

四元裂解位相调制实现相干光通过散射介质聚焦

张诚 方龙杰 朱建华 左浩毅 高福华 庞霖

Four-element division algorithm for focusing light through scattering medium

Zhang Cheng Fang Long-Jie Zhu Jian-Hua Zuo Hao-Yi Gao Fu-Hua Pang Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 114202 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.114202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.114202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于双光束干涉和非线性相关的身份认证方法

Identity authentication based on two-beam interference and nonlinear correlation

物理学报.2017, 66(4): 044202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.044202>

基于空间域和频率域傅里叶变换 F^2 的光纤模式成分分析

Fiber modal content analysis based on spatial and spectral Fourier transform

物理学报.2016, 65(15): 154202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154202>

空域移相偏振点衍射波前检测技术

Spatial phase-shifting polarization point-piffraction interferometer for wavefront measurement

物理学报.2016, 65(11): 114203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.114203>

无衍射 Mathieu 光束自重建特性的理论和实验研究

Theoretical and experimental studies on the self-reconstruction property of non-diffracting Mathieu beam

物理学报.2015, 64(1): 014201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.014201>

一种基于双光束干涉的分级身份认证方法

Multi-level authentication based on two-beam interference

物理学报.2013, 62(6): 064205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.064205>

四元裂解位相调制实现相干光通过散射介质聚焦*

张诚# 方龙杰# 朱建华 左浩毅 高福华 庞霖†

(四川大学物理科学与技术学院, 教育部重点实验室, 成都 610065)

(2016年12月17日收到; 2017年3月20日收到修改稿)

光在不均匀介质中传播会受到散射的干扰, 在这些散射材料中, 例如粉末、生物组织、亚波长颗粒对入射光多次散射使得出射光无法聚焦, 从而在接收平面形成散斑. 本文提出四元裂解位相调制方法对入射相干光场进行调制, 使其通过散射介质聚焦. 此方法利用入射光场全场调制, 充分考虑光场单元之间的干涉作用, 从整个空间光调制器的调制面开始, 逐层进行四元裂解及位相优化. 运用此方法在实验中实现了相干光的前向散射和后向散射有效聚焦, 这为生物医学领域中通过散射介质成像提供了新的思路和方法.

关键词: 散射介质, 聚焦, 相干干涉, 四元裂解

PACS: 42.25.Hz, 42.30.Rx, 78.20.-e

DOI: 10.7498/aps.66.114202

1 引言

光学成像是人类获取信息的最重要手段, 然而当相干光通过生物组织等折射率非均匀介质时, 会引起强散射效应^[1-3], 光的相干性会被破坏, 形成一系列散斑^[4]. 传统成像方法难以克服光在传播过程中遇到的散射干扰, 随机散射被认为是生物组织成像中限制光学分辨率和穿透深度的最重要的原因^[5]. 近年来, 随着光散射理论与实验技术^[6-8]的快速发展, 人们基于分段连续算法^[9,10]、位相共轭法^[11-13]、透射矩阵法^[14-16]、遗传基因算法^[17], 通过利用空间光调制器 (spatial light modulator, SLM) 适当调制入射光波, 以此来减少散射干扰. 其中, Vellekoop 和 Mosk^[9,10] 提出的分段连续算法中, 采用 SLM 单个单元调制的方法, 以在成像处达到最大光强为优化条件, 获得其最佳位相. 将各单元最佳位相加载于 SLM 上, 对入射光波进行调制, 通过散射介质后成像聚焦. 这种方法简单明了, 在实验操作上也容易实现. 但当某个单元被优化时, 其他单元均设为初始值 (入射波的初始位相, 位相

调制器不对其做改变), 出射场是调制单元上反射光与背景光的相干叠加, 没有加入单元之间的干涉项贡献. 且随着独立单元的个数增大、单个单元对波面的调制, 使得出射场目标处的光强信噪比低, 聚焦优化收敛慢, 从而需要多次迭代才能实现明显的聚焦效果.

本文提出四元裂解位相调制方法, 利用散射介质各单元发光在出射场处相干叠加实现. 将入射波面上未被调制和已被调制的单元相关联, 保持位相调制过程中聚焦目标处光强有较高的信噪比, 且无需多次迭代, 以便快速收敛. 本文从波动光学的角度阐述四元裂解位相调制方法具有快速收敛的优点, 在实验中应用该方法将入射光场进行纯位相调制, 实现了前向散射和后向散射的相干聚焦.

2 算法描述

2.1 光场描述

激光通过散射介质后, 波面上各点位相随机化, 出射光场为散射界面上多个散射源发光的相干叠加. 用透射矩阵 t_{mn} 来描述光在散射介质里的传

* 国家自然科学基金 (批准号: 61377054, 61675140) 资助的课题.

共同第一作者

† 通信作者. E-mail: panglin_p@yahoo.com

输情况^[18], 将出射光场 E_m 和入射光场联系起来:

$$E_m = \sum_n^N t_{mn} A_n e^{i\phi_n}, \quad (1)$$

其中 A_n 和 ϕ_n 分别代表从SLM第 n 个独立单元出射的光的振幅和位相. 对于强散射介质, t_{mn} 具有统计独立的和遵循圆高斯分布的性质^[19-22]. 设 η 为增强倍数, 其定义为优化后和优化前目标处光强的比值, 则有

$$\eta = \frac{(N-1)\pi}{4} + 1, \quad (2)$$

其中 N 为独立控制的单元个数.

2.2 四元裂解法

本文提出四元裂解法, 以增加优化时测量的信噪比及缩短收敛时间. 四元裂解方法从整个SLM调制面开始, 逐层进行四元裂解, 使调制区域从大到小进行逐层位相优化. 具体过程如图1所示. 首先把SLM分为4个独立单元(图1(a)), 对每个单元先后进行 $0-2\pi$ 的位相优化, 同时保持其他单元的

位相为“0”(不进行位相变化, 如图1(a)), 测量目标处对应的光强度, 找到对应最大光强的最佳位相, 便得到了这一层的最佳位相分布, 称这一层为父层(其最佳位相标记为图1(b)中的“父”). 随后, 把父层中的4个单元依次顺序四分. 如图1(c), 先将父层中左上角分为4个更小的区域, 称为子层, 同样也使子层中的每个区域依次进行位相变化, 同时使子层中的其他区域继承父层的位相, 父层中未被分裂的单元保持其最佳位相. 如图1(d), 当子层中其中一个单元寻找到最佳位相后, 随后进行下一个子单元的最佳位相的寻找, 同时把已优化过的子单元赋值为最佳位相(如图1(d)中的‘子’). 随后, 如图1(e), 再对父层中右上角进行细分优化, 同时令已优化过的单元赋值为其最佳位相. 依次类推, 如图1(f)和图1(g)对父层中的左下角、右下角进行细分优化, 最终就得到了如图1(h)中的子层最佳位相分布. 然后, 将子单元逐一四元裂解, 进入孙层单元的位相优化(其中最佳位相用‘孙’标记, 如图1(i)). 依此类推, 可将单元细分、优化直至重孙单元直至SLM的像素大小.

