

CCD 光电响应非线性特性对高功率激光光束 质量评价的影响

刘亚群 唐顺兴* 郭亚晶 崔子健 姜秀青 朱宝强

中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

摘要 对利用电荷耦合器件(CCD)测量高能激光系统近远场能量分布时, CCD 光电响应非线性特性对光束质量评价的影响进行分析计算。提出了一种基于单缝衍射的 CCD 光电响应标定方法, 完成对某 CCD 的标定工作。利用该标定结果分别对理论模拟及实际系统下的近远场能量分布进行灰度修复, 考察灰度修复对近场填充因子(FF)及远场环围能量分布的影响。对实际光束的修复结果表明, 经过灰度修复的近场填充因子会提高 1%~2%, 对远场评价基本无影响。

关键词 激光器; 光束质量; 电荷耦合器件; 单缝衍射; 非线性特性; 近远场; 灰度修复

中图分类号 TN386.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0402001

Analysis of Influence of CCD's Nonlinear Photoelectric Characterization on Evaluating the High Power Laser Beam Quality

Liu Yaqun Tang Shunxing GuoYajing Cui Zijian Jiang Xiuqing Zhu Baoqiang

Joint Laboratory for High Power Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Influence of charge coupled device (CCD)'s nonlinear response characteristics on the near-field and far-field beam quality's measurement of high power laser system is analyzed. A new calibration method, based on single slit diffraction, is presented to calibrate CCD's photoelectric characteristics. Accomplish the calibration of a given CCD and restore the grey level of near-field and far-field energy distribution by the calibration curve in ideal and practical system to observe the influence on the measurement of near-field fill factor (FF) and far-field encircled energy distribution. The restoration shows that in a certain laser system the near-field FF will improve 1%~2% after the grey level restoration. And it has nearly no influence on the far-field energy distribution parameters.

Key words lasers; beam quality; charge coupled device (CCD); single slit diffraction; nonlinear characterization; near-field and far-field; grey level restoration

OCIS codes 040.1520; 140.3295; 050.1940; 230.0040

1 引 言

在高功率激光系统中, 光束质量是一项重要性能指标^[1]。高能光束对目标的作用效果不仅取决于激光器输出功率, 还与激光光束质量有密切的关系。近远场光斑能量分布测量的方法有很多种, 包括扫描法、感光法、烧蚀法以及阵列探测法等^[2]。其中阵列探测法中基于 CCD 的测量方法, 实时性好, 灵敏度高, 数据处理方便, 成为光斑能量分布测量的主要方法^[3]。

收稿日期: 2014-10-10; 收到修改稿日期: 2014-11-27

作者简介: 刘亚群(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光能量测量方面的研究。E-mail: liulishi91@126.com

导师简介: 朱宝强(1966—), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事高功率激光非线性技术方面的研究。

E-mail: baoqzhu@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: leo@siom.ac.cn

CCD的光电响应反映的是输入光强与输出灰度值之间的对应关系,由于CCD动态响应范围有限,CCD光电响应只在一定区间内呈良好的线性关系^[4-5]。为了使测量结果真实可靠,达到输出灰度值可以准确反映实际能量分布的目的,有必要对CCD进行光电响应特性标定。CCD相机的标定方法有很多,传统的能量卡计标定法等操作简单,但需要多次曝光采样^[6];尖劈分光法^[7]对CCD进行光电响应标定的方法只需要一次曝光就可以完成标定工作,但由于采用取独立的衍射子光斑的峰值光强进行标定,用于标定的采样点有限;利用双缝衍射和衍射光栅标定CCD^[8-9],为了在足够大的CCD动态范围里获得足够多的采样点,需要严格控制缝宽与缝间距的关系,实验条件复杂;小孔衍射法标定CCD光电响应特性,虽然实验简单,但小孔衍射图样作为中心圆对称图像会引入中心对准问题^[5]。本文采用一种基于单缝衍射进行CCD光电响应特性标定的新方法。

2 CCD光电响应标定

基于单缝衍射的CCD标定方法,实验简单,易于标定。结合标定系统各项参数,只要控制单缝的宽度使最大光强尽量接近CCD饱和光强,就可以在足够大的CCD动态范围内获取足够多的采样点。在远场焦平面获得实验衍射光强灰度值分布曲线,与理论光强分布曲线进行拟合,拟合范围连续。

