

# 激光光束经过不透明散射介质的聚焦

黄惠玲 陈子阳 孙存志 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** 由于多重散射的影响,当激光光束经过散射介质(例如牛奶、生物组织等)之后将形成散斑。如何调制激光光束,使其经过散射介质之后能实现有效地聚焦是一项具有重要意义的工作。研究了利用空间光调制器和连续顺序反馈优化算法对入射光波前进行相位调制,从而实现了激光光束经过散射介质的有效聚焦,得到的最大光强增长因子为50.6139。还研究了空间光调制器上的总调制单元个数、每个调制单元的相位精度对光强增长因子的影响。实验研究结果表明,目标位置处的光强随着总调制单元数的增加而增加,并且随着调制单元的相位精度的增加而增强。

**关键词** 激光光学; 散射; 聚焦; 反馈优化算法; 相位调制

**中图分类号** O436

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0602004

## Focusing Laser Beams through Opaque Scattering Media

Huang Huiling Chen Ziyang Sun Cunzhi Pu Jixiong

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

**Abstract** Because of multiple scattering, laser beam is diffused and transforms into speckle when propagating through scattering media, such as milk, biological tissue et al. Realization of diffused light into a focal spot by modulating the wavefront of the incident beams is of great significance. In this study, focusing laser beams through opaque scattering media is achieved by introducing the spatial light modulator and continuous sequential feedback algorithm to modulate phase of the incident beam. The maximum enhancement factor of intensity obtained is 50.6139. The influence of the number of square segments of the spatial light modulation and the phase precision of every segment on the enhancement factor of intensity is discussed. Experimental result shows that light intensity at the target area increases with the increasing number of square segments of the spatial light modulation, and becomes stronger with the increasing phase precision.

**Key words** laser optics; scattering; focusing; feedback optimization algorithm; phase modulation

**OCIS codes** 030.6600; 110.7050; 290.4210; 030.6140

## 1 引言

激光光束通过湍流大气时,由于大气湍流的弱均匀介质性质的影响,导致光束呈现发散、形变、闪烁等不利因素<sup>[1-2]</sup>。当物体经过湍流大气成像,其成像质量将变差。国内外学者应用自适应光学技术可以纠正波像差,改善成像质量<sup>[3-4]</sup>。但是,当入射相干光通过牛奶、白色涂料、人体组织等强散射介质时,由于光在这些介质内经历了多重散射,散射光形成了随机散斑<sup>[5-6]</sup>。入射到散射介质中的光线在出射时失去了原有入射光场的空间相干性,稳定的相干光会被散射为随机化的相干光、有序的图像变得随机紊乱<sup>[7-8]</sup>,这严重地影响了人类从中提取信息的能力。对于这种由强散射介质引起的波前畸变,自适应光学技术则无法有效地纠正波像差<sup>[4]</sup>。近几年,国外学者研究结果显示,可通过对入射相干光束的波前进行整形来克服散射介质多重散射

收稿日期: 2014-12-11; 收到修改稿日期: 2015-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(61178015,11304104)

作者简介: 黄惠玲(1990—),女,硕士研究生,主要从事光束整形方面的研究。E-mail: ling200602@126.com

导师简介: 蒲继雄(1962—),男,博士,教授,主要从事光传输与变换方面的研究。E-mail: jixiong@hqu.edu.cn (通信联系人)

的影响<sup>[9-14]</sup>,从而实现光通过散射介质的聚焦和成像。调制光束使得它通过散射介质聚焦,在生物医学<sup>[15-16]</sup>、光学捕获<sup>[17]</sup>、荧光成像<sup>[18]</sup>等领域有着广泛的应用前景。

目前,国内关于光束经过强散射介质的波前调制研究尚处于起步阶段,例如,西安电子科技大学的研究团队使用圆形高斯分布模型的散射介质对光通过散射介质的超衍射极限聚焦进行了数值模拟<sup>[19]</sup>。基于振幅调制的方法,本文在实验上实现了激光光束经过散射介质的聚焦<sup>[20]</sup>。使用空间光调制器(SLM)及连续顺序反馈优化算法实现了对入射波前的相位调制,使得光束经过散射介质后能够实现聚焦。在改变聚焦目标后,可实现在任意位置处的聚焦。此外,还研究了目标焦斑的亮度随不同的总调制单元个数以及每个调制单元中的调制份数的变化情况。

