

液晶空间光调制器 Gamma 曲线的线性化调试 算法及其对光束整形的影响

邱基斯^{1,3} 樊仲维^{1,3} 唐熊忻^{1,2,3}

¹中国科学院光电研究院, 北京 100190

²中国科学院研究生院, 北京 100049

³北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100192

摘要 在惯性约束聚变(ICF)驱动装置中利用液晶空间光调制器进行激光束的实时、可控光束空间整形时, Gamma 曲线呈线性变化有着重要意义。针对现有调整 Gamma 曲线呈线性变化的方法费时费力、效果不理想的现状,提出了一种新的调整方法,即依靠 Lagrange 插值将横坐标为灰度值、纵坐标为功率值的离散点拟合得到曲线方程,然后利用 Bolzano 二分法求得该曲线方程上与目标 Gamma 曲线中灰度间隔为 1 的功率值对应的新灰度值,将新、旧灰度值逐点替换使 Gamma 曲线呈线性变化。将其应用到大型高能激光放大装置的光束整形中,得到近场调制度较低且长时间保持稳定的超高斯平顶光束。

关键词 激光器;光束整形;液晶空间光调制器;Gamma 曲线;光束质量

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.061402

New Adjustment Method for Gamma Curve of Liquid Crystal Spatial Light Modulator and Its Effect on Beam Shaping

Qiu Jisi^{1,3} Fan Zhongwei^{1,3} Tang Xiongxin^{1,2,3}

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³Beijing GK Laser Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China

Abstract When liquid crystal spatial light modulator is used for real-time adjustable beam shaping in inertial confinement fusion (ICF), Gamma curve with linear variation is of great significance. We present a new adjustment method for Gamma curve of liquid crystal spatial light modulator to vary linearly based on the existing hard sledding and time-consuming adjustment method. Discrete points for which gray values are used as abscissa and power values as ordinate are fitted to curve equation by Lagrange interpolation. Depending on the curve equation, the new gray values corresponding to the power values on the target Gamma curve are obtained with the gray value interval of 1 by Bolzano dichotomy. Then, replacing the original gray values with new ones makes the Gamma curve vary linearly. Using the new adjustment method for beam shaping in high-power laser amplifier facilities, super-Gaussian flat-top beam with a small near-field modulation and long-term stability is obtained.

Key words lasers; beam shaping; liquid crystal spatial light modulator; Gamma curve; beam quality

OCIS codes 140.3300; 050.1220; 230.3720

1 引言

在惯性约束聚变(ICF)高功率激光系统中,为了使强激光均匀地照射腔靶,同时减小自聚焦效应并提高

收稿日期: 2012-02-28; 收到修改稿日期: 2012-03-06; 网络出版日期: 2012-04-24

基金项目: 国家 863 计划重点项目(2009AA034701)资助课题。

作者简介: 邱基斯(1982—),男,博士研究生,主要从事大型复杂全固态激光器和激光放大器等方面的研究。

E-mail: keith0311@163.com

导师简介: 樊仲维(1965—),男,研究员,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: fanzw@gklaser.com

系统安全运行通量,希望输出的激光光束有大的填充因子和均匀平滑的强度分布。而激光系统各单元都不同程度地造成光束近场不均匀,比如,振荡器输出脉冲近场一般是高斯分布,放大器增益不均匀、退偏不均匀会造成光束近场的不均匀,输入光束的不均匀近场会导致一种被称为“B积分”的非线性效应,使输出光束质量变坏,甚至损坏激光工作物质。为得到近场较均匀的超高斯近平顶光束,需对激光束进行空间整形。激光束空间强度分布整形有很多方式,包括强度滤波器、透镜列阵系统、光楔列阵系统、随机相位板以及衍射光学元件等^[1]。例如,美国的 Beamlet 和国家点火装置(NIF)中采用中性密度滤光片作为空间整形器件^[2]。虽然上述方法各有所长,但都有一个共同的缺点:每个器件针对特定的光束而设计,而制作好的光学元件不能随着光束的改变而灵活地调节。当使用条件改变时,不能及时做出相应调整,必须重新制作整形元件,而且机械调整困难。为了克服这些缺点,需要能够实现实时可控的光学元件,考虑利用液晶空间光调制器(LCSLM)作为整形器件进行光束空间整形^[3~10]。

