

文章编号:1002-2082(2019)01-0063-05

偏振相移与相位共轭结合的散射光聚焦技术研究

张凯,薛彬,王志洋,吴翰钟

(天津大学海洋科学与技术学院,天津300072)

摘要:散射介质对光的随机散射作用是制约其光学聚焦和成像的重要因素,光学相位共轭技术能够通过对散射光场共轭还原实现透过散射介质的光学聚焦和成像,其中散射光场相位的获取是共轭还原的核心。阐述了偏振相移的基本原理,将偏振相移与相位共轭技术相结合,设计了新的基于偏振相移的数字光学相位共轭系统。采用633 nm的HeNe激光器作为系统光源,毛玻璃作为散射介质开展散射光聚焦实验研究。实验结果表明:该装置能够成功实现透过散射介质的光学聚焦,其中聚焦点与背景光强的比值可达约400倍。

关键词:相位共轭;偏振相移;数字全息;散射光聚焦

中图分类号:O436.1

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201940.0101011

Focusing of scattering light by combining polarization phase shifting and digital optical phase conjugation

ZHANG Kai, XUE Bin, WANG Zhiyang, WU Hanzhong

(School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The random scattering effect of scattering medium on light is an important factor that restricts its optical focusing and imaging. The optical phase conjugation technique can realize optical focusing and imaging through the scattering medium by conjugate reduction of scattered light field, where the acquisition of scattered light field phase is the core of conjugate reduction. We expounded the basic principle of polarization phase shift, combined the polarization phase shift with the phase conjugation technique, and designed a novel digital optical phase conjugation system based on polarization phase shift. A 633 nm HeNe laser was used as the system light source, and frosted glass was used as the scattering medium to conduct scattered light focusing experiments. The experimental results show that the device can successfully achieve optical focusing through the scattering medium, and the ratio of the focal point to the background light intensity can reach about 400 times.

Key words: phase conjugation; polarization phase shifting; digital holography; focusing of scattering light

引言

由于光经过散射介质发生随机散射作用,使得其难以直接实现光学聚焦和成像。光学相位共轭技术是实现散射介质光学聚焦和成像的重要手段之

一,其利用全息记录和再现实现散斑的相位提取和共轭还原,从而抑制光散射作用,实现光学聚焦和成像。相比于波前整形和传输矩阵方式,其具有计算量小、无需迭代、反演速度快的优点,有望实现散射

收稿日期:2018-09-17; 修回日期:2018-11-01

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC1401203);国家自然科学基金青年科学基金(61505140);天津市自然科学基金(18JCYBJC17100)

作者简介:张凯(1993—),男,硕士研究生,主要从事光学成像方面的研究。E-mail:txzhangkai@tju.edu.cn

介质内部快速实时聚焦和成像^[1-4]。在数字光学相位共轭技术研究方面,Meng Cui 等设计了数字光学相位共轭系统(digital optical phase conjugation, DOPC),通过控制电光调制器(electro-optic modulator, EOM)改变参考光相位,利用四步相移法测得了散斑相位并实现了透过散射介质的光学相位共轭聚焦,验证了其散射抑制作用^[5]。Wang Yingmin 等利用数字光学相位共轭系统结合超声调制实现了散射介质内部的荧光目标成像^[6]。Suzuki 等利用超声编码数字光学相位共轭技术首次实现了反射模式下的散射介质光学聚焦,进一步推动了该技术的实用化^[7]。Ryu J 等通过调节相位图实现了透过散射介质的可变聚焦和三维成像,提高了相位共轭聚焦成像的可控性^[8]。