## 2 理论分析

由于散射介质的散射作用,入射相干光透过散射介质后会在 CCD 接收面上形成一个随机散斑场,如图 1(a)所示。通过纯相位空间光调制器对入射光的波前进行空间相位调制<sup>[21-23]</sup>,使它透过散射介质后聚焦在 CCD 接收面上的目标位置,如图 1(b)所示。将 SLM 所用的表面空间划分成  $N$  个等大的方形调制单元,通过波前相位调制连续顺序反馈优化算法<sup>[24]</sup>,逐个地调制每个调制单元的相位,使得经过这个调制单元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。

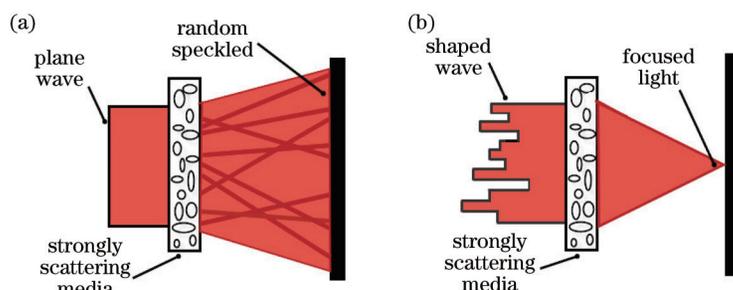


图 1 过程示意图。(a) 平面波透过散射介质后形成随机散斑; (b) 整形后的入射光透过散射介质后在目标位置形成聚焦光斑  
Fig.1 Schematic of the process. (a) Speckle pattern formed from a plane wave; (b) a single spot formed from the shaped wavefront

经过调制后,目标位置处的复振幅  $E_m$  为  $N$  个从不同调制单元出射的光到达目标位置的光场的线性叠加,表示为<sup>[25]</sup>:

$$E_m = \sum_{n=1}^N t_{mn} A_n \exp(i\phi_n), \quad (1)$$

式中  $A_n$  和  $\phi_n$  分别表示经过第  $n$  个调制单元后的振幅和相位。 $t_{mn}$  则表示散射介质和光学传输系统的传输矩阵(包括振幅和相位)。当入射光为平面波时,  $A_n$  可归一化为  $A_n = 1/\sqrt{N}$ , 因此复振幅可表示为  $E_m = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N t_{mn} \exp(i\phi_n)$ 。由上式可明显地看出,当式子中所有的项都同相时,目标位置处的振幅  $E_m$  最大。

调制区域越大,调制单元个数越多,则目标位置处的光强  $I_m = |E_m|^2 = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N t_{mn} \exp(i\phi_n) \right|^2$  越强,CCD 接收面上目标位置处越亮。

当 SLM 上划分的调制单元调制的相位完全补偿了散射介质所产生的相位延迟,即  $\phi_n = -\arg(t_{mn})$ , 则  $I_m$  最大。光强增长因子  $\eta$  定义为优化后的目标位置处的光强  $I_m$  与优化前的统计平均光强  $\langle I_0 \rangle$  的比值,即  $\eta = \frac{I_m}{\langle I_0 \rangle}$ 。在理想情况下,可计算得到增长因子为<sup>[25]</sup>:

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

目标位置处的光强增长因子取决于被优化的总调制单元个数  $N$ , 被调制区域越大,划分的调制单元  $N$  越多,则目标位置处的亮度越高。

### 3 样品制备及实验装置

实验中所用的散射介质是白色氧化锌(ZnO)粉末,将 1.23 mol/L 的纳米 ZnO 均匀地涂在 1.2 mm 的载玻片上,这是一种不透明的强散射材料。

采用的实验装置如图 2 所示。HeNe 激光器的出射光被扩束后经过水平偏振的偏振片 P,出射的水平偏振光再经过分束镜 BS 入射到反射式纯相位空间光调制器上,反射后的光通过显微物镜 O1(10X,0.25NA)聚焦到散射介质 S 上,透过散射介质后再通过第二个显微物镜 O2(20X,0.4NA)入射到 CCD(AVT Pike F421B)中。最后将 SLM 和 CCD 连接至同一台计算机上,计算机某一区域上的灰度图加载到 SLM 对入射光束进行相位调制,CCD 接收光强分布并进行反馈。