液晶空间光调制器是一种高对比度、高分辨率、主动型和可编码的空间光调制器件。利用液晶空间光调制器进行激光束的实时、可调控光束空间整形,可以方便地获得所需形状(如方形、圆形等几何形状)的近平顶光强分布的光束,在高功率激光系统前级放大器或振荡器光束整形中具有重要的应用前景^[12~14]。高功率激光装置在进行光束近场补偿前,需要精确测试灰度与功率透射率变化曲线,即液晶空间光调制器的 Gamma 曲线,随后根据特定算法改变写入液晶空间光调制器的图像。高功率激光装置中,液晶空间光调制器前存在较多光学元件及前级放大器,光束入射到液晶空间光调制器上强度分布随时间而变化。若 Gamma 曲线不呈线性变化,在非线形变化较大的地方,即 Gamma 曲线上 $1 < k < \infty$ (k 为斜率)的区域内,在液晶空间光调制器上写入图像灰度的微弱变化都会导致激光透射率出现较大的起伏,强度分布随时间漂移对补偿后光束近场调制影响明显。当 Gamma 曲线呈线性变化时,激光强度分布随时间变化才对补偿的影响不明显,补偿后的光束近场调制小且能长期维持稳定,从而达到对激光光束进行有效空间整形、输出近场调制度较低的超高斯平顶光束的目的。

现有的调节 Gamma 曲线形状的方法只能通过计算机显卡驱动程序进行调整,即调节对比度、亮度和灰度的数值,每调节其中的一个值,都要测试 0~255 之间灰度的透射率变化,绘制 Gamma 曲线并判断是否呈线性变化。对比度、亮度和灰度的数值有多种组合,要判断调节是否正确,需要花费大量时间进行实验判断。由于显卡硬件驱动程序的限制,最终调节好的 Gamma 曲线也只能是趋近线性变化,调整结果并不理想。这种传统的调整方法影响了大型高功率激光放大装置的补偿结果和效率。为此,本文提出一种利用 Matlab 编程调整 Gamma 曲线的方法,快速、准确地使 Gamma 曲线呈线性变化,将其应用到大型高能量激光放大装置的光束整形中,得到近场调制度较低的超高斯平顶光束且稳定性极高。

2 实验装置

液晶空间光调制器 Gamma 曲线实验装置如图 1 所示。两个 45°反射镜用于后期准直光路,光路可能随时间而变化,可以通过此镜组精确调节;扩束镜组是必须的,因为液晶的像元是有大小的,光束越大则有效利用的像元越多,整形效果就越好;用液晶光阀进行振幅调制时,要求光的偏振态与液晶分子平行进入,这样就使得格兰棱镜和液晶光阀在机械上要有 45°夹角,而液晶光阀在机械上 45°放置较麻烦,所以只能让两个格兰棱镜成 45°角放置。但是,在实验中发现,国内几大光学镜片厂商所生产的 45°反射镜对偏振态非 0°和 90°进入的光有非常严重的退偏,使得后级光路输出的光无法使用,最终结果就要在液晶前后各放置一个石英转子,也就形成了现有的光路。为了提高 Gamma 曲线测试和动态校正的精度,测试光源采用北京国科世纪激光技术有限公司生产的 1053 nm 单纵模掺 Yb³⁺ 光纤激光器,线偏振态输出功率为 22 mW(偏振态稳定度优于 1%),短时间内工作稳定,无模式竞争和跳模现象。激光由单模保偏光纤输出(光纤芯径 6 μm,数值孔径为 0.14),经由 Throlabs 非球面镜耦合头准直后进入扩束镜组,使测试光斑口径扩大至 20 mm,随后由 1/2 波片调节注入光偏振态,配合其后的格兰棱镜起动态调节注入光功率的目的。采用 SONY 公司生产的 LCX016AL-6 型液晶空间光调制器,其有效工作面积 26.6 mm×20.0 mm(1.3 inch),分辨率 832 pixel×624 pixel,工作电压 15 V。液晶空间光调制器前后正交放置一对消光比大于 2000:1 的格兰棱镜,可以保证液晶空间光调制器具备高消光比的工作条件,使输出图像背景噪声小,具有较高的对比度。光束经过前置格

