

# 相位共轭技术抑制散射及还原光场研究

刘迪维<sup>1,2</sup> 刘红林<sup>1</sup> 乔 木<sup>1,2</sup> 韩申生<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 采用数字相位共轭技术研究了散射介质中光场的还原特性。将散射介质简化为相幅随机调制面, 推导了三种相幅调制情况下的光场还原效果, 并给出数值模拟结果。结果表明在纯相位随机型调制或高斯曲线足够宽的高斯振幅相位随机型调制下, 可以得到理想的光场还原效果。在纯相位随机型调制下, 共轭波前记录精度越高、波前探测孔径越大, 光场还原效果越好。光场的还原过程可以容纳一定的噪声, 相对于光场相位的还原, 强度还原的抗噪能力更强。

**关键词** 成像系统; 相位共轭; 散射; 随机调制; 噪声

**中图分类号** O438 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0711002

## Scattering Effect Suppression and Optical Field Recovery by Phase Conjugation Technology

Liu Diwei<sup>1,2</sup> Liu Honglin<sup>1</sup> Qiao Mu<sup>1,2</sup> Han Shensheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The digital phase conjugation technology is used to investigate the optical field recovery characteristics in scattering media. The scattering medium is treated as a plane of phase and amplitude random modulation, the optical field recovery effect under three different modulation conditions is deduced theoretically, and a numerical simulation is performed. The results show that optical fields can be ideally recovered for the pure phase modulation or the Gaussian amplitude random phase modulation with a Gaussian curve wide enough. In pure phase modulation, higher wavefront recording precision and larger aperture size will result in better recovered optical fields. The optical field recovering can accommodate some noise, and the intensity recovering is more robust to noise than the phase recovering.

**Key words** imaging systems; phase conjugation; scattering; random modulation; noise

**OCIS codes** 110.1080; 090.1000; 260.1960

## 1 引 言

相位共轭技术<sup>[1-3]</sup>是对光波的相位进行时间和空间上的复共轭处理的技术,在数学上等价于对波前作复共轭运算,具备这种功能的装置称为相位共轭镜。经相位共轭镜作用得到的复共轭波,等同于时间反演波,可以沿原传播路径返回。基于这种特性,相位共轭技术可以用于补偿散射等扰动造成的光场畸变,还原生物图像信息,在生物光学成像应用中变得越来越重要<sup>[4-6]</sup>。一直以来,在生物组织内进行光学聚焦、传输能量是生物光学成像的关键。但由于多次散射效应<sup>[7]</sup>,光子在生物组织中会严重扩散,入射光可达深度和能量传输十分有限,限制了成像深度和质量。目前,一些实验采用相位共轭技术结合超声调制方法补偿散射造成的畸

**收稿日期:** 2016-01-06; **收到修改稿日期:** 2016-03-15

**基金项目:** 国家 863 计划(2014AA8XX2008)

**作者简介:** 刘迪维(1990—),男,硕士研究生,主要从事生物光学成像方面的研究。E-mail: ldw2013@siom.ac.cn

**导师简介:** 刘红林(1982—),女,博士,副研究员,主要从事生物光学成像方面的研究。E-mail: hlliu4@hotmail.com

(通信联系人)

变,实现了在散射介质内进行光学聚焦的目的<sup>[8-12]</sup>。

相位共轭波可以利用光折变效应等全息术方法<sup>[1,13-14]</sup>和受激布里渊散射<sup>[13-18]</sup>、四波混频<sup>[14,19-21]</sup>等非线性光学方法产生。传统的全息术方法中,散射场波前通过干涉图样被记录在光敏记录介质如光折变晶体中,当参考共轭光照射该光敏记录介质后,会产生相位共轭波<sup>[22]</sup>。由于光子与物质的相互作用,响应时间取决于介质原子或分子的响应时间,为皮秒量级,可用于实时探测<sup>[2]</sup>。但是采用这类方法获得的增益小于1,信噪比低,而且对光源和材料有特殊要求<sup>[11]</sup>。为克服上述问题,数字相位共轭技术<sup>[23-24]</sup>得到了快速发展。该方法先记录散射场波前的全息图,然后提取相幅信息<sup>[25-34]</sup>,通过计算机加载到空间光调制器(SLM)上,参考共轭光经SLM调制反射,产生相位共轭波。其优点是增益不受介质的限制,理论上可提供任意大的增益,而且无论对脉冲还是连续光源都适用<sup>[11]</sup>。

本文研究了数字相位共轭技术在散射介质存在的情况下对光场的还原效果。由于散射介质是十分复杂的体系,光在其中传播的波前不能像在自由空间中一样用惠更斯-菲涅耳原理<sup>[35]</sup>来解析表达。考虑到散射介质中光以场的形式与物质相互作用<sup>[7,35]</sup>,本文将散射介质简化为相幅随机调制面模型,从而可以用衍射原理来研究数字相位共轭技术抑制散射、还原光场的效果。从理论上推导了三种相幅调制方式下光场的还原,将数值模拟结果与理论结果进行比较。在上述模型下,进一步研究了共轭波前记录精度和孔径大小对光场还原的影响。最后,分别在相位共轭镜表面和随机调制面加入噪声,研究了噪声对光场还原的影响。

