

探测器动态范围对光束质量 β 因子测量的影响分析

关有光 周文超 田小强

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 结合高能激光束硬边光阑发射时远场的分布特性,对探测器动态范围在光束质量 β 因子测量中的影响进行了理论分析。对近衍射极限光束质量测量不同动态范围探测器的影响进行了数值计算,根据计算测试误差给出了探测器动态范围的最低推荐值。实验验证模拟结果的正确性。

关键词 探测器; 光束质量; 动态范围; β 因子

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.070401

Influence Analysis of Detector Dynamic-Range on Laser Beam Quality Factor β Measurement

Guan Youguang Zhou Wenchao Tian Xiaoqiang

(Applied Electronics Institute, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Based on the far field distribution character of high energy laser, the influence of different dynamic-range detectors in laser beam quality factor β measurement is discussed. According to numerical calculation of different dynamic-range detectors in the diffraction limit beam quality measurement, the lowest value of dynamic-range is recommended. The experiment demonstrates the correctness of simulation result.

Key words detectors; laser beam quality; dynamic range; factor β

OCIS codes 040.5160; 120.4640; 140.3295

1 引言

由于面阵探测器(CCD、阵列靶斑仪)具有速度快、数据量大和易于计算机处理等优点^[1],因此被广泛应用于激光束光束参数测试领域。光束质量 β 因子测量通常采用面阵探测器获取激光束远场强度空间分布,由图像处理系统根据环能量比计算出 β 因子。面阵探测器最为关键的性能参数主要包括靶面尺寸、空间分辨力、靶面均匀性和有效动态范围^[2],靶面尺寸和空间分辨力决定了远场光斑测量尺度范围和光斑最小分辨尺度,靶面均匀性和有效动态范围决定了强度分布失真程度。可见,探测器性能的好坏对于光束质量测量结果有直接影响。

由于硬边光阑发射激光束远场分布存在高阶衍射强度低、衍射角半径大、积分含能比高等特点,在该类激光束远场测量中对探测器的性能要求更高。在光束质量测量中,根据被测对象选用合适的探测器,并合理优化光学系统设计参数,可以大大减小探测分辨力和靶面尺寸的影响;普通探测器均匀性一般较好,或可通过非均匀性校正得到明显改善,对光束质量测量的影响也相对较小。对于探测器动态范围,尤其应用在某些特殊波段的光束测试,由于很难引进国外高性能探测器,可用探测器有效动态范围非常有限,对测量结果影响较大^[3],本文重点讨论探测器动态范围因素的影响。

2 硬边光阑发射激光束远场特性

按照经典衍射理论,遮拦比为 e 的均匀分布平面波空心束远场强度分布可表示为^[4]

$$I(\theta) = \frac{(1 - e^2)\pi a^2 P}{(\lambda f)^2} \left[\frac{2J_1(ka\theta)}{ka\theta} - e^2 \frac{2J_1(eka\theta)}{eka\theta} \right]^2, \quad (1)$$

