

文章编号: 0258-7025(2008)04-0544-05

高功率激光近场空域计算方法

孙志红 彭志涛 刘 华 徐隆波 赵军普 王 超 傅学军

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 为了使目前高功率激光近场空域的对比度和调制度评价更加科学化,在数值计算中采用图像分割灰度门限法,对 CCD 采集的原始近场图像进行信噪分割。用最大类间方差作为判断噪声阈值的主要依据,由噪声区域最大概率灰度值得到本底灰度,然后根据强度是否大于 $I_{\text{avg}}(1+5\sigma)$ 值来判断是否存在奇异点。奇异点位置灰度值经 8-邻域图像平滑处理得到。通过应用大量近场测量数据分析对比了调制度的两种计算方法,结果表明两种计算方法处理结果是一致的,并规范地给出了高功率激光近场空域评价计算方法。

关键词 激光技术;光束质量;近场;调制度;对比度

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Calculated Methods of High Power Laser Near Field Parameters

Sun Zhihong Peng Zhitao Liu Hua Xu Longbo Zhao Junpu Wang Chao Fu Xuejun

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract In order to scientifically evaluate the near field parameters involving the modulation and contrast ratio in space region for high power solid-state laser facility, the grey threshold of image segmentation in image processing is used to separate the noise and signal for the image of near field picked by CCD. The maximum square difference value is taken as the main criterion for noise threshold. The grey background can be obtained from the grey value of the most probability in the noise region. The oddity spot in laser near field can be judged based on whether the intensity is greater than $I_{\text{avg}}(1+5\sigma)$ or not. The image smoothness technique of eight neighbor regions is adopted to process the oddity spots of pixel. Two evaluated methods for modulation are analyzed and compared with many experimental data. It is shown that two calculation results of modulation are identical, and present evaluated methods of high power laser near field parameters are much more normative.

Key words laser technique; beam quality; near field; modulation; contrast ratio

1 引 言

高功率激光器常规检修和故障诊断主要依据激光参数精密诊断和测量的结果,参数诊断和测量包括激光能量、功率、近场、时间波形和脉宽,以及焦斑形态和波前的测试。近场是指一个光学链里远离成像的位置,对于大功率激光器主要是指具有光束全尺寸的区域。由于惯性约束聚变要求尽可能提高增益介质的能量提取效率、降低传输中的非线性效应引起的光学元件破坏风险并减少衍射引起的光束调制,故要求近场分布为平顶高斯分布。对于高功率激光系统,非线性效应使得近场出现很强的调制,价格昂贵的大口径光学元件一般处在近场位置,破坏风险比较大,大大限制了激光装置的负载能力。

近场空间特征参量评价主要考虑强度分布的均匀性,目前高功率激光近场空域评价主要采用对比度和调制度两个参数^[1~5]。理想的光束波前强度分布应该是“平坦”的,但由于各种原因导致强激光近场有较强的调制,正确评判光束近场对于激光器光束控制和参数诊断系统起至关重要的作用。国内在强激光传输变换和光束控制方面开展了大量工作^[6~9]。在强激光技术领域,因高能量、高功率、高光强和高对比度等特点,给激光参数诊断和测量带来新的挑战,为此需要开展一些专用测试技术和参数评判方法的探索,规范各参数计算方法,推动强激光精密诊断技术的发展。

收稿日期:2007-08-30; 收到修改稿日期:2007-11-20

作者简介:孙志红(1965—),女,甘肃人,副研究员,主要从事光学检测方面的研究。E-mail:sunzh01@163.com

2 高功率激光近场空域计算方法

高功率激光近场空域评价主要采用对比度 C 和调制度 M 两个参数。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

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

调制度反映的是近场整体起伏量, 实际光束近场 $M \geq 1$, M 越小, 近场越均匀, 高功率激光装置一般要求 $M \leq 1.5$ 。

对比度是指近场平顶取样区域内强度起伏的归一化均方根(RMS)值, 用于定量描述高强度激光束传输过程中小尺度自聚焦引入的中、高频强度调制度。对于理想均匀光束 $C = 0$, 高功率激光装置希望近场对比度 $C \leq 10\%$, 对比度表示为

$$C = \frac{1}{I_{\text{avg}}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i - I_{\text{avg}})^2}{N}}, \quad (2)$$