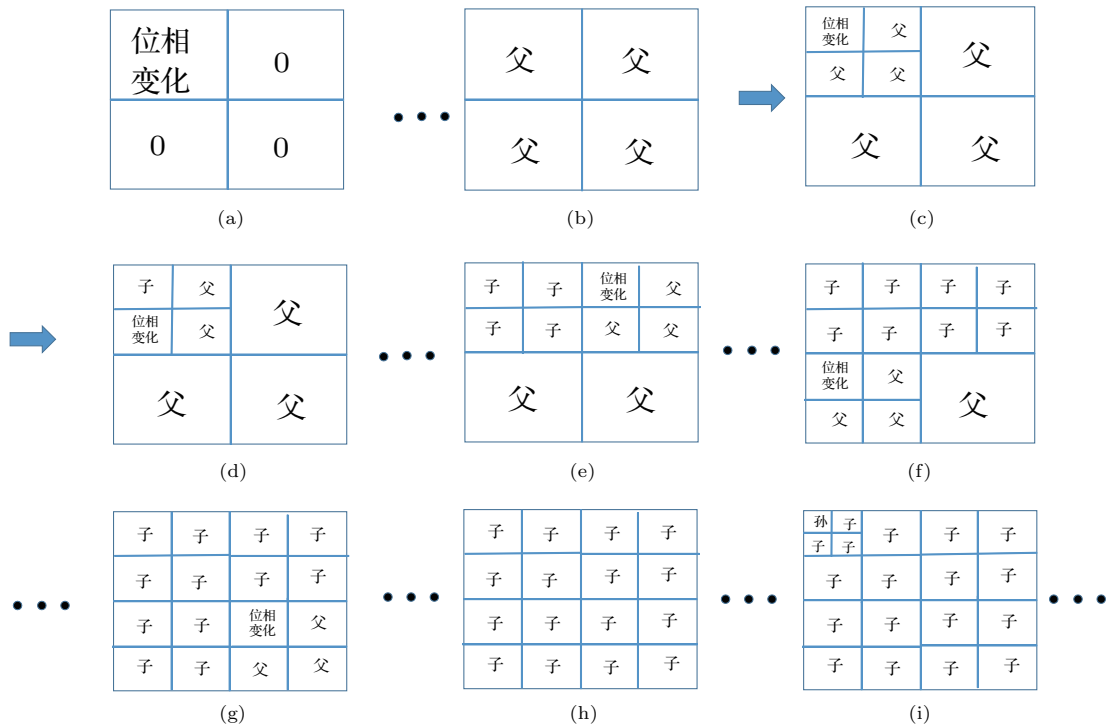


图1 四元裂解调制算法 (a) 父层中独立单元的位相调制; (b) 父层的最佳位相分布; (c)–(g) 父层中的独立单元顺序四元裂解, 进入子层单元的位相调制; (h) 子层的最佳位相分布; (i) 子层中的独立单元四元裂解, 进入孙层单元的位相调制

Fig. 1. Four-cell division algorithm: (a) The segment of father layer being modulated; (b) the optimal phase distribution of father layer; (c)–(g) the segments of father layer being divided into four segments sequentially, and begin to modulate the segment of son layer; (h) the optimal phase distribution of son layer; (i) the segments of son layer being divided into four segments, and begin to modulate the segment of grandson layer.

四元裂解的本质是波面上每个单元位相优化时保持其他各单元处在最佳位相, 即保证所有单元处在彼此同相状态, 从而在出射场形成相长干涉叠加. 优化过程中目标处所测量的信号来自所有单元及单元之间的干涉贡献, 从而解决分段连续法中信号噪比低及反复迭代的问题.

我们以四元裂解方法中的第一次裂解(父层)为例说明优化的物理依据, 此时空间光调制器分成四个独立单元, 它们的复振幅可以表示为:

$$\begin{aligned} E_1(x, y) &= U_1(x, y) \exp[-j\alpha_1(x, y)], \\ E_2(x, y) &= U_2(x, y) \exp[-j\alpha_2(x, y)], \\ E_3(x, y) &= U_3(x, y) \exp[-j\alpha_3(x, y)], \\ E_4(x, y) &= O(x, y) \exp[-j\phi(x, y)]; \end{aligned} \quad (3)$$

则出射场为四个独立单元上光场的相干叠加, 其目标处的光强可以表示为

$$\begin{aligned} I(x, y) &= \sum_{i=1}^3 |U_i(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 \\ &+ 2 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1, i \neq j}^3 U_i(x, y) U_j(x, y) \\ &\times \cos[\alpha_i(x, y) - \alpha_j(x, y)] \\ &+ 2 \sum_{i=1}^3 U_i(x, y) O(x, y) \\ &\times \cos[\alpha_i(x, y) - \phi(x, y)], \end{aligned} \quad (4)$$

其中 E_4 为正在被调制的独立单元的复振幅; $O(x, y), \phi(x, y)$ 分别为其振幅和位相; $E_i (i = 1, 2, 3)$ 为另外三个单元的复振幅; $U_i (i = 1, 2, 3), \alpha_i (i = 1, 2, 3)$ 为其振幅和位相.

(4) 式的第三项表示正在被调节的单元上光波与其余单元上光波的干涉, 即在优化中考虑了所有单元的贡献, 也考虑了各个单元之间的干涉贡献.

3 实 验

当激光入射到散射介质时, 散射光呈 2π 空间角分布(或 4π 空间角)出射. 散射角(散射方向与入射光方向间的夹角)呈 $0-\pi$, 各个方向的散射截面(即散射效率)不同, 依赖于散射体颗粒的大小、形状及散射体本身的物理特性. 原理上讲, 利用位相单元调节可聚焦任何方向的散射光, 但本文专注于

应用四元裂解法进行两个特殊方向的聚焦实验, 散射角为 0 的前向散射聚焦及散射角为 π 的后向散射聚焦.

对于单个散射颗粒而言, 前向、后向散射并没有太大的区别, 仅仅是散射截面的差异. 对于强散射介质而言, 直接透射光几乎为 0 , 前向、后向散射过程不同. 前向散射中, 散射光子经过多次散射穿过介质, 其方向及相位严重偏离原来的入射光. 到达探测点的散射光中可能包括更多的来自二次及更多次向前散射的光子. 而后向散射中, 散射的能量来源于单次散射及多次散射. 如图 2 所示, 为简明起见, 将散射介质分为 ①, ②, ③ 介质层. 对于前向散射(图 2(a)), 入射光子入射到介质前表面(表面 1)进入散射介质内部, 大部分光子经历多次散射(如图 2(a)中的光线 1, 2, 3)穿过介质层 ①, ②, ③, 从介质后表面(表面 2)出射, 少部分光子(图 2(a)中的光线 4)未经多次散射从介质后表面(表面 2)出射, 出射光子在后表面进行相干叠加.

