

doi: 10.3788/gzxb20164508.0812001

# 万焦耳级激光装置的焦斑诊断

王拯洲<sup>1,3,4</sup>, 夏彦文<sup>2</sup>, 李红光<sup>4</sup>, 胡炳樑<sup>4</sup>, 殷勤业<sup>1</sup>, 郑奎兴<sup>2</sup>

(1 西安交通大学 电子与信息工程学院, 西安 710049)

(2 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

(3 中国科学院大学, 北京 100039)

(4 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

**摘要:**为了评估万焦耳级激光装置不同打靶透镜构型的远场光束质量,采用弱光取样、分束放大成像的探测方法,在横向放大系数相同而光强衰减系数不同的条件下,通过两台 16 位科学 CCD 在主办光路和旁瓣光路对  $3\omega$  激光束的焦斑进行采集;基于纹影测量激光焦斑数学模型,获得了动态范围为 1 151.7 : 1 的远场焦斑重构图像;并对 CCD 动态范围、分束光路相对放大系数、系统噪声等因素对焦斑诊断的影响进行了分析.实验表明,该方法能够实现高动态范围远场焦斑的精确测量,对于重构图像的拼接边缘误差小于 1 pixel,满足打靶要求.

**关键词:**光学测量;远场;焦斑;动态范围;纹影;高功率激光

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)08-0812001-6

## Far-field Focal Spot Measurement of 10kJ-level Laser Facility

WANG Zheng-zhou<sup>1,3,4</sup>, XIA Yan-wen<sup>2</sup>, LI Hong-guang<sup>4</sup>, HU Bing-liang<sup>4</sup>,  
YIN Qin-ye<sup>1</sup>, ZHENG Kui-xing<sup>2</sup>

(1 School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2 Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

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

**Abstract:** In order to evaluate the far-field beam quality of 10 kJ-level laser facility with different off-axis wedged focus lens, by utilizing the methods of the sampling of weak light beams and amplification imaging of splitting beams, the focal spot data of  $3\omega$  laser was collected by two 16-bit scientific-grade CCD cameras in the paths of main lobe and side lobe under the conditions of that the lateral magnification coefficient is the same but the intensity attenuation coefficient is different. One CCD obtained main lobe of far-field image, the other acquired its side lobe. The far-field focal spot was reconstructed based on the mathematical model of schlieren method, and the dynamic range is 1 151.7 : 1. The influence of CCD dynamic range, relative magnification ratio and system noise on reconstructed image was analyzed. Experimental results show that, the method can achieve a high dynamic range far-field accurate measurement of focal spot, the stitching error is less than one pixel, which meets the requirements of targeting experiments in experimental precision.

**Key words:** Optical measurement; Far field; Focal spot; Dynamic range; Schlieren reconstruction; High power laser

**OCIS Codes:** 120.1680; 120.4640; 120.4820; 130.3120

基金项目: 国家高技术研究与发展计划(No. 051Z331BOA)资助

第一作者: 王拯洲(1976-), 男, 副研究员, 博士研究生, 主要研究方向为信号与信息处理. Email: azhou\_china@126.com

导师(通讯作者): 夏彦文(1972-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为激光参数诊断. Email: xiayanwen1972@163.com

收稿日期: 2015-12-24; 录用日期: 2016-05-27

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

随着精密物理实验研究对激光驱动器输出参量的要求越来越高,未来大型激光装置对激光束的时域、空域和频域分布,能量以及功率等也提出了较高的调控能力要求<sup>[1]</sup>.对大型激光装置靶面焦斑的精密测量具有双重目的<sup>[2]</sup>,一是可以获得在不同激光功率入射条件下光学元件对焦斑的影响<sup>[3]</sup>,预测元件的非线性行为及终端光学组件的聚焦能力<sup>[4]</sup>;另一方面,通过获取焦斑的能量集中度,为焦斑质量的改善提供参考依据<sup>[5]</sup>.

