

特邀论文

# 基于二值化传输矩阵透过散射介质的光聚焦

斯科<sup>1,2,3\*</sup>, 汤黎明<sup>1,2</sup>, 杜吉超<sup>1,2</sup>, 吴晨雪<sup>1,2</sup>, 徐晓滨<sup>3</sup>, 胡乐佳<sup>1,2</sup>, 陈佳佳<sup>1,2</sup>, 龚薇<sup>3</sup>

<sup>1</sup>浙江大学医学院附属第一医院神经生物学系现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310058;

<sup>2</sup>浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027;

<sup>3</sup>浙江大学脑科学与脑医学学院, 浙江 杭州 310058

**摘要** 提出一种光透过散射介质的散斑恢复算法, 可实现大视场任意位置的聚焦。通过仿真模拟光路测量散射介质的传输矩阵并进行二值化处理, 再利用数字微镜器件对入射光进行二值振幅调制, 实现透过散射介质的单点或多点聚焦。由于不同聚焦位置的独立性, 所提算法能够实现大视场任意位置聚焦。仿真结果表明, 聚焦位置的光强增强因子随着采样数目的增加而增加; 与传统三步相移法相比, 在采样数目减少 1/3 的情况下, 所提算法能够获得 55% 的增强比, 比三步相移法高 12%。所提算法对透过散射介质实现大视场范围扫描聚焦有重要意义, 在生物医学成像领域具有广阔应用前景。

**关键词** 生物光学; 散射; 传输矩阵; 贝叶斯定理; 聚焦

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0207038

## Light Focusing Through Scattering Medium Based on Binary Transmission Matrix

Si Ke<sup>1,2,3\*</sup>, Tang Liming<sup>1,2</sup>, Du Jichao<sup>1,2</sup>, Wu Chenxue<sup>1,2</sup>, Xu Xiaobin<sup>3</sup>,  
Hu Lejia<sup>1,2</sup>, Chen Jiajia<sup>1,2</sup>, Gong Wei<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Neurobiology, the First Affiliated Hospital, School of Medicine, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

<sup>2</sup>College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

<sup>3</sup>School of Brain Science and Brain Medicine, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China

**Abstract** In this paper, a speckle recovery algorithm for light through scattering media that can achieve focusing at any position in a large field of view is proposed. The transmission matrix of the scattering medium is measured and binarized by simulating the optical path, and the digital micro-mirror device is used to modulate the binary amplitude of the incident light to achieve single-point or multi-point focusing through the scattering medium. Due to the independence of different focus positions, the algorithm can achieve large field-of-view focusing at any position. The simulation results show that the intensity enhancement factor of the focus position increases with the increase in the sampling number. Compared with the traditional three-step phase shift method, an enhancement ratio of 55% can be obtained by the proposed algorithm when the number of sampling is reduced by 1/3, which is 12% higher than that by the three-step phase shift method. The proposed algorithm exhibits great significance for realizing large field-of-view scanning and focusing through the scattering medium, making it applicable in the field of biomedical imaging.

**Key words** bio-photonics; scattering; transmission matrix; Bayesian theorem; focusing

**OCIS codes** 290.4210; 290.2558; 290.5820

## 1 引言

在光学成像中, 由于散射介质的折射率空间分布不均匀, 光在经过散射介质时光强与相位的变化

异常复杂, 给光学系统成像质量带来极大的影响。近年来发布的克服光学散射的研究<sup>[1-3]</sup>表明, 利用波前校正器件对入射光进行调制, 可以实现透过散射介质的光学聚焦, 该方法已在光学成像领域中起到

收稿日期: 2019-10-08; 修回日期: 2019-11-15; 录用日期: 2019-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(81771877, 61975178)、浙江省自然科学基金(LZ17F050001, LR20F050002)

