

基于衍射光栅的远场焦斑测量新方法

贺元兴^{1,2,3} 李新阳^{2,3}

¹国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073
²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209
³中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

摘要 提出一种基于一维线衍射光栅的焦斑重构和远场测量新方法,从理论上分析了新方法在拓展测量仪器动态范围、提取远场焦斑高频旁瓣信息的有效性及其方法的适用条件。基于实验室现有的一套远场测量系统平台及自行设计的一维线衍射光栅,以远场环围能量(PIB)曲线作为检验新方法有效性的指标,通过数值仿真和实验相结合考察了新方法的有效性,并从准确测量远场焦斑质量的角度探讨了不同减阈值的去噪方式对焦斑重构结果的影响,对结果进行了分析讨论。

关键词 光栅;线衍射光栅;远场焦斑;CCD 相机;动态范围;随机噪声

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0208001

Far-Field Focal Spot Measurement Based on Diffraction Grating

He Yuanxing^{1,2,3} Li Xinyang^{2,3}

¹College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

³Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract A new method of the reconstruction of focal spot and far-field focal spot measurement based on the diffraction grating is proposed, the validity of new method in expanding the measurement dynamic range and extracting the focal spot side lobe data is analyzed and the application condition is given in theory. According to the far-field spot measurement system available in laboratory and 1-D linear diffraction grating designed, power in the bucket (PIB) curve is taken as the measure of the validity of new method, the applicability of this new method is investigated by numerical simulation and experiment, in which the influence of the choice of the threshold on the results is discussed from the view of accurately calculating focal spot quality. The results are discussed and analyzed.

Key words gratings; linear diffraction grating; far-field focal spot; CCD camera; dynamic range; random noise

OCIS codes 050.1950; 050.1960; 230.5160; 010.1330; 010.1300

1 引 言

远场焦斑的准确测量对于诸如光束质量 β 因子、环围能量比等光束质量评价参数的正确评估至关重要。目前,远场焦斑的测量方法很多,有扫描法、感光法、烧蚀法和阵列探测法等^[1]。扫描法测量远场焦斑分布实时性差,它对光源的稳定性有一定要求;感光法和烧蚀法存在不能准确定量的问题;阵列探测法(如基于 CCD 相机成像方法)克服了前几

种方法的不足,具有实时性好、灵敏度高、操作和计算处理方便等诸多优点,已成为测量实际焦斑空间分布的主要手段。然而,由于常用的 CCD 相机线性动态范围十分有限,而实际远场焦斑的中心和旁瓣强度差别悬殊,约 4 个数量级^[2,3],这意味着实际远场焦斑的大量旁瓣信息将被测量仪器的噪声淹没而无法探测到,从而导致对光束质量评价参数的错误评估和计算。为了拓展 CCD 相机的测量动态范围,

收稿日期: 2011-09-01; 收到修改稿日期: 2011-10-05

作者简介: 贺元兴(1984—),男,博士研究生,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: yuanxing-he@163.com

导师简介: 李新阳(1971—),男,研究员,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: abopse2@ioe.ac.cn

纹影法^[4]、尖劈分束法^[5~7]相继被提出,然而纹影法要求待测远场焦斑的随机抖动要小,在实际应用中这对光束控制系统提出了更高要求;而对于尖劈分束方法,由于尖劈在光学加工过程中产生的面形误差将会对实际光束引入额外的波像差,而且聚焦后的细光束在尖劈内每经过两次内表面反射便会带入附加光程差,这使得在 CCD 光敏面上所形成的一列子光斑并非严格的远场焦斑。相比于纹影法和尖劈分束法,采用衍射光栅分束特性测量远场焦斑的方法放宽了对待测光斑随机抖动误差的控制要求,并且通过设计合理的光栅参数,可保证远场平面内所形成的各衍射子光斑的形态分布完全相似,不存在尖劈方法的小离焦问题,从而很好地克服了纹影法和尖劈分束方法的不足。