对某红外CCD相机光电响应特性进行标定,利用标定结果对实际激光近场和远场能量分布结果进行灰度修复,并对灰度修复前后光束质量参数进行分析对比。

2.1 实验原理

由单缝夫朗禾费衍射原理,衍射屏上任一位置 P 处的光场复振幅分布 $E(P)$ 可以表示为

$$E(P) = C \int_{-a/2}^{a/2} \exp(ikxx_1/f) dx_1 = E_0 \frac{\sin \alpha}{\alpha}, \quad (1)$$

式中 $E_0 = Ca$ 是观察屏上中心点处的光场复振幅, k 为波矢, x 是 P 与衍射屏中心的距离, C 是光场复振幅公式里对平面光强的相对分布没有影响的常数项, $|C|=1$ 。衍射屏上的光强度为

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2, \quad (2)$$

式中 $I_0 = |E_0|^2$,表示衍射屏中心的光强。 $\alpha = \frac{\pi ax}{\lambda f}$, a 为单缝缝宽, λ 为入射光波长, f 为单缝后放置的透镜焦距。在衍射理论里,通常称 $\left(\frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)^2$ 为单缝衍射因子也即单缝衍射光强的归一化分布。单缝衍射光强分布的归一化曲线如图1所示。

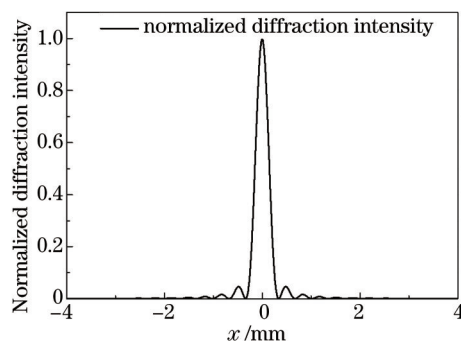


图1 单缝衍射归一化光强理论分布曲线

Fig.1 Theoretical distribution of normalized single slit diffraction intensity

2.2 实验方法与结果

对某科学级CCD相机进行标定实验,待标定的科学级CCD相机的主要技术指标:CCD面阵的像素数512 pixel×512 pixel,像素尺寸25 μm×25 μm,数字信号输出12 bit,其理论最大输出灰度值为4095 ADU,ADU为灰度单位。用于标定的激光束外径为大于25 mm的实心均强平行光,波长为1053 nm。标定系统的实验光路图如图2所示,平行激光束垂直入射到单缝上,根据夫朗禾费衍射理论,在单缝后放置一个透镜,待标定的CCD相机放在透镜的焦点处,得到单缝的远场衍射图样。

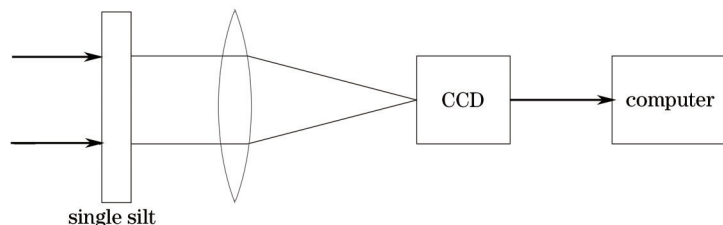


图2 标定系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of calibration system

调节缝宽 a , 使 CCD 获取的衍射图样最大灰度值在不饱和的情况下尽量达到最大。图 3 给出缝宽 a 为 0.546 mm 时的衍射图像。衍射图像最大灰度值为 4074 ADU, 接近 CCD 的饱和光强 4095 ADU。读取衍射图像的任一横行, 得到单缝衍射强度图。重复采样, 消除由于光强量化误差以及 CCD 存在的噪声等因素造成的随机噪声^[10], 得到平滑的单缝衍射强度图, 如图 4 所示。

