

基于均匀度和平稳度的激光光束匀化性评价

李丽 韩学勤* 赵士伟 包鸿音 王兴宾

北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191

摘要 针对激光光束匀化的目的和特性,对现有的光束匀化性评价方法进行了分析,说明了这些方法的特点和存在的问题。提出了一种基于均匀度和平稳度的光束匀化性评价方法,该方法使用面阵 CCD 采集激光光强分布图像,通过图像处理分析光斑图像,采用均匀度和平稳度评价方法对光斑的整体能量分布和散斑进行评价。实验结果表明该评价方法可以较好地反映激光光束匀化状况。

关键词 激光光学;光束质量;激光光束匀化;衍射;均匀度;平稳度

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.011401

Laser Beam Homogenization Assessment Based on Uniformity and Stationarity

Li Li Han Xueqin Zhao shiwei Bao Hongyin Wang Xingbin

School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract Aiming at the characteristics and purpose of beam homogenization, existing evaluating methods for beam uniformity are analyzed, and their disadvantages are discussed. An assessment method combining uniformity and stationarity is introduced. The laser intensity distribution is obtained by CCD and the laser spot is analyzed by image processing. Then we quantitatively analyze the energy distribution and speckle of laser spot with uniformity and stationarity. The result indicates that the testing system fully satisfies the demand of laser spot assessment.

Key words laser optics; beam quality; laser beam homogenization; diffraction; uniformity; stationarity

OCIS Codes 140.3295; 140.3430; 140.3300; 100.2960

1 引言

激光器直接产生光束的空间强度通常呈高斯或类高斯分布,然而在雷达探测、激光照明、惯性约束核聚变等诸多领域往往要求光照均匀,为此以实现光强均匀分布为目的的激光光束匀化技术应运而生并得到了快速发展。迄今人们已研发出多种光束匀化技术^[1-6],如透镜阵列法、随机相位板法、光谱色散平滑法等。

如何使用一种高效、准确的方法评价光束匀化效果,关系到整个匀化体系的成败,已成为激光光束匀化技术研究中的一重要课题。针对光束匀化效果的评价,目前已有多种方法,如通量对比度、调制度、平顶因子和平顶光束 M^2 因子等^[7-8],但尚未有统一的衡量标准。本文在比较现有评价方法的基础上,提出了一种基于均匀度和平稳度的激光光束匀化性评价方法。

2 现有评价方法分析

传统的针对单束激光的评价方法如 M^2 因子、 β 因子、桶中能量比等,未考虑合成光束的非高斯分布特征^[9],不能准确地反映匀化光束状况。目前针对匀化光束质量的评价主要有调制度、光束通量对比度、平顶因子和平顶光束 M^2 因子等。

收稿日期: 2013-08-26; 收到修改稿日期: 2013-09-27; 网络出版日期: 2013-12-13

作者简介: 李丽(1970—),女,博士,副教授,主要从事图像处理和光电成像方面的研究。E-mail: lili2005buaa@126.com

*通信联系人。E-mail: xueqhan@163.com

2.1 调制度和光束通量对比度

调制度是指近场的平顶区域峰值强度 I_{\max} 与平均强度 I_{avg} 之比,表示为

$$M = I_{\max} / I_{\text{avg}} . \quad (1)$$

M 越接近 1, 光强分布越均匀, M 用于描述激光束宏观的近场分布均匀性。

光束通量对比度定义为

$$C = \frac{\sqrt{\sum (I_i - \bar{I})^2 / N}}{\bar{I}} , \quad (2)$$

式中 I_i 表示各采样点的能量值, \bar{I} 表示各采样点的平均值, N 表示采样点个数, $C \leq 1$, C 越小, 匀化效果越好。

调制度和光束通量对比度对近场光强的分布做了整体描述, 但有很多不足之处, 如调制度仅考虑平顶区域的一个光强最大点, 具有很大的随机性; 对比度虽然具有统计特性, 但是不难想象具有相同对比度的近场, 可能引起近场调制的原因是不同的, 因此不能从本质不能反映调制来源。

