

# 双帧图像融合测量脉冲激光束散角

王劲松 朱大钊\* 李延凤 安志勇

(长春理工大学光电学院, 吉林 长春 130022)

**摘要** 利用电荷耦合器件(CCD)在一定范围内与光照度成线性响应的特性,提出了一种通过双帧图像融合的方法,进行脉冲激光束散角的检测,并通过 Matlab 数学仿真和实验验证了其可行性和准确性。该方法扩大了光照度适用范围;弥补了 CCD 动态响应范围不宽的缺陷,很好的解决了脉冲激光束散角测量精度不高的问题。实验结果显示,该方法的测量精度为 2%。

**关键词** 测量;脉冲激光;束散角;图像融合;双帧图像

**中图分类号** TP312.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0708002

## Measuring Pulsed Laser Beam Divergence Angle Via Dual-Frame Image Fusion

Wang Jinsong Zhu Dazhao Li Yanfeng An Zhiyong

(School of Optoelectronics, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** A method for measuring divergence angle of pulsed laser beam is proposed based on dual-frame image fusion and charge coupled device (CCD) characteristic that CCD camera response to illumination is nearly linearity in a certain range. The feasibility and accuracy are proved by experiment and mathematical simulation via Matlab. This method expands the application scope of illuminance measured and makes up the defects that CCD dynamic response range is not wide, and is a good solution to the question that pulsed laser beam divergent angle measurement accuracy is not high. The experimental results show that measurement accuracy of this method is 2%.

**Key words** measurement; pulsed laser; beam divergence angle; image fusion; dual-frame image

**OCIS codes** 100.2000; 140.3295; 140.3538

## 1 引言

激光束散角不仅是评价光束质量的主要参数,还是其他重要光束质量评价参数前提量,如  $M^2$  因子、 $\beta$  值<sup>[1-2]</sup>等。束散角传统的检测方法如偏硼酸钡(BBO)倍频法<sup>[3]</sup>、套筒法、刀口法,偏振干涉法<sup>[4]</sup>等方法操作复杂、测量精度低,两点法的精度较高,但是测量所需空间较大,易受场地等外界因素的限制。使用以电荷耦合器件(CCD)相机为核心器件的焦斑法则完全的克服了上述测量方法的不足,但由于在测量时必须对激光进行衰减,必然造成光斑特性的失真,实验表明这种失真将严重影响测量结果。利

用多幅图像融合<sup>[5]</sup>的方法在一定程度上弥补了这种不足,但由于多幅图像是由调节 CCD 的单个曝光时间来获得的,因此这种方法对连续激光效果较理想,对于脉宽只有 8~10 ns 的脉冲激光来说并不适用。针对这些不足,以图像融合方法为基础,提出了较为科学简便的饱和及未饱和双帧图像融合的检测方法,并通过 Matlab 数字仿真和实验验证了该方法的可行性和准确性。

## 2 测量的基本原理

脉冲激光束散角的测量原理如图 1 所示,激光

收稿日期: 2013-11-25; 收到修改稿日期: 2014-02-12

基金项目: 国家科技型中小企业技术创新基金(11C262122005651)

作者简介: 王劲松(1973—),男,副教授,主要从事激光参数测试技术和红外测试技术等方面的研究。

E-mail: soldier\_1973@163.com

\* 通信联系人。E-mail: 106341146@qq.com

器发射出的激光经衰减片衰减,被物镜 L 聚焦,光斑成像在 CCD 上。设物镜焦距为  $f$ ,光斑半径为  $r$ ,由(1)式可得出激光束散角  $2\theta$ 。

