

doi: 10.3788/gzxb20154402.0229002

激光通过散射介质的聚焦

黄惠玲, 孙存志, 陈子阳, 蒲继雄

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 基于角谱衍射公式和散射介质的圆形高斯分布模型, 数值模拟光通过散射介质的聚焦. 通过反馈优化算法实现散射光束的波前整形, 在目标位置处形成一个很亮的聚焦光斑. 改变聚焦目标位置后, 可实现任意位置处的单点或多点聚焦. 讨论了空间光调制器上的总调制单元个数、每个调制单元相位准确度与光强增长因子的关系. 结果表明: 目标位置处的光强随着总像素单元数的增加而线性地增强, 并且随着调制单元的相位准确度的增加而增强.

关键词: 散射介质; 聚焦; 角谱衍射公式; 圆形高斯分布; 算法

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)02-0229002-5

Focusing of Laser Through Scattering Media

HUANG Hui-ling, SUN Cun-zhi, CHEN Zi-yang, PU Ji-xiong

(College of Information Science and Engineering, Fujian Provincial Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract: Based on angular spectrum diffraction theorem and circular Gaussian distribution model of scattering media, light focusing through scattering media was numerically simulated. A high contrast focus in the target area is produced by using a feedback optimization algorithm to shape the wavefront of the scattering light. By adjusting the target area, it is also possible to form one or multiple foci at will. The influence of the number of square segments of the spatial light modulation and the phase precision of a single segment on the intensity enhancement was discussed. The result shows that the light intensity at the target area increases linearly with the increasing number of square segments of the spatial light modulation, and becomes stronger with the increasing phase precision.

Key words: Scattering media; Focusing; Angular spectrum diffraction theorem; Circular Gaussian distribution; Alaogirhm

OCIS Codes: 030.6600; 110.7050; 290.4210; 030.6140

0 引言

由于白色涂料、人体组织等散射介质具有多重散射特性, 当入射相干光通过这些散射介质后, 光束的相干性被破坏, 从而形成随机散斑^[1-2]. 近几年国外学者研究结果显示, 使用优化算法和空间光调制器对入射相干光束进行波前整形可以使光通过散射介质后聚焦. 2007 年, 荷兰特温特大学的 Mosk 教授等率先在实验上获得了光通过散射介质后的聚焦光斑^[3]. 随后, 世界上的其他研究小组也相继用不同的方法实现了该过

程. 2010 年, 法国的 Popoff 等采用四步相移法测量随机散射介质的传输矩阵后进行相位共轭实现了通过散射介质的聚焦^[4]. 2011 年, 美国的 Meng Cui 等提出了并行波前相位优化方法, 这是一种基于空间频率域的调制方法, 聚焦时间更短^[5]. 调制后的光束可以克服散射介质多重散射的影响, 在经过散射介质后形成很亮的聚焦光斑. 在这样的调制下, 散射介质对于成像和信息传输是有利的. 通过散射介质成像可以突破衍射极限的限制, 提高成像分辨率^[6]. 调制光束使得它通过散射介质聚焦, 在生物医学^[7], 光学捕获^[8], 荧光成像^[9]

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61178015、11304104)资助

第一作者: 黄惠玲(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光束整形. Email: ling200602@126.com

导师(通讯作者): 蒲继雄(1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光传输与变换. Email: jixiong@hqu.edu.cn

收稿日期: 2014-07-22; **录用日期:** 2014-09-02

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

等方面有着广泛的应用前景。

本文使用 MATLAB 进行数值模拟,利用优化反馈算法实现对入射波前的相位调制,使得光束经过散射介质后能够在模拟的 CCD 接收面上形成聚焦光斑.改变聚焦目标后,可实现任意位置处的单点或多点聚焦.讨论了目标焦斑的亮度随不同的总调制像素单元数以及每个调制单元中的调制相位份数的变化.

1 理论分析

入射相干光经过散射介质后,通过散射介质的散射后会在 CCD 接收面上形成一个随机散斑场,如图 1(a)^[3].为了使入射光通过散射介质后聚焦,用纯相位空间光调制器对入射光的波前进行空间调制^[10],经过散射介质后聚焦在 CCD 接收面上的任意目标位置,如图 1(b).将空间光调制器的表面空间划分成 N 个等大的方形像素单元,即 N 个输入模式,通过波前相位调制反馈算法,分别逐个地调制每个输入模式的相位,使得每个调制后的光束与背景散斑场发生相长干涉,目标位置的光强达到最大.

