

光通过散射介质聚焦的空间位相 逐个单元调节方法*

方龙杰 张熙程 张 诚 左浩毅 朱建华 高福华 庞 霖**

(四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

摘要 本研究在分析现有散射介质聚焦方法的基础上, 提出一种利用单元裂解进行波前位相调制, 将经过强散射介质的散射光聚焦的快速收敛方法. 文中详细地描述了这一新方法的原理, 并同现有逐个单元调节方法进行运行对比. 单元裂解方法的物理本质, 即为实现空间光调制器的调制各单元光波之间同位相干涉. 本方法具有更高的信噪比, 并且聚焦收敛的速度快. 这一新方法为进一步开展生物成像的光学理论研究提供了新思路.

关键词 空间光调制器, 聚焦, 干涉, 散射介质

学科分类号 Q6

DOI: 10.16476/j.pibb.2017.0319

脑成像(brain imaging)技术是生物医学领域一项非常重要的技术, 其广泛应用于医学临床实践, 对确定受疾病影响的定位、诊断人脑内部的疾病起着十分关键的作用. 现有的脑成像方法主要有脑电图^[1]、脑磁图^[2]、核磁共振成像^[3-6]、光学散射成像^[7]. 脑电图是将人脑的自发性生物电位放大记录获得的图像, 是检测大脑疾病的一种有效方法; 脑磁图是通过测量颅脑中极微弱的脑磁波并且记录下来, 能够准确诊断多种疾病; 核磁共振成像方法利用核磁共振对人体采集信号并给出二维或三维图像. 光学散射成像方法较以上方法具有分辨率高、设备要求简单的优点, 但由于光学信号在生物组织中会强烈散射, 成像深度极为有限. 其原因就是入射光的波前在经过散射介质之后随机化, 在散射介质后面接收到的是一系列的散斑, 难以实现对光经过散射介质后进行聚焦, 从而不能实现高分辨荧光成像. 就散射强度而言, 散射介质可以分为两大类: 弱散射和强散射^[8]. 大气层就是弱散射介质应用示例. 由于大气的不均匀分布和大气湍流形成折射率的非均匀性分布会对来自星系光的波面产生整形, 从而引起成像像差. 其矫正方法为自适应光学法^[9], 即通过波面矫正的方法从一定程度上消除像

差, 从而实现清晰成像的目的. 然而, 强散射对应的散射介质主要为大量固体无序材料以及生物组织, 由于介质内部的分子具有随机分布, 对所经过光的位相改变作用同样具有随机性. 根据惠更斯原理, 透射光可认为各个具有不同位相的子波源在介质后成像点的相干叠加, 各个子波源的位相具有随机性, 因此相干叠加的结果是在介质后成像面形成一系列散斑, 从而无法得到清晰成像. 为此, 近年来人们提出了许多通过强散射介质成像(即聚焦)的方法. Vellekoop^[10]最早提出利用空间光调制器(spatial light modulator, SLM)通过逐个调节各个像素的位相方法, 利用位相补偿实现了相干光通过强散射介质聚焦. 随后, 基于 SLM 的位相调制作用, 有几种寻找优化位相分布方法相继被提出. 这些算法主要分为两大类: 单个元素调制方法和整体调制方法. 单个元素调制方法即对每一个 SLM 像素分别寻找优化位相, 例如 Vellekoop 提出的逐个调节

* 国家自然科学基金资助项目(61377054, 61675140).

** 通讯联系人.

Tel: 028-85412322, E-mail: panglin_p@yahoo.com

收稿日期: 2017-07-31, 接受日期: 2018-01-09

方法^[10]. 这种方法简单明了, 容易理解, 在操作上也容易实现, 取得了良好效果, 但不足之处在于需要多次迭代, 所需时间长, 信噪比弱. 整体调制方法即同时改变 SLM 上所有像素的位相值, 使其位相分布朝向聚焦的位相分布收敛, 例如分区算法^[11]、透射矩阵方法^[12]、遗传算法^[13]等. 整体调制算法由于同时改变所有 SLM 像素的位相, 所以具有信噪比高的优点^[14-19]. 不足之处在于分区算法收敛具有随机性, 收敛速度较慢^[10].

本文尝试一种取以上两种方法优点的方法——四元裂解法. 首先将 SLM 进行单元分区, 例如将 SLM 单元分为 4 个单元. 每一个 SLM 独立调制单元寻找其与其他单元相互作用对输出点的贡献后, 便形成了此层的最佳位相分布, 把这一层称为父单元层. 然后进行像细胞分裂一样的四单元分裂, 每一个单元分裂为 4 个子单元, 形成子单元层. 分裂后的 4 个子单元首先继承其父单元的位相, 并开始子单元层的优化. 各个子单元优化完成后, 各子单元便拥有最佳的位相值, 即子单元层位相分布. 子单元层优化完成后, 每个子单元再次分裂为 4 个单元, 即孙单元, 形成孙单元层. 与子单元层优化过程一样, 在保持各个孙单元继承或优化位相的前提下, 对各个孙单元进行优化, 形成孙单元层位相分布. 依此类推, 可将单元细分、优化直至 SLM 的像素单元. 这种通过 SLM 调节散射光波的波前从而实现对散射光聚焦的新方法对未来进行生物组织成像提供了一个可行的方向.

1 模型描述

1.1 弱散射模型

弱散射的特例就是大气层, 由于大气的不均匀分布和大气湍流所造成的折射率非均匀分布对波面形成变形, 从而带来像差. 其矫正方法为自适应光学法(adaptive optics, AO)^[10], 即通过波面矫正的方法从一定程度上消除像差, 从而达到使成像变得清晰的目的. 其波面矫正机制是将大气引起的波面误差由一个可变形的镜面进行实时校正, 如图 1 所示. 在天文学观测中, 一般使用卡塞格林望远镜系统观测天体. 图 1a 为假设无大气湍流的理想情况, 平面波入射进入卡塞格林望远镜系统, 其波面为平面, 通过主镜的抛物面反射和副镜的双曲面反射, 在成像面形成一个理想的焦点. 而在实际观测中, 由于大气湍流, 波面不再是平面, 由于波面破坏而

产生畸变, 最终所有的光线不是在同一地方聚焦, 会使得成像不清晰, 如图 1b 所示. 为此, 利用 AO 方法, 将可变形镜面放在卡塞格林望远镜的抛物面反射镜面上, 通过调节改变镜面的形状对波前进行校正, 使校正之后的光波前重新恢复平面波的形式, 进入望远镜系统后在像面会聚成为一个焦点, 如图 1c 所示.

由于大气在实时变化, 因此, 可变形镜面的变形频率要求很高. 波前畸变带来的像差可以用 Zernike 多项式表示:

$$\phi(x, y) - \phi_0(x, y) = \sum_{k=1}^M a_k z_k(x, y) \quad (1)$$

其中 $\phi(x, y)$ 表示由于大气弱散射作用导致波前畸变而引起的波前变化, $\phi_0(x, y)$ 为没有大气弱散射时的位相分布, 对于平面波 $\phi_0(x, y)$ 为常数. $z_k(x, y)$ 表示第 k 项 Zernike 多项式, a_k 表示第 k 项 Zernike 多项式的系数, M 表示取 M 项 Zernike 多项式. Zernike 多项式当中的每一项代表一个本征波面, 任意一种复杂的波面都可以分解成为多个本征波面的线性组合. 从(1)式可以看出, 当取 Zernike 多项式的项数越多, 即 M 越大, 校正结果会越精确. 自适应光学方法在校正弱散射介质带来的波前畸变取得了十分成功的应用, 但是对于强散射介质, 由于波前被散射介质完全破坏, 其位相具有完全的随机性, 自适应光学无法解决波前恢复问题. 而近年来, 随着空间光调制器的不断发展, 利用 SLM 进行波前整形的方法取得长足进步^[2-4].

1.2 强散射模型

平面波入射到强散射介质的前表面上, 如图 2 所示, 一部分光会在介质表面反射(图中未画出), 另一部分光进入介质层, 介质对入射光具有多层散射作用. 对于非相干光, 在接收面的光场分布即为各个散射光光强度直接相加. 而对于相干光, 由于干涉效应, 接收面的光复振幅分布为各子波源在接收面的复振幅相加, 光强度为复振幅的模数平方(图 2a). 根据惠更斯原理, 波前上的每一点可以看作是一个子波源, 各子波源的包络面即最终波的传播波前. 因此, 最终在散射样品后成像表面形成的散斑结果是各个子波在介质后表面相干叠加的结果. 强散射介质最主要的特点是散射光位相变化的随机性, 因此传统波面已不复存在, 无法利用自适应光学方法通过波面整形恢复原来的平面波形式. Vellekoop^[9]证明, 通过改变入射平面波的空间位相