## 2 理论分析

将散射介质简化为相幅随机调制面,光场经过该调制面,相位和振幅会得到相应的调制,即可从惠更斯-菲涅耳原理出发进行相关的推导。图1为光场还原结构示意图,分为波前记录和相位复共轭两部分。波前记录阶段:入射光从源面 $X_s$ 出发自由传播到随机调制面 $X_1$ ,经相幅随机调制后,再自由传播到相位共轭镜 $X_2$ 处被记录。相位共轭阶段:将 $X_2$ 反射的相位共轭光自由传播到达 $X_1$ ,其相幅随机调制分布与波前记录阶段一致,调制后继续自由传播到源面 $X_s$ 处,得到还原后的光场。假设对相位共轭面波前的记录是理想的,在此假设条件下研究不同的相幅调制方式对光场还原的影响。实际上共轭波前记录精度、孔径大小等因素都会影响光场还原,会在后文讨论。

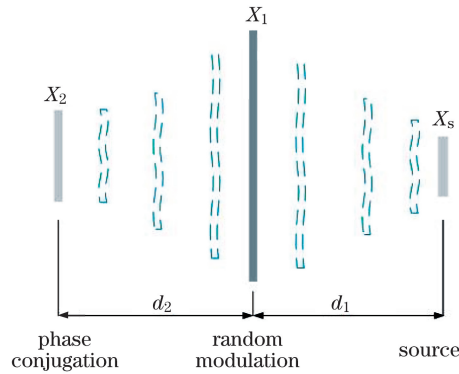


图1 光场还原结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure for optical field recovery

假设波前记录阶段从 $X_s$ 输入的光场为 $E(x_s)$ ,则 $X_2$ 处的光场 $E(x_2)$ 为

$$E(x_2) = \int dx_s dx_1 E(x_s) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x_s - x_1)^2\right] g(x_1) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d_2} (x_1 - x_2)^2\right], \quad (1)$$

式中 $x_s, x_1, x_2$ 分别为波前记录阶段 $X_s, X_1, X_2$ 处的坐标, $\lambda$ 为光波波长, $d_1$ 和 $d_2$ 分别为 $X_s$ 到 $X_1$ 和 $X_1$ 到 $X_2$ 的距离, $g(x_1)$ 为相幅随机调制函数。经相位共轭镜作用得到相位共轭光,在数学上等价于复共轭作用,因此反演回到 $X_s$ 的光场为

$$\int dx_2 dx'_1 E^*(x_2) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d_2} (x_2 - x'_1)^2\right] g(x'_1) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x'_1 - x'_s)^2\right] =$$

$$\begin{aligned} & \int dx_s dx_1 dx_2 dx'_1 E^*(x_s) \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x_s - x_1)^2\right] g^*(x_1) \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda d_2} (x_1 - x_2)^2\right] \cdot \\ & \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d_2} (x_2 - x'_1)^2\right] g(x'_1) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x'_1 - x'_s)^2\right] = \\ & \int dx_s dx_1 E^*(x_s) \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x_s - x_1)^2\right] \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x_1 - x'_s)^2\right] |g(x_1)|^2, \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $x'_1, x'_s$  分别为相位共轭阶段  $X_1, X_s$  处的坐标。假设相位共轭面  $X_2$  足够大, 则有

$$\int dx_2 \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda d_2} (x_1 - x_2)^2\right] \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d_2} (x_2 - x'_1)^2\right] = \delta(x_1 - x'_1), \quad (3)$$

式中  $\delta$  表示狄拉克分布函数。将(3)式代入积分可得(2)式。

下面讨论三种随机调制方式下的光场还原效果。

### 2.1 纯相位随机型调制

如果随机调制面为纯相位随机型, 随机调制函数可以表示为

$$g(x_1) = \exp[i2\pi \cdot \text{rand}(x_1)], \quad (4)$$

式中  $\text{rand}()$  表示  $[0, 1]$  区间内均匀分布的随机数, 则  $|g(x_1)|^2 = 1$ , 代入(2)式可得

$$\begin{aligned} & \int dx_s dx_1 E^*(x_s) \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x_s - x_1)^2\right] \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x_1 - x'_s)^2\right] |g(x_1)|^2 = \\ & \int dx_s dx_1 E^*(x_s) \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x_s - x_1)^2\right] \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x_1 - x'_s)^2\right] = \\ & \int dx_s E^*(x_s) \delta(x_s - x'_s) = E^*(x'_s). \end{aligned} \quad (5)$$

显然, 当随机调制面为纯相位型调制方式时, 光场可以被完全还原。

### 2.2 高斯振幅相位随机型调制

如果随机调制面为高斯振幅相位随机型, 随机调制函数为

$$g(x_1) = \exp[i2\pi \cdot \text{rand}(x_1)] \exp\left(-\frac{x_1^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

式中  $\sigma$  为高斯振幅调制的线宽, 则  $|g(x_1)|^2 = \exp\left(-\frac{x_1^2}{\sigma^2}\right)$ , 代入(2)式可得