兰棱镜后偏振态变为 0° 方向,这里定义为 p 偏振光, p 偏振光经过左旋 45° 石英转子后,偏振态逆时针方向旋转 45° (即图 1 中 -45° 方向)。此时,由电脑通过 VGA 视频线将一幅灰度值为 255 的 $832 \text{ pixel} \times 624 \text{ pixel}$ 分辨率图片传输至液晶空间光调制器,左旋 45° 的激光通过液晶分子后,其偏振方向旋转 90° ,偏振态旋转为 45° 方向(图 1 中 45° 方向),经由右旋 45° 转子后, 45° 偏振态激光旋转为 90° 偏振态激光,即 s 光。因为两格兰棱镜正交放置,故 s 光可以完全透过,最后由正透镜聚焦后,使用 Thorlabs 公司型号为 PM1000 的功率计测试其输出功率,便完成了一个工作测试流程。当写入不同灰度值时,液晶空间光调制器上的每一个像素液晶分子上加的工作电压也不同, $0 \sim 255$ 灰度的像素点对激光偏振态旋转 $0^\circ \sim 90^\circ$,配合后置的检偏器件,就可以实现对光束空间强度分布的任意控制,通过写入 $0 \sim 255$ 灰度图片,测试各灰度值对应的检偏后激光功率输出。

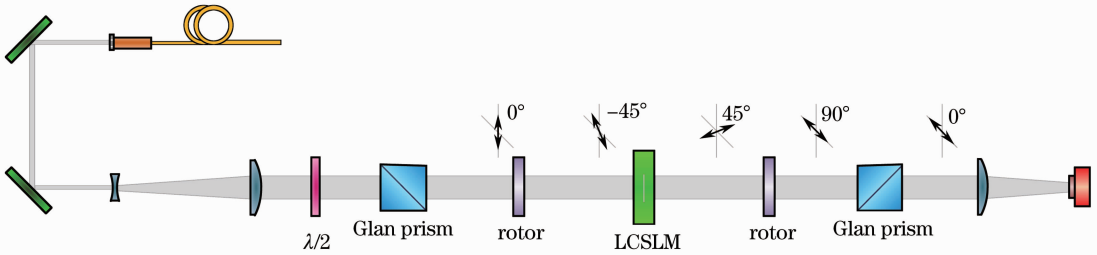
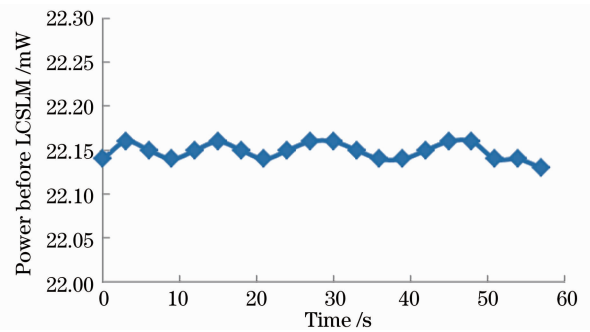


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental layout

Gamma 曲线是激光束通过液晶空间光调制器后的透射率随着在液晶空间光调制器上写入灰度值从 $0 \sim 255$ 的图像而变化的曲线,透射率为激光束通过液晶空间光调制器后的功率除以进入时的功率,而激光束进入液晶空间光调制器的功率的均方根(RMS)值为 0.041% ,如图 2 所示,可看作不变的值。因此,可将 Gamma 曲线用激光束通过液晶空间光调制器后的功率随着写入图像灰度值在 $0 \sim 255$ 变化而变化的曲线来替代。本文在 $0 \sim 255$ 的灰度值中,间隔 10 个灰度值在液晶空间光调制器上写入图像,测量激光功率输出。当入射激光的波长为 1053 nm 时,液晶空间光调制器的 Gamma 曲线如图 3 所示。