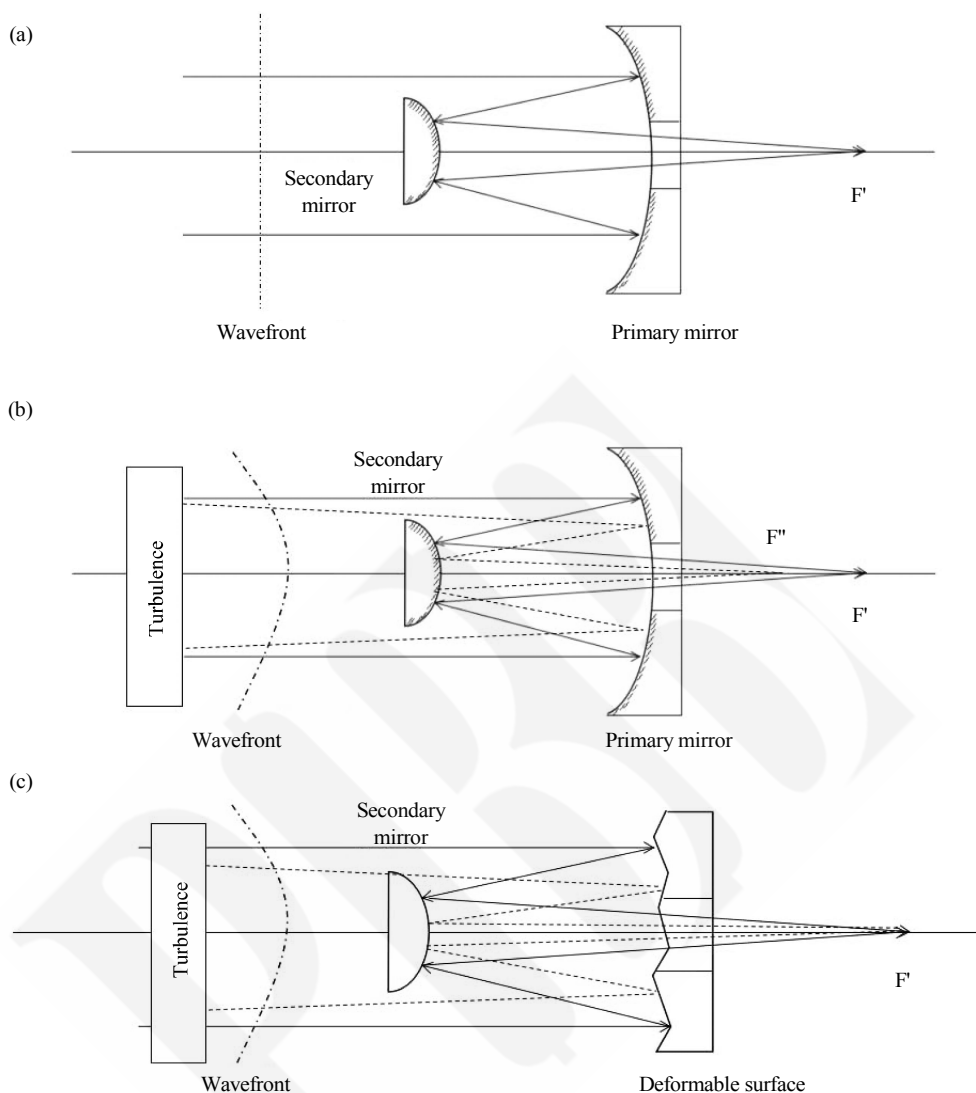


Fig. 1 The principle of adaptive optics for aberration compensation

(a) The plane wave is incident on a Cassegrain telescope and form a focus. (b) The incident light is scattered by atmosphere and form multi-foci due to aberration. (c) The incident wave propagates through the gas and weakly scattered. Then the micromachined membrane deformable mirror is used for aberration compensation.

分布, 可以使得光穿过散射介质后在样品后表面形成一个焦点, 如图 2b 所示. 其原理是光的位相补偿方法, 即散射介质使得光的位相分布具有随机性, 通过位相补偿的方法使得光在通过散射介质后的成像面(点)重新变为同相关系, 因此会在样品后表面干涉相长, 形成聚焦点.

根据统计光学原理^[12], 对于强散射介质, 入射光场与出射光场可以通过光通道模型的概念进行描述. 每一个入射通道对应入射光一个复振幅, 每一个出射通道对应一个出射光的复振幅. 本文仅讨论

SLM 的位相调制作用, 因此通道的复振幅分布即为通道的空间位相分布. 每一种散射介质唯一对应一个传输矩阵 t_{mn} , 这个矩阵将入射通道的空间位相分布与出射通道的空间位相分布联系起来:

$$E_m = \sum_n^N t_{mn} A_n e^{i\phi_n} \quad (2)$$

其中, E_m 表示第 m 个出射通道的复振幅, A_n 表示第 n 个入射通道的振幅大小, $e^{i\phi_n}$ 表示第 n 个入射通道的位相. 从(2)式可以看出, 散射样品后

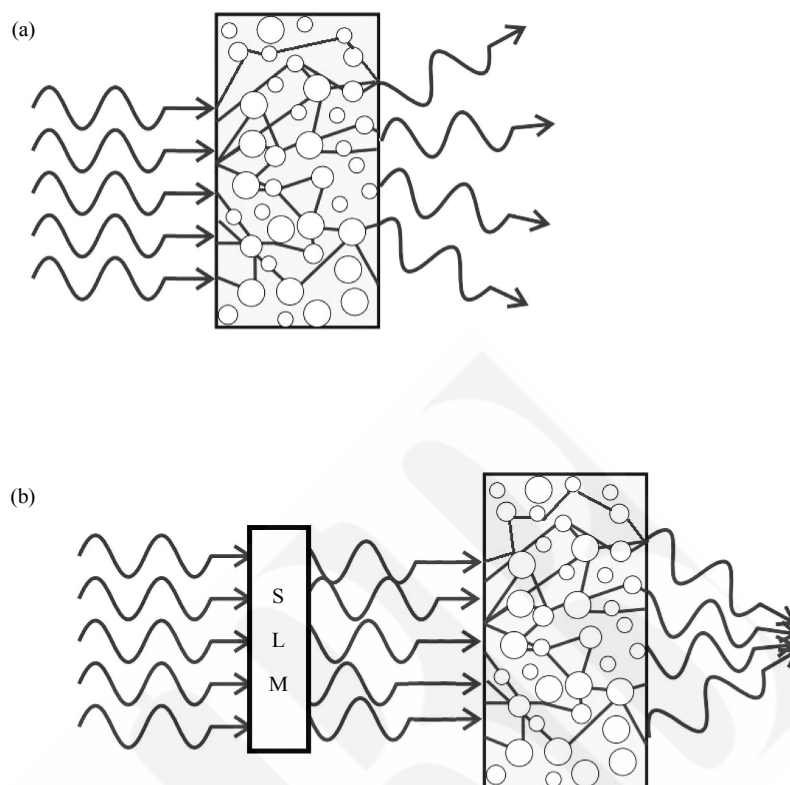


Fig. 2 The physical model of scattering medium

(a) The light is incident on the front face of scattering media and propagates through the scattering medium. The wavefront of the transmitted light is destroyed and the phase of the incident light changes sharply. (b) The wavefront of the incident light is modulated by spatial light modulator and forms a sharp focus after propagating through the scattering media.

的出射通道分布(位相分布)是各入射通道在后表面的相干叠加. 当 SLM 的单元数越多, 即 n 越大, 入射通道数即散射源越多, 根据惠更斯原理, 子波源的数目也就越多, 在样品后表面的干涉越强, 最终获得的增强倍数越大.

1.3 算法模型

基于 SLM 的位相调制作用, 算法主要分为两大类: 单个单元调制方法和整体调制方法. 单个单元调制方法即对每一个 SLM 单元(单元为 SLM 多个像素的集合)分别寻找优化位相, 例如 Vellekoop 提出的逐个调节方法^[9]. 这种方法简单明了, 容易理解, 在操作上也容易实现, 取得了良好的效果, 但不足之处在于需要多次迭代, 所需时间长. 由于是单个单元调制, 每个单元的贡献一目了然. 但是, 位相优化过程中单个单元所释出的信噪比弱, 不利于优化过程. 整体调制方法即同时改变 SLM 上的所有单元的位相值, 使得其位相分布朝向聚焦

的位相分布收敛, 例如分区算法^[11]、透射矩阵方法^[12]、遗传算法^[13]等. 整体调制算法由于同时改变所有 SLM 像素的位相, 所以具有信噪比高的优点. 不足之处在于收敛速度较慢. 单个单元的位相贡献不明确. 本文提出一种基于单元调节的方法, 不仅能够克服现有单个调节算法中收敛速度慢的问题, 而且具有整体调制算法中信噪比高的优点.

1.3.1 逐个调节算法

逐个调节算法分为两种: 单个重置 0 调制算法和单个连续算法. 单个重置 0 调制算法是指把空间光调制器的调制平面分成 N 个单元, 从第一个单元开始, 每个单元的位相从 $0 \sim 2\pi$ 循环, 找出所要聚焦的位置的光强最大值, 记录下来, 然后把这一单元的位相重置 0, 开始下一个单元的优化, 以此类推, 直到进行到最后一个单元为止. 找出所有单元的优化位相之后, 把所有单元的位相设置成为优化位相, 即可在成像面得到聚焦, 如图 3a 所示,

称作逐步序列算法(stepwise sequential algorithm, SSA). 由于每一次调制过程都将 SLM 的相应单元位相重置为 0, 所以得到的优化位相是与散斑背景干涉的结果, 而不是单元与单元之间干涉的结果, 因此需要反复多次迭代, 所需要时间较长. 随后 Vellekoop 等提出单个连续算法, 这种方法非常类似于单个重置 0 调制算法, 不同之处在于每一次优化完成之后, 把这一单元的位相值设置为优化位相

值, 再进行下一个单元的优化, 如 3b 所示, 称为连续序列算法(continuous sequential algorithm, CSA)方法. 这种方法对单个重置 0 调制算法有所改进, 在调制过程中考虑单元与已经优化的单元之间的干涉, 因此会得到更高的初始增强倍数. 但是, 最开始时优化的单元仍然是与散斑背景干涉, 因此仍然需要迭代多次.