\* E-mail: kesi@zju.edu.cn

很大的作用,尤其是在生物医学成像领域<sup>[4]</sup>。目前,主要的波前校正器件有液晶空间光调制器(SLM)<sup>[5-7]</sup>、可变形镜(DM)<sup>[8]</sup>和数字微镜器件(DMD)<sup>[9]</sup>。2007年,Vellekoop等<sup>[10]</sup>利用SLM补偿入射光的相位畸变,实现了透过散射介质的单点聚焦与多点聚焦,并证实了最大增强因子仅与入射光通道数目相关,且增强因子随着入射光通道数目的增加而增大。2010年,Popoff等<sup>[11]</sup>利用传输矩阵的方法实现了透过散射介质的聚焦,他们将入射到SLM表面的光划分为外围参考区域光与中心调制区域光,外围参考区域加载相位保持不变,中心调制区域每一个子分区上依次加载 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 的相位,最后通过四步相移法计算出每一个子分区的相位,从而测量出散射介质的传输矩阵。2012年,Conkey等<sup>[12]</sup>利用遗传算法对入射光进行波前整形,成功实现透过强散射介质的聚焦,并证实了遗传算法在低信噪比环境下的优异性。2014年,Zhang等<sup>[13]</sup>同样采用遗传算法,用DMD代替SLM,实现了对入射光波前的二值振幅调制,调高了聚焦效率。2015年,Drémeau等<sup>[9]</sup>同样使用DMD作为空间光调制器件,利用相位恢复算法对散射介质的传输矩阵进行测量,这种方法从优化理论出发,利用统计学方法将从每一个聚焦位置采集到的多组数据作为传输矩阵相应行的估计,由于传输矩阵不同行之间具有统计独立性,因此

可以利用并行计算加快全传输矩阵的计算速度。2018年,赵广智等<sup>[14]</sup>采用模式分解理论对多模光纤传输矩阵进行测量,通过DMD对多模光纤的入射波前进行二值振幅调制,实现了透过多模光纤出射光斑的扫描与聚焦。

常用的测量传输矩阵的方法有四步相移干涉法<sup>[11,15-16]</sup>、迭代相位恢复法<sup>[9]</sup>、波前整形法<sup>[17]</sup>等。利用这些方法虽然能够测量出包含相位信息的传输矩阵,但这些相位信息对于振幅调制DMD来说是冗余的<sup>[18]</sup>。本文提出一种针对散射介质的二值化传输矩阵计算方法,利用DMD对入射光进行二值振幅调制,实现透过散射介质的任意位置聚焦。为验证算法可行性,本文将该算法应用于多层随机相位屏的散射校正,得到了良好的聚焦效果。

## 2 仿真系统设计

二值化传输矩阵测量系统原理图如图1(a)所示。氦氖激光器发出波长为633 nm的激光,经第一组4f系统(L1+L2)准直扩束后照射到DMD表面,DMD调制后的光束经第二个4f系统(L3+OBJ1)投影到散射介质(SM)上,散射介质放置在OBJ1后1/2焦距处,并在L3焦点处放置一个孔阑以滤除DMD调制产生的非零级次。透过散射介质的散射光被第三组4f系统(OBJ2+TL)收集到CMOS相机感光面,由相机记录光束信息。

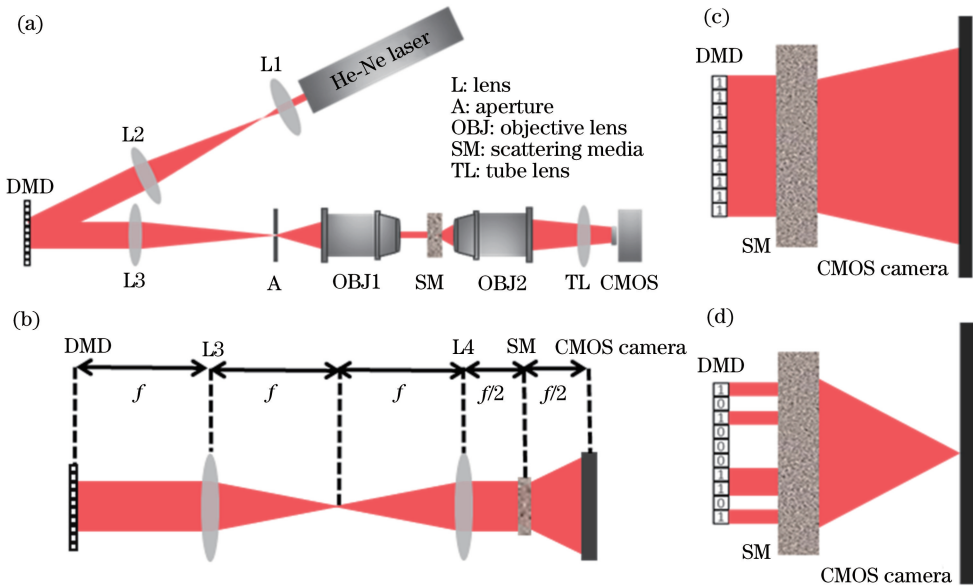


图1 仿真系统示意图及聚焦原理图。(a)仿真系统示意图;(b)仿真参数示意图;  
(c) DMD未调制时透过散射介质的散射;(d) DMD调制时透过散射介质的聚焦

