

强激光小尺度自聚焦过程的近场强度熵表征研究

刘仁德^{1,2} 胡东霞¹ 赵军普¹ 邓学伟¹ 代万俊¹ 黄小霞¹

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心,四川 绵阳 621900

²中国工程物理研究院研究生部,北京 100088

摘要 小尺度自聚焦是威胁强激光装置安全运行的重要因素,需确定装置激光束发生小尺度自聚焦的临界点,以指导装置的安全运行。提出利用输出光束近场强度熵值变化来反映激光束小尺度自聚焦发展过程的方法,通过数值模拟研究了小尺度自聚焦发展过程中的近场强度熵值变化规律,利用此规律给出了强激光装置中发生显著小尺度自聚焦的近场强度熵值预警方法。通过与光束近场调制度及对比度方法的对比分析,发现该方法对小尺度自聚焦发生的表征更明显。

关键词 物理光学;小尺度自聚焦;图像熵;强激光

中图分类号 O437.5 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s226001

Assessment Research of Small-Scale Self-Focusing in Intense Laser Beam by Near-Field Intensity Entropy

Liu Rende^{1,2} Hu Dongxia¹ Zhao Junpu¹ Deng Xuewei¹
Dai Wanjun¹ Huang Xiaoxia¹

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Postgraduate Department, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract Small-scale self-focusing is an important factor threatening the safe operation of intense laser facility, and estimating the marginal value of small-scale self-focusing in laser beam is an important part of the guidance for the safe operation of intense laser facility. The method of using near-field intensity entropy of the output laser beam to reflect the small-scale self-focusing development in laser beam is proposed. Then the variation regular pattern of near-field intensity entropy with the development of small-scale self-focusing is studied by numerical simulation. Using this regular pattern, an early-warning method is given for the obvious small-scale self-focusing happening in intense laser facility. By contrast with the methods of modulation ratio and contrast ratio, the proposed method offers a more obvious assessment.

Key words physical optics; small-scale self-focusing; image entropy; intense laser

OCIS codes 260.5950;190.3100;110.2960

1 引 言

强激光在非线性介质中传输或放大,由于介质的非线性极化会产生非线性自聚焦效应^[1]。在强激光装置中,光学元件和环境等存在噪声,入射的均匀光束经过传输后存在一定的振幅和位相调制,这使得在发生全光束自聚焦前,光束发生局部的迅速增强,形成若干强度非常高的细丝,即发生小尺度自聚焦^[2]。小尺度自聚焦会造成本身就较高通量运行的强激光装置发生介质损伤,威胁装置的正常运行^[3-4]。出于强激光装置的安全考虑,需确保装置运行在未发生或未发生严重小尺度自聚焦情况下。因此,研究强激光装置中激光

收稿日期: 2015-05-29; **收到修改稿日期:** 2015-06-26

作者简介: 刘仁德(1991—),男,硕士研究生,主要从事强激光传输及图像处理方面的研究。E-mail:dear_dea@163.com

导师简介: 胡东霞(1978—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事强激光传输及光束质量控制等方面的研究。

E-mail: dongxia.hu@caep.cn(通信联系人)

束小尺度自聚焦的发生就显得很有必要。

目前主要通过非线性相移量值和输出的光束质量两类方法来评价激光束小尺度自聚焦的程度^[5-6]。从 Bespalv 等^[7]关于小尺度自聚焦的经典理论发展而来的 B 积分(Breakup-integral)可以衡量全光束所感应的非线性相移量,但对于不同调制度的入射光束,同一非线性相移量对应不同的小尺度自聚焦程度^[8]。B 积分得到广泛应用,已在美国国家点火装置(NIF)、星光 II 等装置作为装置安全运行的预警判据^[9-10]。B 积分的增长是发生小尺度自聚焦的充分条件,在确定调制度入射情况下能够和小尺度自聚焦程度相对应,然而实验上测量 B 积分比较复杂^[11]。输出的光束质量方法,通过计算光束近场强度分布的均匀性,进而反映因小尺度自聚焦而分裂的高强度细丝情况,以此来评价激光束的小尺度自聚焦程度。此法是光束发生小尺度自聚焦的必要非充分条件,但对于稳定运行的强激光装置,其变化能和小尺度自聚焦程度相对应,直观简便。传统有近场调制度和对比度等参数表征输出的光束质量,但有判别点不明显的缺点。

本文提出了通过输出激光束近场的强度熵值来表征输出激光束的光束质量,进而反映激光束的小尺度自聚焦程度的方法。通过数值模拟计算验证了该方法的可行性以及该方法相比于近场对比度、调制度方法的优势。

