

数字微镜器件的远场焦斑测量方法

李 铭^{1,2}, 袁索超^{1,2}, 李红光¹, 达争尚¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 提出了一种基于数字微镜器件(Digital Micro-mirror Device, DMD)的高功率激光远场焦斑大动态测量方法。采用 DMD 对焦斑主瓣和旁瓣区域进行分离,用两路 CCD 分别测量,通过图像拼接实现两路测量结果的融合,获得大动态焦斑数据。DMD 由数字信号控制,通过改变控制信号模板,可以快速适应不同形态焦斑的测量。具体分析了 DMD 焦斑分割原理及 DMD 控制信号模板的获取,说明了焦斑重构时所需的图像校正和对准方法,实验验证了新方法的可行性。结果表明:文中方法的测量动态范围可以达到 3 000:1 以上。

关键词: 远场焦斑测量; 数字微镜器件; 大动态; 投影变换

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1217001

Far-field focal spot measurement based on DMD

Li Ming^{1,2}, Yuan Suochao^{1,2}, Li Hongguang¹, Da Zhengshang¹

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

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

Abstract: Based on digital micro-mirror device (DMD), a novel method for measuring high power laser far-field focal spot with high dynamic range was proposed. The region of focal spot was divided into two segments with different intensity range through DMD, and then captured by two CCD respectively. Image fusion technique was used to put two results together and the intensity distribution of high dynamic range focal spot was acquired. Based on the digital control of DMD, focal spot with different forms can be measured efficiently. The principle of focal spot division using DMD and the approach to obtain DMD control signal template were analyzed and the procedures of image calibration and registration for focal spot reconstruction were explained. The feasibility of the new method was verified by experiment. The results show that a dynamic range of 3 000:1 is achieved through the proposed method.

Key words: far-field focal spot measurement; digital micro-mirror device; high dynamic range; projective transformation

收稿日期:2018-07-05; 修订日期:2018-08-03

基金项目:中国科学院国防重点实验室基金(Y629941213)

作者简介:李铭(1992-),男,硕士生,主要从事激光远场焦斑测量方面的研究。Email:liming2015@opt.cn

导师简介:达争尚(1973-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事强激光参数诊断和控制方面的研究。Email:dazhengshang@opt.ac.cn

0 引言

随着激光技术的不断发展,高功率激光在工业和科研领域得到了广泛应用。远场焦斑的能量分布反映了光束的可聚焦程度,是评价高功率激光装置输出光束质量的重要指标。高功率激光远场焦斑测量的难点之一是能量分布的动态范围大,如用于惯性约束聚变的激光远场焦斑的动态范围通常在 104:1 以上^[1],远高于一般 CCD 探测器的线性动态范围,直接使用 CCD 测量无法得到准确的测量结果。解决这一问题的有效思路是动态范围拼接法,即通过一定方式使焦斑主瓣和旁瓣区域分离,然后分别测量并将测量结果融合。目前,该思路实现的具体方式有:纹影法^[2-3]、基于光楔分束的方法^[4-5]以及基于衍射光栅分束的方法^[6]。纹影法要求小球中心与实际焦斑质心尽量重合,对于不同焦斑形态的适应性较差。基于光楔的方法需要由一定规模的光斑阵列来重构焦斑,其测量精度受限于探测器靶面尺寸。基于衍射光栅的方法要求光栅对激光复振幅的采样频率大于近场复振幅空间频谱带宽的两倍,测量光栅参数的选择需要考虑波像差对近场频谱带宽的影响,否则主瓣和旁瓣的分离不彻底。

文中基于动态范围拼接的测量思路,提出利用数字微镜器件(Digital Micro-mirror Device, DMD)来分离焦斑主瓣和旁瓣。DMD 是美国 TI 公司生产的一款光束控制器件,由数十万或百万的可转动微反射镜组成。通过数字信号可以控制每个微反射镜的翻转状态,从而可以精准地控制入射光束走向^[7-8]。利用 DMD 的光束控制特性可以精确实现主瓣光束和旁瓣光束的分离,而且不受焦斑形态变化的影响。文中分析了 DMD 焦斑区域分割及焦斑重构的原理,并通过实验验证了该方法的可行性。

