

文章编号 1004-924X(2022)04-0380-23

基于旁瓣光束衍射反演的强激光远场 焦斑测量方法

王拯洲*, 王力, 魏际同, 王伟, 李刚, 弋东驰, 王亚军
(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西西安710119)

摘要:针对大型激光装置使用纹影法无法实现旁瓣光束弱信号区域光强分布精确测量的问题,提出了基于旁瓣光束衍射反演的纹影法强激光远场焦斑测量方法。采用逆向推演间接测量的研究方法,沿光路传播逆方向推导,以旁瓣光束衍射光强图像和相位图像作为输入,通过计算获得未遮挡前旁瓣光束远场焦斑分布。相比传统基于纹影的远场焦斑测量方法,本文的主要改进和优化措施为:首先,基于旁瓣光束衍射反演的原理和间接测量的思想,改进纹影法强激光远场焦斑测量数学模型,从理论角度揭示该模型的合理性;其次,实验仿真强激光远场焦斑测量的整个过程,主要步骤为旁瓣光束衍射、加噪去噪、旁瓣光束衍射反演、焦斑重构等,验证了该方法的可行性;最后,将改进的DnCNN算法用于去除主瓣和旁瓣光束12位科学CCD图像不同级别(0~75 dB)的噪声,提升了远场焦斑的重构精度。实验结果表明:该方法不仅消除了纹影小球对旁瓣光束衍射的影响,而且获得了真实的旁瓣光束弱信号区域的光强分布,包括旁瓣光束各个波峰的幅值和位置、动态范围比值等远场焦斑测量重要参数,其中重构焦斑动态范围比值与理论焦斑动态范围比值之间的误差为3.20%,提高了基于纹影的强激光远场焦斑测量的可信度和实验精度。

关键词:远场焦斑测量;纹影法;焦斑重构;DnCNN;旁瓣光束衍射反演

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20223004.0380

Measurement for far-field focal spot of high power laser based on the diffraction inversion of sidelobe beam

WANG Zhengzhou*, WANG Li, WEI Jitong, WANG Wei, LI Gang, YI Dongchi, WANG Yajun

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

* Corresponding author, E-mail: azhou_china@126.com

Abstract: In order to solve the problem that the schlieren method cannot accurately measure the weak signal region of the sidelobe beam in large laser devices of the national large scientific facility, a new schlieren method based on the diffraction inversion of the sidelobe beam is proposed to measure the far-field focal spot for high-power laser. The key point of this method is that an indirect measurement approach is used based on reverse deduction, while deducting along the reverse direction of the optical path propagation. The diffraction intensity image and phase image of the sidelobe beam are the inputs to calculate the far-field focal spot distribution of the front sidelobe beam, which is not shielded. Compared with the traditional far-field focal spot measurement based on the schlieren method, the improvements and optimizations proposed in this paper are as follows. First, the mathematical model of far-field focal spot measurement using the

收稿日期:2021-07-10;修订日期:2021-08-17.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61705254, No. U1930118);陕西省重点研发计划项目(No. 2020GY-114)

schlieren method is improved to reveal the rationality of the model, theoretically based on the principle of diffraction inversion of the sidelobe beam and the indirect measurement approach. Then, the feasibility of this method is verified by simulating the whole experimental process of high power laser far-field focal spot measurement, which consists of sidelobe beam diffraction, denoising, sidelobe beam diffraction inversion, and focal spot reconstruction. Finally, the improved DnCNN algorithm is used to remove the noise of different levels (0-75 dB) of 12 bit scientific CCD images in the mainlobe and sidelobe beams, and the reconstruction accuracy of far-field focal spot is improved. The experimental results show that this method not only eliminates the influence of the schlieren sphere on the diffraction of the sidelobe beam but also obtains the real intensity distribution of the sidelobe beam in the weak signal region, including the important parameters of far-field focal spot measurement, such as the amplitude and position of each peak of the side lobe beam, the dynamic range ratio, the amplitude and position of each peak of the sidelobe beam, and the ratio of dynamic range. The error between the reconstructed and theoretical focal spots of the dynamic range ratio is 3.20%. It is significant to improve the reliability and experimental accuracy of the far-field focal spot of high-power laser measurement using the schlieren method.

Key words: measurement for far-field focal spot; schlieren method; reconstruction of focal spot; DnCNN denoising; sidelobe diffraction inversion

1 引言

某大科学装置是我国开展高能量密度物理和惯性约束聚变(ICF)研究的首台十万焦耳量级高功率激光装置^[1],位于该激光装置末端的综合诊断系统是一个多功能、高精度的激光参量诊断平台,用来精密诊断激光装置输出光束的特性,包括能量、近场、远场、时间波形、波前分布等。该装置的终极目标是基于纹影法的原理实现强激光远场焦斑光强分布的测量,为未来频率转换组件研究^[2]和强激光远场焦斑测量提供理论指导和精确实验参数。

对于大型激光装置激光强度时空分布测量方法,国内外的学者也进行了大量的研究工作。国外学者所采用的方法有:CCD直接测量法^[3]、列阵相机法^[4]、间接测量法^[5-6]、数字显微镜器件法^[7]等。2007年,NIF装置使用CCD直接成像法对远场焦斑进行测量^[3],所测的旁瓣分布的细节基本上被淹没在图像的本底信号中无法分辨。2008年,美国Aegis技术公司使用阵列探测法测试远距离传输的强激光光束的目标靶^[4],该方法只适用于测量远距离、大面积、连续辐射、高能量的激光光束的光强分布。2008年和

2012年,罗切斯特大学设计的OMEGAEP焦斑诊断系统^[5-6]使用间接测量法实现远场焦斑的测量,该方法为大型激光装置远场焦斑的精确测量提供了另外一种思路。2012年,Fiorito RB等人使用数字显微镜器件法实现焦斑的测量^[7],该方法需要根据CCD实际的光斑分布划分“遮挡”区域来确定反射型的掩模,不适用于大型激光装置单次、高能量、非连续辐射激光光束远场焦斑的测量。

国内学者提出的主要方法为纹影法^[8]、衍射光栅法^[9]、正交光楔法^[10]、列阵相机法^[11]等。2006年,程娟等人将纹影法应用于强激光远场焦斑测量^[8],并简要介绍了纹影法测量的原理。2012年,贺元兴等人提出的基于衍射光栅的焦斑重构和远场测量方法^[9]和正交光楔激光远场焦斑测量方法^[10],由于探测CCD噪声的影响,这两种方法对旁瓣区域弱信号探测效果较差。2013年,周继权等人使用列阵相机法^[11]对不同曝光的多幅图像的配准来合成高动态范围的图像,该方法无法适应高功率激光装置一次主发射的实验光束辐射进行多次曝光。2018年,李铭开展了基于光场相机的远场焦斑测量实验的研究^[12],证实了光场结构测量结果的有效性,但实验中焦斑重构算法

缺乏针对于焦斑能量分布恢复的精细化改进。对于强激光远场焦斑测量数学模型的研究,王拯洲和夏彦文等人做了大量的工作,并于2014年和2016年提出了高动态范围激光焦斑测量数学模型^[13-14],以图像的标准差作为噪声对实验数据进行分析,获得了高动态范围远场焦斑的重构图像;2017年,提出了基于纹影的远场焦斑测量和自动重构方法^[15],该方法只合适主瓣图像存在明显纹理的图像和能量放大倍率 K 小于10的情况;2020年,提出了基于远场焦斑测量数学模型改进的CNN去噪方法^[16],将DnCNN去噪算法引入数学模型中,改进原有DnCNN去噪算法的不足,提高了基于纹影的高动态范围远场焦斑测量的可信度。

随着大型激光装置的建成和物理实验的逐步深入开展,该装置主要存在的远场焦斑强信号、弱信号的同时探测这一矛盾和旁瓣光束弱信号区域无法精确测量的问题被发现。针对以上矛盾和问题,本文提出了基于旁瓣光束衍射反演的纹影法强激光远场焦斑测量方法。主要措施为:(1)通过将主光路分束为主瓣和旁瓣光束,主瓣光束被大倍率衰减后使用主瓣CCD测量主瓣区域强信号区域;旁瓣光束被纹影小球遮挡中心后使用旁瓣CCD测量旁瓣光束弱信号区域,解决了主瓣强信号和旁瓣弱信号同时测量这一个矛盾;(2)使用基于旁瓣光束衍射反演方法,以旁瓣光束衍射光强图像和相位图像作为输入,通过计算精确还原未遮挡前旁瓣光束各个旁瓣波峰的震荡信号。主要思路为:采用逆向推演间接测量的研究方法,沿光路传播逆方向推导,以旁瓣光束衍射光强图像和相位图像作为输入,通过计算获得未遮挡前旁瓣光束远场焦斑分布。主要研究内容为:(1)构建基于旁瓣光束衍射反演的纹影法强激光远场焦斑测量数学模型,从理论角度揭示该模型的合理性;(2)通过实验仿真旁瓣光束衍射反演的全流程,验证该方法对旁瓣光束弱信号的精确探测的可行性;(3)研究改进DnCNN去噪算法对强激光远场焦斑测量精度的

提升作用。实验结果表明:该方法不仅消除了纹影小球对旁瓣光束衍射的影响,而且获得了旁瓣光束各个波峰的幅值和位置、动态范围比值等远场焦斑测量重要参数。

基于以上研究思路和研究内容,本论文主要拟解决2个科学问题:(1)构建基于旁瓣光束衍射反演的纹影法强激光远场焦斑测量数学模型,解决旁瓣光束衍射反演对于旁瓣区域弱信号的精确探测问题;(2)解决DnCNN去噪算法改进对于实验精度提升的问题。通过解决以上科学问题,首先从理论角度揭示该数学模型和旁瓣光束衍射反演方法的合理性,为未来远场焦斑测量提供理论支撑;其次,通过基于DnCNN的科学级CCD图像去噪和旁瓣光束纹影小球衍射反演这两个改进措施,为强激光远场焦斑测量的精度提升提供实验验证方法指导。该研究工作的完成不仅对未来大科学激光装置远场焦斑测量在理论上的创新具有重大指导意义,而且为该装置强激光远场焦斑的精确测量奠定了基础。

2 理论背景

2.1 大型激光装置综合诊断系统光学系统设计

在大型高功率激光装置综合诊断系统中,光路设计如参考文献[16]中所示,使用分光系统将主光路分为主瓣光路和旁瓣光路。主瓣光路经过大倍率光束衰减器件和主瓣聚焦透镜后使用主瓣CCD直接采集主瓣光路分布图像;旁瓣光路依次经过旁瓣聚焦透镜1、纹影小球、旁瓣透镜2,最后使用旁瓣CCD采集旁瓣光路分布图像。该光路设计存在一个理想化的假设,即认为被纹影小球遮挡的旁瓣光束遮挡区域的光强分布为零,认为非遮挡区域的光强分布不变。

然而,根据光学衍射理论可知,旁瓣光束光场的传播在绕过纹影小球这个障碍物后,后面的旁瓣光束光场已经是一个发生了衍射作用的衍射场。当旁瓣光束被纹影小球遮挡后(如图1中

黑色圆“●”),先被纹影小球衍射,再传输至 CCD 成像位置时,CCD 成像位置的旁瓣衍射光束分布与未遮挡前的旁瓣光束分布已经发生了巨大的变化。根据衍射逆运算理论,反演正确的未遮挡前的旁瓣光束分布,需要以旁瓣光束衍射光强图像和相位图像作为输入。因此,对于原有大型激光装置综合诊断系统的光路设计进行改进,是十分必要的。改进方案如下:在靶点后增加一个旁瓣分束镜 splitp,将靶点后的旁瓣光束分为两路,分光比例为 1:1,旁瓣光路 1 使用旁瓣 CCD 测量旁瓣衍射光束的振幅信息,旁瓣光路 2 使用哈特曼传感器测量旁瓣衍射光束的相位信息。将两个旁瓣 CCD 采集振幅图像和哈特曼传感器相位结合,使用反演运算获得真正未衍射前的及未遮挡的旁瓣光束分布图像 $I'_{\text{Diff}_p}(x_i, y_j)$ 。另外,去掉原有光路中的主瓣透镜 lenz 和旁瓣透镜 2 lenp2,这样旁瓣 CCD 获得直接衍射后的旁瓣衍射光束分布,不需要对原有旁瓣光束沿光路截面方向进行按比例放大,主瓣光束光强分布更加简单。基于旁瓣光束衍射反演的纹影法远场焦斑测量光学设计如图 1 所示。

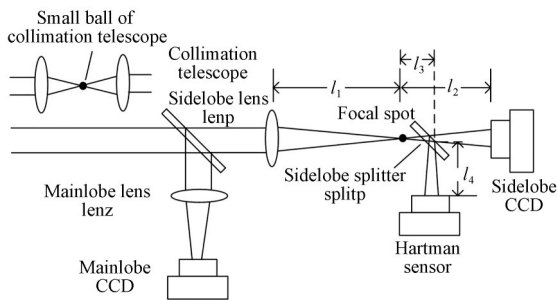


图 1 基于旁瓣光束衍射反演的纹影法远场焦斑测量光学设计

Fig. 1 Optical design for far-field focal spot measurement using schlieren method based on diffraction inversion of sidelobe beam

需要说明是,在光学平台搭建过程中,需要保证旁瓣 CCD 和哈特曼传感器距离靶点之间的光程必须相等,如图 1 中,用公式表示为 $l_2 + l_3 = l_4$ 。