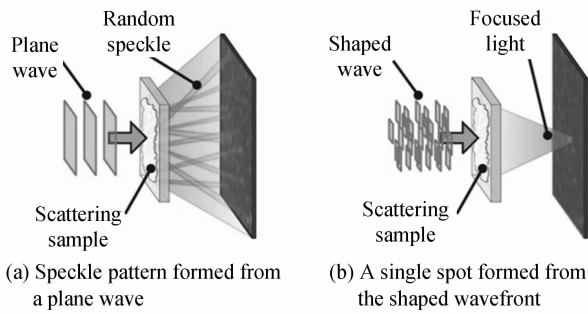


图 1 光通过散射介质并形成光斑的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the light transmits through the scattering media and forms light spot

调制后目标位置的复振幅 E_m 为 N 个从不同像素单元射出的光到达目标位置的光场的线性叠加,表示为

$$E_m = \sum_{n=1}^N t_{nm} A_n e^{i\phi_n} \quad (1)$$

式中, A_n 和 ϕ_n 分别表示经过第 n 个像素单元后光场的振幅和相位.由于本文中的入射光为平面波, A_n 归一化后为 $A_n = 1/\sqrt{N}$, 则复振幅表示为 $E_m = 1/\sqrt{N} \sum_{n=1}^N t_{nm} \cdot e^{i\phi_n}$. 散射介质和光学传输系统可以由一个未知的传输矩阵 t_{nm} (包括振幅和相位) 表示. 由式(1)可以看出, 当入射光所有的项都同相时, 目标位置处的振幅最大. 被调制的区域越大, 划分的单元 N 越多, 即被调制的信道越多, 则得到的目标光强 $I_m = |E_m|^2 = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N t_{nm} e^{i\phi_n} \right|^2$ 就会越强, 对应 CCD 接收面上目标位置的亮度越高.

整个目标位置光强的增长因子取决于被优化的总

像素单元个数 N , 理想的增长因子 η 定义为优化后目标位置处的光强与优化前的统计平均光强的比值, 即

$$\eta = \frac{I_m}{\langle I_0 \rangle}, \text{表示为}^{[8]}$$

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

通过改变划分的像素单元个数 N , 增长因子 η 随着 N 线性地增大.

2 数值模拟过程

采用 MATLAB 模拟该实验过程, 其语言程序所用的参量选取为: 采样点数为 256×256 , 入射光波长为 632.8 nm, 透镜的焦距为 250 mm. 空间光调制器与透镜之间的距离为 100 mm, 透镜与散射介质之间的距离为 190 mm, 散射介质与 CCD 之间的距离为 60 mm.

入射光通过空间光调制器的调制后, 再经过透镜投射到散射介质前表面上, 最后用模拟的 CCD 接收透射光的光强. 当 CCD 接收面上接收到信号后, 检测目标位置的光强, 采用一个反馈算法来改变空间光调制器的相位, 使得透射光聚焦到目标位置, 并且该位置的光强值越来越大, 其模拟流程图如图 2.

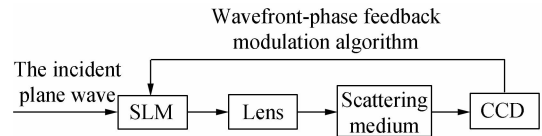


图 2 模拟流程图

Fig. 2 Flow chart of the simulation process

角谱衍射公式理论上严格满足亥姆霍兹方程, 可以用来处理光束的非傍轴传输^[11-13], 因此采用角谱衍射来模拟光学元件间的光束传输过程

$$E(x, y) = F^{-1} \{ F \{ E_0(x_0, y_0) \} H(f_x, f_y) \} \quad (3)$$

式中, $E_0(x_0, y_0)$ 和 $E(x, y)$ 分别表示源面和观察面的光场复振幅; $H(f_x, f_y)$ 为角谱衍射传递函数, $H(f_x, f_y) = \exp(jkd \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2})$; F 和 F^{-1} 分别表示傅里叶变换和反傅里叶变换; f_x, f_y 是频域坐标; k 为入射光波矢; d 为传输距离. 因此空间光调制器的前表面光场 $E_{\text{SLM, in}}$ 、透镜前表面光场 $E_{\text{len, in}}$ 、散射介质的前表面光场 $E_{\text{media, in}}$ 和 CCD 接收面上的光场 E_{out} 都可以由式(3)算出.

空间光调制器后表面的光场 $E_{\text{media, out}}$ 为

$$E_{\text{media, out}} = E_{\text{media, in}} \exp(i\phi_n) \quad (4)$$

式中 ϕ_n 为空间光调制器上的相位调制.