$$2\theta = \arctan(2r/f') \approx 2r/f'. \quad (1)$$

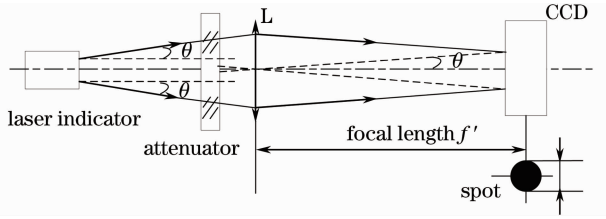


图 1 束散角的测量原理图

Fig. 1 Measurement principle of beam divergence angle

### 3 光强的过度衰减对测量结果的影响

由式(1)可知,只要测得光斑的半径  $r$ ,就可以解

算出束散角  $2\theta$ ,而  $r$  取决于光强度的分布,由图 1 可知,光束经衰减片衰减后,其光强分布会受到影响。理想的高斯光束的三维光强分布如图 2(a)所示,为方便观察,只取一个侧面进行分析,图 2(a)所示的光强分布就可以用图 2(b)所示正态分布曲线来描述。理想情况下,激光光强和图像的灰度值近似线性关系,图中最高点强度  $I_0$  对应的像素值为  $p_1$ ,如图 3 所示根据高斯光束的定义,光斑边缘点的光强为中心光强的  $1/e^2$  倍<sup>[6]</sup>,即边缘点的像素值为  $p_1/e^2$ ,对应的光斑半径为  $R_1$ 。如图 3 中的粗实线所示,假设衰减片的透射率为  $t$ ,经过衰减片衰减后的曲线如图 4 中虚线所示,此时的边缘点像素值  $P$  为

$$P = p_1 t / e^2, \quad (2)$$

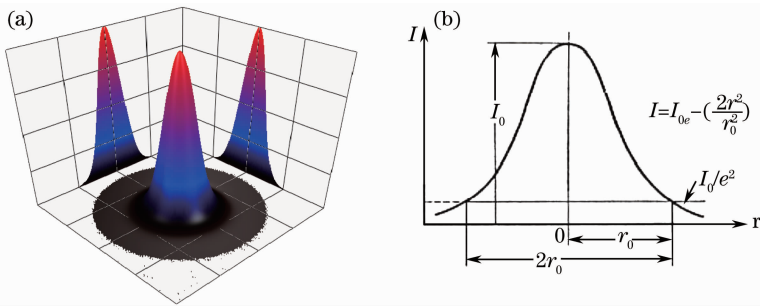


图 2 理想高斯光束光强分布。(a) 三维分布; (b) 二维分布

Fig. 2 Ideal Gaussian beam intensity distribution. (a) Three-dimensional distribution; (b) two-dimensional distribution

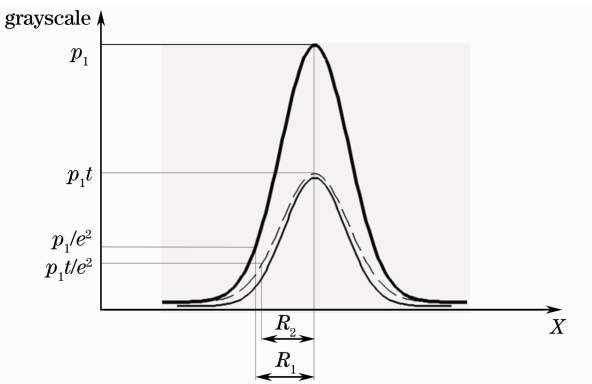


图 3 光强衰减失真

Fig. 3 Light intensity distortion caused by attenuation

对应的半径仍为  $R_1$ 。但是由于噪声的存在,实际衰减后的光斑的边缘部分会被噪声淹没,导致光斑变小,其曲线如图 3 中细实线所示,此时测得光斑半径  $R_2 < R_1$ ,测量误差为

$$\Delta R = R_1 - R_2. \quad (3)$$

由于脉冲激光的功率远远超过 CCD 的动态响应范围,必须对其进行大幅度的衰减,此时  $\Delta R$  必然

很大。

### 4 图像融合算法研究

由上文所述,假若 CCD 的动态响应范围足够大则完全可以避免这种情况,但是由于脉冲激光的峰值功率非常大,要满足这个动态范围并不容易。一般的做法是对光强进行一定程度的衰减,然后尽量扩大 CCD 的动态范围。目前常用的 CCD 动态范围扩展技术有冷却降噪、多模式输出和多图像融合三种<sup>[7]</sup>。冷却降噪很容易实现,但扩展能力有限。多模式输出属于非线性输出,不能应用于束散角测量。图像融合的技术需要控制 CCD 的快门时间来获得多幅图像,这并不适用于脉宽为纳秒甚至皮秒级的脉冲激光,并且这样对同步控制硬件的要求更高。

由前述分析可知,要测量光斑的半径  $r$ ,首先要确定光斑的边界,而此边界的判据是依赖光斑中心光强,即如果知道光强分布的顶部和边缘信息,就可以正确解算半径  $r$ <sup>[8]</sup>。在未饱和或刚刚饱和的光斑

图像中包含了光强三维分布中顶部的信息较为完整而边缘信息有可能被噪声淹没,饱和光斑中则包含了边缘点信息而顶部信息因饱和无法获取,基于此,只需从 2 frame 图像中提取有用信息,并保证计算得到的边缘点灰度值在 CCD 的测量范围内,即 0~255,就可以解算光斑半径  $r$ 。