本文将一维线衍射光栅引入到远场焦斑的测量问题中,首先从理论的角度分析讨论了基于衍射光栅分束特性测量远场焦斑的新方法在拓展 CCD 相机线性动态范围、提取实际焦斑高频旁瓣信息的有效性,然后根据实验室现有的一套远场测量系统和自行设计制作的一维线衍射光栅,通过数值仿真和实验两种途径对该远场焦斑测量新方法进行了验证。结果表明,重构后的焦斑与传统测量方法^[8]测得的远场焦斑相比,重构的焦斑同时包含了真实焦斑的高频旁瓣信息以及中心主核区域的低频信息,它更完整地反映了真实焦斑分布形态,这为远场焦斑的测量提供了一种更为有效的手段。

2 基本原理

考虑如图 1 所示的一维线衍射光栅,周期性狭缝的延拓方向为 ξ 方向,每个狭缝的宽度为 a ,相邻狭缝的间距为 d ,则透射率函数为

$$t(\xi) = \left[\frac{1}{d} \text{rect}\left(\frac{\xi}{a}\right) \otimes \text{comb}\left(\frac{\xi}{d}\right) \right], \quad (1)$$

式中,“ \otimes ”表示卷积; $\text{comb}\left(\frac{\xi}{d}\right)$ 为梳状函数,定义为 $\text{comb } \xi = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(\xi - n)$; $\text{rect}\left(\frac{\xi}{a}\right)$ 为宽度为 a 的矩形窗口函数。

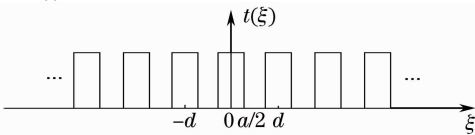


图 1 一维线光栅的透射率函数

Fig. 1 Transmissive ratio function of 1-D linear diffraction grating

将衍射光栅密接聚焦光学系统的入瞳面并与之平行放置,入射光束垂直辐照在衍射光栅的前表面,假设前表面光波复振幅分布为 $u(\xi, \eta)$,经衍射光栅的空间采样后,聚焦光学系统入瞳面上光波复振幅分布 $u_s(\xi, \eta)$ 可表示为

$$u_s(\xi, \eta) = t(\xi)u(\xi, \eta) = \left[\frac{1}{d} \text{rect}\left(\frac{\xi}{a}\right) \otimes \text{comb}\left(\frac{\xi}{d}\right) \right] u(\xi, \eta). \quad (2)$$

根据傅里叶光学原理^[9],在聚焦光学系统的远场焦平面上 (x, y) 点处衍射花样的复振幅为

$$U_s(x, y) = \frac{\exp(jkf)}{j\lambda f} \exp\left[j \frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right] \times \mathcal{L}\{u_s(\xi, \eta)\} = \frac{\exp(jkf)}{j\lambda f} \exp\left[j \frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right] \times \frac{a}{d} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}\left(\frac{an}{d}\right) U\left(\frac{x}{\lambda f} - \frac{n}{d}, \frac{y}{\lambda f}\right), \quad (3)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为激光波长; f 为聚焦光学系统的有效焦距; $U(x, y)$ 为不加光栅情况下光束远场复振幅函数。焦平面上光强分布为

$$I_s(x, y) = |U_s(x, y)|^2, \quad (4)$$

(3)式表明,经一维线衍射光栅抽样后光波的远场复振幅函数由中心分别位于 $(n\lambda f/d, 0)$ 位置的复振幅函数 $U(x, y)$ 的加权和构成,权系数与衍射光栅的结构参数有关。当复振幅函数 $U(x, y)$ 具有如下特征:函数取值大的部分位于中心有限区域,除此以外其他区域的取值较小或接近于 0,可认为该复振幅函数具有带限性,不妨假设复振幅函数分布区域的半宽为 $B_f \times \lambda f/D$,则当远场平面内相邻衍射级的中心间隔 $\lambda f/d$ 大于每一个衍射级复振幅函数的空间分布范围 $2B_f \times \lambda f/D$,即 $D/d \gg 2B_f$ 时,衍射花样彼此之间的强度交叠可以忽略,将(3)式代入(4)式可进一步得到

$$I_s(x, y) = |U_s(x, y)|^2 = \left(\frac{a}{\lambda f d}\right)^2 \times \sum_n \left[\text{sinc}\left(\frac{an}{d}\right) \right]^2 I\left(\frac{x}{\lambda f} - \frac{n}{d}, y\right), \quad (5)$$