$$\begin{aligned} & \int dx_s dx_1 E^*(x_s) \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x_s - x_1)^2\right] \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x_1 - x'_s)^2\right] |g(x_1)|^2 = \\ & \int dx_s dx_1 E^*(x_s) \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x_s - x_1)^2\right] \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x_1 - x'_s)^2\right] \exp\left(-\frac{x_1^2}{\sigma^2}\right) = \\ & \int dx_s dx_1 E^*(x_s) \exp\left\{-\frac{1}{\sigma^2} \left[x_1 - \frac{j\pi\sigma^2}{\lambda d_1} (x_s - x'_s)\right]^2\right\} \exp\left[-\frac{\pi^2\sigma^2}{\lambda^2 d_1^2} (x_s - x'_s)^2\right] \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x_s^2 - x'^2_s)\right] \Rightarrow \\ & \int dx_s E^*(x_s) \exp\left[-\frac{\pi^2\sigma^2}{\lambda^2 d_1^2} (x_s - x'_s)^2\right] \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x_s^2 - x'^2_s)\right] = \\ & \exp\left(-\frac{\pi^2}{\pi^2\sigma^2 + j\pi\lambda d_1} x'^2_s\right) \int dx_s E^*(x_s) \exp\left[-\frac{\pi^2\sigma^2 + j\pi\lambda d_1}{\lambda^2 d_1^2} \left(x_s - \frac{\pi^2\sigma^2}{\pi^2\sigma^2 + j\pi\lambda d_1} x'_s\right)^2\right], \end{aligned} \quad (7)$$

常数项省略, (7)式没有明显的积分形式, 强度和相位的还原都受到了影响。若  $\sigma^2 \gg \pi\lambda d_1$ , 则有  $\frac{\pi^2}{\pi^2\sigma^2 + j\pi\lambda d_1} \approx$

$\frac{1}{\sigma^2}, \frac{\pi^2\sigma^2 + j\pi\lambda d_1}{\lambda^2 d_1^2} \approx \frac{\pi^2\sigma^2}{\lambda^2 d_1^2}$ , 则

$$\begin{aligned} & \exp\left(-\frac{\pi^2}{\pi^2\sigma^2 + j\pi\lambda d_1} x'^2_s\right) \int dx_s E^*(x_s) \exp\left[-\frac{\pi^2\sigma^2 + j\pi\lambda d_1}{\lambda^2 d_1^2} \left(x_s - \frac{\pi^2\sigma^2}{\pi^2\sigma^2 + j\pi\lambda d_1} x'_s\right)^2\right] = \\ & \exp\left(-\frac{x'^2_s}{\sigma^2}\right) \int dx_s E^*(x_s) \exp\left[-\frac{\pi^2\sigma^2}{\lambda^2 d_1^2} (x_s - x'_s)^2\right] = \end{aligned}$$

$$\exp\left(-\frac{x_s'^2}{\sigma^2}\right) \int dx_s E^*(x_s) \delta(x_s - x_s') = \exp\left(-\frac{x_s'^2}{\sigma^2}\right) E^*(x_s'), \quad (8)$$

若  $x_s'$  相对  $\sigma$  取值足够小, 则由高斯函数的特性可知,  $\exp\left(-\frac{x_s'^2}{\sigma^2}\right)$  变化平缓, 可以看作常数  $C$ , 则(8)式可以进一步简化为  $CE^*(x_s')$ , 这种情况下光场可以视作近似完全还原。

### 2.3 振幅随机相位随机型调制

如果随机调制面为振幅随机相位随机型, 随机调制函数为

$$g(x_1) = \text{rand}(x_1) \exp[i2\pi \cdot \text{rand}(x_1)], \quad (9)$$

则  $|g(x_1)|^2 = \text{rand}^2(x_1)$ , 代入(2)式可得

$$\int dx_s dx_1 E^*(x_s) \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x_s - x_1)^2\right] \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d_1} (x_1 - x_s')^2\right] \text{rand}^2(x_1). \quad (10)$$

(10)式也没有明显的积分形式, 只能给出数值结果, 这种情况下强度和相位的还原都受到影响。

## 3 数值模拟结果与讨论

按照图 1 及理论推导过程进行数值模拟, 得到三种调制方式下的数值模拟结果及共轭波前记录精度、孔径大小、噪声等因素对光场还原的影响。设  $X_s$  处入射场为光斑直径为 2 mm、散斑尺寸为  $10 \mu\text{m}$  的高斯随机场,  $d_1 = 100 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 100 \text{ mm}$ 。图 2(a)、(b)分别为入射散斑场自由传播到  $X_1$  和  $X_2$  处的衍射强度分布,  $a_1$  和  $a_2$  分别为两处光斑直径的一半, 从图 2 可知,  $a_1$  约为 5 mm,  $a_2$  约为 20 mm。

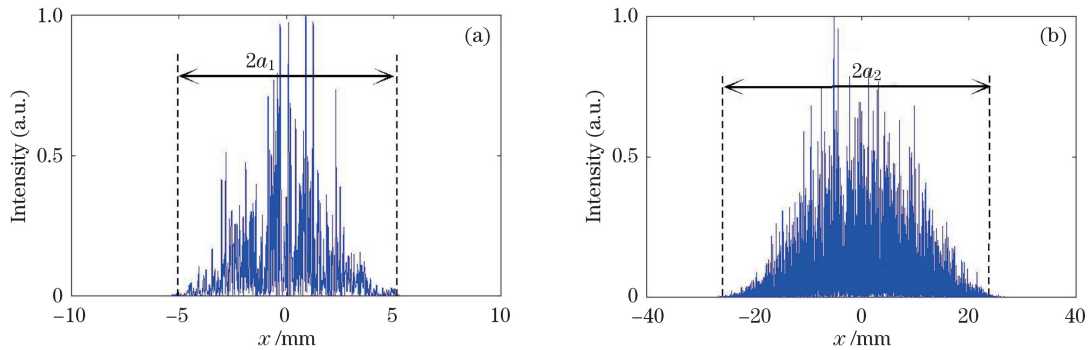


图 2 入射散斑场自由传播到(a)  $X_1$  和(b)  $X_2$  处的衍射强度分布

Fig. 2 Diffraction intensity distribution of incident speckle after free propagation to (a)  $X_1$  and (b)  $X_2$