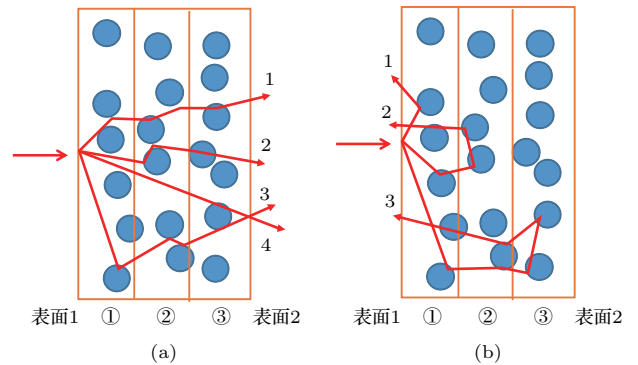


图 2 前向散射和后向散射示意图 (a) 前向散射; (b) 后向散射; 1, 2, 3 为经过多次散射后的出射光; 4 为未经多次散射出射光; ①, ②, ③ 为将散射介质分为三层; 表面 1 为样品前表面; 表面 2 为样品后表面

Fig. 2. Schematic diagram of forward scatter and backscatter: (a) Forward scatter; (b) backscatter; 1, 2, 3, the output light after multiple scattering; 4, the output light without multiple scattering; ①, ②, ③, divided the sample into three layer; surface 1, forward surface of sample; surface 2, backward surface of sample.

后向散射过程不同于前向散射, 入射光子入射到介质上, 经背向散射(散射角为 180°)返回. 未经散射及前向散射的光子继续向前传播, 再次进行背向散射返回; 依次类推, 散射返回的光子在介质前表面相干叠加形成散斑. 如图 2(b)所示. 光线 1, 在介质层 ① 散射后, 从表面 1 后向出射; 某些多次散射光子(在介质内散射次数较多), 先经历介质

层①, ②的前向散射, 然后在介质层② 背向散射, 从表面1 出射, 如图 2(b) 中光线2. 某些多次散射光子, 先经历介质层①, ②, ③的前向散射, 然后在介质③层背向散射, 从表面1 出射, 如图 2(b) 中光线3. 显然, 后向散射中单次散射所占的分量更多, 对后向散射聚焦的贡献更大. 尽管前向、后向散射形成聚焦的物理机理一致, 但是光子散射经历不同, 这对不同具体应用将产生一定的影响.

以下表述为具体的实验过程. 在 3.1 节前向散射实验中, 基于分段连续算法与第 2 节提出的四元裂解方法, 利用 SLM 调制入射光光波实现前向散射聚焦, 进行了三次对比实验. 在 3.2 节前向散射实验中基于四元裂解算法, 利用 SLM 调制入射光光波实现后向散射聚焦, 进行了三次重复实验.

3.1 前向散射

图 3 为前向散射聚焦实验装置. 波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光经平面镜 M 反射, 经显微物镜 O_1 及透镜 L_1 进行滤波、准直及光束放大后, 照射在 SLM 上. 本实验所使用的 SLM 是由 HOLO-EYE 公司生产的 PLUTO-TELCO 纯位相型反射式液晶空间光调制器. 透镜 L_2 和 L_3 将 SLM 表面缩小成像于显微物镜 O_2 的入射光瞳. 散射介质(毛玻璃, 厚 2 mm 单面磨砂) 前表面置于 O_2 的焦面处, 显微物镜 O_3 将散射介质的后表面成像于 12 bit 的 CCD (Thorlabs, BC106-VIS). 将 CCD 接收到的像面强度分布信号输入计算机, 计算所要成像(聚焦) 处的光强的变化来调制 SLM 各单元的位相.

本实验中按照分段连续算法和第 2 节所述的四元裂解调制方法将 SLM 位相面 (1920×1080 个像素) 分解为 2×2 , 4×4 , 8×8 , 16×16 , 32×32 , 64×64 个独立单元进行了三次对比实验, 且各自加以优化得到其最佳位相分布, 然后分别将其加载于 SLM 上, 测量得到目标处(如图 4 中红色方框标记, 大小为 20×20 像素, $160 \mu\text{m} \times 160 \mu\text{m}$) 的光强增强倍数(目标处优化后与优化前的光强比值, 以下简称增强倍数). 四元裂解方法中的第一次实验结果如图 4 所示. 若加载如图 4(a) 中的“0” (SLM 对入射光不进行调节) 相位分布, CCD 接收到的是一系列散斑, 此时没有聚焦现象, 如图 4(b) 所示. 若将 SLM 四等分, 按照第 2 节所表述的方法进行 4 个

单元的位相优化(如图 1(a)), 再将优化后的最佳位相分布(如图 4(c)) 加载于 SLM 上, 则可以得到如图 4(f) 所示的光强分布图, 此时目标处开始出现不明显的聚焦效果, 其增强倍数为 1.95. 随后, 依据第 2 节的四元裂解法, 将每一个单元等分为 4 个单元, 进行图 1 中(c)—(g) 的一系列优化过程, 得到 $4 \times 4 = 16$ 单元位相分布(如图 4(d)), 将其加载于 SLM 上后, 目标处聚焦效果明显增强(如图 4(g)), 可实现 10.28 倍的光场增强. 依此类推, 继续进行 4 单元分裂(如图 1(i)), 裂变得得到 $8 \times 8 = 64$ 单元位相分布(如图 4(e)), 加载这一相位分布产生的聚焦效果更为显著(如图 4(h)), 此时的增强倍数提高到 23.11 倍. 同样地, 再次通过单元分裂方法得到 $16 \times 16 = 256$ 单元位相分布(如图 4(i)), 加载于 SLM 上, 聚焦明显提升, 且此时周围的背景光开始变暗(如图 4(l)), 增强倍数也继续增加, 达到 29.89 倍. 若继续将 256 个单元进行 4 单元分裂, 进行位相优化, 便可得到 $32 \times 32 = 1024$ 单元位相分布(如图 4(j)), 当其加载于 SLM 上, 焦点处的增强倍数(如图 4(m)) 达到 42.22. 继续对 1024 个单元进行 4 元分裂, 优化得到 $64 \times 64 = 4096$ 单元位相分布(如图 4(k)), 目标处的增强倍数进一步增加, 达到 52.12(如图 4(n)).