然而在实现散射介质聚焦及成像方面,国内学者对于波前整形和传输矩阵技术的应用研究较多,数字光学相位共轭系统的应用研究却鲜有报道^[9-13]。本文提出了一种新的偏振相移与相位共轭结合的实验装置,能够实现透过散射介质的光学聚焦和成像。偏振相移作为一种获取光相位的重要手段,相比于传统的四步相移,无需使用电光调制器,只需调节波片角度来控制光相位,控制方式简单易行。本文分析了偏振相移的基本原理,设计了新的基于偏振相移的数字光学相位共轭系统,通过调节参考光的偏振方向改变物光和参考光的相位差,利用偏振四步相移获取散斑光相位。实现了透过毛玻璃的散射光光学聚焦,聚焦点的峰背比可达约 400 倍。

1 偏振相移基本原理

在同频相干光的光相位提取中,可以忽略光频

量,仅从光相位的改变方面进行分析研究。如图 1 所示,设两束准直平行光沿 z 轴方向传播,光波面为 xy 平面,其偏振方向均沿 x 轴方向,复振幅可以分别表示为 $E_1(x, y) = a(x, y)e^{i\varphi_1(x, y)}$, $E_2(x, y) = b(x, y) \cdot e^{i\varphi_2(x, y)}$, $\varphi_2(x, y) - \varphi_1(x, y) = \varphi(x, y)$,一束光经过 $1/4$ 波片,其快轴与 x 轴成 $\pi/4$ 角,另一束光经过 $1/2$ 波片,其快轴与 x 轴成 θ 角。设 E_1 和 E_2 的琼斯向量分别为 $\begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} E_2 \\ 0 \end{bmatrix}$,此时 $1/4$ 波片和 $1/2$ 波片的琼斯矩阵分别为 $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix}$,则两束光合束后形成光场的琼斯向量为^[16-17]:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

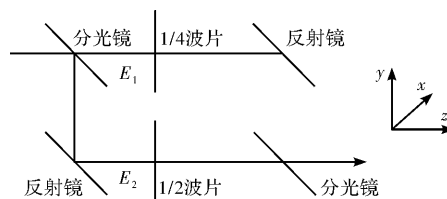


图 1 偏振相移干涉原理图

Fig. 1 Schematic of polarization phase shifting

一般相机仅能接收光强信息,上述合成光场的光强可以表示为

$$I(x, y) = a^2(x, y) + b^2(x, y) + \sqrt{2} \times a(x, y)b(x, y) \cos[\varphi(x, y) - 2\theta] \quad (2)$$

转动 $1/2$ 波片在不同的 θ 角,即可得到具有不同相移的干涉图样。设 θ 角分别取 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$, 则有

$$I_1(x, y) = a^2(x, y) + b^2(x, y) + \sqrt{2}a(x, y)b(x, y)\cos\varphi(x, y) \quad (\theta=0) \quad (3)$$

$$I_2(x, y) = a^2(x, y) + b^2(x, y) + \sqrt{2}a(x, y)b(x, y)\sin\varphi(x, y) \quad (\theta=\pi/4) \quad (4)$$

$$I_3(x, y) = a^2(x, y) + b^2(x, y) - \sqrt{2}a(x, y)b(x, y)\cos\varphi(x, y) \quad (\theta=\pi/2) \quad (5)$$

$$I_4(x, y) = a^2(x, y) + b^2(x, y) - \sqrt{2}a(x, y)b(x, y)\sin\varphi(x, y) \quad (\theta=3\pi/4) \quad (6)$$

经过计算可以得到待测相位分布 $\varphi(x, y)$ 为

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{I_2(x, y) - I_4(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad (7)$$

2 偏振相移数字光学相位共轭系统设计

基于偏振相移和相位共轭原理,设计并搭建

了偏振相移数字光学相位共轭系统,实验装置如图 2 所示,整个相位共轭还原过程分为相位提取和相位共轭两部分。

相位提取过程如图 2(a)所示,系统光源为 633 nm 的 HeNe 激光器(Thorlabs HRS015B),其发出的光束经过光隔离器、 $1/2$ 波片和偏振片后将其偏振方向调整为水平方向,利用分光镜 1 将其分为两