为评价还原效果, 比较  $X_s$  上的入射散斑场与还原后的散斑场, 分别计算两者强度和相位相关系数  $r$ 。

统计学上, 相关系数  $r = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)D(Y)}}$ , 其中  $\text{cov}(X, Y)$  为变量  $X$  和  $Y$  的协方差,  $D(X)$  和  $D(Y)$  分别为  $X$

和  $Y$  的方差,  $r$  是反映变量之间相关关系密切程度的统计指标,  $r$  越大, 两者相似度越高, 还原效果越好。图 3~5 分别为纯相位随机型、高斯振幅相位随机型和振幅随机相位随机型三种调制方式下的数值模拟结果。

由图 3 可知, 入射光场与还原光场强度的相关系数接近于 1, 相位相关系数也达到 0.94 以上, 输入光场与还原光场几乎完全重合, 这表明在纯相位随机型调制方式下, 光场可以基本无失真地还原。对于高斯振幅相位随机型的调制方式, 由(6)、(7)式可知, 光场的反演结果受  $\sigma$  影响, 图 4 为  $\sigma$  取不同值时光场强度和相位的还原结果。当  $\sigma$  取值较小, 为  $a_1/2$  时, 还原效果很差, 而当  $\sigma$  取值较大, 为  $a_1$  时, 还原效果有明显提升, 尤其是强度的还原效果, 相关系数大于 0.98。由此可知当  $\sigma$  足够大时, 光场也能达到比较理想的还原效果。振幅随机相位随机型调制方式下(图 5), 光场的强度和相位还原都不甚理想。上述数值模拟结果基本与理论推导一致。

在纯相位随机型调制方式下, 研究了共轭波前记录精度、波前探测孔径大小以及噪声扰动等因素对光场还原的影响。共轭波前记录精度可以用波前探测的分辨率  $\delta_2$  来表征, 波前探测的孔径大小  $D$  即为接收面大小, 孔径中心与光斑中心重合。

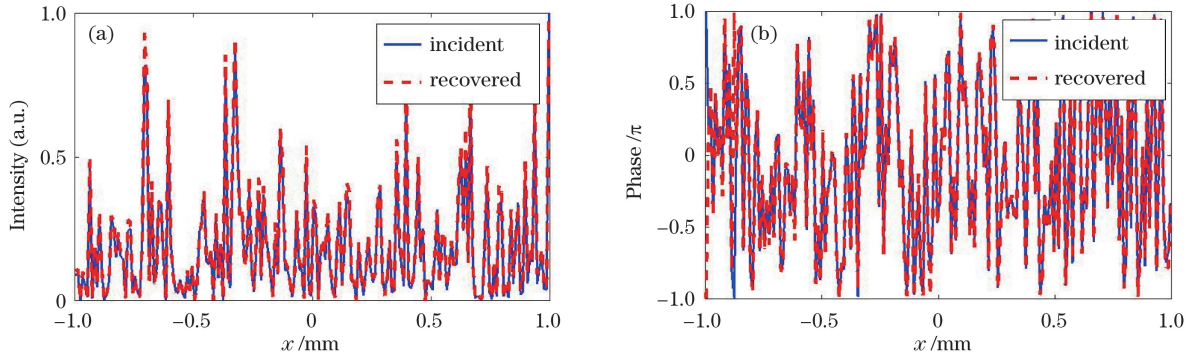


图 3 纯相位随机型调制下入射光场与还原光场的比较。(a)强度,  $r=0.99567$ ; (b)相位,  $r=0.94138$   
 Fig. 3 Comparison of original incident and recovered optical fields for pure phase random modulation.