2.2 构建基于旁瓣光束衍射反演的高功率激光远场焦斑测量数学模型

高动态范围激光焦斑测量数学模型最初是由王拯洲等人在文献[13]和[14]中提出来的,该数学模型为强激光远场焦斑测量提供了理论依据,但该数学模型存在一定的不足:(1)未考虑纹影小球遮挡旁瓣光束中心后,因为纹影小球边沿的衍射影响了旁瓣光束光强分布;(2)该数学模型中重构图像的输入为主瓣 CCD 和旁瓣 CCD 直接采集的图像,未经过有效的去噪处理。为了进一步解决大型激光装置使用纹影法无法实现旁瓣光束弱信号区域光强分布精确测量的问题,本文提出了基于旁瓣光束衍射反演的纹影法强激光远场焦斑测量方法和数学模型,并对该数学模型进行完整的公式推导和分析。

2.2.1 主光路分束

根据夫琅禾费衍射公式,激光远场焦斑强度分布^[2] $I_f(x, y)$ 为激光远场复振幅^[3] $U_f(x, y)$ 取模运算后的平方。令激光远场焦斑强度分布 $I_f(x, y)$ 为原始主光路远场光强分布,为了同时分别测量主瓣和旁瓣光强,按照 $\alpha:\beta(\alpha+\beta=1)$ 的分光比例将原始主光路远场光束分为主瓣光束和旁瓣光束,则主瓣光束的焦斑强度分布函数为:

$$I_{\text{Org}_z}(x, y) = \alpha I_f(x, y). \quad (1)$$

旁瓣光束的焦斑强度分布函数为:

$$I_{\text{Org}_p}(x, y) = \beta I_f(x, y). \quad (2)$$

2.2.2 光路衰减

为了使用科学 CCD 分别探测主瓣光束和旁瓣光束的光强分布,需要对两个光束的能量分别进行衰减,使得两个光束的能量都衰减至科学 CCD 的线性响应区间以内。由于主瓣 CCD 用来探测强激光远场焦斑高能量、中心区域的主瓣光束焦斑强度分布,主瓣光束能量必须进行大倍率能量衰减,衰减后的主瓣光束能量只占原始光束能量的 0.1%~1%。当主光路光束经过分束、主瓣光束能量衰减后,主瓣光束的焦斑强度分布函数为:

$$I_{Att,z}(x,y) = k_z I_{Org,z}(x,y), \quad (3)$$

其中, k_z 为主瓣光束能量衰减系数 ($0.001 < k_z < 1$)。

为了获得旁瓣光束弱信号区域的焦斑强度分布, 需要尽可能保留旁瓣光束弱信号区域的光强信号。选取方案是对分束后的旁瓣光束不再经过任何能量衰减, 而是使用纹影小球遮挡旁瓣光束中心强信号区域、未遮挡周围弱信号区域的方法, 对遮挡和衍射后的旁瓣衍射光束的光强和相位进行测量, 作为旁瓣光束衍射反演运算的输入。

则经过分束后的旁瓣光束光强的焦斑强度分布函数为:

$$I_{Att,p}(x,y) = k_p I_{Org,p}(x,y) = I_{Org,p}(x,y), \quad (4)$$

其中, k_p 为旁瓣光束能量衰减系数 ($k_p = 1$)。

2.2.3 旁瓣光束衍射

使用纹影小球遮挡旁瓣光束的强能量区域使得旁瓣光束产生衍射现象, 当衍射后的旁瓣光束传输到 CCD 探测位置后, CCD 所采集的旁瓣光束图像是经过纹影小球衍射并随着传输距离分布函数变化后的旁瓣光束分布图像。旁瓣光束衍射需要经过纹影小球遮挡、旁瓣光束分光、旁瓣光束光强衍射和旁瓣光束相位采集 3 个步骤。

2.2.3.1 纹影小球遮挡

假设未遮挡前的旁瓣光束分布为 $I_{Org,p}(x,y)$, 则纹影小球遮挡位置的旁瓣光束分布 $I_{Obj,p}(x,y)$ 表示为:

$$I_{Obj,p}(x,y) = I_{Org,p}(x,y) \cdot \text{Mask}(x,y), \quad (5)$$

其中, $\text{Mask}(x,y)$ 为纹影小球遮挡效果的掩膜, 当前位置 (x,y) 距离纹影小球中心 (x_0,y_0) 的距离小于纹影小球半径值 r , Mask 值为 0, 否则值为 1, 用公式表示为:

$$\text{Mask}(x,y) = \begin{cases} 0 & \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} < r \\ 1 & \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \geq r \end{cases}. \quad (6)$$

2.2.3.2 旁瓣衍射光束二次分光

将被纹影小球衍射后的旁瓣光束按照 1:1 的

比例进行二次分光, 如图 1 所示, 旁瓣衍射光强测量光束分布记为 $I_{Int,p}(x,y)$, 旁瓣衍射相位测量光束分布为 $I_{Ph,p}(x,y)$ 。

$$I_{Int,p}(x_i,y_j) = I_{Ph,p}(x_i,y_j) = I_{Obj,p}(x_i,y_j)/2. \quad (7)$$

2.2.3.3 旁瓣光束光强衍射和旁瓣光束相位采集

假设衍射后的旁瓣光束传输到 CCD 探测位置的距离为 z , 则 CCD 所采集的旁瓣衍射光束分布函数 $I_{Diff,p}(x,y)$ 表示为^[16-17]

$$I_{Diff,p}(x,y) = |\text{IFFT} \{ \text{FFT} [U_{Int,p}(x,y)] \cdot Rs(x,y) \}|^2, \quad (8)$$

其中, $U_{Int,p}(x,y)$ 为旁瓣衍射光束光强分布函数 $I_{Int,p}(x,y)$ 的复振幅表示形式, 表示为:

$$U_{Int,p}(x,y) = \sqrt{I_{Int,p}(x_i,y_j)} \exp [ik\phi(x,y)], \quad (9)$$

其中, $\phi(x,y)$ 为波前相位分布, 在旁瓣光束衍射步骤中, 波前相位分布的输入值为 0。式(8)中

$Rs(x,y) = e^{j \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{(1-\lambda x_k)^2 + (1-\lambda y_k)^2}}$ 是一个低通滤波器, 该滤波器与光束传播距离相关, λ 为波长, z 表示 CCD 相机测量位置和纹影小球中心之间的距离, FFT 和 IFFT 分别表示二维傅里叶变换和二维傅里叶逆变换。将式(8)所表示的旁瓣光束衍射分布函数进一步解释为: 先对旁瓣光束分布进行二维傅里叶变换, 然后在频域内使用低通滤波器 $Rs(x,y)$ 进行低通滤波, 最后利用二维傅里叶逆变换实现从频域到时域的变换。

2.2.4 量化

量化的目的是将光束模拟分布函数进行数字化, 即使用主瓣 CCD 和旁瓣 CCD 分别在主瓣光束和旁瓣光束完成图像采集。由于 CCD 存在噪声, 假设主瓣 CCD 和旁瓣 CCD 的噪声分布函数分别为 $n_z(x,y)$ 和 $n_p(x,y)$, 则包含噪声的主瓣 CCD 的分布函数表示为:

$$I_z(x_i,y_j) = I_{Att,z}(x_i,y_j) + n_z(x_i,y_j). \quad (10)$$

由于使用纹影小球遮挡旁瓣光束中心, 旁瓣 CCD 采集到的分布函数为旁瓣衍射光束分布函数 $I_{Diff,p}(x_i,y_j)$ 与旁瓣 CCD 噪声 $n_p(x_i,y_j)$ 的叠加, 用公式表示为:

$$I_p(x_i,y_j) = I_{Diff,p}(x_i,y_j) + n_p(x_i,y_j). \quad (11)$$

2.2.5 去噪

假设 CCD 噪声符合随机分布,在准确估计 CCD 图像的噪声的情况下,图像去噪处理就是对采集 CCD 图像减去噪声的随机估计,用公式表示为:

$$\begin{cases} I_{z,\text{dn}}(x_i, y_j) = I_z(x_i, y_j) - n_z(x_i, y_j) \\ I_{p,\text{dn}}(x_i, y_j) = I_p(x_i, y_j) - n_p(x_i, y_j) \end{cases}, \quad (12)$$

其中: $I_{z,\text{dn}}(x_i, y_j)$ 和 $I_{p,\text{dn}}(x_i, y_j)$ 分别为主瓣图像和旁瓣图像分别减去各自估计噪声后的结果。以上去噪方法是假设主瓣 CCD 噪声 $n_z(x_i, y_j)$ 和旁瓣 CCD 噪声 $n_p(x_i, y_j)$ 被准确估计所采用的方法。

使用纹影法对远场焦斑进行测量,由于 CCD 复杂的噪声特征,使得主瓣和旁瓣图像的强能量区域和弱能量区域噪声完全不同:主瓣光束能量强度高,噪声信号较强;旁瓣光束能量强度低,却包含丰富的旁瓣环状能量分布信息。另外,远场焦斑重构需要对主瓣光束强度同时进行光强放大和衰减倍率放大,没有经过有效去噪的主瓣光束图像噪声被同时放大 100~1 000 倍,这将对远场焦斑的重构精度产生巨大的影响。因此,选择有效的去噪算法并根据焦斑测量实验噪声的特点改进去噪算法是十分必要的。令图像去噪过程函数为 $Denoise$, 去噪处理后的主瓣光强、旁瓣光强、旁瓣光束波前分布函数表示为:

$$\begin{cases} I'_{z,\text{dn}}(x_i, y_j) = Denoise [I_z(x_i, y_j)] \\ I'_{p,\text{dn}}(x_i, y_j) = Denoise [I_p(x_i, y_j)], \\ \phi'_{p,\text{dn}}(x_i, y_j) = Denoise [\phi_p(x_i, y_j)] \end{cases}, \quad (13)$$

其中: $\phi_p(x_i, y_j)$ 为旁瓣光束使用哈特曼采集的波前相位图像, $\phi'_{p,\text{dn}}(x_i, y_j)$ 为经过去噪处理后的旁瓣光束波前相位图像。

2.2.6 旁瓣光束衍射反演

为了准确获得未遮挡以前的旁瓣光束分布,就需要以 CCD 采集到的旁瓣光束图像 $I'_{p,\text{dn}}(x_i, y_j)$ 为输入,通过反演运算获得真正未衍射以前的及未遮挡的旁瓣光束分布图像 $I'_{\text{diff},p}(x_i, y_j)$, 用公式表示为^[17-18]:

$$I'_{\text{diff},p}(x_i, y_j) = \left| \text{IFFT} \{ \text{FFT} [U'_{p,\text{dn}}(x_i, y_j)] \cdot \text{IR}_s(x_i, y_j) \} \right|^2, \quad (14)$$

其中, $U'_{p,\text{dn}}(x_i, y_j)$ 为旁瓣光束衍射反演光强分布函数 $I'_{p,\text{dn}}(x_i, y_j)$ 的复振幅表示形式,用公式表示为:

$$U'_{p,\text{dn}}(x_i, y_j) = \sqrt{I'_{p,\text{dn}}(x_i, y_j)} \exp [ik\phi'_{p,\text{dn}}(x_i, y_j)]. \quad (15)$$

为了同时测量旁瓣光束的光强和波前相位,需要对旁瓣光束进行二次分光,分光比例为 1:1,二次分光前旁瓣光束真实未遮挡前的旁瓣光束光强分布函数为旁瓣光束衍射反演光强分布函数 $I'_{\text{diff},p}(x_i, y_j)$ 的 2 倍数,用公式表示为:

$$\text{IDiffraction}(x_i, y_j) = 2 \cdot I'_{\text{diff},p}(x_i, y_j). \quad (16)$$

式(15)中 $\phi'_{p,\text{dn}}(x_i, y_j)$ 为旁瓣光束的波前相位分布图像,该图像是使用哈特曼传感器采集再进行去噪处理后的图像数据,公式(14)中 $\text{IR}_s(x_i, y_j) = e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}z\sqrt{(1-\lambda x_k)^2 + (1-\lambda y_k)^2}}$, IR_s 也是一个低通滤波器,该滤波器与光束传播距离相关, λ 为波长, z 表示 CCD 相机测量位置和纹影小球中心之间的距离,FFT 和 IFFT 分别表示二维傅里叶变换和二维傅里叶逆变换。旁瓣光束衍射反演式(14)与旁瓣光束衍射式(8)之间的区别为:旁瓣光束衍射反演公式是以旁瓣 CCD 采集并完成去噪处理后的图像作为输入;式(14)低通滤波器 IR_s 的传输距离 z 和式(8)低通滤波器 R_s 中的传输距离 z 互为相反数。

2.2.7 焦斑重构

焦斑重构是纹影法远场焦斑测量的最后一步,就是以主瓣 CCD 图像、旁瓣 CCD 图像、旁瓣光束相位图像作为输入完成最终远场焦斑的重构操作。远场焦斑重构的基本思路是:重构焦斑主瓣区域使用主瓣光束图像数据光强放大和衰减倍率放大后进行填充,即重构焦斑的主瓣区域光强 = 去噪后主瓣光强 / ($k\alpha$); 重构焦斑旁瓣区域使用旁瓣光束衍射反演数据进行填充,将去噪处理、旁瓣光束衍射反演、纹影小球遮挡区域外的数据作为重构图像旁瓣区域焦斑分布;重构焦斑过渡区域使用主瓣区域数据和旁瓣区域数据