收稿日期: 2010-10-25; 收到修改稿日期: 2011-03-05; 网络出版日期: 2011-06-02

作者简介: 关有光(1973—),男,硕士,副研究员,主要从事激光总体技术方面的研究。E-mail: zwc0710@hotmail.com

式中 P 为总功率, a 为近场光束外径, θ 为远场角半径, f 为焦距, λ 为波长。图 1 为远场强度分布以及根据光斑分布计算的环围能量曲线。

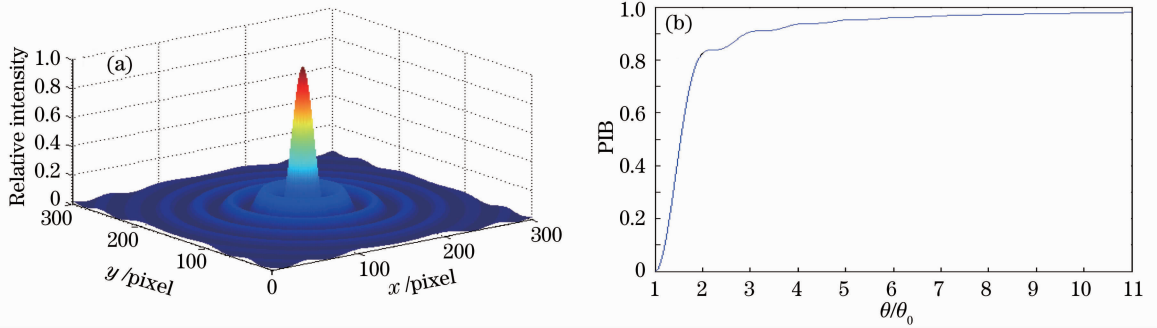


图 1 空心光束远场分布(a)和环围能量分布(b)

Fig. 1 Far field profile (a) and enclosed energy distribution (b) of a circle beam

光束质量 β 因子定义为被测光束远场发散角与理想光束远场发散角之比^[5,6]。在实际测量过程中,探测器获取被测光束远场强度分布后,根据环围能量比计算被测激光束远场发散角,从而计算出 β 因子为

$$\beta = \theta_{\text{actual}} / \theta_{\text{ideal}}, \quad (2)$$

从图 1 可看出,当被测激光束光束质量接近衍射极限时,远场光斑强度分布存在衍射环,环围能量与角半径曲线在对应理想环围能量比附近存在明显“拐点”,环围能量比的微小偏差引起的光束角半径偏差却很大。因此,这类激光束光束质量测量探测器的性能要更高,以遮拦比 e 为 0.4 时均匀分布平面波空心束为例,一级亮环峰值为中央极大峰值的 6%,二级亮环峰值为中央极大峰值 0.3%,三级亮环峰值为中央极大峰值的 0.06%,要保证环围能量比引起的测试误差足够小,必须对探测器动态范围提出更高的要求。

3 探测器有效动态范围

探测器动态范围 R_D 有多种描述方式,一般定义为最大线性有效幅值 I_{max} 与暗噪声 I_n 之比,它表征系统可探测信号的最大相对范围^[7,8]

$$R_D = I_{\text{max}} / I_n. \quad (3)$$

探测器在入射光束照射下输出一定范围的电压信号,经过采集电路[图像采集卡、模/数(A/D)转换单元等]进行模数转换,输出计算机可以获取的离散数字信号。可见,采集电路的 A/D 转换位数、量化误差和探测器信噪比共同作用决定了采集系统最大动态范围。因此,信噪比为 60 dB 的 CCD,要获取较高动态范围, A/D 量化位数最小必须达到 10 bit。

本文讨论的探测器有效动态范围是指采集系统实际测量使用的有效动态范围,即输出信号 I 扣除本底背景 I_{bg} 后线性区最大峰值与暗噪声 I_n 之比

$$R_D = (I - I_{\text{bg}})_{\text{max}} / I_n, \quad (4)$$

探测器动态范围标称值一般在 100~10000 之间。实际使用时若被测光束波长不在探测器中心响应区,其有效使用动态范围会下降。如果衰减设置过大导致强度峰值低于线性区最大可探测峰值,或探测器在测量环境下存在较大的本底背景,也将引起探测器有效使用动态范围的下降。

4 探测器动态范围影响数值模拟

实际应用的探测器动态范围总是有限的。探测器动态范围较小时,被测激光经探测器采样获取强度分布时高阶分量无法被探测出来,造成光束总能量的损失,从而引起光束质量的计算误差。如 e 为 0.4 的理想光束衍射三级亮峰为中央极大峰值的 0.06%,对于一般的探测器,三级以上衍射环就无法探测,使得光束总功率测量值明显偏小。

图 2 表示光束环围半径与环围能量比的计算关系。假定实际光斑环围功率比与光束半径关系曲线为中间的曲线 2,若光束总功率测试值偏大,光斑环围功率比计算值将偏小,从而引起光束质量测量值偏大,如

图 2 曲线 3 所示;由于光束总功率测试值偏小,光束环围功率比计算值将偏大,此时根据环围功率比计算的光束质量将偏小,如图 2 曲线 1 所示。可见,有限的探测器动态范围,将造成光束质量 β 因子测试值比实际偏小。