焦斑分布的高动态范围<sup>[6]</sup>测量一直是大型激光装置参量诊断的难点之一,国内外大型激光装置对靶面焦斑分布的测量方法主要有长焦距透镜法、列阵相机法、Rattle pair法和纹影法等<sup>[7]</sup>,但这些方法难以解决万焦耳级激光装置焦斑分布测量难点,即激光弹着点

存在漂移、不同发次的焦斑形态分布各异、精密物理实验对靶面焦斑的要求多种多样<sup>[4]</sup>、打靶透镜存在不同构型等.

为了实现对万焦耳级激光装置一大口径高通量验证实验平台<sup>[8]</sup>的焦斑诊断,本文在已有焦斑数学模型<sup>[9]</sup>研究的基础上,采用纹影法<sup>[10]</sup>和拼接技术建立了高动态范围的焦斑测量的激光焦斑精密诊断系统,并对焦斑重构的准确性进行了系统评价.

## 1 诊断光路排布

为了测试大口径高通量验证实验平台不同打靶透镜构型的聚焦性能,采用弱光取样、先共路后分离放大的诊断技术,整个测量光路如图1,即以真空小靶室作为分割点,由真空小靶室前的取样光路和靶室后的诊断光路构成.

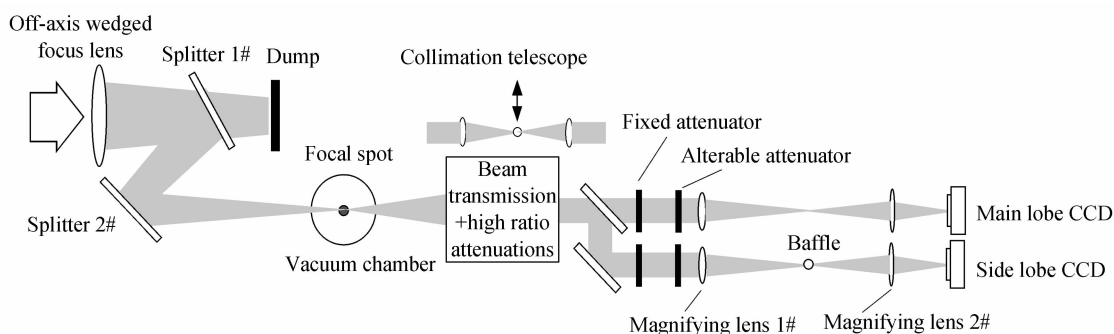


图1 基于纹影法的焦斑测量光路示意图

Fig.1 Schematic of laser beam focal plane measured by schlieren method

从楔形打靶透镜出来的三波长会聚激光束(1 053 nm、527 nm、351 nm)经两块楔形平面镜反射取样后进入真空小靶室,在真空小靶室中心聚焦,完成对焦斑的取样.打靶透镜安装在纵向可移动镜框内,通过自身的楔形在真空小靶室内完成三波长焦斑的横向空间分离;以小靶室中心作为基准,打靶透镜位置根据焦距的不同可前后移动,保证紫外 $3\omega$ (351 nm)激光束被测焦斑定位于小靶室中心;大部分能量经第一块取样镜透射后被能量截止器吸收,反射的弱光进入真空模拟小靶室,该实验设置避免了采用庞大的真空系统,方便对不同打靶透镜构型下的焦斑进行测试.

真空小靶室后的诊断光路采用先共路后分束放大的取样方式,即从小靶室中心射出的发散光经传输光路准直成小口径的平行光,经过级联式大倍率衰减器实现跨度多达10个量级的分段式能量衰减,经分光镜分成焦斑“主瓣”和“旁瓣”光路;在“旁瓣”光路中,平行光束首先经会聚透镜组聚焦,再经放大透镜组放大后在CCD相机上获得被测激光束的焦斑像,在会聚透镜的焦面处放置纹影小球挡住焦斑“主瓣”,因此CCD上形成的是焦斑“旁瓣”像,为适应装置在不同实验环境下的要求,通过替换放大透镜组完成不同焦斑

视场的测量需求;“主瓣”测量光路与此类似,为了保证“主瓣”和“旁瓣”光路像差的一致性,通过切换不同衰减完成两个光路探测器最佳响应匹配.