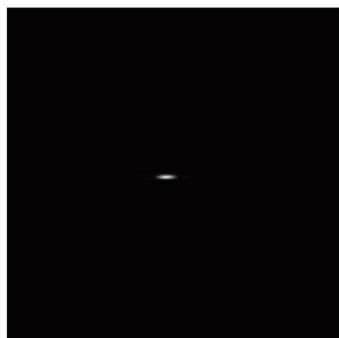


图3 CCD 衍射图样

Fig.3 Diffraction image on CCD

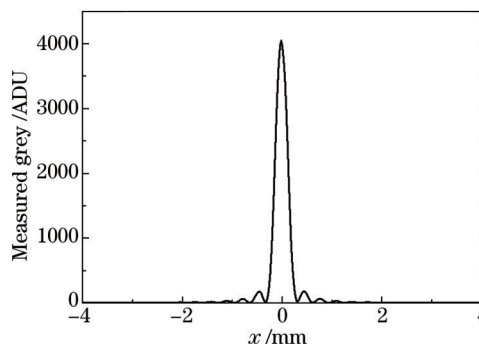


图4 衍射实验 CCD 测量灰度

Fig.4 CCD-measured grey of diffraction

具体的数据处理过程如下: 取衍射强度一级衍射峰和与之对应的理论衍射强度分布来进行标定工作。降噪后的 CCD 测量灰度值与归一化的理论衍射强度对应曲线如图 5 所示。在测量灰度值很小或者很大的区间内, CCD 光电响应并不满足线性的关系。根据经验, 取 [1500, 3000] ADU 区间内 CCD 测量的灰度值与对应的归一化衍射强度进行线性拟合, 得到两组数据间的线性对应关系, 拟合结果如图 6 所示。根据这一线性区间的拟合结果, 在整个归一化衍射强度区间(即归一化衍射强度为 [0, 1]) 内得到与之对应的理论真实灰度值, 如图 7 所示。

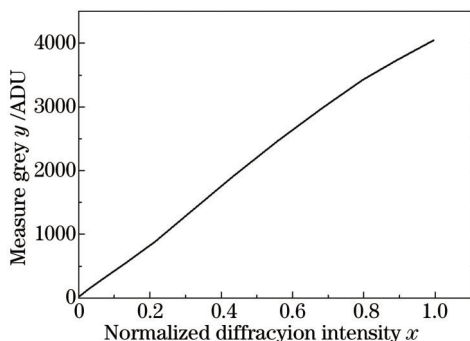


图5 CCD 测量灰度值与归一化衍射强度对应曲线

Fig.5 Curves of CCD-measured grey on normalized diffraction intensity

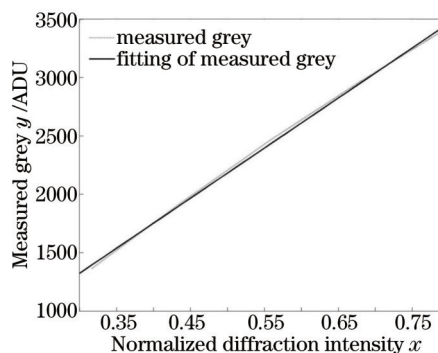


图6 CCD 测量灰度值与归一化衍射强度线性拟合(线性区间内)

Fig.6 Linear fitting of CCD-measured grey and normalized diffraction intensity (in linear range)

将理论真实灰度值与测量灰度值进行融合, 拟合这两组数据, 完成 CCD 光电响应特性的标定。标定结果如图 8 所示, 测量灰度值 I_m 与理论真实灰度值 I_t 之间满足拟合多项式(该拟合多项式的确定系数达到 0.9996):

$$I_t = 3.183 \times 10^{-8} I_m^3 - 1.561 \times 10^{-4} I_m^2 + 1.173 I_m + 6.973 . \quad (3)$$

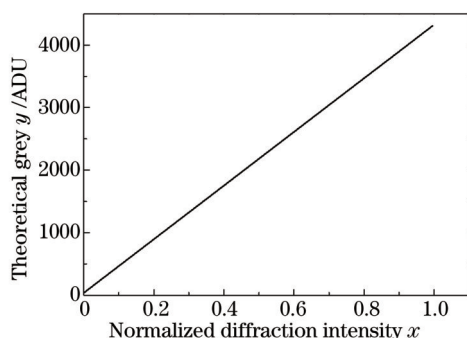


图7 理论真实灰度值与归一化理论衍射强度对应曲线

Fig.7 Curves of theoretical grey on normalized diffraction intensity

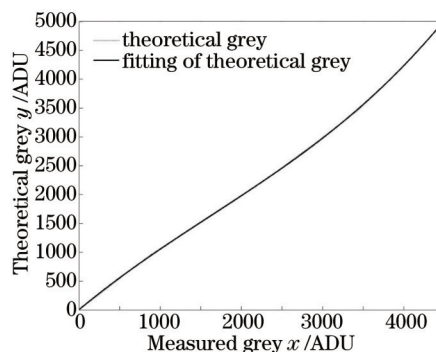


图8 CCD光电响应标定曲线

Fig.8 Calibration curve of CCD's photoelectric characteristics

由标定结果可以看出,在 CCD 测量灰度值为 [1500,3500]ADU 的范围内,测量灰度值和真实灰度值近似服从线性关系,在测量灰度值处于 1500 ADU 以下和 3500 ADU 以上时线性关系变弱。该 CCD 在入射实际灰度值低于 7 ADU 时没有测量信号,即为 CCD 光电响应的“死区”。