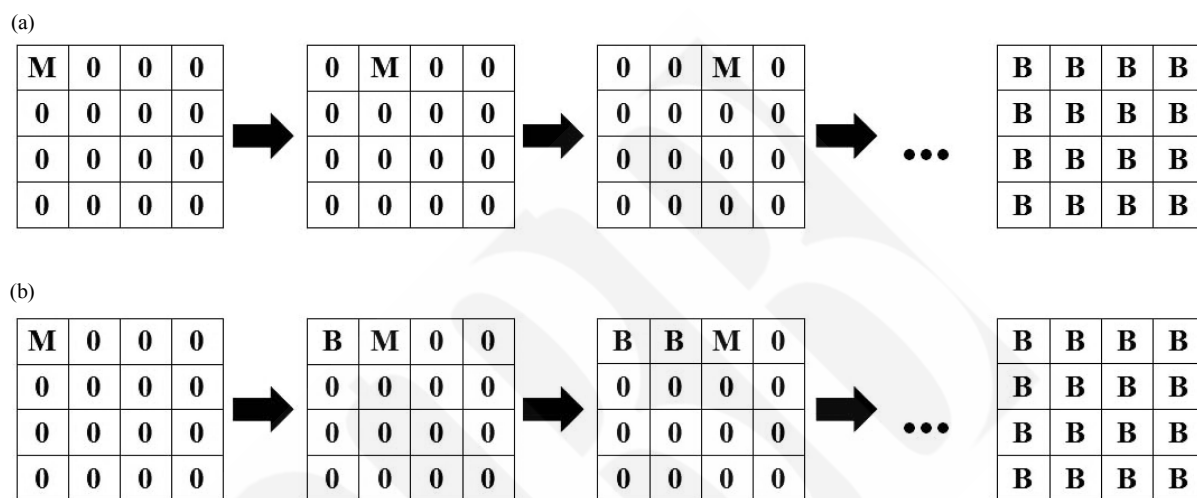


Fig. 3 Illustration to show the principles used in the single segment to focus scattered light

(a) Procedure of phase modulation of SSA. (b) Procedure of phase modulation of CSA. “M” stands for the modulation processing in which the segment modulate its optical phase from 0 to 2π ; “0” means to keep the phase on this segment as the same with the incident wave; “B” represents to set this segment the optimized phase to bring the brightest focal point.

1.3.2 四元裂解算法

a. 算法描述

SSA 及 CSA 方法中, 优化过程中单元位相调节时, 聚焦点光强监测的信噪比小, 不利于有一定噪声环境下的优化过程. 鉴于上述方法的不足, 本文提出四元裂解算法(four-element division algorithm, FEDA)以增加优化时的测量信噪比并缩短收敛时间. 本方法从整个 SLM 单元开始, 首先将其分成 4 个大单元进行位相调制, 然后逐一将每个单元又继续细分为 4 个单元, 优化过程中聚焦点所测量的信号来自所有单元及单元干涉之间的贡献, 从而解决信噪比较低及反复迭代的问题. 首先对 SLM 的 1/4 个单元进行位相优化, 如图 4a 所示. 图中写 “0” 的单元表示使这一单元与入射光的位相一致, 图中写 M(modulation)的单元表示这一单元正在进行从 $0 \sim 2\pi$ 循环, 依据所要聚焦的目标处得到最大的光强度以确定此单元对应的位相

值, 然后将此单元设置成优化位相(图 4b). 图中写 B(brightest)的单元表示把这个单元设置为优化位相. 然后用同样的方法优化剩下的 2 个单元(图 4c, d). 最后, 将所有 4 个单元得到其优化位相即得到本轮位相调制的优化位相分布, 如图 4e 所示. 显然, 本方法优势在于优化过程中直接将干涉项加入, 具有快速收敛的特点, 无需进行多重迭代. 在高信噪比测量保证的前提下, 一轮优化过程即得到实现目标处光强最大所对应的位相分布.

由于上文的步骤只采用了 4 个 SLM 单元对光场的空间分布进行调制, 而聚焦点能量与 SLM 单元数呈正比^[20], 4 个单元的调节显然无法满足测量精度的要求. 因此, 接下来将每一个单元进行四单元分裂(图 4f), 各单元首先继承上一轮调节的优化位相 B, 然后每一个 1/16 的 SLM 单元从 $0 \sim 2\pi$ 循环(图 4f 中的 M 所代表的过程), 在聚焦目标处找到最大光强度对应的位相值 b, 将此单元设置成为

这一优化位相, 随即进入第二个 1/16 单元的位相调制(图 4g), 余下的单元按照同样方法进行位相优化(图 4h, i). 图中仅仅画出第一个 1/4 单元进行四单元分裂的过程. 所有单元的优化位相全部找出

后, 即得到本轮位相调制的优化位相分布(图 4j). 然后继续将 SLM 上的单元细分, 将每 1/16 的光场调制继续进行四单元分裂, 依次类推, 直到能够独立控制的单元数量等于空间光调制器的像素个数.

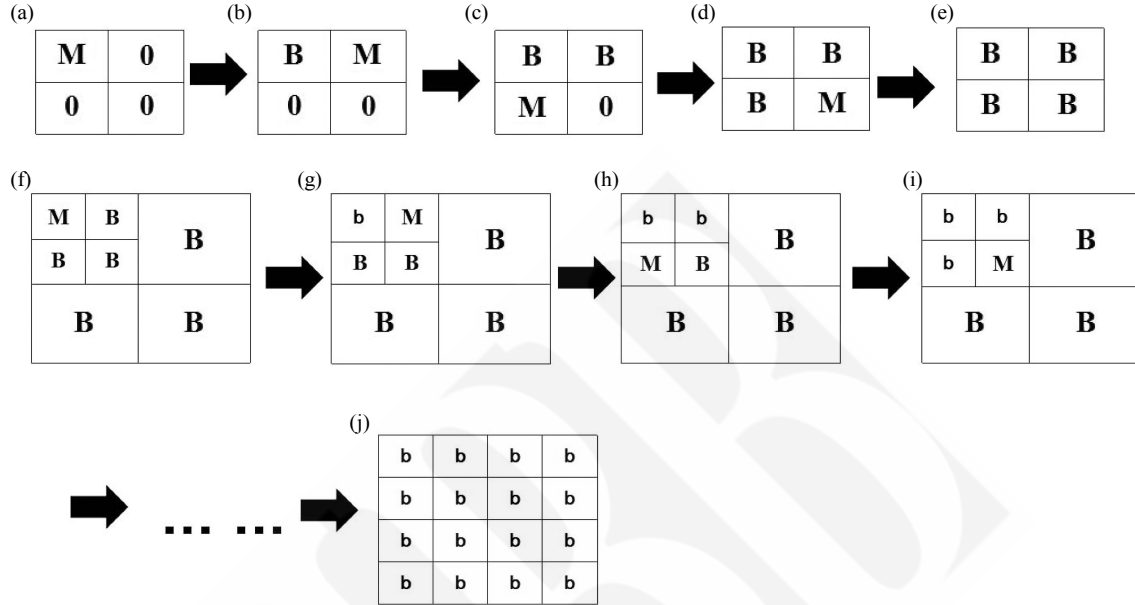


Fig. 4 Principle used in the four-element division method to focus scattered light

(a~e) Procedure of phase modulation of 4 segments. (f~j) Procedure of phase modulation of 16 segments. “M” means to modulate this segments cycling from 0 to 2π ; “0” represents to keep this part the same with the original wave; “B” means to set this segment the brightest phase of elder generation; “b” to set this segment the brightest phase of filial generation.

b. 理论分析

由于 SLM 位于光学系统入瞳面, 4 元裂解算法首先是把 SLM 分成 4 个光场, 当这 4 个光场经过光学系统缩小成像在介质的前表面, 并且穿过散射介质时, 4 个光场进行干涉, 相消相长. 设 $O(x, y)$ 为某一单元调制光波的振幅, $\phi(x, y)$ 为此光波的位相. $R_i(x, y)$ ($i=1, 2, 3$) 为另外 3 个单元光波的振幅, $\varphi_i(x, y)$ ($i=1, 2, 3$) 分别为这 3 个光波的位相. 出射场接收平面处的光强为

$$I(x, y) = \sum_{i=1}^3 |R_i(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 + 2 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 R_i(x, y) R_j(x, y) \cos[\varphi_i(x, y) - \varphi_j(x, y)] + 2 \sum_{i=1}^3 R_i(x, y) O(x, y) \cos[\varphi_i(x, y) - \phi(x, y)] \quad (3)$$

上式的第四项是正在调节的单元光与其余光波

的干涉项. 四元裂解法优化中我们考量了所有单元的贡献, 也考虑到各个单元之间的干涉贡献. 优化过程的本质是找到使焦点处光强处最大时各个单元的同相关系即最佳位相值. 同理, 当 SLM 调制单元数四元裂解至 $4n$ 个单元时, 出射场接收面的光强分布为

$$I(x, y) = \sum_{i=1}^{4n-1} |R_i(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 + 2 \sum_{i=1}^{4n-1} \sum_{j=1}^{4n-1} R_i(x, y) R_j(x, y) \cos[\varphi_i(x, y) - \varphi_j(x, y)] + 2 \sum_{i=1}^{4n-1} R_i(x, y) O(x, y) \cos[\varphi_i(x, y) - \phi(x, y)] \quad (4)$$

上式中第四项为正在调节的单元光波与其余光波的干涉项, 其中包含 $4n-1$ 项求和, 因此调制单元数越多, 干涉效应越强. 所以本文提出的新方法优越性就在于考虑了 SLM 光波前相互之间的干涉,

可以提高收敛速度, 缩短聚焦的时间.