按照一定的比例进行填充。

假设主瓣 CCD 采集到的主瓣光强图像为

$$h(x_i, y_j) = \begin{cases} h_z(x_i, y_j) = \frac{1}{k\alpha} I'_{z, \text{dn}}(x_i, y_j) = \frac{1}{k\alpha} \text{Denoise}(I_z(x_i, y_j)) \\ h_p(x_i, y_j) = \frac{2}{\beta} I'_{\text{Diff}, p}(x_i, y_j) = \frac{1}{\beta} \text{IDiffraction}(x_i, y_j) \\ d_1 h_z(x_i, y_j) + d_2 h_p(x_i, y_j) \quad (x_i, y_j) \in A \cap B = C \neq \emptyset \end{cases}, \quad (17)$$

其中: A、B、C 分别为主瓣光束图像数据填充区域、旁瓣光束图像数据填充区域、使用主瓣光束图像数据和旁瓣光束图像数据拼接时的过渡区域, 如图 2 所示。在过渡区域 C, 主瓣图像灰度与旁瓣图像灰度的比值为 $d_1:d_2$, 满足 $d_1+d_2=1, 0 < d_1 < 1, 0 < d_2 < 1, k_z=k$ 。

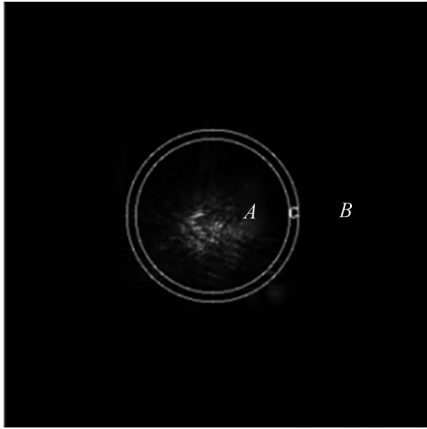


图 2 远场焦斑重构不同区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of different area of far-field focal reconstruction

本文提出的“基于旁瓣光束衍射反演的高功率激光远场焦斑测量数学模型”是基于文献[14]和[16]的基础上提出来的对远场焦斑测量数学模型的优化和改进。相比文献[14], 本文数学模型增加了旁瓣光束衍射、去噪、旁瓣光束衍射反演。相比文献[16], 本文数学模型增加了旁瓣光束衍射和旁瓣光束衍射反演。相比文献[14]和[16], 本文数学模型的主要改进措施为:(1)在旁瓣光束衍射步骤中, 增加了旁瓣衍射光束二次分光;(2)在旁瓣光束衍射步骤中增加了旁瓣光束光强衍射和旁瓣光束相位采集;(3)增加旁瓣光束衍射反演过程。主要优点为:(1)可以对旁瓣光束的相位和光强进行同时测量;(2)采用逆向间接测量的方法, 以旁瓣光束衍射光强图像和相

$I_z(x_i, y_j)$, 旁瓣 CCD 采集到的旁瓣光强图像为 $I_p(x_i, y_j)$, 则重构焦斑的分布函数^[5]为 $h(x_i, y_j)$:

位图像作为输入, 通过计算获得未遮挡前旁瓣光束远场焦斑分布;(3)在构建新的数学模型时, 将实际远场焦斑测量实验中的噪声和纹影小球衍射作为影响旁瓣光束光强分布的重要因素, 并使用改进的 DnCNN 去噪算法和旁瓣光束衍射反演进行消除, 以提升强激光远场焦斑测量的实验精度。

3 实验仿真

实验仿真主要模拟强激光远场焦斑测量的实验过程, 对基于旁瓣光束衍射反演的强激光远场焦斑测量数学模型的实验过程进行分解, 将每一个的实验步骤具体化、实例化, 重点关注核心步骤实验数据处理的结果和效果。以核心实验步骤(去噪、旁瓣光束衍射反演和焦斑重构)为重点, 处理对应步骤的实验数据, 分析改进 DnCNN 去噪算法和旁瓣光束衍射反演的处理效果, 论证旁瓣光束衍射反演对于远场焦斑测量实验可信度和可靠性的提升作用。

基于旁瓣光束衍射反演的强激光远场焦斑测量实验过程共包含 7 部分:(1)获取初始实验数据;(2)预处理;(3)旁瓣光束衍射;(4)图像采集和加噪声;(5)去除噪声;(6)旁瓣光束衍射反演;(7)远场焦斑强度分布重构。强激光远场焦斑测量仿真实验数据处理流程如图 3 所示。

3.1 获取初始实验数据

依据夫琅禾费衍射公式, 激光远场焦斑强度分布^[19] $I_f(x, y)$ 为激光远场复振幅^[20] $U_f(x, y)$ 取模运算后的平方, 利用 Matlab 2016b 模拟生成的远场焦斑图像数据如图 4 所示。具体的激光远场焦斑强度分布生成参数包括波长 λ 、纹影小球半径 a 、透镜焦距 f 、幅值 A_m 、像素尺寸 $pixel$, 如表 1 所示。

图 4 中生成的远场焦斑实验数据(初始实验

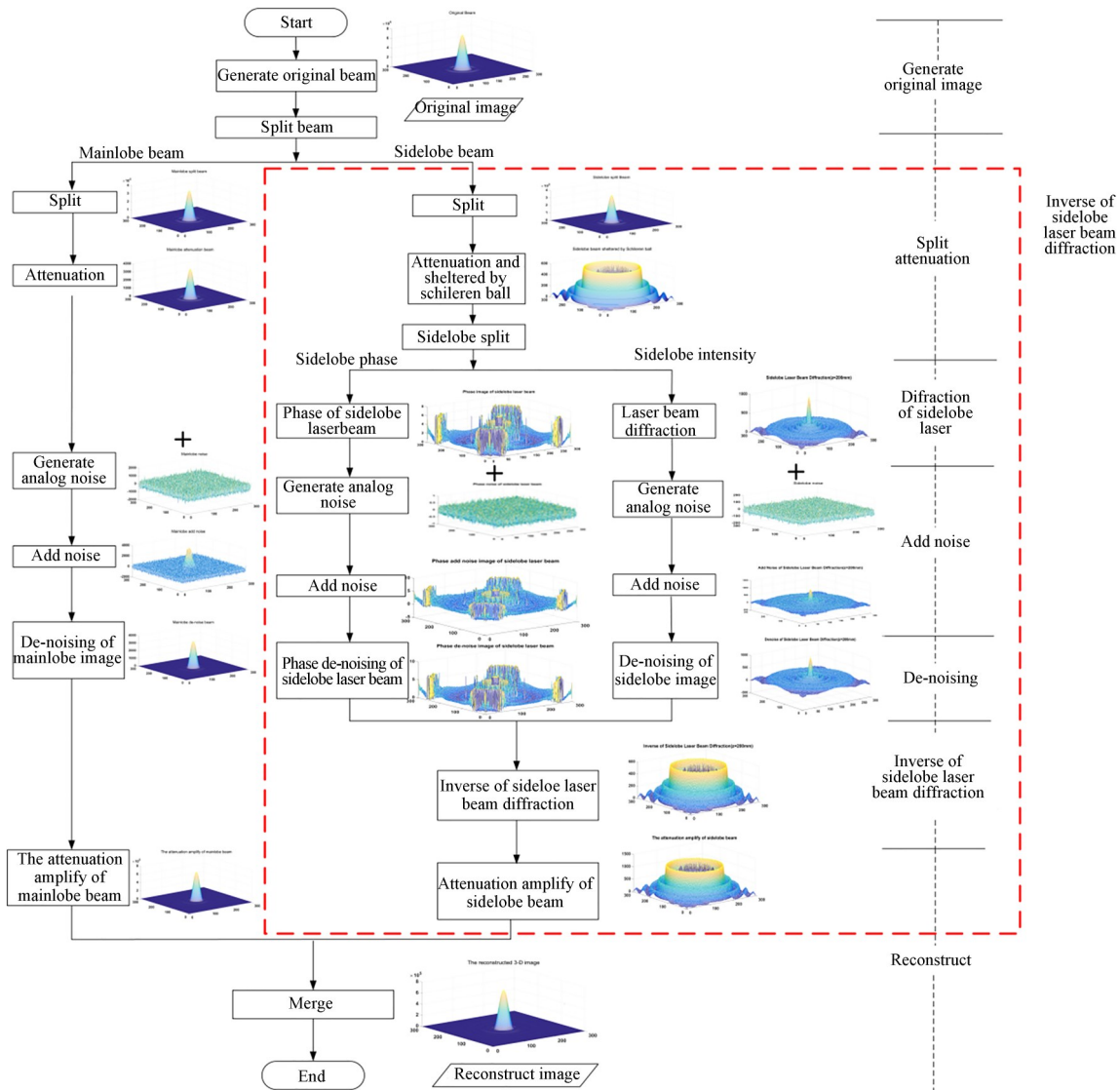


图 3 数据处理流程图

Fig. 3 Flow chart of data processing

数据)最大值为 3 583.6。当 $y=256$ 时,旁瓣曲线第一、第二、第三、第四波峰所处位置 x 分别为 214、187、160、133,灰度值分别为 62.69、14.88、5.73、2.62。当纹影小球半径大于 80 像素时,在旁瓣区域最大灰度值为 5.74,均值为 0.54。因为初始实验数据旁瓣区域的灰度值为 0~15 之间的浮点数,这与 12 位科学 CCD 的灰度范围 (0~4 095) 不符。将图 4(a) 的初始实验数据放大 200 倍,主要有以下优点:(1)旁瓣光束焦斑强度分布图像的灰度处在 12 位科学级 CCD 的线性响应区间之内 (0~4 095);(2)通过对初始实验数据进行放大处理,旁瓣光束焦斑强度分布图像第一、第二、第三、第四波峰灰度也被等比例放大,特别是

提高了第四波峰的信噪比,有利于提升远场重构焦斑动态范围比值的测量精度;(3)有利于仿真和实现基于旁瓣光束衍射反演的强激光远场焦斑测量实验中图像去噪处理、旁瓣光束衍射反演等重要过程。

将如图 4(b) 所示的三维生成的远场实验图像数据沿 Z 轴方向放大 200 倍,得到基于旁瓣光束衍射反演强激光远场焦斑测量的原始图像,如图 5 所示,其中最大值为 716 730,旁瓣光束第一、第二、第三、第四波峰值分别为 12 321、2 978.5、1 148.2、557.2,其中远场焦斑动态范围比值=最大值/第四波峰值,原始图像的动态范围比值=716 730/557.2 \approx 1 286.3。在图 3 数据处理流程

图中,原始图像作为整个仿真实验流程的输入 图像。

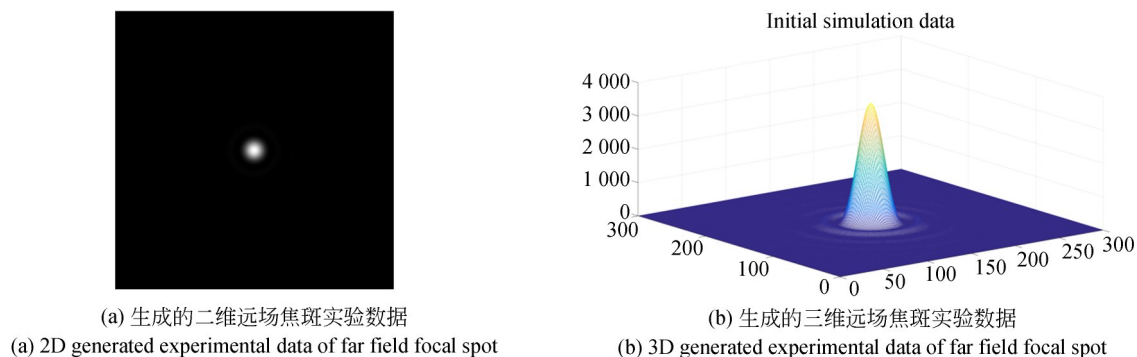


图 4 利用仿真参数生成的远场焦斑实验数据

Fig. 4 Generated experimental data of far field focal spot obtained by simulated parameters

表 1 激光远场焦斑强度分布仿真实验参数

Tab. 1 Simulated experimental parameters of far-field focal spot to obtain intensity distribution

No.	Parameter	Name	Value	Unit
1	λ	Wavelength	6.3500×10^{-4}	mm
2	a	Radius of the sphere	0.5	mm
3	f	Focal length of telecentric lens	100	mm
4	M	Magnification	1	mm
5	pixel	Pixel size	0.0056	mm