3 对近场光束质量评价的影响

利用 2 节中 CCD 标定结果,计算和分析 CCD 光电响应非线性特性对理想近场光束质量评价的影响。考虑到实际测量系统中众多光学器件带来的诸如成像透镜像差等因素使激光光束不再是理想状态^[11],由 CCD 非线性引起的对光束质量评价的影响有一定的改变。因此 3.2 节中计算和分析了 CCD 光电响应非线性特性对某高功率激光系统实际测量近场光束质量评价的影响。在高功率激光系统中,填充因子(FF)是衡量光束近场质量很重要的一个物理量^[12],它被定义为

$$f_{FF} = \frac{\bar{u}}{u_{max}}, \quad (4)$$

式中 u_{max} 为近场能通量峰值, \bar{u} 为以峰值 1% 为边缘的孔径内各处能通量的平均值。

3.1 理想近场模拟

利用软件模拟 10 阶的超高斯分布为理想近场,其束腰半径为 0.5 mm,激光波长为 1053 nm。参考实际测量系统,本底灰度真实值取为 40 ADU。真实灰度峰值在 [500,4000] ADU 的范围内取值,经过理论计算,当真实灰度峰值小于 2800 ADU 时,近场填充因子测量值比真实值要小;真实灰度峰值大于 2800 ADU 时,近场填充因子测量值比真实值大。理想近场填充因子真实值与测量值差值绝对值百分比平均为 0.43%,具体如表 1 所示。在近场实际测量中,为了规避非线性特性对测量结果的影响,一般取灰度峰值范围为 2000~3000 ADU。根据表 1 数据,在灰度峰值为 2700 ADU 的理想近场,其近场填充因子真实值和测量值分别为 67.62% 和 67.6%,修复百分比为 0.02%;而在灰度峰值为 4000ADU 的理想近场下,修复百分比达到 1.28%。CCD 光电响应标定结果对理想近场的影响如图 9 所示,其中图 9(a)和(b)分别为有无修复情况下光斑能量真实值(修复后)和测量值三维分布对比。

3.2 实际系统近场

某高功率激光系统实际测量中,近场灰度峰值取在 2000~3000 ADU 范围内,CCD 的饱和读数为 4095 ADU,FF 一般能达到 50%~70% 范围。表 2 给出该系统一系列近场光斑能量分布修复的结果,FF 真实值平均为 56.56%,比理想近场的 FF 小 11.06%。分析表 2 数据得出,该系统近场分布修复前后变化规律与理论计算结果一致。FF 测量值与真实值的差值平均为 1.25%,与 3.1 节中理想近场下同灰度峰值范围的修复差值比较可以看出,CCD 光电非线性特性对实际激光系统 FF 的影响更大。图 10(a)和(b)给出其中一组近场光斑能量分布修复前后的对比图。

表 1 近场填充因子修复与真实灰度峰值关系

Table 1 FF restoration versus theoretical peak grey level

Theoretical peak /ADU	Measured value (without restoration) /%	Real value (with restoration) /%	Restoration difference /%
500	67.33	67.62	-0.29
600	67.29	67.62	-0.33
700	67.26	67.62	-0.36
800	67.23	67.62	-0.39
900	67.21	67.62	-0.41
1000	67.19	67.62	-0.43
1100	67.18	67.62	-0.44
1200	67.17	67.62	-0.45
1300	67.16	67.62	-0.46
1400	67.16	67.62	-0.46
1500	67.16	67.62	-0.46
1600	67.17	67.62	-0.45
1700	67.19	67.62	-0.43
1800	67.21	67.62	-0.41
1900	67.24	67.62	-0.38
2000	67.27	67.62	-0.35
2100	67.31	67.62	-0.31
2200	67.34	67.62	-0.28
2300	67.38	67.62	-0.24
2400	67.43	67.62	-0.19
2500	67.48	67.62	-0.14
2600	67.54	67.62	-0.08
2700	67.6	67.62	-0.02
2800	67.67	67.62	0.05
2900	67.74	67.62	0.12
3000	67.82	67.62	0.20
3100	67.89	67.62	0.27
3200	67.97	67.62	0.35
3300	68.07	67.62	0.45
3400	68.17	67.62	0.55
3500	68.27	67.62	0.65
3600	68.39	67.62	0.77
3700	68.51	67.62	0.89
3800	68.63	67.62	1.01
3900	68.76	67.62	1.14
4000	68.90	67.62	1.28