(a) Intensity,  $r=0.99567$ ; (b) phase,  $r=0.94138$

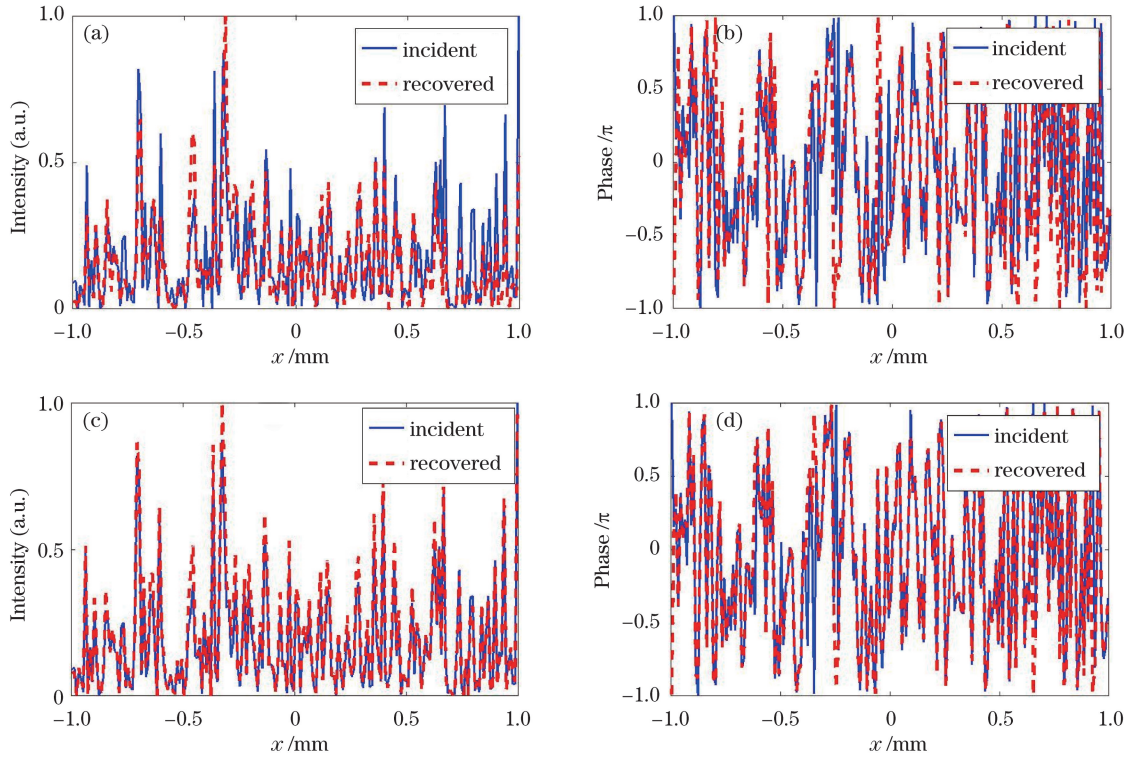


图 4 高斯振幅相位随机型调制下入射光场与还原光场的比较。(a)强度,  $\sigma=a_1/2, r=0.81461$ ; (b)相位,  $\sigma=a_1/2, r=0.6392$ ;  
 (c)强度,  $\sigma=a_1, r=0.9878$ ; (d)相位,  $\sigma=a_1, r=0.843$

Fig. 4 Comparison of original incident and recovered optical fields for Gaussian amplitude and phase random modulation.

(a) Intensity,  $\sigma=a_1/2, r=0.81461$ ; (b) phase,  $\sigma=a_1/2, r=0.6392$ ; (c) intensity,  $\sigma=a_1, r=0.9878$ ;

(d) phase,  $\sigma=a_1, r=0.843$

图 6 和图 7 分别为波前探测分辨率和孔径大小与强度、相位还原效果的关系曲线。研究分辨率的影响时,孔径  $D=2a_2, a_2=20 \text{ mm}$  (图 2), 研究孔径大小的影响时,分辨率  $\delta_2=5 \mu\text{m}$ , 其他参数与图 3 一致。由图 6 可知, 相关系数随分辨率的降低而减小。与强度相比, 相位的还原效果随分辨率降低下降得更快, 要保持较高的相关系数, 要求分辨率更高。这表明对相位的还原要求更为精确的波前记录信息。由图 7 可知, 强度和相位的还原效果随波前探测接收孔径的增大而提升, 接收孔径大于  $2a_2$  后还原效果几乎不再变化。实际上, 相位共轭面  $X_2$  处的光斑大小为  $2a_2$  (图 2), 光斑外的光强几乎为零, 对还原贡献不大, 因此波前探测接收孔径大于  $2a_2$  后, 强度还原结果几乎没有变化; 另外光斑大部分能量集中在  $a_2$  范围内, 该部分的贡献远大于两瓣, 故波前探测接收孔径约为  $a_2$  时, 强度和相位还原已达到较好效果, 相关系数分别达到 0.95 和 0.9 以上。相对而言, 相位的还原效果比强度差, 相关系数随接收孔径增大而上升的幅度相对较慢, 这可能是因为

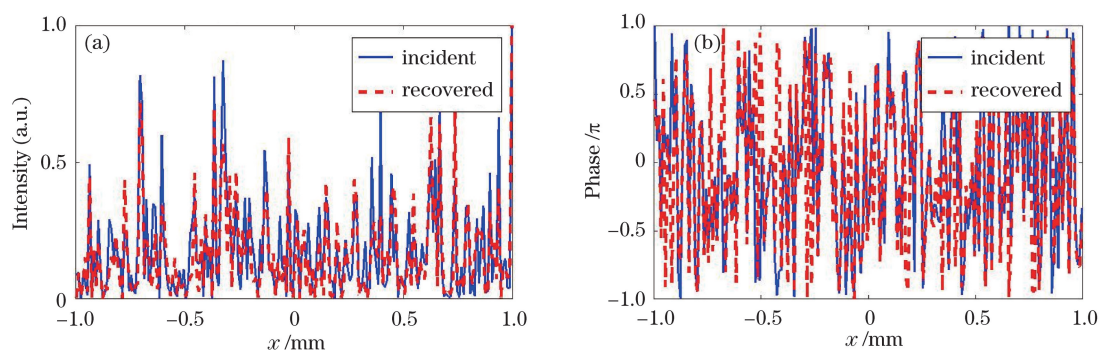


图 5 振幅随机相位随机型调制下入射光场与还原光场的比较。(a)强度,  $r=0.84755$ ; (b)相位,  $r=0.63013$

Fig. 5 Comparison of original incident and recovered optical fields for amplitude random and phase random modulation.