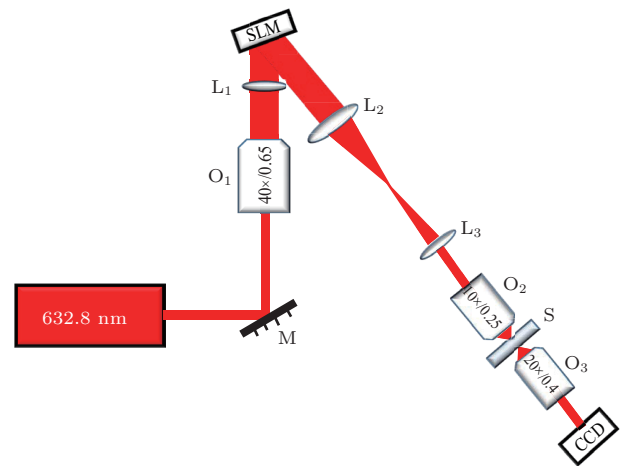


图 3 前向散射实验光路 激光波长为 632.8 nm; M 为平面镜; O_1 , O_2 , O_3 为显微物镜, 放大倍数分别为 40 \times , 10 \times , 20 \times ; L_1 , L_2 , L_3 为透镜, 焦距分别为 75, 300, 100 mm; SLM 为空间光调制器; S 为样品; CCD 为相机
Fig. 3. Experimental setup for forward scattering: 632.8 nm, laser; M, mirror; O_1 , O_2 , O_3 , 40 \times , 10 \times , 20 \times microscope objectives; L_1 , L_2 , L_3 , lenses, focal lengths 75, 300, 100 mm; SLM, spatial light modulator; S, sample; CCD, camera.

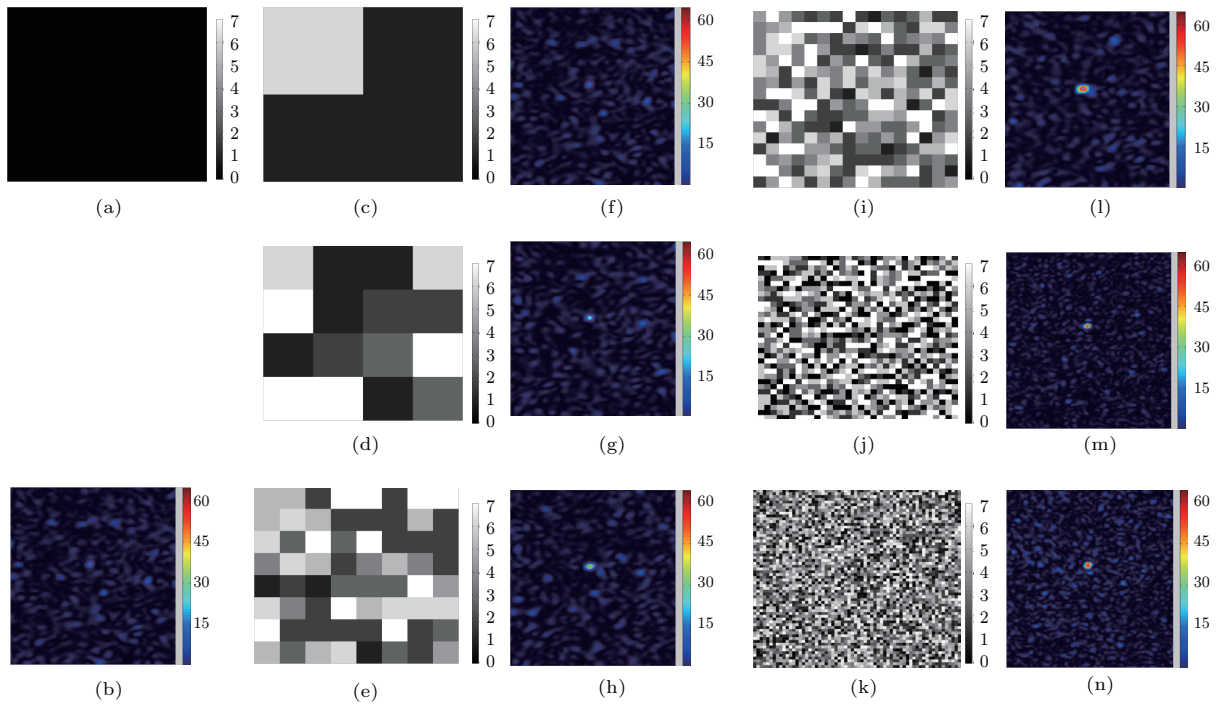


图4 (网刊彩色) 前向散射实验结果 (a)“0”位相分布; 不同独立单元个数的最佳位相分布为(c) 4个单元, (d) 16个单元, (e) 64个单元, (i) 256个单元, (j) 1024单元, (k) 4096个单元; (b)加载“0”位相分布的结果, 加载最佳位相分布于SLM结果为(f) 4个单元, (g) 16个单元, (h) 64个单元, (l) 256个单元, (m) 1024单元, (n) 4096个单元

Fig. 4. (color online) The result of forward scattering: (a) “0” phase distribution; the optimal phase distribution for different segments (c) 4 segments, (d) 16 segments, (e) 64 segments, (i) 256 segments, (j) 1024 segments, (k) 4096 segments; (b) the result of loading the “0” phase distribution, the result of loading different optimal phase distribution on SLM: (f) 4 segments, (g) 16 segments, (h) 64 segments, (l) 256 segments, (m) 1024 segments; (n) 4096 segments.

表1 利用两种方法在不同独立单元个数调制下目标处光强增强倍数对比

Table 1. The comparison of the enhancement between two algorithm base on different number of modulated segments.

独立单元个数	四元裂解			分段连续		
2 × 2	1.95	1.87	2.00	1.94	1.85	2.01
4 × 4	10.28	8.61	7.67	7.57	6.41	7.34
8 × 8	23.11	22.16	22.99	19.42	19.81	18.31
16 × 16	29.89	29.12	30.88	24.38	22.16	21.68
32 × 32	42.22	42.64	43.93	33.80	30.76	31.42
64 × 64	52.12	50.11	55.11	45.51	44.92	44.21

将两种方法的实验结果归纳为表1. 表1中第一列为独立调制单元个数, 2 × 2表示总共有4个调制单元, 这4个独立的调制单元成2行2列的方阵排列. 4 × 4, 8 × 8, …, 64 × 64的含义以此类推. 第2列到第4列表示利用四元裂解算法聚焦得到的目标处的增强倍数, 每种方法进行3次实验. 从表1的第2—4列可以看到, 当调制单元数为

64 × 64 = 4096时, 利用四元裂解算法聚焦得到的增强倍数为52.45(三次实验的平均值). 第5—7列为利用分段连续算法进行三次实验, 在不同单元调制下的增强倍数. 从表1的第5—7列可以看到, 当调制单元数为64 × 64 = 4096时, 利用连续分段算法聚焦得到的增强倍数为44.88(三次实验的平均值). 将两种方法的实验数据做图, 如图5所示, 图中红色圆点为四元裂解算法不同独立单元调制下对应的增强倍数, 黑色三角形为分段连续算法不同独立单元调制下对应的增强倍数. 从图5中可以看到, 随着独立单元数的增大, 两种算法的光强增强倍数都是逐渐增大. 当调制单元个数从2 × 2增加到64 × 64时, 对于四元裂解算法, 增强倍数的3次实验平均值从1.96增加到52.45; 而对于分段连续算法, 增强倍数的3次实验平均值从1.96增加到44.88. 在单元数较少时, 两种算法取得的增强倍数相差不大, 而随着单元个数的增加, 其差距逐渐明显. 在相同的单元个数以及其他的实验条件均相同的情况下, 四元裂解算法优于分段连续算法.