透镜的复振幅透过率为 $t(x, y)$, 表示为 $t(x, y) = P(x, y) \exp(-ik \frac{x^2 + y^2}{2f})$. 则透镜后表面的光场 $E_{\text{len, out}}$

为

$$E_{\text{len, out}} = E_{\text{len, in}} t(x, y) \quad (5)$$

式中, $P(x, y)$ 为光阑函数; f 为透镜的焦距.

散射介质的传输矩阵是统计独立的, 并且服从圆形高斯分布(CGD)^[14]. 由于光通过散射介质后遵守能量关系, 因此还要对由圆形高斯分布模型生成的传输矩阵进行奇异值分解^[15-16], 得到最后可用于模拟的传输矩阵 T . 则散射介质后表面的光场 $E_{\text{media_out}}$ 为

$$E_{\text{media_out}} = E_{\text{media_in}} T \quad (6)$$

经过计算, 可以得到 CCD 接收面上的光场. 采用连续顺序算法^[17], 把 $0 \sim \pi$ 分为等大的 15 份, 将这 15 个相位值逐个加载到空间光调制器的像素单元中, 使得它们透射光在 CCD 接收平面发生相长干涉. 通过检测目标位置的光强, 把使该位置光强最大的相位值存起来, 作为该像素单元的调制相位. 同样地, 调制完一个像素单元后再接着调制下一个, 直至所有单元都调

制完, 此时目标位置的光强最大.

3 模拟结果及分析

本次数值模拟的总像素单元数 N 为 256. 调制前, 经过散射介质后的透射光在 CCD 接收面上形成散斑. 通过波前反馈相位调制算法改变空间光调制器的每个像素单元的附加相位, 使得入射波前的相位发生改变, 与此同时接收面上的光场也会发生变化. 迭代之后, 明显地看出透射光聚焦在 CCD 接收面中心位置处, 形成一个很亮的聚焦光斑, 光强增长因子为 177. 2210. 仿真结果如图 3. 其中, 图 3(a) 为未经调制的光束经过散射介质后形成的散斑图; 图 3(b) 为经过相位调制后的光束形成的单点聚焦; 图 3(c) 为 $N=256$ 时, 目标位置光强增长因子随调制像素单元的变化曲线; 图 3(d) 为

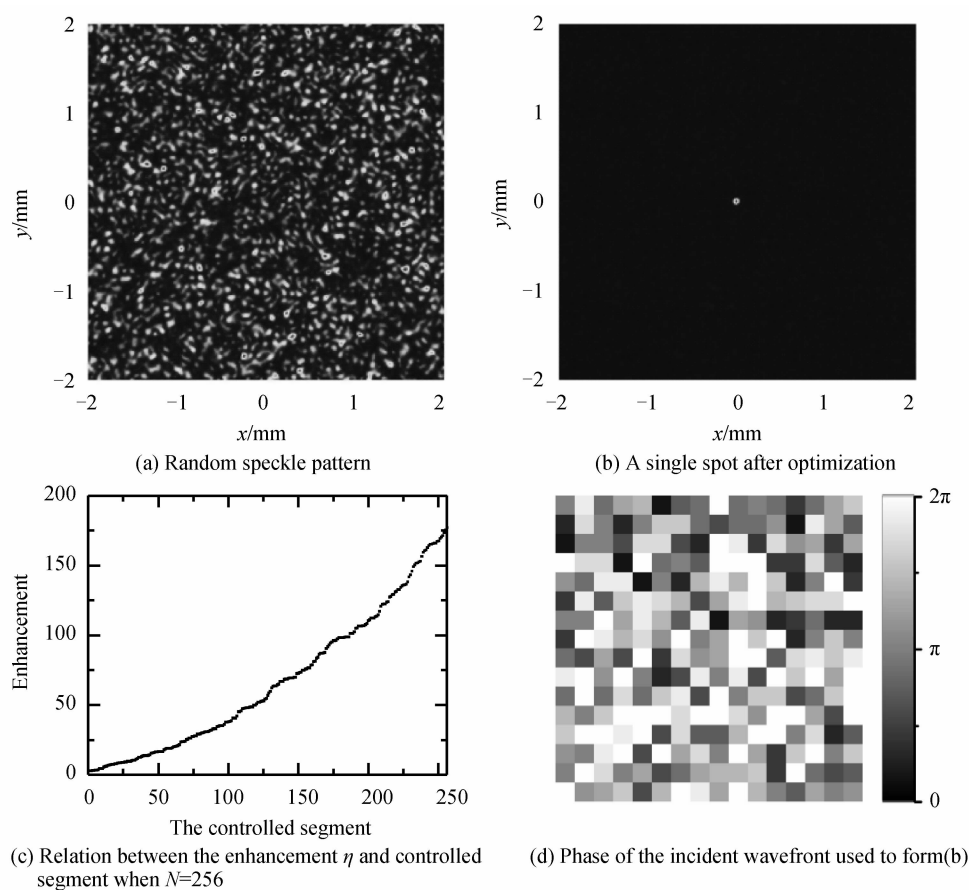


图 3 入射光通过散射介质后的数值模拟结果

Fig. 3 Simulation results of the incident light transmits through the scattering media

