M S, et al. Optical phase conjugation for turbidity suppression in biological samples[J]. Nature Photonics, 2008, 2(2): 110-115.
- [9] Popoff S M, Lerosey G, Fink M, et al. Controlling light through optical disordered media: transmission matrix approach[J]. New Journal of Physics, 2011, 13(12): 123021.
- [10] Popoff S, Lerosey G, Fink M, et al. Image transmission through an opaque material[J]. Nature Communications, 2010, 1: 81.
- [11] Loterie D, Farahi S, Papadopoulos I, et al. Digital confocal microscopy through a multimode fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(18): 23845-23858.
- [12] Shao X P, Wu T F, Gong C M. Simulation on light refocusing through a highly scattering turbid medium using circular Gaussian distribution model [J]. Optical Engineering, 2013, 52(11): 113104.
- [13] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. Applied Optics, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [14] Di Leonardo R, Ianni F, Ruocco G. Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays[J]. Optics Express, 2007, 15(4): 1913-1922.
- [15] Bianchi S, Di Leonardo R. A multi-mode fiber probe for holographic micromanipulation and microscopy [J]. Lab on a Chip, 2012, 12(3): 635-639.
- [16] Zhan L, Liu D A, Yang A H, et al. Fast compensation for arbitrary focusing through scattering media[J]. Applied Optics, 2019, 58(10): 2624-2629.
- [17] Shen Y C, Liu Y, Ma C, et al. Sub-Nyquist sampling boosts targeted light transport through opaque scattering media[J]. Optica, 2017, 4(1): 97-102.
- [18] Boniface A, Mounaix M, Blochet B, et al. Transmission-matrix-based point-spread-function engineering through a complex medium[J]. Optics, 2017, 4(1): 54-59.