2.2 平顶因子

平顶因子定义为

$$F = \frac{\sum_{f=1}^{P_{\text{peak}}-1} \frac{E_f + E_{f+1}}{2}}{P_{\text{peak}}} , \quad (3)$$

式中 f 为阈值能量, P_{peak} 为峰值能量, E_f 为某一阈值能量之上的能量分数。理想的具有平顶形状的光束, 均匀性最好, 平顶因子值为 1。它描述了整个激光光强的整体均匀效果, 缺乏对散斑特征的描述。

2.3 平顶光束 M^2 因子评价方法

匀化处理后的光束, 可用超高斯函数、匀化高斯函数、洛伦兹函数等来描述。 M^2 是描述激光光束质量的重要参数, 可以同时反映光束的近场和远场分布特性, 因此, 有人将 M^2 应用于评价光束匀化性, 如 Lu 等^[10] 将平顶洛伦兹光束的 M^2 因子定义为

$$M^2 = \frac{q}{2} \left[\frac{2^{4/q} (2+q)}{\sqrt{\pi} (1+q) (4+q)} \Gamma(1 - \frac{2}{q}) \Gamma(\frac{3}{2} - \frac{2}{q}) \right]^{\frac{1}{2}} , \quad (4)$$

式中 Γ 为伽马函数。然而经过匀化处理获得的并不是理想的平顶光束, 若采用上述函数描述输出光束的平顶性, 需要先将输出光束光强的空间分布拟合为上述函数的形式, 但其过程复杂且在实际应用中不够直观方便。

3 基于均匀度和平稳度的评价方法

3.1 均匀性评价考虑的因素

激光光束匀化就是对光束进行空间整形, 得到较理想的呈均匀分布的平滑光束, 如图 1 所示。

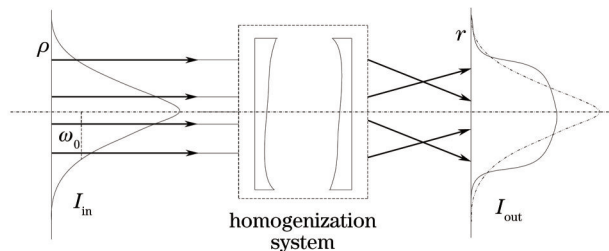


图 1 光束匀化原理示意图

Fig.1 Scheme of beam homogenization

激光光束匀化技术大体可分为时间域和空间域两类。时间域匀化技术在改善焦斑内部小空间周期的强度调制方面具有优势, 空间域匀化技术在控制焦斑包络形状方面具有优势。

综合考虑光束匀化目的和现有匀化技术, 本文从两个方面对其匀化效果进行评价, 一是对其整体包络

形状,即均匀性进行评价,二是对内部小空间的平滑状况,即平稳性进行评价。

3.2 均匀度和平稳度评价方法

为了对激光光强的整体包络形状和内部小空间的平滑状况进行评价,提出了基于均匀度和平稳度双重判据的评价方法。均匀度描述激光光强的整体均匀效果,将其定义为

$$\alpha = \frac{W_1}{W_2}, \quad (5)$$

式中 W_1 为光强下降到最高光强的 50% 时的桶中能量, W_2 为光强下降到最高光强的 90% 时的桶中能量^[11-12]。

理想匀化光束局部区域内激光光强分布具有很强的相关性,即局部区域范围内光强的统计特性变化较小。但是由于激光的高相干性,多个光束叠加会产生干涉散斑,破坏了局部的平稳性,造成小空间的光强分布不平滑,本文以激光光强截面分布图为例进行说明,如图 2 所示。