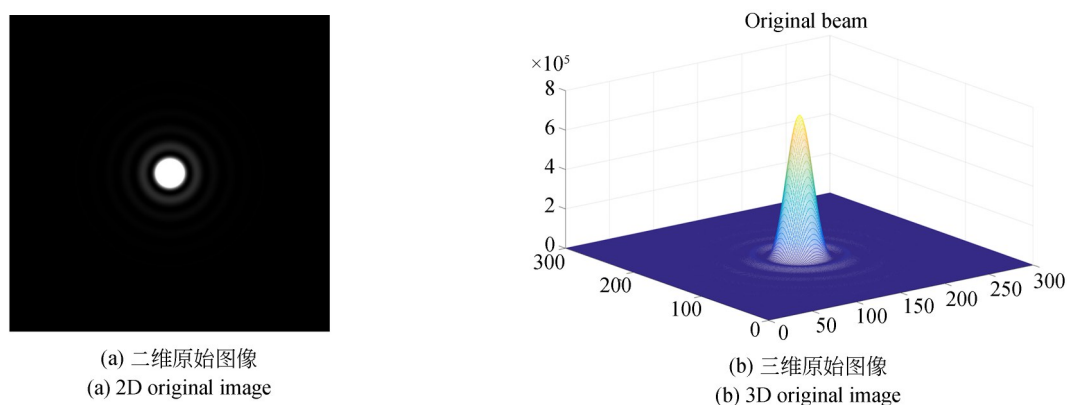


图 5 原始图像

Fig. 5 Original image

3.2 预处理

实验数据预处理就是模拟主光路光束的分光、衰减、旁瓣光束纹影小球遮挡过程,主要步骤为:首先,将原始远场光束按照 1:1 的比例分为主瓣和旁瓣光束,分光处理后光束分布如图 6(a)和(b)所示,在式(1)~式(2)中 $\alpha =$

$0.5, \beta = 0.5$;其次,对分光后的主瓣光束进行大倍率衰减,旁瓣光束衰减倍率为 1%,对应式(3)中 $k_2 = 0.01$,主瓣光束大倍率衰减后的图像如图 6(c)所示。由于旁瓣光束中心被纹影小球遮挡,剩余旁瓣光束外围区域光束能量相对较小,为了突显旁瓣光束外围区域弱信号的分

布特征,选择旁瓣光束的衰减倍率为 1,对应式(4)中 $k_p=1$ 。最后,模拟纹影小球对于旁瓣光束的遮挡效果,在纹影小球遮挡位置,当旁瓣光束遮挡后的传输距离 $z=0$ 时,将旁瓣光束纹

影小球区域内的光强分布设置为 0,而旁瓣光束纹影小球区域外的光强分布则保持不变。使用纹影小球遮挡旁瓣光束中心后光强分布如图 6(d)所示。

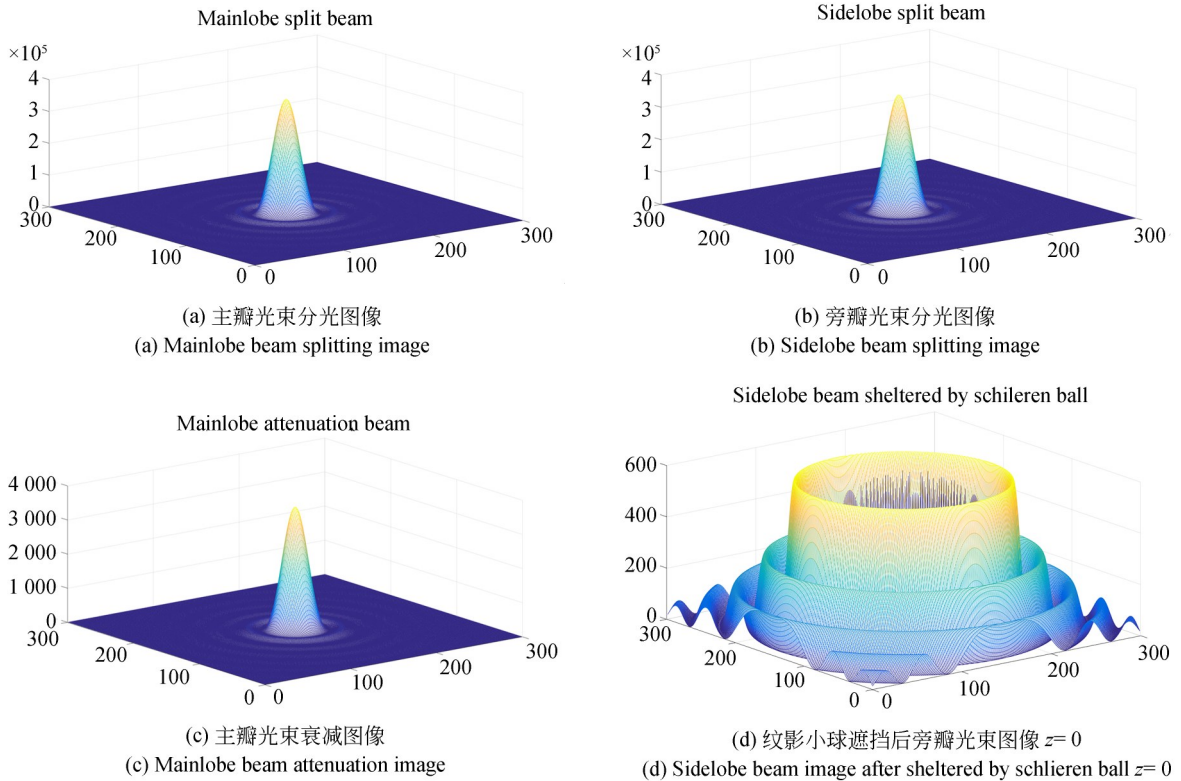


图 6 主瓣光束和旁瓣光束焦斑图像预处理结果

Fig. 6 Preprocessing result of mainlobe and sidelobe beam of focal spot image

3.3 旁瓣光束衍射

纹影小球遮挡旁瓣光束强能量区域会对旁瓣光束产生衍射现象,纹影小球遮挡位置旁瓣光束图像如图 6(d)所示。随着衍射后光束的传播,假设传输距离为 $z=200$ (单位: mm),则 CCD 成像位置的旁瓣衍射光束分布如图 7 所示。

3.4 模拟图像采集增加噪声

主瓣光束传输至图像采集位置前,需要经过分束、能量衰减。真实实验条件下主瓣 CCD 采集获得包含随机噪声的主瓣图像;仿真实验条件下的等效措施是对主瓣光束仿真图像增加随机噪声。旁瓣光束传输至图像采集位置前,需要经过一次主光路分光、二次旁瓣光束分光、纹影小球遮挡、旁瓣光束衍射。在真实实验条件下,旁瓣 CCD 采集获得旁瓣光束衍射光强图像,哈特曼采集获得旁瓣光束衍射相位图像,两个图像都

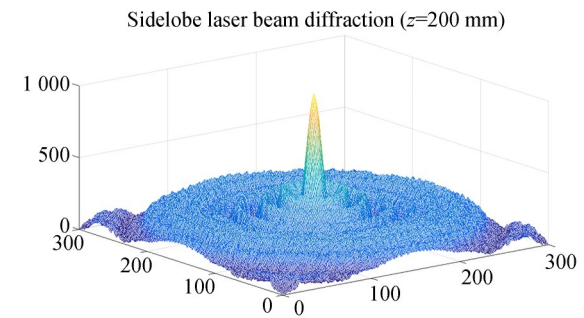


图 7 旁瓣光束衍射结果 $z=200$ mm

Fig. 7 Diffraction image of sidelobe beam $z=200$ mm

包含随机噪声。在仿真实验条件下,等效措施是对经过两次分光、纹影小球遮挡、旁瓣光束衍射的仿真旁瓣光强和相位图像增加随机噪声。

主瓣光束图像、旁瓣光束衍射相位图像、旁瓣光束衍射光强图像分别增加均方差为 250、10、

50 的随机噪声,主瓣光束、旁瓣光束衍射相位和旁瓣光束光强衍射图像增加的随机噪声分别如图 8(a)、(b)和(c)所示;增加随机噪声后的主瓣光束图像、旁瓣光束衍射相位图像、旁瓣光束衍射光强图像如图 8(d)、(e)和(f)所示。

3.5 去除噪声

对主瓣光束图像、旁瓣光束衍射相位图像、旁瓣光束衍射光强图像使用文献[16]所示的改进 DnCNN 算法进行去噪处理,如图 9(a)、(b)、(c)所示。

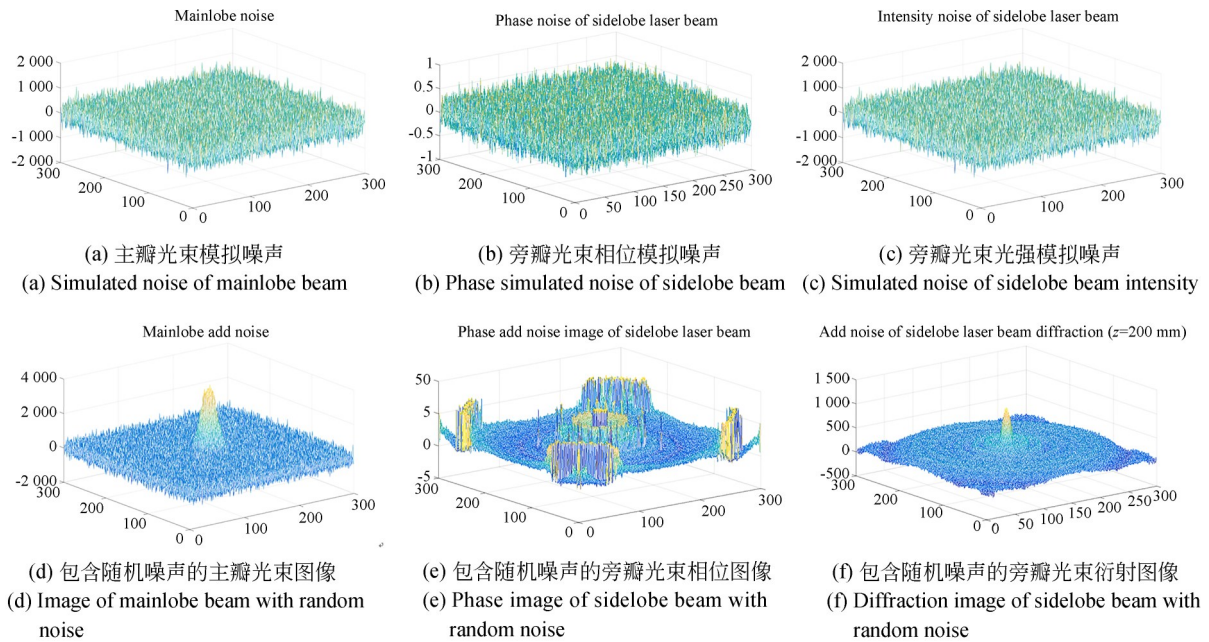


图 8 增加随机噪声图像

Fig. 8 Images of adding random noise

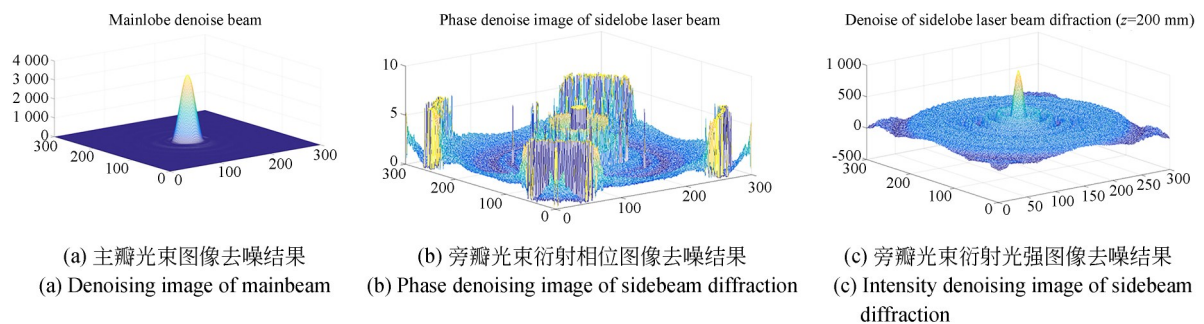


图 9 图像去除噪声结果

Fig. 9 Denoising result of add noise images

3.6 旁瓣光束衍射反演

为了准确获得未遮挡前的旁瓣光束分布,就需要以旁瓣光束衍射相位去噪图像(如图 9(b))和旁瓣光束衍射光强去噪图像(如图 9(c))作为输入,通过反演运算获得真正未衍射以前的及未遮挡的旁瓣光束分布图像(如图 10 所示)。本次

实验旁瓣 CCD 采集位置距离纹影小球中心位置 200 mm。

3.7 远场焦斑强度分布重构

远场焦斑重构就是以主瓣 CCD 采集图像、旁瓣光束衍射光强图像、旁瓣光束衍射相位图像作为输入完成最终远场焦斑的强度分布重构。

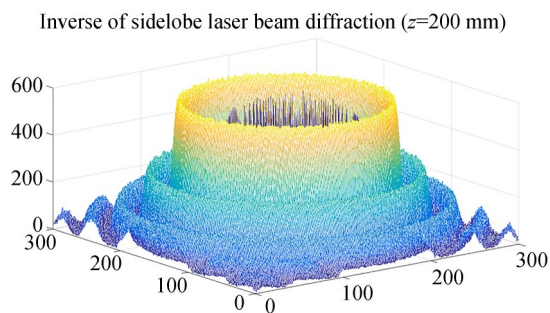
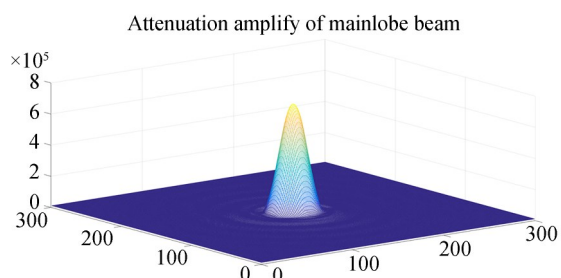