2 理论分析

B 积分可以衡量光束的非线性相移量,对于波长为 λ , 光强为 I 的光束通过长度为 L , 非线性系数为 n_2 的介质, B 积分为

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L n_2 I(z) dz. \quad (1)$$

激光束的光束质量有多种评价参数,在反映强激光小尺度自聚焦情况时多关注强激光的近场均匀性,常见的有近场调制度和对比度^[6]。对比度 C 是强度分布方差 σ_I 和平均光强 I_{avg} 的比值,可表示为

$$C = \frac{\sigma_I}{I_{\text{avg}}} = \frac{\sqrt{\iint (I - I_{\text{avg}})^2 dx dy}}{I_{\text{avg}} \sqrt{\iint dx dy}}. \quad (2)$$

对比度通过表征近场各点光强相对平均光强的整体离散值,描述小尺度自聚焦形成的高强度细丝造成的对平均光强的累计离散情况,进而反映小尺度自聚焦情况。调制度 M 是光强最大值 I_{max} 和平均值 I_{avg} 的比值,可表示为

$$M = I_{\text{max}} / I_{\text{avg}}. \quad (3)$$

调制度通过表征小尺度自聚焦形成的高强度细丝的峰值情况,进而反映小尺度自聚焦情况。对比度和调制度,反映了激光束近场的一些特性,但也较片面,例如多个与均值的小量偏差的累计和少数与均值大值偏差的累计对比度值是一致的,调制度不能区分峰值强度细丝的数量等。

图像熵^[12]是图像复杂性的度量,在图像处理等领域得到了广泛应用^[13-14],其表达式为

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \lg p_i, \quad (4)$$

式中 N 为数字图像的灰度集数量, p_i 为第 i 灰度级的概率。熵值是对各个灰度级的分布统计量,当 $p_{i=m} = 1, p_{i \neq m} = 0$ (m 为 $1 \sim N$ 中的任一值)时, $H = 0$ 为最小值,当 $p_1 = p_2 = \dots = p_N = 1/N$ 时, $H = \lg N$ 为最大值^[15]。即当分布全部集中在一个灰度级时熵值最小,当均匀的分布在所有灰度级时熵值最大。

由于测量时电荷耦合器件(CCD)在整个脉冲时间内工作于积分模式, CCD 灰度值对应的物理量是积分通量(单位 J/cm^2)^[16],对于固定脉宽激光束,其和光强也是成比例相对应的。借鉴图像熵的定义,将激光强度对应图像中的灰度对激光束近场进行离散统计并据此计算熵值,进而表征激光束近场的强度分布情况。

从激光束未发生小尺度自聚焦直至发生严重小尺度自聚焦的过程来分析。受一定调制激光束未发生小尺度自聚焦时整个近场几乎同一强度,熵值较小;发生轻微小尺度自聚焦时近场将不再几乎同一强度,出现不同强度的区域,相对分布均匀,熵值较大;出现非常严重小尺度自聚焦时,由于高强度细丝的增多使得分布在高强度区域的集中性增大,相对分布变得不那么均匀了,熵值较小。可见,随着未发生小尺度自聚焦到发

生小尺度自聚焦再到发生严重小尺度自聚焦,熵值应先增大后减小,并在发生轻微小尺度自聚焦处出现极大值点,据此,近场熵值的变化能反映激光束小尺度自聚焦的发展,可在熵值极大值点附近进行预警,避免激光束发生严重小尺度自聚焦。

3 数值模拟与分析

产生脉宽为 1 ns,带有相同调制并以不同能量入射的超高斯光场经过线性折射率 $n_0 = 1.53$,非线性折射率 $n_2 = 1.15 \times 10^{-13}$ esu 的非线性介质后,得到不同的输出光束近场,图 1 为 3 个典型 B 积分值时对应的输出近场及水平方向强度分布剖面图,图 1(a)、(b)、(c)分别为 $B = 0.0199, 1.8006, 2.7025$ 时对应输出近场及水平方向强度分布剖面图。