为了进一步定量说明实验的重复性, 定义重复率 μ 为

$$\mu = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\eta_i - \bar{\eta}|}{\bar{\eta}}, \quad (5)$$

其中 n 为实验重复的次数, 本文中重复 3 次实验, $\eta_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 为第 i 次实验获得的增强倍数, $\bar{\eta}$ 为 n 次实验的平均增强倍数. 如果重复率越接近 1, 说明实验的重复性越强; 如果重复率越接近 0, 说明重复性越弱. 根据 (5) 式计算可以得到当独立调制的单元个数为 64×64 时, 对于四元裂解算法, 其重复率为 0.96, 对于分段连续算法, 其重复率为 0.99, 说明两种聚焦算法都具有良好的重复性.

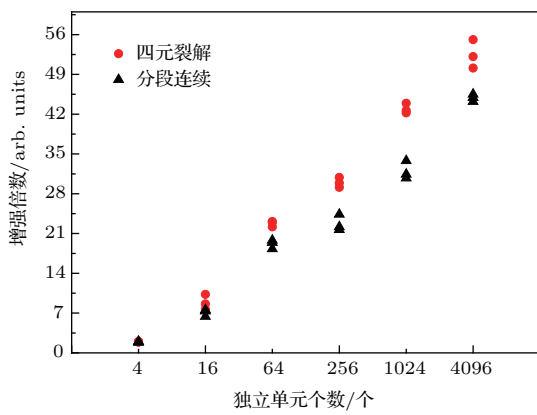


图 5 (网刊彩色) 不同位相调制方法独立单元个数与增强倍数的关系. 圆形代表四元裂解算法得到的增强倍数; 三角形代表分段连续算法得到的增强倍数; 每种方法有三个点, 代表重复三次实验.

Fig. 5. (color online) The enhancement of target area based on different number of modulated segments and different algorithms: Circle, the enhancement from four-element division algorithms; triangle, the enhancement from continuous sequential algorithms; each algorithm is performed three times.

3.2 后向散射

前向散射中, 散射光子经多次散射穿过介质, 其方向及位相严重偏离原来的入射光, 完全随机化, 在介质后相干叠加. 而后向散射过程不同于前向散射, 入射光子入射到介质上, 经背向散射 (散射角为 180°) 返回, 在介质前相干叠加.

图 6 为后向散射实验光路图. 波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光, 经过显微物镜 O_1 及透镜 L_1 进行滤波、准直及光束放大后, 照射于 SLM 上, 经过 SLM 的调制与反射后, 通过非偏振的分束镜, 一部分光经过透镜 L_2 , 将 SLM 表面缩小成像于显微物镜 O_2

的入射光瞳. 散射介质 (毛玻璃) 前表面放置于 O_2 的后焦面处. 激光照射在毛玻璃上, 由毛玻璃表面反射的后向散射光经过 O_2 , L_2 分束镜, 成像于 12 bit 的 CCD. 用 matlab 读取图片, 计算目标处的光强值, 获得 SLM 的调制效果.

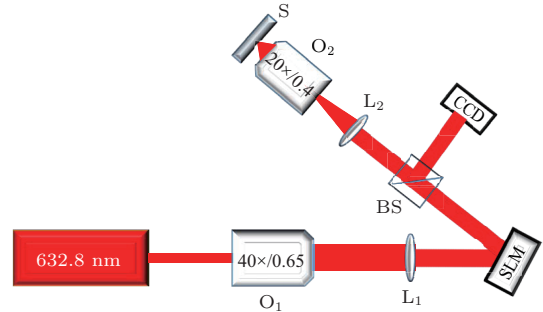


图 6 后向散射实验光路. 激光波长为 632.8 nm ; O_1 , O_2 为显微物镜, 放大倍数分别为 $40\times$, $20\times$; L_1 , L_2 为透镜, 焦距分别为 75 mm , 100 mm ; SLM 为空间光调制器; BS 为非偏振分束镜; S 为样品; CCD 为相机.

Fig. 6. Experimental setup for backward scatter: O_1 , O_2 , $40\times$, $120\times$ microscope objectives; L_1 , L_2 , lenses, focal lengths 75 , 100 mm ; SLM, spatial light modulator; BS, 50% non-polarizing beam splitter; S, sample; CCD, camera.

同前向散射实验一样, 将 SLM 上的 1920×1080 个像素按照四元裂解调制方法, 依次裂解为 2×2 , 4×4 , 8×8 , 16×16 个独立单元, 优化获取其最佳位相分布, 加载于 SLM 上, 观察调制效果. 进行了三次重复实验, 第一次实验结果如图 7 所示. 未经四元裂解位相优化时, 在 CCD 平面上形成一系列散斑, 如图 7(a) 和图 7(b) 所示, 其中图 7(a) 为“0”位相分布, 图 7(b) 为 CCD 接收到的散斑. 将 SLM 分为 4 等份, 进行 4 个单元的位相优化; 将优化后的最佳位相分布 (如图 7(c)) 加载于 SLM 上, 出射场光强分布如图 7(e) 所示; 依据第 2 节的四元裂解法, 将单元继续细分优化, 得到 16, 64, 256 个单元的最佳相位分布 (如图 7(d), 图 7(g) 和图 7(h)), 分别加载于 SLM 得到聚焦效果 (如图 7(f), 图 7(i) 和图 7(j)).

实验结果如表 2 所列. 表 2 中第 1 行为独立调制单元个数, 所使用的个数从 $2 \times 2 = 4$ 个一直增大到 $16 \times 16 = 256$ 个; 第 2—4 列为三次实验中不同单元调制下的增强倍数, 其定义与前向散射相同. 从表 1 中可以看到, 当调制单元数为从 $2 \times 2 = 4$ 一直增大到 $16 \times 16 = 256$ 时, 利用四元裂解算法聚焦得