图 10 去噪后的旁瓣光束衍射反演图像 $z=200\text{mm}$
 Fig. 10 Denoising image of sidelobe beam diffraction in-
 version $z=200\text{ mm}$

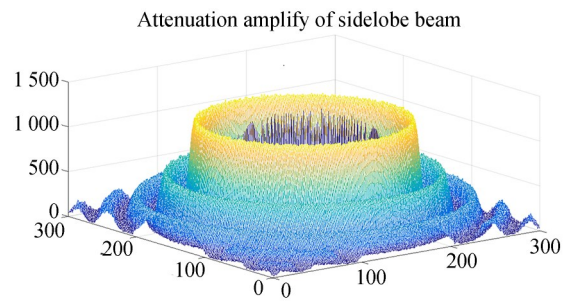
本次仿真实验主光路按照等比例分束为主瓣光束和旁瓣光束 ($\alpha=0.5, \beta=0.5$), 主瓣光束和旁瓣光束的衰减系数分别为 $k_z=0.01$ 和 $k_p=1$ 。因

此, 主瓣光束强度复原所乘放大倍数为 $1/(\text{主瓣光束分光比例} \times \text{主瓣光束衰减系数})=1/(\alpha k_z)=200$; 同样, 旁瓣光束强度复原所乘放大倍数为 $1/(\text{旁瓣光束分光比例} \times \text{旁瓣光束衰减系数})=1/(\beta k_p)=2$ 。主瓣光束强度复原图像和旁瓣光束强度复原图像分别如图 11(a)、(b) 所示。

经过主光路分束、光路衰减、旁瓣光束衍射、量化、去噪、旁瓣光束衍射反演等步骤后, 依据公式 (17) 完成远场焦斑重构。重构原则为: 重构焦斑主瓣区域使用主瓣光束图像数据填充, 重构焦斑旁瓣区域使用旁瓣光束衍射反演数据填充; 重构焦斑过渡区域使用主瓣光束图像数据和旁瓣光束衍射反演数据按照一定的比例填充。远场焦斑重构二维、三维图像分别如图 11(c)、(d) 所示。



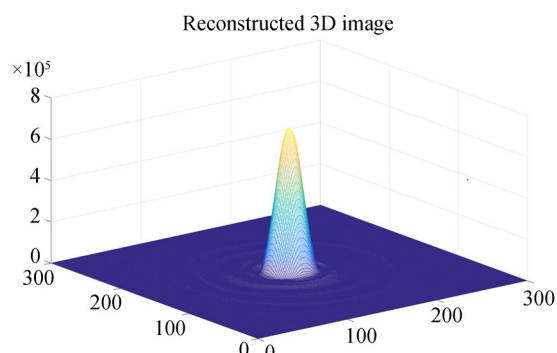
(a) 主瓣光束分光和衰减倍率放大图像
 (a) Mainlobe beam magnification image of splitting and attenuation



(b) 旁瓣光束衰减倍率放大图像
 (b) Sidelobe beam magnification image of attenuation



(c) 二维重构图像
 (c) 2D reconstructed image



(d) 三维重构图像
 (d) 3D reconstructed image

图 11 远场焦斑强度分布重构结果

Fig. 11 Intensity distribution reconstructed result of far-field focal spot

4 实验结果及分析

为了验证旁瓣光束衍射反演数学模型在理

论上的可靠性, 需要对旁瓣光束衍射反演数学模型进行实验仿真, 说明该数学模型所需要选择的具体参数和搭建验证实验环境所需要的实验条

件。该仿真实验是对章节 2.3 中实验仿真步骤“旁瓣光束衍射反演”的进一步分解和细化。将旁瓣光束衍射反演数学模型公式(14)~(16)使

用图形化形式所表示的旁瓣光束衍射反演仿真数据处理流程如图 12 所示,共分为预处理、旁瓣光束衍射、去噪、旁瓣光束衍射反演 4 个步骤。

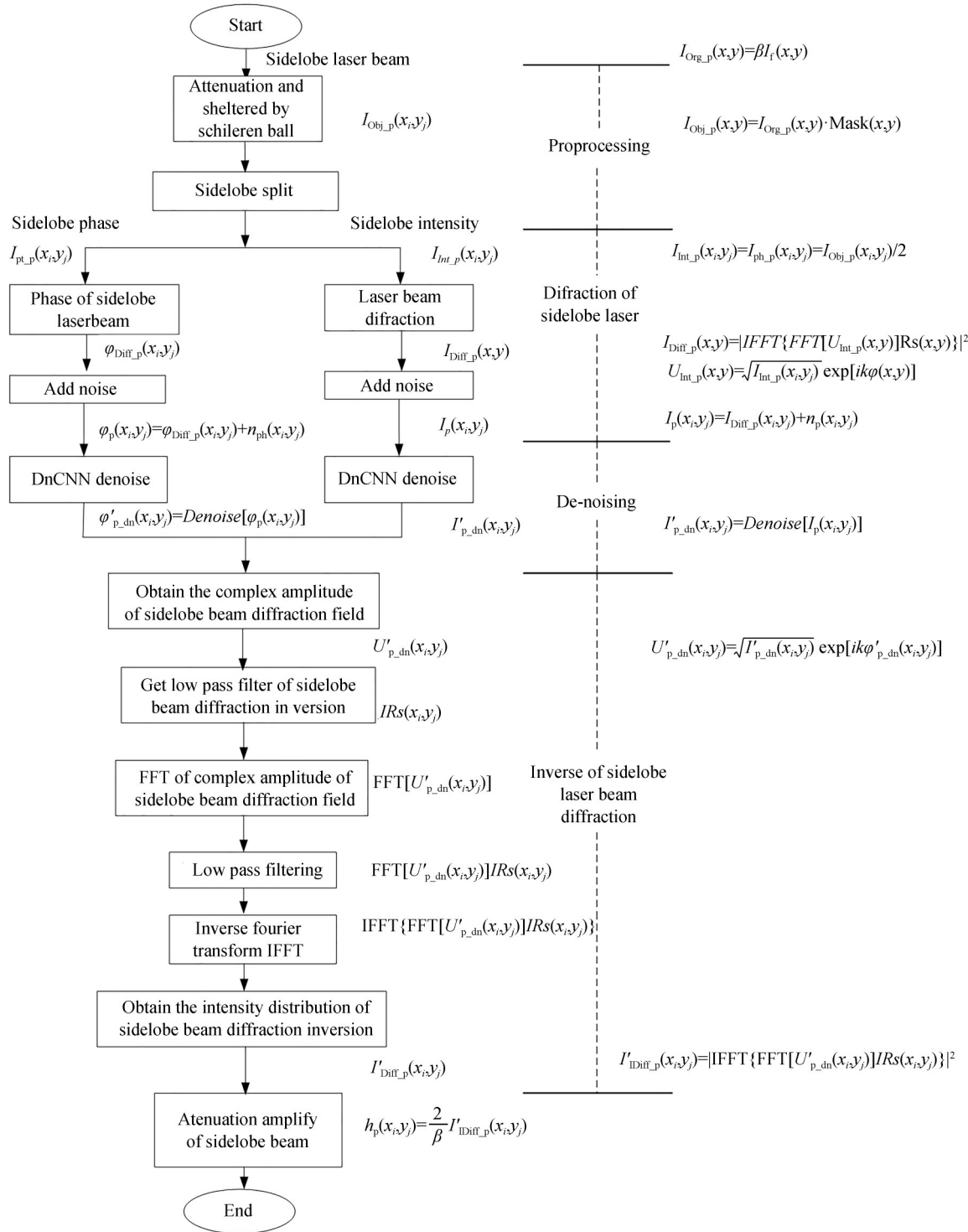


图 12 旁瓣光束衍射反演仿真数据处理流程

Fig. 12 Simulated data processing flow of sidelobe beam diffraction inversion

旁瓣光束衍射反演仿真实验侧重点是分析不同实验参数对于衍射反演结果的影响,主要分为 4 个方面:(1)传输距离 z 对于衍射反演结果的影响;(2)旁瓣衍射光束相位测量对于反演结果的影响;(3)去噪处理对于衍射反演结果的影响;(4)纹影小球大小对于衍射反演结果的影响。本文只是对前 3 个因素进行讨论。

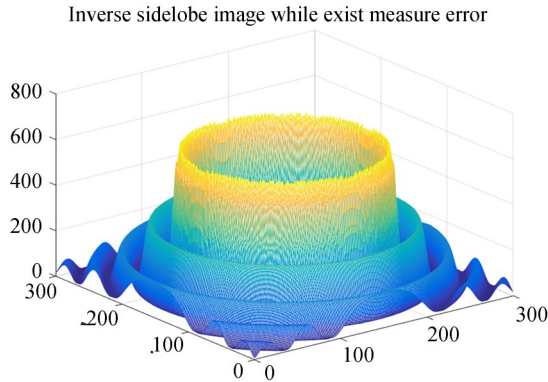
在真实的远场焦斑测量实验中,旁瓣光束衍射反演模型由于测量参数是通过估计和探测器

测量获得,而估计和探测器测量通常存在误差,为了仿真真实的远场焦斑测量实验环境,分别对旁瓣光束衍射反演模型中的重要参数(噪声、传输距离 z 、纹影小球直径大小 d 、旁瓣衍射光束相位 ϕ)增加不同的误差,误差统计如表 2 所示。在仿真误差环境下,获得的旁瓣光束衍射反演结果如图 13(a)所示,旁瓣光束衍射反演曲线($x=256$)如图 13(b)所示。

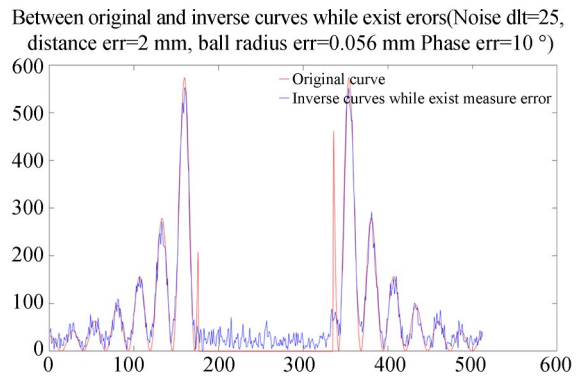
表 2 旁瓣光束衍射反演实验误差统计表

Tab. 2 Error statistics of sidelobe beam diffraction inversion experiment

Error name	Unit	Symbol	Theoretical value	Error value
Transmission distance error	mm	z	200	2
Average phase error of sidelobe beam	degree	ϕ	0	10
Noise mean square error		σ	0	25
Radius error of schlieren sphere	mm	d	0.4480	0.056



(a) 仿真误差环境下瓣光束衍射反演图像
(a) Diffraction inversion image of lobebeam in simulated error environment



(b) 仿真误差环境下旁瓣光束衍射反演曲线
(b) Diffraction inversion curve of sidelobe beam in simulated error environment = 256)

图 13 仿真误差环境下的旁瓣光束衍射反演结果

Fig. 13 Sidelobe beam diffraction inversion results in simulated error environment

从表 2 和图 13 可以看出,仿真实验中旁瓣光束衍射图像增加了均方差为 25 的随机噪声,并通过 DnCNN 算法完成去噪处理,作为公式(15)中去噪处理后的旁瓣光束衍射光强分布 $I'_{p,dn}(x_i, y_j)$;传输距离 z 理论值为 200 mm,仿真实验中的传输距离值 $z=202$ mm,误差为 2 mm;纹影小球半径 d 理论值为 0.896 mm,仿真实验中的纹影小

球半径 $d=0.392$ mm,对应旁瓣 CCD 相机 80 个像素,误差为 0.056 mm;旁瓣光束相位平均值为 -59.79° ,仿真实验中增加的平均误差为 10° 。在噪声、传输距离 z 、纹影小球直径大小 d 、旁瓣衍射光束相位 ϕ 这 4 种参数的综合误差作用下,产生的仿真实验结果如图 13 所示。从图可以看出,虽然 4 个参数与理论值都存在一定的误差,但是

在旁瓣有效区域($0 \leq x \leq 176$),旁瓣衍射反演信号与原始旁瓣信号之间波峰和波谷的上升和下降的趋势是十分相似的,这说明将旁瓣光束衍射反演模型应用在真实的远场焦斑测量实验中是值得信赖的。

在表 2 中的 4 个参数中,对旁瓣光束衍射反演结果影响最大的 3 个参数是传输距离 z 、旁瓣光束相位和 CCD 噪声。下面将 3 个实验参数对于旁瓣光束衍射反演实验结果的影响进行分析。

4.1 传输距离 z 误差对于旁瓣光束衍射反演结果的影响分析

为了讨论传输距离测量误差对于旁瓣衍射反演结果的影响,需要将其其他 3 个参数固定,噪声均方差 $\sigma=25$,纹影小球直径 $d=0.448 \text{ mm}$,旁瓣衍射光束分布 $\phi'(x, y)$ 与理论值误差为 0。不同的旁瓣光束传输距离测量误差对于旁瓣光束衍射反演产生巨大的影响,对比结果如图 14 所示。

从图 14 可以看出,传输距离误差 z 越大,对旁瓣光束衍射反演结果影响越大,当误差大于 10 mm 时,旁瓣光束衍射反演曲线中心出现衍射光斑;当误差小于 5 mm 时,旁瓣光束衍射反演曲线第 1~4 波峰的极大值失真较小;当误差小于 1 mm 时,对旁瓣光束衍射反演结果的误差基本可

