

用于光束周期性调制补偿的相位载波技术研究

高雅茹^{1,2}, 刘德安^{1*}, 杨爱华^{1,2}, 张盼^{1,2}, 朱健强¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对影响高功率激光系统输出性能的空间周期性调制, 提出并分析讨论了一种新的基于相位载波灵活补偿控制的方法。首先, 理论分析了本文方法对空间周期性调制的空间频率的控制, 通过改变相位载波的幅度调节空间频率的强度, 并且对于振幅型周期性调制, 相位载波的周期可以改变空间频率强度极大值的位置。然后, 进行了相位载波对振幅型周期性调制的空间频率影响的实验, 实验结果和数值模拟验证了该方法的可行性, 并对加载相位载波前后的输出近场图及对应的一维平均功率谱密度曲线进行了对比, 加载相位载波后, 空间频率的峰值下降了一个量级, 并降低到了本底值附近。该方法为高功率激光系统中敏感的空间周期性调制的补偿和控制提供了一个新的思路。

关键词 物理光学; 衍射理论; 空间频率; 相位载波; 空间周期性调制; 近场光束

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1005003

Study on Phase Carrier Technology to Compensate for the Spatial Periodic Modulation of Beam

Gao Yaru^{1,2}, Liu Dean^{1*}, Yang Aihua^{1,2}, Zhang Pan^{1,2}, Zhu Jianqiang¹

¹Joint Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract For the spatial periodic modulation that affects the output performance of high power laser systems, a novel method of compensating and controlling the spatial periodic modulation based on phase carrier is proposed and analyzed. First, the theoretical analysis shows that this method is able to control the spatial frequency of the spatial periodic modulation. The intensity of the spatial frequency is modulated by changing the magnitude of the phase carrier, and for the amplitude-type spatial periodic modulation, the period of the phase carrier can change the position of the maximum intensity of the spatial frequency. Then, the experiment on the effect of phase carrier on the amplitude-type spatial periodic modulation is carried out. The feasibility of the method is verified by experimental results and numerical simulations. The output near-field beam and the corresponding one-dimensional average power spectral density curve before and after the phase carrier modulation are compared. It is found that the peak value of the spatial frequency drops by an order of magnitude and decreases to near the background value after phase carrier modulation in the experiment. This method provides a new way to compensate and control the sensitive spatial periodic modulation in high power laser systems.

Key words physical optics; diffraction theory; spatial frequency; phase carrier; spatial periodic modulation; near-field beam

OCIS codes 260.1960; 300.6380; 070.6120; 070.6110

1 引言

光束在高功率激光系统中传播时, 光路中的灰

尘、光学元件表面的形变和介质材料的不均匀等都会对近场光束产生空间周期性调制, 破坏系统的光束质量。由于近场光束不均匀, 在高通量运行时, 某

收稿日期: 2018-03-21; 修回日期: 2018-05-16; 录用日期: 2018-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(11774364)、中国科学院国际伙伴计划(GJHZ1871)

* E-mail: liudean@siom.ac.cn

些特定空间频率的非线性增益非常高,可能引起小尺度自聚焦现象,从而激发后续光学元件的损伤^[1-3]。Gao 等^[4]利用一种改进的迭代权重算法对近场中的空间周期性调制进行补偿。在实际应用中,空间滤波器是控制近场光束不均匀性的主要方法,它基于频域处理,通过选择合适大小的滤波小孔来滤除有害的空间频率,并且具有像传递功能,是高功率激光系统中最重要元件之一^[5-7]。但是,空间滤波器应用于高功率激光系统时,为了滤除有害的空间频率,滤波小孔的半径通常很小,以致于在焦面处的强激光和小孔的边缘材料发生作用,从而产生堵孔效应和光束反射的问题^[8-10]。另外,滤波小孔作为硬边光阑,容易出现卡边效应,给光场增加边缘调制。为了解决这些问题,国内外文献报道了多种改进措施。研究人员对滤波小孔的结构和材料进行优化,比如采用四条内边都不在同一个平面的四叶型滤波小孔^[11]和拥有良好性能的锥形滤波小孔^[12-13]。此外新型的狭缝型空间滤波器也被提出,柱透镜的应用使焦面处的焦斑变成了焦线,从而将远场强度降低了两到三个数量级^[14-17]。Sinha 等^[18]提出利用染料的饱和吸收特性形成软边光阑来缓解滤波小孔硬边光阑的特性。还有文献提出了无透镜、无针孔、光束不聚焦的非聚焦型空间滤波器^[19-21]。迄今为止,大多数文献提到的方法都聚焦