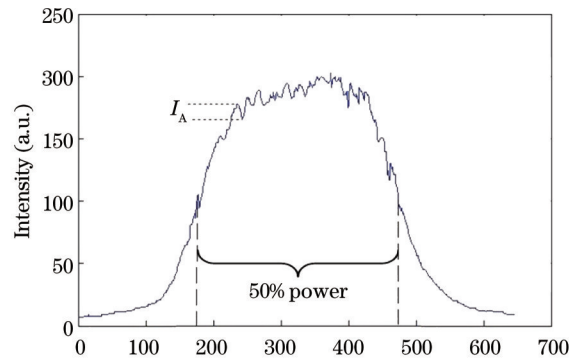


图2 平稳度示意图

Fig.2 Scheme of stationarity

平稳度主要考察光束散斑情况,反映光强分布的平滑状态。其定义如下:

$$\beta = \begin{cases} \frac{\sum I_A}{I_{\text{mean}}}, & \text{if } I_A > 0.1I_{\text{mean}} \\ \frac{I_{A-\text{max}}}{I_{\text{mean}}}, & \text{if } I_A \leq 0.1I_{\text{mean}} \end{cases}, \quad (6)$$

式中 I_{mean} 为平顶区域^[7]的平均光强, I_A 表示波动强度。若存在强度大于 $0.1I_{\text{mean}}$ 的波动,则将其相加,所得之和与 I_{mean} 的比值即为光束平稳度;若无强度大于 $0.1I_{\text{mean}}$ 的波动,则找出最大波动,最大波动与 I_{mean} 的比值即为光束平稳度。 $\beta \geq 0$, β 越小激光光强分布越平稳。

4 基于均匀度和平稳度的评价方法

4.1 实验装置及工作流程

激光光束匀化性评价实验装置由漫反射靶、衰减片、滤光片、镜头、CCD、同步控制电路、计算机系统等组成,如图 3 所示。

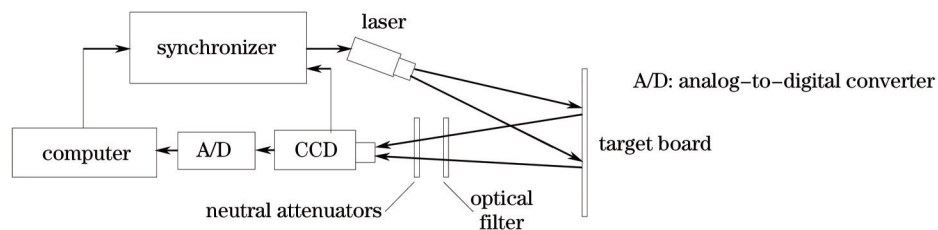


图3 测量系统示意图

Fig.3 Scheme of test system

由于 CCD 探测器具有高灵敏度和低饱和光强的特点,所以实验必须使用光学衰减器。为精细地控制衰减程度,选用在待测激光波长范围内吸收系数稳定、表面均匀性好的中性玻璃衰减片,根据被测激光强度的

不同,选择适当衰减幅度,从而有效利用 CCD 的动态范围^[13]。通过镜头调节使光斑面积占到 CCD 接收图像面积 1/3 以上,以提高测量精度。同步控制电路提取 CCD 场同步信号,触发激光器发出脉冲射激光照射漫反射靶,保证被测激光的单脉冲选取。