光路的准直分为小靶室的被测焦点准直和焦斑测量系统的准直.前者将激光装置发出的激光束会聚到模拟靶点,后者将模拟靶点成像到“主瓣”和“旁瓣”CCD上,并实现对“主瓣”、“旁瓣”相对放大系数、能量相对取样系数、成像位置关系等参量进行标定.

在焦斑测量系统的准直中,由于测量光路的固定衰减倍率大,要获得合适强度、焦斑形态分布规则的准直点光源像是非常困难的,为此,将准直功能分成两步:首先,在模拟靶点放置多模光纤点光源,将光纤端面成像到“主瓣”、“旁瓣”CCD的大致中心位置;然后,在“主瓣”、“旁瓣”分光之前及大倍率衰减之后插入一个望远准直组件,在光束焦斑位置放置单模光纤点光源,沿焦面横向移动点光源位置,对应的“主瓣”、“旁瓣”CCD上的光斑也相应移动,从而完成主瓣和旁瓣CCD相对应像素坐标关系之间的标定.

## 2 诊断方法

大口径高通量验证实验平台基于纹影测量远场焦

斑数学模型对焦斑进行测量,数学模型见图 2,共包含分光、量化和图像合成 3 个步骤<sup>[9]</sup>.

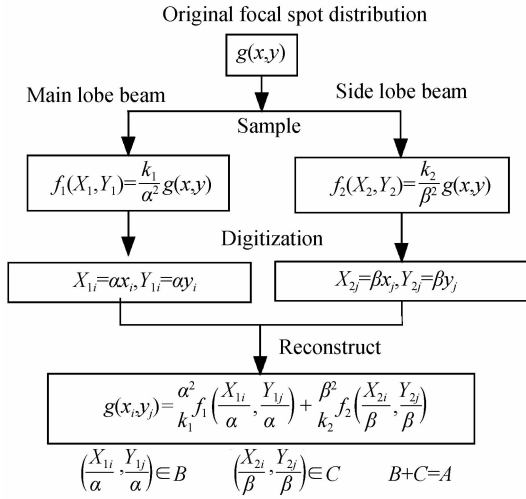


图 2 纹影测量激光焦斑数学模型

Fig. 2 The mathematical model to measure the laser beam focal spot

假设原始焦斑强度分布函数为  $g(x, y)$ ;  $(x, y)$  为靶面的笛卡尔坐标;  $f_1, f_2$  为到达主旁瓣 CCD 像面的光强分布函数;  $k_1, k_2, \alpha, \beta$  分别为主旁瓣光路的能量取样系数和焦斑横向放大率;  $(X_{1i}, Y_{1i}), (X_{2i}, Y_{2i})$  为主旁瓣 CCD 像元数值量化后的笛卡尔坐标;  $(x_i, y_i)$  为  $(x, y)$  的量化抽样值;  $B, C$  分别为主、旁瓣区域。

“主瓣”、“旁瓣”光路中的相关参量通过在线标定获得,即在被测取样信号处放置光纤点光源,横向移动点光源,记录下点光源在“主信号”和“次信号”探测器上的强度、位置坐标及相对移动量,从而获得相对强度衰减系数  $k = k_2/k_1$ 、“主信号”和“次信号”探测器像元坐标对应关系以及相对放大系数  $\gamma = \beta/\alpha$ 。由于在标定时建立了“主信号”和“次信号”探测器像元之间的对应关系,当纹影小球不能遮挡旁瓣中心时,使用主瓣中纹影小球对应区域的数据填充旁瓣纹影小球对应区域的数据,即利用坐标对应关系进行图像镶嵌。因此,重构图像的拼接准确度与纹影小球位置无关,克服了传统信号合成方法中拼接位置不明确,拼接图像不衔接的缺点,能够完成由于信号分布不规则导致纹影小球未遮挡部分饱和时的图像拼接。

经 CCD 像元量化后强度分布转化为离散值,如果两 CCD 的像元尺寸、相对放大系数  $\gamma$  不相同,对应于原始光斑的分割可能取不同的量化值,如图 3,导致合成图像各区域的空间分辨率不一致,出现了明显的拼