于滤波小孔大小和形状的单一调制,未从调制空间频率的角度探索和研究。

随着空间光调制器(SLM)等多功能数字化器件的发展^[22],SLM 也逐渐运用到高功率激光系统中。比如在国家点火装置(NIF)中,可编程的空间整形器利用两级液晶 SLM 执行对大口径光学元件上损伤点“预屏蔽”的任务^[23-24];在 OMEGA EP 激光系统中,SLM 除了“预屏蔽”功能外,同时还具有对激光的空间强度和波前进行改变的能力^[25-27]。考虑到空间滤波器在高功率激光系统中遇到的问题和 SLM 技术的灵活应用,本文提出一种基于相位载波控制空间频率的方法。通过在近场中加载相位载波控制近场中空间周期性调制的空间频率,理论分析了本文方法的可行性,并实验验证了近场光束中仅存在振幅型空间周期性调制时空频率的调控,为后续的相关研究奠定了基础。

2 理论分析

为了便于分析问题,本文只考虑一维空间周期性调制的情况。如图 1 所示,通过 SLM 加载到近场中的矩形相位载波位于空间滤波器第一个透镜的前焦面处,与空间周期性调制入射光束发生耦合,进而观察焦面处空间频率的变化以及输出近场光束。

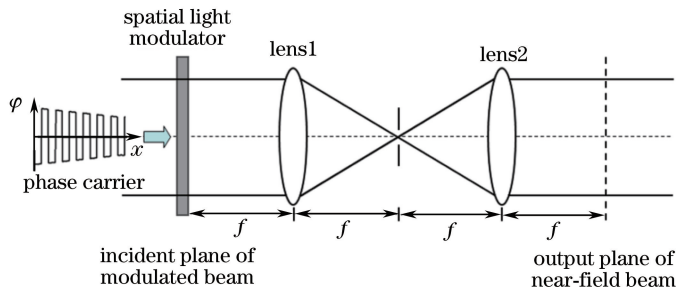


图 1 相位载波结合空间滤波器控制空间周期性调制空间频率的示意图

Fig. 1 Schematic of spatial frequency of spatial periodic modulation controlled by phase carrier combined with spatial filter

设定一维振幅型空间周期性调制光场由一个周期固定的振幅型正弦光栅引起。周期性调制光场可以看作是均匀背景光场 $E_0(x_0, y_0)$ 和一个弱调制场 $ME_0(x_0, y_0)[1 + \sin(2\pi f_0 x_0)]$ 的叠加,并且假定背景光场的光强不随传输距离的变化而变化,则振幅型空间周期性调制入射光场 $E(x_0, y_0)$ 分布可表示为

$$E(x_0, y_0) = E_0(x_0, y_0)[1 + M + M \sin(2\pi f_0 x_0)], \quad (1)$$

式中 M 和 f_0 分别是振幅型周期性调制的振幅调制度和空间频率。当未加载相位载波时,振幅型周期性调制光场在焦面处的光场分布为

$$F(f_x, f_y) = \frac{1}{i\lambda f} E_0(f_x, f_y) \left[(1 + M)\delta(f_x, f_y) + \frac{M}{2i}\delta(f_x - f_0, f_y) - \frac{M}{2i}\delta(f_x + f_0, f_y) \right], \quad (2)$$

式中 λ 为光波长, f 为空间滤波器中透镜的焦距, (f_x, f_y) 为频谱坐标系中空间频率的坐标。由(2)式可以看出,在频谱坐标系中,空间频率 $\pm f_0$ 分别

位于中心的两侧,光强均为 $M^2 E_0^2 / (4\lambda^2 f^2)$ 。因为 f_0 和 $-f_0$ 的光强呈镜像对称分布,所以这里以空间频率 $-f_0$ 进行分析。通常情况下,空间频率 $-f_0$ 是由空间滤波器的滤波小孔进行滤除,假设滤波小孔的截止频率为 ν , ν 应当小于 f_0 。但是当 ν 很小时,在高功率激光系统中将发生严重的堵孔问题。因此,本文分析的重点是允许滤波小孔的截止频率较大,即 $f_0 < \nu$ 时,如何利用相位载波来控制 and 调节周期性调制的空间频率。