实验步骤分为光斑图像采集和图像处理与分析,流程图如图 4 所示。

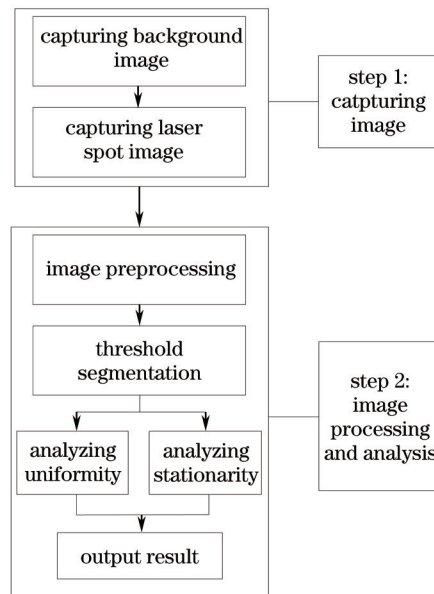


图 4 实验步骤流程图

Fig.4 Steps of main test

CCD 获取的图像通常含有很多噪声,如背景光、CCD 固有噪声等。为降低噪声对图像质量的影响,采用二次相减法对图像进行去噪预处理,即:在无激光照射时,采集 10 幅背景图像,对其进行平均运算,将平均后的图像作为背景图像;在激光照射时,采集一幅图像作为主动图像;对主动图像与背景图像相减,即可消除大部分噪声。预处理后的光斑图像仍含有背景像素,鉴于光斑图像亮度较高、背景简单等特点,选用最大熵法阈值分割方法^[14]对图像进行分割处理。

光斑提取出来之后,需要确定光斑的中心,常用的光斑图像中心定位方法有质心法、高斯分布拟合法和椭圆拟合法等。由于激光经匀化处理后的光斑没有明显的边缘,不一定为标准的圆形或椭圆,因此选用质心法定位光斑中心,公式如下:

$$\begin{cases} X = \frac{\sum \sum A[i,j] i}{\sum \sum A[i,j]} \\ Y = \frac{\sum \sum A[i,j] j}{\sum \sum A[i,j]} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 (X, Y) 表示光斑质心坐标, $A(i, j)$ 表示代表第 i 行第 j 列的灰度值。

以光斑质心为中心,选一条过中心的直线 l_1 , 并过中心做该直线的垂线 l_2 。 l_1 和 l_2 即为激光光强切面分布曲线。计算 l_1 和 l_2 均匀度 α_1 和 α_2 , 计算 l_1 和 l_2 平稳度 β_1 和 β_2 , 按如下公式进行加权:

$$\begin{cases} \alpha = 0.5\alpha_1 + 0.5\alpha_2 \\ \beta = 0.5\beta_1 + 0.5\beta_2 \end{cases}, \quad (8)$$

得到的 α 为激光光束均匀度, β 为激光光束平稳度。

4.2 理论分析与实验测量

根据图 3 所示装置建立实验系统,对普通高斯光束、使用透镜阵列进行匀化和光谱色散平滑单元进行匀化的激光光束进行采集评价。所用激光波长为 1053 nm 基频光,出射 526.5 nm 的倍频光,透镜阵列包含 7 个透镜元,透镜元口径为 50 mm,透镜元焦距为 0.75 m,主聚焦透镜焦距为 0.75m, CCD 为 WAT-902H 工业型摄像机。

透镜阵列将入射光束分成大量光束,透镜元的作用是产生空间的相位调制,激光经过透镜元和主聚焦

透镜后焦斑的大小可表示为

$$a = \frac{df_a}{f}, \quad (9)$$

式中 d 和 f 分别是透镜元的口径和焦距, f_a 为主聚焦透镜焦距, 可见不同的焦距和口径便可获得不同大小的焦斑, 并且多束光束叠加, 可使光束均匀度提高, 但是由于激光的高相干性, 多个光束叠加会产生干涉条纹。

光谱色散平滑单元主要由电光相位调制器和光栅组成。设入射激光横向空间分布为 $A_0(x, y)$, 中心圆频率为 ω_0 , 经过该单元后光场如下:

$$E_0(x, y, t) = A_0(x, y) \sum_n J_n(\delta) \exp[i\omega_0 t + in(\omega_m t + ax)], \quad (10)$$

式中 J_n 为 n 阶第一类贝塞尔函数, δ 和 ω_m 分别是电光调制器的调制深度和圆调制频率。

光束经过透镜阵列和光谱色散平滑单元后, 出射光场为各光波分量的叠加, 一定时间内平均的光强分布为

$$I(x, y, z) = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |E(x, y, z, t)|^2 dt, \quad (11)$$

式中 $E(x, y, z, t)$ 为出射光场。某一瞬时靶面光强分布是具有高度空间强度调制的干涉图样, 但图样会随时间快速变化, 在足够短的时间间隔内做到时间意义上的平滑, 消除小尺度不均匀, 这就是光谱色散平滑法的基本原理^[15]。