2 实验装置及实验结果

2.1 实验装置

实验光路图如图 5 所示. 使用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器, 激光器发出的光经过平面反射镜 M 使得光的传播方向旋转 90°. 然后利用一个放大倍数为 40×, 数值孔径为 0.65 的显微物镜 O₁ 和一个焦距为 75 mm 的凸透镜 L₁ 进行空间滤波, 光经过一非偏振分束镜 BS, 照射到 SLM 上. 采用德国 HOLOEYE 公司生产的 PLUTO-TELCO 纯位相型液晶空间光调制器, 空间光调制器的像素是 1920×1080, 每一个单元的大小是边长为 8 μm 的正方形, 可在 0~2π 位相区间内加载 256 种等间距的位相. 光波经过 SLM 调制后反射, 再次进入

分束镜 BS 反射, 然后经过焦距为 300 mm 的透镜 L₂ 和焦距为 100 mm 的透镜 L₃, 使 SLM 面成像于显微物镜 O₂ 的入射光阑处. 经过 L₃ 透镜出射的光波射入一个放大倍数为 10×, 数值孔径为 0.25 的显微物镜 O₂, 然后将样品 S(所使用的样品是毛玻璃, 厚度为 2 mm, 单面磨砂)的前表面放在显微物镜 O₂ 的后焦面上. 样品 S 的前表面为磨砂面. 在样品 S 后放置一个放大倍数为 20×, 数值孔径为 0.4 的显微物镜 O₃, 将散射介质的后表面成像于 CCD 上. 所使用的 CCD 是由美国 THORLABS 生产的 CCD, 具有高分辨率 1360×1024 单元, 自动曝光时间从 20 μs 至 1 s, 增益控制从 1× 至 16×. 将 CCD 接收到的信号输入计算机, 即可从计算机读出 SLM 的调制效果.

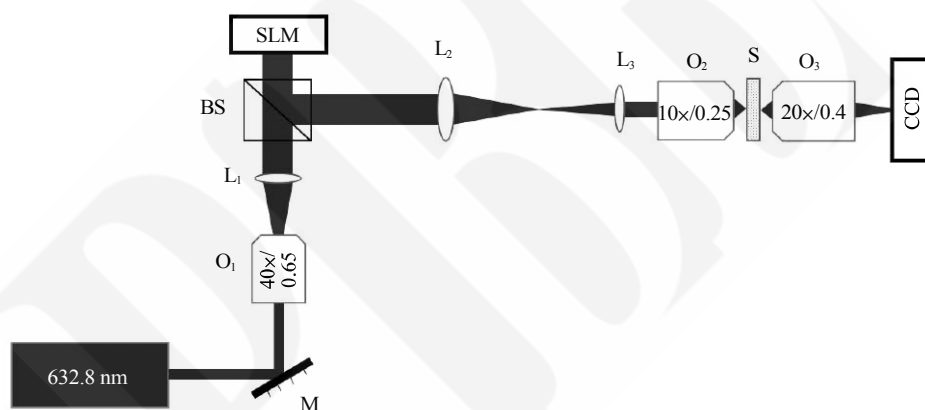


Fig. 5 Optical scheme of the apparatus

A 632.8 nm He-Ne laser beam is expanded and reflected off a Holoeye liquid crystal SLM. The SLM is imaged onto the exit pupil of the objective. The shaped wavefront is focused on the strongly scattering sample (ground glass) and a CCD camera images the transmitted intensity pattern by another microscope objective. M: Mirror; O₁, O₂ and O₃: Microscope objectives; L₁, L₂ and L₃: Lenses; BS: 50% non-polarizing beam splitter; SLM: Spatial light modulator; S: Sample; CCD: Charged couple device.

2.2 实验结果

本实验选择 CCD 的观察区域是 1800 μm × 1600 μm. 按照第 2 节所描述的调节步骤, 选出 SLM 2 × 2, 4 × 4, 8 × 8 单元的优化位相分布. 然后分别加载优化后的位相分布, 测量计算目标处 (135 μm × 135 μm 区域, 此面积区域为一个散斑点的大小) 增强倍数, 其定义为 SLM 加载最终优化位相分布后目标处 (即所聚焦的地方) 光强与入射光强的能量积分之比,

$$\eta = \frac{I_{\text{opt}}}{I_0} \quad (5)$$

其中 η 表示增强倍数, I_{opt} 表示目标处的光强, I_0 表示没有加载位相分布的光强. 实验结果如表 1 所示, 总共进行了 4 次实验进行对比.

表 1 中, 第一列为实验方式, “Initiation” 表示入射波保持为平面波进入散射介质. “2×2 of first modulation” 表示 4 个 SLM 独立调制单元分别从 0~2π 循环, 其余单元的位相与原入射平面波保持不变, 寻找最优的位相分布, 在调制过程中逐渐加入干涉项 (图 6a). 为了研究位相调制单元之间相互作用的大小对最终优化位相分布的贡献, 对 2×2 单元调制进行四次迭代. “2×2 with an

optimized area”表示 2×2 个 SLM 独立调制单元分别从 $0 \sim 2\pi$ 循环, 在调制过程中其余单元继承 1 个上一次调节的最大光强对应的位相 **B**, 剩下的 3 个单元位相设为上一次调节的最小光强对应的位相 **D**. Neighbor 表示所选择继承上一次调节的最大光强的 SLM 单元与正在位相调制的单元为相邻的关系(图 6b); diagonal 表示所继承上一次调节最大光强的 SLM 单元与正在进行位相调制单元为对角线关系(图 6c). “ 2×2 with 2 optimized areas”表示在调制过程中其余 SLM 单元继承 2 个上一次的最大的

光强对应的位相 **B**, 剩下的 1 个单元位相设为上一次调节的最小光强对应的位相 **D**(图 6d). “ 2×2 with 3 optimized areas”表示在调制过程中其余 SLM 单元继承 3 个上一次的最大的光强对应的位相 **B**(图 6e). “ 4×4 with 1 optimized areas”、“ 4×4 with 2 optimized areas”、“ 4×4 with 3 optimized areas”、“ 8×8 with 4 optimized areas”、“ 8×8 with 8 optimized areas”、“ 8×8 with 15 optimized areas”的含义以此类推. 表 1 中第 2~5 列为 4 次实验的增强倍数实验数据结果.

Table 1 Comparison of focusing effect with different types of pixels of SLM and different set-up method

Method of experiment	Intensification factor of the first experiment	Intensification factor of the second experiment	Intensification factor of the third experiment	Intensification factor of the fourth experiment
1. Initiation	1	1	1	1
2. 2×2 of first modulation	3.4186	4.7942	4.2422	2.0534
3. 2×2 with a optimized area (neighbor)	3.1028	4.8353	4.3678	2.2631
4. 2×2 with a optimized area (diagonal)	2.9252	4.6124	4.4123	2.2474
5. 2×2 with 2 optimized areas	5.3795	5.3127	5.9994	5.7546
6. 2×2 with 3 optimized areas	6.4451	5.8656	6.3759	6.9566
7. 4×4 with an optimized area (neighbor)	9.9318	10.5828	9.7334	8.5091
8. 4×4 with an optimized area (diagonal)	9.7226	10.6833	10.04	8.0161
9. 4×4 with 2 optimized areas	11.0744	12.9334	13.8903	9.4442
10. 4×4 with 3 optimized areas	11.4627	14.5155	15.1197	9.8121
11. 8×8 with 4 optimized areas	14.3046	17.9901	18.2379	11.621
12. 8×8 with 8 optimized areas	17.0196	18.6085	19.823	12.4344
13. 8×8 with 15 optimized areas	18.3584	20.214	22.1371	13.9159

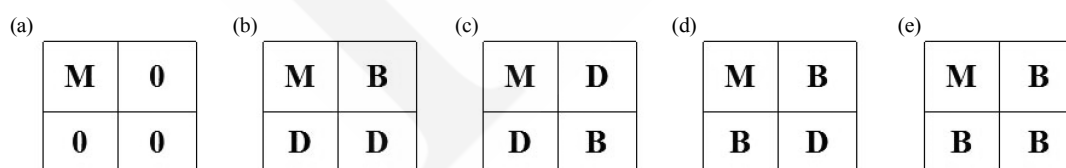


Fig. 6 Procedure of the study of the interference between segment to segment

(a) 2×2 of first modulation. (b) 2×2 with a optimized area (neighbor). (c) 2×2 with a optimized area (diagonal). (d) 2×2 with 2 optimized areas. (e) 2×2 with 3 optimized areas. “**M**” to cycle the phase of this segment from 0 to 2π and find optimal phase. “**B**” to set this segment the optimized phase of elder generation. “**D**” to set this segment the inferior phase of elder generation. “**0**” to set this segment the same phase with incident wavefront.

