

调制散射光束的振幅实现聚焦

孙存志 陈子阳 蒲继雄

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要 光束通过生物组织白色涂料等散射介质后将发生散射, 实现对散射光束进行整形和控制具有重要的意义。使用振幅调制实时反馈的方法, 对入射到散射样品的相干光的振幅进行预调整, 探测器实时读取散射光斑数据作为反馈依据, 以此调制空间光调制器上的对应区域, 进一步补偿由散射介质引起的振幅失调。实验结果表明, 目标位置光强得到显著增加, 其能量平均值是调制前散射区域能量平均值的 11 倍。

关键词 散射; 反馈; 振幅调制; 光束聚焦; 优化算法

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0829001

Modulating the Amplitude of Scattering light for Focusing

Sun Cunzhi Chen Ziyang Pu Jixiong

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract Light will be scattered when passes through turbid media such as white paint or human tissue. It is of great significance for modulating and controlling the scattering light. The real-time amplitude modulation and feedback method is used to compensate the amplitude disorder produced by the turbid media. The light intensity of a certain area can be strengthened by introducing a pre-modulation on the incident light. According to the real-time feedback data from the detector, the amplitude disorder can be better compensated by controlling the amplitude of light on certain area of the spacial light modulator. The experimental result shows that the modulated intensity can be 11 times that without modulation.

Key words scattering; feedback; amplitude modulation; beam focusing; optimization algorithm

OCIS codes 290.4210; 040.1520; 100.3190

1 引 言

激光光束的深聚焦在光学成像技术^[1]中有着重要的意义, 聚焦光斑在传输过程中携带的光动量和能量被应用在光学微操控领域^[2]。另外, 聚集光斑小尺寸、高能量的特点可以实现对材料表面结构的精确控制, 在光学外科手术和光学刻蚀^[3]等领域得到应用。最近, 蓬勃发展的分子生物学、胶体学和纳米技术等都依赖于激光光束的深聚焦, 光学显微和光学微操控依赖于将入射束光聚焦成很小的聚焦点的能力。然而, 因为散射介质存在的多重散射作用, 光束不能在非均匀介质, 诸如白纸、白色涂料(如

ZnO、TiO₂ 等)甚至是人体组织细胞间顺利地传播, 光束被散射偏离了原有的聚焦光传输方向。多重散射破坏了入射相干光束的空间的相干性, 光束通过多重散射后相位和传输方向发生变化, 在接收面上因为空间叠加而光强加强或者空间相消而出现光强削弱, 散射光斑变得不均匀。将降低超声波和微波传输过程中失真的成功方法^[4]应用于光学领域, 使用空间光调制器(SLM)对波前整形补偿散射介质引起的失真, 实现散射光束的重新聚集。国外学者研究结果显示对入射相干光束预先整形可以使散射光重现聚焦成一点^[5-9], 并对散射介质构建传输矩

收稿日期: 2014-04-14; 收到修改稿日期: 2014-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(61178015, 11304104)

作者简介: 孙存志(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光束整形方面的研究。E-mail: 992049627@qq.com

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

(通信联系人, 中国光学学会会员号: S042011102S)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

阵实现对散射光的控制,取得了较好的效果。目前国内研究尚处于模拟阶段^[10]。本文通过控制一定区域内入射光波波振面起伏来补偿因介质多重散射引起的光波波振面失调^[11],达到对散射光波整形的目的。最终光束穿过散射介质后,在 CCD 上形成能量集中的光斑。

2 实验装置

实验装置示意图如图 1 所示。竖直偏振的 He-Ne 光经过 $\lambda/4$ 玻片变成圆偏振光经过分束器(BS)和竖直偏振的偏振片 P1,偏振光入射到振幅型(LCR2500)空间光调制器(分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$,响应时间为 16 ms)上,经空间光调制器反射,垂直入射到偏振片 P2 上,偏振片 P2 的偏振方向和 P1 垂直。使用透镜调整 SLM 上加载的图像和 CCD 上接收到图像比例^[12],透镜在系统中起着调节 SLM 像素在 CCD 上成像尺寸的作用,同时该透镜对光束有着收束的作用。CCD 接受面放置在 SLM 的等效面上,并且 CCD 上的像素单元与 SLM 上的像素单元等比例对应。偏振光经过散射介质后,散射光斑被 CCD 接收。在计算机上显示 CCD 接收到的散射光强分布,分析接收到的光斑图像亮度值,以此对应光强值。空间光调制器调制区域被分割成 $N \times N$ 个单元,在反馈过程中就是对应着 N^2 个调制单元。将每个单元对应成像在 CCD 接收面上。改变每个单元对应的灰度值,CCD 接收面上的图像能量分布将发生变化,这种变化就是对入射到散射介质的光波波前预调制。当被调制的光束入射到散射介质相应区域补偿该区域因为散射介质存在造成的波面失调。光波得到整形,CCD 对应单元的光强随之发生变化。以此循环,至达到目标光强分布。