束激光,一束光作为物光经过分光镜 2、物镜 1 (25X, NA0.4)、散射片(毛玻璃)、物镜 2 (25X, NA0.4)、偏振片和 1/4 波片后被反射镜反射进入分光镜 3;另一束光作为参考光经过透镜 1 ($f=15.8\text{ mm}$)、滤光片、透镜 2 ($f=250\text{ mm}$) 和 1/2 波片后与物光于分光镜 3 处合束,一起进入 DOPC 系统。此时,参考光为线偏振光,调节 1/4 波片的快轴角度,使得进入 DOPC 的物光变为圆偏光,物光与参考光在 SLM 表面发生干涉作用。其中经过准直扩束的参考光的光束直径约为 18 mm ,入射光和参考光均垂直入射空间光调制器 (spatial light modulator, SLM),DOPC 系统中的 SLM 经过透镜 3 与 CMOS 相机构成物像关系,CMOS 相机能够采集到 SLM 上的物光和参考光相互作用的干涉图样。调节 1/2 波片的快轴角度,则能够改变参考光的光偏振方向,从而改变与物光的相位差,通过 CMOS 相机记录 1/2 波片转动角度分别为 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ 时参考光与物光的干涉图,利用(7)式便能够计算得到物光散斑的相位分布。

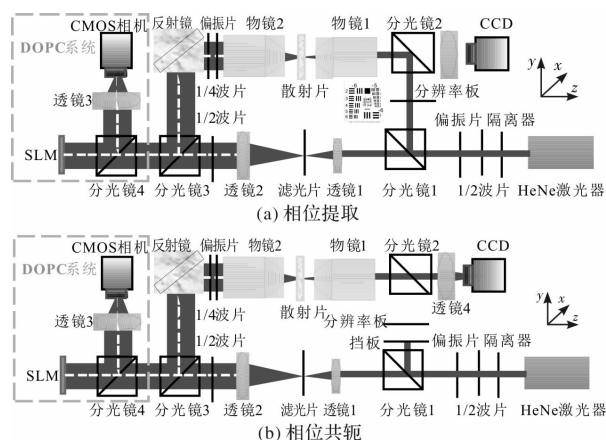


图 2 偏振相移数字光学相位共轭系统实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for digital optical phase conjugation system based on polarization phase shifting

相位共轭即时间反演过程如图 2(b)所示。在物光路径放置挡板,并在 SLM 加载前述计算得到的散斑共轭相位,调节参考光光强和偏振方向使得 SLM 的相位调制效率最高。参考光垂直入射 SLM,反射光被调制为与原散斑相位共轭的光波,可以实现散射光的共轭还原。相位共轭光反向经过散射板之后,利用 CCD 相机检测时间反演的光波信号,并与未进行调制的直接反射光进行比较。图 2 所示的分辨率板为 USAF1951,试验中先去掉该分辨率板,测试偏振相移数字光学相位共轭系统能否透过散射介质实现光学聚焦,然后在系统

中置入分辨率板,测试该系统能否透过散射介质对分辨率板图案进行成像。

图 2 所示的 DOPC 系统包括 SLM (Holoeye, PLUTO-VIS-016)、分光镜、CMOS 相机 (PCO, EDGE 3.1) 和透镜 3 ($f=100\text{ mm}$), SLM 安装在一个六自由度的组合调节架上,实验中采用的空间光调制器分辨率为 $1\,920\text{ pixel} \times 1\,080\text{ pixel}$,像素尺寸 $8\text{ }\mu\text{m} \times 8\text{ }\mu\text{m}$ 。CMOS 相机最高分辨率为 $2\,048\text{ pixel} \times 1\,536\text{ pixel}$,像素尺寸 $6.5\text{ }\mu\text{m} \times 6.5\text{ }\mu\text{m}$,实验中仅取 $1\,920\text{ pixel} \times 1\,080\text{ pixel}$ 图像区域进行分析研究。由于 SLM 和 CMOS 相机像素尺寸存在差异,为了实现 SLM 和 CMOS 相机像素的一一对准,能够准确提取 SLM 表面的散斑相位,所以需要调节透镜 3 使得 SLM 和 CMOS 相机传感器平面互为物像关系。根据理论计算,凸透镜的物像关系满足 $u+v=f(M+1)^2/M$ (u 为物距, v 为像距, f 为焦距, M 为放大倍数)。由 SLM 和 CMOS 相机的像素尺寸可知,目标放大倍数为 $M=6.5/8=0.8125$,实验中透镜 3 焦距为 100 mm ,所以需调节 CMOS 相机和 SLM 的空间直线距离约为 404 mm 。