设矩形相位载波的周期为 T , 相位幅度为 $\pm 2\pi A$, A 是和相位载波幅度有关的参数。则当加载相位载波后,振幅型周期性调制光场在焦面处的光场分布为

$$F'(f_x, f_y) = \frac{1}{i\lambda f} E_0(f_x, f_y) \text{sinc}\left(\frac{n}{2}\right) \times \cos\left(2A\pi + \frac{n\pi}{2}\right) \exp\left(-i\frac{n\pi}{2}\right) \times \left[(1+M) \sum_n \delta\left(f_x - \frac{n}{T}, f_y\right) + \frac{M}{2i} \sum_n \delta\left(f_x - f_0 - \frac{n}{T}, f_y\right) - \frac{M}{2i} \sum_n \delta\left(f_x + f_0 - \frac{n}{T}, f_y\right) \right], \quad (3)$$

式中 n 是整数,表示相位载波调制后空间频率的阶次。空间频率 $-f_0$ ($n=0$) 的光强为 $M^2 E_0^2 \cos^2(2\pi A) / (4\lambda^2 f^2)$, 这是与 A 有关的函数,其随参数 A 变化的理论曲线如图 2 所示,光强在 0 到 $M^2 E_0^2 / (4\lambda^2 f^2)$ 之间来回振荡。当 $A=0.25$ 时,空间频率 $-f_0$ 的光强变为 0,此时在 $-f_0$ 处的所有能量都被调制到相位载波调制后的高阶空间频率 $f_m = \frac{m}{T} - f_0$ 上,其中 m 是一非零整数。大多数能量被调制到相位载波调制后的一阶空间频率 $f_{\pm 1} =$

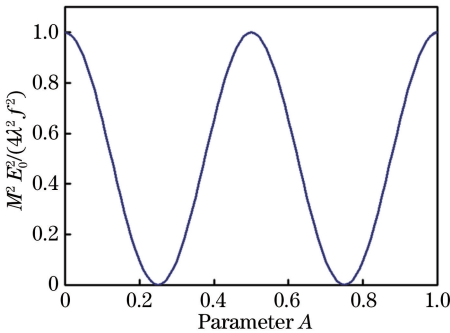


图 2 空间频率 $-f_0$ 的强随参数 A 变化的理论曲线图
Fig. 2 Theoretical curve of the intensity of spatial frequency $-f_0$ with the change of parameter A

$\pm \frac{1}{T} - f_0$ 上,而调制到其他阶次空间频率的能量比较少,通常可以忽略。因此,空间频率强度的极大值从 $-f_0$ 变成 $f_{\pm 1}$ 。此外空间频率 $f_{\pm 1}$ 的大小由相位载波的周期 T 决定。为了避免在输出近场中引入新的调制,需要确保相位载波调制后的所有高阶空间频率 ($|n| > 0$) 都在滤波小孔的截止频率之外,即离中心最近的高阶空间频率要远离小孔的截止频率。因为空间频率 f_1 是离中心最近的相位载波调制后的高阶空间频率,所以空间频率 f_1 和滤波小孔的截止频率 ν 需要满足以下关系:

$$f_1 > \nu, \quad (4)$$

则相位载波的周期需要满足以下条件:

$$T < \frac{1}{f_0 + \nu}. \quad (5)$$

因此,相位载波的周期应由给定的滤波小孔的截止频率和空间周期性调制的空间频率来合理确定。利用空间滤波器滤除所有的相位载波调制后的高阶空间频率后,再对滤波处理后的频域光场进行逆传输运算,得输出近场 $E_O(x_0, y_0)$ 为

$$E_O(x_0, y_0) = E_0(x_0, y_0) \cos(2\pi A) \times [1 + M + M \sin(2\pi f_0 x_0)]. \quad (6)$$

若要得到背景光场 $E(x_0, y_0)$, 即目标光场,相位载波参数 A 应满足:

$$\cos(2\pi A) = \frac{E_0(x_0, y_0)}{E_0(x_0, y_0) [1 + M + M \sin(2\pi f_0 x_0)]} = \frac{1}{1 + M + M \sin(2\pi f_0 x_0)}. \quad (7)$$