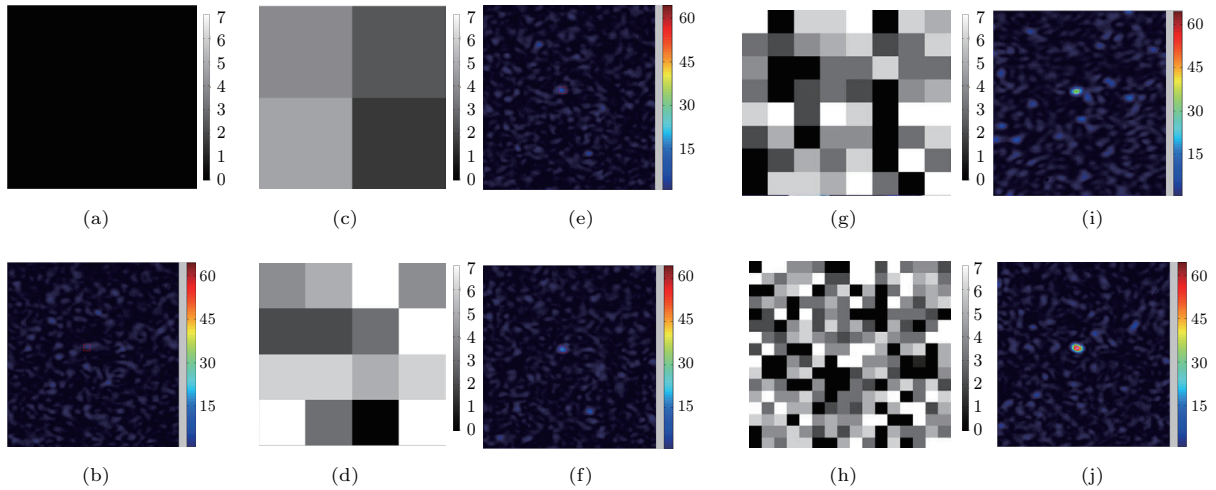


图7 (网刊彩色) 后向散射聚焦结果 (a)“0”位相分布; 不同独立单元个数的最佳位相分布为 (c) 4个单元, (d) 16个单元, (g) 64个单元, (h) 256个单元; (b) 加载“0”位相分布的结果, 加载最佳位相分布于SLM结果为 (e) 4个单元, (f) 16个单元, (i) 64个单元, (j) 256个单元

Fig. 7. (color online) The result of forward scattering: (a) “0” phase distribution; the optimal phase distribution for different segments (c) 4 segments, (d) 16 segments, (g) 64 segments, (h) 256 segments; (b) the result of loading the “0” phase distribution, the result of loading different optimal phase distribution on SLM (e) 4 segments, (f) 16 segments, (i) 64 segments, (j) 256 segments.

到的增强倍数从2.45一直增大到32.31(三次实验的平均值). 将表2中的结果做出函数关系图, 如图8所示, 其中横坐标表示独立调制的单元个数, 从 $2 \times 2 = 4$ 个一直增大到 $16 \times 16 = 256$ 个, 纵坐标为实验的增强倍数, 圆点为不同单元调制下的增强倍数, 每种不同的单元个数进行3次实验, 所以每个单元数对应3个数据点. 由图8可见, 当调制单元数为从 $2 \times 2 = 4$ 一直增大到 $16 \times 16 = 256$ 时, 利用四元裂解算法聚焦得到的增强倍数从2.45增大到32.31(三次实验的平均值), 其增长的趋势类似于指数形式的增长趋势, 增长速率随着单元数的增加而增大. 后向散射与前向散射遵从同样的规律, 增强倍数随SLM调制单元数量的增加而增大. 根据(5)式计算可以得到当独立调制的单元个数为 16×16 时, 对于四元裂解算法, 在后向散射实验中, 其重复率为0.94, 说明四元裂解算法对于后向散射的聚焦具有良好的重复性.

表2 不同独立单元个数调制下对应的目标处光强增强倍数
Table 2. The enhancement base on different number of modulated segments.

独立单元个数	2×2	4×4	8×8	16×16
增强倍数	2.27	7.68	15.53	31.39
	2.60	6.26	18.66	35.43
	2.27	6.35	13.73	31.01

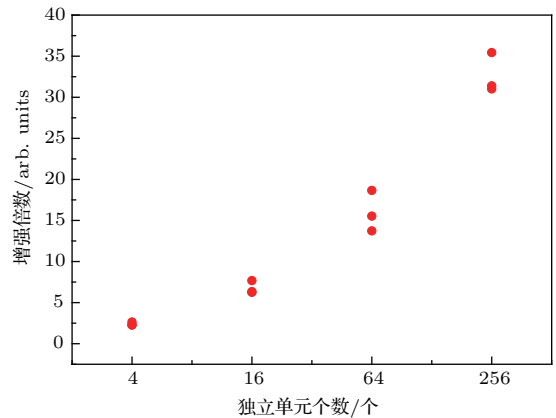


图8 独立单元个数与增强倍数的关系 其中横坐标表示独立调制的单元个数, 纵坐标表示增强倍数; 增强倍数由四元裂解算法聚焦获得, 对于不同的单元个数, 各做3次实验

Fig. 8. The relationship between the number of segments and enhancement: The x -axis represents number of segments and the y -axis represents enhancement of target signal; the blue circles are the enhancement of target signal from four-element division algorithms and the experiment is performed 3 times for different number of segment.

4 讨 论

在四元裂解方法中, 起点是将SLM上的全部像素分为4个独立单元, 由于调制区域大, 每个区域的位相变化将对入射光有较大幅度的调整, 对目标处光强的调制效果明显, 利于在高信噪比下

寻找到最佳位相分布. 四元裂解后续过程是逐级相关的, 且在每个单元进行最佳位相的寻找中, 将已优化过的单元都赋值为最佳位相, 出射场的光强是SLM上所有单元反射光和各个单元反射光之间的干涉贡献, 因此保证了目标处光强度的高信噪比, 寻找的最佳位相更准确, 聚焦效果收敛更快, 不需要进行多次迭代. 例如, 若将SLM上的像素分为 $64 \times 64 = 4096$ 个独立单元, $0-2\pi$ 步长为8, 在实验中, 四元裂解需要优化49140次, 而对于分段连续算法迭代两次需要优化73728次. 总之, 如图5所示, 在单元个数较少时, 两种方法的调制效果相差不大, 而随着单元个数的增多, 四元裂解的优势逐渐明显.

由图4和图7的实验结果可知, 基于四元裂解方法, 前向散射和后向散射实验中均形成了聚焦, 验证了该方法的有效性; 且随着独立单元个数的增加, 调制后的位相补偿了由于散射介质(毛玻璃)引起的随机位相, 入射光波被调制得愈加准确, 增强效果逐渐增大. 相对于前向散射聚焦, 后向散射聚焦难度更大.

在前向散射实验中, 不同单元数调制下均实现了聚焦. 为探究增强效果与环境扰动、激光器稳定性等实验误差的关系, 利用MATLAB对四元裂解算法的聚焦过程进行模拟, 通过改变不同的参数讨论环境扰动对最终聚焦结果的影响. 模拟模型如图9所示. 用元素全为1的矩阵表示平面波, 平面光波照射在SLM, 用元素均为 $\exp[i\varphi_k](k = 1, 2, 3, \dots, N)$ 的矩阵表示SLM的调制作用. 此SLM为纯相位调制, 光波经SLM反射后振幅不变, 而位相的改变量为 $\varphi_k(0-2\pi$ 量化为8份进行调制), 其中 N 为SLM总的单元数, i 为虚数单位. 经SLM调制的光波照射到样品前表面, 用一个高斯分布的随机矩阵^[9,10]表示散射介质的散射作用, 使得入射光波被散射形成散斑. 此散斑利用透镜成像于CCD平面上, 由于透镜的前焦面与后焦面互为共轭面, 将样品(物面)放在透镜的前焦面上, 则CCD(像面)应该放在透镜的后焦面上, 物面与像面的复振幅分布满足傅里叶变换关系, 利用快速傅里叶变换即可得到CCD的光强分布. 将CCD探测信号传输给电脑对目标处的光强进行积分、比较不同位相的调制效果, 从而得到某个单元的最佳位相. 将其反馈给SLM, 随后进入下一个单元的最佳位相寻找, 当所有单元都寻找到了最佳位

相, 加载于SLM上, 调制后的光波补偿了散射介质引起的随机干扰, 从而重新变为平面波, 再经过透镜, CCD就探测到目标处的聚焦效果.