最后加载在空间光调制器上而形成图 3(b) 中聚焦光斑的相位图. 从图 3(c) 可以看出, 随着调制像素单元个数的增加, 光强因子并不是连续增加的, 但总体呈增强趋势. 这是由于每个像素单元的相位值只分为 15 份, 每次迭代之后找到的最优相位值可能不是发生完全相长干涉的相位值.

改变式(2)中划分的总像素单元个数 N , 得到不同像素单元个数下的光强增长因子, 其关系曲线如图 4. 其中实线为理想情况下的关系曲线, 点图为在总像素单元个数分别为 16、64、256、1 024 下模拟测得的关系图. k 为 $0 \sim 2\pi$ 分的份数. 从图中可以发现, 测得的光强增长因子比理想情况小, 这是由于加载到空间光调

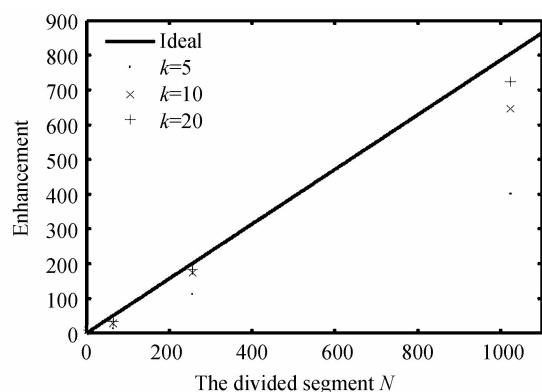


图4 光强增长因子与划分的总像素单元个数的关系
Fig. 4 Relation between the enhancement and the divided segment in the ideal situation

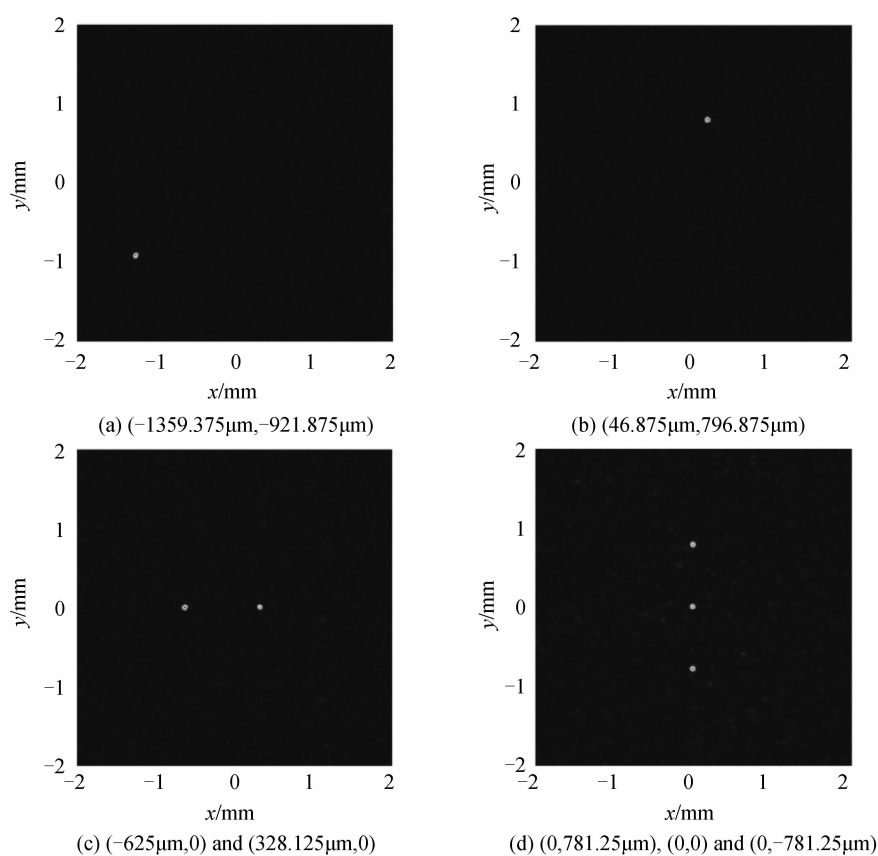


图5 调制后在目标位置处形成的多点聚焦光斑
Fig. 5 Multiple spot at the defined target after optimization