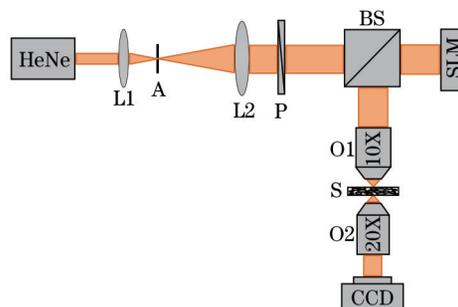


图 2 实验装置图

Fig.2 Schematic of the experimental setup

采用连续顺序反馈优化算法,把每个调制单元的相位值  $0 \sim 2\pi$  分为等大的 10 份,即用不同的灰度值来等效表示。将这些相位值逐个地加载到 SLM 的调制单元中,使得它在 CCD 接收面目标位置处发生相长干涉。通过检测目标位置处的光强,将该位置光强最大的相位值储存起来,作为该调制单元的最优相位值。所有的调制单元都调制完后,目标位置的光强最大。

### 4 实验结果及分析

我们利用 SLM 对光束的相位进行调制。图 3 中,以光束截面的总调制单元数  $N$  为 225,每个调制单元的相位值  $0 \sim 2\pi$  分为 10 份的结果为例,给出了基于相位调制方法实现激光经过强散射介质后聚焦的过程。未

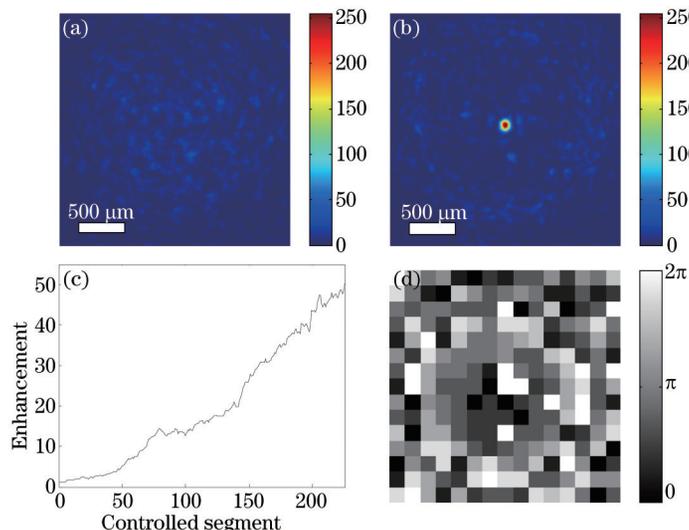


图 3 实验结果图。(a) 未整形入射光经过散射介质后形成的随机散斑图样;(b) 整形后的入射光透过散射介质后在接收面中心位置形成单点聚焦光斑;(c)  $N=225$  时,目标位置光强增长因子随调制像素单元的变化曲线;(d) 加载在空间光调制器上而形成

图 3(b)中聚焦光斑的相位图

Fig.3 Diagrams of experimental results. (a) Random speckle pattern formed from unshaped incident light; (b) a single spot formed from shaped incident light in center target area; (c) relation between enhancement and controlled segment when  $N=225$ ; (d) phase pattern of incident wavefront used to form (b)

调制的激光光束照射散射介质后,由于多重散射的原因,散射光呈现散斑形状,如图3(a)所示。为了获得有效的聚焦,需对入射激光光束的波前进行调制。通过反馈优化算法改变每个调制单元的相位值,使入射光波前的相位发生改变,CCD接收面上的光强分布也会发生变化。一开始,光场收敛得比较慢,但在几次迭代后,可看出在CCD接收面的中心位置处形成一个亮的聚焦光斑,光强增长因子为50.6139。实验结果如图3所示。图3(b)为经过调制后的光束形成的单点焦斑;图3(c)为 $N=225$ 时,目标位置处的光强增长因子随调制像素单元数的变化曲线图;图3(d)为最后加载在SLM上而形成图3(b)中聚焦光斑的相位图。

通过改变总调制单元数 $N$ ,得到总调制单元个数分别为25、100、144、225、400下的光强增长因子及所耗用时间的关系,其关系曲线图如图4所示。图中方块表示在不同的总调制单元个数下的平均光强增长因子,误差棒为光强增长因子波动的标准偏差。从图中可看出,随着总调制单元个数的增加,光强增长因子也随之增大,所消耗的时间也加长。但是当总调制单元达到一定个数时,光强增长因子趋于稳定,我们分析这是由于外界的噪声影响及所消耗时间的增长,使得光强增长因子无法继续增大。

改变每个调制单元相位值 $0\sim 2\pi$ 分的份数,得到相位值份数分别为5、10、15、20、25、30下的光强增长因子及所耗用时间的关系,其关系曲线图如图5所示。图中方块表示在不同的相位值份数下的平均光强增长因子,误差棒为光强增长因子波动的标准偏差。从图中可以看出随着相位值份数增大,光强增长因子增加的幅度不大,而消耗时间增长很快。并且相位值份数达到一定个数时,光强增长因子趋于稳定,所以要根据实际情况选择一个最优份数。

