

影响基于 CCD 相机激光光束宽度精确测量的因素

王艳萍^{1,2} 王茜蓓¹ 马 冲²

(¹ 北京理工大学光电学院, 北京 100081
² 中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 北京 100013)

摘要 分析了基于 CCD 相机激光光束宽度测量过程中引入的噪声特性,并给出了有效抑制噪声的方法,说明了在光束宽度计算过程中尤其采用 4σ 算法时,积分区域选取的意义及正确的选取方法,总结了影响基于 CCD 相机激光光束宽度精确测量的因素。通过实验,进一步验证了用 4σ 算法计算激光光束宽度时,特别是计算小光斑光束宽度时,积分区域限制的重要性;提出了积分区域最佳选取值为 2 倍的光束宽度;得出了如无噪声影响,CCD 空间分辨率对基于 4σ 算法的光束宽度结果影响很小的结论,即采用 4σ 算法虽然光束宽度内仅有十几个甚至几个像素,仍能得到准确的光束宽度值;定量给出了高频随机噪声对基于 4σ 算法的光束宽度测量重复性的影响,以及提高测量结果精确度的方法;分析了基底噪声对基于 4σ 算法的光束宽度测量结果的影响程度,提出了正确的背景图像扣除方法以减少基底噪声的影响。

关键词 测量; 激光光束质量; 激光光束宽度; 4σ 算法; 噪声; 积分区域

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0208002

Factors Affecting the Accurate Measurement of Laser Beam Width with CCD Camera

Wang Yanping^{1,2} Wang Qianqian¹ Ma Chong²

(¹ School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
² Division of Optics, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract The noise characteristics existing in the laser beam width measurement based on CCD camera are analyzed, and the methods of effectively restraining noise are presented. The importance of the limitation of integration area for the 4σ beam width measurement, and the method to correctly select integration area are discussed. Factors affecting the accuracy of the laser beam width measurement with CCD camera are summarized. The analyses of experimental data prove that random noise and baseline offset have great effects on the small beam width with 4σ method, and the limitation of integration area for the 4σ beam width measurement is necessary. Furthermore, the experimental results show that the optimum integration area size is 2 times of the beam width; the CCD spatial resolution has little impact on the 4σ beam width measurement in the absence of noises, that is, a few pixel data can get the correct results. Besides, the effect of high frequency random noise on the 4σ beam width measurement repeatability and the methods to improve the measurement accuracy are discussed; the effect of baseline error on the 4σ laser beam width measurement is analyzed, and the proper method of the background map subtraction is proposed to reduce the influence of noise.

Key words measurement; laser beam quality; laser beam width; 4σ method; noises; integration area

OCIS codes 140.3300; 030.4280; 110.3000

1 引 言

在激光器制造,激光微细加工,激光制导,惯性约

束核聚变,激光诊断治疗等领域,研究人员十分关心用于衡量激光光束质量及表征激光光束传输特性的

收稿日期: 2013-06-25; 收到修改稿日期: 2013-10-16

基金项目: 国家质检总局科技计划项目(2012QK346)

作者简介: 王艳萍(1982—),女,博士研究生,主要从事激光参数计量方面的研究。E-mail: wyp@nim.ac.cn

导师简介: 王茜蓓(1970—),女,博士,副教授,主要从事光电子技术、激光技术及应用等方面的研究。

E-mail: qqwang@bit.edu.cn

激光空域参数^[1-6]。激光空域参数主要包括激光光束的宽度,发散角,强度分布,相位分布以及激光光束传输因子 M^2 ^[7]。其中激光光束宽度是最基本的激光空域参数,同时也是计算激光光束传输因子 M^2 、激光光束发散角等重要激光空域参数的基础^[8]。

基于 CCD 相机的激光光束宽度测量技术出现在 20 世纪 90 年代初^[8-9]。近 5 年,随着国内激光光束质量诊断及激光光束传输特性评价需求的日益增加,激光光束宽度测量仪器的购买量和使用率迅速增长。目前基于 CCD 相机的激光光束宽度测量仪器的制造商主要集中在国外,如 Spiricon、DataRay、Torlabs 等公司。基于 CCD 相机的激光光束宽度测量方法,具有空间分辨率高,常见光谱范围可覆盖,光束宽度算法灵活,适用于脉冲激光测量等优点,已成为常见的激光光束宽度测量方法。然而 CCD 所接收的激光强度在满足 CCD 器件不饱和条件下通常在纳瓦量级,易受到来自 CCD 自身噪声及外界光辐射的影响。在激光光束宽度测量各环节中,对于抑制或减小噪声技术的准确运用,直接关系到测量结果的精确性。此外,其他 CCD 相机特性如有限采集区域,图像空间分辨率,模拟数字(AD)位数等,均对激光光束宽度精确测量带来影响。