以遮拦比 e 为 0.4 的均匀分布平面波空心束为例进行模拟数值计算。考虑到实际应用特点,对测量系统参数作了如下假设:靶面尺寸等效为 30 倍衍射极限,像素分辨力等效为 0.05 倍衍射极限,模拟不同动态范围的探测器,对远场光束强度分布进行取样,并根据理想空心束环围能量比计算光束质量。需要说明的是,为了更直观地反应探测器动态范围的影响,计算光束质量 β 因子时对靶面尺寸和分辨率引起的测量偏差进行了修正。表 1 为模拟计算结果。

表 1 不同动 R_D 测器测量光束质量 β 因子模拟计算结果

Table 1 β analysis result of different R_D detectors

R_D	β factor	Testing error
100	0.69	-0.31
300	0.80	-0.20
600	0.82	-0.18
1000	0.87	-0.13
2000	0.88	-0.12
5000	0.93	-0.07
10000	0.97	-0.03
100000	0.99	-0.01

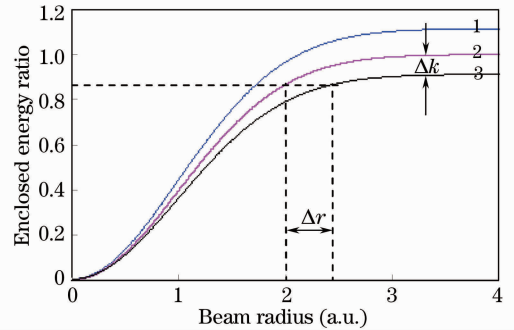


图 2 环围功率比与光束半径关系曲线

Fig. 2 Curves of enclosed energy ratio and beam radius

图 3(a)为模拟采集系统“采集”得到的光束远场强度分布,图 3(b)为对模拟采集系统在不同探测器动态范围条件下“采集”的图像进行光束质量处理得到的曲线结果。根据模拟计算结果,可得出几点结论:

- 1) 对于理想空心光束,探测器动态范围越大,光束质量 β 因子计算值越接近理论上的真值 $\beta=1$ 。可见,光束质量测量应尽可能地选用大动态范围的探测器。
- 2) 考虑到实际应用探测器不可能具有无限大动态范围,较高动态范围的探测器一般在 1000~10000 之间,选取探测器动态范围大于 800 倍时可以控制测量误差在 15% 以内。
- 3) 模拟结果均是基于探测器最大动态范围计算得到的。实际测量过程中的无光本底、测量过程中图像峰值可能大幅度低于最大饱和峰值,均将造成有效动态范围的下降,引起更大的测量误差,因此测量过程中应尽可能利用探测器最大有效动态范围。

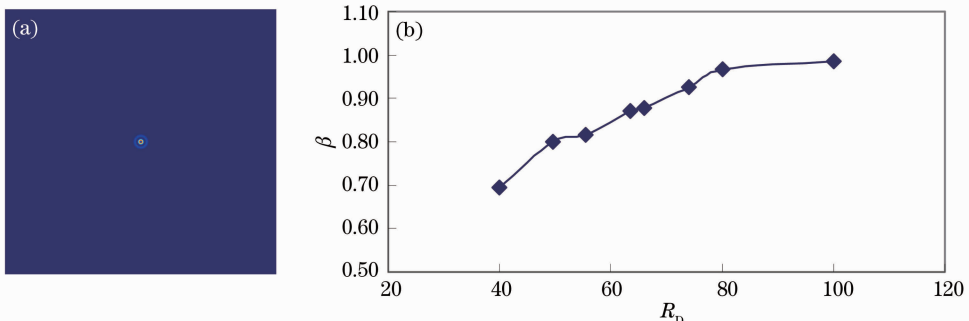


图 3 模拟采集系统“采集”得到的光强分布(a)和在不同 R_D 时采集图像的 β 值(b)

Fig. 3 (a) Intensity distribution pattern and (b) β factors of assumed detectors with different R_D