式中 I_i 为近场取样区域内第 i 像素对应的强度值, N 为像素总数。近场的测量普遍采用将光束近场作为“物”通过像传递系统缩束成像到 CCD 上, 根据 CCD 采集的近场图像可得到强度统计分布, 即灰度直方图。灰度直方图是灰度值的函数, 它描述图像中各灰度值的像素个数(灰度出现的频率)。直方图给出了图像中各个灰度级在图像中所占的比例, 通常用横坐标表示像素的灰度级别, 纵坐标表示对应的灰度级出现的像素个数, 可表示为 $P(i) = n_i$, n_i 为图像中灰度为 i 的像素数。

灰度直方图将图像的强度统计分为两部分: 噪声区和近场区, 首先进行图像分割, 其目的是将图像中的有效强度统计分布从背景中提取出来, 即进行基于灰度直方图的阈值选取。

2.1 近场测量中去除背景噪声

采用模式识别中最大类间方差准则确定分割的最佳门限, 作为判断噪声阈值的主要判据。其基本思想是对像素进行划分, 通过使划分得到的信号和噪声之间的距离达到最大来确定合适的门限。类间方差法也称为大津法(Otsu)^[10]。

设图像中总像素数为

$$N = \sum_{i=1}^L n_i, \quad (3)$$

各灰度出现的概率为

$$p_i = n_i / N. \quad (4)$$

设以灰度 k 为门限, 将图像分为 A, B 两个区域, 对应灰度为 $1 \sim k$ 的像素和灰度为 $k+1 \sim L$ 的像素, 设区域 A 产生的概率为 $\omega(k)$, 则区域 A 和 B

产生的概率为

$$\begin{aligned} \omega_A &= \sum_{i=1}^k p_i = \omega(k), \\ \omega_B &= \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - \omega(k). \end{aligned} \quad (5)$$

区域 A 和 B 的平均灰度值为

$$\begin{aligned} \mu_A &= \sum_{i=1}^k \frac{i p_i}{\omega_A} = \frac{\mu(k)}{\omega(k)}, \\ \mu_B &= \sum_{i=k+1}^L \frac{i p_i}{\omega_B} = \frac{\mu - \mu(k)}{1 - \omega(k)}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $\mu = \sum_{i=1}^L i p_i$ 为整体图像灰度平均值, $\mu(k) = \sum_{i=1}^k i p_i$ 是阈值为 k 时的灰度平均值, 所以全部采样区域灰度平均值为

$$\mu = \omega_A \mu_A + \omega_B \mu_B. \quad (7)$$

两个区域间的方差为

$$\begin{aligned} \sigma^2(k) &= \omega_A (\mu_A - \mu)^2 + \omega_B (\mu_B - \mu)^2 = \\ &= \omega_A \omega_B (\mu_B - \mu_A)^2 = \frac{[\mu \cdot \omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k) [1 - \omega(k)]}, \end{aligned} \quad (8)$$

通常将此方差称为阈值选择函数。阈值 k 分割出的有效强度统计分布和背景两部分构成了整幅图像, 因方差是灰度分布均匀性的一种度量, 方差值越大, 说明构成图像的两部分差别越大, 当部分目标错分为背景或部分背景错分为目标都会导致两部分差别变小。按照最大类间方差的准则, 从 $1 \sim L$ 之间改变 k , 使类间方差最大的 k 即是区域分割的最佳门限(阈值), 类间方差最大的分割意味着错分概率最小。

在计算近场中, 由于直方图是各灰度的像素统计, 采用最大类间方差完全根据直方图作为判断噪声阈值的主要依据, 未考虑图像其他特性。在有些特殊近场分布情况下只靠最大类间方差法分割的结果不合理, 使背景噪声区域过大。则需采用人工判别, 在背景和阈值之间较平坦区域选取分界点, 给出噪声区, 有效强度统计分布区域采用最大类间方差法给出的分界阈值。

2.2 信号区域去本底

按阈值去掉背景噪声可得到信号区域, 由噪声区最大概率的灰度值作为本底灰度, 近场图像整体减去该值去本底。

2.3 奇异点判断和图像平滑处理

根据调制度定义直接计算 M 只考虑了平顶区域的一个最强点, 具有很大的随机性, 很容易受 CCD 随机噪声、奇异响应点或近场本身的少量奇异点的影响。由于对比度 C 具有统计特性, 数据的稳