将表 1 中每一个数据除以其所在列中的最大值, 然后 4 次实验结果进行平均, 得到的数据作出函数关系图, 如图 7 蓝色曲线所示. 图中的误差线为均方差的计算结果. 其中横坐标的数字与表 1 中的实验方式对应, 其单元数由 $2 \times 2 = 4$ 逐渐增加至 $8 \times 8 = 64$, 并且相同的单元数当中讨论了设置不同优化位相的单元个数的情形, 纵坐标代表归一化之

后的增强倍数. 从图 7 中可以清晰地看到, 当 SLM 单元个数相同时, 2 个设置为优化位相的增强倍数大于 1 个设置为优化位相的增强倍数, 3 个设置为优化位相的增强倍数大于 2 个设置为优化位相的增强倍数, 并且优化位相设置为与正在调制的单元是相邻还是相对关系不大. 当 SLM 单元个数不同时, SLM 单元个数越多, 增强倍数越大. 所以,

考虑单元间干涉效应越强烈, 目标处的聚焦效果越好. 实验中, 出现下降的点对应的实验方式是相同的单元数, 设置相邻 SLM 调制单元为优化位相与设置相对单元为优化位相. 而从相邻与相对的单元发出的光最终都会被会聚到样品的前表面上, 这对于干涉的贡献都是相同的, 因此从理论上来说, 相邻与相对得到的实验结果应该是完全相同的. 实验中所得到的数据起伏是由于实验测量的随机误差造成的.

在 CCD 接收平面上, 目标处的信号强度既包含有各个单元单独的贡献, 同时也包含各个元素之间相互干涉的贡献. 相互作用的贡献可以由总的目标处信号强度减去各个单元单独的贡献得到, 即相互作用的贡献 $I_{\text{inter}}(x, y)$ 为公式(4)中的干涉项, 可以表示为

$$I_{\text{inter}}(x, y) = 2 \sum_{i=1}^{4k-1} \sum_{j=1}^{4k-1} R_i(x, y) R_j(x, y) \cos[\varphi_i(x, y) - \varphi_j(x, y)] + 2 \sum_{i=1}^{4k-1} R_i(x, y) O(x, y) \cos[\varphi_i(x, y) - \phi(x, y)] \quad (6)$$

利用每一次优化位相分布的位相值, 代入(6)式计算干涉的贡献, 作图, 如图 7 红色曲线所示. 其中横坐标的实验方式与表 1 中的实验方式一一对应, 其单元数由 $2 \times 2 = 4$ 逐渐增加至 $8 \times 8 = 4096$, 并且除去起始时的情形. 纵坐标代表相互作用的贡献 $I_{\text{inter}}(x, y)$, 图中的误差线为 4 组实验均方差的计算结果. 从图中不难发现, 设置的 SLM 为最大光强的单元越多, 干涉效应越强. 分析公式(6)可知,

SLM 单元从 $k-1$ 个增加到 k 个时, 公式(6)右边将增加 $2k$ 个干涉项. 并且还可以发现, 增加 SLM 单元个数时, 干涉贡献有一个明显的跳跃. 因为将 SLM 单元数四单元分裂时, 单元数增加 4 倍, 公式(6)中求和符号里面的项数增加 $8k$ 项.

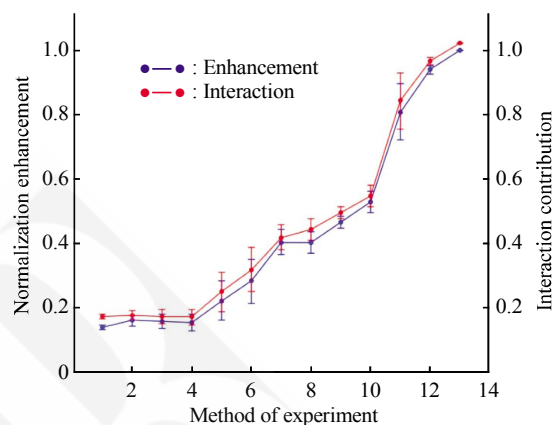


Fig. 7 Comparison of focusing enhancement and interaction between the segments with different types of pixels of SLM and different set-up method after standardization and averaging

The number of segments are 4, 8, 16 and 64, respectively. The methods of the experiment correspond to the methods in Table 1 and discuss the influence of different interference effect of the same number of segments. The enhancement is normalized and the experimental uncertainty is of the order of the error bars with 4 times of experiment.

图 8 给出了表 1 第三列数据中 SLM 8×8 单元 CCD 观察到的图像和 SLM 加载的位相分布. 图 8a, b 两图没有零位相分布的情形. 图 8c 和 d 表

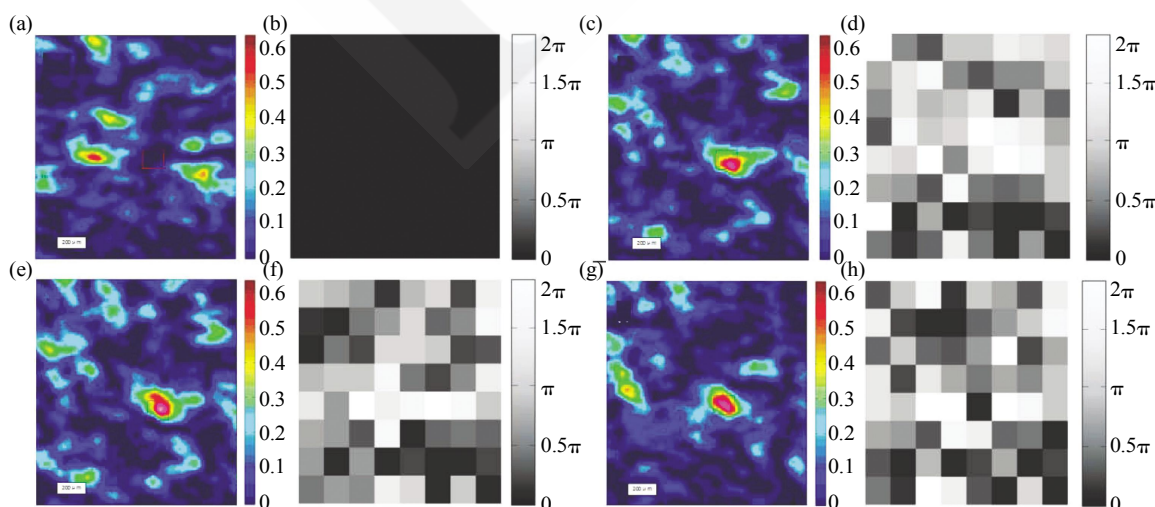


Fig. 8 Images of 8×8 pixels of SLM observed on CCD and the phase boards of SLM

(a) The result of no phase modulation. (b) The phase board of SLM of Figure (a). (c) The result modulated according to the procedure which has four optimized areas of 8×8 pixels of SLM. (d) The phase board of SLM of Figure (c). (e) The result modulated according to the procedure which has eight optimized areas of 8×8 pixels of SLM. (f) The phase board of SLM of Figure (e). (g) The result modulated according to the procedure of 8×8 pixels of SLM which all other areas are optimized. (h) The phase board of SLM of Figure (g).

示表 1 中实验方式为“ 8×8 with 4 optimized areas”对应的情形. 图 8e 和 f 表示表 1 中实验方式为“ 8×8 with 8 optimized areas”对应的情形. 图 8g 和 h 表示图 7 中横坐标为“ 8×8 with 15 optimized areas”对应的情形. 从图 8g 中可以看到, 当把 SLM 单元做到 8×8 时, 在目标处已经有较强的增强效果, 增强倍数达到 18.4, 并且聚焦处周围的背景光都变得较暗.

继续进行 4 元裂解优化, 我们进行了 $32 \times 32 =$

1024 及 $64 \times 64 = 4096$ 个 SLM 单元的位相优化(图 9). 1024 个 SLM 独立控制单元达到聚焦处光强的增强倍数为 29.4725. 4096 个 SLM 控制单元得到的聚焦处的光强增强倍数为 58.2984. 从图 9 可以看到, 当独立控制的单元数达到 4096 个时, 在 CCD 接收平面上已经能够接收到十分细锐的焦点. 所以, 如果继续细分 SLM 单元, 可以提高聚焦处的增强倍数, 进而提高聚焦效果.