把(7)式代入(6)式就得到目标输出近场,即

$$E_O(x_0, y_0) = E_0(x_0, y_0). \quad (8)$$

利用该方法不仅可以使振幅型空间周期性调制光场变得均匀,而且可以调控振幅型空间周期性调制的空间频率强度极大值的位置,使其远离滤波小孔的截止频率,但该方法存在一部分能量损失。当近场中仅存在相位型空间周期性调制时,设定一维相位型空间周期性调制光场由一个周期固定的相位型正弦光栅引起,则相位调制的入射光场 $E_\varphi(x_0, y_0)$ 为

$$E_\varphi(x_0, y_0) = E_0(x_0, y_0) \exp[iM_\varphi \sin(2\pi f_\varphi x_0)], \quad (9)$$

式中 M_φ 和 f_φ 分别为相位型空间周期性调制的相位调制度和空间频率。这跟振幅型空间周期性调制光场的分析稍有不同,相位载波的幅度不是 $\pm 2\pi A$, 而是 φ_1 和 φ_2 , 则加载相位载波,滤除相位载波调制

后的高阶空间频率,输出的近场为

$$E_{\varphi_0}(x_0, y_0) = E_0(x_0, y_0) \cos\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \times \exp\left\{i\left[\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + M_{\varphi} \sin(2\pi f_{\varphi} x_0)\right]\right\}. \quad (10)$$

为了获得目标光场 $E_0(x_0, y_0)$, φ_1 和 φ_2 之间的关系应满足:

$$\begin{cases} \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} = 0 \\ \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} = -M_{\varphi} \sin(2\pi f_{\varphi} x_0) \end{cases}, \quad (11)$$

即:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = -M_{\varphi} \sin(2\pi f_{\varphi} x_0). \quad (12)$$

从(12)式可知,相位型空间周期性调制由点对点直接补偿,从而抑制或降低相位型空间周期性调制的空间频率的光强分布。那么当振幅型空间周期性调制和相位型空间周期性调制同时存在时,所需加载的最终相位载波是控制振幅型空间周期性调制所需相位载波分布和补偿相位型空间周期性调制所需相位分布之和。综上,本文方法可以影响空间周期性调制的空间频率分布,抑制或改变对应的空间频率强度的极大值,同时可以改变振幅型空间周期性调制的空间频率强度极大值的位置。因此利用本文方法,可以考虑适当增大滤波小孔的半径,在避免卡边效应的同时也有利于缓解滤波小孔堵孔效应。

3 实验与结果分析

实验主要采用空间光调制器验证在一维正弦振幅型空间周期性调制入射光场中加载相位载波的方法来调控焦面处空间频率这个概念的可行性。实验装置如图3所示。波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 的 He-Ne

激光束通过滤波和扩束后,照射到透射式振幅型 SLM1 (1920 pixel \times 1080 pixel, $8 \mu\text{m}/\text{pixel}$) 上, SLM1 结合起偏器 P1 和检偏器 P2 为光束近场提供一维正弦振幅型空间周期性调制,设其振幅调制度 $M=0.1$,其相应的空间频率 $f_0=12 \text{ mm}^{-1}$ 。透过分光棱镜后的光束经过反射式相位型 SLM2 (1920 \times 1080 pixel, $6.4 \mu\text{m}/\text{pixel}$) 反射后,再经过成像系统,成像于 8 位 CCD (1376 pixel \times 1040 pixel, $6.45 \mu\text{m}/\text{pixel}$)。SLM2 的作用是加载所需的相位载波,成像系统由两个焦距均为 17.5 cm 的凸透镜和一个滤波小孔组成。值得注意的是,设定的滤波小孔的截止频率应该大于空间频率 f_0 ,所以实验中滤波小孔的半径 R 设为 1.5 mm,其相应的截止频率 $\nu=13.35 \text{ mm}^{-1}$ 。由前面的理论分析可知,为了调控空间周期性调制的空间频率,在近场中加载的相位载波的幅度应由入射的调制近场和目标光场共同确定。图4为入射的振幅型空间周期性调制光场和目标光场的分布。

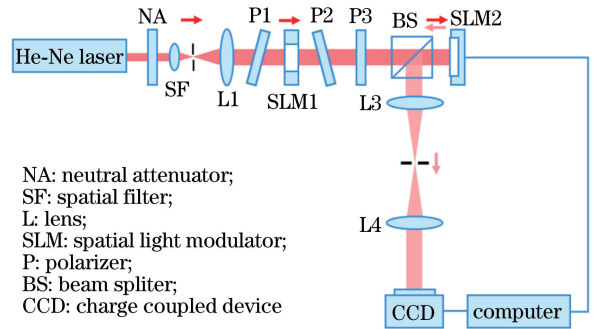


图3 控制振幅型周期性调制空间频率的实验装置图
Fig. 3 Experimental setup for controlling the spatial frequency of amplitude-type spatial periodic modulation