图5所示为光斑灰度图像和光强截面曲线, 其中图5(a)为高斯光束, 图5(b)为经过透镜阵列的激光光束, 图5(c)为经过透镜阵列和光谱色散平滑单元的激光光束, 评价结果如表1所示。

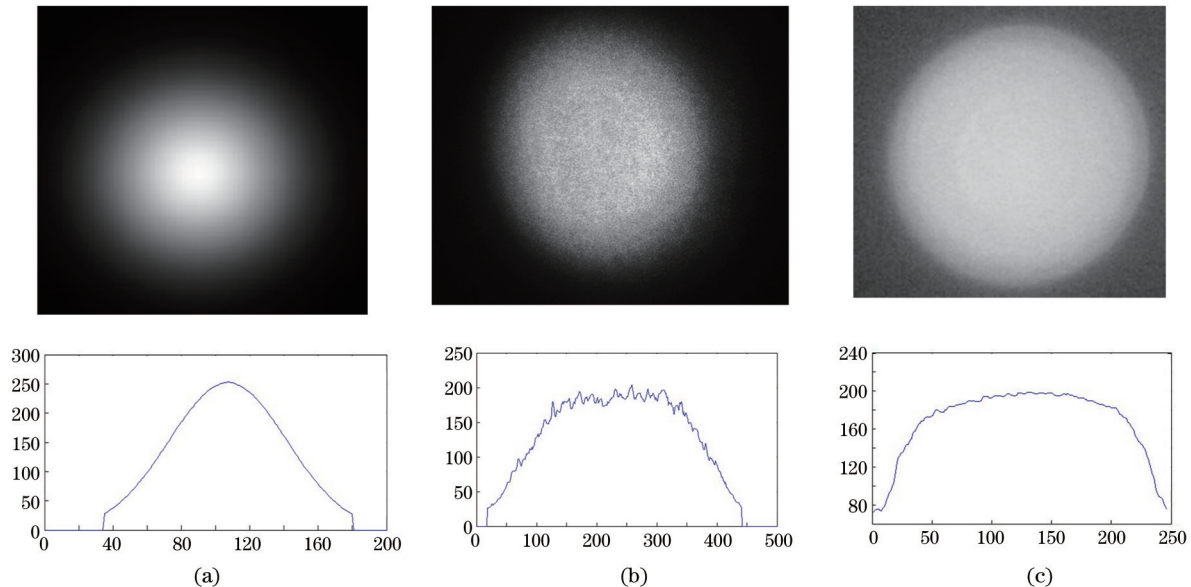


图5 光束切面图。(a)高斯光束; (b)经过透镜阵列的激光光束; (c)经过透镜阵列和光谱色散平滑单元的激光光束
Fig.5 Energy distribution of beam. (a) Gaussian beam; (b) laser beam after lens array; (c) laser beam after lens array and dispersion smoothing unit

由表1中的数据可知: 高斯光束均匀度较差, 平稳度较好; 经透镜阵列的多束光束叠加, 使其均匀度提高明显, 其值为0.82, 但是由于激光的高相干性, 多个光束叠加会产生细密干涉条纹, 平稳度变差, 其值为0.21; 光束经过透镜阵列和光谱色散平滑单元后, 通过调节参数, 可以获得最佳的匀化效果, 均匀度和平稳度分别为0.88和0.02, 与光谱色散平滑法能消除小尺度不均匀的理论相符。该方法的有效性由此得到了验证。

表1 匀化性参数

Table 1 Uniformity factors

Factor	Uniformity	Stationarity
Gaussian beam	0.48	0.01
Laser beam after lens array	0.82	0.21
Laser beam after lens array and dispersion smoothing unit	0.88	0.02