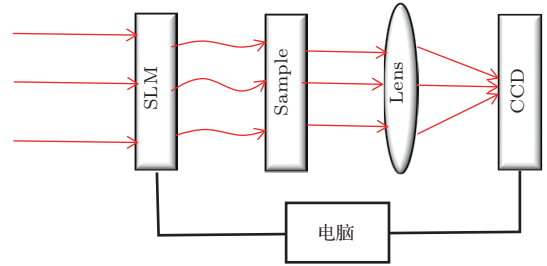


图9 模拟四元裂解算法 SLM, 空间光调制器; sample, 散射介质样品; CCD, 相机; lens, 透镜

Fig. 9. The simulation of Four-element Division algorithm: SLM, spatial light modulator; sample, strongly scattering media corresponding to ground glass in this paper; CCD, charged couple device; lens, optical lens.

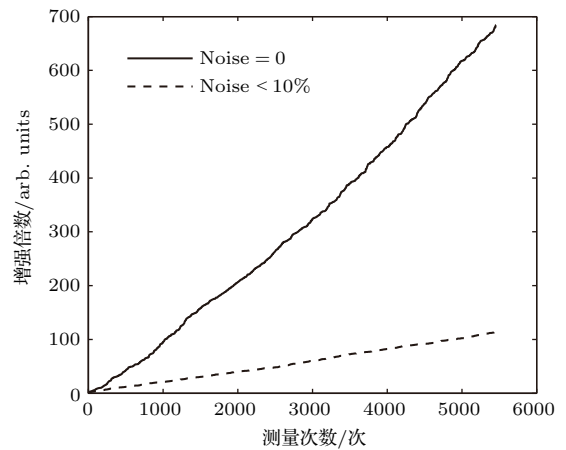


图10 四元裂解算法模拟结果 实线表示 CCD 噪声为 0 的情形; 虚线表示在 CCD 平面加入 10% 的噪声的情形

Fig. 10. The result of simulating four-element division algorithm: Solid line, simulated enhancement with no noise at CCD plane; dashed line, simulated enhancement with 10% noise of average intensity at the CCD plane.

首先模拟没有噪声的情形, 测得的增强倍数曲线如图10实线所示, 其中横坐标为测量的次数, 纵坐标为目标处光强的增强倍数. 由曲线可知, 当四元裂解算法最终完成时, 增强倍数达到692.3. 从图10可以看到, 整个增长过程呈现出近似线性关系, 并且到快要结束的时候, 增强倍数增长速度略微加快. 然而在聚焦实验过程中, 由于CCD是将光信号转换为电信号输入计算机, 在信号的转换过程中由于电子的热运动会带来系统误差, 因此在通过傅里叶变换计算得到的光强分布处加一随机的高斯白光噪声矩阵, 噪声的最大值可以通过控制

随机数的最大值来控制;同时,由于环境扰动、光学平台的机械振动以及激光器的不稳定等,会对实验结果引入实验误差.所有的这些误差最终反映在CCD测得的光强分布会有一微小的扰动.因此在CCD接收到的光强分布中加入相对于平均光强10%的噪声,再次进行模拟,得到的增强倍数曲线如图10虚线所示,其最终增强倍数为124.5.由图10可见,由于环境的扰动误差会使得增强倍数大幅下降.其原因是通过四元裂解方法得到的优化位相分布与散射介质的结构存在一一对应的关系,本聚焦方法严格要求实验过程中介质需要保持静止不动,所以环境扰动会对实验结果有较大的影响.

综上所述,用如图3的光路测量系统的稳定性.将SLM只当作反射镜,不对入射光波有任何调制;用CCD每隔一秒截取一副图,一共截取1000幅图,计算其光强值(如图11(a)中品红色曲线),用MATLAB画出曲线,采用最小二乘法进行数据拟合(如图11(a)中的黑色曲线).而图11(a)中的品红色曲线与黑色曲线的差值即为环境噪声,如图11(b)所示.计算环境噪声的相对均方差为0.0094,显示环境噪声并不是影响本实验结果的主要因素,而激光器输出强度不稳定是本实验中增强倍数不能继续增加的决定性限制因素.从物理的角度分析,1%的相对均方差表示由于CCD光信号转化为电信号时由于电子的热运动而带来的系统误差,这不是影响实验结果的主要因素.然而包含了实验平台的机械振动、空气扰动以及激光器本身输出功率的不稳定性而引起的激光器输出功率的变化,其变化在10%的范围内,根据模拟的结果,10%的误差范围会使得聚焦的增强倍数在 10^2 的数量级范围内,与本文实验的结果恰好对应,因此本文提出的四元裂解方法聚焦良好的实际应用价值,具有可操作性.另外,SLM上的独立单元个数,SLM和CCD的响应速度(SLM为10—100 Hz, CCD为1 Hz),都会使收敛时间加长,从而增加了实验的不确定性.

由于本实验未完全实现自动化,CCD不是直接由计算机读取,CCD拍照存盘后,利用MATLAB读取图片计算光强,随之判断优化位相.当单元数为 $4 \times 4 = 16$ 时需要3 min完成聚焦,当单元数为 $8 \times 8 = 64$ 时需要14 min完成聚焦,当单元数更多时所需要的优化时间更长.若CCD直接由计算

机读取,速度将会加快.假设CCD的读取频率为100 Hz,则当调制单元数增大至 $64 \times 64 = 4096$ 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,稳定时间长,可以允许长时间进行位相优化.但对于生物组织,稳定持续时间仅为毫秒量级,本实验系统基于液晶运作的SLM根本无法应用.但是,如果采用高速数字微镜作为调节元件,其调制速度为20 kHz,当调制单元增大至 $64 \times 64 = 4096$ 时,所需要的调制时间在毫秒级范围内,完全可用于实时生物聚焦成像[23].

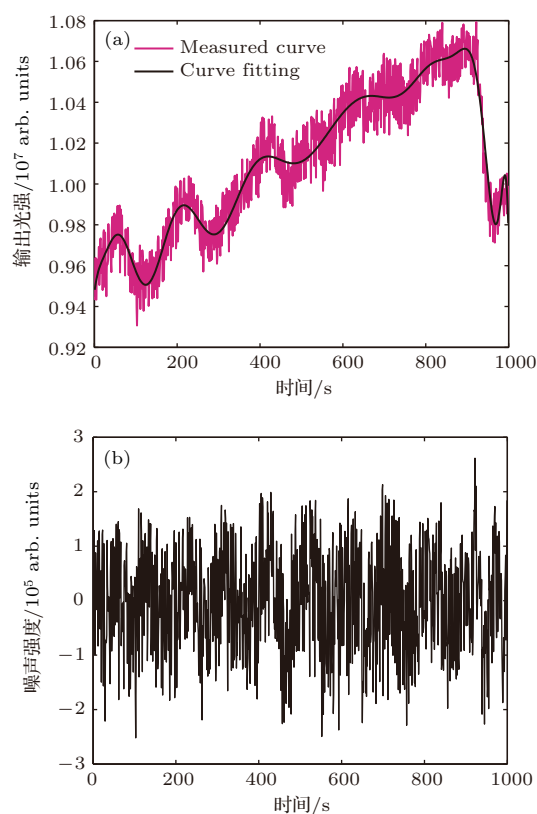


图11 (网刊彩色) 系统噪声测量 (a) 出射光强值; (b) 系统噪声

Fig. 11. (color online) Measure the system noise: (a) Output intensity; (b) system noise.