定性和可信度较调制度高。根据统计原理,当近场通量统计满足正态分布时, $[1-3\sigma, 1+3\sigma]$ 内的采样点占总采样点的 99.7% 以上, 定义 3σ 调制度比较合理, 这样调制度定义也更稳定, 即 $M_{3\sigma} = 1+3\sigma$ 。对于高功率输出近场, 通量分布为非正态分布^[11], 采用 4σ 调制度更为保险, 则 $M_{4\sigma} = 1+4\sigma$, 这也可以作为是否存在奇异点的判据。

奇异点去除采用邻域平均法, 即奇异点处的灰度值由所取区域内各点灰度的平均值来表示, 通过这种替换达到对图像平滑化处理^[12], 再进行空域计算。

图像平滑处理中邻域的取法采用 8-邻域图像平滑处理。所取的 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 区域如图 1, 以 (x, y) 为中心, 以单位距离的 $\sqrt{2}$ 倍为半径, 则在 (x, y) 点邻域中点坐标的集合[不包含点 (x, y)] 为

$$S = \{(x, y+1), (x, y-1), (x+1, y), (x-1, y), (x-1, y+1), (x+1, y+1), (x-1, y-1), (x+1, y-1)\}.$$
 (9)

$x-1, y+1$	$x, y+1$	$x+1, y+1$
$x-1, y$	x, y	$x+1, y$
$x-1, y-1$	$x, y-1$	$x+1, y-1$

图 1 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 区域

Fig. 1 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ regions

通常把不同点看成是由噪声产生的, 奇异点灰度值 $g(x, y)$ 采用非加权邻域平均法, 即用周围点的灰度平均值置换得到

$$g(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{8} \sum_{(m,n) \in S} f(m, n) & \text{if } g(x, y) - I_{\text{avg}} > 4\sigma, \\ f(m, n) & \text{others} \end{cases},$$
 (10)

式中 $f(m, n)$ 为各点的灰度值。

由于不是通过对邻域内的所有像素求平均值来消除噪声, 而只是让奇异点的像素取周围像素灰度的平均值, 当一些点的灰度值与图像灰度平均值的差不超过规定的阈值时, 仍保留其原来的值, 故这样平滑图像的优点是避免图像完全平均化而导致图像模糊。

3 计算结果及讨论

激光近场分析中, 首先根据 CCD 采集的原始图像(图 2)给出灰度分布直方图, 然后计算强度统计分布的类间方差, 以最大类间方差作为判断噪声阈值的主要判据, 按阈值去掉背景噪声得到信号区域, 计算背景噪声分布的均方根值。由背景噪声区出现的最大概率灰度值作为本底灰度, 近场图像整体减去该值去本底之后, 将信号区图像二值化, 二值化阈值采用最大类间方差的噪声阈值, 取总宽度 80% 的区域作为近场分析范围; 比较调制度计算值与 4σ 调制度值, 寻找奇异点, 并将奇异点像素灰度设定为周围像素灰度的平均值。为了进行近场间的横向比较, 首先进行归一化, 设近场强度分布为

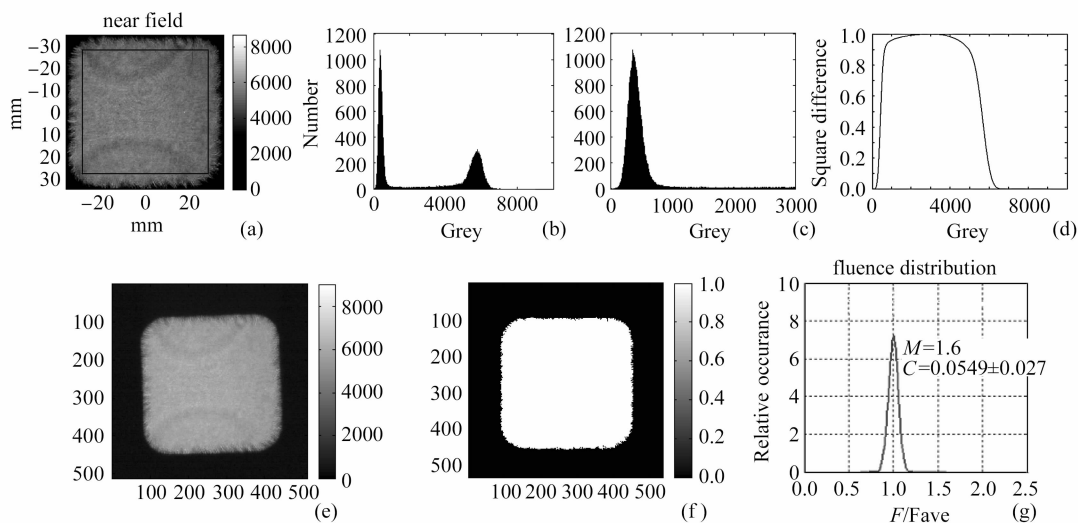


图 2 近场空域调制度 M 和对比度 C 的计算。(a) 原始图像; (b) 灰度分布直方图;