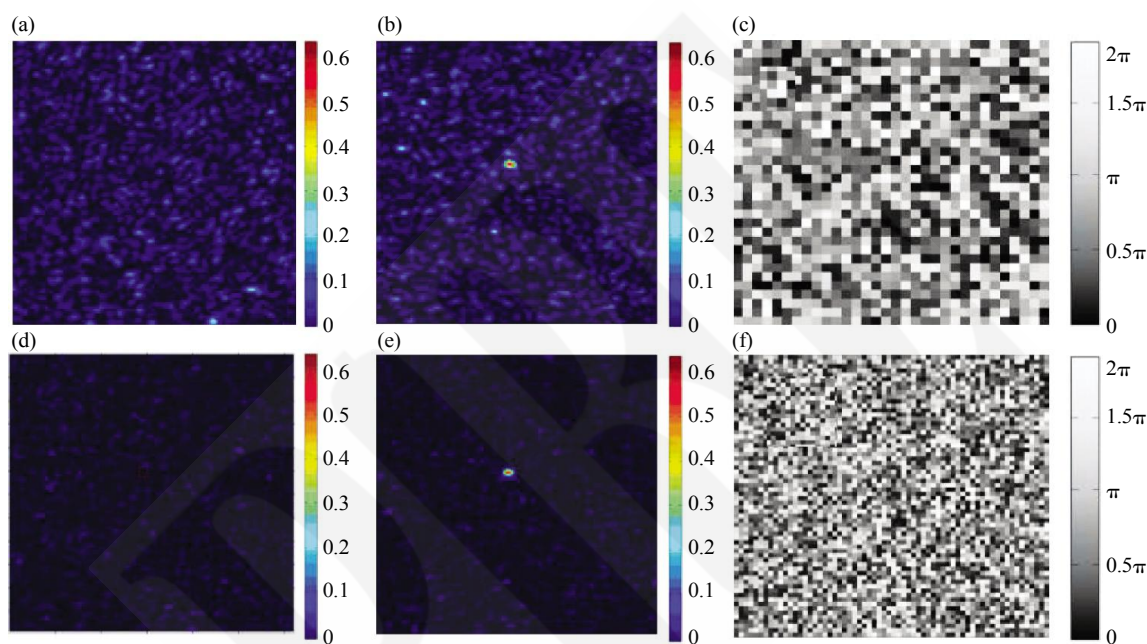


Fig. 9 The focusing results of 1024 and 4096 segments

(a) The origin speckle pattern. (b) The focusing results of 1024 segments. (c) The optimal phase distribution corresponding to Figure 9(b). (d) The origin speckle pattern. (e) The focusing results of 4096 segments. (f) The optimal phase distribution corresponding to Figure 9(e).

图 10 对比了在聚焦过程中, 所选取的聚焦处光强随着测量次数的变化曲线. 所使用的 SLM 调制单元数为 4096. 图 10a 图为利用 Vellokoop 的逐个调节方法 SSA^[7], 即从第一个单元一次调节到最后一个单元, 一个单元优化完成之后, 将其重置为 0, 然后接着调制接下来的单元. 其中横坐标表示测量次数, 即将一个单元获得一个优化位相为一次测量. 纵坐标表示聚焦点的增强倍数. 由上述讨论可知, 此方法需要多次迭代. 在实验中迭代 4 次至饱和, 图 10a 中曲线首先几乎保持不变, 因为一个单元的调制信号较弱, 当测量次数达到 4096 时, 即一轮优化完成, 所有单元都设置成为优化位相, 并且在样品后表面产生相长干涉, 此时增强倍数显

著上升. 接下来进行第二轮优化, 增强倍数有微小变化, 当第二轮优化完成时, 即测量次数为 8192 时, 增强倍数再次显著增加. 然后进行第 3、第 4 轮优化, 每一轮优化完成后, 增强倍数的上升幅度在减小, 最终达到饱和, 得到最终的增强倍数为 54.61.

图 10b 为利用 Vellekoop 的第二种逐个调节方法 CSA^[7], 此方法类似于图 10a 的方法, 区别在于优化好的 SLM 单元设置为其优化位相, 并调制下一个单元. 显然, 此方法也需要迭代至少 1 次. 在实验中迭代了 4 次至饱和, 由于各个单元是连续地优化并设置成为优化值, 所以增强倍数也是连续地上升, 上升的速度逐渐减慢, 达到饱和, 最终所得

到的增强倍数为 56.72.

图 10c 是利用本文提出的四元裂解算法. 由上述讨论可知, 本方法无需多次迭代, 只进行一次优化, 由于本优化方法是逐渐精细 SLM 的位相分布, 所以增强倍数仍然是连续上升, 最终得到的增强倍

数为 58.4. 从三个图的对比不难看出, 利用 3 种方法可以最终得到相同的增强效果, 但是本文提出的四元裂解算法所需要的时间最短, 因此本方法具有收敛速度快的特点.

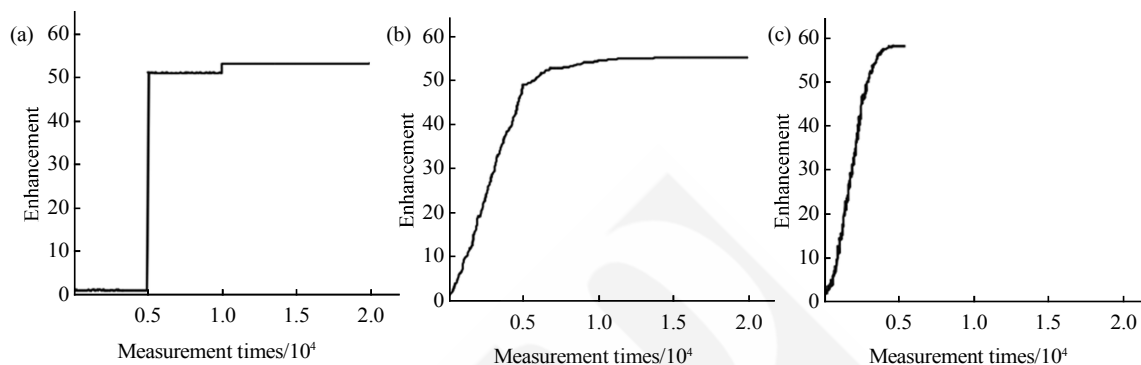


Fig. 10 Comparison of the experimental enhancement with respect to measurement times when segment number $N=4096$

(a) Stepwise sequential algorithm. (b) Continuous sequential algorithm. (c) Four-element division algorithm.

图 11 展示了利用单个重置 0 调制算法 SSA、单个连续算法 CSA 和本文提出的四元裂解算法 FDA 得到的 CCD 上的聚焦效果图. 图 11a 是聚焦之前的散斑图, 图 11b 是优化前 SLM 的位相分布 (均为 0 位相). 图 11c 是利用单个重置 0 调制算法得到的聚焦效果, 其中优化过程迭代了 4 次至饱和, 图 11d 是其 SLM 对应的优化位相分布. 图 11e 是利用单个连续调制算法得到的聚焦效果, 其

中优化过程迭代了 4 次至饱和, 图 11f 是其对应 SLM 的优化位相分布. 图 11g 是利用四元裂解算法得到的聚焦效果, 图 11h 是其 SLM 对应的优化位相分布. 从图 11 可以看到, 利用三种基于元素调制的算法均可以使最终的增强倍数达到相同的值并且在 CCD 上获得尖锐的聚焦效果, 但是四元裂解算法由于无需迭代所使用的时间最短, 证明了四元裂解算法具有聚焦收敛速度快的优点.

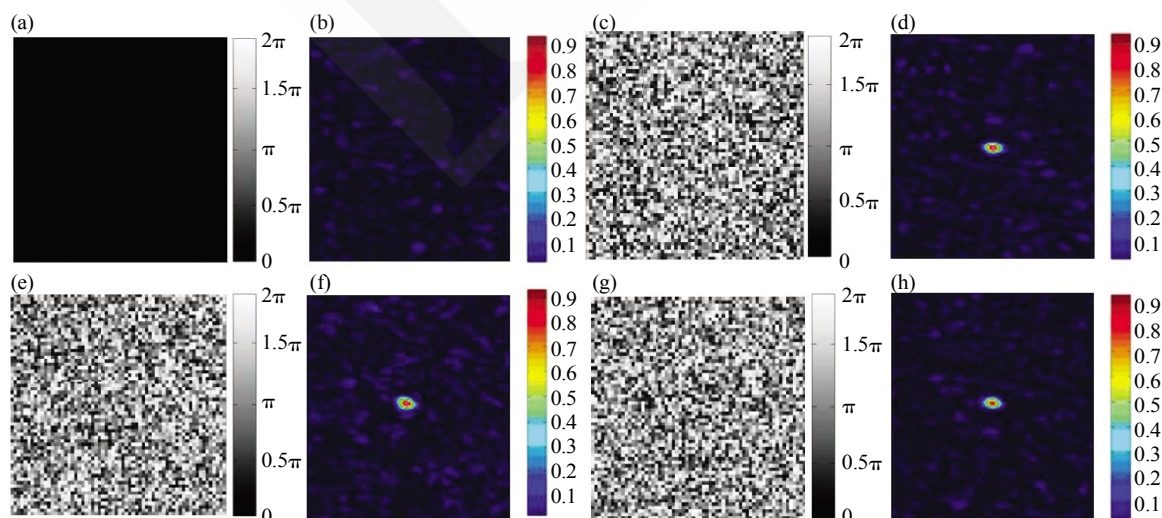


Fig. 11 The optimized phase distribution and transmission images by wavefront shaping

(a) The phase distribution of plane wave. (b) The transmission image through the sample with plane waves. (c) The modulated phase distribution using stepwise sequential algorithm (after iteration of four times). (d) The focusing on CCD using stepwise sequential algorithm. (e) The modulated phase distribution using continuous sequential algorithm (after four time iterations). (f) The focusing on CCD using continuous sequential algorithm. (g) The modulated phase distribution using four-element division algorithm. (h) The focusing on CCD using four-element division algorithm.