接痕迹。为了消除这些缺点,光路设计时尽可能使得  $\gamma=1$ ,同时选用相同的 CCD,确保分割的尺寸、像元数目一致。

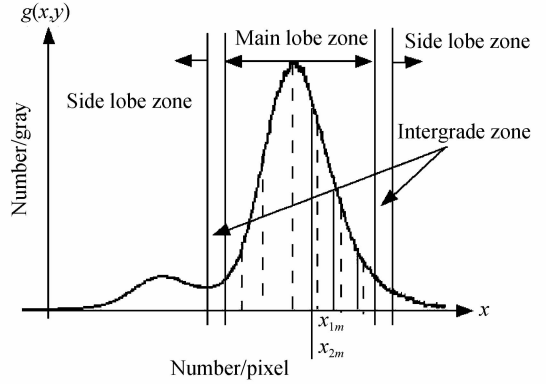


图 3 焦斑重构区域示意图

Fig. 3 Reconstructed zone of schlieren method

获得主瓣和旁瓣图像后,就需要对旁瓣数据进行重构,本文采用圆拟合法计算旁瓣图像中心,利用所述在线标定方法获取主瓣和旁瓣 CCD 相对应像素坐标关系以及主瓣和旁瓣相对强度衰减系数,通过渐入渐出的加权平均法消除图像边缘部分的灰度差来实现焦斑的形态分布测量<sup>[9]</sup>。该方法的优点在于:采用圆拟合法计算的圆心与纹影小球的光照度无关,坐标对应关系与纹影小球放置无关,因此,如果纹影小球没有挡住旁瓣光路的焦斑中心时也能准确获得纹影小球在主瓣光斑上的对应位置,而不是用主瓣重心来代替该位置,避免了实际打靶实验时光斑形状不规则以及纹影小球无法准确挡住旁瓣中心时的焦斑重构的真实性。

为了保证线性拼接,选取的“主瓣”、“旁瓣”拼接区域应存在重叠区域,重叠区域的强度值应处于 CCD 的线性区域,重叠区域的强度跨度越大,拼接后获得的焦斑分布越光滑,但整体动态范围就越低,因此,必须根据 CCD 的线性范围<sup>[11]</sup>、物理实验的要求合理选择重叠区域的强度值,重叠区域的合理选择主要通过纹影小球的大小、相对强度衰减系数来控制。

### 3 数值分析

实际 CCD 获得的图像存在噪声本底,假设“主瓣”和“旁瓣”CCD 的噪声分布函数分别为  $m_1(x_{1i}, y_{1i}), m_2(x_{2i}, y_{2i})$ ,这里  $i, j$  为 CCD 像素序号,重构的焦斑分布函数应修改为

$$g(x_i, y_j) = \begin{cases} \frac{\alpha^2}{k_1} \left[ f_1\left(\frac{X_{1i}}{\alpha}, \frac{Y_{1j}}{\alpha}\right) + m_1\left(\frac{X_{1i}}{\alpha}, \frac{Y_{1j}}{\alpha}\right) \right] & (x, y) \in B \\ \frac{d_1 \alpha^2}{k_1} \left[ f_1\left(\frac{X_{1i}}{\alpha}, \frac{Y_{1j}}{\alpha}\right) + m_1\left(\frac{X_{1i}}{\alpha}, \frac{Y_{1j}}{\alpha}\right) \right] + \frac{d_2 \beta^2}{k_2} \left[ f_2\left(\frac{X_{2i}}{\beta}, \frac{Y_{2j}}{\beta}\right) + m_2\left(\frac{X_{2i}}{\beta}, \frac{Y_{2j}}{\beta}\right) \right] & (x, y) \in B \cap C \\ \frac{\beta^2}{k_2} \left[ f_2\left(\frac{X_{2i}}{\beta}, \frac{Y_{2j}}{\beta}\right) + m_2\left(\frac{X_{2i}}{\beta}, \frac{Y_{2j}}{\beta}\right) \right] & (x, y) \in C \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $d_1, d_2$  为权重系数<sup>[9,12]</sup>, 代表重叠区域主旁瓣图像所占的比例, 且  $d_1$  由 1 渐变到 0,  $d_2$  由 0 渐变到 1, 满足  $d_1 + d_2 = 1, 0 < d_1 < 1, 0 < d_2 < 1$ .