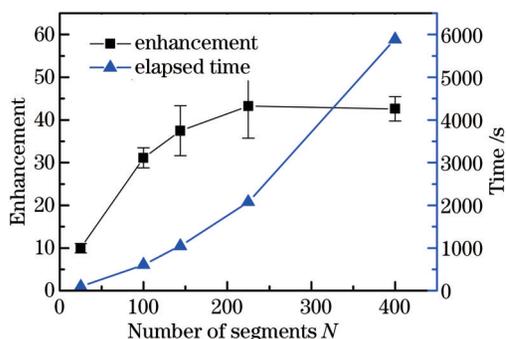


图4 光强增长因子及耗用时间与总调制单元个数的关系图  
Fig.4 Relation between the enhancement and the elapsed time, the divided segment

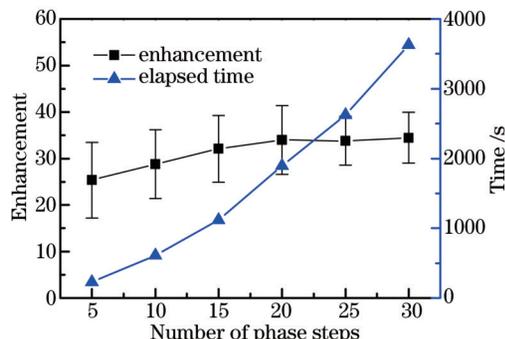


图5 光强增长因子及耗用时间与 $0\sim 2\pi$ 分的份数的关系图  
Fig.5 Relation between the enhancement and the elapsed time, phase precision

改变聚焦位置后,可在CCD接收面任意位置处形成聚焦光斑,如图6(a)和(b)所示。总调制单元数 $N$ 为100,这两位置处聚焦光斑的光强增长因子分别为27.9430和29.3334。

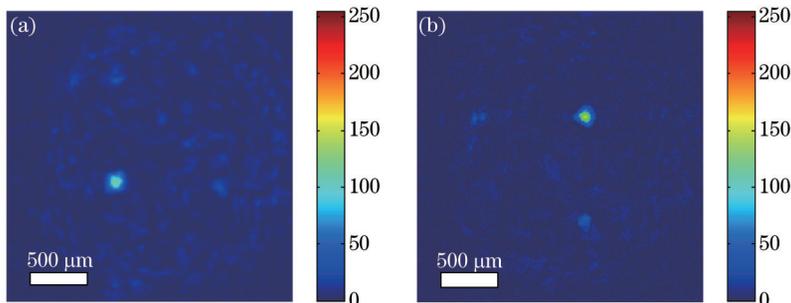


图6 在任意位置处聚焦的实验结果图  
Fig.6 Diagrams of experimental result for focusing at arbitrary area

## 5 结 论

本实验基于干涉理论,通过使用波前相位调制的方法实现了对散射光束的控制整形,使散射光束在目标位置处发生相长干涉,最后形成聚焦光斑。实验结果显示,相干光束被散射介质散射后,得到的散射光束可被整形聚焦。目标位置产生的聚焦光斑是除了该位置处以外其他区域的光能转移叠加的结果。被调制