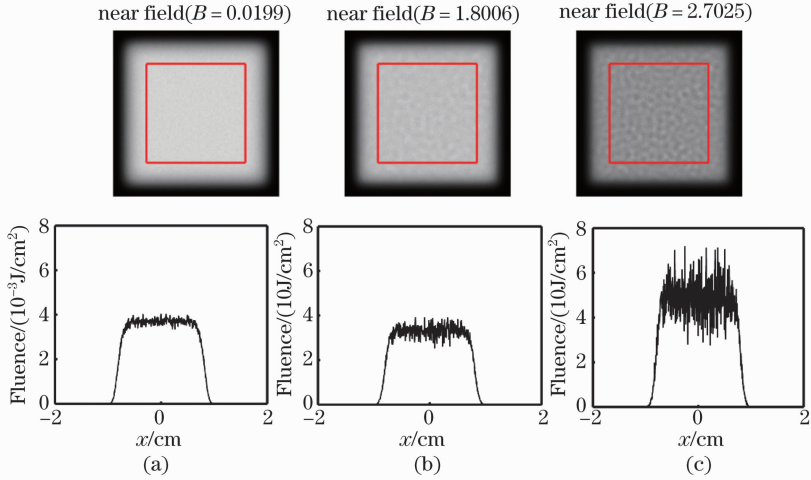


图 1 不同 B 积分值对应的近场以及近场水平方向强度分布。(a) $B = 0.0199$; (b) $B = 1.8006$; (c) $B = 2.7025$
 Fig. 1 Near field corresponding to different B-integrals and intensity distribution along horizontal direction.
 (a) $B = 0.0199$; (b) $B = 1.8006$; (c) $B = 2.7025$

为消除背景的影响,选取部分平顶区进行计算,分别统计 B 积分 0.0199~2.7025 的 22 个不同输出近场计算区域内相应最小到最大强度值的概率分布,得到如图 2 所示曲线(为便于观察,隐去部分曲线),接着计算强度熵值,得到如图 3(a)所示的曲线,可以看到当 B 积分为 1.8006 时熵值有明显的极大值,可以较好的反映相应条件下激光束已发生小尺度自聚焦效应,熵极大值点相对应的注入能量值可以作为警戒点,在小于熵值极大值点对应注入能量的注入下不会发生严重小尺度自聚焦,在大于熵值极大值点对应注入能量的注入下将发生更严重小尺度自聚焦,需谨慎关注激光束的小尺度自聚焦情况。如图 3(b)所示,调制度和对比度随着 B 积分的变化而变化,并在 B 积分为 1.5~2 这个区间内快速上升,虽可以观察出发生小尺度自聚焦的大致区域,但无法观察出明显的判据点。

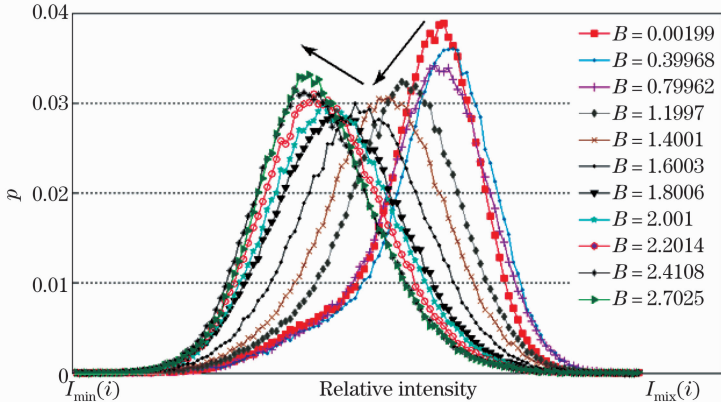


图 2 不同 B 积分值对应的输出近场相对强度概率分布统计

Fig. 2 Statistic of output near-field relative intensity probability corresponding to different B-integrals

可见,数值分析结果和理论分析预期一致,输出近场的熵值变化可以反映激光束小尺度自聚焦的发展情况,并且相比调制度和对比度能给出更清晰直接的预警值。

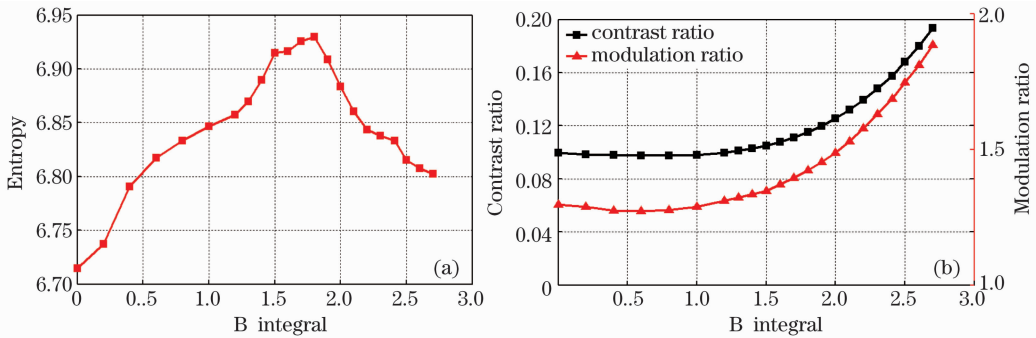


图3 不同B积分值对应的近场评价参数变化。(a)熵值;(b)对比度及调制度
Fig. 3 Changes of estimation parameters corresponding to different B-integrals.
(a) Entropy; (b) contrast ratio and modulation ratio