(a) Intensity,  $r=0.84755$ ; (b) phase,  $r=0.63013$

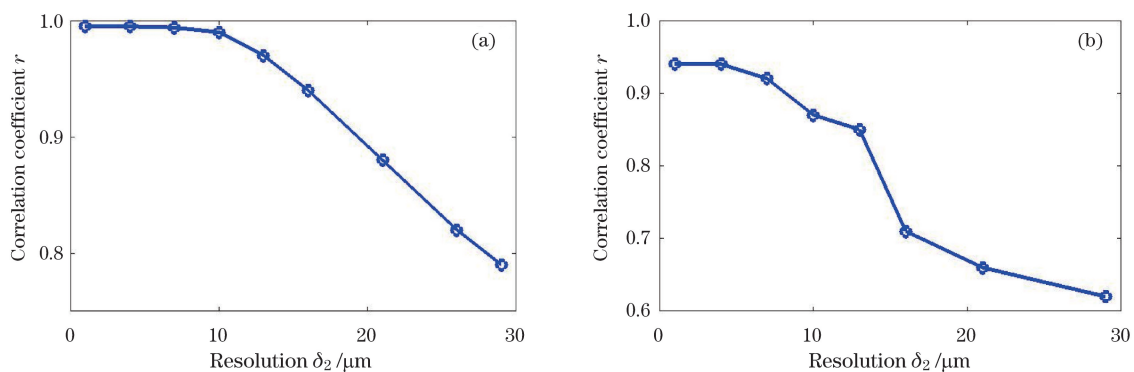


图 6 光场还原效果与波前探测面分辨率的关系。(a)强度; (b)相位

Fig. 6 Relationship between optical field recovery effect and resolution of wavefront detection  $\delta_2$  on plane  $X_2$ .

(a) Intensity; (b) phase

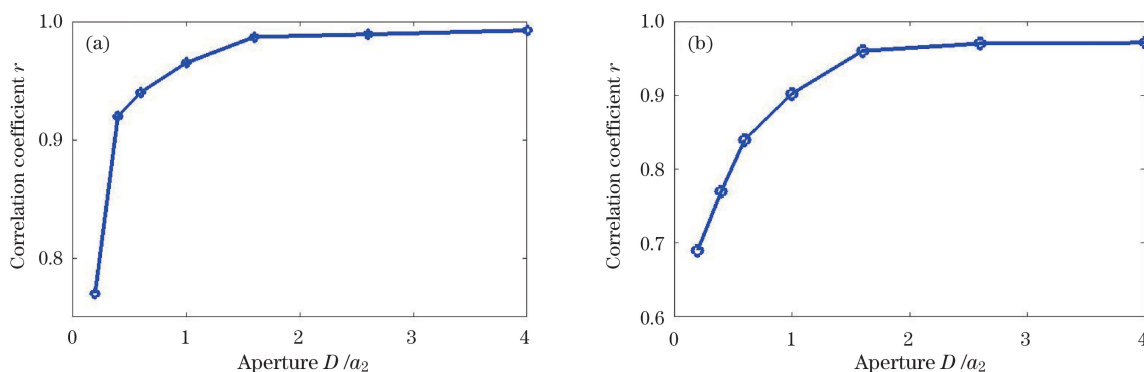


图 7 入射和还原光场的相关系数  $r$  与  $X_2$  处波前探测接收孔径  $D$  的关系曲线。(a)强度; (b)相位

Fig. 7 Relationship curves of the correlation coefficient  $r$  between incident and recovered optical fields with the aperture size  $D$  on  $X_2$ . (a) Intensity; (b) phase

相位的还原要求更为完整的波前信息,所以光场边缘的光强很小对相位还原效果也有一定的影响。

数字相位共轭技术需要合理地设置参数,共轭波前探测精度足够高、接收孔径足够大时才能保证理想的光场还原效果。具体的参数设置标准,需要根据散斑尺寸等散斑场特性确定。

最后研究了  $X_1$  和  $X_2$  上分别加入噪声后对光场还原的影响。 $X_2$  上的噪声扰动包括背景噪声、杂散光等,而  $X_1$  上的噪声可以理解动态散射介质,相对于波前记录阶段,相位共轭阶段随机调制发生了变化。数值模拟中,相位共轭阶段噪声分别以  $\exp[i2\pi \cdot \text{rand}(x_2) \cdot n]$  和  $\exp[i2\pi \cdot \text{rand}(x_1) \cdot n]$  的纯相位形式作用于经  $X_2$  反射的光场和经  $X_1$  调制后的光场,其中  $n$  表征噪声的大小, $n$  值越大表示噪声越大。研究噪声扰动影响时,波前探测分辨率和孔径分别设为  $5 \mu\text{m}$  和  $2a_2$ ,其他参数设置不变。模拟结果如图 8、9 所示。

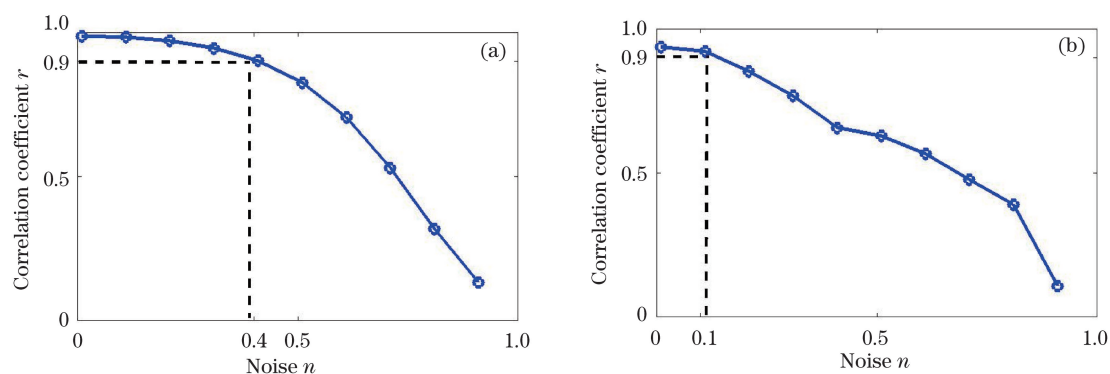


图 8 光场还原效果随相位共轭面  $X_2$  处噪声的变化。(a)强度;(b)相位

Fig. 8 Relationship between the recovered optical field and the noise on  $X_2$ . (a) Intensity; (b) phase