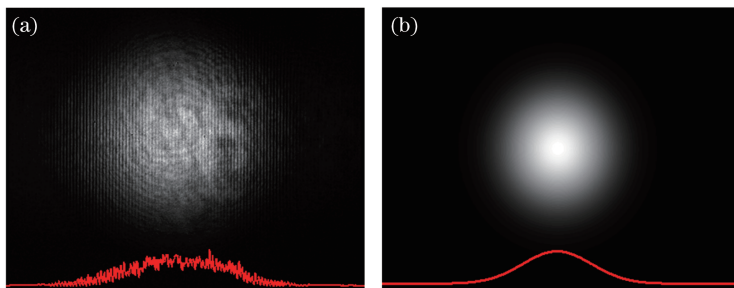


图4 (a)入射的振幅型空间周期性调制光场分布;(b)目标光场分布

Fig. 4 (a) Intensity distribution of incident beam with amplitude-type spatial periodic modulation;
(b) intensity distribution of target beam

在实际应用中,加载在 SLM2 上的相位载波的周期应该是像素化的,而且需满足(5)式。由于

SLM2 中像素的大小为 $6.4 \mu\text{m}$,则相位载波一个周期内所需的最大的像素个数为 6。图5(a)~(d)

为未加载相位载波和加载相位载波周期分别为 2, 4, 6 pixel 时测得的焦面处频谱图案。图中标识的 2ν 表示成像系统中滤波小孔截止频率的范围。为了更直观地显示焦面处空间频率的分布, 图中的横坐标采用频谱坐标系中空间频率对应的符号来表示, 而不是实际空间坐标值。如图 5(a) 所示, 在未加载相位载波时, 紧临中心的频率 $-f_0$ 处有一个小的亮点, 且在滤波小孔截止频率范围之内。但是, 当加上相位载波后, 如图 5(b)~(d) 所

示, 在空间频率 $-f_0$ 处的光强几乎不可见, 而相位载波调制后的高阶空间频率 $f_{\pm 1}$ 的光强增加了。这是因为空间频率 f_1 比空间频率 f_{-1} 更接近中心, 因此只讨论空间频率 f_1 的变化。另外, 从图中可以看出, 相位载波调制后的一阶空间频率 f_1 的位置随着周期 T 的变化而变化。 T 的值越小, f_1 距离中心越远。图 5(b) 为未进行相位载波调制的高阶空间频率 f_1 , 这是因为 f_1 到中心的距离超过了 CCD 的探测区域。

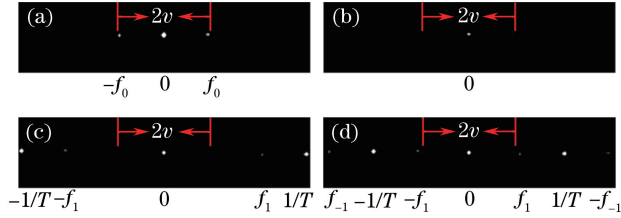


图 5 (a) 未加相位载波时和加载周期分别为 (b) 2 pixel, (c) 4 pixel, (d) 6 pixel 的相位载波时测得的焦面处空间频率的分布图; (e) 相位载波调制后一阶空间频率 f_1 随相位载波周期变化的关系图

Fig. 5 Distribution of the spatial frequency measured on the focal plane (a) without phase carrier, and with phase carrier for periods of (b) 2 pixel, (c) 4 pixel, and (d) 6 pixel; (e) first-order spatial frequency after phase carrier f_1 varies with the periods of phase carrier

为了更准确地观察焦面处各个空间频率光强的变化, 图 5(a)~(d) 中相应的归一化的一维轮廓曲线如图 6(a)~(d) 所示。由于光束近场的能量都聚焦在焦面上, 因此焦面处的能量很大, 导致 CCD 饱和, 所以在图 6(a) 中, 测得的空间频率 $\pm f_0$ 的强度和中心强度一样。图中虚线矩形表示滤波小孔允许通过的空间频率范围, 从图中可以看出, 未加载相位载波时, 空间频率 $-f_0$ 在小孔截止频率范围之内; 加载相位载波之后, 空间频率 $-f_0$ 处的光强大大降