式中, $I(x, y) = |U(x, y)|^2$ 为不加光栅情况下的远场焦斑分布函数。

由(5)式可以看出,各个衍射级的峰值光强比例关系由系数 $[\text{sinc}(an/d)]^2$ 确定,相邻衍射级的中心间隔为 $\lambda f/d$,每一个衍射级的光强分布形态与不加光栅情况下远场光强分布形态一致,这就为远场焦斑的重构和恢复奠定了理论基础。

基于一维线衍射光栅的远场焦斑测量和光斑重构方法如下:

1) 在激光远场焦斑测量中,通过调整衰减片的衰减倍率,使得零级衍射光斑 Spot_1 中心主核区域完全饱和,其大量高频旁瓣信息从测量仪器的随机噪声中凸现出来,而相邻一级(+1级或-1级)的衍射子光斑 Spot_2 处于测量仪器的线性响应区,其中心主核的强度分布信息在焦斑重构中是有用的,设 Spot_1 的光强分布为 I_1 , Spot_2 的光强分布为 I_2 ;

2) 根据(5)式,零级光斑 Spot_1 和相邻一级光斑 Spot_2 的峰值强度的理论比例为 $1: [\text{sinc}(an/d)]^2$,将 Spot_2 的光强度分布乘以比例系数 $[\text{sinc}(an/d)]^{-2}$,得到一新的衍射光斑 Spot_2_{new},其强度分布可表示为 $I'_2 = [\text{sinc}(an/d)]^{-2} \times I_2$ 。

3) 假设测量仪器的线性范围为 $[0, T]$,保留 Spot_1 光强分布中小于 T 的高频旁瓣数据并令大于 T 的中心区域数据为 T ,同时保留 Spot_2_{new} 强度分布中大于阈值 T 的中心主核区域数据并令小于 T 的受噪声污染的高频旁瓣数据为零,将经过上述处理后的两个远场光斑分别记为 Spot_1_Recon 和 Spot_2_Recon,它们的光强分布可分别表示为

$$I_{1\text{Recon}}(x, y) = \begin{cases} T & \text{for } I_1(x, y) > T \\ I_1 & \text{other} \end{cases}, \quad (6)$$

$$I_{2\text{Recon}}(x, y) = \begin{cases} I'_2(x, y) & \text{for } I'_2(x, y) > T \\ 0 & \text{other} \end{cases}. \quad (7)$$

4) 由(5)式可知 Spot_1_Recon 和 Spot_2_

Recon 的中心间隔为 $\lambda f / d$,由光斑 Spot_2_Recon 的峰值位置推算出零级饱和光斑的峰值位置,并依此对准两个光斑,将 Spot_1_Recon 和 Spot_2_Recon 进行拼接,从而得到既包含焦斑高频旁瓣信息又包含中心主核区域信息的更为完整的焦斑分布 Spot_Recon,其强度分布为

$$I_{\text{Recon}}(x, y) = I_{1\text{Recon}}(x, y) + I_{2\text{Recon}}\left(x \pm \frac{\lambda f}{d}, y\right) - T, \quad (8)$$