在介绍基于 CCD 相机的激光光束宽度测量原理的基础上,分析了影响光束宽度测量精确度的因素,通过实验定量给出了关键因素对光束宽度测量结果的影响程度。讨论了在光束宽测量软件中积分区域选取的必要性,通过实验数据给出了积分区域选取的最佳值以及有效可行的精确的积分区域选取方法。分析了噪声引入的途径,剖析了背景图像信号的成分,以及正确扣除基底噪声的方法。实验定量给出了在合理积分区域内,不同信噪比(SNR)下随机噪声引入的测量误差,以及背景扣除后的残余基底噪声对测量结果的影响。

2 基于 CCD 相机的激光光束宽度测量原理

CCD 相机作为激光光束宽度测量的探测器,用于捕捉激光光束入射位置横截面内的光强分布图像。由于 CCD 器件响应灵敏度高,通常采用调节附加在 CCD 面前的衰减器,或调节 CCD 相机曝光时间及增益等方法,使入射光束强度处在 CCD 动态范围内。此外,采集图像应在暗室中操作,防止外部光辐射的干扰。安装在计算机上的激光光束宽度分析

软件,控制 CCD 相机完成图像采集过程,并将图像数据传入计算机。由于 CCD 相机采集的激光光束光强分布图像中同时包含了噪声信息,在光束宽度计算前,需要首先执行背景图像采集及扣除程序^[8],将噪声降至最低。

经过背景图像扣除及其他去噪程序处理后的光强分布图像作为输入数据,用于光束宽度计算。常见的光束宽度算法有 4σ 法,刀口扫描法,狭缝扫描法等^[9]。在此仅介绍 4σ 光束宽度算法。

国际标准组织(ISO)中采用 4σ 法定义激光光束宽度^[8],即用基于光轴 z 处光束横截面内光强分布的二阶矩,来定义沿主轴 x, y 方向的光束宽度 d_x, d_y ,即

$$d_x = 4\sigma_x, d_y = 4\sigma_y, \quad (1)$$

式中 σ_x, σ_y 为光束光强分布 $E(x, y)$ 主轴方向的二阶矩。

$$\sigma_x^2 = \frac{\iint E(x, y) (x - \bar{x})^2 dx dy}{\iint E(x, y) dx dy},$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\iint E(x, y) (y - \bar{y})^2 dx dy}{\iint E(x, y) dx dy}, \quad (2)$$

式中 \bar{x}, \bar{y} 是光强分布 $E(x, y)$ 的一阶矩,物理意义为光束横截面内光强分布的质心坐标,即

$$\bar{x} = \frac{\iint E(x, y) x dx dy}{\iint E(x, y) dx dy}, \quad \bar{y} = \frac{\iint E(x, y) y dx dy}{\iint E(x, y) dx dy}. \quad (3)$$

4σ 光束宽度算法是完善的理论,如果 $E(x, y)$ 值是理想 TEM_{00} 模高斯光束的光强分布,按照(1)式计算的光束宽度与高斯光束定义的光束宽度,即光强下降到峰值的 $1/e^2$ 处的宽度是一致的。但实际测量过程,(1),(2)式中的光强分布 $E(x, y)$ 在有限区域采集, $E(x, y)$ 边缘信号被截断;同时 $E(x, y)$ 为离散值,其离散程度由 CCD 空间分辨率决定;此外 $E(x, y)$ 值中包含有扣除背景图像后的残余噪声,及 AD 量化等误差,这些因素都会影响光束宽度测量结果的精度。