Fig. 1 Schematic of simulation system and focusing. (a) Schematic of simulation system; (b) schematic of simulation parameters; (c) scattering through scattering medium without DMD modulation; (d) focusing through scattering medium with DMD modulation

本文采用标量衍射角谱理论对光束传播进行模拟仿真<sup>[19]</sup>,如图 1(b)所示,DMD 位于 L3 透镜前焦面处,L3 与 L4 的焦距都为  $f$ ,L4 为物镜 OBJ1 的等效透镜,散射介质 SM 放置在 L4 后  $1/2$  焦距处,CMOS 记录下 L4 后焦面的光强分布。物镜数值孔径为 0.1,将 20 层总厚度为 0.15 mm 的随机相位屏作为散射介质,其相位值随机分布在 0 和最大相位之间,通过改变最大相位来调整散射强度。假设每层散射介质之间光束能自由传播,那么就可以用光波的复振幅与相位分布的乘积来模拟散射过程。

DMD 上加载的输入图案由 MATLAB 计算生成,在整个调制区域内,DMD 上像素单元的“开”与“关”状态的占比各为 50%,以保证每次输入不同图案时输入的总光强一致。DMD 调制区域总尺寸为  $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ ,每  $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$  区域组成一个大的调制单元,因而总的调制自由度  $N$  为  $32 \times 32$ ,相机接收面总像素数  $M$  为  $100 \text{ pixel} \times 100 \text{ pixel}$ 。

### 3 算法原理

传输矩阵可用于表征光学系统入射光场与出射光场之间的关系,一旦测量出散射介质的传输矩阵,就可以通过调制入射光场实现任意出射光场。入射到散射介质表面的光场复振幅  $E_{in}$  和出射光场复振幅  $E_{out}$  之间的关系可用复传输矩阵  $T$  表示,用  $t_{mn}$  表示传输矩阵  $T$  中的每一个元素,其实际物理意义为输入光场复振幅的第  $n$  个模式对输出光场复振幅第  $m$  个( $m$ th)模式的影响。数学关系式为

$$E_{out} = TE_{in}。 \quad (1)$$

#### 3.1 二值化传输矩阵

当使用 DMD 作为空间光调制器件调节入射光场时,透过散射介质被相机采集到的光场可表示为每一个 DMD 像素单元对应的出射光场的线性叠加,其中传输矩阵  $T$  第  $m$  行对应相机的第  $m$  个像素。假定 DMD 输入像素的单元数为  $N$ ,用以采集散射光场的相机像素单元数为  $M$ ,那么相机的第  $m$  个像素采集到的光场  $E_m$  就是所有输入光场  $E_n$  乘以传输矩阵单元  $t_{mn}$  的叠加<sup>[20]</sup>:

$$E_m = \sum_{n=1}^N t_{mn} E_n。 \quad (2)$$

DMD 上的像素单元只有“开”和“关”两种状态,在均匀照明的情况下,忽略光强损失,令像素单元处于“开”状态时  $E_n = 1$ ,“关”状态时  $E_n = 0$ 。目标位置出射光场可以用对应于 DMD 上“开”状态的像素单元的传输矩阵单元  $t_{mn}$  叠加表示。对于无序散射介

质, $t_{mn}$  在统计学上独立且服从圆高斯分布<sup>[10]</sup>,传输矩阵  $T$  第  $m$  行中实部符号相同的部分元素会在相机的第  $m$  个像素处发生相长干涉,从而使得对应入射光经散射介质后在该处发生聚焦。但  $T$  中元素包含正负实部两部分,不同实部符号对应不同的干涉效应,不同干涉效应的相互叠加导致不同聚焦位置光强分布不均,光强呈散斑状分布,如图 1(c)所示。根据实部符号的不同,将  $t_{mn}$  分为两部分:相长(实部大于零)和相消(实部小于零),根据这一划分对复传输矩阵  $T$  进行二值化(实部大于零对应矩阵元素为 1,小于零对应矩阵元素为 0)。如图 1(d)所示,通过 DMD 的调制功能将对应于相消部分的像素单元置为“关”状态( $E_n = 0$ ),即可实现光束在第  $m$  个像素单元处的聚焦。