需要说明的是,对于光束质量为几倍甚至十几倍衍射极限的被测光束,远场强度更为弥散,区别于图 1 中近衍射极限光束。此时,探测器引起环围总功率测试误差要小,也就是说对于光束质量为几倍甚至十几倍衍射极限的被测光束,探测器动态范围的影响要小于模拟计算误差,可以适当放宽探测器动态范围的指标要求。

5 实验

研制了一套光束质量测量系统,系统像质峰谷(PV)值小于 0.4λ ,选用动态范围为 1000 倍的 CCD 探测器,归一化尺寸为 30 倍衍射极限,像素归一化分辨力为 0.05 倍衍射极限,对平行光源输出光束进行光束质量测试。测试远场光斑分布和计算光束质量 β 因子如图 4 所示。测试结果 β 为 0.86,与理论模拟计算结果较为接近,验证了理论模拟结果的准确性。

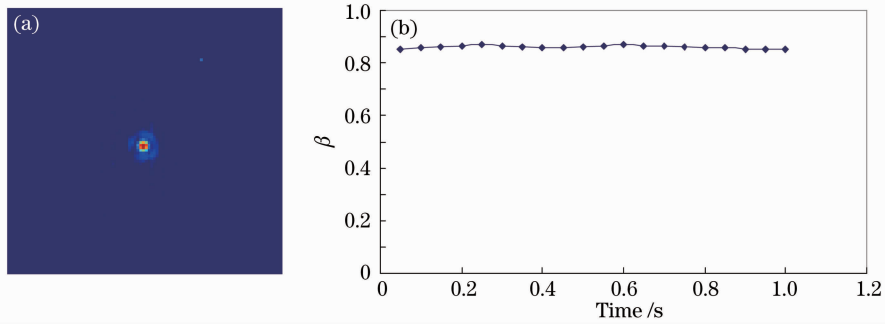


图 4 CCD 测试光强分布(a)和光束质量 β 因子测试结果(b)

Fig. 4 Density distribution pattern (a) and beam quality β test result (b) of CCD

6 结论

讨论了探测器动态范围对硬边光阑发射激光束光束质量 β 因子测量误差的影响,进行了理论分析和数值模拟,并进行了实验验证。结果表明,光束质量测试应尽可能地选用大动态范围的探测器,在被测光束光束质量接近衍射极限时,动态范围引起测试误差要控制在 15% 以内,探测器有效动态范围必须大于 800 倍。当被测光束光束质量为几倍甚至十几倍衍射极限时,探测器引起的环围总功率测试误差将减小,可适当放宽动态范围的指标要求。

参 考 文 献

- Zhao Changming. Investigation on the experimental measurement of laser beam quality[J]. *Laser Technology*, 2000, **24**(6): 341~344
赵长明. 激光光束质量参数测量的实验研究[J]. *激光技术*, 2000, **24**(6): 341~344
- Xie Xudong, Chen Bo, Liu Hua *et al.*. Calibration of linear dynamic range for CCD system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(11): 182~184
谢旭东,陈波,刘华等. CCD 系统线性动态范围的标定[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(11): 182~184
- Tian Yinghua, Ye Yidong, Xiang Rujian *et al.*. Evaluation of uncertainty in beam quality measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(11): 182~184
田英华,叶一东,向汝建等. 光束质量因子测量的不确定度分析[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(7): 1076~1078
- Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004
苏毅,万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004
- Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1643~1653
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): 1643~1653
- Wang Kewei, Sun Xiaoquan, Ma Chaojie. Evaluation and application of high energy laser weapon system beam quality[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(8): 13~16
王科伟,孙晓泉,马超杰. 高能激光武器系统中的光束质量评价与应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(8): 13~16
- Guo Wenge, Yao Shengli, Gao Feng *et al.*. The evaluation of CCD image gathering and processing system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(9): 851~854
郭文阁,姚胜利,高风等. CCD 图像采集系统性能评价[J]. *光子学报*, 1998, **27**(9): 851~854
- Tan Xinquan, Mei Xiaoying. Performance evaluation of high resolution CCD image sensor and CCD camera[J]. *Optical Technology*, 1999, (1): 70~72
谈新权,梅晓英. 高分辨率 CCD 图像传感器及 CCD 摄像机的性能评价[J]. *光学技术*, 1999, (1): 70~72