3 影响基于 CCD 相机激光光束宽度测量精度的因素

采用 CCD 相机测量激光光束宽度,影响其测量精度的因素可概括为:噪声信号,包括高频随机噪声

和基底噪声；光强分布一阶距，尤其是二阶距的积分区域恰当选取；光束宽度算法；CCD 相机采集到的光束强度；其他 CCD 相机性能，如 CCD 空间分辨率、AD 位数、探测器面响应不均匀性、线性等（为便于处理，探测器面响应不均匀性、线性放在噪声部分考虑）。其中，噪声的影响和积分区域的选取两个因素对光束宽度精确测量起着关键作用。掌握 CCD 相机测量光束宽度过程中引入噪声的成分及特性，采取正确的去噪处理方法，可以大幅提高测量精度，否则测量误差较大。在光束宽度计算前，尤其采用 4σ 算法时，积分区域的选取是必要的，合适的积分区域及正确的选取方法会得到精确的计算结果。

下文通过理论分析，并结合实验数据说明影响激光光束宽度测量的因素，分析其影响程度，并提出提高测量精度的具体方法。

3.1 CCD 采集的光强分布图像中的噪声成分及特性

CCD 相机测量的激光光强分布图像，其噪声来源有两部分：1) 背景辐射，包括背景杂散光，激光出射的抽运光或荧光等；2) CCD 相机引入的噪声。在保证暗室的条件下，CCD 相机自身引入的噪声是主要噪声来源，主要包括：暗电流噪声，其与 CCD 内部半导体材料热运动及曝光时间有关^[10]；散粒噪声，是指注入光强不变时，由于光子的粒子性，单位时间内转化的电荷数不同引入的噪声^[10]，散粒噪声为均匀白噪声，大小与增益成正比；读出噪声，表示由 CCD 器件输出放大器及其后续电子器件引入的噪声。

从图像分析的角度来看，CCD 采集的图像信号 $E(x, y)$ 包括真实的由激光发出的光强分布信号 $E_{\text{true}}(x, y)$ 和背景图像信号 $E_{\text{B}}(x, y)$ 两部分^[8]。背景图像信号 $E_{\text{B}}(x, y)$ 可进一步分为三部分：高频随机噪声 $E_{\text{B,noise}}(x, y)$ ，均匀的基底偏置 $E_{\text{B,offset}}(x, y)$ ，非均匀的基底部分 $E_{\text{B,inh}}(x, y)$ ，即

$$E(x, y) = E_{\text{true}}(x, y) + E_{\text{B}}(x, y), \quad (4)$$

$$E_{\text{B}}(x, y) = E_{\text{B,noise}}(x, y) + E_{\text{B,offset}}(x, y) + E_{\text{B,inh}}(x, y). \quad (5)$$

包含在激光光束宽度积分计算中的高频随机噪声为统计误差，仅影响测量的重复性。可以通过多次重复测量取平均值的方法，减小其引入的误差。通过统计分析，高频随机噪声大体服从高斯分布。基底噪声 $E_{\text{B,offset}}(x, y)$ 和 $E_{\text{B,inh}}(x, y)$ 引入的系统误差，通常采用多幅背景图像信号的平均得到，再通过背景图像扣除的方法消除对积分计算的影响。但是，背景图像扣除后的基底值不可能完全为零，即使

很小的基底值也会给光束宽度的计算结果带来较大的误差。此外需要注意的是，通常 CCD 相机为单极 AD 转换器，如果不提高 AD 输入信号的偏置，信号中包含的负噪声会丢失，无法补偿正噪声的幅值，背景图像扣除后的基底偏差会加大^[8,11-12]。

3.2 积分区域的选取

实际应用中，光强分布一阶矩、二阶矩公式中的无限积分域为有限的求和，求和计算在用户选取的积分区域内。(2)、(3)式可改写为

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_x \sum_y E(x, y) (x - \bar{x})^2}{\sum_x \sum_y E(x, y)},$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_x \sum_y E(x, y) (y - \bar{y})^2}{\sum_x \sum_y E(x, y)}, \quad (6)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_x \sum_y E(x, y) x}{\sum_x \sum_y E(x, y)}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_x \sum_y E(x, y) y}{\sum_x \sum_y E(x, y)}. \quad (7)$$

(6)式中分子项为光强分布 $E(x, y)$ 加权的 $x - \bar{x}$ 、 $y - \bar{y}$ 的平方和。在距离质心较远处的噪声信号，会由于距质心距离 $(x - \bar{x})^2$ 或 $(y - \bar{y})^2$ 的值较大，加剧影响求和结果^[11]。因此，实际计算中尤其测量光束较小时，应限制积分区域，消除积分区域外的噪声对光束宽度计算结果的影响。但积分区域选取太小，会截除大量有效信号，光束宽度计算结果偏小。