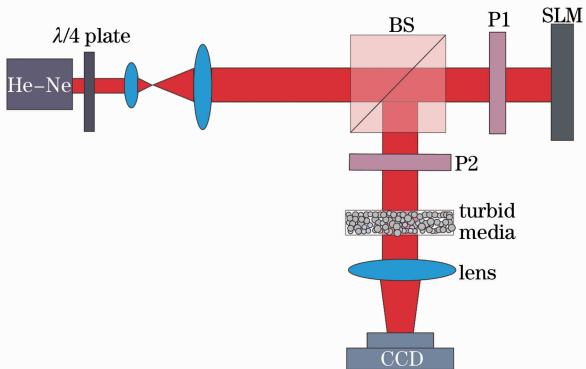


图 1 反馈装置图

Fig. 1 Setup of feedback loop

3 反馈算法及实验结果

实验中使用的散射介质对入射光束能量几乎不吸收。实现目标位置处光强的增强是以被调制区域内其他位置处光强的削弱转移为前提。目标位置电场可以表示为

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

式中 A_n 为入射光振幅值, ϕ_n 为入射光相位, 矩阵元素 t_{mn} 为加载到 SLM 上的振幅调制。被调制区域内目标位置为 m , 该点电场被看作一个通信通道。区域内其他位置 n 点的电场信号与 m 点电场关系由矩阵元素 t_{mn} 组成的归一化变换矩阵描述, 该矩阵可以看作对入射信号光各个信道的预调制。本实验中, 该变换矩阵可以用加载在 SLM 上图像的灰度值来等效表示。从(1)式可以看出, 被调制的区域越大, 划分的单元 N 越多, 被调制的信道越多, m 点处叠加的电场越大, 则得到的目标光强 $I_0 = |E_m|^2 = \frac{1}{N} \left| \sum_n^N t_{mn} A_n \exp(i\phi_n) \right|^2$ 就会越强, 对应 CCD 上图像的亮度越高。实验中通过反馈法寻找最优化灰度分布的过程可以看作是寻找以元素 t_{mn} 组成的传输矩阵的过程。

实现反馈过程需要一个合适的散射介质、空间光调制器、探测装置还有反馈算法。选取适当的散射介质, 破坏入射光的相干性, 使入射光完全被打乱, 散射介质不能过厚, 否则光束在散射过程中传输

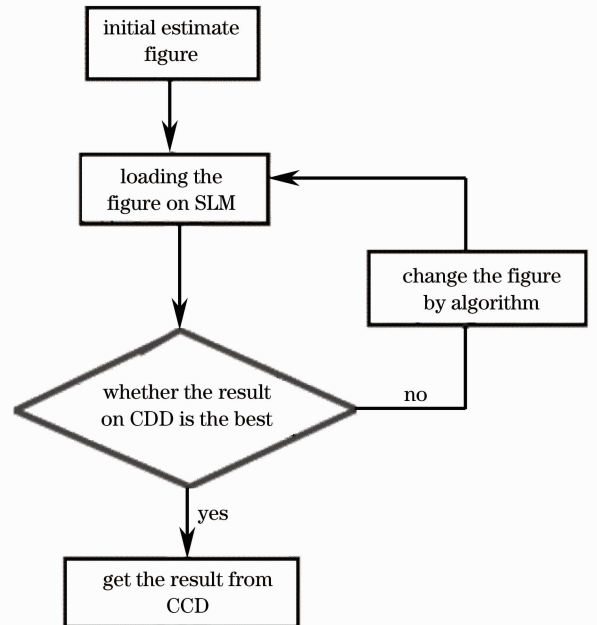


图 2 反馈过程的原理框图

Fig. 2 Block diagram of experimental process

方向发生反转,当光束反转或者无法通过介质时,探测器对光束变化将会被淹没在背景噪声里,影响反馈过程的顺利进行。本次实验中使用的散射介质是4片腐蚀的玻璃片叠加得到的,其中一片对入射光有一定的散射作用,不能代替生物组织等散射样品,但将多片重叠在一起,入射光就会被明显散射,以此代替真实的散射物体。