低, 而相位载波调制后的一阶空间频率 f_1 的光强逐渐增加, 空间频率强度的极大值由 $-f_0$ 变成 $f_{\pm 1}$, 此外所有的相位载波调制后的高阶空间频率都在滤波小孔的截止频率之外。根据实验中测得的入射振幅型空间周期性调制光场和实验中空间滤波器的有关参数进行了数值模拟实验, 得到焦平面处空间频率分布的一维轮廓曲线如图 6(e)~(h) 所示。为了便于和实验结果比较, 对所有模拟的一维轮廓曲线图进行了阈值处理。由实验结果和模拟结

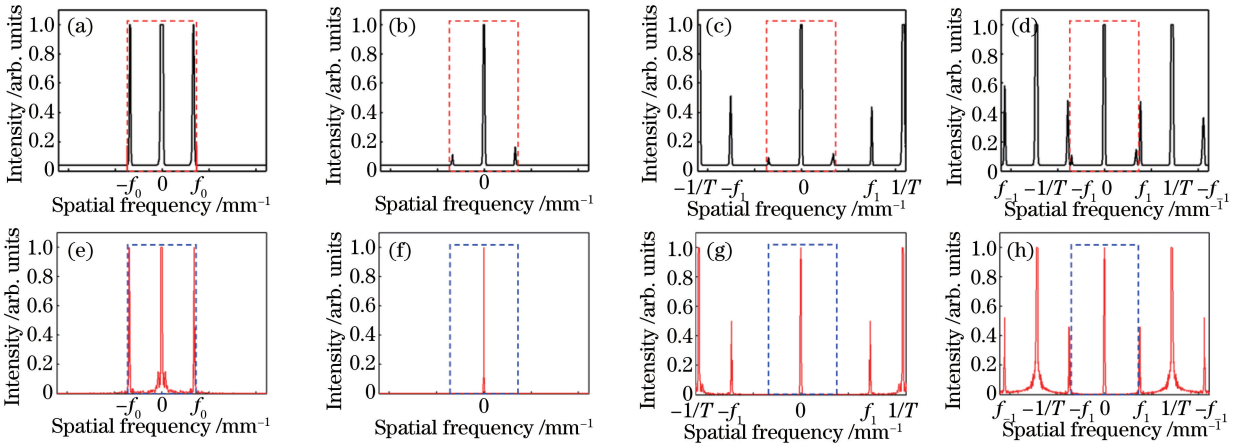


图 6 (a) 未加相位载波时和加载周期分别为 (b) 2 pixel, (c) 4 pixel,

(d) 6 pixel 的相位载波时焦面处空间频率的分布图的一维轮廓曲线图; (e)~(h) 对应的理论一维轮廓曲线图

Fig. 6 Corresponding one-dimensional profile curves on the focal plane (a) without phase carrier, and with phase carrier for periods of (b) 2 pixel, (c) 4 pixel, and (d) 6 pixel; (e)-(h) corresponding simulated one-dimensional profile curves

果对比可知,所有相位载波调制后的高阶空间频率都得到非常好的对应。但是在实验结果中,相位载波调制后的空间频率 f_0 的光强并不等于0,这是因为实验中难免存在误差,比如成像系统中轻微的离焦、振幅畸变引起的相位畸变、周期像素化的相位载波、测量误差以及周围环境中存在的各种噪声扰动。

实验中也测得了未加载相位载波和加载周期为2 pixel的相位载波后的输出近场图分布,如图7(a)和(c)所示。由于实验测得的焦面处频谱图案中,空间频率 $\pm f_0$ 处的光强仍有剩余,以及实验中多个光学元件和各种噪声引入的调制,使得图7(c)中测得的输出近场图并不均匀,且与均匀的背景光场之间存在差异。此外,功率谱密度(PSD)^[28]能够描述空间频率的功率分布,也能够反映近场的周期性调