很多光束宽度分析软件中，积分区域的选取为用户手动选取，积分区域的中心和大小并不精确，且重复性差。相比之下积分区域自动选取是较好的方法，可以采用先预算后精算的过程。预算过程可以在整个采集面上用狭缝扫描或 4σ 法计算初始光束宽度，为提高计算速度，也可采用扫描最大值所在行列，找出最大值下降到预定阈值的位置计算初始光束宽度。得到初始光束宽度后，以初始质心位置为积分区域中心，按照预定与光束宽度的倍数关系选取积分区域，再在积分区域内精算光束宽度。

4 实验及结果分析

实验重点分析内容如下：

- 1) 光束宽度分析软件中无积分区域选取的功能，或仪器使用者没有进行积分区域选取时，光束宽度的测量误差，以及积分区域的最佳选取值。
- 2) 在无噪声情况下，CCD 空间分辨率单一因素对光束宽度测量结果的影响。

3) 在不同信噪比下,背景图像中高频随机噪声对光束宽度测量重复性的影响。

4) 在背景图像扣除残余基底噪声后,或在背景图像中丢失负值信号时,光束宽度的测量误差。

以下实验的分析软件基于 LabView 平台。为了提高计算速度和数据处理能力,数据分析计算部分采用 C 语言编写。为得到准确的光束宽度标准值,实验所用激光光束为软件模拟的 TEM₀₀ 模高斯光束。实验中光束宽度算法均采用 4 σ 法。

4.1 无积分区域限制下小光斑光束宽度测量误差

在实际测量中,经常遇到被测光斑尺寸远小于 CCD 相机的探测面的情况,例如使用典型的 5 mm \times 5 mm 探测器面的 CCD 相机测量百微米,甚至几十微米量级的小光斑。采用 4 σ 算法时,如不使用积分区域限制,光斑边缘位置的噪声会引入很大误差。

实验中分别选取了探测器尺寸与被测光束直径为 3:1,12:1,20:1,30:1 4 种情况。在不考虑基底噪声,并且光强分布图像空间分辨率足够高的条件下,在光束光强分布图像上叠加高斯白噪声,光束光强峰值与高斯白噪声均方根(RMS)值比为 1400:1。实验结果如图 1 所示,CCD 探测器尺寸为 3 倍光束宽度时,测量重复性为 0.003%;12,20 倍光束宽度时,测量重复性变差,为 1.2%,10.6%;30 倍光束宽度时,测量重复性为 18.3%,明显变差。

实验同时考虑了无积分区域限制时,使用 4 σ 算法测量不同尺寸的光束宽度时,基底噪声对测量结果的影响。测量时不叠加随机噪声,光强分布图像空间分辨率足够高时,基底噪声对结果的影响可忽略。实验中模拟典型的光束宽度测量条件,入射高斯光束的强度接近 12 位 CCD 相机的饱和上限,即

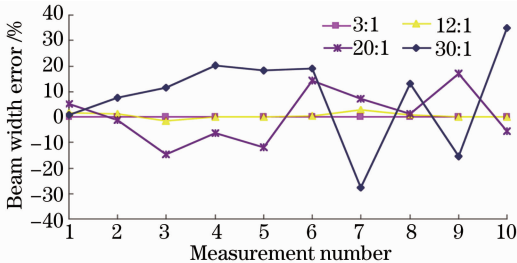


图 1 4 σ 算法中积分区域为整个探测面时,不同探测器尺寸与被测光束直径比时,随机噪声对测量结果重复性的影响

Fig. 1 Using 4 σ algorithm with an entire integration area, effects of random noise on the beam width measurement repeatability under different detector size to beam size ratios