图 4 为 1 frame 未饱和图像和 1 frame 饱和图像的二维轮廓图。在饱和图像中,设  $y_0$  为饱和点的灰度值即  $y_0 = 255$ ,用  $\{y_0\}$  表示灰度值大于等于  $y_0$  的像素点的个数。在不饱和图像中,可以找到一个灰度值  $x_0$ ,用  $\{x_0\}$  表示灰度值在于  $x_0$  的像素点的个数,使其满足式

$$\{x_0\} = \{y_0\}. \quad (4)$$

在未饱和图像中,取一灰度值  $x_1 (x_1 < x_0)$ ,用  $\{x_1\}$  表示灰度值大于  $x_1$  的像素点的个数。同理,在饱和图像中存在一灰度值  $y_1$ ,用  $\{y_1\}$  表示灰度值大于  $y_1$  的像素点的个数,使其满足式

$$\{x_1\} = \{y_1\}. \quad (5)$$

在饱和图像中,假设 CCD 动态范围足够大,最高点的像素值设为  $y^*$ ,于是有:

$$\frac{x^* - x_0}{x_0 - x_1} = \frac{y^* - y_0}{y_0 - y_1}, \quad (6)$$

式中  $x^*$  为未饱和图像中最高点像素值。已知  $y_0 = 225$ ,选取  $x_1$  时,在纯噪声图像的最大灰度值  $z_p$  的基础上加一个较小值。为了结果更加准确,最好去掉背景噪声的影响,则(1)式变为:

$$y^* = \frac{(x^* - x_0)(255 - y_1)}{x_0 - x_1} + 255 - z_p. \quad (7)$$

$y^*$  已知后,即可由(7)式计算出边缘光线对应的灰度值  $P$ :

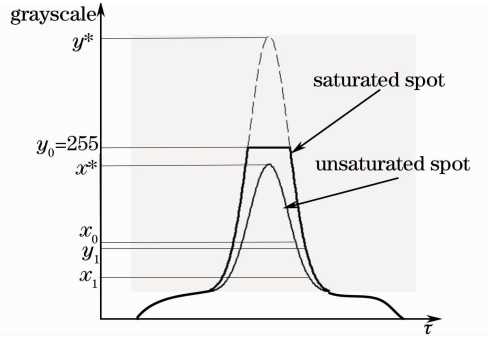


图 4 算法示意图

Fig. 4 Algorithm schematic

$$P = y^* / e^2. \quad (8)$$

## 5 实验验证

为了验证上述方法的正确性,使用一个标定过的束散角为  $2\theta = 0.528$  mrad、功率为 3 mW、波长为 630 nm 的半导体激光器作为实验对象,搭建测试系统,并用上述算法测量激光器的束散角。由于实验装置与传统焦斑法测量束散角的装置相同,所以用传统焦斑法对该激光器进行测量,对比实验结果。

实验系统由定标激光器、衰减系统、物镜、CCD 相机和上位机软件组成,实验系统的部分实物如图 5 所示。为了能得到满足算法要求的光斑图像,衰减系统使用了两种衰减方法:1) 是使用具有一定透射率的衰减片进行衰减;2) 是偏振衰减。实验的时候,先用透射率片对光强进行大范围的衰减,再用偏振衰减进行微调。另外,为了避免系统对物镜焦距的影响,将衰减系统置于物镜和激光器之间。探测器件使用 Watec902B 可见光 CCD,视频采集卡和采集软件为凌华 RTV-24 四通道视频采集卡。

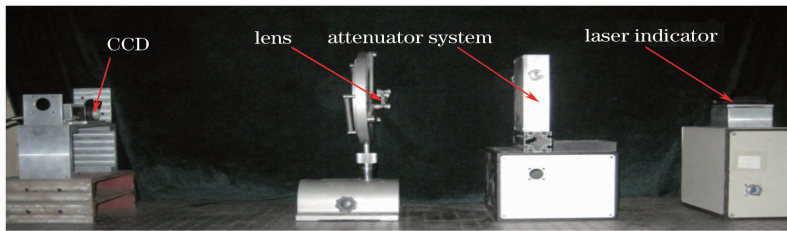


图 5 实验实物图

Fig. 5 Photo of real experimental object

为减小杂光对实验结果的影响,实验在暗室中进行。先选用透射率较小的衰减片,再根据光斑图像的饱和程度,选择更换衰减片或使用偏振衰减对光强进一步调整。反复采集 20 次,包括 10 frame 饱和光斑图像和 10 frame 不饱和图像。