(c) 背景直方图; (d) 评价函数的值; (e) 去本底后图像; (f) 二值图像; (g) 能量密度统计曲线

Fig. 2 Calculation of modulation and contrast ratio of near field. (a) original image of near field; (b) histogram of grey distribution; (c) histogram of background; (d) evaluate function; (e) image of subtracting background; (f) binary image; (g) statistic curve of energy density

表 1 近场调制度 M 和对比度 C
Table 1 Modulation M and contrast ratio C of near field

Number	Oddity spot is not eliminated			Oddity spot is eliminated		
	M	$1+3C$	$1+4C$	C	M	C
1	2.22	1.23	1.30	0.076 ± 0.054	1.34	0.08
2	1.43	1.17	1.24	0.057 ± 0.023	1.29	0.06
3	1.42	1.17	1.24	0.058 ± 0.023	1.29	0.06
4	1.33	1.26	1.34	0.086 ± 0.060	1.33	0.09
5	1.47	1.27	1.36	0.090 ± 0.110	1.36	0.09
6	1.31	1.19	1.26	0.064 ± 0.030	1.25	0.06
7	1.27	1.18	1.24	0.060 ± 0.015	1.24	0.06
8	1.47	1.15	1.19	0.049 ± 0.029	1.19	0.05
9	1.95	1.23	1.30	0.076 ± 0.058	1.30	0.08
10	1.96	1.20	1.27	0.068 ± 0.032	1.33	0.07

$$I(x, y) = I_{\text{avg}} [1 + A(x, y)], \quad (11)$$

式中 $A(x, y)$ 为以平均强度 I_{avg} 归一化后的近场调制分布函数, 则

$$C = \frac{1}{I_{\text{avg}}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i - I_{\text{avg}})^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N A^2(x, y)}{N}}, \quad (12)$$

然后, 按照定义计算调制度 M 和对比度 C , 并给出近场能量密度统计曲线。

表 1 给出对测量的多个近场图在未剔除奇异点情况下, 分别采用 $3\sigma (M = 1 + 3C)$ 和 $4\sigma (M = 1 + 4C)$ 调制度评价, 并对剔除奇异点前后的调制度 M 和对比度 C 计算数值进行分析比较。

从表 1 可以看出, 调制度 M 的计算按照其定义式, 结果具有很大的随机性, 受 CCD 少量奇异点影响较大。在处理数据时, 根据是否满足关系式 $M_{4\sigma} = 1 + 4C$ 判断近场强度分布是否存在奇异点; 如果存在奇异点, 一种方法是用 3σ 调制度和 4σ 调制度 (可以看出采用 4σ 调制度更为可靠); 另一种方法是采用对强度大于 $I_{\text{avg}} (1 + 5\sigma)$ 的粗大孤立点进行剔除, 并将奇异点位置灰度设定为邻域平均灰度值, 再进行空域计算。从计算结果可以看出, 采用这两种方法对调制度 M 的计算结果非常接近。

4 结 论

采用最大类间方差作为判断噪声阈值的主要依据, 用噪声区域最大概率灰度值作为本底灰度, 根据强度是否大于 $I_{\text{avg}} (1 + 5\sigma)$ 作为奇异点的判据, 并对奇异点像素采用 8-邻域图像平滑处理, 从而解决高功率激光近场空域评判的参数数值计算中所涉及的信号和噪声分离方法、有效强度分布去除本底、寻找

和剔除奇异点等问题, 合理给出调制度和对比度的测量结果。对大量近场测量的实验数据剔除奇异点前后的调制度和对比度计算数值进行分析比较, 结果表明, 由于对比度表示近场分布区域内强度起伏的归一化均方根值, 具有统计意义, 故奇异点对其数值影响不大; 调制度 M 具有很大的随机性, 未剔除奇异点的 4σ 调制度与剔除奇异点后计算的调制度数值基本接近, 两种处理方法皆可行。这样通过对近场调制度和对比度计算过程中的分析讨论得到高功率激光近场空域评判的计算方法。