图2为反馈过程原理框图。入射光被空间光调制器在二维(2D)像素空间划分为 $N \times N$ 个像素点。反馈过程主要分为以下步骤:1)计算机初始一副 N 行 N 列且灰度值在 $[0 \sim 1]$ 随机分布的单元组成的灰度图并加载到SLM上;2)CCD上对应区域的亮度对应发生变化,读取CCD图像亮度等效为其光强值,将其和目标值进行比较,判断光强分布是否更加接近目标得到光强分布,根据判断结果同时调制这副 N^2 个矩形单元组成的随机图像的灰度值,由算法按照一定的规则调整每个单元灰度值变化;3)使用CCD读取散射图像,重复步骤2)。使得变化后的灰度图对散射光的调制结果更好地趋近于目标,

这个过程不断以致最终找到最优解。评价目标点被补偿优劣可以由目标函数 ϵ_i 来评价,其表达式为

$$\epsilon_i = \sum_{N \times N} [I_{\text{exp}}(x, y) - I_d(x, y)]^2, \quad (2)$$

式中 I_{exp} 为目标得到光强分布, I_d 为第 i 次迭代时,探测器接收到的散射光的光强分布值。很显然,目标函数 ϵ_i 的值越小,探测值越接近目标分布,反之亦然。使用 $\text{sinc}(x)$ 函数的灰度分布作为目标图像,选取该函数的目的是以 $\text{sinc}(x)$ 函数极大值对噪声具有较好的抑制作用,同时在目标值中加入了 $[0 \sim 0.2]$ 均匀随机值以平衡背景噪声对反馈过程的干扰。使用诸如粒子群算法^[13]、模拟退火算法和蚁群算法等,可以实现反馈过程,本文使用的是粒子群算法。

对SLM加载调制图需要反应时间,CCD接收到散射光斑也需要时间积累。这些因素都限制了反馈速度的提高,本次实验达到较好结果需要10 min左右。

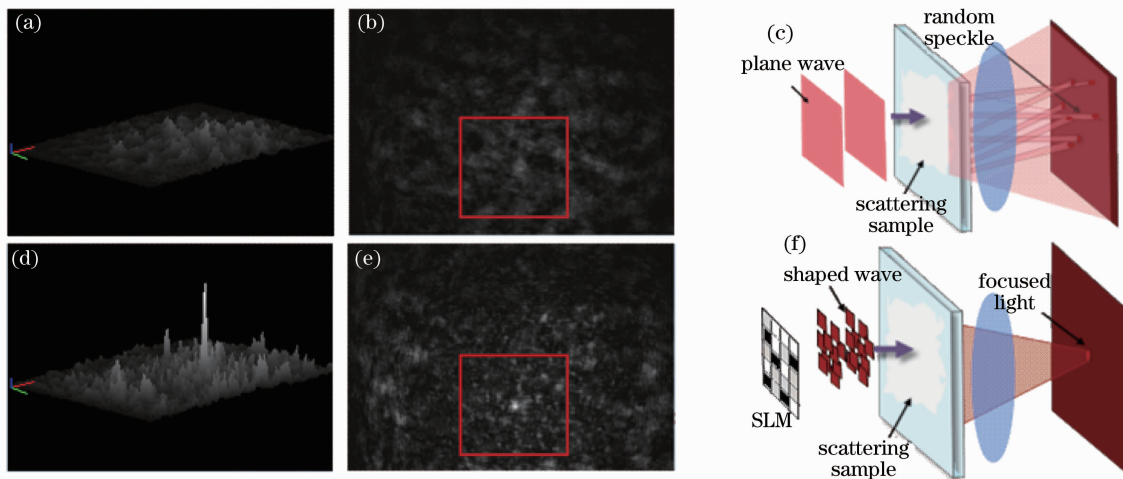


图3 (a)、(b)平面波被散射后的光强分布三维图、二维图和(c)对应该过程的示意图;
(d)、(e)反馈后得到的光强分布图和(f)对应该过程的示意图

Fig. 3 (a), (b) 3D and 2D figures of the scattered plane wave intensity and (c) schematic diagram of the process;
(d), (e) light intensity distributions after the feedback process and (f) schematic diagram of the process