(8)式中,等号右边“±”号的选取根据 Spot_1_Recon 和 Spot_2_Recon 光强分布的相对位置关系确定。

3 仿真计算

为了验证上述焦斑重构理论在拓展测量仪器动态范围、提取光斑高频旁瓣信息的有效性,采用数值仿真方法进行了相关计算。由于激光在传输过程中受到各种扰动源的影响,远场的光束质量会降低,在众多扰动源中,大气湍流介质是其中尤为重要的一项,而 Kolmogoroff 湍流模型是描述大气湍流波像差的常用模型^[10],因此,下面仅针对圆环形平面光束在 Kolmogoroff 大气湍流介质中的传输和远场成像进行仿真计算和分析,仿照参数列于表 1。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameters	Value	Parameters	Value
Diameter of transmitted laser beam, D / mm	100	Obscuring ratio of laser beam, ϵ	0.5
Wavelength, $\lambda / \mu\text{m}$	3.39	Focal length of system, f / m	2.443
Grating constant, d / mm	5	Width of grating slit, a / mm	3
Number of pixels of CCD, N_{pixel}	128 × 128	Pixel size of CCD, $l_{\text{pixel}} / \mu\text{m}$	30
Saturation threshold of CCD, T_s / ADU	8000	Upper limit of Linear response range of CCD, $T_{\text{linear}} / \text{ADU}$	4000
Read-out noise of CCD, σ / ADU	15	Ground voltage of CCD, N_B / ADU	2600
Peak intensity of focal spot simulated, $I_{\text{max}} / \text{ADU}$	15000	Strength of atmospheric turbulence, D/r_0	2

图 2 为 $d=5 \text{ mm}$ 、 $a=3 \text{ mm}$ 一维线衍射光栅结构示意图,光栅狭缝的刻划方向沿竖直方向;图 3 给出了 $D/r_0=2$ 时按照 Roddier 的方法^[11]所生成的去倾斜像差后的某一帧大气湍流随机相位屏,单位为弧度;由图 2 和图 3 所示的近场分布反演远场,同时考虑 CCD 像素的离散积分采样、读出量化以及 CCD 背景噪声(这里假设背景噪声服从均值为 N_B 、标准差为 σ 的高斯型随机分布)的影响,仿真生成了不加光栅情况下 CCD 光敏面上远场焦斑强度分布,示于图 4。为了验证焦斑重构方法在拓展 CCD 动

态范围方面的有效性,图 5 给出了加入光栅情况下 CCD 光敏面上远场焦斑强度分布,图中已经去除了 CCD 背景直流电平的影响。不难看出,不加光栅时,由于适当的光能量衰减使得 CCD 光敏面上的远场焦斑峰值光强灰度值约为 4000 ADU(ADU 为 CCD 输出灰度单位),处于 CCD 相机线性响应范围之内;在加入光栅的情况下 CCD 相机光敏面上所成的零级光斑中心主核部分灰度值已经远远超出 CCD 的饱和阈值,零级光斑明显饱和,而相邻+1级子光斑的峰值光强小于 4000 ADU,处于 CCD 线性响应区。

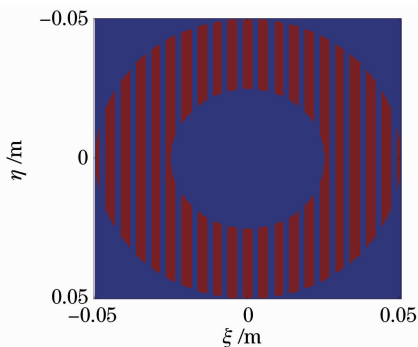


图 2 光栅示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 1-D diffraction grating