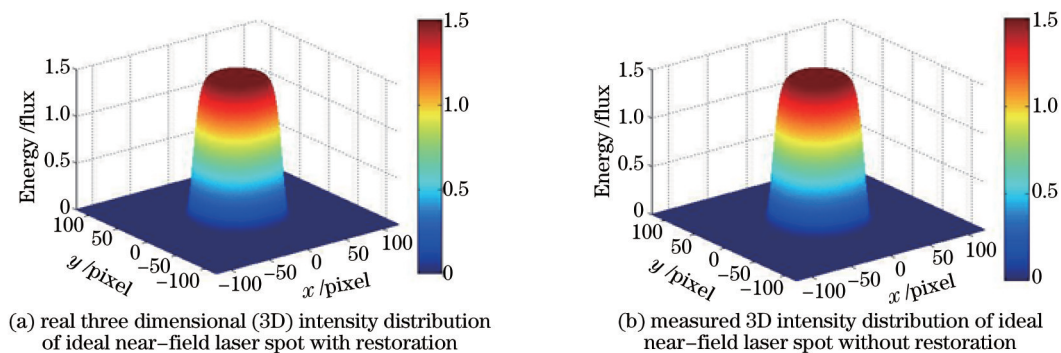


图9 修复前后理想近场光斑能量分布图

Fig.9 Ideal 3D intensity distribution of near-field laser spot with and without restoration

表2 近场能量分布修复前后对比

Table 2 Comparison of near-field laser intensity distribution with and without restoration

Measured value (without restoration) /%	Real value (with restoration) /%	Restoration difference /%
55.03	56.40	-1.37
52.15	53.89	-1.74
59.34	59.01	0.33
52.65	53.38	-0.73
57.44	59.65	-2.21
52.44	53.89	-1.45
56.69	58.06	-1.37
54.11	56.09	-1.98
53.50	55.51	-2.01
57.64	58.10	-0.46
56.00	56.42	-0.42
59.28	58.36	0.92

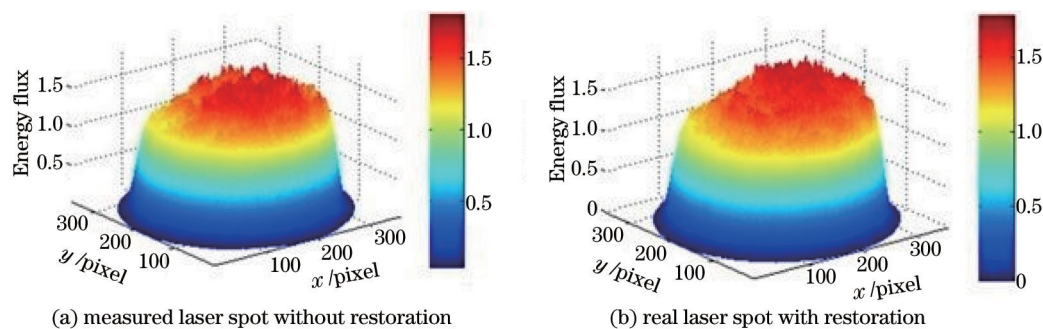


图10 激光近场光斑三维光强分布图

Fig.10 3D intensity distribution of near-field laser spot with and without restoration

4 对远场光束质量评价的影响

利用CCD标定结果进行远场光束的灰度修复,计算和分析CCD光电响应非线性特性对理想和实际系统的远场光束质量评价的影响。在远场光束中,关注激光能量集中度。评价远场光束质量时,多采用环围能量来表征能量集中度^[13]。由理想远场光斑中心核所对应的环围能量半径作为光束质量定义的规范桶半径,以规范桶内所含的环围能量份额作为规范能量比。

4.1 理想远场模拟

利用软件模拟理想远场能量分布,其光束口径为1 mm,透镜焦距为1 m,激光波长为1053 nm。参考实际测量系统,本底灰度值取为40 ADU。考虑到高功率激光系统中最后一级空间滤波器孔径一般取为20倍

的衍射极限(DL),因此在理论计算中,规定 20 倍 DL 包含远场焦斑的全部能量。

CCD 光电响应标定结果对理想远场光斑能量分布的影响与真实远场灰度峰值的关系如表 3 所示。结合实际测量情况,以远场光斑面积占 CCD 感光面积 2/3 的情况进行计算,1DL 对应 CCD 感光面积为 17 pixel。分析表 3 数据,环围能量半径的真实值略大于测量值,其中 50% 的环围能量半径真实值与测量值平均差值为 0.007 DL,在 CCD 上对应 0.1 pixel;95 % 环围能量半径真实值与测量值平均差值为 0.12 DL,在 CCD 上对应 2 pixel。图 11 取真实远场能量峰值为 2000 ADU 的情况,其中图 11(a)和(b)为有无修复情况下光斑能量真实值(修复后)和测量值(修复前)的三维分布,图 11(c)和(d)分别为其环围能量分布。