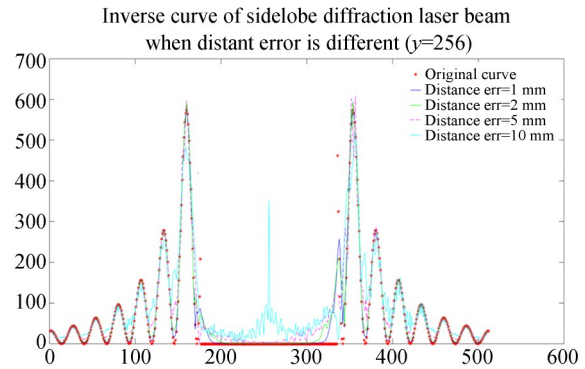


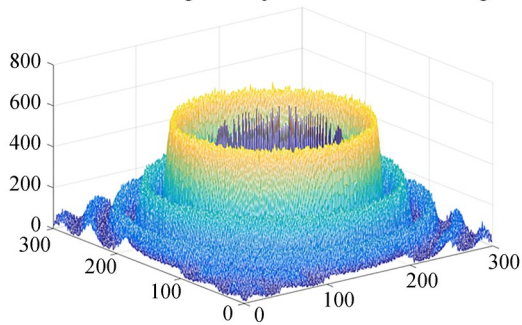
图 14 不同传输距离误差的旁瓣光束衍射反演结果
Fig. 14 Inverse curve of sidelobe diffraction beam with different distance error ($y=256$)

以忽略不计。因此,为了提高旁瓣光束衍射反演的精度,需要保证传输距离 z 的误差小于 1 mm。

4.2 旁瓣衍射光束相位测量误差对于旁瓣光束衍射反演结果的影响分析

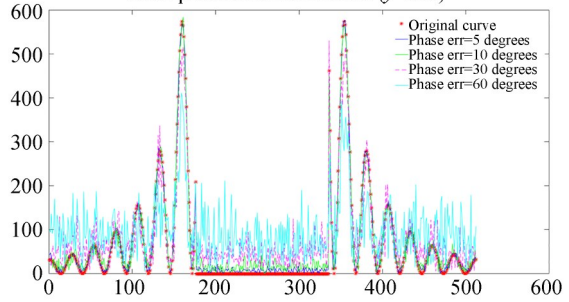
为了讨论旁瓣光束相位测量误差对于旁瓣衍射反演结果的影响,也需要将其其他 3 个参数固定,传输距离 $z=200 \text{ mm}$,噪声均方差 $\sigma=0$,纹影小球直径 $d=0.448 \text{ mm}$,这 3 个参数的取值与各自的理论值相等。当相位误差均方差等于 10 度时,旁瓣光束衍射反演结果如图 15(a) 所示。当对旁瓣光束相位增加均方差为不同度数的相位误差时,对于旁瓣光束反演结果产生不同的影响,对比结果如图 15(b) 所示。

Inverse sidelobe image while phase error MSE is 10 degrees



(a) 相位误差 MSE=10 度时的旁瓣光束衍射反演图像
(a) Phase error MSE=10 degrees sidelobe beam diffraction inversion image

Inverse curve of sidelobe diffraction laser beam when phase error is different ($y=256$)



(b) 不同旁瓣相位误差的旁瓣光束衍射反演曲线 ($y=256$)
(b) Inverse curve of sidelobe diffraction beam when phase error is different ($y=256$)

图 15 相位误差对旁瓣光束衍射反演结果影响分析

Fig. 15 Analysis the influence of phase error on diffraction inversion of sidelobe beam

从图 15(b)可以看出, 相位误差 ϕ 越大, 对旁瓣光束衍射反演结果影响越大, 当相位误差均方差大于 10 度时, 旁瓣光束衍射反演曲线完全被噪声淹没; 当相位误差均方差小于 5 度时, 旁瓣光束衍射反演曲线第 1~4 波峰的极大值失真较小; 当相位误差均方差小于 1 度时, 对旁瓣光束衍射反演结果的误差完全忽略不计。因此, 为了提高旁瓣光束衍射反演的精度, 需要保证相位误差 z 的均方差小于 5 度。

为了进一步说明相位测量误差对于旁瓣光束衍射反演结果的影响, 在不同相位随机误差情况下的反演结果比较如图 16 所示, 第一行为理想状态下的反演结果, 第二行为相位均方误差 $MSE = 10^\circ$ 的反演结果, 从图可以看出 ($y = 256$), 旁瓣光束原始曲线和旁瓣光束衍射反演曲线相关系数为 0.992 1, 第三行为相位均方误差 $MSE = 30^\circ$ 的反演结果, 旁瓣光束原始曲线和旁瓣光束衍射反演曲线相关系数为 0.938 9。当相位均方误差不同时 ($MSE < 30^\circ$), 每个波峰在 x 方向上位置基本上保持不变, 只是旁瓣区域

各个波峰在 y 方向上的信号存在差异。当相位均方误差极小时, 第一、第二旁瓣波峰和理想波峰差别很小, 而第三至第六旁瓣波峰和理想波峰差别会越来越大; 当相位均方误差 $MSE = 30^\circ$ 时, 第四至第六波的旁瓣波峰已经全部淹没在噪声中, 以至于无法区分出来。当旁瓣光束相位值为随机值时, 旁瓣光束衍射反演结果如第四行所示; 当旁瓣光束相位值为 0 时, 旁瓣光束衍射反演结果如第五行所示。从图中可以看出, 当旁瓣光束相位值为随机值或者某个固定值时, 除第一个旁瓣波峰以外, 其他的旁瓣波峰的信号都没有反演出来; 此外, 在纹影小球遮挡区域 ($176 < x < 335$), 衍射反演曲线中的信号依然很强, 在 y 方向上基本上和第一旁瓣信号相当, 这显然与未遮挡前的旁瓣光束信号基本为 0 的理论值不符。通过以上分析, 可以得到以下结论: (1) 旁瓣光束相位测量对于旁瓣光束衍射结果具有非常大的影响, 特别是影响旁瓣光束各个波峰信号在 x 方向和 y 方向的分布; (2) 旁瓣光束相位误差越大, 对于第一个波峰以外的波峰的误差影响越大, 以至于无

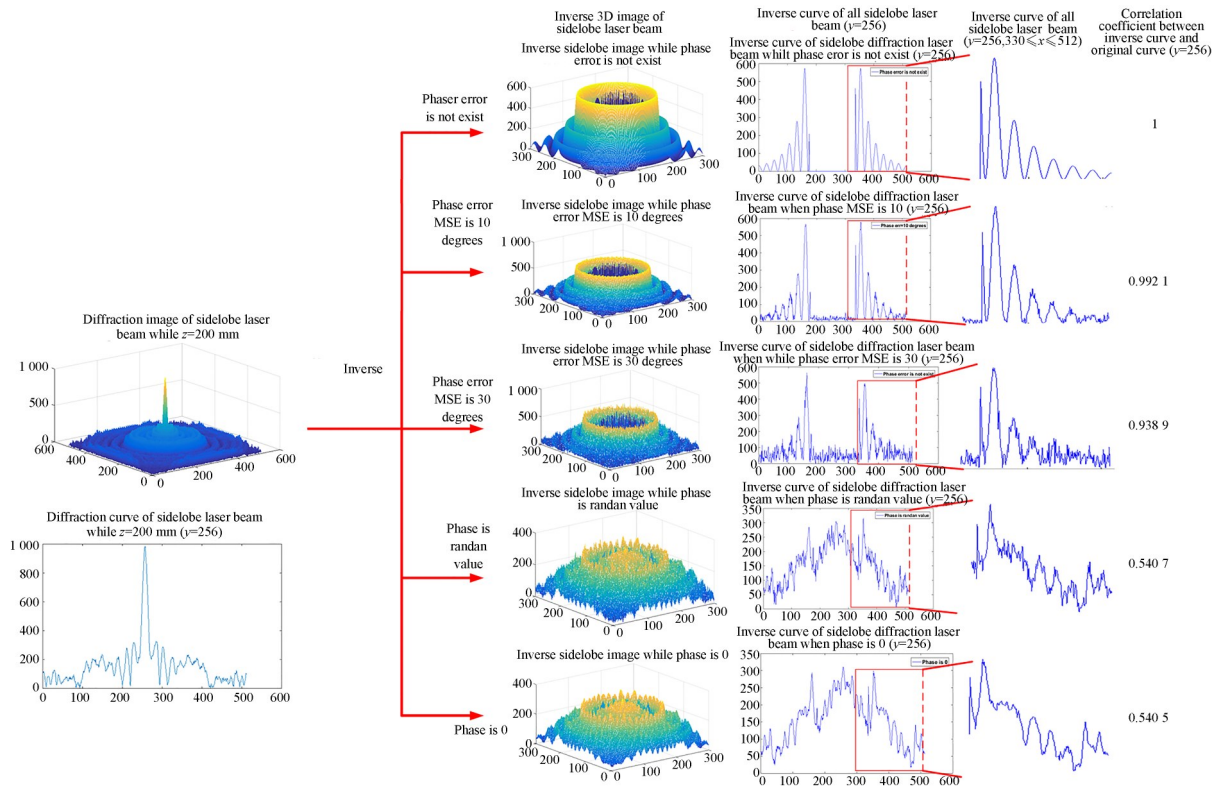


图 16 相位测量误差对于旁瓣光束衍射反演结果的影响

Fig. 16 Effect of phase measurement error on diffraction inversion of sidelobe beam

法区分出各个旁瓣波峰的分布特征;(3)当旁瓣光束相位测量不准时,在反演结果的纹影小球遮挡区域中依然存在很强的信号,这与未遮挡前的旁瓣光束信号基本为0的理论值不符,将影响旁瓣第一至第三波峰在y方向有效信号的测量。因此,只有使用哈特曼传感器采集到真实的旁瓣相位信号,才能通过旁瓣光束衍射反演运算实现真正的旁瓣光束弱信号的测量。

4.3 DnCNN 去噪对旁瓣光束衍射反演结果的影响分析

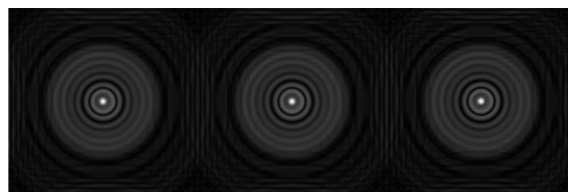
由于旁瓣 CCD 采集到的图像数据是经过纹影小球遮挡、衍射的图像,而且旁瓣 CCD 采集的旁瓣衍射图像包含了 CCD 相机的噪声。为了准确获得未遮挡以前的旁瓣光束分布,就需要以 CCD 采集到的旁瓣光束图像为输入(如图 17(a)),首先经过去噪(如图 17(c)),后经过反演运算获得真正未衍射以前旁瓣光束分布图像。

4.3.1 对旁瓣光束衍射图像 DnCNN 去噪效果分析

使用新的改进措施对旁瓣分光 and 衰减图像(以下简称旁瓣图像)进行去噪处理。根据参考文献[16]针对 DnCNN 算法的改进措施如下:(1)对 12 科学 CCD 进行预处理,将 12 位数据拉伸为 0~1 之间 double 类型;(2)将 DnCNN 算法中所有参数的数据类型转化为 double;(3)将去噪处理后的数据减去本底噪声;(4)将去噪处理的 double 数据进行灰度等级还原,拉伸至 0~4 095 之间。

在 DnCNN 去噪算法验证实验中,旁瓣图像最大灰度值为 754,增加均方差为 25 的随机噪声,旁瓣光束衍射图像去噪处理如图 17 所示。

旁瓣光束经过纹影小球遮挡后被纹影小球边缘衍射,被衍射后的图像和理论上未遮挡前的光强分布已经完全不同。纹影小球遮挡区域,即旁瓣光束中心区域形成一个明亮光斑;无法找到明显的旁瓣波峰信号,原来旁瓣波峰位置为峰值更加小的衍射环状分布。基于旁瓣衍射图像以上特征,只能从整体上对旁瓣衍射原始图像、加



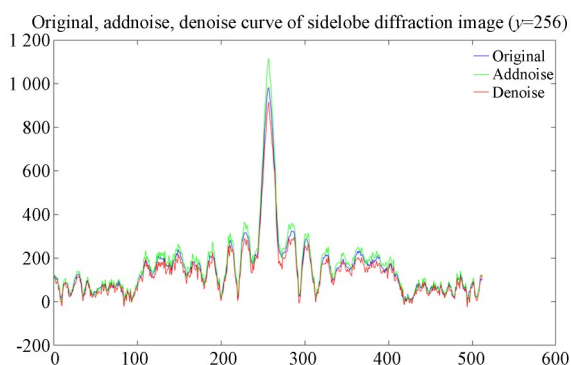
(a) 旁瓣衍射光束原始图像 (b) 旁瓣衍射光束噪声图像 (c) 旁瓣衍射光束去噪图像
(a) Original image of sidelobe diffraction beam (b) Add noise image of sidelobe diffraction beam (c) Sidelobe diffraction beam denoising image