信号幅值为 4096 bit。为便于计算,实验中基底噪声认为是均匀基底偏置。结果如图 2 所示,分别叠加 0.2、0.5 bit 的基底时,如果探测器尺寸为 5 倍光束宽度(d),测量偏差分别为 4.9%、11.8%;如果探测器尺寸为 7 d ,测量偏差分别为 17.9%、40.2%;如果探测器尺寸为 10 d ,按照 5 mm \times 5 mm 探测器尺寸计算,被测光斑为 0.5 mm(这在激光光束宽度测量中是很常见的例子),此时如不限制积分区域,测量偏差分别为 62.0%、123.2%。实验数据表明了使用 4 σ 算法计算光束宽度时,如不通过积分区域限制光束边缘的噪声,特别是基底噪声,将引入较大的误差。

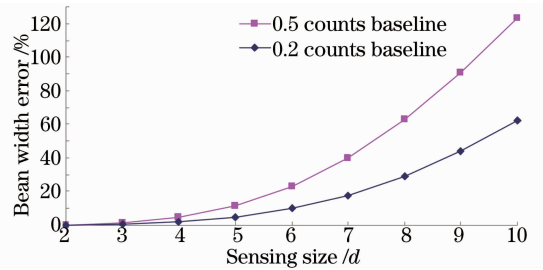


图 2 4 σ 算法中积分区域为整个探测面时,受基底噪声影响,不同尺寸光束的测量误差

Fig. 2 Using 4 σ algorithm with an entire integration area, the effect of baseline noise on the beam width measurement for different beam sizes

4.2 积分区域的最佳选取值

实际测量中由于光强分布图像中的边缘噪声对基于 4 σ 算法的光束宽度结果的影响,积分区域的选取是必要的。积分区域越小对噪声的抑制越强,但如果积分区域选取太小,光强分布的有效信号丢失过多,光束宽度计算值会明显下降。为了准确分析由于积分区域对有效信号的截断导致光束宽度测量的误差,实验在不加入噪声的条件下,分析了不同大小的积分区域对光束宽度测量的影响。实验结果如图 3 所示,当选取的积分区域从 2 d 开始逐渐减小时,参与 4 σ 算法的有效高斯光束信息减少,光束宽度测量偏差加大。积分区域为 1.8 d 时测量偏差为 0.2%;为 1.5 d 时,光束宽度测量值仅因积分区域选取的因素会产生 1.4% 的偏差;为 1 d 时,积分区域已截断过多的有效信号,偏差已达 12%。此外,不难理解无噪声的情况下积分区域越大,包含的有效数据越多,计算越精确,积分区域取 2 d ,测量偏差为 0.05%,选取大于 2 d 的积分区域时,偏差小于 0.05%。

实验结果表明,2 d 的积分区域是最佳值,小于

$2d$ 的积分区域,有效信号边缘截断带来的误差增大,大于 $2d$ 的积分区域,区域边缘噪声引入的误差开始显现。

图 3 的实验结果同时表明,CCD 相机探测器的尺寸决定了可测量的激光最大光束宽度。如探测器尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,考虑到测量结果精确度,测量的光斑应小于 2.5 mm 。

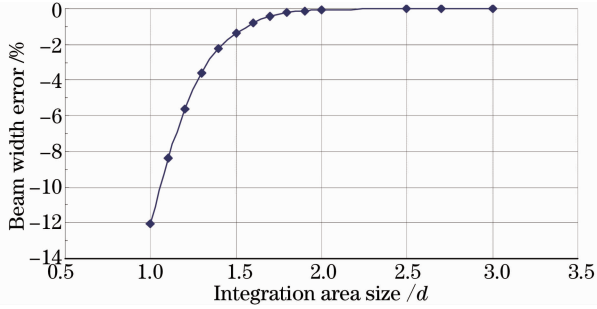


图 3 无噪声条件下积分区域大小对光束宽度测量值的影响

Fig. 3 Beam width error versus integration area size without noise

4.3 CCD 相机空间分辨率对光束宽度测量结果的影响

CCD 相机空间分辨率决定了激光光束宽度内的像素个数。实验分析了在无噪声,积分区域为 $3d$ 的条件下,空间分辨率对基于 4σ 算法的激光光束宽度测量结果的影响。实验数据如表 1 所示,高斯光束宽度内包含 50 pixel,即空间分辨率足够高,测量偏差为 0。将空间分辨率降低,光束宽度内包含 10 pixel,测量偏差为 0。实验结果表明,当光束宽度内包含 4 pixel,测量偏差仍为 0;光束宽度只有 3 pixel,参与 4σ 算法的数据只有 $9\text{ pixel} \times 9\text{ pixel}$ 的情况下,测量偏差只有 0.03%。