## 6 Matlab 计算及结果分析

### 6.1 Matlab 解算

图 6(a)所示的是 1 frame 饱和光斑的图像,其三维灰度分布及二维曲线如图 6(b)、(c)所示,其饱和点的像素数是  $\{y_0\} = 259$  个。图 7(a)所示的是

1 frame不饱和光斑的图像,图 7(b)、(c)是其三维灰度分布及二维曲线,由以上两帧图像,通过 Matlab 编程统计可得  $x_0=46$ 、 $y_1=203$ 、这里噪声图像的最大灰度值可在实验环境及人员稳定的情况下一次空

测得到,也可以空测多次取平均值,实测结果  $z_p=29$ ,在噪声基础上加一小量后,取  $x_1=34$  带入(8)式,计算得: $P=y^*/e^2=119.45$ 。

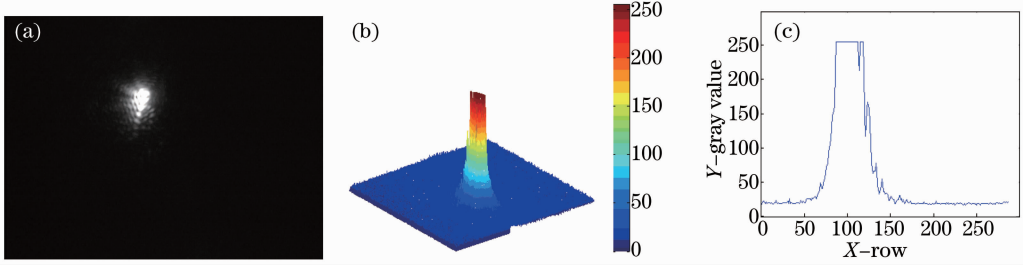


图 6 饱和光斑图像。(a) 光斑;(b) 三维分布;(c) 二维分布

Fig. 6 Saturated spot image. (a) Spot; (b) three-dimensional distribution; (c) dimensional distribution

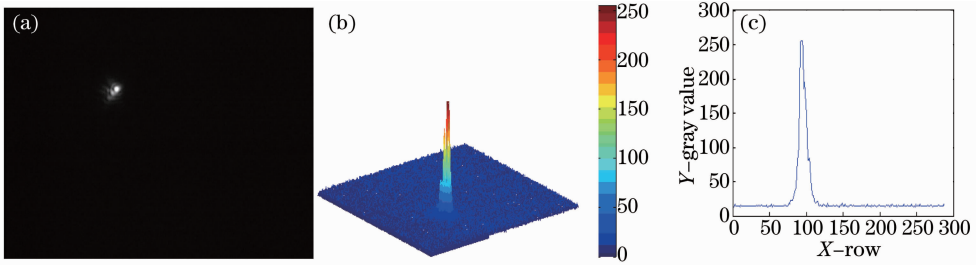


图 7 不饱和光斑图像。(a) 光斑;(b) 三维分布;(c) 二维分布

Fig. 7 Unaturated spot image. (a) Spot; (b) three-dimensional distribution; (c) dimensional distribution

以 119.45 为阈值对图像进行二值化。这里选择一种较为简便的半径计算方法,如图 8 所示,假设 CCD 的像元为正方形,由于像元的尺寸较小且光斑图像包含的像元点较多,将光斑图像的面积等效成其包含像元点面积的综合,即:

$$\pi r^2 = k \times s = k \times r_0^2, \quad (11)$$

$$r = \sqrt{\frac{k \times r_0^2}{\pi}}, \quad (12)$$

式中  $r$  为待求光斑半径,  $s$  为像元面积,  $k$  为光斑图像包含像元个数,  $r_0$  为正方形像元边长。

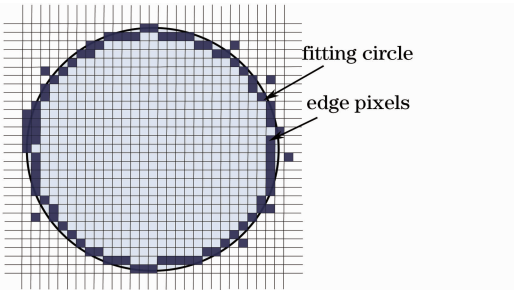


图 8 面积等效法求拟合圆半径

Fig. 8 Calculating fitting circle radius via equivalent area

## 6.2 测量结果及分析

用此方法对功率 3 mW、波长为 630 nm 的半导体激光器进行 12 次测量,再使用焦斑法并利用采集

到的不饱和图像进行 12 次测量,结果如表 2 所示,表中 I 栏为此方法的测量结果,II 栏为焦斑法测量结果。此测量方法测量结果的平均值  $\bar{2\theta} = 0.519$  mrad,相对误差  $\Delta_{2\theta} = 1.7\%$ ,标准差  $\sigma_{2\theta} = 0.0769$  mrad。焦斑法测量结果的平均值  $\bar{2\theta}' = 0.501$  mrad,相对误差  $\Delta_{2\theta}' = 5.1\%$ ,标准差  $\sigma_{2\theta}' = 0.0244$  mrad。可以看出焦斑法测量结果的重复性要比此的方法高,但其测量精度远远小于本文方法的测量精度。

表 1 束散角测量数据

Table 1 Measurement results of beam divergence angle

No.	Divergence angle / mrad	
	I	II
1	0.628134	0.527687
2	0.523640	0.527315
3	0.451765	0.543095
4	0.650372	0.506635
5	0.413032	0.469231
6	0.534681	0.510534
7	0.557504	0.469231
8	0.620019	0.500529
9	0.429671	0.485045
10	0.449171	0.510373
11	0.527346	0.496700
12	0.556105	0.470673

影响测量精度的因素分析归纳起来具体包括三个方面：

#### 1) 软件方面

此方面误差来主要是算法。如果激光器模式阶数较高、光斑整形及能量整形不到位，导致光斑形状不规则、能量分布不再是近似的高斯分布，这些情况会严重影响该方法的准确性。在验证实验结果中，为了能较为快捷简便地计算结果，面积等效处理也会造成误差；

#### 2) 杂散光

杂光包括环境的背景光及光学器件多次折反射引起的杂光，这部分杂光有可能形成“鬼斑”。另外 CCD 自身的噪声对图像也存在影响；

#### 3) 硬件方面

主要包括 CCD 自身暗电流产生的噪声，及硬件系统的误差如离焦、调校误差、加工误差等等。

## 7 结 论

此方法充分有效地利用了双帧图像中的有用信息，解决了 CCD 动态范围不足的问题，且比以往的图像融合算法运算量较小、计算速度快可测量精度为 2%，虽然验证实验使用的是连续激光器，但该方法完全可用来测量脉冲激光，这就弥补了以往图像融合算法无法用于测量脉冲激光的不足。

## 参 考 文 献

- 1 Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1643-1652.  
冯国英, 周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1643-1652.
- 2 Wu H P. Evaluation and analysis of laser beam quality[J]. Opt & Laser Technol, 2000, 8(2): 128-132.
- 3 Sha Xianwu, Shi Dufang, Cheng Changshui, et al.. Determination of light-beam dispersion angle by BBO frequency-doubling[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2000, 17(4): 374-376.  
沙先武, 是度芳, 陈长水, 等. BBO 倍频法测定光束发散角[J]. 量子电子学报, 2000, 17(4): 374-376.
- 4 Nie Dezhen, Zhang Qincheng. Measurement of laser beam divergence by polarization light interference[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1989, 6(3): 279-282.  
聂得真, 张钦成. 用偏振光干涉法测里激光发散角[J]. 量子电子学, 1989, 6(3): 279-282.
- 5 Shen Lin, Yang Jinhua, Han Fuli, et al.. Research on laser beam divergence angle measurement method based on spot image [J]. Acta Armanentarii, 2011, 32(7): 890-895.  
申琳, 杨进华, 韩福利, 等. 基于光斑图像的激光束散角测量方法研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(7): 890-895.
- 6 J M Liu. Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes[J]. Opt Lett, 1982, 7(5): 196-198.
- 7 Zhou Jiankang, Shen Weimin, Tang Minxue. Extended dynamic-range techniques of CCD measurements [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(10): 96-100.  
周建康, 沈为民, 唐敏学. CCD 测量动态范围的扩展技术[J]. 光电工程, 2006, 33(10): 96-114.
- 8 Emmanuel M Dvige, Neal G Skinner, Dale M Byrne. Analytical far-field divergence angle of a truncated Gaussian beam[J]. Appl Opt, 2000, 39(27): 4918-4925.

栏目编辑: 张浩佳