5 总 结

本文提出了一种利用SLM调制入射光场的方法——四元裂解调制方法,使光经过强散射介质(毛玻璃)后,前向散射光和后向散射光都形成了聚焦.在理论部分详细介绍了此方法的调制过程与理论依据.在实验部分首先讨论了前向散射与后向散射两种不同的散射过程;然后在前向散射实验中,基于分段连续算法和四元裂解算法,进行了三次对比实验,验证了本方法与分段连续方法相比具有快

速收敛, 信噪比高等优点; 随后在后向散射实验中, 基于四元裂解算法进行了三次重复实验, 结果显示与前向散射实验中增长倍数有相同的增长趋势, 体现了该方法的适用性. 在以上实验和理论的基础上我们将应用细小的散射颗粒组成(如TiO₂)三维体散射介质, 对体散射进行更为深入的研究. 本方法为生物医学领域中通过散射介质成像提供了新的思路和方法.

参考文献

- [1] Ishimaru A 1978 *Wave Propagation and Scattering in Random Media* (New York: Academic Press) pp349–351
- [2] Sebbah P 2012 *Waves and Imaging through Complex Media* (Berlin: Springer Science & Business Media) pp29–53
- [3] Tuchin V 2007 *Tissue Optics: Light Scattering Methods and Instruments for Medical Diagnosis* (Bellingham: SPIE Press) pp3–20
- [4] Sebbah P 2010 *Waves and Imaging through Complex Media* (Netherlands: Kluwer Academic Publishers) pp15–26
- [5] Hayakawa C K, Venugopalan V, Krishnamachari V V, Potma E O 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 043903
- [6] Xi S X, Wang X L, Huang S, Chang S J, Lin L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 114204 (in Chinese) [席思星, 王晓雷, 黄帅, 常胜江, 林列 2015 物理学报 **64** 114204]
- [7] Zhou Q Q, Xu S W, Lu J F, Zhou Q, Ji X M, Yin J P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 153701 (in Chinese) [周巧巧, 徐淑武, 陆俊发, 周琦, 纪宪明, 印建平 2013 物理学报 **62** 153701]
- [8] Li X Q, Wang T, Ji X L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 134209 (in Chinese) [李晓庆, 王涛, 季小玲 2014 物理学报 **63** 134209]
- [9] Vellekoop I M, Mosk A P 2007 *Opt. Lett.* **32** 2309
- [10] Vellekoop I M, Mosk A P 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 120601
- [11] Yaqoob Z, Psaltis D, Feld M S, Yang C 2008 *Nature Photon.* **2** 110
- [12] Cui M, McDowell E J, Yang C 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 123702
- [13] Hillman T, Yamauchi T, Choi W, Dasari R, Yaqoob Z, Park Y 2013 *Sci. Rep.* **3** 1909
- [14] Popoff S M, Lerosey G, Carminati R, Fink M, Boccaro A C, Gigan S 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 100601
- [15] Yoon J, Lee K R, Park J, Park Y 2015 *Opt. Express* **23** 10158
- [16] Cui M 2011 *Opt. Lett.* **36** 870
- [17] Conkey D B, Brown A N, Caravaca-Aguirre A M, Piestun R 2012 *Opt. Express* **20** 4840
- [18] Vellekoop I M, Mosk A P 2008 *Opt. Commun.* **281** 3071
- [19] Goodman J W 2000 *Statistical Optics* (New York: Wiley) pp30–45
- [20] Garcia N, Genack A Z 1989 *Phys. Rev. Lett.* **63** 1678
- [21] Webster M A, Gerke T D, Weiner A M, Webb K J 2004 *Opt. Lett.* **29** 1491
- [22] Beenakker C W J 1997 *Rev. Mod. Phys.* **69** 731
- [23] Conkey D B, Caravaca-Aguirre A M, Piestun R 2012 *Opt. Express* **20** 1733

Four-element division algorithm for focusing light through scattering medium*

Zhang Cheng[#] Fang Long-Jie[#] Zhu Jian-Hua Zuo Hao-Yi Gao Fu-Hua Pang Lin[†]

(College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(Received 17 December 2016; revised manuscript received 20 March 2017)

Abstract

Light transport in complex disordered medium, such as white paint, milk, is a fundamental physical phenomenon, and it plays an important role in numerous applications including imaging through turbid layers, and quantum information processes. However, all spatial coherence is lost due to the distorted incident wavefront caused by repeated scattering and interference. Incident coherent light diffuses through the medium and cannot form a geometric focus but a volume speckle field on the imaging plane. In this paper, we propose a four-element division algorithm and experimentally demonstrate that using this algorithm to modulate the incident light, the shaped wavefront can focus through disordered material. At the beginning, we start with four segments on spatial light modulator (SLM), changing the phase of each segment from $0-2\pi$ to search for the optimal phase in terms of the maximal output intensity at a certain field. After the optimal phase of these four segments is found, each of all segments is divided further into four subsegments, so 16 subsegments are formed on the SLM. Just like the first step, the optimal phase is found by cycling the phases of these 16 subsegments. Sequentially, this procedure is repeated several times, so more and more subsegments are obtained. As a result, the modulated input light from SLM can be focused after it has passed through the turbid scattering medium. By employing this approach in the forward scattered experiment, the total pixels of spatial light modulator are divided into 4–4096 segments to shape the incident light. After separately searching for all the optimal phase distributions, we can see that a sharp focusing is gradually achieved. Likewise, in backscattered experiment, 4–1024 segments are used to focus the incident light after passing through the diffuse material. In comparison with stepwise sequential algorithm, the main advantage of our method is that the interference effect of all segments on SLM is taken into consideration, which means that the modulated and the modulating segments are connected with each other. In this way, the signal-to-noise ratio is higher and no iteration is needed. All this experiment shows that the four-element division algorithm can be employed to focus the incident light passing through a disorder material efficiently, which maybe provide a new idea and method in the field of biomedical imaging through scattering medium.

Keywords: turbid medium, focusing, constructive interference, four-element division algorithm

PACS: 42.25.Hz, 42.30.Rx, 78.20.-e

DOI: 10.7498/aps.66.114202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61377054, 61675140).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: panglin_p@yahoo.com