图 2 1053 nm 单纵模掺 Yb³⁺ 光纤激光器功率随时间变化曲线Fig. 2 Power of single-frequency Yb³⁺-doped fiber laser at 1053 nm versus time

3 Gamma 曲线的调整方法

图 3 是原始的 Gamma 曲线,期望新的 Gamma 曲线为通过 $(0,0)$ 和 $(255,A)$ 的直线,如图 4 所示,其中 A 为在液晶空间光调制器上写入灰度为 255 的图像时的功率值,本文中 $A = 2.02 \text{ mW}$ 。要使 Gamma 曲线变为通过 $(0,0)$ 和 $(255,2.02)$ 的直线,具体步骤如下。

1) 将测得的在液晶空间光调制器上写入不同灰度值图像时的功率值,即横坐标为灰度值、纵坐标为功率值的间断的点,拟合为连续的曲线。

假设函数 $y = f(x)$ 在 $N+1$ 个点 $(x_0, y_0), \dots, (x_N, y_N)$ 处的值已知,其中值 x_k 在区间 $[a, b]$ 上分布,且满足 $a \leq x_0 < x_1 < \dots < x_N \leq b, y_k = f(x_k)$,则可以构造一个过这 $N+1$ 个点的 N 次多项式 $P(x)$ 。对此可利用 Lagrange 插值多项式

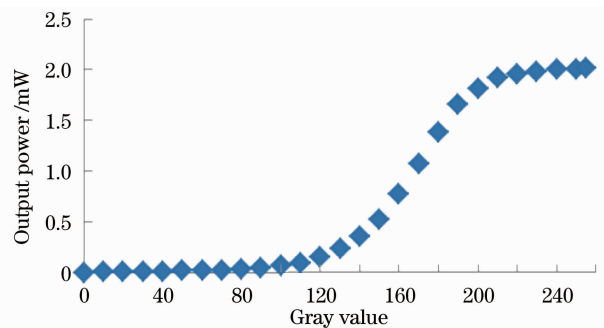


图 3 1053 nm 激光入射时液晶空间光调制器的 Gamma 曲线

Fig. 3 Gamma curve of the LCSLM for 1053 nm laser

$$P_N(x) = \sum_{k=0}^N y_k L_{N,k}(x), \quad (1)$$

式中 $L_{N,k}$ 为基于节点:

$$L_{N,k} = \frac{(x-x_0)\cdots(x-x_{k-1})(x-x_{k+1})\cdots(x-x_N)}{(x_k-x_0)\cdots(x_k-x_{k-1})(x_k-x_{k+1})\cdots(x_k-x_N)} \quad (2)$$

的 Lagrange 系数多项式。易知,项 $(x-x_k)$ 和 (x_k-x_k) 不在(2)式的右端出现。可引入(2)式的乘式记号,写为

$$L_{N,k} = \frac{\prod_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^N (x-x_j)}{\prod_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^N (x_k-x_j)}. \quad (3)$$

将(3)式代入(1)式,可知过点 (x_j, y_j) 的多项式曲线 $y = P_N(x)$ 为

$$P_N(x_j) = y_0 L_{N,0}(x_j) + \cdots + y_j L_{N,j}(x_j) + \cdots + y_N L_{N,N}(x_j). \quad (4)$$

利用(2),(4)式用 Lagrange 插值将横坐标为灰度值、纵坐标为功率值的离散点拟合得到 Gamma 曲线的代数方程^[9]。根据拟合出来的方程,在区间 $[0, A]$ 上的任意功率值,都可求得与其对应的灰度值。

2) 图 4 所示呈线性变化的 Gamma 曲线,其函数表达式为

$$Y = \nu X, \quad (5)$$

式中 $\nu = \frac{A}{255} = 0.0079$, Y 代表功率, X 代表灰度值。若灰度值的间隔为 1,由(5)式可轻易求得 X 在 $[0, 255]$ 上这 256 个灰度值对应的功率值 Y 。