制特性,因此,计算了图7(a)和(c)的一维平均 PSD 曲线,如图7(b)和(d)所示。本文中一维平均 PSD 曲线是通过计算输出近场图的9个随机一维轮廓曲线图的PSD,然后对所有一维 PSD 求平均值得到。图7(b)中短箭头为空间频率峰值在 12.4 mm^{-1} 处,这和实验中设定的空间频率为 12 mm^{-1} 基本一致。由图7(d)可知,空间频率的强度显著下降,并且下降了一个数量级,接近本底值,也证明了本文方法的可行性。因此,本文方法为调控高功率激光系统中特定频率的频谱分布提供了一种手段。关于实验中各种误差因素对该方法效果的影响,以及近场光束中仅存在相位型空间周期性调制,振幅型空间周期性调制和相位型空间周期性调制同时存在以及多个不同周期的空间周期性调制存在时该方法的效果,也是以后需要深入研究的。

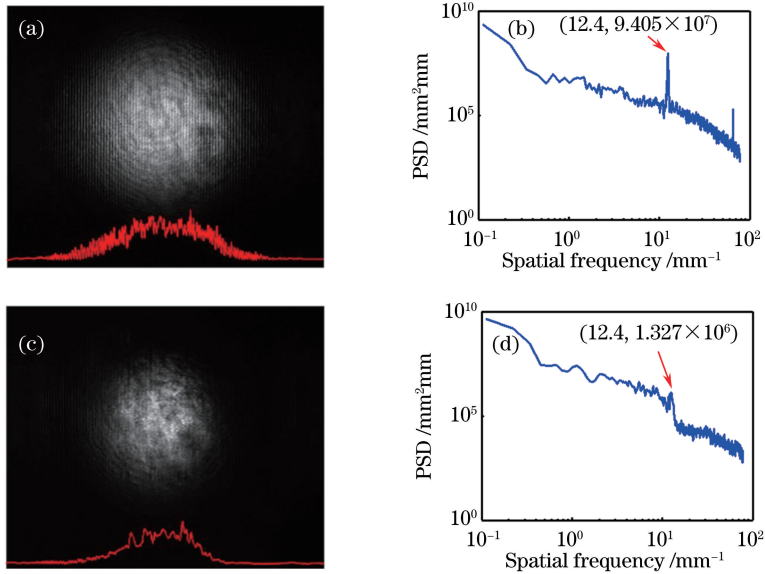


图7 (a)未加载相位载波的输出近场分布和(b)相应的一维平均 PSD 曲线;

(c)加载周期为2 pixel的相位载波后的输出近场分布和(d)相应的一维平均 PSD 曲线

Fig. 7 (a) Intensity distribution of output near-field beam without phase carrier and (b) corresponding one-dimensional average PSD curve; (c) intensity distribution of output near-field beam after phase carrier with a period of 2 pixel and (d) corresponding one-dimensional average PSD curve

4 结 论

主要研究了在近场中加载相位载波来控制空间周期性调制的空间频率,理论分析了本文方法应用在近场中的可行性,包括仅存在振幅型空间周期性调制,仅存在相位型空间周期性调制和两种类型空间周期性调制同时存在等情况,并验证了振幅型空间周期性调制近场的空间频率强度极大值和其位置被调控的情况,与模拟结果基本一致。研究表明,振

幅型空间周期性调制的空间频率强度的极大值由相位载波的幅度确定,其位置受相位载波的周期影响。为了避免引入新的调制,选择合适的相位载波周期来确保所有的相位载波调制后的高阶空间频率都在滤波小孔的截止频率之外。最后对未加载相位载波和加载周期为2 pixel的相位载波后的输出近场光强分布及对应的一维平均 PSD 曲线进行了比较分析。该方法是否适合近场中存在更多更复杂空间周期性调制时的情况需要进行深入研究,但这种控制