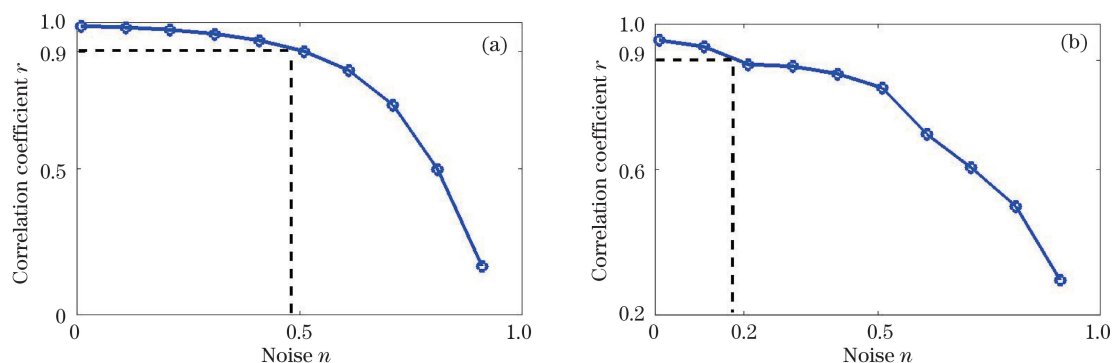


图 9 光场还原效果随随机调制面  $X_1$  处噪声的变化。(a)强度;(b)相位

Fig. 9 Relationship between the recovered optical field and the noise on  $X_1$ . (a) Intensity; (b) phase

由图 8 可知,要保持还原相关系数在 0.9 以上,强度和相位的还原在相位共轭面可分别容纳相位起伏约为  $2\pi \times 0.4$  和  $2\pi \times 0.1$  的噪声。其中相位的还原对相位共轭面上的噪声更为敏感,这也表明相位的还原要求更加精确的波前记录信息。图 9 为强度、相位还原效果与随机调制面上噪声的关系,同样,当随机调制面分别加入相位起伏约为  $2\pi \times 0.5$  和  $2\pi \times 0.2$  的噪声时,强度、相位的还原相关系数保持在 0.9 以上,这表明光场的还原允许介质有一定扰动。总体上,强度还原的稳定性比相位还原更好,相位的还原对相位共轭面上的噪声更为敏感。

## 4 结 论

将散射介质对光场造成的畸变影响简化为相幅随机调制面,从衍射理论出发,推导了数字相位共轭技术中光场还原的形式。理论分析和数值模拟结果表明,当随机调制面为纯相位型时,光场可以完全还原;当随机调制面为高斯振幅相位随机型,且高斯曲线足够宽,即  $\sigma$  足够大时,光场的还原效果较为理想,而  $\sigma$  较小时,光场的还原效果会变差;当随机调制面为振幅随机相位随机型时,光场的还原效果也很差。共轭波前探测精度、波前探测接收孔径大小以及噪声扰动都会影响光场还原结果。在纯相位随机型调制方式下,数值模拟显示,光场的还原效果随波前探测精度的下降而下降,随波前探测接收孔径的增大而上升。相对于强度,相位的还原对共轭波前记录精度和接收孔径的要求更高。对于噪声,强度还原比相位还原的抗噪能力更强。相关系数为 0.9 以上时,强度还原中相位共轭面和随机调制面可分别容纳  $2\pi \times 0.4$  和  $2\pi \times 0.5$  的相位起伏噪声;相位还原中相位共轭面和随机调制面可分别容纳  $2\pi \times 0.1$  和  $2\pi \times 0.2$  的相位起伏噪声。这些影响因素的模拟研究,对实验设计有一定指导意义。今后将进一步研究随机调制面的调制方式和散射场性质对光场还原的影响。