图 17 改进 DnCNN 算法去除旁瓣光束衍射图像噪声效果

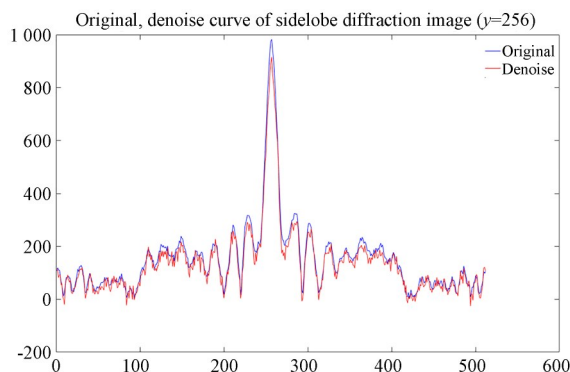
Fig. 17 Denoise effect of improve DnCNN algorithm on sidelobe diffraction beam addnoise image

噪图像、去噪图像进行比较说明。通过观察,旁瓣光束衍射去噪图像和原始图像在纹理、波峰形状上完全一致。当旁瓣衍射原始图像增加均方差为 25 的随机噪声,使用改进 DnCNN 算法去除旁瓣光束衍射图像噪声后,旁瓣衍射原始图像和旁瓣衍射去噪图像之间的相关系数为 0.998 83,去噪后的旁瓣衍射光束中心区域能量损失最小,旁瓣光束衍射去噪图像和原始图像最大值之间灰度差值为 78.91,误差为 7.94%,这说明改进 DnCNN 算法对于去除旁瓣光束衍射图像均方差为 25 的随机噪声的效果好。

旁瓣衍射图像去噪效果对比($y=256$)曲线如图 18 所示,图 18(a)和(b)中蓝色为原始曲线,绿色为的加噪声曲线,红色为去噪曲线。对旁瓣光束衍射原始图像增加均方差为 25 的随机噪声后,在 $y=256$ 的水平曲线中,原始图像增加最大值为 133.5,比较旁瓣光束原始曲线和去噪后曲线,两条曲线的峰值、轮廓、上升下降趋势完全吻合,两条曲线的相关系数为 0.996 9,误差小于 4.83%。比较两条曲线的上升沿和下降沿区域,灰度值误差小于 2.5,在每个衍射环所在的峰值位置,灰度值误差小于 26。由此可见,对于旁瓣衍射噪声曲线来说,改进 DnCNN 去噪算法在较大范围上升和下降区域的去噪效果比在极小范围的峰值区域的去噪效果好。去噪曲线旁瓣区域灰度积分和原始曲线旁瓣区域灰度积分的比值为 0.951 6。



(a) 旁瓣衍射光束原始、加噪声和去噪曲线比较 ($\delta=25$)
(a) Comparison of original, add noise and denoising curves of sidelobe diffraction beam ($\delta=25$)



(b) 旁瓣衍射光束原始和去噪曲线比较 ($\delta=25$)
(b) Comparison of original and denoising curves of sidelobe diffraction beam ($\delta=25$)

图 18 旁瓣衍射图像去噪效果对比曲线 ($y=256$)

Fig. 18 Comparison of sidelobe diffraction image of de-noising effect ($y=256$)

4.3.2 DnCNN 去噪对旁瓣光束反演结果影响分析

为了说明去噪处理对于旁瓣光束衍射反演精度的提升作用, 分别将未去噪的旁瓣光束衍射图像和去噪的旁瓣光束衍射图像分别作为输入, 其中旁瓣衍射图像所增加的随机噪声均方差为 25, 使用公式 (15) 进行衍射反演运算, 处理结果如图 19 所示。

从图 19 中可以看出, 旁瓣光束未衍射曲线与旁瓣光束衍射去噪和未去噪反演曲线之间总体轮廓上相似度很好。特别在旁瓣有效区域, 三条曲线之间的上升和下降趋势完全保持一致, 只是在旁瓣波峰的极大值位置相差较大。在旁瓣光束第一个波峰 ($x=160$), 未去噪反演曲线与未衍射曲线之间的误差为 28.4, 去噪反演曲线与未

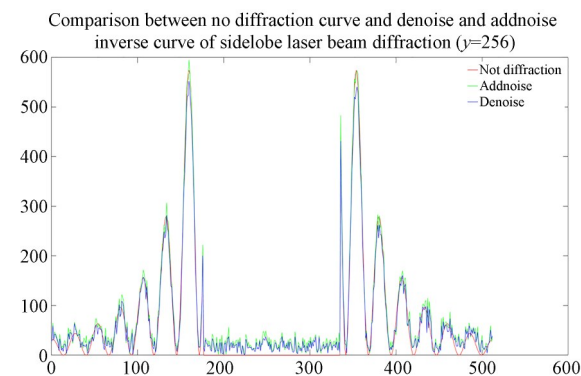


图 19 旁瓣光束未衍射曲线与旁瓣光束衍射未去噪和去噪反演曲线结果比较 ($\delta=25$)

Fig. 19 Comparison between no diffraction and denoise and addnoise inverse curve of sidelobe diffraction laser beam ($\delta=25$)

衍射曲线之间的误差为 -14; 在旁瓣光束第二个波峰 ($x=133$), 未去噪反演曲线与未衍射曲线之间的误差为 28.1, 去噪反演曲线与未衍射曲线之间的误差为 -2.8; 在旁瓣光束第三个波峰 ($x=107$), 未去噪反演曲线与未衍射曲线之间的误差为 14.5, 去噪反演曲线与未衍射曲线之间的误差为 -0.7。通过比较可以看出, 相比旁瓣光束衍射未去噪处理衍射反演, 经过去噪处理后旁瓣光束衍射反演图像与旁瓣光束未衍射曲线之间的信号误差更小。从整体上对三个曲线进行比较, 旁瓣光束未衍射曲线与旁瓣光束衍射未去噪反演曲线与之间的相关系数为 0.988 5, 旁瓣光束未衍射曲线与旁瓣光束衍射去噪后反演曲线之间的相关系数为 0.992 1。这说明在衍射反演前首先对旁瓣光束衍射图像进行去噪处理是十分必要的。另外, 在纹影小球遮挡区域 $176 < x < 236$, 旁瓣光束衍射未去噪反演曲线和旁瓣光束衍射去噪后反演曲线分别与旁瓣光束未衍射曲线之间误差大约为 12.9, 因为在最终焦斑重构过程中, 这个区间的信号使用主瓣信号进行替换, 对最终焦斑重构结果没有影响, 这个区间的误差可以忽略不计。

为了说明当噪声不同时, DnCNN 去噪算法对于旁瓣衍射光束反演结果的影响, 将不同均方差噪声情况下的旁瓣衍射光束先去噪后反演的处理结果进行比较, 结果如图 20 所示。

从图中可以看出, 当均方差噪声小于 25 时, 经过 DnCNN 算法去噪后的旁瓣光束衍射反演曲

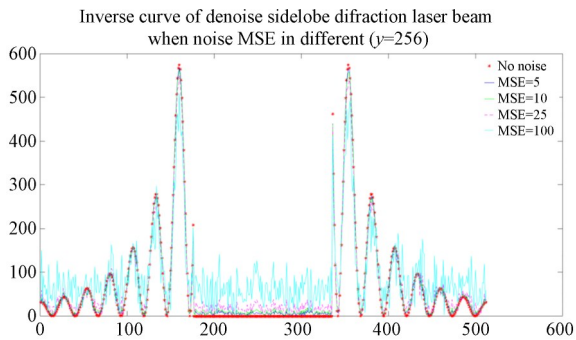


图 20 当噪声不同时旁瓣衍射光束去噪、反演结果 ($y=256$)

Fig. 20 Inverse curve of denoise sidelobe diffraction beam when noise MSE is different ($y=256$)

线与无噪声的旁瓣光束衍射反演曲线相似度高,反演真实度值得信任。当均方差噪声大于 100 时,经过 DnCNN 算法去噪后的旁瓣光束衍射反演曲线与无噪声的旁瓣光束衍射反演曲线相似度低,失真较大,基本上无法反演出有效的纹影小球未遮挡前的、未衍射的旁瓣光束分布图像。

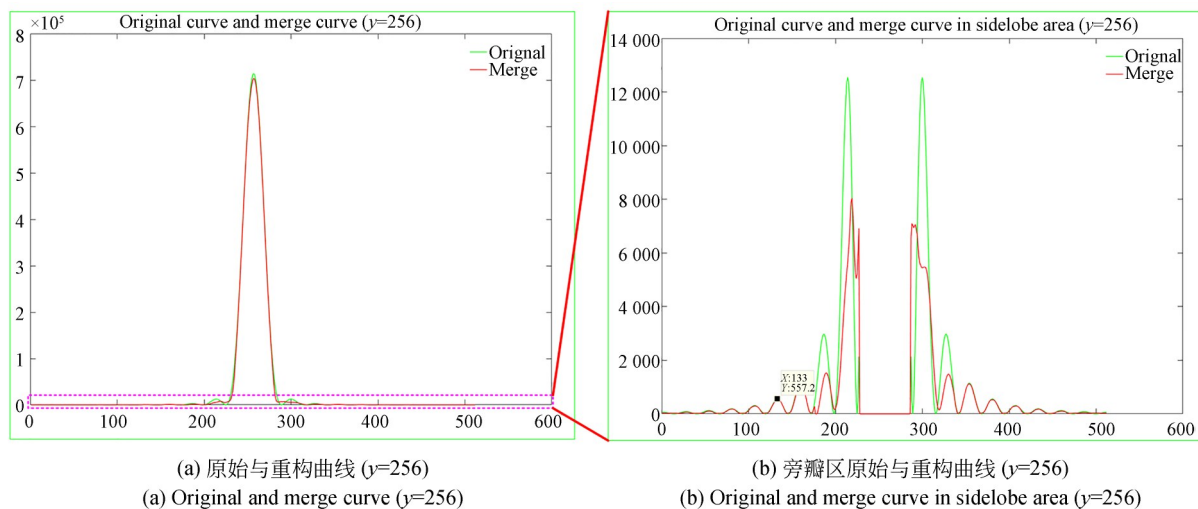
通过以上比较分析,可以得出的启发是:当噪声较小(均方差 σ 小于 25)时,经过 DnCNN 算法去噪后的旁瓣光束衍射反演结果是真实可靠的,也就是说,对于旁瓣衍射光束的测量,只有选择低信噪比的科学 CCD 进行采集,才能反演出原始的旁瓣光束分布图像,从而为最终获得精确的高动态范围远场焦斑分布图像提供保障。

4.4 旁瓣光束衍射反演对重构结果的影响分析

旁瓣光束衍射反演的反演精度首先反映了对旁瓣光束弱信号区域的测量精度,由于旁瓣光束衰减系数 $k_p=1$ 且旁瓣光束相比原始光束的比例系数 $\beta=0.5$ 。因此,在旁瓣区域最终重构远场焦斑的理论光强是旁瓣光束衍射反演理论光强的 2 倍,旁瓣光束衍射反演的精度直接反映了最终重构远场焦斑旁瓣区域的精度。

本次仿真实验选择传输距离 z 理论值为 200 mm,仿真实验中的传输距离 z 误差为 2 mm;纹影小球半径 d 误差为 0.056 mm,旁瓣光束相位的平均误差为 10 度,当主瓣图像和旁瓣图像增加随机噪声均方差为 25 时,远场焦斑强度分布重构结果如图 21 所示。

原始图像的最大值、旁瓣光束第四波峰值分别为 716 730、557.2,最大值是第四旁瓣波峰信号的约 1 286.3 倍;重构图像最大值、旁瓣光束第四波峰值分别为 704 855、530.9,最大值是第四旁瓣波峰信号的约 1 328.7 倍。由此可见,在原始图像和重构图像中旁瓣波峰信号相比主瓣光束波峰信号是极小的,为了突出展示原始图像和重构图像旁瓣区域中各个旁瓣波峰的起伏、形状等细节信息,采用放大镜模式对局部区域进行放大展示,所选择的旁瓣弱信号区域如图 21(a)用粉色矩形框所示,旁瓣弱信号区域局部放大结果如图 21(b)所示。



(a) 原始与重构曲线 ($y=256$)
(a) Original and merge curve ($y=256$)

(b) 旁瓣区原始与重构曲线 ($y=256$)
(b) Original and merge curve in sidelobe area ($y=256$)

图 21 远场焦斑重构精度分析

Fig. 21 Reconstructed accuracy analysis of far-field focal spot

根据参考文献[16],远场焦斑动态范围比值为重构焦斑光强分布最大值与第四旁瓣波峰信号值的比值。因此,改进DnCNN去噪算法对于包含噪声的主瓣光束和旁瓣光束采集图像去噪处理效果是影响动态范围比值精度的重要因素之一。

分析改进DnCNN去噪算法对于主瓣光束采集图像的去噪效果,选择原始图像和重构图像 $y=256$ 时的水平曲线如图21(a)所示,当 $x=256$ 时,主瓣原始图像和主瓣去噪图像的灰度值分别为3583.63和3524.31,两个灰度值之间的误差为59.32,这是因为受到去噪处理效果的影响。在本次实验中,主瓣衰减系数和分光比例的乘积 $\alpha k_z=0.005$,根据公式(9),当 $x=256, y=256$ 时,重构焦斑灰度值和原始图像灰度值之间的误差为 $59.32/(\alpha k_z)=11864$ 。重构焦斑灰度值和原始图像灰度值之间存在巨大误差的主要原因为:(1)去噪算法对于主瓣图像的误差估计不精确,噪声估计误差越大,则远场焦斑重构误差越大;(2)当主瓣光束经过分光 and 衰减倍率放大200倍后,噪声误差也被放大200倍。由于主瓣光束分光比例和大倍率衰减系数是确定的,所以降低远场焦斑重构误差的最有效方法就是提高主瓣光束图像的去噪精度。此外,主瓣光束选择较小分光比例 α 和能量衰减系数 k_z ($\alpha k_z < 10$),也有利于提高远场焦斑光强分布的重构精度。