1 测量基本原理

1.1 DMD 光束控制原理

DMD 微反射镜为正方形,可以以对角线为轴翻转 12°, 翻转状态由数字信号控制。当控制信号为“1”时,反射镜翻转+12°,当控制信号为“0”时,反射镜翻转-12°,如图 1(a)所示。控制所有微镜翻转状态的信号是一个由 0、1 元素组成的二维矩阵,称之为控制信号模板。图 1(b)表示 DMD 反射面上一个 20×

20 的观察窗口,白色区域控制信号为 1,灰色区域控制信号为 0。当光线入射该窗口时,白色区域和灰色区域的反射光线方向互不相同,可以被分别接收,从而使窗口内不同区域的信息被分离。由于微镜尺寸在微米量级,所以可以较为精细地实现不规则形状区域的分离。

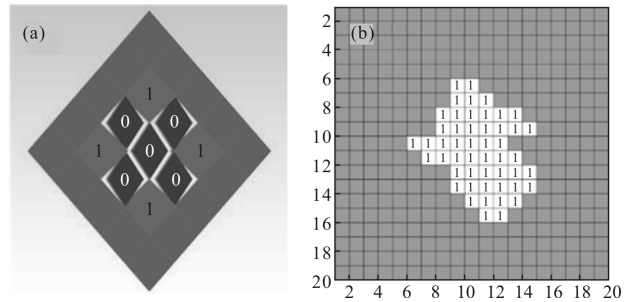


图 1 (a) DMD 微反射镜翻转控制示意图;(b) DMD 控制信号模板示意图

Fig.1 (a) Diagram of flip control for DMD micromirror;

(b) diagram of DMD control signal template

1.2 基于 DMD 的远场焦斑测量系统工作原理

测量系统结构如图 2 所示,其中两成像镜参数相同,两 CCD 探测器参数相同。调整 DMD 放置方向使微反射镜对角线垂直于纸面,同时,两 CCD 的放置方向也作相应调整。中继镜将焦斑成像至 DMD 反射面,通过控制微镜阵列的翻转状态,使焦斑的主瓣反射到成像镜 1 所在的光路,旁瓣反射到成像镜 2 所在的光路。两测量光路对称设置,具有相同的成像倍率,且两成像镜平面与 DMD 所在平面的夹角大小都为 24°。将两路测量数据拼接得到实际焦斑分布。

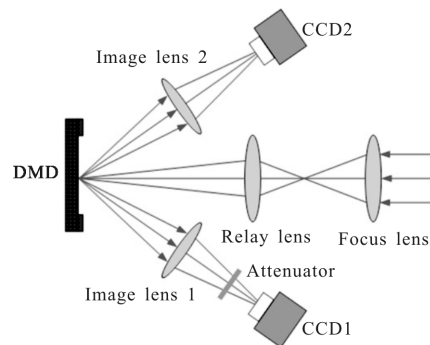


图 2 测量系统结构

Fig.2 Measurement system configuration

为了获得使焦斑主瓣和旁瓣分离的 DMD 控制信号模板,将 DMD 控制信号全部置 1,使待测激光全部入射成像镜 1,经衰减后,CCD1 上得到焦斑在 DMD 面上的分布,设置适当的灰度阈值,在所得图像中识别焦斑主瓣区域,高于阈值的像素值置 1,其余像素值置 0,将所得二值图像记为 I ,图 3(a)为实验中某次测量获得的二值图像。由于 DMD 所在平面与成像镜光轴不垂直,DMD 在 CCD 上的像是斜四边形。因此,二值图像 I 经过校正后才可以作为控制信号模板。利用八参数投影变换^[9-10]将 DMD 像校正为矩形,记 (x, y) 为校正前像素坐标, (x', y') 为校正后像素坐标,则校正投影变换为:

$$[x', y'] = T_p[x, y] \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} x' = \frac{ax+by+c}{gx+hy+1} \\ y' = \frac{dx+ey+f}{gx+hy+1} \end{cases} \quad (2)$$