从图 11 得知, 三种算法最终均得到了相同的聚焦效果. 为进一步探究优化位相分布与聚焦结果的关系, 将三种算法得到的优化位相分布进行统计处理. 将 $0 \sim 2\pi$ 区间等分成 20 等分, 分别统计三种算法的优化位相分布中, 各个区间中位相的数量, 得到的结果如图 12 所示. 图中横坐标表示位相区间的序号, 其中 ‘1’ 代表 $0 \sim 0.1\pi$, 2 代表 $0.1 \sim 0.2\pi$, 3 代表 $0.2 \sim 0.3\pi$, ..., 20 代表 $1.9 \sim 2\pi$. 纵坐标表示各个区间中位相的个数. 其中 “●—●” 代表重置 0 的逐个调节算法, “▲—▲” 代表不重置 0 的逐个调节算法, “▶—▶” 代表四元裂解算法. 从图 12 可以发现, 三种算法得到的位相分布具有相同的变化趋势, 说明三种算法得到相同的聚焦结果.

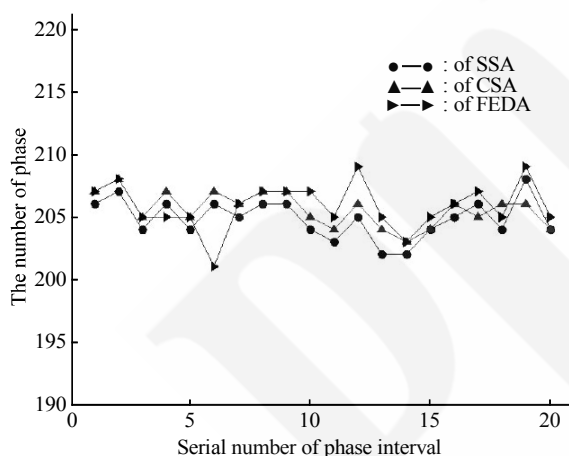


Fig. 12 The number of phase in different phase ranges of the optimized phase distributions from the stepwise sequential algorithm (SSA), continuous sequential algorithm (CSA), and four-element division algorithm (FEDA)

The abscissa is serial number of phase interval, which 1 means $0 \sim 0.1\pi$, 2 means $0.1 \sim 0.2\pi$, 3 means $0.2 \sim 0.3\pi$, ..., 20 means $1.9 \sim 2\pi$.

3 讨 论

本文提出四元裂解法, 保证在 SLM 位相优化的初期时散射斑在强烈随机背景噪声下, 对入射波能量完全考量, 位相调制时输出场的探测信噪比高, 从而快速优化 SLM 单元位相分布. 例如, 最初 2×2 单元优化时, 单元的面积占整个波面的 $1/4$, 因此, 单元优化时, $1/4$ 波面的位相变化能够引起出射场的显著变化. 这就避免了大数量单元优化时, 由于单元面积占波面的比例很小, 其位相变

化对输出场聚焦处的影响很小, 如此低信噪比探测较难捕获单元在位相变化时对输出的影响. 这也是 Vellekoop 在进行单元位相优化时, 保持其他单元的影响为最小, 即保持其他单元与入射平面波的位相保持不变, 以提高输出场被调制单元位相信号的信噪比. 显然, 该单元所优化的位相值仅考虑了本单元本身的贡献, 并没有涉及到该单元与其他单元干涉项的贡献. 而从图 5 不难看出, SLM 的调制信号在样品的前表面通过透镜会聚并散射, 各单元的调制信号会在样品的后表面产生强烈的干涉效应. Vellekoop 的方法在各单元单独优化完成后, 取各个单元的位相优化值所组成的整体位相分布. 虽然, 各个单元在输出场的干涉效应在此时加入, 但完全没有得到任何程度的优化, 因此, 进一步循环优化是必须的. 四元裂解法单元优化中, 每个单元的位相优化都是在其他单元最大贡献的基础上进行的, 因此, 各个单元及单元之间对目标输出场的贡献是同时优化的, 保证了整体单元位相优化的全局优化, 无需重复优化过程, 可迅速达到优化收敛的效果.

上面的实验结果表明, 本文提出的方法具有快速收敛的特点. 该方法是在优化的开始就考虑了干涉, 并且在优化的过程中不断加入干涉项, 所以, 无需迭代, 收敛速度较快. 当调制单元数为 $64 \times 64 = 4096$ 时, 对于 Vellekoop 提出的单个调节, 迭代两次时所需要计算的聚焦处光强数量为 81 920 幅图的光强, 而本文提出的四元裂解法仅仅需要计算的聚焦处光强数量为 54 600, 节省了 $1/3$ 的时间. 同时, 本方法从大面积单元入手进行四单元劈裂, 所以具有信噪比高的特点.

当激光入射到散射介质时, 由于各个方向的散射截面(即散射效率)不同, 依赖于散射体形状及散射体本身物理特性. 本文所使用的介质为毛玻璃, 单面磨砂, 其磨砂表面的放大示意图如图 13a 所示. 当入射光入射到磨砂表面时, 由于表面凹凸不平, 所以光会在各个凹凸面被多次散射. 而对于实际的生物介质而言(图 13b), 散射介质可分为(1)、(2)、(3)···介质层. 入射光子入射到介质前表面进入散射介质后, 经过在各个层的散射后, 从介质后表面出射. 所以, 单面磨砂的毛玻璃与生物介质散射的物理本质是相同的. 我们通过将氧化铝微米颗粒混入透明聚合物(PDMS)制成厚度达 1 mm 的体散射介质, 应用本文提出的方法, 同样得到所期待的聚焦效果.

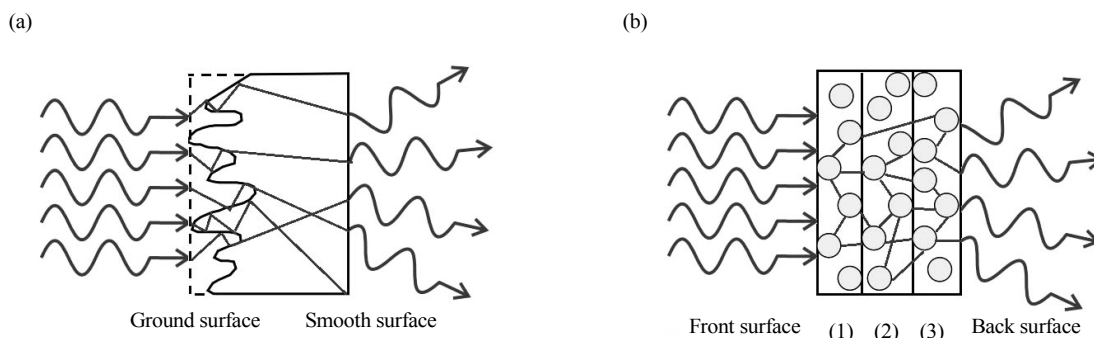


Fig. 13 The schematic of scattering using ground glass and turbid media

(a) The light propagates through ground glass. (b) The light propagates through turbid media.

在本文实验中, 将 $0 \sim 2\pi$ 范围内等分成 16 份, 即每一个 SLM 单元可以有 16 种不同的位相调制. 总共选取 4 096 个独立调制的单元进行位相优化. 从 CCD 聚焦效果看, 本实验足以证明此方案的可行性, 因为 4 096 个单元的调制增强效应效果已经达到 58.2984, 如图 11f 图所示. 依据统计理论, 目标处增强倍数 η 与能够独立控制的单元数 N 之间的关系是 $\eta = \frac{\pi}{4}(N-1)+1$, 计算得出 4 096 个单元的优化理论值应当达到 3.2172×10^3 , 与本文中的实验数值相差甚远. 其主要原因是所使用的激光器

输出功率的稳定性. 图 14 显示在所有元件保持不变的情况下, CCD 检测激光器输出强度随时间变化的曲线. 每隔 1 s 采集一幅光强分布图, 计算出的强度如图 14a 虚线所示. 利用多项式曲线拟合得到激光器输出强度变化如图 14a 实线曲线所示. 而图 14a 中实线与虚线的差值即为环境噪声, 如图 14b 所示. 计算环境噪声的相对均方差为 0.009, 显示环境噪声并不是影响本实验结果的主要因素, 激光器输出强度不稳定是本实验中增强倍数无法继续增大的主要限制因素.

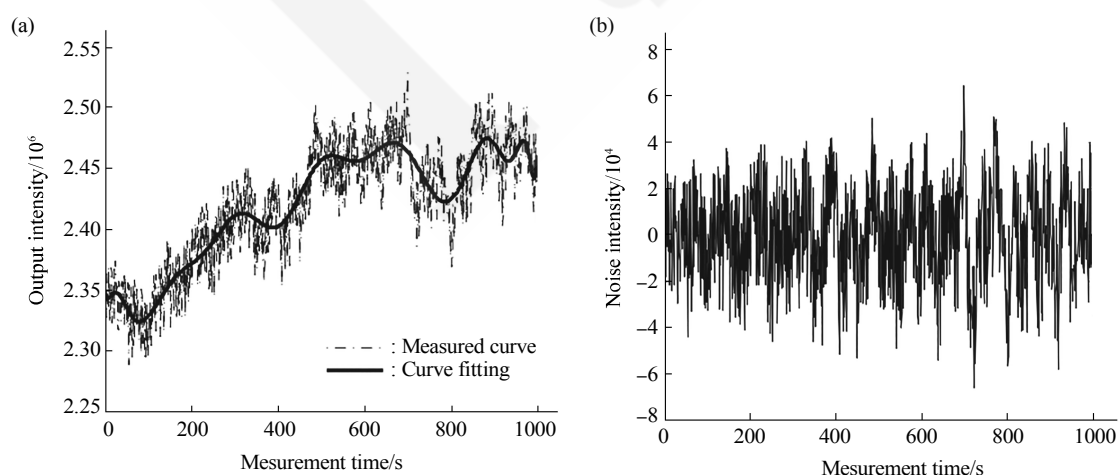


Fig. 14 The measured output intensity and calculated noise

(a) The output intensity as a function of measurement time. (b) The noise intensity as a function of measurement time.