5 结 论

提出了一种激光光束匀化性评价方法,该方法采用均匀度和平稳度指标分别对激光整体强度分布和干涉散斑造成的内部小空间不平滑状况进行评价。使用面阵 CCD 采集激光光强分布图像,通过图像处理方法对光斑图像进行实时处理评价,并进行了实验验证,结果表明该方法能够有效反映匀化光束质量。同时,该评价方法也存在一些问题,例如当近场分布中存在强调制时,该方法均匀度结果会很好,而平稳度指标会变差,这就存在两个评价参数的权重问题,是否应根据不同应用需求进行归一化处理值得进一步深入探讨。

参 考 文 献

- 1 Dickey F M, Holswade SC. Laser Beam Shaping: Theory and Techniques [M]. New York: Marcel Dekker, 2000.
- 2 Shenlei Zhou, Zunqi Lin, Xiujuan Jiang. Beam smoothing by lens array with spectral dispersion [J]. Opt Commun, 2007, 272(1): 186.
- 3 Yu Xiaochen, Hu Jiasheng, Wang Liaobao. Laser beam shaping based on liquid-crystal spatial light modulator [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0514001.
于晓晨, 胡家升, 王连宝. 基于液晶空间光调制器的激光束整形[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0514001.
- 4 Yu Xiaochen, Hu Jiasheng, Wang Liaobao. New methods for improving the quality of laser beam shaping [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0116002.
于晓晨, 胡家升, 王连宝. 提高激光束整形质量的新方法[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0116002.
- 5 Huang Feng, Jia Wenwu, Wang Yuefeng, *et al.*. Theory and design of laser beam homogenizer based on multi-aperture beam integrator [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(1): 44.
黄 峰, 贾文武, 汪岳峰, 等. 多孔径光束积分激光匀束器理论与设计[J]. 激光与红外, 2010, 40(1): 44.
- 6 Yongzhong Li, Liejia Qian, Daquan Lu, *et al.*. Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(5): 957-963.
- 7 G Klauminzcr, C Abele. Excimer lasers need specifications for beam uniformity [J]. Laser Focus World, 1991, 27(5): 153.
- 8 He Yuanxing, Li Xinyang. Study on standard for evaluating the far-field energy focusability of laser beams [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 051403.
贺元兴, 李新阳. 激光束远场能量集中度的评价指标探讨[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 051403.
- 9 P Zhou, Z Liu, X Xu, *et al.*. Numerical analysis of the effects of aberrations on coherently combined fiber laser beams [J]. Appl Opt, 2008, 47(18): 3350-3359.
- 10 B Lu, B Zhang, S Zuo. Far-field intensity distribution, M^2 factor, and propagation of flattened Gaussian beam [J]. Appl Opt, 1999, 38(21): 4581-4584.
- 11 A E Siegman. How to (Maybe) Measure Laser Beam Quality[R]. Long Beach: Optical Society of America Annual Meeting, California, October 1997.
- 12 A E Siegman. New developments in laser resonators[C]. SPIE, 1990, 1224. 2.
- 13 Cao Yilei, Gao Chunqing. Analysis on the accuracy of beam parameter measurement by using CCD array [J]. Optical Technique, 2004, 30(5): 583-586.
曹一磊, 高春清. 基于面阵 CCD 的激光光束参量测量系统精度分析[J]. 光学技术, 2004, 30(5): 583-586.
- 14 Sun Zhihong, Peng Zhitao, Liu Hua, *et al.*. Calculated methods of high power laser near field parameters [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(4): 544.
孙志红, 彭志涛, 刘 华, 等. 高功率激光近场空域计算方法[J]. 中国激光, 2008, 35(4): 544.
- 15 Jiang Xiujuan, Zhou Shenlei, Lin Zunqi, *et al.*. Improving of the irradiation uniformity on targets with a diffraction weakened lens array and spectral dispersion smoothing [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(11): 5824.
江秀娟, 周申蕾, 林尊琪, 等. 利用消衍射透镜阵列及光谱色散平滑实现焦斑均匀辐照[J]. 物理学报, 2006, 55(11): 5824.