从式(12)可以看出, 合并图像的各区域的噪声本底绝对值是不相同的, 即使通过扣除本底平均值的方法, 每区域的噪声标准偏差也是不同的, 即

$$\sigma(x, y) = \begin{cases} \frac{\alpha^2 \sigma_{m1}}{k_1} & (x, y) \in B \\ \frac{d_1 \alpha^2 \sigma_{m1} + d_2 \beta^2 \sigma_{m2}}{k_1} & (x, y) \in B \cap C \\ \frac{\beta^2 \sigma_{m2}}{k_2} & (x, y) \in C \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\sigma_{m1}, \sigma_{m2}$  为“主瓣”和“旁瓣”CCD 的噪声标准偏差,  $\sigma$  为合并图像的噪声标准偏差, 为了拼接边缘灰度台阶, 通过边界融合的方法可以实现图像的渐变过渡, 这种相互关系见图 4.

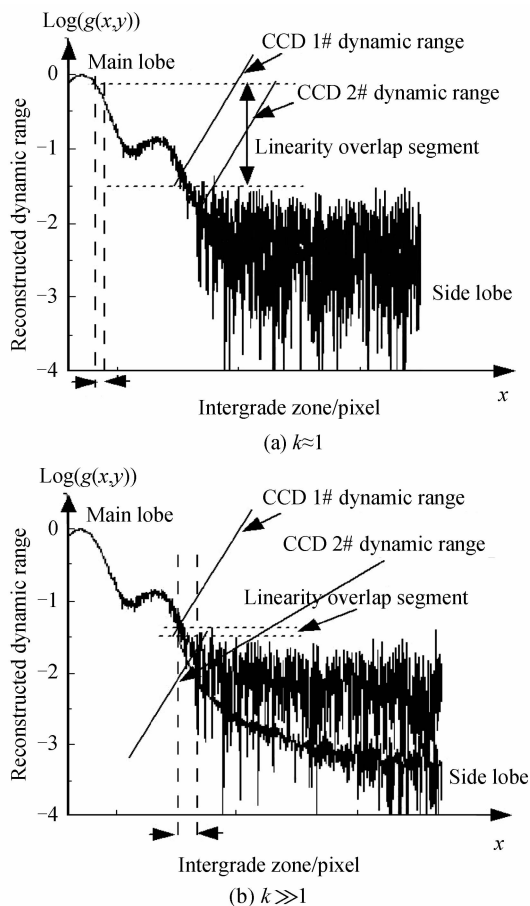


图 4 重构焦斑图像各参量间的相互关系

Fig. 4 Dynamic range of reconstructed focal spot

拼接算法能达到的动态范围除了与两 CCD 本身的动态范围有关外, 还与它们的相对强度衰减系数  $k(k > 1)$  有关. 在保持主瓣 CCD 获取的峰值灰度不变的情况下,  $k$  越小, 动态范围越低, 边界融合部分越平滑, 如图 4(a);  $k$  越大, 动态范围也越大, 边界融合部分会出现断层, 该部分误差偏大, 拼接图像越不平滑, 如

图 4(b); 随着  $k$  的增大, 两 CCD 线性重叠区域开始变小, 重构后的动态范围也越大, 但线性重叠区域向主瓣 CCD 的线性下限移动, 因此边界融合部分的误差变大, 拼接图像越不平滑.

使用纹影法对远场光斑进行测量时, 重构算法的误差主要来自于主瓣和旁瓣相对拼接位置. 为了提高图像拼接准确度, 设计了主瓣和旁瓣光路横向放大系数相同而衰减系数不同的光学系统. 这要求使用同样型号的 CCD 进行采集, 主瓣和旁瓣的焦斑横向放大系数完全相同, 而主瓣和旁瓣光强放大系数则不同, 即  $\gamma = 1$  和  $k > 1$ . 这样, 主瓣光斑和旁瓣光斑每个像素之间一一对应, 具体标定方法见参考文献[9].