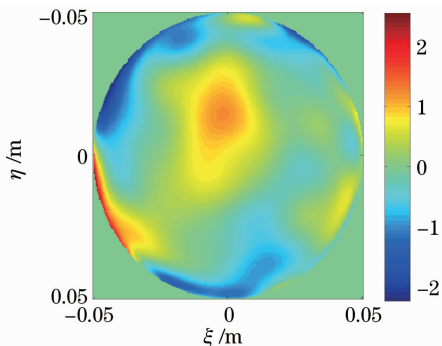


图 3 随机相位屏

Fig. 3 Random phase screen

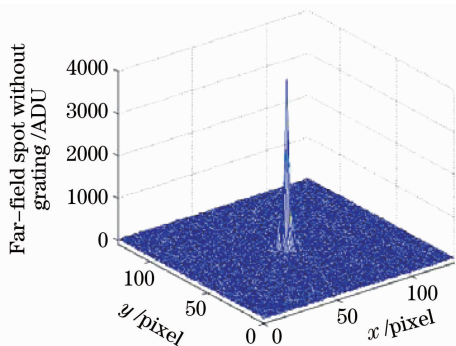


图 4 不加光栅情况下 CCD 上所成的远场光斑

Fig. 4 Far-field spot in the absence of grating

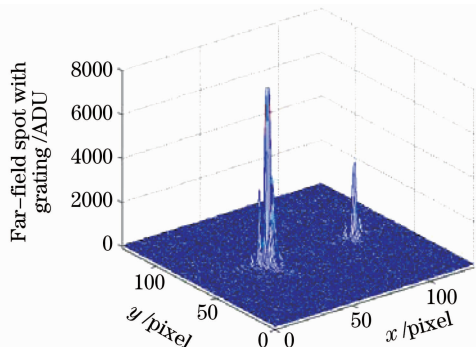


图 5 加光栅情况下 CCD 上所成的远场光斑

Fig. 5 Far-field spot in the present of grating

远场环能量(PIB)曲线包含了十分丰富的光斑信息,一些光束质量评价指标(如光束质量 β 因子和环能量比)的计算均可以通过理想焦斑 PIB 曲线和实际焦斑 PIB 曲线计算得到。因此,从准确测量远场焦斑质量的角度来看,通过以下 3 条环能量曲线,即加光栅时由零级和 +1 级衍射光斑重构的远场焦斑 PIB 曲线、不加光栅时远场焦斑 PIB 曲线以及不存在 CCD 背景噪声情况下的实际远场焦斑 PIB 曲线进行对比,可反映出焦斑重构方法对可靠评估远场光斑质量的有效性。在实际计算中发现,CCD 的背景噪声对光斑相关参数的计算结果影响很大,不同的去噪方式往往会得出完全不同的结论。“阈值法”是实际使用较多的一种去噪方法,在计算光斑相关参数前,根据 CCD 的背景噪声起伏大小人为地设置一个阈值 T ,将每个像素的输出灰度值减掉该阈值并将负值置零。阈值的选取对于焦斑 PIB 曲线的计算影响较大,图 6~8 分别给出了阈值取 CCD 背景直流电平分别加 1 倍噪声起伏均方根(RMS)、加 2 倍噪声起伏 RMS 和加 3 倍噪声起伏 RMS(即 $N_B + \sigma$ 、 $N_B + 2\sigma$ 和 $N_B + 3\sigma$) 这 3 种去噪方式下,重构后焦斑的 PIB 曲线和不加光栅时的远场焦斑 PIB 曲线,同时给出不含 CCD 背景噪声情况下实际焦斑的 PIB 曲线和理想焦斑的 PIB 曲线作对比,其中理想焦斑是由无像差情况下的环形平面光束计算得到的。由 PIB 曲线图至少可以得出以下两点结论:1) 从选取的阈值来看,阈值取 $N_B + \sigma$ 在 3 种去噪方法中更为合理,当阈值取为 $N_B + 2\sigma$ 和 $N_B + 3\sigma$ 时,实际焦斑的大量高频旁瓣信息被阈值去掉,从而造成有像差情况下实际焦斑的 PIB 曲线高于理想焦斑的 PIB 曲线,出现所谓“超衍射极限”的错误结果;2) 当阈值取为 $N_B + \sigma$ 时,利用第 2 节给出的方法所重构的远场焦斑的 PIB 曲线与不加光栅的远场焦斑计算的 PIB 曲线相比,前者更接近于