表 1 无噪声条件下 CCD 空间分辨率对基于 4σ 算法的光束宽度的影响

Table 1 Effect of CCD spatial resolution on the laser beam width for 4σ measurement method without noise

Beam width / pixel	Integration area / pixel ²	Beam width error
50	150×150	0
20	60×60	0
10	30×30	0
4	12×12	0
3	9×9	0.03%

实验结果表明,不考虑噪声的影响,CCD 空间分辨率对基于 4σ 算法的光束宽度计算值影响很小,

即使光束宽度中仅包含有几个像素,也能得到精确的测量结果。

4.4 随机噪声对光束宽度测量结果的影响

高频随机噪声是无法通过背景图像去除的,它影响着光束宽度测量结果的重复性。实验模拟了在 TEM_{00} 模高斯光束的光强分布图像上叠加高斯白噪声的情况,信噪比分别为 $1365:1$, $333:1$, $100:1$, $33:1$, $10:1$ 。信噪比算法为信号峰值与噪声 RMS 值之比。实验中积分区域为 $2d$ 。为了单独考虑高频随机噪声对测量结果的影响,实验中没有叠加基底噪声。实验结果如图 4 所示,信噪比为 $1365:1$ 时,光束宽度测量重复性为 0.01%;信噪比分别降低为 $100:1$, $33:1$ 时,测量重复性变差为 0.17%, 0.39%。高频随机噪声对光束宽度测量重复性的影响,可通过多次测量取平均值的方法弥补。实验数据表明信噪比为 $10:1$ 时,虽然测量重复性为 1.66%,但取 14 次测量结果的平均值,与标准值的偏差仅为 0.03%。

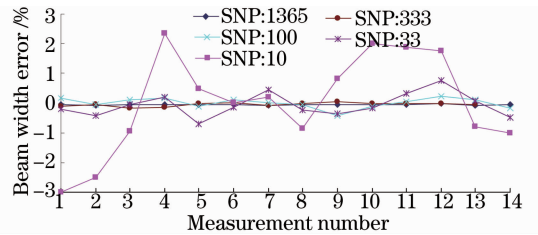


图 4 不同信噪比下随机噪声对 4σ 算法的光束宽度测量重复性的影响(积分区域限制为 $2d$)

Fig. 4 Effect of random noise on the 4σ beam width measurement repeatability for the different SNR (integration area is limited as $2d$)

4.5 基底噪声对光束宽度测量结果的影响

由于基底的漂移,即使计算光束宽度前进行了背景图像扣除,仍会有基底噪声存在,大小通常为 $-1 \sim 1\text{ bit}$ 。实验模拟了常见用于激光光束宽度测量的 12、10、8 bit AD 的 CCD 相机,入射激光光强幅值接近 CCD 饱和上限,峰值分别为 4096、1024、256 bit,基底噪声仅考虑均匀基底偏置,幅值为 $-1 \sim 1\text{ bit}$ 。实验中积分区域限制为 $2d$,不附加高斯随机噪声。实验数据如表 2 所示,表 2 表明即使在选取了 $2d$ 的积分区域限制,且光强信号足够强已充分利用 CCD 动态范围的情况下,基底噪声仍对光束宽度测量结果有较大影响,尤其是在相机 AD 位数较小,对噪声分辨率较低情况下,误差在百分之几的水平。

表 2 基底噪声对 4σ 算法的光束宽度的影响(积分区域限制为 $2d$)

Table 2 Effect of baseline noise on the 4σ beam width measurement (integration area is limited as $2d$)

Baseline /bit	Gaussian beam	Gaussian beam	Gaussian beam
	peak; 4096 bit	peak; 1024 bit	peak; 256 bit
-1	-0.6%	-2.3%	-9.5%
-0.8	-0.5%	-1.8%	-7.5%
-0.5	-0.3%	-1.1%	-4.6%
-0.2	-0.2%	-0.5%	-1.8%
0.2	0.0%	0.4%	1.6%
0.5	0.2%	1.0%	4.1%
0.8	0.4%	1.6%	6.4%
1	0.5%	2.1%	7.9%