3 实验结果及分析

由于在图 2(a)所示的物光相位提取过程中平面物光经过散射片时光线被散射,出射光形成散斑图案,所以在 SLM 表面物光和参考光干涉时形成散斑干涉条纹。CMOS 相机采集到的偏振相移干涉图如图 3 所示,其中(a)、(b)、(c)、(d)分别对应 1/2 波片转动 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ 时 SLM 表面物光和参考光的干涉图样。由前述理论分析可知,当 1/2 波片转动 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ 时,参考光的偏振态发生变化,对应物光和参考光的相位差和干涉强度会发生改变。从图 3 可以明显观察到,不同偏振相移干涉图中干涉强度变化导致的亮暗条纹变化。此外,实验中观察到随着 1/2 波片角度的连续转动,干涉条纹呈现重复变化趋势,其变化周期对应转动角度为 π ,与理论计算情况相吻合。利用 4 幅相移干涉图根据(7)式进行计算,可以得到如图 4 所示的物光散斑相位图。

在图 2(a)所示的实验装置中,先不放置分辨率板,测试该装置能否透过散射介质实现光学聚焦。未启用 DOPC 系统时,将 SLM 上加载空相位,参考光照射在 SLM 上,其反射光为未调制光,未调制光直接照射在散射片后出射光被 CCD

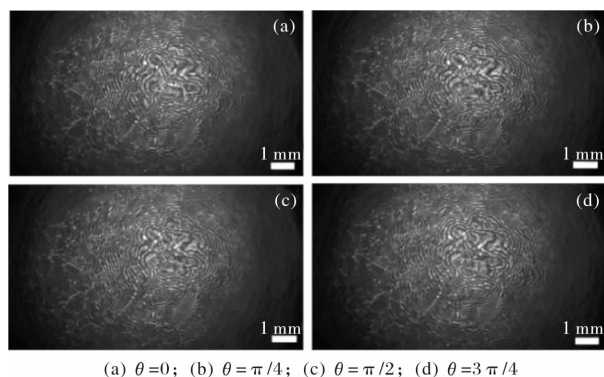
(a) $\theta=0$; (b) $\theta=\pi/4$; (c) $\theta=\pi/2$; (d) $\theta=3\pi/4$

图3 不同偏振态的相移干涉图

Fig. 3 Interference patterns in different polarization states

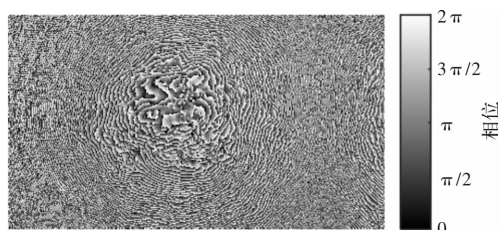


图4 散斑相位图

Fig. 4 Phase map of speckle pattern

相机采集,呈现一片杂乱的散斑信号如图5(a)所示。当启用DOPC系统时,在SLM上加载与图4共轭的散斑相位,参考光照射在SLM表面上后被调制,形成的时间反演光通过散射介质,理想情况下出射光变为与原入射光相位共轭的类平行光束。在经过透镜4之后,未调制出射的散斑信号在透镜焦点处仍为一片散乱的点,类平行光束经过透镜之后则会在焦点位置汇聚形成如图5(b)所示的聚焦点。改变散射片的位置,则CCD相机表面的光学聚焦效果则会消失。为了测试光学聚焦效果,实验测试了散射片在不同位置的光学聚焦,其聚焦点与背景光强的比值数据见表1所示,根据表1数据,该系统透过散射介质实现光学聚焦,其聚焦点和背景光强的比值(峰背比)可达约400倍。