参 考 文 献

- 1 You Kaiming, Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Study on modulation property of broadband laser propagation in free space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 965~970
游开明, 文双春, 范滇元. 宽频带激光自由空间传输的调制特性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 965~970
- 2 Liu Hongjie, Jing Feng, Li Qiang *et al.*. The effect of spatial filter pinhole on output beams quality in high power laser [J]. *Journal of Yunnan University*, 2005, **27**(5A): 184~189
刘红婕, 景峰, 李强等. 高功率固体激光装置空间滤波器小孔对输出光束质量的影响[J]. *云南大学学报*, 2005, **27**(5A): 184~189
- 3 Yi Xunong, Hu Wei, Luo Hailu *et al.*. Study of small scale self-focusing in laser beams by high order contrast [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(2): 749~754
易煦农, 胡巍, 罗海陆等. 用高阶对比度研究光束的小尺度自聚焦[J]. *物理学报*, 2005, **54**(2): 749~754
- 4 Yang Yongming. Research on the method for measuring laser quality by CCD [J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2004, **36**(1): 119~121
杨永明. CCD 测量光束质量的方法研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2004, **36**(1): 119~121
- 5 Zhang Bin, Li Qiang, Cai Bangwei. Influence of high power third harmonics conversion on laser beam quality [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 553~556
张彬, 李强, 蔡邦维. 高强度三次谐波转换对光束质量的影响[J]. *光子学报*, 2004, **33**(5): 553~556
- 6 Yu Yongai, Zhang Lingling, Tang Qianjin *et al.*. Real-time laser beam quality measurement technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 255~258

- 于永爱,张玲玲,唐前进等. 激光束质量实时测量技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(2):255~258
- 7 Fang Tao, Ye Xin, Wang Zhimin *et al.*. Real-time measurement of beam quality factor M^2 based on diffraction gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):650~654
房滔,叶昕,王志敏等. 一种基于衍射光栅光束质量 M^2 因子的实时检测技术[J]. 中国激光, 2006, **33**(5):650~654
- 8 Zhang Yan, Guo Xin, Li Kun *et al.*. Experimental study on generalized M^2 factor of truncated laser beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):1057~1062
张艳,郭欣,李琨等. 截断光束的广义 M^2 因子测量的实验研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(7):1057~1062
- 9 Wen Qiao, Zhang Bin. M^2 -factor of partially coherent Gaussian Schell-model beams propagating in media [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2):212~216
文乔,张彬. 部分相干高斯-谢尔模型光束在介质中传输的 M^2 因子[J]. 光学学报, 2006, **26**(2):212~216
- 10 Sun Zhaolin. Image Processing by MATLAB 6. X [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 261~265
孙兆林. MATLAB 6. X 图象处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2002. 261~265
- 11 Zhao Junpu. Study on high power solid state laser beam quality diagnosis [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. 24~25
赵军普. 高功率固体激光光束质量诊断方法研究[D]. 成都:四川大学, 2006. 24~25
- 12 Gong Shengrong, Liu Cunping, Wang Qiang *et al.*. Digital Image Processing and Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. 60~63
龚声蓉,刘存平,王强等. 数字图象处理与分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2006. 60~63

Chinese Optics Letters (《中国光学快报》)“纳米光学”专题 征 稿 启 事

纳米科学与技术的快速发展对许多学科产生了巨大影响,尤其是激光与光学领域。*Chinese Optics Letters* (《中国光学快报》)计划于2008年10月推出“纳米光学”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“纳米光学”方面原创性的研究论文,旨在集中报道该方面最新的研究成果及研究进展,以引起国内外广大科研工作者的更大关注。

征稿范围包括:

- Quantum dots and nanowires
- Photonic crystals
- Silicon photonics
- Solar cells and solar energy
- VCSELs
- Slow light and fast light
- Plasmonics
- Other

Feature Editors:

Connie Chang-Hasnain

John R. Whinnery Chair Professor in

Electrical Engineering and Computer

Sciences

University of California

T. P. Lee

Telcordia Technologies (Retired)

截稿日期:2008年5月15日

投稿方式以及格式:可直接将稿件电子版发至邮箱:col@mail.shnc.ac.cn(主题标明“纳米光学专题投稿”),或通过网上投稿系统直接上传稿件(投稿类型选择 focus issue submission),详情请参见《中国光学快报》网站:<http://www.col.org.cn>。投稿必须是英文稿,其电子版请使用 Latex 或者 MS-Word 格式。有任何问题请发邮件至 col@mail.shnc.ac.cn 询问。