3) 将 Y 代入到多项式曲线 $y = P_N(x)$ 即 $Y = P_N(x)$, 利用 Bolzano 二分法求得在曲线 $Y = P_N(x)$ 上与 Y 对应的新灰度值 x 。其中 Bolzano 二分法求解过程如下:令 $f(x) = P_N(x) - Y$, 由于方程 $f(x) = 0$ 的根 x 在 $[0, 255]$ 区间上,令 $a = 0, b = 255$, 则 $f(a) = P_N(a) - Y, f(b) = P_N(b) - Y$ 。先判断 a 或 b 是不是方程的解,若 $f(a) < \Delta$ (其中 Δ 是求解精度,为一个足够小的值,可令其等于 0.5), 则解为 $x = a$, 同理若 $f(b) < \Delta$, 则解为 $x = b$ 。如果 a, b 不是方程的根,则必然有 $f(a)f(b) < 0$, 令 $c = \frac{a+b}{2}$ 。若 $f(a)f(c) < 0$, 令 $b = c$; 若 $f(b)f(c) < 0$, 令 $a = c$ 。重复上述步骤直到求出方程的根 x 为止。需要注意的是,由于灰度值为整数,应将 x 需四舍五入至整数。

通过上述步骤,依靠 Lagrange 插值将横坐标为灰度值、纵坐标为功率值的离散点拟合得到曲线方程后,利用 Bolzano 二分法可求得图 4 中灰度间隔 $X=1$ 的功率值 Y 对应的新灰度值 x 。将新灰度值通过控制系统写入 VGA 图像处理模块,应用于液晶空间光调制器,重新测量液晶空间光调制器的 Gamma 曲线如图 5 所示,为一条直线。

4 实验结果分析

近场调制度定义为激光脉冲空间分布的全强度口径内峰值强度与平均强度之比,反映了近场光斑强度的均匀性,是衡量激光放大器光束质量的关键指标之一,其数学表达式为

$$M = \frac{I_{\max}}{I_{\text{avg}}},$$

式中 I_{\max} 为光束空间分布的峰值强度, I_{avg} 为空间分布的平均强度。控制光束近场强度调制度可以减小光学元件损伤的几率,改善光束近场均匀性,提高激光放大器的工作通量和负载能力。