空间频率的思想为解决在高功率激光系统中空间滤波器的堵孔问题提供了新思路。

参 考 文 献

- [1] Campillo A J, Shapiro S L, Suydam B R. Periodic breakup of optical beams due to self-focusing [J]. *Applied Physics Letters*, 1973, 23(11): 628-630.
- [2] Fleck J, Morris J, Bliss E. Small-scale self-focusing effects in a high power glass laser amplifier[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1978, 14(5): 353-363.
- [3] Bespalov V I, Talanov V I. Filamentary structure of light beams in nonlinear liquids [J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 1966, 3: 307-310.
- [4] Gao Y R, Liu D A, Yang A H, *et al.* Compensation for the spatial periodic modulation of the near-field beam with an improved iterative weight-based method [J]. *Optik*, 2017, 143: 59-65.
- [5] Simmons W, Hunt J, Warren W. Light propagation through large laser systems [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1981, 17(9): 1727-1744.
- [6] Hunt J T, Renard P A, Simmons W W. Improved performance of fusion lasers using the imaging properties of multiple spatial filters [J]. *Applied Optics*, 1977, 16(4): 779-782.
- [7] Hunt J T, Glaze J A, Simmons W W, *et al.* Suppression of self-focusing through low-pass spatial filtering and relay imaging [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(13): 2053-2057.
- [8] Dimakov S A, Zavgorodneva S I, Koval'chuk L V, *et al.* Investigation of the threshold of formation of a plasma screening radiation in a spatial filter [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1989, 19(6): 803-805.
- [9] Auerbach J M, Holmes N C, Hunt J T, *et al.* Closure phenomena in pinholes irradiated by Nd laser pulses[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(14): 2495-2499.
- [10] Murray J E, Milam D, Boley C D, *et al.* Spatial filter pinhole development for the National Ignition Facility[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(9): 1405-1420.
- [11] Boley C D, Estabrook K G, Auerbach J M, *et al.* Modeling of laser knife-edge and pinhole experiments [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3492: 524-536.
- [12] Celliers P M, Estabrook K G, Wallace R J, *et al.* Spatial filter pinhole for high-energy pulsed lasers [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(12): 2371-2378.
- [13] Zhang X, Zhou W, Hu D X, *et al.* Application of cone pinhole in high energy solid-state laser system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(7): 1700-1704.
- [14] Xiong H, Yuan X, Zhang X, *et al.* Performance of a simplified slit spatial filter for large laser systems[J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 22211-22219.
- [15] Xiong H, Yu T C, Gao F, *et al.* Filtering characteristics of a three-lens slit spatial filter for high-power lasers[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(22): 4593-4595.
- [16] Wan J, Xiong H, Zhang X, *et al.* Beam propagation characteristics in four-cylindrical-lens slit spatial filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0907001.
- [17] Xiong H. Application of two-lens slit spatial filter in high power lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091408.
- [18] Sinha S, Dasgupta K, Sasikumar S, *et al.* Saturable-absorber-based spatial filtering of high-power laser beams [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(20): 4947-4956.
- [19] Zheng G W, He Y L, Huang S H, *et al.* Low-pass spatial filtering for continuous-wave laser beam by transmission volume phase gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(4): 863-868.
- [20] Zhang Y, Wang Y Z, Qi H J, *et al.* Analysis on spatial filtering by reflecting combination device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0616002.
- [21] Zhang Y, Yi K, Qi H J, *et al.* Design of phase-shifted Rugate thin film spatial filter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 1007001.
- [22] Cheng Y, Huang D J, Fan W. Beam shaping capability of amplitude spatial light modulator by electrical addressing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0405001.
- 张鑫, 周维, 胡东霞, 等. 高功率固体激光器锥形空间滤波孔应用 [J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(7): 1700-1704.
- 熊哈. 高功率激光器中两镜型线聚焦空间滤波器的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 091408.
- 熊哈, 王胭脂, 齐红基, 等. 反射型组合器件的空间滤波分析 [J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0616002.
- 章瑛, 易葵, 齐红基, 等. 相移 Rugate 薄膜空间滤波器的设计 [J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1007001.
- 程煜, 黄大杰, 范薇. 电寻址振幅型空间光调制器的

- 光束整形能力 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0405001.
- [23] Heebner J, Borden M, Miller P, *et al.* A programmable beam shaping system for tailoring the profile of high fluence laser beams[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7842: 78421C.
- [24] Heebner J, Borden M, Miller P, *et al.* Programmable beam spatial shaping system for the National Ignition Facility[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7916: 79160H.
- [25] Barczys M, Bahk S W, Spilatro M, *et al.* Deployment of a spatial light modulator-based beam-shaping system on the OMEGA EP laser [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8602: 86020F.
- [26] Bahk S W, Fess E, Kruschwitz B E, *et al.* A high-resolution, adaptive beam-shaping system for high-power lasers [J]. Optics Express, 2010, 18(9): 9151-9163.
- [27] Bagnoud V, Zuegel J D. Independent phase and amplitude control of a laser beam by use of a single-phase-only spatial light modulator [J]. Optics Letters, 2004, 29(3): 295-297.
- [28] Elson J M, Bennett J M. Calculation of the power spectral density from surface profile data[J]. Applied Optics, 1995, 34(1): 201-208.