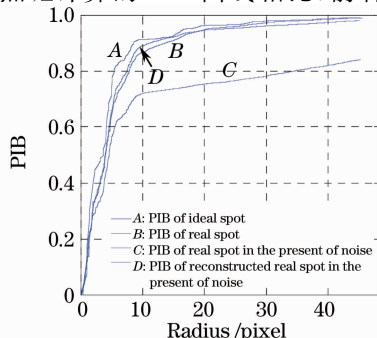


图 6 阈值为 $N_B + \sigma$ 情况下的 PIB 曲线

Fig. 6 PIB curves when the threshold is taken as $N_B + \sigma$

理论上实际光斑的 PIB 曲线,这说明加入衍射光栅后重构的焦斑远场分布更接近于理论上实际焦斑的远场分布,由此计算光束质量也将更为可靠。

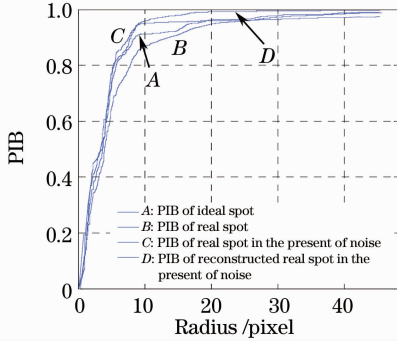


图 7 阈值为 $N_B + 2\sigma$ 情况下的 PIB 曲线

Fig. 7 PIB curves when the threshold is taken as $N_B + 2\sigma$

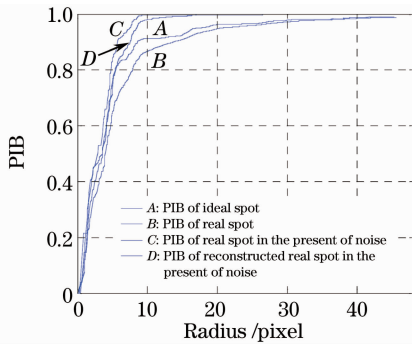


图 8 阈值为 $N_B + 3\sigma$ 情况下的 PIB 曲线

Fig. 8 PIB curves when the threshold is taken as $N_B + 3\sigma$

图 9 给出了阈值取 CCD 背景直流电平加 1 倍噪声起伏均方根值(RMS)(即 $N_B + \sigma$)的情况下重构的远场焦斑强度分布。可以看出,重构后的远场焦斑峰值光强灰度值接近于理论峰值灰度 15000 ADU,与图 4 所示的不加光栅情况下 CCD 测得的远场焦斑相比,焦斑峰值强度增加了约 4 倍,也就是说,加入衍射光栅后通过零级和一级衍射光斑进行

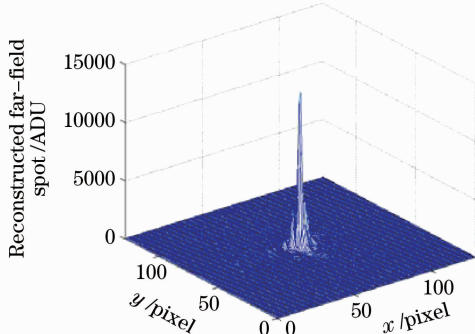


图 9 重构的远场焦斑

Fig. 9 Reconstructed far-field spot

焦斑重构,使得 CCD 测量的线性动态范围扩展了约 4 倍,这也进一步说明本文所提出的基于衍射光栅的远场焦斑测量方法在拓展 CCD 测量动态范围方面是十分有效的。

4 实 验

实验光路如图 10 所示,外径为 100 mm、中心遮拦比为 0.5 的圆环形光束经一维线衍射光栅 1 后进入聚焦光学系统 2 成像于放置在远场焦面上的 CCD 相机 3 光敏面上。其中,一维线衍射光栅密接平行放置在聚焦光学系统入射光瞳面前,狭缝刻划方向沿竖直方向,高速采集卡将所采集到的数据送交计算机 4 作进一步处理。远场焦斑测量系统相关技术参数如下: CCD 面阵的像素数为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$;像素尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$;数字信号输出为 14 bit; CCD 背景电平 N_B 约为 2680 ADU,背景噪声随机起伏 σ 为 15~16 ADU;待测激光波长为 $3.39 \mu\text{m}$;卡塞格林反射式聚焦系统外径大于 100 mm,中心次镜遮拦尺寸为 50 mm,系统有效焦距为 2.443 m;光栅常数为 5 mm,狭缝宽度为 3 mm。事先对该红外 CCD 相机的光电响应特性进行标定,如图 11 所示。当测量灰度值小于 4000 ADU 时,该相机的响应线性度较好,随着激光功率的进一步增加,CCD 相机的光电响应逐渐趋于饱和,饱和阈值在 8000 ADU 左右。