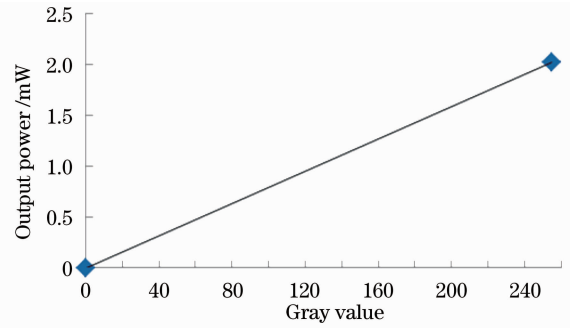


图 4 1053 nm 激光入射时期望液晶空间光调制器呈线性变化的 Gamma 曲线

Fig. 4 Expected Gamma curve of the LCSLM with linear variation for 1053 nm laser

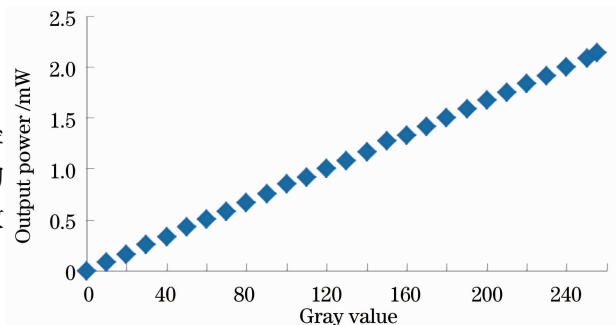


图 5 灰度替换后 1053 nm 激光入射时液晶空间光调制器的 Gamma 曲线

Fig. 5 Gamma curve of the LCSLM for 1053 nm laser after gray replacement

将液晶空间光调制器应用于图中 A 代表放大器,FR 代表法拉第旋光器,M 代表反射镜,R 代表转子,P 代表偏振片,RTP 代表电光开关,L 代表透镜,实验装置如图 6 所示。补偿前的光束近场分布如图 7(a)所示,图 7(b)显示了光斑的通量分布,即光斑上不同灰度出现的几率,当光斑强度比较均匀即近场调制度小时,此曲线较平滑。按照传统方法调整 Gamma 曲线,补偿后 CCD 采集到的光斑如图 8 所示,其近场调制度约为 1.42。而将本文所述的 Gamma 曲线的调整方法应用于其中,补偿后 CCD 采集到的光斑如图 9 所示,其近场调制度约为 1.23。根据不同的 Gamma 曲线调整方式,补偿后间隔 20 min 用 CCD 采集光斑并计算其近场调制度,得到的近场调制度随时间变化曲线如图 10 所示,分别用三角和正方形表示利用传统方法和本文方法调整 Gamma 曲线得到的光束近场调制度,发现将 Gamma 曲线的线性变化调整得比较好时,光束近场调制度小,且稳定性高。这正是由于当 Gamma 曲线呈线性变化时,激光强度分布随时间变化对补偿的影响不明显,在液晶空间光调制器上写入图像灰度的微弱变化不至于导致激光透射率出现较大的起伏。因