本文设置的聚焦点区域大小为 $135 \mu\text{m} \times 135 \mu\text{m}$, 选取这一数值的原因是依据透射光场对应的一个散斑的大小而确定的. 一个散斑的大小约为 $130 \mu\text{m}$

$\times 130 \mu\text{m}$; 我们选取 20 像素 $\times$ 20 像素即 $135 \mu\text{m} \times 135 \mu\text{m}$ 作为聚焦区域设定.

由于本实验使用的 CCD 的记录频率为 1 Hz,

当单元数为 $4 \times 4 = 16$ 时需要 3 min 时间完成聚焦, 当单元数为 $8 \times 8 = 64$ 时需要 14 min 时间完成聚焦, 当调制单元数增大至 $64 \times 64 = 4\,096$ 时, 所需要的聚焦时间较长, 其原因是本实验没有完全实现自动化, CCD 不是直接由计算机读取, 而是 CCD 拍照后保存在计算机硬盘中, 利用 MATLAB 软件读取硬盘中的图片并且计算光强, 判断优化位相. 如果 CCD 直接由计算机读取, 速度会加快. 假设 CCD 的读取频率为 100 Hz, 则当调制单元数增大至 $64 \times 64 = 4\,096$ 时, 所需要的聚焦时间仅为 5 min. 对静态散射物, 如本实验用的毛玻璃, 可以长时间运算. 但对于生物组织, 稳定持续时间仅为毫秒量级, 本实验系统用的基于液晶运作的 SLM 根本无法用于生物组织聚焦成像. 但是, 如果采用高速数字微镜(digital micro-mirror device, DMD)作为位相调节元件, 其读取频率为 20 kHz, 则当调制单元数增大至 $64 \times 64 = 4\,096$ 时, 所需要的聚焦时间在毫秒量级范围内, 完全可用于实时生物聚焦成像.

下一步工作将提升实验硬件设备, 使用稳定输出功率的激光器, 并且使用速度更快的空间光调制器, 或者将空间光调制器换成高速 DMD, 以节省聚焦时间, 并且增加位相调制分辨率, 以提升聚焦效果.

4 结 论

本文提出并证明基于空间光调制器聚焦通过散射介质的相干光 SLM 单元四元裂解方法. 四元裂解方法的物理本质是利用全部入射光场进行 SLM 位相的优化, 从 4 个大调制单元入手, 每一个独立调制单元寻找其与其他单元相互作用对输出点的贡献后, 然后进行像细胞分裂一样的四单元分裂, 每一个单元分裂为 4 个子单元, 分裂后的 4 个子单元首先继承其父单元的位相, 并开始子单元层的优化. 在每个子单元完成优化后, 用优化后的位相取代该子单元的位相后, 依次进行各个子单元的位相优化. 子单元层优化完成后, 每个子单元再次分裂为 4 个单元, 即孙单元, 与子单元层优化过程一样, 在保持各个孙单元继承或优化位相的前提下, 对各个孙单元进行优化依此类推, 可将单元细分、优化直至 SLM 的像素单元.

本文实验对比了优化位相分布对散射聚焦的影响, 实验表明, 考虑单元间干涉效应越强烈, 目标处的聚焦效果越好, 这与理论分析中的结论一致. 同时, 本文展示了调制单元个数 N 分别等于 $2 \times 2 =$

4, $4 \times 4 = 16$, $8 \times 8 = 64$, $16 \times 16 = 256$, $32 \times 32 = 1\,024$ 和 $64 \times 64 = 4\,096$ 的聚焦结果, 证明了四元裂解方法的正确性和可行性. 但是, 由于实验条件的限制, 本文的实验没有获得较高的增强倍数, 原因是激光器的不稳定性以及 CCD 的记录频率低. 下一步工作将提升实验硬件设备, 使用稳定输出功率的激光器, 并且使用速度更快的空间光调制器, 或者将空间光调制器换成 DMD, 以达到进行生物组织位相聚焦成像的毫秒量级并提升聚焦效果. 本文提出的这一新方法为光波在生物组织当中的传输调制提供了一种新的优化思路.

参 考 文 献

- [1] Wan A W, Yin F L. Feature extraction of electroencephalogram (EEG) signal-A review//Azlan W, Yin F. Proceedings of The Biomedical Engineering and Sciences, San Francisco, 2013. USA: IEEE, 2014: 204-213
- [2] König R, Sieluzycski C, Durka P J. Tiny signals from the human brain: acquisition and processing of biomagnetic Fields in Magnetoencephalography. Journal of Low Temperature Physics, 2007, **146**(5-6): 697-718
- [3] Balafar M A, Ramli A R, Saripan M I, *et al.* Review of brain MRI image segmentation methods. Artificial Intelligence Review, 2010, **33**(3): 261-274
- [4] Brunner D O, Furrer L, Weiger M, *et al.* Symmetrically biased T/R switches for NMR and MRI with microsecond dead time. Journal of Magnetic Resonance, 2016, **263**(1): 147-155
- [5] Ghiss M, Giannesini B, Tropiano P, *et al.* Quantitative MRI water content mapping of porcine intervertebral disc during uniaxial compression. Computer Methods in Biomechanics & Biomedical Engineering, 2015, **19**(10): 1-9
- [6] Messaoud Z B, Chnitti S, Njeh I. An automated MRI brain tissue segmentation approach; proceedings of the International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing, F, 2016 [C]
- [7] Vellekoop I M, Mosk A P. Phase control algorithms for focusing light through turbid media. Optics Communications, 2007, **281**(11): 3071-3080
- [8] Esposito R, Scherillo G, Pannico M, *et al.* Depth profiles in confocal optical microscopy: a simulation approach based on the second Rayleigh-Sommerfeld diffraction integral. Optics Express, 2016, **24**(12): 12565-12576
- [9] Tyson R K. Principles of Adaptive Optics. Academic Press, 1991
- [10] Vellekoop I M. Controlling the propagation of light in disordered scattering media [D]. USA: University of California, San Diego, 2008
- [11] Popoff S M, Lerosey G, Fink M, *et al.* Controlling light through optical disordered media: transmission matrix approach. New Journal of Physics, 2011, **13**(12): 1-9
- [12] Chaigne T, Katz O, Boccara A C, *et al.* Controlling light in

- scattering media noninvasively using the photo-acoustic transmission-matrix. *Nature Photonics*, 2013, **8**(1): 58–64
- [13] Conkey D B, Brown A N, Caravacaaguirre A M, *et al.* Genetic algorithm optimization for focusing through turbid media in noisy environments. *Optics Express*, 2012, **20**(5): 4840–4849
- [14] Vellekoop I M, Aegerter C M. Scattered light fluorescence microscopy: imaging through turbid layers. *Optics Letters*, 2010, **35**(8): 1245–1247
- [15] Vellekoop I M, Cui M, Yang C. Digital optical phase conjugation of fluorescence in turbid tissue. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(8): 81108–81117
- [16] Hillman T R, Yamauchi T, Choi W, *et al.* Digital optical phase conjugation for delivering two-dimensional images through turbid media. *Scientific Reports*, 2013, **3**(5): 1909–1909
- [17] 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. *Physical Review Letters*, 2010, **104**(10): 100601–100601
- [18] Yoon J, Lee K, Park J, *et al.* Measuring optical transmission matrices by wavefront shaping. *Optics Express*, 2015, **23** (8): 10158–10167
- [19] Conkey D B, Caravacaaguirre A M, Piestun R. High-speed scattering medium characterization with application to focusing light through turbid media. *Optics Express*, 2012, **20** (2): 1733–1740
- [20] Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media. *Optics Letters*, 2007, **32**(16): 2309–2311

A Spatial Phase Modulation Method of Rapid Convergence for Focusing Coherent Light Through Scattering Media*

FANG Long-Jie, ZHANG Xi-Cheng, ZHANG Cheng, ZUO Hao-Yi, ZHU Jian-Hua, GAO Fu-Hua, PANG Lin**

(College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract A method of focusing strongly scattered light through turbid media based on spatial light wavefront modulation was proposed in the field of biophysical imaging. The content and procedure of this new method was detailed described. The strict optical theory indicates that the focusing result is better if the effect of interference is considered more intensely. The experiment also indicates this phenomenon. In addition, the experiment reveals that under the same conditions, the more the number of pixels controlled on spatial light modulator, the better the focusing result is. This new method has higher signal-to-noise ratio than other methods. The result of focusing and the phase board uploaded on spatial light modulator are displayed in the paper. At the same time, the convergence rate of focusing is much faster than other methods. That is mainly because our method has considered interference and the focusing result is the superposition of all pixels modulated on spatial light modulator. Therefore, we think that it will provide a new idea for the research of biophysics imaging.

Key words spatial light modulator, focusing, interference, scattering media

DOI: 10.16476/j.pibb.2017.0319

* This work was supported by a grant from The National Natural Science Foundation of China (61377054, 61675140).

**Corresponding author.

Tel: 86-28-85412322, E-mail: panglin_p@yahoo.com

Received: July 31, 2017 Accepted: January 9, 2018