为了便于求解投影算子,在白光照明下由 CCD1 对 DMD 成像,所得图像如图 3(b)所示,通过角点检测算法^[10]确定图像中斜四边形的 4 个角点的坐

后的 4 个角点坐标,将这四组坐标依次代入公式(2),联立求解 8 个参数。利用得到的投影算子对二值图像进行校正,校正后为:

$$I'(x', y') = I(x, y) \quad (3)$$

结果如图 3(c)所示,其中,实线框所围区域为校正后 DMD 像的范围,虚线框所围区域为主瓣区域,对实线框所围区域进行缩放即得到所需 DMD 控制信号模板,如图 3(d)所示。

1.3 数据拼接原理

假设 CCD1 图像中焦斑的分布为 $I_1(x, y)$, $(x, y) \in Z_1$, Z_1 为主瓣分布范围, CCD2 图像中焦斑的分布为 $I_2(x, y)$, $(x, y) \in Z_2$, Z_2 为旁瓣分布范围。若满足拼接条件 $Z_1 \cup Z_2 = \phi$ 且 $Z_1 \cap Z_2 = Z$, Z 为焦斑的测量窗口范围,则整体焦斑能量分布为:

$$I(x, y) = k_1^{-1} I_1(x, y) + k_2^{-1} I_2(x, y) \quad (4)$$

式中: $(x, y) \in Z$, k_1, k_2 分别为主瓣和旁瓣的能量衰减系数。但在实际测量时,由于光路间的差异, DMD 在两 CCD 图像上的位置及形状会有一定偏差,所以要准确拼接,必须对两路测量图像中的 DMD 像进行对准,具体过程如下:首先,在白光照明的状态下,两路成像镜分别对 DMD 成像。然后,提取两路图像中 DMD 像的四对角点坐标,以 CCD1 图像中的角点坐标为 (x', y') ,以 CCD2 图像中的角点坐标为 (x, y) ,代入公式(2),求解投影变换参数。记所得对准投影算子为 T_r ,则与 CCD1 图像对准后的 CCD2 图像中焦斑的分布 I_2 为:

$$I_2(T_r[x, y]) = I_2(x, y) \quad (5)$$

在 $Z \sim Z_1$ 的范围内对 I_2 进行重采样,此时,主瓣图像和旁瓣图像即满足拼接条件。最后,分别以校正投影算子 T_p 对两路测量图像进行校正,代入公式(4)得到整体焦斑分布。

2 实验结果及分析

实验装置如图 4 所示。待测焦斑由波长 527 nm 的半导体激光器产生。DMD 分辨率为 1 024×768,单个微镜边长为 13.68 μm。聚焦镜焦距 100 mm。中继镜焦距 75 mm,垂轴放大倍率为-2。成像镜焦距 75 mm,垂轴放大倍率-0.9。CCD 像元数为 1 000×1 000,像元尺寸为 13 μm,输出数字信号为 12 位。