为了降低标定光源的强度、光束质量对测量结果的影响, 需对相关系数的标定值进行统计平均. 利用在线标定  $\gamma$  的方法可以将两 CCD 探测面内的任意对应点的偏差控制在 1 pixel 内. 此外, 纹影小球中心的准确计算也可以提高重构图像的准确度, 因为只有确定旁瓣纹影小球中心和半径以及主瓣和旁瓣光斑之间各个像素的对应关系, 才能确定在旁瓣光斑中纹影小球区域需要替换的主瓣光斑数据, 通过圆拟合算法计算纹影小球中心坐标使得偏差小于 1 pixel.

### 4 实验结果

实验前首先测试了选用的 CCD 的线性灵敏度, 结果见图 5, 非线性偏差好于 2%, 动态范围大于 400 : 1.

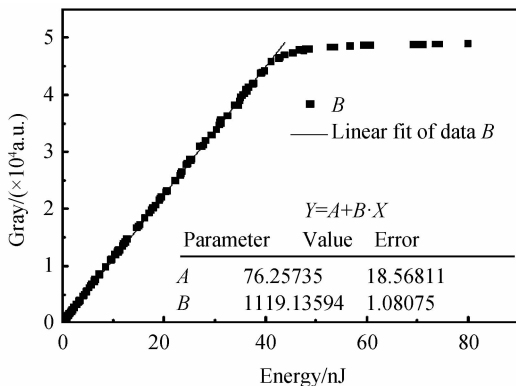


图 5 CCD 线性曲线

Fig. 5 Non-linearity of 16bit CCD

在实际的打靶实验中, 采用两个科学级 16 位的 CCD 采集主瓣和旁瓣数据, 采集的主瓣和旁瓣光斑如图 6.

在使用纹影法对远场光斑进行重构前, 需要得到实验中的参量  $\gamma$  和  $k$ , 这是由光路标定得到的, 在本次实验中主瓣相对旁瓣的焦斑横向放大系数  $\gamma = \beta/\alpha = 1/1.875$ , 主瓣相对旁瓣的强度衰减系数  $k = k_2/k_1 = 150$ . 对于远场光斑的重构, 主要包含的步骤为

1) 预处理. 主瓣、旁瓣图像去除本底, 旁瓣横向放大 1.875 倍, 并将旁瓣光斑的大小裁剪为  $1024 \times 1024$ ;

使用 Ostu 法对旁瓣光斑二值化,因为纹理小球图像的特点是纹影小球中心是黑色的,而且对比度低,所以需要先找到纹影小球背景区域,才能再找到纹影小球.

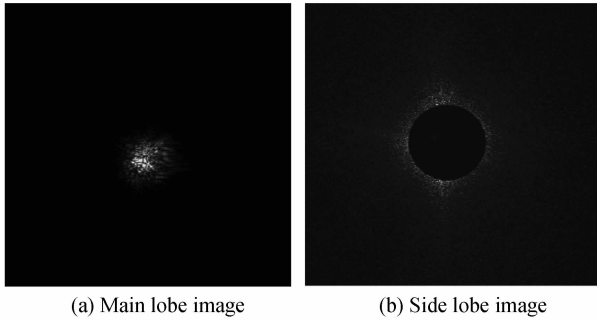
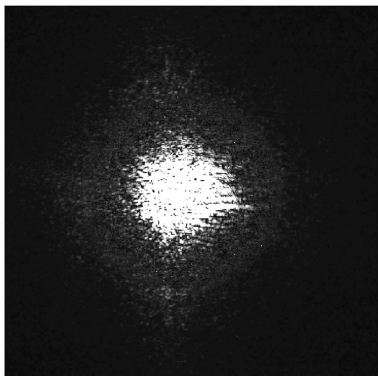


图 6 CCD 采集的图像  
Fig. 6 Images collected by CCD

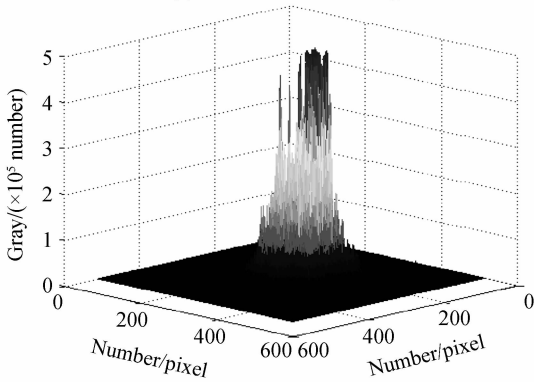
2)使用 Sobel 算子获得纹影小球圆轮廓,并使用最小二乘法拟合纹影小球的圆心和半径<sup>[13]</sup>,其中圆心坐标为(484,515),半径为 254.