表 3 理想远场环围能量修复与真实灰度峰值关系

Table 3 Ideal far-field encircled energy restoration versus theoretical peak grey level

Theoretical peak /ADU	50% Encircled energy radius /DL			95% Encircled energy radius /DL		
	Measured value	Real value	Restoration difference	Measured value	Real value	Restoration difference
500	0.294	0.298	-0.003	1.46	1.48	-0.02
800	0.293	0.298	-0.005	1.45	1.48	-0.03
1000	0.292	0.298	-0.006	1.43	1.48	-0.05
2000	0.288	0.298	-0.010	1.34	1.48	-0.14
3000	0.288	0.298	-0.010	1.25	1.48	-0.23
4000	0.288	0.298	-0.009	1.25	1.48	-0.23

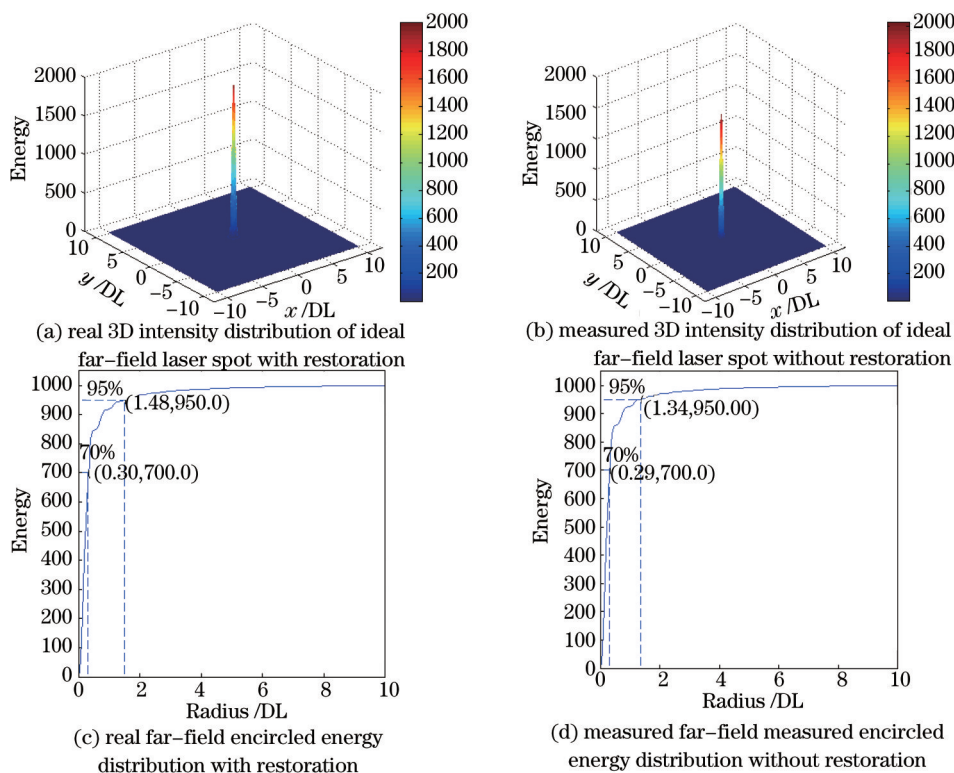


图 11 修复前后理想远场光斑能量分布图

Fig.11 Ideal far-field energy distribution with and without restoration

4.2 实际系统远场

表 4 给出某高功率激光系统中一系列远场光斑分布能量的 50% 和 95% 环围能量半径的真实值(修复后)和测量值(修复前)。在该系统的测量中,实际 1DL 对应 12 pixel。根据表 4 数据得出,50% 环围能量半径修复差值平均为 0.42 pixel,95% 环围能量半径修复差值平均为 1.32 pixel。这些数据与理论计算一致,远场环围能量评价计算中引入的误差仅有 1~2 pixel。图 12 为其中一组远场实际光斑能量分布修复前后的对比图,其