#### 3.2 基于贝叶斯定理的二值化算法

根据贝叶斯定理,在事件  $A$  发生的前提下事件  $B$  发生的概率  $P(B|A)$  的计算式为

$$P(B|A) = P(AB)/P(A), \quad (3)$$

事件  $A$  发生的概率  $P(A)$  可由全概率公式计算得到:

$$P(A) = P(A|B) + P(A|\bar{B}), \quad (4)$$

事件  $A$  和事件  $B$  同时发生的概率  $P(AB)$  的计算式为

$$P(AB) = P(A|B) \times P(B)。 \quad (5)$$

式中; $\bar{B}$  代表事件  $B$  的补集。

基于贝叶斯定理的二值化算法的原理如图 2(a)所示。假定输入-输出对的总采集数目(即 DMD 上加载的各不相同的输入图案数)为  $K$ ,DMD 上每一个像素单元都与第  $m$  个相机像素单元有对应关系,这种对应关系就是传输矩阵。如图 2(b)所示,第  $m$  个相机像素单元有  $K$  个强度数据值,对第  $m$  个像素单元预先设定一个光强阈值  $H_m$  (一般为第  $m$  个像素对应的  $K$  个强度值中最大强度值的  $4/5$ ),根据这  $K$  个强度值是否大于  $H_m$ ,将这  $K$  个强度值分为相长干涉(事件  $C$ ,大于  $H_m$ )和相消干涉(事件  $D$ ,不大于  $H_m$ )两部分。那么传输矩阵单元  $t_{mn}$  产生相长干涉的概率就可以表达为

$$P(C|T)_{mn} = \frac{P(T|C)_{mn} \times P(C)_m}{P(T|C)_{mn} \times P(C)_m + P(T|D)_{mn} \times P(D)_m}, \quad (6)$$

式中: $P(C)_m = K_c/K$ , $P(D)_m = K_d/K$ , $K_c$  为第  $m$  个像素单元的  $K$  个强度值属于  $C$  的次数, $K_d$  为属于  $D$  的次数; $P(T|C)_{mn} = k_c/K_c$ , $P(T|D)_{mn} =$

$k_d/K_d, k_c$  表示第  $m$  个像素单元位于  $C$  部分时 DMD 上第  $n$  个像素处于“开”状态的次数,  $k_d$  表示第  $m$  个像素单元位于  $D$  部分时 DMD 上第  $n$  个像素处于“开”状态的次数。那么  $P(C|T)_{mn}$  就表示当 DMD 上第  $n$  个像素处于“开”状态时, 相机的第  $m$  个像素位于  $C$  部分的概率。同样可得  $P(D|T)_{mn}$  的计算式为

$$P(D|T)_{mn} = \frac{P(T|D)_{mn} \times P(D)_m}{P(T|C)_{mn} \times P(C)_m + P(T|D)_{mn} \times P(D)_m}, \quad (7)$$

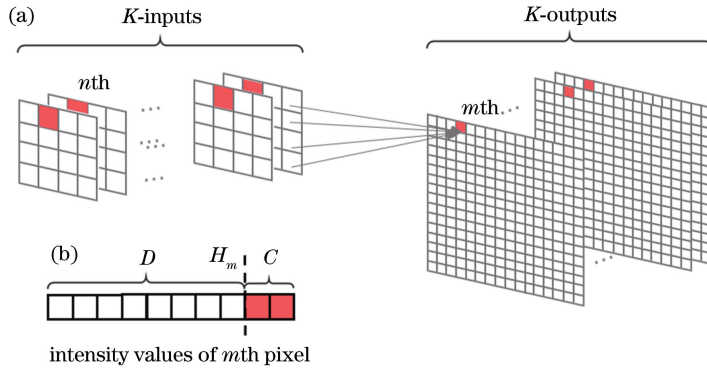


图 2 二值化算法原理示意图。(a)输入输出对应图;(b)第  $m$  个像素单元强度划分图

Fig. 2 Schematic of binary algorithm. (a) input and output map; (b) intensity division of  $m$  th pixel unit