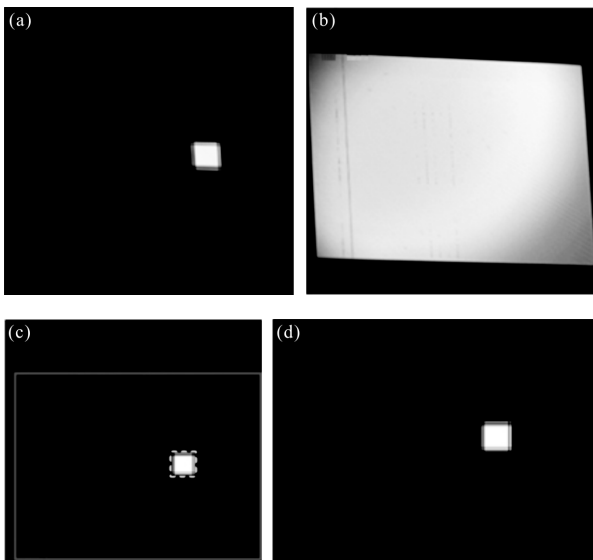


图 3 (a) 二值图像 I ; (b) 白光照明时的 DMD 像; (c) 校正后的二值图像 I' ; (d) DMD 控制信号模板

Fig.3 (a) Binary image I ; (b) DMD image by white light; (c) calibrated binary image I' ; (d) DMD control signal template

标,再根据 DMD 的实际尺寸及成像倍率确定校正

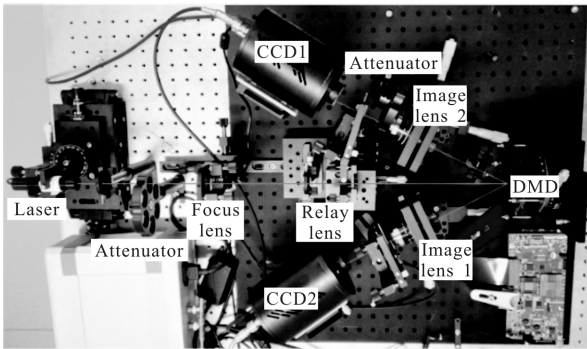
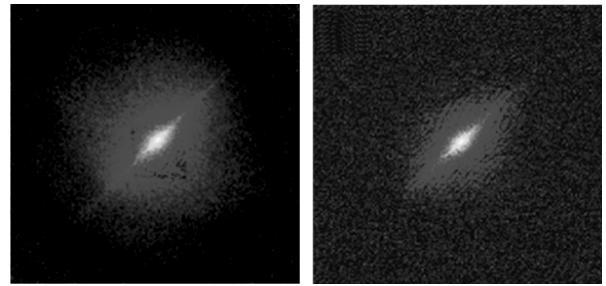


图 4 实验装置

Fig.4 Experimental installation

待测激光经初始衰减后测量，对所得主瓣和旁瓣图像进行对准和校正。图 5(a)~(e)为一次实验结果，其中图 5(a)、(b)分别为从主瓣和旁瓣图像上截取的测量窗口内的焦斑二维强度分布；图 5(c)为主瓣图像上过峰值点沿水平方向的一维强度分布，图 5(d)为旁瓣图像上与图 5(c)同一水平线上的一维强度分布；图 5(e)为拼接后的焦斑强度分布(取对数显示)。由图 5(c)可知：主瓣的峰值强度为 3 821，实验中，主瓣相对旁瓣衰减 30 倍，所以主瓣峰值强度值为 114 630；由图 5(d)可知，旁瓣中噪声水平以上可以识别的最



(e) 重构焦斑

(f) CCD 直接测量结果

(e) Reconstructed focal spot

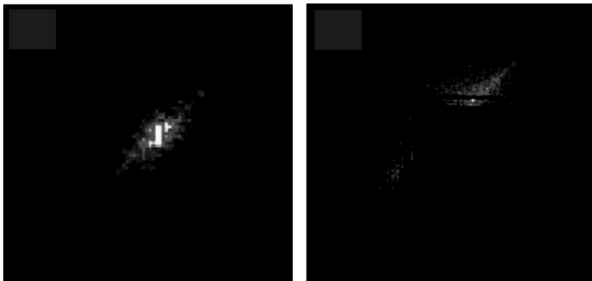
(f) Measurement result CCD

图 5 测量结果

Fig.5 Measurement results

低强度不高于 30，故测量动态范围不低于 3 800:1。图 5(f)为相同焦斑由 CCD 直接测得的结果(取对数显示)，其峰值光强与图 5(e)一致，但可以看到旁瓣信息湮没在噪声中而无法分辨。