5 结 论

通过理论和实验分析了影响基于 CCD 相机激光光束宽度精确测量的因素,定量给出了影响程度,并针对各因素提出了减少误差,提高测量精度的方法。

1) CCD 采集的激光光强分布图像中的边缘噪声明显影响着基于 4σ 算法的激光光束宽度的测量结果。特别对于小光斑光束宽度测量, 4σ 算法中一阶距,二阶距的积分区域应受到限制。但如果选取的积分区域太小,有效信号被截断,测量结果误差会急剧增大。通过实验验证,最佳的积分区域选取值应为 2 倍的光束宽度。积分区域选取方法应采用先预算后精算的自动选取方法,以避免分析软件中常见的手动选取积分区域带来的误差。

2) 光强分布图像中的高频随机噪声无法从背景图像中扣除,直接影响着光束宽度测量结果的重复性。但可以通过提高入射激光强度,降低 CCD 增益等方法提高信噪比,也可以通过多次测量取平均值的方法,减小高频随机噪声对光束宽度测量精度的影响。

3) 与高频随机噪声相比,光强分布图像中的基底噪声对基于 4σ 算法的激光光束宽度的测量结果影响更大。基底噪声的去除主要依靠背景图像扣除,因此,在分别执行背景图像采集和光强分布图像采集过程中,应确保实验环境不变,同时保持 CCD 相机设置如曝光时间,增益等相同,尽量减少残余的基底噪声。此外,采集的背景图像应避免由于负信号的丢失而引入的误差。

4) 在不考虑噪声的情况下,CCD 空间分辨率对于 4σ 算法得出的激光光束宽度值几乎没有影响。

参 考 文 献

1 Liu Zhibin, Tao Wang, Liu Shen, *et al.*. Study on the

characteristics of double-sided laser beam welding for T-joints[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503008.

刘志斌,陶汪,刘申,等. T型接头双侧激光同步焊接特性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503008.

2 Sharma Prerana, Jain Shweta, Sharma R P. A comparison of paraxial and extended paraxial approach for laser beam propagation in plasma[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2012, 365(1): 012054.

3 Schmitt Felix, Mehlmann Benjamin, Gedicke Jens, *et al.*. Laser beam micro welding with high brilliant fiber lasers[J]. Journal of Laser Micro Nanoengineering, 2010, 5(3): 197-203.

4 Wang Jinguo, Sun Zhe, Jiang Menghua, *et al.*. High-gain sub-nanosecond Nd: YAG rod double pass amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s102005.

王金国,孙哲,姜梦华,等. 高增益亚纳秒脉宽激光 Nd: YAG 双通放大器[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s102005.

5 Song Chao, Xu Zhiyong, Wang Jinyuan. Cloud-scattering model and channel transmission characteristics analysis[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0213001.

宋超,徐智勇,汪进源. 云散射模型与信道传输特性分析[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0213001.

6 Wang Xiaofa, Fan Zhongwei, Yu Jin, *et al.*. High energy and high efficiency Nd: glass regenerative amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0802002.

王小发,樊仲维,余锦,等. 高能量高效率钕玻璃再生放大器[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0802002.

7 ISO. ISO15367-1. Lasers and Laser-Related Equipment-Test Methods for Determination of the Shape of a Laser Beam Wavefront-Part 1: Terminology and Fundamental Aspects[S]. 2003.

8 ISO. ISO11146-1. Test Methods for Laser Beam Widths, Divergence Angles and Beam Propagation Ratios-Part1: Stigmatic and Simple Astigmatic Beams[S]. 2004.

9 ISO. ISO/TR 11146-3. Test Methods for Laser Beam Widths, Divergence Angles and Beam Propagation Ratios-Part 3: Intrinsic and Geometrical Laser Beam Classification, Propagation and Details of Test Methods Stigmatic and Simple Astigmatic Beams [S]. 2004.

10 ASTM, E2642-09. Standard Terminology for Scientific Charge-Coupled Device (CCD) Detectors [S].

11 Ma Chong. Study on the Measurement of Laser Spatial Parameters[D]. Beijing: National Institute of Metrology, 1996. 19-26.

马冲. 激光空域参数测量研究[D]. 北京: 中国计量研究院, 1996. 19-26.

12 Roundy, Carlos B. CCD camera baseline calibration and its effects on imaging processing and laser beam analysis[C]. SPIE, 1997, 3110: 860-879.