3)图像合并.根据主瓣图像和旁瓣图像之间坐标对应关系,在主瓣图像中寻找和旁瓣纹影小球大小、位置相对应的圆区域,将该圆区域中主瓣数据乘以  $k$  后嵌入到旁瓣纹影小球对应的区域中.

4)采用加权平均法<sup>[9]</sup>对拼接边界±5 像素的区域进行融合,重构图像如图 7(a),三维重构图像如图 7(b).



(a) The reconstructed image

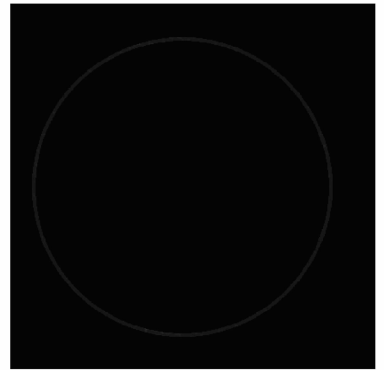


(b) The three dimensional reconstructed image

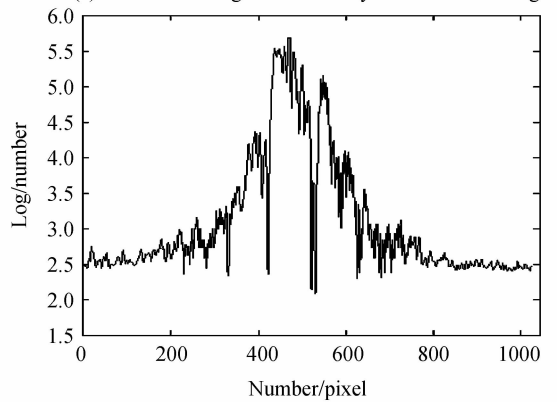
图 7 重构图像实物和重构三维图像

Fig. 7 The reconstructed image and the three dimensional image

为了计算重构图像的动态范围,需要计算两个值:重构图像的最大值  $C_{max}$ ,重构图像所测到最小的有效信号  $S_{min}$ <sup>[14]</sup>.在本次实验中, $C_{max} = 492397$  灰度, $S_{min}$  是一个统计值,它是旁瓣数据中位于纹影小球半径 1.3 倍处±5 个像素宽度的圆环灰度平均值,如图 8(a),计算得到的  $S_{min} = 427.54$ ,本次实验所得到的动态范围为  $C_{max}/S_{min} = 1151.7$ ,相比原来科学 CCD 的动态范围 400 : 1 提高到 1151.7 : 1.因此,通过纹影法能实现高动态远场光斑的测量.为了检测重构图像在拼接边缘的融合效果,获得重构图像中心的水平方向的灰度值取对数后的曲线,如图 8(b).因为水平拼接位置为 222 和 748,从图中可以看出,图像平滑,融合效果极好.



(a) The minimal signal detected by reconstructed image



(b) The one dimensional distribution function of reconstructed image

图 8 重构图像所测到最小的有效信号和该信号取对数后的一维强度分布

Fig. 8 The minimal signal detected by reconstructed image and its one dimensional distribution function

在纹影重构过程中,由于焦斑分布很不规则,出现纹影小球无法准确挡住旁瓣图像中心的情况,这样就使得旁瓣图像的边缘部分出现饱和,因为 CCD 具有饱和和溢出效应,如果在中心饱和的情况下,饱和溢出区域的图像数据也不准确,所以将纹影小球边缘部分的饱和区域以及周围区域用相应位置的主瓣图像数据乘以光强放大系数后进行替换,以尽可能保证拼接图像的真实性.