## 4 仿真结果与分析

### 4.1 聚焦效果评价

本文采用光强增强因子  $\eta$  作为聚焦效果的评价指标<sup>[21]</sup>, 光强增强因子  $\eta$  的定义式为

$$\eta = \frac{I_{\text{refocus}}}{I_{\text{reference}}}, \quad (8)$$

式中:  $I_{\text{refocus}}$  为经 DMD 调制后在目标位置处得到的聚焦点光强;  $I_{\text{reference}}$  为参考光强。DMD 上调制区域像素单元“开”、“关”状态的比例为 1:1, 因而  $I_{\text{reference}}$  可以用 DMD 调制区域像素单元全置为“开”状态时得到的统计平均光强(所有像素位置光强求和除以像素数)的 1/2 来代替。考虑到 DMD 为纯振幅调制器件, 其最大增强因子  $\eta_{\text{max}}$ <sup>[22]</sup> 为

$$\eta_{\text{max}} = 1 + \left(\frac{N}{2} - 1\right) / \pi. \quad (9)$$

采集  $K$  幅输入-输出对来验证本文算法的聚焦效果, 如图 3 所示, 在采样数目为  $2N$  时, 最大增强因子为 163, 增强因子为 90.5, 可达到最大增强因子的 55%, 这一数值已经大于利用 SLM 通过三步相移法(采样数目为  $3N$ )所达到的 49.1% 增强比<sup>[23]</sup>。图 3(b)和图 3(c)分别表示采样数为  $N$  和  $4N$  时的聚

式中:  $P(D|T)_{mn}$  表示当 DMD 上第  $n$  个像素处于“开”状态时, 相机的第  $m$  个像素位于  $D$  部分的概率。

下面利用  $P(C|T)_{mn}$  和  $P(D|T)_{mn}$  计算出对应出射光斑在相机的第  $m$  个像素处聚焦所需要的 DMD 输入图案。当 DMD 上的第  $n$  个像素同时满足以下两个条件时, 将该像素置为“开”状态, 其余像素默认为“关”状态: 1)  $P(C|T)_{mn}$  大于  $P(C|T)_m$  的中位数; 2)  $P(D|T)_{mn}$  小于  $P(D|T)_m$  的中位数。其中  $P(C|T)_m$  和  $P(D|T)_m$  分别为 DMD 上全部  $N$  个像素的  $P(C|T)_{mn}$  和  $P(D|T)_{mn}$  的集合。

焦效果, 随着采样数目的增加, 增强因子线性增加, 但所需要的采样时间也会线性增加。由于 DMD 最大刷新频率(22 kHz)远高于常见的纯相位型 SLM (60 Hz), 在相同采样数目下采样时间会低于传统三步相移法所需要的时间。在保证聚焦效果的前提下, 为减少计算时间, 后续均采用  $K = 2N$  进行仿真。

### 4.2 单点聚焦结果

单点聚焦的仿真结果如图 4 所示。像素位置从左上开始标号为 1, 依次从上往下、从左往右递增, 成像面  $100 \text{ pixel} \times 100 \text{ pixel}$  的标号依次对应 1~10000。由于散射效应, 未经 DMD 调制的人射光在经过散射介质后的散射光如图 4(a)所示, 呈散斑状分布。为了补偿散射, 通过测量二值化传输矩阵可以快速计算出对应于某一聚焦位置的 DMD 输入图案, 图 4(c)为对应于第 5050 个像素(聚焦位置)时, DMD 上加载的二值化图案, 白色区域代表该像素单元置为“开”状态, 黑色为“关”状态。在 DMD 上加载该计算结果实现对入射光振幅的调制, 可以得到第 5050 个像素处的聚焦结果, 如图 4(b)所示, 此时光强增长因子为 90.5, 达到最大增强因子的

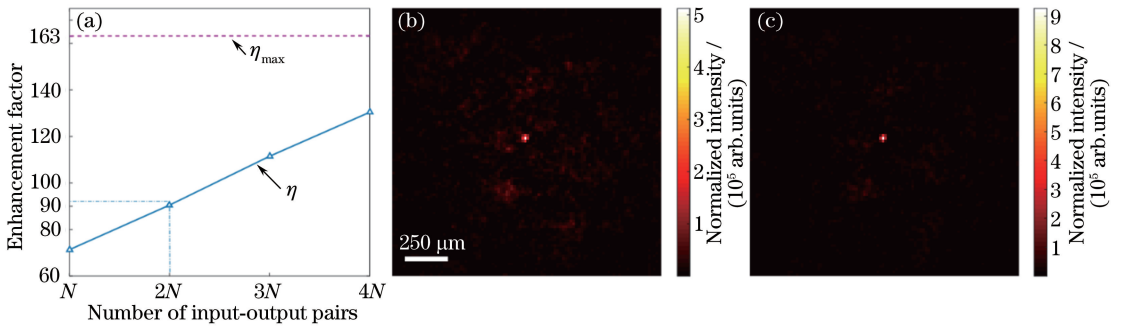


图3 本文算法的聚焦效果。(a)增强因子与采样数的关系曲线;(b)采样数为  $N$  时的聚焦效果;(c)采样数为  $4N$  时的聚焦效果

Fig. 3 Focusing effect of proposed algorithm. (a) Relationship between enhancement factor and number of sampling;