对于重构焦斑的旁瓣波峰来说,以 $y=256$ 水平曲线为例,在旁瓣第一和第二个波峰区域噪声对焦斑重构的误差最大,如图21(b)和表3所示,在第一、第二、第三、第四旁瓣波峰位置的误差分别为4314、1452、11、26。通过观察发现,原始曲线和重构曲线四个旁瓣波峰之间的误差,从第一波峰到第四个波峰误差依次减少,在第四波峰区间 $[120, 172]$ 两曲线灰度值的误差小于30。对原始图像来说,最大值和旁瓣光束第四波峰值分别为716730、557.2;对重构图像来说,最大值和旁瓣光束第四波峰值分别为704855、530.9。因此,远场焦斑光强分布的原始图像和重构图像

的动态范围比值分别约为1286.3和1327.7。远场焦斑重构实验动态范围比值的误差和精度分别为42.55和96.80%。以上对比分析说明,将改进DnCNN去噪算法用于去除旁瓣弱信号区域的CCD噪声,能够有效提高远场焦斑重构实验动态范围比值的测量精度。

由于重构焦斑强度分布最大值为704855,重构焦斑旁瓣光束强度分布范围处于 $0\sim 4314$ 之间。在图21(b)中,虽然使用放大镜模式对局部区域进行放大展示,但该图中没有包含重构焦斑强度分布最大值信息,使用放大镜模式不仅能够展示重构焦斑强度分布最大值、四个旁瓣波峰灰度值,而且能够突出旁瓣区域中各个旁瓣波峰的起伏、形状信息,本文选择对数运算函数 \lg 变换重构焦斑和原始焦斑强度分布水平曲线($y=256$)的灰度值,两曲线的变换结果对比如图22所示。重构焦斑和原始焦斑中的最大值、四个旁瓣波峰灰度值、动态范围比值对比如表3所示。对数运算函数 \lg 变换后原始焦斑和重构焦斑水平曲线($y=256$)最大值分别用 C_{\max} 和 M_{\max} 标识,对应数值分别为5.8554和5.8481,原始焦斑水平曲线($y=256$)第一、第四旁瓣波峰等用 S^1_{\max} 和 S^4_{\max} 标识,对应数值分别为4.091和2.746,重构焦斑水平曲线($y=256$)第一、第四旁瓣波峰等用 M^1_{\max} 和 M^4_{\max} 标识,对应数值分别为3.904和2.725。

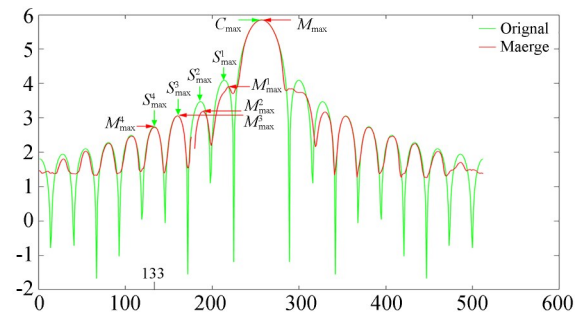


图22 原始焦斑和重构焦斑强度分布水平曲线($y=256$)灰度值对数变换结果对比

Fig. 22 Comparison of logarithm transform result of intensity distribution between original and reconstructed horizontal curve ($y=256$) of far-field focal spot

对数运算变换后原始焦斑和重构焦斑水平曲线($y=256$)最大值、第一、第二、第三、第四旁瓣波峰之间的误差分别为 -0.0073 、 0.187 、 0.290 、 0.004 和 0.021 。对应灰度值误差分别为 11875 、 4314 、 1452 、 11 、 26 。由此可见,对数运算变换前后都是第三波峰误差最小。

根据参考文献对动态范围比值定义^[16],重构

焦斑的动态范围比值和误差与第一个和第二旁瓣波峰的误差无关,仅与重构焦斑强度分布最大值和第四旁瓣波峰的灰度值相关。焦斑强度分布原始图像动态范围比值= $(10^{C_{\max}} - S_{\max}^4)$: $1 \approx 1286.47:1$, 重构焦斑图像动态范围比值= $(10^{M_{\max}} - M_{\max}^4)$: $1 \approx 1327.70:1$, 两个动态范围比值之间的误差约为 3.20% 。

表 3 重构焦斑和原始焦斑动态范围比值误差比较

Tab. 3 Comparison of dynamic range ratio errors between original and reconstructed far-field focal spot

Beam	Org. Max ($y=256$)	Merge Max ($y=256$)	Error of log10 curve	Error of gray curve	Dynamic range			
					Used	Org. Image	Merge Image	Error
Mainlobe	$C_{\max}=5.8554$	$M_{\max}=5.8481$	-0.0073	11875	Yes			
Peak 1	$S_{\max}^1=4.091$	$M_{\max}^1=3.904$	0.1870	4314	No			
Side- lobe	Peak 2 $S_{\max}^2=3.474$	$M_{\max}^2=3.184$	0.2900	1452	No	1286.3	1328.9	3.22%
Peak 3 $S_{\max}^3=3.06$	$M_{\max}^3=3.056$	0.0040	11	No				
Peak 4 $S_{\max}^4=2.746$	$M_{\max}^4=2.725$	0.0210	26	Yes				

通过全流程仿真基于旁瓣光束衍射反演的强激光远场焦斑测量实验过程,共包含 7 个实验步骤,特别增加了针对旁瓣光束弱信号区域光强分布精确测量问题而设计的旁瓣光束衍射反演步骤,该步骤能够有效消除因纹影小球遮挡产生的对于旁瓣光束强度分布的影响。此外,对于旁瓣光束衍射相位图像、旁瓣光束衍射光强图像使用改进的 DnCNN 算法进行去噪处理,有效去除了因为旁瓣光束相位和光强图像采集时,分别叠加在哈特曼和旁瓣 CCD 相机中的随机噪声。在本次强激光远场焦斑测量仿真实验中,重构焦斑和原始焦斑之间的相关系数大于 0.998 ,重构焦斑和原始焦斑两个动态范围比值之间的误差小于 4% 。由此说明,基于旁瓣光束衍射反演的强激光远场焦斑测量方法不仅能够提高旁瓣光束弱信号区域光强分布测量精确,而且能够从整体形貌上提升远场焦斑光强分布与理论焦斑光强分布的相似度和重构精度,从而进一步验证了该方法在理论上的合理性和实验上的可行性。

5 结 论

针对大型激光装置使用纹影法测量强激光远场焦斑存在无法解决旁瓣区域弱信号精确测量的问题,提出了基于旁瓣光束衍射反演的纹影法强激光远场焦斑测量方法。采用逆向推演间接测量的研究方法,沿光路传播方向逆向推导,以旁瓣光束衍射光强图像和相位图像作为输入,通过计算获得未遮挡前旁瓣光束远场焦斑分布。为了进一步提高激光装置的实验性能和测量精度,在以下三个方面进行改进和优化:在理论方面,构建基于旁瓣光束衍射反演的纹影法强激光远场焦斑测量数学模型,从理论角度揭示该数学模型和旁瓣光束衍射反演方法的合理性;在实验方面,将数学模型构建和实验仿真相结合证明新数学模型的可靠性;改进 DnCNN 去噪算法,可去除不同噪声级别($0\sim 75$ dB)、12 位科学 CCD 图像的噪声,以提升焦斑测量的实验精度。总之,本文采用旁瓣光束衍射反演的方法进行强激光远场焦斑精确测量的研究,探索提高旁瓣光束弱信号区域准确测量的问题,对揭示强激光远场焦斑分布测量值与理论值之间的规律具有重要意

义,为将来大科学激光装置的强激光远场焦斑的

精确测量奠定了基础。

参考文献:

- [1] 刘维宝, 郑万国, 朱启华, 等. 神光-III激光装置的总体集成及探索[J]. 国防科技, 2014, 35(6): 30-36.
LIU W B, ZHENG W G, ZHU Q H, *et al.* The system integration and exploration of SG-III high power lasers facility[J]. *National Defense Science & Technology*, 2014, 35(6): 30-36. (in Chinese)
- [2] 翟学锋, 王国富, 达争尚. 神光-III 3 ω 光路自动准直系统设计[J]. 应用光学, 2007, 28(2): 177-180.
ZHAI X F, WANG G F, DA Z S. Design of SG-III 3 ω laser beam auto-collimation system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(2): 177-180. (in Chinese)
- [3] HAYNAM C A, WEGNER P J, AUERBACH J M, *et al.* National Ignition Facility laser performance status[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3276-3303.
- [4] LUKE J R, THOMAS D, LEWIS J, *et al.* Evaluation of materials for on-board laser diagnostics[C]. *High-Power Laser Ablation VII*, "SPIE Proceedings. Taos, NM. SPIE, 2008.
- [5] BROMAGE J, BAHK S W, IRWIN D, *et al.* A focal-spot diagnostic for on-shot characterization of high-energy petawatt lasers [J]. *Optics Express*, 2008, 16(21): 16561-16572.
- [6] KRUSCHWITZ B E, BAHK S W, BROMAGE J, *et al.* Accurate target-plane focal-spot characterization in high-energy laser systems using phase retrieval[J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 20874.
- [7] ZHANG H D, FIORITO R B, SHKVARUNETS A G, *et al.* Beam halo imaging with a digital optical mask[J]. *Physical Review Special Topics — Accelerators and Beams*, 2012, 15(7): 072803.
- [8] 程娟, 秦兴武, 陈波, 等. 纹影法测量远场焦斑实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(4): 612-614.
CHENG J, QIN X W, CHEN B, *et al.* Experimental investigation on focal spot measurement by schlieren method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(4): 612-614. (in Chinese)
- [9] 贺元兴, 李新阳. 基于衍射光栅的远场焦斑测量新方法[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0208001.
HE Y X, LI X Y. Far-field focal spot measurement based on diffraction grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 0208001. (in Chinese)
- [10] 贺元兴, 李新阳. 正交光楔激光远场焦斑测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(11): 2543-2548.
HE Y X, LI X Y. Far-field focal spot measurement method based on orthogonal wedges [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(11): 2543-2548. (in Chinese)
- [11] 周继权, 王庆. 基于相机阵列的高动态范围图像合成方法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(9): 2858-2860, 2864.
ZHOU J Q, WANG Q. Camera array-based HDR image synthesis method[J]. *Application Research of Computers*, 2013, 30(9): 2858-2860, 2864. (in Chinese)
- [12] 李铭. 基于光场相机的高功率激光远场焦斑测量[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2018.
LI M. *Far-field focal spot measurement based on plenoptic camera*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [13] 王拯洲, 王伟, 夏彦文. 高动态范围激光焦斑测量数学模型研究[J]. 光子学报, 2014, 43(10): 1010002.
WANG Z Z, WANG W, XIA Y W. Mathematical model for the measurement of high dynamic range laser focal spot[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(10): 1010002. (in Chinese)
- [14] 王拯洲, 夏彦文, 李红光, 等. 万焦耳级激光装置的焦斑诊断[J]. 光子学报, 2016, 45(8): 0812001.
WANG Z Z, XIA Y W, LI H G, *et al.* Far-field focal spot measurement of 10kJ-level laser facility [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(8): 0812001. (in Chinese)
- [15] WANG Z Z, HU B L, YIN Q Y. An improved schlieren method for measurement and automatic reconstruction of the far-field focal spot[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0171415.
- [16] 王拯洲, 王力, 谭萌, 等. 基于远场焦斑测量数学模型改进的CNN去噪方法研究[J]. 光子学报, 2020, 49(12): 1212001.

- WANG Z Z, WANG L, TAN M, *et al.* Research on CNN denoising algorithm based on an improved mathematical model for the measurement of far-field focal spot [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12): 1212001. (in Chinese)
- [17] ZHANG Y M, LÜ Q N, GE B Z. Elimination of zero-order diffraction in digital off-axis holography [J]. *Optics Communications*, 2004, 240(4/5/6): 261-267.
- [18] 张磊, 钱晓凡, 毕精会, 等. 菲涅耳衍射的逆运算研究[J]. *激光杂志*, 2007, 28(1): 53-54.
ZHANG L, QIAN X F, BI J H, *et al.* Study on inverse calculation of Fresnel diffraction[J]. *Laser Journal*, 2007, 28(1): 53-54. (in Chinese)
- [19] 牛志峰, 郭建增. 近场强度分布对激光束光束质量的影响[J]. *应用激光*, 2011, 31(3): 200-203.
NIU Z F, GUO J Z. Effect of the near field intensity distribution on the quality of the laser beam[J]. *Applied Laser*, 2011, 31(3): 200-203. (in Chinese)
- [20] 高学燕, 苏毅, 叶一东, 等. 焦斑二阶矩半径与光束近场分布的关系[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(6): 1449-1453.
GAO X Y, SU Y, YE Y D, *et al.* Relation between second-order moment radius of focal spot and near field distribution of laser beam[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(6)

作者简介:

王拯洲(1976—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事信号与信息处理、激光参数测量的研究。E-mail: azhou_china@126.com