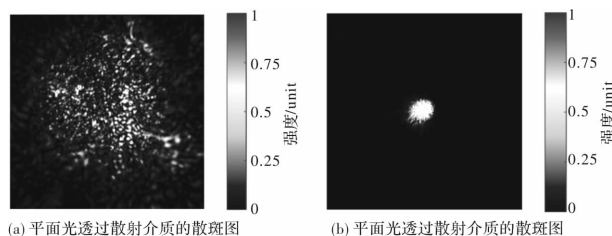


图5 平面光和相位共轭光通过散射介质对比图

Fig. 5 Comparison of plane light and phase conjugation light passing through scattering medium

表1 不同散射片位置的峰背比

Table 1 Focus to background ratios in different places of scattering media

散射片位置/mm	聚焦点平均光强	背景平均光强	峰背比
0.056	55 249	121	457
2.020	56 526	143	395
4.035	56 016	133	421
6.027	59 828	154	388
8.010	51 189	127	403

此外,在图2(a)的实验装置中加入分辨率板,作为待成像目标,经过上述相位提取过程可以得到包含成像信息的物光散斑信号相位,取该共轭相位加载在SLM上,参考光照射后其还原信号便能够透过散射介质在CCD相机上观察到原目标图像。实验中将USAF 1951分辨率板作为待成像目标,如图6(a)所示,参考光照射在图中红色圆圈区域内。利用本文设计的偏振相移光学相位共轭系统进行相位共轭还原,可以得到透过散射介质后该分辨率板的成像图案,如图6(b)所示,图中不同颜色代表接收到的不同光强信息,白色虚线框为理想的暗条形应该出现的位置。从图6(b)中可以看出虽然利用该系统能够让透过散射介质光呈现特定的目标图像,但该图像仍然存在一定的图像畸变和成像误差。

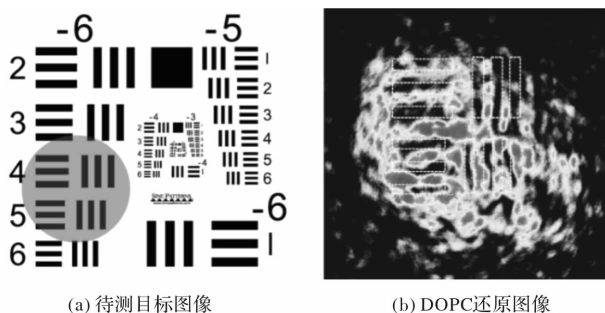


图6 利用DOPC实现透过散射介质成像

Fig. 6 Imaging through scattering media using DOPC system

4 结论

本文围绕散射光聚焦技术,介绍了一种新的基于偏振相移的数字光学相位共轭系统,该系统无需电光调制器,操作简便,并实现了透过散射介质的光学聚焦和成像。基于该研究基础,未来可以改进系统设计,利用空间偏振结构将4种偏振相移干涉图组合于一张图片中进行实时处理,进一步缩短相位提取的时间,降低光相位抖动带来的影响,提高散射介质光学聚焦

和成像质量。

参考文献:

- [1] YANG Qiang, CAO Liangcai, ZENG Guofan. Progress in optical focusing techniques aiming to suppress scattering effect in biomedical tissues[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0901001.
杨强,曹良才,金国藩. 可抑制生物组织散射效应的光学聚焦技术研究进展[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0901001.
- [2] SHEN Y, LIU Y, MA C, et al. Focusing light through scattering media by full-polarization digital optical phase conjugation[J]. Optics Letters, 2016, 41(6): 1130-1133.
- [3] HORSTMAYER R, RUAN H, YANG C. Guide-star-assisted wavefront-shaping methods for focusing light into biological tissue[J]. Nature Photonics, 2015, 9(9): 563.
- [4] YANG Hong, HUANG Yuanhui, GONG Changshu, et al. Advances on techniques of breaking diffraction limitation using scattering medium[J]. Chinese Optics, 2014, 7(1): 1-25
杨虹, 黄远辉, 龚昌妹, 等. 散射介质超衍射极限技术研究进展[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 1-25.
- [5] CUI M, YANG C. Implementation of a digital optical phase conjugation system and its application to study the robustness of turbidity suppression by phase conjugation[J]. Optics Express, 2010, 18(4): 3444-3455.
- [6] WANG Y M, JUDKEWITZ B, DIMARZIO C A, et al. Deep-tissue focal fluorescence imaging with digitally time-reversed ultrasound-encoded light[J]. Nature Communications, 2012, 3: 928.
- [7] SUZUKI Y, TAY J W, YANG Q, et al. Continuous scanning of a time-reversed ultrasonically encoded optical focus by reflection-mode digital phase conjugation[J]. Optics Letters, 2014, 39(12): 3441-3444.
- [8] RYU J, JANG M, EOM T J, et al. Optical phase conjugation assisted scattering lens: variable focusing and 3D patterning [J]. Scientific Reports, 2016 (6): 23494.
- [9] ZHANG Hongbo, ZHANG Xiren. Coherence of digital phase conjugation for implementing time reversal in scattering media[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(5): 111-117.
张洪波, 张希仁. 用于实现散射介质中时间反演的数字相位共轭的相干性[J]. 物理学报, 2018, 67(5): 111-117.
- [10] HE H, WONG K S. An improved wavefront determination method based on phase conjugation for imaging through thin scattering medium[J]. Journal of Optics, 2016, 18(8): 085604.
- [11] ZHAO Ming, ZHAO Meijing, SUN Chengwei, et al. Measurement and light focusing by transmission matrices of scattering media based on phase-only modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 368-375.
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): 368-375.
- [12] MAO Hang, TAO L, CHEN Liangyi. Application and development of adaptive optics to three-dimensional in vivo deep tissue fluorescent microscopy[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(6): 17-23.
毛珩, Tao Louis, 陈良怡. 自适应光学技术在深层动态荧光显微成像中的应用和发展[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 17-23.
- [13] YAN Zhaojun, YANG Pengqian. Simulation of layer oriented multi-conjugate adaptive optics system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(9): 213-218.
颜召军, 杨朋千. 层向多层共轭自适应光学系统的模拟[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 213-218.
- [14] DAI Qingqing, FAN Zhiguo, SONG Qiang, et al. Polarization defogging method for color image based on automatic estimation of global parameters [J]. Journal of Applied Optics. 2018, 39(4): 511-517.
代晴晴, 范之国, 宋强, 等. 全局参数自动估计的彩色图像偏振去雾方法[J]. 应用光学, 2018, 39(4): 511-517.
- [15] ZHAO Lujian, GAO Jun, BI Ran, et al. Polarization defogging method based on maximum and minimum intensity images [J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(3): 415-420.
赵录建, 高隽, 毕冉, 等. 基于最大和最小光强图像的偏振去雾方法[J]. 应用光学, 2017, 38(3): 415-420.
- [16] QIAN Kemao, MIAO Hong, WU Xiaoping. A real-time polarization phase shifting technique for dynamic measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(1): 64-67.
钱克矛, 缪泓, 伍小平. 一种用于动态过程测量的实时偏振相移方法[J]. 光学学报, 2001, 21(1): 64-67.
- [17] YU Daoyin, TAN Hengying. Engineering optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 494-499.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 494-499.