(b) focusing effect with number of sampling of  $N$ ; (c) focusing effect with number of sampling of  $4N$

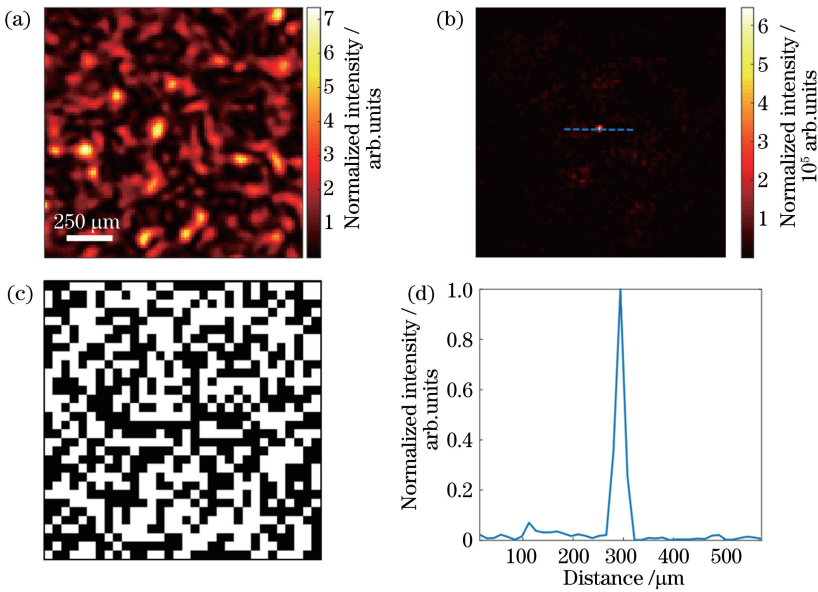


图4 单点聚焦的仿真模拟结果。(a) DMD 未调制时的散斑图;

(b)第 5050 个像素位置的单点聚焦图;(c) DMD 上加载的调制图案;(d)图 4(b)中虚线位置的光强剖面图

Fig. 4 Simulation results of single point focusing. (a) Speckle pattern without DMD modulation; (b) single point focusing at 5050th pixel; (c) modulation pattern loaded on DMD; (d) intensity profile of dash line in Fig. 4(b)

55%。图 4(d)为该聚焦点沿图 4(b)虚线方向的归一化光强剖面图,聚焦点直径约为  $42 \mu\text{m}$ 。

数据采集完成后,本文提出的二值化传输矩阵测量算法生成一张聚焦输入图案需要  $0.08 \text{ s}$  (100 次计算结果的平均, intel core i5-7500 处理器, 8 GB 内存),如果减小扫描区域,计算时间也会相应降低,图 5 所示为不同像素位置的聚焦效果。

### 4.3 多点聚焦结果

基于二值化传输矩阵的测量算法不仅能够实现单点聚焦,计算出在不同位置聚焦所需的输入图案后,对相应输入图案进行“与”运算,还可以得到对应于多点聚焦的输入图案,从而实现多点聚焦。图 6(a)、(b)分别为相距较远的两个聚焦位置(第 1225 个像素和第 8475 个像素)以及相距较近的两

个聚焦位置(第 1225 个像素和第 2025 个像素)的两点聚焦结果。图 6(c)所示为图 6(b)中蓝色虚线所在位置的归一化光强剖面图,可以看出,当相隔  $100 \mu\text{m}$  时,两个聚焦点依旧可以清楚分辨。

## 5 结论

基于贝叶斯理论和全概率公式提出了一种针对散射介质的二值化传输矩阵测量算法。以 DMD 为波前校正器件,在其上面加载 2048 幅“开”“关”(比例为  $50:50$ )的随机二值化图案(图案大小为  $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ ),并在成像面采集相对应的输出图案(大小为  $100 \text{ pixel} \times 100 \text{ pixel}$ ),从而得到 2048 对“输入-输出”。然后通过贝叶斯公式计算每一个聚焦位置处发生相长干涉和相消干涉的条件概率,