图3对调制前后的情况作了对比,对比(b)、(e)可以明显分辨出被调制点光强亮度的增加。相比图3(b)可以看出图3(e)中光斑加强位置附近区域暗斑增加。通过CCD读数,被调制后的结果显示被调制区域的总光强也有增加,这一现象在加入散射介质后出现,可以解释为散射介质使得调制区域外的光波转移到了调制区域内。图4为CCD接收的优化之后散射光的光强图,对应图3(e)中被方框标出的区域,目标位置处光强得到显著增强。CCD读

数显示,图4中对应数值为2048以上的区域光强平均值是图3(b)调制区域光强平均值的11倍,调制后光斑最大值是调制前不同坐标位置处光斑能量最大值的3倍。并且从图中可以看出,目标位置处光能量加强是该区域其他位置暗斑区域增加,能量转移的结果。补偿后,目标位置能量增强,其他位置能量减弱。

图4左下角标出了被调制结果的尺度。聚焦光斑的精细程度受到空间光调制器调制方格单元尺

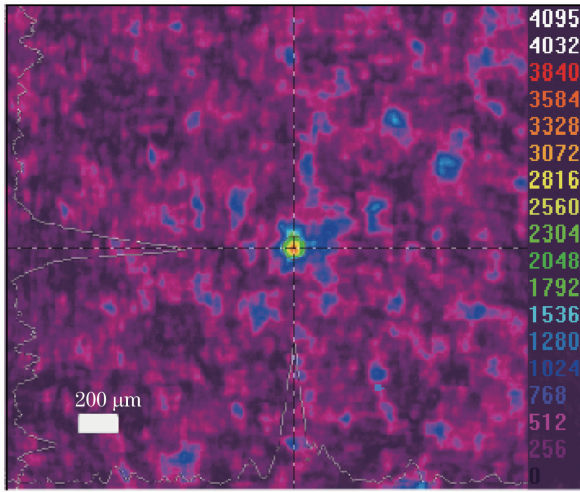


图4 优化之后的光强分布

Fig. 4 Intensity distribution after the optimization procedure

寸、衍射和噪声的影响。但是并非计算区域被划分得越多越好,需要保证每次循环变化后 CCD 接收结果要压制背景噪声的影响。过小的调制单元无法突破衍射的限制,处理方法是将散射介质放大,在更小的面积内调制,从而得到更加精细的结果。图4右侧的数值标出了图中不同颜色对应的光强大小。

4 平衡背景噪声

光斑分析仪显示,目标位置临近区域存在背景噪声,背景噪声会影响程序的收敛速度甚至出现错误的结果。如果能抑制背景噪声,不仅可以提高光强对比度,而且光能量也会更加集中,最大光强也会增加。对目标函数作如下改进:

$$\epsilon_i = \sum_{N \times N} [I_{\text{exp}}(x, y) + r - I_d(x, y)]^2, \quad (3)$$

式中目标光强分布加入均匀随机数 r , 实现区域内随机噪声的补偿。整体来看,评价函数值快速降低,提高收敛速度。图5为加入不同取值范围的随机噪声得到的反馈结果。图5(a)~(c)对应均匀随机数的范围分别是 $[0 \sim 0.1]$ 、 $[0 \sim 0.3]$ 、 $[0 \sim 0.2]$,用光束分析仪读取最大接收数值,分别为(a) 3.31×10^3 , (b) 3.50×10^3 , (c) 3.83×10^3 (单位为1)。从图中可以看出,因为选取合适的随机数平衡背景噪声,接收到的最大光斑数值得到提高,相邻区域内其他光斑也得到了抑制,区域变得平滑。图5(a)~(c)左侧 y 坐标上光强曲线起伏逐渐变得平滑,最大位置变得更加突出。说明对目标函数的改进是有效的。