为了验证该方法对于不同形态焦斑测量的适应性，调整激光器光束形状和出射角度，图 6 是相应的测量结果。测量时只需要根据新的焦斑分布对 DMD 控制信号模板做相应改变，而不需要再对系统其他部分做调整，也不需要重新求解校正和对准投影变换算子。

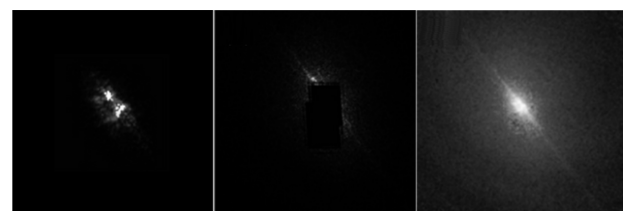


(a) 主瓣二维分布

(b) 旁瓣二维分布

(a) 2D distribution of main lobe

(b) 2D distribution of side lobe



(a) 主瓣二维分布

(b) 旁瓣二维分布

(c) 重构焦斑

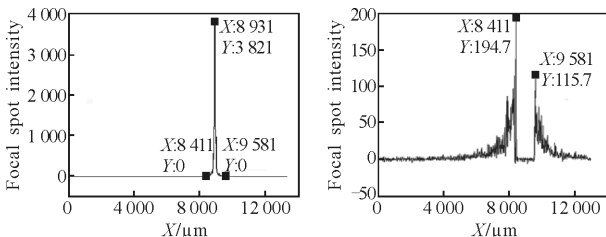
(a) 2D distribution of main lobe

(b) 2D distribution of side lobe

(c) Reconstructed focal spot

图 6 测量结果

Fig.6 Measurement results



(c) 主瓣沿过峰值点水平线的一维分布

(d) 旁瓣沿过峰值点水平线的一维分布

(c) 1D distribution of main lobe along the horizontal line through peak point

(d) 1D distribution of side lobe along the horizontal line through peak point

3 结论

针对高功率激光远场焦斑测量中强度分布动态范围大的问题，基于动态范围拼接的思路，引入 DMD 实现焦斑主瓣和旁瓣的分离测量，采用图像拼接技术完成大动态焦斑重构。搭建实验装置对方法的有效性进行了验证，结果表明，通过该测量方法实现了 3 000:1 以上的测量动态范围，同时，通过对 DMD 的数字驱动，测量系统可以快速适应焦斑形态变化。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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. (in Chinese)
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.
- [3] He Yuanxing, Li Xinyang. Far-field focal spot measurement based on orthogonal wedges [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(11): 2543–2548. (in Chinese)
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.
- [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. (in Chinese)
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] Wang Zhengzhou, Wang Wei, Xia Yanwen, et al. Mathematical modal for the measurement of high dynamic range laser focal spot [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(10): 1010002. (in Chinese)
- 王拯洲, 王伟, 夏彦文, 等. 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.
- [6] He Yuanxing, Li Xinyang. Far-field focal spot measurement based on diffraction grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 0208001. (in Chinese)
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.
- [7] Lv Weizhen, Liu Weiqi, Wei Zhonglun, et al. Design of high dynamic range imaging optical system based on DMD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1167–1171. (in Chinese)
吕伟振, 刘伟奇, 魏忠伦, 等. 基于 DMD 的高动态范围成像光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(4): 1167–1171.
- [8] Li Zhuo, Mu Da, Lv Shilong, et al. Design of zoom LWIR projection system based on DMD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1218003. (in Chinese)
李卓, 牟达, 吕世龙, 等. 基于 DMD 的长波红外变焦投影系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(12): 1218003.
- [9] Zhao Yan, Chen Yue, Wang Shigang. Fast SIFT image splicing with projection error correction [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1645–1651. (in Chinese)
赵岩, 陈月, 王世刚. 结合投影误差校正的快速 SIFT 图像拼接[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(6): 1645–1651.
- [10] Hartley R, Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision [M]. London: Cambridge University Press, 2002: 33–35.