## 5 结论

本文采用弱光取样、分束放大成像以及等比例放大的纹影探测技术,实现了万焦耳级激光装置不同打靶透镜构型的远场焦斑分布诊断;分析了拼接图像各参量之间的关系,保证重构信号的准确性.研究表明,采用主旁瓣分束测量方法获得的动态范围从 400 : 1 提高到 1 151.7 : 1,重构图像的拼接边缘误差小于 1 pixel,满足了打靶要求.由于打靶过程中气流扰动的影响,预先标定好的主瓣旁瓣之间的位置关系往往存在一定的误差,所以,如何获得一个不依赖于标定的自动重构算法将是今后的研究重点.

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] DU Xiang-wan. Factor for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in far field[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, **24**(4): 327-332.  
杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素[J]. 中国激光, 1997, **24**(4): 327-332.
- [3] SHAO Min, FU Hai-wei, LUO Xiao-dong, *et al.* B integral in high power laser system[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, **5**(6): 1-4.  
邵敏,傅海威,罗小东,等. 高功率激光系统中 B 积分的研究[J]. 光学与光电技术, 2007, **5**(6): 1-4.
- [4] HEESTAND G M, HAYNAM C A, WEGNER P J, *et al.* Demonstration of high-energy  $2\omega$ (526;5nm) operation on the national ignition facility laser system[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(19): 3494-9.
- [5] LI Ping, WANG Wei, ZHAO Run-Chang, *et al.* Polarization smoothing design for improving the whole spatial frequency at focal spot[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(21): 215202.  
李平,王伟,赵润昌,等. 基于焦斑空间频率全域优化的偏振匀滑设计[J]. 物理学报, 2014, **63**(21): 215202.
- [6] SHEN Wei-min, WU Quan-ying, XUE Ming-qiu. Optical design of far field beam diagnosis system in Shen-Guang III intense laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 964-969.  
沈为民,吴泉英,薛鸣球. 神光 III 强激光束远场诊断系统光学设计[J]. 光子学报, 2004, **33**(8): 964-969.
- [7] LIU Hong-jie, JING Feng, ZUO Yan-lei, *et al.* Relation between wavefront power spectral density and wings of focal spot[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(4): 504-508.  
刘红婕,景峰,左言磊,等. 激光波前功率谱密度与焦斑旁瓣的关系[J]. 中国激光, 2006, **33**(4): 504-508.
- [8] XIA Yan-wen, LIANG Yue, LI Sen, *et al.* Energy measurement system of a large-aperture high power laser experiment platform[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2013, **21**(1): 126-131.
- [9] WANG Zheng-zhou, WANG Wei, XIA Yan-wen. Mathematical model for the measurement of high dynamic range laser focal spot[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1010002.  
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.
- [10] CHENG Juan, QIN Xing-wu, 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.
- [11] GUAN You-guang, ZHOU Wen-chao, TIAN Xiao-qiang. Influence analysis of detector dynamic-range on laser beam quality factor  $\beta$  measurement[J]. *Laser&Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(7): 401-407.  
关有光,周文超,田小强. 探测器动态范围对光束质量  $\beta$  因子测量的影响分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(7): 401-407.
- [12] YANG Zuo-ting, RUAN Ping, ZHAI Bo. Auto-exposure algorithm for scenes with high dynamic range based on image entropy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(6): 742-746.  
杨作廷,阮萍,翟波. 基于图像熵的高动态范围场景的自动曝光算法[J]. 光子学报, 2013, **42**(6): 742-746.
- [13] WANG Zheng-zhou, WANG Wei, HU Bing-liang, *et al.* Design and implementation of integrated diagnostic beam fast automatic alignment system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0512005.  
王拯洲,王维,胡炳樑,等. 综合诊断光路快速自动准直系统设计及实现[J]. 光子学报, 2014, **43**(5): 0512005.
- [14] ZHOU Ji-quan, WANG Qing. Camera array-based HDR image synthesis method[J]. *Application Research of Computers*, 2013, **30**(9): 88-92.  
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): 88-92.