中图 12(a)和(b)为有无修复情况下光斑能量三维分布对比,图 12(c)和(d)为修复前后环围能量分布对比。

表 4 有无修复的远场环围能量半径

Table 4 Encircled energy radius with and without restoration

50% Encircled energy radius /pixel			95% Encircled energy radius /pixel		
Measured value	Real value	Restoration difference	Measured value	Real value	Restoration difference
11	11	0	27	28	3.57
16	16	0	38	38	0.00
10	10	0	22	23	4.35
16	17	1	38	41	7.32
9	10	1	21	22	4.55
10	11	1	21	23	8.70
14	15	1	37	38	2.63
10	10	0	22	22	0.00
17	17	0	41	42	2.38
10	10	0	23	24	4.17
15	15	0	37	39	5.13
12	13	1	25	26	3.85
15	15	0	38	40	5.00
12	13	1	22	23	4.35
13	14	1	35	37	5.41
9	9	0	23	25	8.00
16	17	1	39	41	4.88
11	11	0	26	26	0.00
16	16	0	38	40	5.00

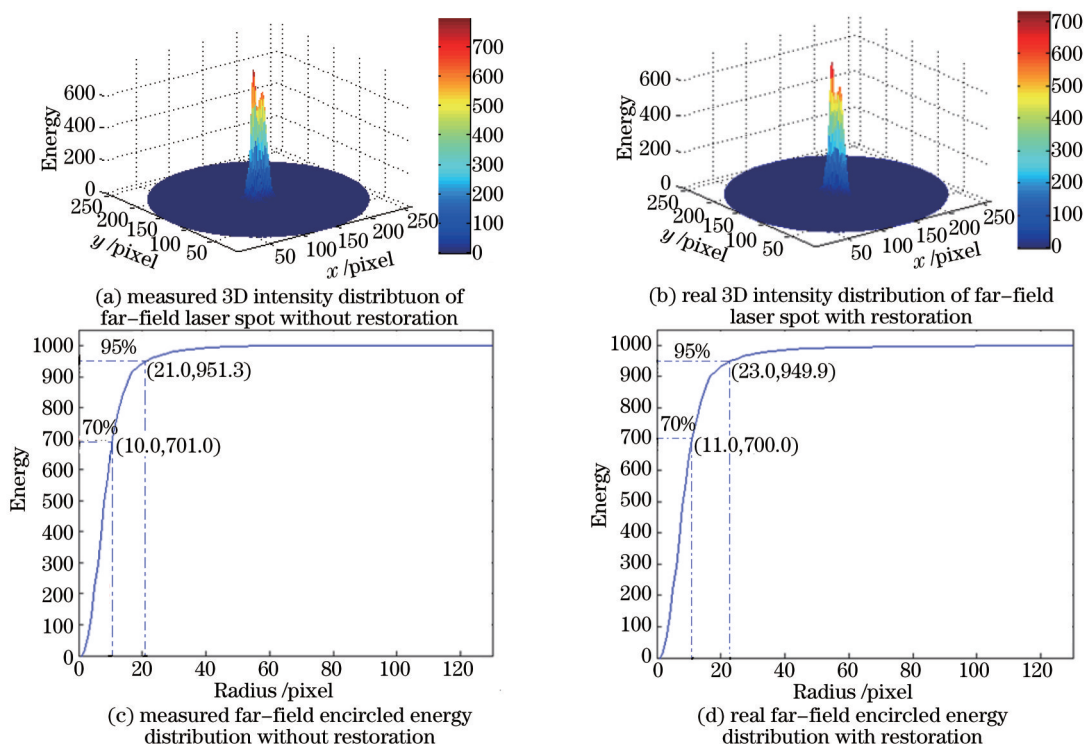


图 12 修复前后远场光斑能量分布图

Fig.12 Far-field energy distribution with and without restoration

5 结 论

采用一种基于单缝衍射的方法标定 CCD 光电响应特性,考察 CCD 光电响应非线性特性对近远场光束质量的影响。利用 CCD 光电响应非线性标定曲线进行灰度修复,对修复前后 FF 及远场环围能量分布进行计算。分析以上计算结果可以看出:

1) FF 测量值与修复后的真实值存在一定的偏差。理论分析表明,理想近场在灰度峰值处于 2000~3000 ADU 时,FF 受 CCD 非线性的影响最小。这为实际测量时为了规避非线性影响而取 2000~3000 ADU 的峰值灰度范围提供了理论依据。某高功率激光系统实际测量中,典型(影响最小的情况下) FF 测量值与修复后真实值的差值为 1.25%,说明 CCD 光电响应非线性特性在处理 FF 时会导致 1.25% 的下降;而 CCD 光电响应非线性效应导致的测量误差在灰度峰值高于 3000 ADU 时会更大。通过限定灰度峰值范围来减小非线性影响的方法并不能完全消除这种影响,并且这种方法不能充分利用 CCD 灰度范围。采用非线性灰度修正来解决这一问题,可以消除 CCD 响应非线性对近场评价引入的测量误差,并且可以提高 CCD 的灰度利用率(测量灰度峰值可达到 4095 ADU),得到更准确精细的激光能量分布。