## 参 考 文 献

- 1 Ashkin A, Boyd C D, Dziedzic J M, *et al.*. Optically-induced refractive index inhomogeneities in LiNbO<sub>3</sub> and LiTaO<sub>3</sub>[J]. Applied Physics Letters, 1966, 9(1): 72-74.
- 2 Wu Cunkai. Phase conjugation optics[J]. Progress in Physics, 1986, 6(3): 353-399.  
吴存恺. 相位复共轭光学[J]. 物理学进展, 1986, 6(3): 353-399.
- 3 He G S. Optical phase conjugation: Principles, techniques, and applications[J]. Progress in Quantum Electronics, 2002, 26(3): 131-191.
- 4 Yang Qiang, Cao Liangcai, Jin Guofan. Progress in optical focusing techniques aiming to suppress scattering effect in biomedical tissues[J]. Chinese J 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.
- 5 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.
- 6 Huang Huiling, Chen Ziyang, Sun Cunzhi, *et al.*. Focusing laser beams through opaque scattering media[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0602004.  
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): 0602004.
- 7 Wang L V, Wu H I. Biomedical optics: Principles and imaging[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- 8 Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. Optics Letters, 2007, 32(16): 2309-2311.
- 9 Yaqoob Z, Psaltis D, Feld M S, *et al.*. Optical phase conjugation for turbidity suppression in biological samples[J]. Nature Photonics, 2008, 2(2): 110-115.
- 10 Xu X, Liu H, Wang L V. Time-reversed ultrasonically encoded optical focusing into scattering media[J]. Nature Photonics, 2011, 5(3): 154-157.
- 11 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(2): 928.
- 12 Judkewitz B, Wang Y M, Horstmeyer R, *et al.*. Speckle-scale focusing in the diffusive regime with time reversal of variance-encoded light (trove)[J]. Nature Photonics, 2013, 7(4): 300-305.
- 13 Boyd R W. Nonlinear optics[M]. London: Academic Press, 2003: 429-541.
- 14 Shi Shunxiang. Nonlinear optics[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012: 268-367.  
石顺祥. 非线性光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012: 268-367.
- 15 Zel'dovich B Y, Popovichev V I, Ragul'skii V V, *et al.*. Connection between the wave fronts of the reflected and exciting light in stimulated Mandel'shtam-Brillouin scattering[J]. JETP Letters, 1972, 15: 109-112.
- 16 Boyd R W, Rzaewski K, Narum P. Noise initiation of stimulated Brillouin scattering[J]. Physical Review A, 1990, 42(9): 5514-5521.
- 17 Ge Chuanwen, Xiao Shuang. Investigation and discussion on high average-power fiber stimulated Brillouin scattering phase-conjugation mirror[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 070002.  
葛传文, 肖 爽. 高平均功率光纤受激布里渊散射相位共轭镜的研究与探讨[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 070002.
- 18 Zhang Cong, Yu Wenfeng, Li Zhenglin, *et al.*. Numerical study on scattering properties for the stimulated Brillouin scattering fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0319005.  
张 聪, 余文峰, 李正林, 等. 光纤受激布里渊散射的散射特性数值研究[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0319005.
- 19 Hellwarth R W. Generation of time-reversed wave fronts by nonlinear refraction[J]. Journal of the Optical Society of America, 1977, 67(1): 1-3.
- 20 Pepper D M, Abrams R L. Narrow optical bandpass filter via nearly degenerate four-wave mixing[J]. Optics Letters, 1978, 3(6): 212-214.
- 21 Yariv A, Pepper D M. Amplified reflection, phase conjugation, and oscillation in degenerate four-wave mixing[J]. Optics Letters, 1977, 1(1): 16-18.
- 22 Gabor D. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161(4098): 777-778.
- 23 Yamaguchi I, Zhang T. Phase-shifting digital holography[J]. Optics Letters, 1997, 22(16): 1268-1270.
- 24 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.



- 25 Fienup J R. Phase retrieval algorithms: A comparison[J]. Applied Optics, 1982, 21(15): 2758-2769.
- 26 Yu Q, Fu S, Yang X, *et al.*. Extraction of phase field from a single contoured correlation fringe pattern of ESPI[J]. Optics Express, 2004, 12(1): 75-83.
- 27 Xiong Liudong, Jia Shuhai, Du Yanfen. A novel algorithm for phase retrieval from a single carrier-frequency fringe pattern[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 123-126.  
熊六东, 贾书海, 杜艳芬. 单幅载频条纹图的相位恢复新算法[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 123-126.
- 28 Huang W, Liu D, Zhang X, *et al.*. Analysis of a digital phase retrieval method for wave-front reconstruction[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(8): 080101.
- 29 Sun Liuxing, Yu Yingjie, Zhou Wenjing. A method to improve the speed of wavelet transform in interferogram analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s2): s212006.  
孙流星, 于瀛洁, 周文静. 一种提高小波变换处理干涉图速度的方法[J]. 光学学报, 2013, 33(s2): s212006.
- 30 Yang Q, Sang X, Xu D. Time-reversed optical focusing through scattering media by digital full phase and amplitude recovery using a single phase-only SLM[J]. Journal of Innovative Optical Health Sciences, 2015, 8(2): 1550007.
- 31 Deng Lijun, Yang Yong, Shi Bingchuan, *et al.*. Two-step phase-shifting digital holography based on extraction of phase shift[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209014.  
邓丽军, 杨 勇, 石炳川, 等. 基于相移量提取的两步相移数字全息术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209014.
- 32 Rong Lu, Wang Dayong, Wang Yunxin, *et al.*. Phase retrieval methods in in-line digital holography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209006.  
戎 路, 王大勇, 王云新, 等. 同轴数字全息中的相位恢复算法[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209006.
- 33 Zhang Wangping, Lü Xiaoxu, Liu Shengde, *et al.*. Generalized phase-shifting phase retrieval approach based on time-domain Fourier transform[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0908004.  
张望平, 吕晓旭, 刘胜德, 等. 基于时域傅里叶变换的广义相移相位恢复方法[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0908004.
- 34 Guo Yuan, Mao Qi, Chen Xiaotian, *et al.*. Study of a fast windowed Fourier filtering method for interference fringes[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0612008.  
郭 媛, 毛 琦, 陈小天, 等. 干涉条纹快速加窗傅里叶滤波方法的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0612008.
- 35 Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. Beijing: Science Press, 1978: 788-814.  
玻 恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 788-814.