4 结论

本文使用角谱衍射公式处理光束的传输,数值模拟了光通过散射介质的聚焦.相干光束被介质散射后,得到的非相干光被整形聚焦.目标位置光强的增加是除了该区域外其他位置光能转移叠加的结果.使用反馈优化算法对入射光波前相位进行调制,被调制后的光束可透过散射介质在任意特定位置处形成一个或者多个焦斑.单点聚焦时,目标位置处光强由划分的像素单元数 N 决定, N 越大,则目标位置处的光强增强越

大.每个调制像素单元相位 $0 \sim 2\pi$ 分的份数越大,目标位置的光强增强也越大,但是增加的幅度有限,同时,运行消耗的时间增长.

改变聚焦位置,可在 CCD 接受面任意位置处形成单点的聚焦光斑,如图 5(a),(b).这两点的位置分别为 $(-1359.375 \mu\text{m}, -921.875 \mu\text{m})$ 和 $(46.875 \mu\text{m}, 796.875 \mu\text{m})$.这两个聚焦光斑的光强增长因子分别为 176.845 8 和 173.046 4.与此同时,还可实现多点聚焦,如图 5(c),(d).两点聚焦中的聚焦位置为 $(-625 \mu\text{m}, 0)$ 和 $(328.125 \mu\text{m}, 0)$,三点聚焦中的聚焦位置为 $(0, 781.25 \mu\text{m}), (0, 0)$ 和 $(0, -781.25 \mu\text{m})$.

大.每个调制像素单元相位 $0 \sim 2\pi$ 分的份数越大,目标位置的光强增强也越大,但是增加的幅度有限,同时,运行消耗的时间增长.

参考文献

- [1] SEBBAH P. Waves and imaging through complex media[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001: 15-26.
- [2] LIU Man, CHENG Chuan-fu, SONG Hong-sheng, et al. Phase singularities of speckle field produced by the scattering from Gaussian correlation random surfaces[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(8): 5376-5384.
刘曼, 程传福, 宋洪胜, 等. 高斯相关随机表面光散射散斑场相位奇异及其特性的理论研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(8):

- 5376-5384.
- [3] VELLEKOOP I M, MOSK A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(16): 2309-2311.
- [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] CUI M. Parallel wavefront optimization method for focusing light through turbid media[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(6): 870-872.
- [6] VELLEKOOP I M, LAGENDIJK A, MOSK A P. Exploiting disorder for perfect focusing[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(8): 320-322.
- [7] WILT B A, BURNS L D, WEI HO E T, *et al.* Advances in light microscopy for neuroscience [J]. *Annual Review of Neuroscience*, 2009, **32**(1): 435-506.
- [8] ČÍŽMÁR T, MAZILU M, DHOLAKIA K. In situ wavefront correction and its application to micromanipulation[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(6): 388-394.
- [9] VELLEKOOP I M, AEGERTER C M. Scattered light fluorescence microscopy: imaging through turbid layers[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(8): 1245-1247.
- [10] SHAN Xin, DUAN Meng-yun, AI Yong, *et al.* Calibration approaches of the phase nonlinearity of the phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 623001.
- 单欣, 段梦云, 艾勇, 等. 纯相位液晶空间光调制器相位校正方法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(6): 623001.
- [11] GOODMAN J W. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [12] SCHMIDT J D. Numerical simulation of optical wave propagation [M]. Washington: SPIE Press, 2010: 87-130.
- [13] DENG Xiao-jiu, LIU Cai-xia, Wang Fei, *et al.* Light intensity of nonparaxial diffracted beams at transverse plane and its energy transmission [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10): 2058-2062.
- 邓小玖, 刘彩霞, 王飞, 等. 非傍轴衍射光束横截面上的光强及其能量传输[J]. *光子学报*, 2008, **37**(10): 2058-2062.
- [14] GOODMAN J W. 统计光学[M]. 秦克诚, 刘培森, 曹其智, 等译. 北京: 科学出版社, 1992:87-52.
- [15] POPOFF S M, LEROSEY G, FINK M, *et al.* Controlling light through optical disordered medium; transmission matrix approach [J]. *New Journal of Physics*, 2011, **13**(12): 123021.
- [16] SHAO Xiao-peng, WU Teng-fei, GONG Chang-mei. Simulation on light refocusing through a highly scattering turbid medium using circular Gaussian distribution model[J]. *Optical Engineering*, 2014, **52**(11): 113104.
- [17] VELLEKOOP I M, MOSK A P. Phase control algorithms for focusing light through turbid medium [J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(11): 3071-3080.