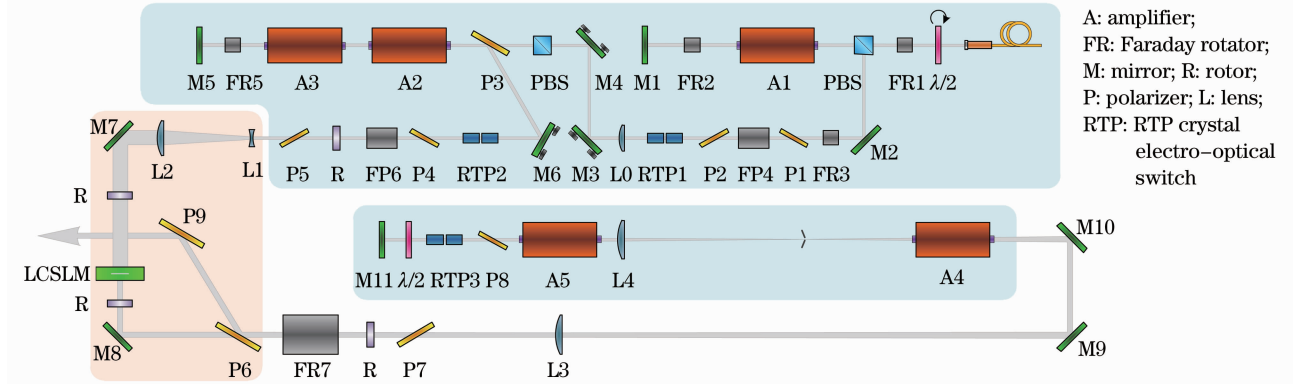


图 6 光束整形实验装置示意图

Fig. 6 Schematic of beam shaping experimental layout

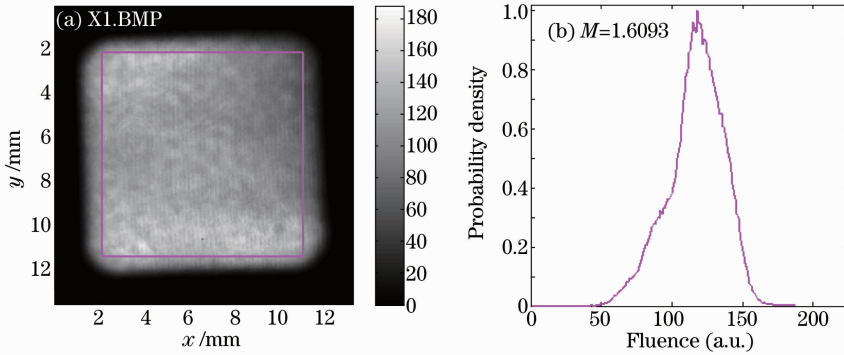


图 7 补偿前的光束近场分布

Fig. 7 Near-field distribution of the beam before compensation

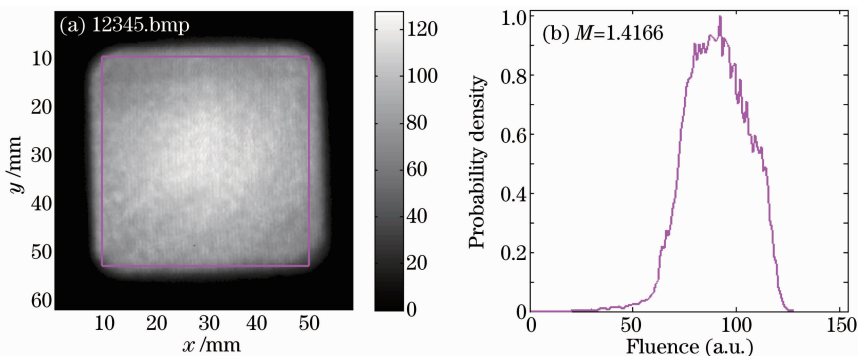


图 8 传统方法调整 Gamma 曲线补偿后的光束近场分布

Fig. 8 Near-field distribution of the beam after compensation under traditional adjustment of Gamma curve

此,将 Gamma 曲线调整成线性变化在光束整形中至关重要。

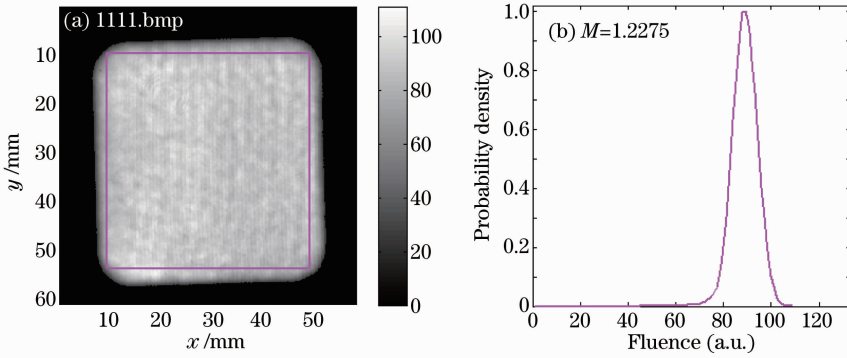


图 9 按照本文方法调整 Gamma 曲线补偿后光束近场分布

Fig. 9 Near-field distribution of the beam after compensation under the described adjustment of Gamma curve

5 结 论

在利用液晶空间光调制器进行激光束的实时、可控光束空间整形时,针对现有调节 Gamma 曲线呈线性变化的方法费时费力、效果也不太理想的现状,提出了一种新的方法,并编程应用于实验。采用日本 SONY 公司研制的分辨率为 $832 \text{ pixel} \times 624 \text{ pixel}$ 的 LCX016AL-6 透射式液晶空间光调制器作为测试对象,搭建了测试光路。在未对液晶空间光调制器的 Gamma 曲线做任何调整的情况下,在液晶空间光调制器上写入不同的灰度图像得到一组横坐标为灰度值、纵坐标为功率值的离散点,利用 Matlab 编写程序,将这些离散的点用 Lagrange 插值法拟合为曲线方程,然后用 Bolzano 二分法求得在此曲线上与灰度间隔为 1 的功率值对应的新的灰度值,最后将新、旧灰度值逐点替换。此时,重新测量液晶空间光调制器的 Gamma 曲线发现其呈线性变化。通过上述算法,仅需一次操作便可使 Gamma 曲线呈线性变化,极大地减少了大型高功率激光器光束近场调试的补偿时间。将其应用到大型高能激光放大装置的光束整形中,得到近场调制度较小的超高斯平顶光束,且稳定性极高。

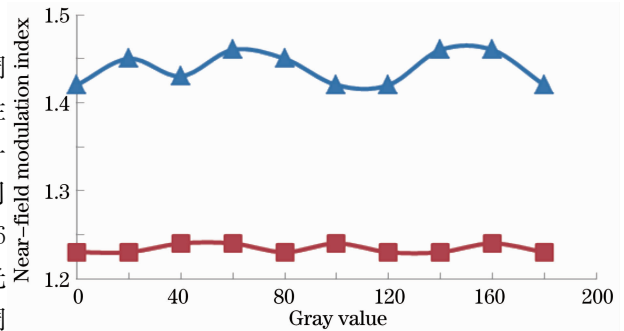


图 10 两种 Gamma 曲线调整方式下近场调制度随时间变化曲线

Fig. 10 Near-field modulation curves under different Gamma curve adjustment method