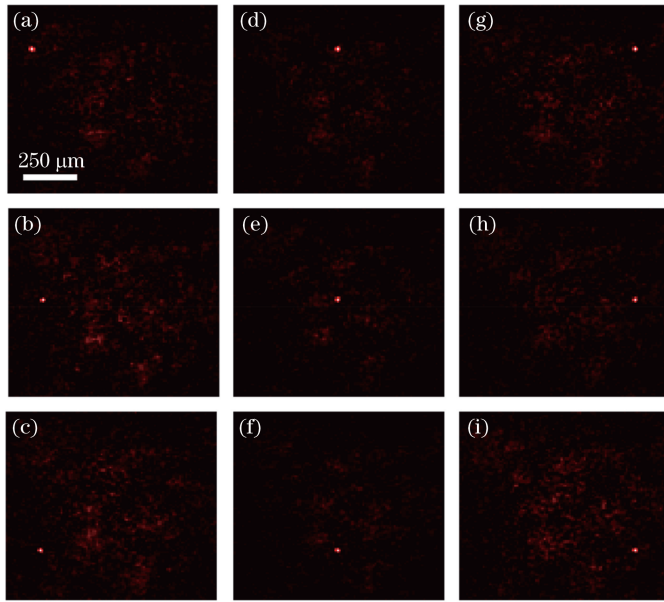


图 5 不同像素位置处的聚焦结果。(a)第 1225 个像素;(b)第 1750 个像素;(c)第 1775 个像素;

(d)第 5025 个像素;(e)第 5050 个像素;(f)第 5075 个像素;(g)第 8425 个像素;(h)第 8450 个像素;(i)第 8475 个像素

Fig. 5 Focusing results at different pixel positions. (a) 1225th pixel; (b) 1750th pixel; (c) 1775th pixel; (d) 5025th pixel; (e) 5050th pixel; (f) 5075th pixel; (g) 8425th pixel; (h) 8450th pixel; (i) 8475th pixel

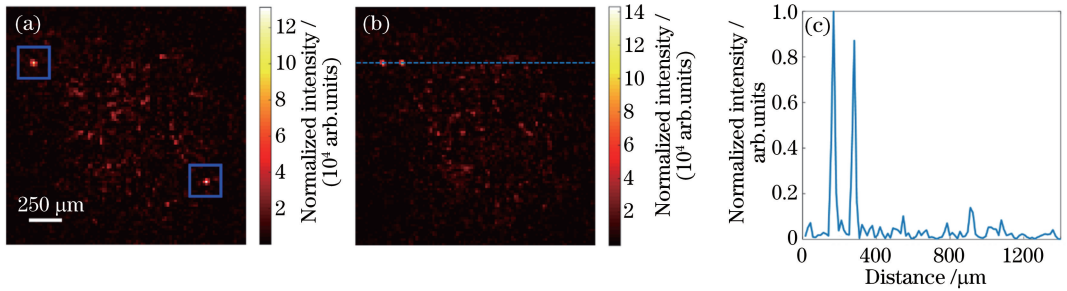


图 6 多点聚焦结果。(a)第 1225 个像素和第 8475 个像素聚焦位置的两点聚焦结果;

(b)第 1225 个像素和第 2025 个像素的聚焦位置的两点聚焦结果;(c)图 6(b)中虚线位置的光强剖面图

Fig. 6 Results of multi-point focusing. (a) Two-point focusing at 1225th and 8475th pixel; (b) two-point focusing at 1225th and 2025th pixel; (c) intensity profile of dash line in Fig. 6(b)

从而获得二值化的传输矩阵。最后通过设立概率阈值得到对应于某一聚焦位置的 DMD 输入图案,在 DMD 上加载该输入图案就可以让光透过该散射介质在其指定聚焦位置处聚焦。本文方法从数据采集完成到求出 DMD 输入图案的时间为 0.08 s,在采样数目减少了 1/3 的前提下,增强比可达到 55%,比传统的三步相移法所能达到的最大增强比大 12 个百分点。但值得注意的是,本文采取的振幅调制方式所能达到的最大增强因子会比纯相位型的低  $\pi^2/2$ <sup>[22]</sup>。同时,该方法还能通过对两幅单点聚焦输入图进行“与”运算,在成像面实现多点聚焦,在相隔仅为 100  $\mu\text{m}$  的情况下依旧具备良好的分辨能力,但存在一处聚焦点光强较强、另一处聚焦点较弱的现象,这与算法中仅考虑聚焦位置而未考虑聚焦点光