区域由  $N$  个调制单元组成,即  $N$  个输入模式,通过连续顺序反馈优化算法对每个输入模式进行相位调制,可在任意位置处聚焦。每个调制单元中的每一点的相位都不一样,调制时是将使得目标位置处光强增强最大的相位值存储下来。理论上,波面可以看成是一系列的点所构成,当所有的点到目标位置的相位共相时,调制效果最好。当实际的波面调制单元与点越接近,则调制效果越好。因此在调制区域一定的情况下,总调制单元个数越多,则目标位置处的光强越大。但是由于外界噪声和消耗时间的影响,当总调制单元达到一定程度时,光强增长因子趋于稳定。另外,调制后的光强增长因子受到调制单元的相位精度的影响。相位精度越高,则每个调制单元找到使之发生完全相长干涉的相位的可能性越大。因此每个调制单元相位值  $0\sim 2\pi$  分的份数越大,目标位置处的光强增长因子也增大。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Xiaowen, Ji Xiaoling. Influence of turbulence on spatial correlation properties of partially coherent annular beams[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2319-2325.  
陈晓文, 季小玲. 湍流对部分相干环状光束空间相干性的影响[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2319-2325.
- 2 Liu X H, Pu J X. Investigation on the scintillation of elliptical vortex beams propagating in turbulent atmosphere[J]. Opt Express, 2011, 19(27): 26444-26450.
- 3 Li C H, Xian H, Rao C H, *et al.*. Field-of-view shifted Shack - Hartmann wavefront sensor for daytime adaptive optics system[J]. Opt Lett, 2006, 31(19): 2821-2823.
- 4 Tyson R K. Principles of Adaptive Optics[M]. Florida: The Chemical Rubber company Press, 2010: 1-108.
- 5 Sebbah P. Waves and Imaging through Complex Media[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001: 15-26.
- 6 Goodman J W. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Application[M]. Cao Qizhi, Chen Jiabi Transl.. Beijing: Science Press, 2009: 1-37.  
顾德门 J W. 光学中的散斑现象—理论与应用[M]. 曹其智, 陈家璧译. 北京: 科学出版社, 2009: 1-37.
- 7 Skipetrov S E. Langevin description of speckle dynamics in nonlinear disordered media[J]. Phys Rev E, 2003, 67(1): 016601.
- 8 Wang L V. Multiscale photoacoustic microscopy and computed tomography[J]. Nat Photonics, 2009, 3(9): 503-509.
- 9 Vellekoop I M, Lagendijk A, Mosk A P. Exploiting disorder for perfect focusing[J]. Nat Photonics, 2010, 4(5): 320-322.
- 10 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]. Phys Rev Lett, 2010, 104(10): 100601.
- 11 Cui M. Parallel wavefront optimization method for focusing light through random scattering media[J]. Opt Lett, 2011, 36(6): 870-872.
- 12 Stockbridge C, Lu Y, Moore J, *et al.*. Focusing through dynamic scattering media[J]. Opt Express, 2012, 20(14): 15086-15092.
- 13 Popoff S M, Goetschy A, Liew S F, *et al.*. Coherent control of total transmission of light through disordered media[J]. Phys Rev Lett, 2014, 112(13): 133903.
- 14 Katz O, Heidmann P, Fink M, *et al.*. Non-invasive single-shot imaging through scattering layers and around corners via speckle correlations[J]. Nat Photonics, 2014, 8(10): 784-790.
- 15 Engelbrecht C J, Greger K, Reynaud E G, *et al.*. Three-dimensional laser microsurgery in light - sheet based microscopy (SPIM)[J]. Opt Express, 2007, 15(10): 6420-6430.
- 16 Wilt B A, Burns L D, Wei Ho E T, *et al.*. Advances in light microscopy for neuroscience[J]. Annu Rev Neurosci, 2009, 32: 435-506.
- 17 Čižmár T, Mazilu M, Dholakia K. In situ wavefront correction and its application to micromanipulation[J]. Nat Photonics, 2010, 4(6): 388-394.
- 18 Vellekoop I M, Aegerter C M. Scattered light fluorescence microscopy: imaging through turbid layers[J]. Opt Lett, 2010, 35(8): 1245-1247.
- 19 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]. Opt Eng, 2013, 52(11): 113104.
- 20 Sun Cunzhi, Chen Ziyang, Pu Jixiong. Modulating the amplitude of scattering light for focusing[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0829001.  
孙存志, 陈子阳, 蒲继雄. 调制散射光束的振幅实现聚焦[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0829001.
- 21 Wang Xiaozhang, Li Qi, Zhong Wen, *et al.*. Drift behavior of airy beams in turbulence simulated by using a liquid crystal spatial light modulator[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1213001.

- 王晓章, 李琦, 钟文, 等. 液晶空间光调制器模拟艾里光束在湍流中的漂移[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1213001.
- 22 Junming Leng, Xinzhu Sang, Binbin Yan. Speckle noise reduction in digital holography with spatial light modulator and nonlocal means algorithm[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(04): 040301.
- 23 Du Yanli, Ma Fengying, Gong Qiaoxia, *et al.*. Optical microscopic imaging technology based on spatial light modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 2(51): 020002.
- 杜艳丽, 马凤英, 弓巧侠, 等. 基于空间光调制器的光学显微镜成像技术[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 2(51): 020002.
- 24 Vellekoop I M, Mosk A P. Phase control algorithms for focusing light through turbid medium[J]. Opt Commun, 2008, 281(11): 3071-3080.
- 25 Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. Opt Lett, 2007, 32(16): 2309-2311.

栏目编辑: 刘丰瑞