参 考 文 献

- 1 Keiichi Sueda, Kouji Tsubakimoto, Noriaki Miyanaga *et al.*. Control of spatial polarization by use of a liquid crystal with an optically treated alignment layer and its application to beam apodization[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(18): 3752~3758
- 2 B. M. Van Woutherghem, J. T. Salmon, R. W. Wilcox. Beamlet Pulse-Generation and Wavefront-Control System[J]. UCRL-LR-105821-95-1, 1995, 42~51
- 3 Zhang Cai, Huang Yongmei, Qi Bo *et al.*. Beam steering control based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0905005
张 彩, 黄永梅, 齐 波 等. 基于液晶空间光调制器的光束偏转控制[J]. 中国激光, 2011, **38**(9): 0905005
- 4 Kong Ningning, Li Chao, Xia Mingliang *et al.*. Calibration of phase-modulation properties of liquid-crystal spatial-light modulator by mask-phase method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0305002
孔宁宁, 李 抄, 夏明亮 等. Mask 相位法校准液晶空间光调制器的相位调制特性[J]. 光学学报, 2011, **31**(3): 0305002
- 5 Bai Fuzhong, Rao Changhui. Phase shift characteristic measurement and static distortion compensation for liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1487~1491
白福忠, 饶长辉. 液晶空间光调制器相移特性测量与静态畸变补偿[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1487~1491

- 6 Zhang Jian, Fang Yun, Wu Liying *et al.*. Liquid crystal beam steering technologies[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **37**(2): 325~334
张健, 方运, 吴丽莹等. 液晶光束偏转技术[J]. 中国激光, 2010, **37**(2): 325~334
- 7 Ma Haotong, Zhou Pu, Wang Xiaolin *et al.*. Near-field beam shaping based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2032~2036
马浩统, 周朴, 王小林等. 基于液晶空间光调制器的激光束近场整形[J]. 光学学报, 2010, **30**(7): 2032~2036
- 8 Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei *et al.*. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1107~1111
陈怀新, 隋展, 陈祯培等. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J]. 光学学报, 2001, **21**(9): 1107~1111
- 9 Ding Lei, Zhao Runchang, Li Mingzhong *et al.*. Feasibility study of liquid crystal light valve on beam-shaping[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(6): 849~852
丁磊, 赵润昌, 李明中等. 反射式液晶空间光调制器用于激光束空间整形可行性研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(6): 849~852
- 10 Gong Huaping, Lü Zhiwei, Lin Dianyong. Present status of laser beam spatial shaping[J]. *Laser & Optoelectron. Progress*, 2005, **42**(9): 2~5
龚华平, 吕志伟, 林殿阳. 激光束空间整形的研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(9): 2~5
- 11 Liu Bohan, Zhang Jian. Dynamical laser beams steering with phase-only spatial light modulator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 899~902
刘伯晗, 张健. 纯相位空间光调制器动态控制光束偏转[J]. 中国激光, 2006, **33**(7): 899~902
- 12 Shi Tao, Huang Ziqiang, Zhang Cuiyu. Liquid crystal spatial light modulator based on BSO[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1999~2003
石涛, 黄子强, 张翠玉. 基于BSO的液晶空间光调制器[J]. 中国激光, 2009, **36**(8): 1999~2003
- 13 Cai Dongmei, Yang Huizhen, Ling Ning *et al.*. Diffraction effect of liquid crystal spatial light modulator using for beam deflection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 491~495
蔡冬梅, 杨慧珍, 凌宁等. 液晶空间光调制器用于光束偏转控制的衍射效应[J]. 中国激光, 2008, **35**(4): 491~495
- 14 John H. Mathews, Kurtis D. Fink. Numerical Methods Using MATLAB (3rd ed.)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002