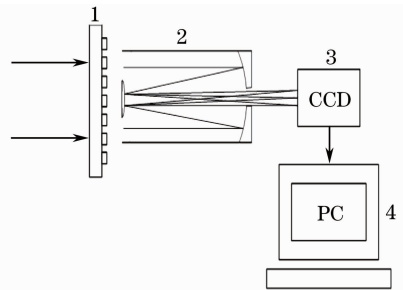


图 10 实验光路

Fig. 10 Schematic diagram of experimental system

根据上节的分析,在阈值取 CCD 背景直流电平分别加 1、2 和 3 倍 CCD 噪声起伏大小 3 种去噪方法中,从测量远场焦斑质量的角度来看,阈值取 CCD 背景直流电平加 1 倍背景起伏噪声大小时计算远场焦斑 PIB 曲线、进而计算远场光束质量更为合理,图 12 给出了在这种去噪方式下 CCD 相机实测的某帧远场焦斑,可以看出。零级衍射光斑中心主核部分已经完全饱和,而一级衍射光斑的峰值灰度约为 3600 ADU,处于该红外 CCD 相机的线性响

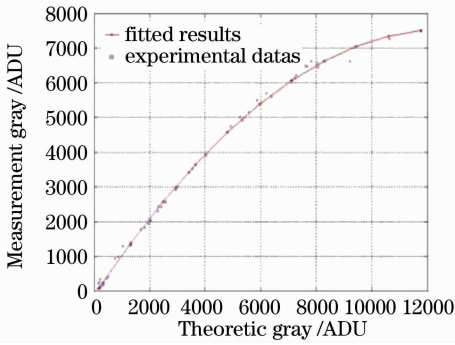


图 11 红外 CCD 相机光电响应特性曲线
Fig. 11 Photoelectric response curve for infrared CCD camera

应范围之内,利用焦斑重构方法对测量数据进行处理,得到重构的远场焦斑如图 13 所示。不难看出,重构的远场焦斑的峰值灰度值接近于14000 ADU,远远大于该 CCD 相机的饱和阈值,由于重构的远场焦斑同时包含了实际远场光斑的高频旁瓣信息以及中心主核部分的低频信息,更完整地反映了实际真实的焦斑分布形态。

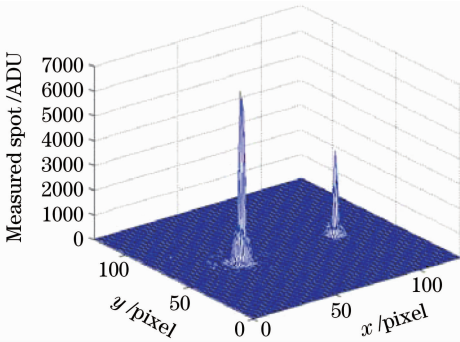


图 12 CCD 实测远场光斑

Fig. 12 Measured spot with CCD camera

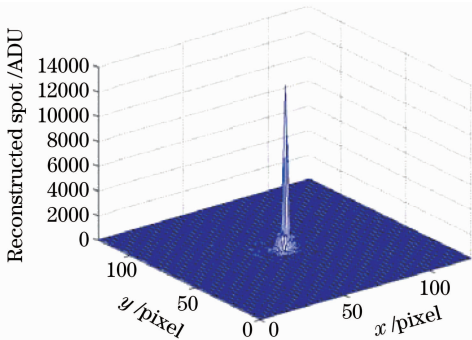


图 13 重构的远场焦斑

Fig. 13 Reconstructed spot

图 14 给出了阈值取为 CCD 背景直流电平加 1 倍噪声起伏 RMS 时,重构焦斑的 PIB 曲线和 +1 级衍射光斑的 PIB 曲线,可以看出,通过重构焦斑计算得到的 PIB 曲线要略高于由 +1 级衍射光斑

计算得到的 PIB 曲线,这是由于阈值取为 CCD 背景直流电平加 1 倍噪声起伏 RMS 时,远离光斑质心区域的随机起伏噪声并没有被完全消除掉,随机噪声参与了 PIB 曲线的计算,使得总能量较小的 +1 级衍射光斑在更广的空间范围内存在更多的能量份额,因而其 PIB 曲线也会相应地略高于总能量较大的重构焦斑的 PIB 曲线,这与上节仿真计算所得到的结果是一致的,重构焦斑的 PIB 曲线与 +1 级衍射光斑 PIB 曲线相比,前者更接近于实际真实焦斑的 PIB 曲线。