2) 远场环围能量半径的测量值与修复后的真实值之间的差值比较小。理论分析表明,环围能量半径的真实值略大于测量值,其中 50% 的环围能量半径真实值与测量值平均差值为 0.1 pixel;95% 环围能量半径对应的平均差值为 2 pixel。在某高功率系统实际测量中,50% 环围能量半径修复差值平均为 0.42 pixel,95% 环围能量半径修复差值平均为 1.32 pixel。CCD 光电响应非线性特性对远场分布的影响只有 1~2 pixel,在远场评价数据处理中,本身存在 ± 1 pixel 的固有偏差,因此 CCD 光电响应非线性度对测量结果的影响可以忽略不计。CCD 光电响应的非线性特性导致 CCD 测量结果与实际光强分布存在一定的偏差。对近远场光斑的光束质量评价引入一定的测量误差,尤其是近场,经过 CCD 图像灰度修复可以消除其影响,得到更准确清晰的激光近场分布。

3) 利用单缝衍射对 CCD 光电响应特性进行标定的新方法,具有实验操作简便、数据处理过程简单等优点,可以实现对 CCD 进行快速实时的在线标定。这一方法可以推广到不同波段的光电响应特性标定,并且适用于不同型号参数的 CCD。利用 CCD 光电响应特性的标定结果对测量图像进行灰度修复,可以得到更为真实可靠的激光光斑能量分布,更准确的评价光束质量。

参 考 文 献

- 1 Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. Study on university standard for evaluating high energy beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(4): 773-778.
刘泽金,周朴,许晓军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 773-778.
- 2 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003. 247-264.
苏毅,万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. 247-264.
- 3 He Yuanxing, Li Xinyang. Analysis of influence of CCD's nonlinear response characterization on measurement results of focal spot and beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0408001.
贺元兴,李新阳. CCD 光电响应非线性特性对激光远场焦斑测量及光束质量计算的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0408001.
- 4 Li Ende, Duan Haifeng, Yang Zeping, *et al.*. Method of calibrating CCD optics-electron characteristic[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(2): 227-229.
李恩德,段海峰,杨泽平,等. 电荷耦合器件光电响应特性标定研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(2): 227-229.
- 5 Yang Jiamin, Cui Mingqi. Study on response of X-ray charge coupled device to soft-X-ray[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(5): 565-568.
杨家敏,崔明启. X 光 CCD 响应特性[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(5): 565-568.
- 6 D A Swyt, J G LaRock. Inverse-fourth apparatus for photometric calibrations[J]. Review of Scientific Instruments, 1978, 49(8): 1083-1089.
- 7 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(F11): 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(F11): 182-184.

- 8 Wang Shuqing, Duan Haifeng. Simulation research for double-slit diffraction application to CCD response features scaling[J]. Opto-Electronic Engineering, 2001, 28(4): 19-21.
王淑青, 段海峰. 双缝衍射用于 CCD 响应特性标定的模拟研究[J]. 光电工程, 2001, 28(4): 19-21.
- 9 He Yuanxing, Li Xinyang. Calibration of CCD camera based on diffraction gratings[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 23(12): 3183-3187.
贺元兴, 李新阳. 基于衍射光栅的 CCD 相机标定方法[J]. 强激光与粒子束, 2012, 23(12): 3183-3187.
- 10 Zhao Guangxing, Yang Guoguang. Data fitting method of interference stripes[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(6): 797-800.
赵光兴, 杨国光. 干涉条纹的数据拟合方法[J]. 光学学报, 2000, 20(6): 797-800.
- 11 Wan Min, Su Yi, Zhang Wei, *et al.*. Influence of surface error on beam quality in optics elements[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(4): 495-500.
万敏, 苏毅, 张卫, 等. 光学器件面形误差对光束质量的影响[J]. 光学学报, 2002, 22(4): 495-500.
- 12 Wen Guojun, Qian Liejia, Qiu Yue, *et al.*. Improve the light beam uniformity by using a serrated circular aperture and a space filter [J]. Chinese J Lasers, 1995, 22(6): 435-438.
文国军, 钱列加, 丘悦, 等. 利用波纹光阑和空间滤波器改善光束近场分布[J]. 中国激光, 1995, 22(6): 435-438 .
- 13 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.

栏目编辑: 刘丰瑞