4 结 论

通过理论和数值模拟分析,发现输出近场熵值能反映激光束的小尺度自聚焦情况,随着激光束未发生小尺度自聚焦到发生小尺度自聚焦再到发生严重小尺度自聚焦,熵值是先增加后减小并有极大值。熵值极大值点可作为发生严重小尺度自聚焦的预警点,且比近场对比度、调制度更加明显、精确。在后续研究中可以根据此法在具体强激光装置的进行模拟和实验,测得熵值极大值点对应的注入为预警值,指导强激光装置运行在注入小于预警值之下,以此确保装置激光束未发生严重小尺度自聚焦,保障装置的安全运行。

参 考 文 献

- Ye Peixian. Nonlinear Optics and Physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2007:212—222.
叶佩弦. 非线性光学物理[M]. 北京:北京大学出版社,2007:212—222.
- Chen Baosuan, Zhang Junyong, Zhang Yanli, *et al.*. Study of small-scale self-focusing in high-power laser system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012,49(1):010002.
陈宝算,张军勇,张艳丽,等. 高功率激光系统中的小尺度自聚焦研究[J]. 激光与光电子学进展,2012,49(1):010002.
- Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Nonlinear theory of filamentation of intense laser beams[J]. Acta Optica Sinica, 2001,21(12):1458—1460.
文双春,范滇元. 光束成丝的非线性理论[J]. 光学学报,2001,21(12):1458—1460.
- Li Xiaoyan, Zhang Yanli, Ouyang Xiaoping, *et al.*. Effect of reflection on high power small-scale self-focusing[J]. Chinese J Lasers,2010,37(11):2844—2848.
李晓燕,张艳丽,欧阳小平,等. 寄生反射对高功率激光小尺度自聚焦的影响[J]. 中国激光,2010,37(11):2844—2848.
- 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.
- Wen Shuangchun. Research on Self-Focusing of Intense Laser Beams [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2001:25—26.
文双春. 强激光非线性自聚焦效应研究[D]. 上海:中国科学院上海光学精密机械研究所,2001:25—26.
- V I Bespalov, V I Talanov. Filamentary structure of light beams in nonlinear liquids[J]. JETP Lett., 1966,3(11):307—310.
- Shao Min, Fu Haiwei, Luo Xiaodong, *et al.*. B integral in high power laser system[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2007,5(6):1—4.
邵敏,傅海威,罗小东,等. 高功率激光系统中的B积分研究[J]. 光学与光电技术,2007,5(6):1—4.
- J A Fleck, J R Morris, E S Bliss. Small-scale self-focusing effects in a high power glass laser amplifier[J]. IEEE J Quantum Electronic, 1978, QE-14(5):353—363.
- Peng Zhitao, Jing Feng, Liu Lanqin, *et al.*. Power spectra density estimation of quality of the laser beam passing through an self-focusing media[J]. Acta Physica Sinica,2003,52(1):87—90.
彭志涛,景峰,刘兰琴,等. 自聚焦激光束光束质量评价的功率谱密度方法[J]. 物理学报,2003,52(1):87—90.
- Yu Wenyan, Zheng Yuxia, Xie Zimin, *et al.*. A method of directly measuring B-integral in a high power laser system[J]. Acta Optica Sinica, 1985,5(1):19—23.

- 余文炎,郑玉霞,谢梓铭,等. 一种直接测定高功率激光系统"B积分"的方法[J]. 光学学报,1985,55(1):19-23.
- 12 R C Gonzalez, R E Woods. Digital Image Processing[M]. Ruan Qiuqi, Ruan Yuzhi, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013:338-340.
冈萨雷斯,伍兹. 数字图像处理[M]. 阮秋琦,阮宇智,译. 北京:电子工业出版社,2013:338-340.
- 13 Kang Zongming, Zhang Li, Xie Pan. Implementation of an automatic focusing algorithm based on spatial high frequency energy and entropy [J]. Acta Electronica Sinica,2003,31(4):532-555.
康宗明,张利,谢攀. 一种基于能量和熵的自动聚焦算法[J]. 电子学报,2003,31(4):532-555.
- 14 Miao Peng, Chao Zhen, Zhang Yiguang, *et al.*. Entropy analysis reveals a simple linear relation between laser speckle and blood flow[J]. Optics Letters,2014,39(13):3907-3910.
杨作廷,阮萍,翟波. 基于强度熵的高动态范围场景的自动曝光算法[J]. 光子学报,2013,42(6):742-746.
- 16 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.

栏目编辑: 史敏