强分配相关,也是后续需要解决的问题。需要注意的是,DMD 高刷新频率的特性能使相机在合理的时间范围内采集更多的图像,而本文已经证实随着采集数目的增加,聚焦点增强因子也线性增加,这能够弥补纯振幅调制增强因子较低的缺点。可见,本文提出的这种基于贝叶斯理论的二值化传输矩阵测量方法有望用于透过散射介质的扫描聚焦,这对研究散射介质特性以及生物成像具有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] Vellekoop I M, Legendijk A, Mosk A P. Exploiting disorder for perfect focusing [J]. Nature Photonics, 2010, 4(5): 320-322.
- [2] Vellekoop I M, Mosk A P. Universal optimal

- transmission of light through disordered materials [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(12): 120601.
- [3] Cui M. Parallel wavefront optimization method for focusing light through random scattering media [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 870-872.
- [4] Kim M, Choi W, Choi Y, et al. Transmission matrix of a scattering medium and its applications in biophotonics [J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 12648-12668.
- [5] Huang H L, Chen Z Y, Sun C Z, et al. Focusing laser beams through opaque scattering media [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 30-35.  
黄惠玲, 陈子阳, 孙存志, 等. 激光光束经过不透明散射介质的聚焦 [J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 30-35.
- [6] Zhao Q, Shi X, Gong W, et al. Large field-of-view and deep tissue optical micro-imaging based on parallel wavefront correction algorithm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1207001.  
赵琪, 石鑫, 龚薇, 等. 基于并行波前校正算法的大视场深穿透光学显微成像 [J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1207001.
- [7] Cheng Y, Huang D J, Fan W. Beam shaping capability of amplitude spatial light modulator by electrical addressing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0405001.  
程煜, 黄大杰, 范薇. 电寻址振幅型空间光调制器的光束整形能力 [J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0405001.
- [8] Shain W J, Vickers N A, Goldberg B B, et al. Extended depth-of-field microscopy with a high-speed deformable mirror [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(5): 995-998.
- [9] Drémeau A, Liutkus A, Martina D, et al. Reference-less measurement of the transmission matrix of a highly scattering material using a DMD and phase retrieval techniques [J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11898-11911.
- [10] Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [11] 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.
- [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] Zhang X L, Kner P. Binary wavefront optimization using a genetic algorithm [J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(12): 125704.
- [14] Zhao G Z, Geng Y, Chen H, et al. A method for focusing and scanning light through multimode fiber based on binary amplitude modulation DMD technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0911004.  
赵广智, 耿焱, 陈慧, 等. 一种基于 DMD 二值振幅调制的多模光纤出射光斑聚焦扫描技术 [J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0911004.
- [15] Sun X Y, Wang J N, Li W, et al. Dynamic target imaging through scattering media based on optical transmission matrix [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1205001.  
孙雪莹, 王剑南, 李伟, 等. 基于光学传输矩阵实现透过散射介质的动态目标成像 [J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1205001.
- [16] Zhao M, Zhao M J, Sun C W, et al. Measurement and light focusing by transmission matrices of scattering media based on phase-only modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0129001.  
赵明, 赵美晶, 孙程伟, 等. 基于纯相位调制的散射介质传输矩阵测量与光波聚焦 [J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0129001.
- [17] Yoon J, Lee K, Park J, et al. Measuring optical transmission matrices by wavefront shaping [J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 10158-10167.
- [18] Jang J, Lim J, Yu H, et al. Complex wavefront shaping for optimal depth-selective focusing in optical coherence tomography [J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 2890-2902.
- [19] Si K, Fiolka R, Cui M. Fluorescence imaging beyond the ballistic regime by ultrasound-pulse-guided digital phase conjugation [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(10): 657-661.
- [20] Zhao T R, Deng L, Wang W, et al. Bayes' theorem-based binary algorithm for fast reference-less calibration of a multimode fiber [J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20368-20378.
- [21] Akbulut D, Huisman T J, van Putten E G, et al. Focusing light through random photonic media by binary amplitude modulation [J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4017-4029.
- [22] Vellekoop I M. Feedback-based wavefront shaping [J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 12189-12206.
- [23] Wang J N, Li W, Liu J T, et al. Measuring optical transmission matrix based on three steps phase shift interferometry and focusing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0804007.  
王剑南, 李伟, 刘杰涛, 等. 基于三步相移干涉法的光学传输矩阵测量与聚焦 [J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0804007.