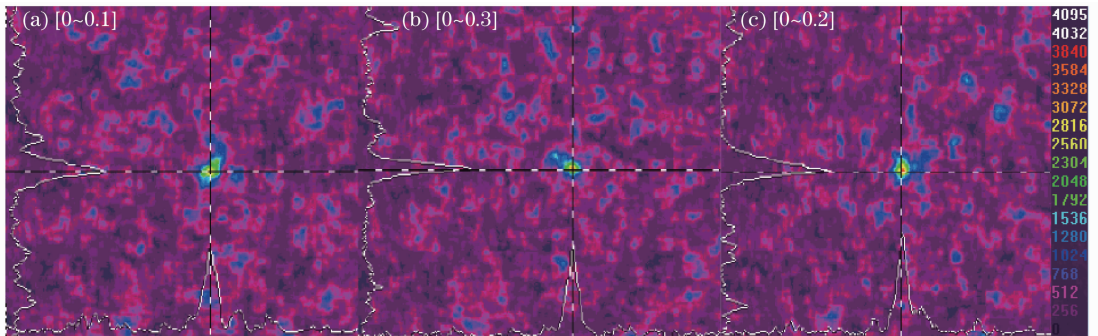


图5 加入不同随机数平衡背景噪声得到的光强分布。光强最大值分别为(a) 3.31×10^3 , (b) 3.50×10^3 , (c) 3.83×10^3

Fig. 5 Intensity distributions after adding different random numbers to balance background noises. The maximums are (a) 3.31×10^3 , (b) 3.50×10^3 , (c) 3.83×10^3 , respectively

5 结 论

使用振幅调制的方法实现对入射到散射介质光波波前的预调制实现对散射光整形。结果显示,相干光束被介质散射后,得到的非相干光被整形聚焦到一点目标位置光强得到显著增加,其能量平均值是调制前散射区域能量平均值的11倍。该实验结果表明,被调制区域可视为由多个信道组成,通过对加载到SLM上的图像进行编码,实现对每个信道

的调制,可以对低相干性散射光调制,实现在特定位置处光强加强。光强加强的多少受到被调制区域大小和加入的散射介质影响。调制结果的精细程度受到被划分的调制单元尺寸的影响。

参 考 文 献

- 1 S W Hell, R Schmidt, A Egner. Diffraction-unlimited three-dimensional optical nanoscopy with opposing lenses [J]. Nature Photon, 2009, 3(7): 381-387.
- 2 K Dholakia, P Reece. Optical micromanipulation takes the hold

- [J]. *Nano Today*, 2006, 1(1): 18–27.
- 3 E McLeod, C B Arnold. Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres [J]. *Nature Nanotech*, 2008, 3(7): 413–417.
- 4 S H Simon, A L Moustakas, M Stoytchev, *et al.*. Communication in a disordered world [J]. *Phys Today*, 2001, 54(9): 38–43.
- 5 I M Vellekoop, A P Mosk. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(16): 2309–2311.
- 6 I M Vellekoop, A P Mosk. Phase control algorithms for focusing light through turbid media [J]. *Opt Commun*, 2008, 281(11): 3071–3080.
- 7 I M Vellekoop, A P Mosk. Universal optimal transmission of light through disordered materials [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 101(12): 120601.
- 8 D B Conkey, A N Brown, A M Caravaca-Aguirre, *et al.*. Genetic algorithm optimization for focusing through turbid media in noisy environments [J]. *Opt Express*, 2012, 20(5): 4840–4849.
- 9 S M Popoff, G Lerosey, R Carminati, *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.
- 10 X P Shao, T F Wu, C M Gao. Simulation on light refocusing through a highly scattering turbid medium using circular Gaussian distribution model [J]. *Opt Eng*, 2013, 52(11): 113104.
- 11 Zhu Lili, Xie Wenming, Li Hui. Spectrum analysis of ultrasound-modulated optical signal [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(s1): s115001.
朱莉莉, 谢文明, 李 晖. 超声调制光学信号的频谱分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(s1): s115001.
- 12 Zhao Man, Jiang Bo, Fan Xiuying, *et al.*. Measurement and analysis on the modulation transfer function of CCD camera [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 071201.
赵 曼, 姜 博, 范秀英, 等. CCD相机调制传递函数的测试分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(7): 071201.
- 13 Liu Yin, Zhang Yanjun, Li Da, *et al.*. Hybrid algorithm particle swarm optimization and Levenberg-Marquardt for Brillouin scattering spectrum of distributed sensing systems [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0415001.
刘 银, 张燕君, 李 达, 等. 粒子群优化和拉凡格氏混合优化算法提取传感布里渊散射谱特征的方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0415001.

栏目编辑：史 敏