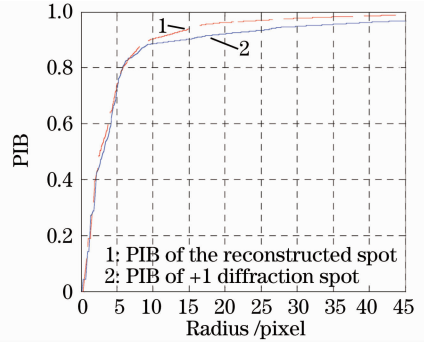


图 14 重构焦斑和 +1 级衍射光斑 PIB 曲线
(阈值取为 $N_B + \sigma$)

Fig. 14 PIB curves of the reconstructed focal spot and +1 diffraction spot (the threshold is taken as $N_B + \sigma$)

5 结 论

实际焦斑的准确测量对于光束质量相关参数的正确评估至关重要。本文将衍射光栅的分束特性应用到实际焦斑的测量问题中,提出了基于一维线衍射光栅的远场焦斑重构和焦斑测量新方法,并从理论上给出了该方法的适用条件。根据实验室现有的一套远场测量系统及自行设计的一维线衍射光栅,以焦斑 PIB 曲线作为验证方法有效性的评价指标,通过数值仿真和实验相结合的方法对焦斑重构方法在拓展 CCD 相机动态范围、提取焦斑高频旁瓣信息的有效性进行了验证。结果表明,CCD 背景噪声起伏对焦斑重构结果影响较大,在阈值取 CCD 背景直流电平分别加上 1、2 和 3 倍 CCD 噪声起伏大小 3 种去噪方法中,从测量远场焦斑质量的角度来看,阈值取 CCD 背景直流电平加上 1 倍 CCD 背景起伏噪声大小计算得到的远场重构焦斑 PIB 曲线更接近于真实焦斑的 PIB 曲线,进而计算得到的诸如光束质量 β 因子、环围能量比等光束质量评价参数也会更为可靠。

参 考 文 献

- 1 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. 247~264
苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. 247~264
- 2 P. J. Wegner, C. E. Barker, J. A. Caid *et al.*. Third-harmonic performance of the beamlet prototype laser [C]. *SPIE*, 1996, **3047**: 370~380
- 3 J. K. Lawson, P. A. Renard, M. A. Hennesian *et al.*. Focal spot characterization [C]. *SPIE*, 1996, **3047**: 800~808
- 4 Cheng Juan, Qin Xingwu, Chen Bo *et al.*. Experimental investigation on focal spot measurement by schlieren method [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(4): 612~614
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
- 5 C. W. Laumann, J. L. Miller, C. E. Thompson *et al.*. ICF Quarterly Report [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1991
- 6 Xie Xudong, Chen Bo, He Ling *et al.*. Algorithm research on focal spot reconstruction for high power laser output [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(3): 237~240
谢旭东, 陈波, 何凌等. 强激光远场焦斑重构算法研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(3): 237~240
- 7 He Ling, Chen Bo, Liu Hua *et al.*. Experimental investigation in far-field test technique for high power laser output [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(3): 245~248
何凌, 陈波, 刘华等. 激光远场焦斑测试技术的实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(3): 245~248
- 8 J. V. Gilse, S. Koczera, D. Greby. Direct laser beam diagnostics [C]. *SPIE*, 1991, **1414**: 45~54
- 9 Ji Jiarong, Feng Ying. Advanced Optics Course [M]. Beijing: Science Press, 2008. 179~181
季家镛, 冯莹. 高等光学教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2008. 179~181
- 10 He Yuanxing, Jiang Wenhan, Li Xinyang. Far-field propagation of focused Gaussian beam through atmospheric turbulence and effects of adaptive phase compensation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0312001
贺元兴, 姜文汉, 李新阳. 聚焦高斯光束在湍流大气中的远场传输及相位补偿效果 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0312001
- 11 Nicolas Roddier. Atmospheric wavefront simulation and Zernike polynomials [C]. *SPIE*, 1990, **1237**: 668~679

栏目编辑:何卓铭