

高功率激光系统中热像的传输及预判技术

杨爱华^{1,2}, 刘德安¹, 高雅茹^{1,2}, 缪洁^{1,2}, 朱健强¹

¹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;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 比较高通量密度下损伤点分别位于上游介质的前后表面时热像的位置及峰值光强的区别。讨论了热像交替排布的现象及峰值光强随损伤点尺寸的变化规律。针对上游光学元件中的损伤点是诱发后续光路中热像的主要因素,提出了以损伤点经一定传输距离后引起的衍射环图像为分析对象的热像预判技术。该技术运用高信噪比的梯度方向匹配算法来获取衍射环图像的特征信息,进而反演出衍射距离和损伤点尺寸。利用液晶空间光调制器产生的单个等效损伤点的衍射图像证明了该方法的有效性;并采用光学元件上实际存在的损伤点所引起的衍射环图像分析了该算法反演多个损伤点时抑制噪声干扰的能力及其空间分辨率。

关键词 激光技术; 高通量密度; 损伤点; 热像; 衍射环; 梯度方向匹配

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0901006

Propagation and Prejudgement Technique of Hot Images in High Power Laser System

Yang Aihua^{1,2}, Liu Dean¹, Gao Yaru^{1,2}, Miao Jie^{1,2}, Zhu Jianqiang¹

¹Joint Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

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

Abstract The locations and peak intensities of hot images are compared under high flux density when the damage point is located on the front surface and rear surface of upstream medium respectively. The phenomenon of alternate arrangement of hot images and variation rule of peak intensities with damage point size are discussed. For the fact that the damage point in upstream optical components is the major factor to induce hot images in subsequent optical path, the hot images prejudging technique is proposed, and the analysis object of which is diffraction rings image introduced by damage point propagation for a certain distance. This technique extracts the feature information of diffraction ring images by using gradient direction matching method with high signal-to-noise ratio and then calculates the diffraction distance and the size of damage point inversely. The diffraction images of single equivalent damage point produced by liquid crystal spatial light modulator is used to demonstrate the effectiveness of the proposed method. The capability of suppressing noise interference and its spatial resolution are analyzed by using the diffraction ring images caused by the actual damage point on the optical components, when multi-damage points are inverted by the proposed method.

Key words laser technique; high flux density; damage point; hot images; diffraction rings; gradient direction matching

OCIS codes 140.3300; 190.3270; 100.3008; 100.3190

收稿日期: 2017-03-22; 收到修改稿日期: 2017-05-15

作者简介: 杨爱华(1991—),男,博士研究生,主要从事高功率激光装置中激光传输与反馈控制技术方面的研究。

E-mail: 1442650631@qq.com

导师简介: 刘德安(1972—),男,博士,研究员,主要从事高功率激光光束传输方面的研究。

E-mail: liudean@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

非线性自聚焦效应是高功率激光系统中制约其负载能力及其安全运行的重要因素^[1-2]。热像作为其中一类特殊的自聚焦效应,是由上游光学元件的损伤点所引起的光束扰动与主光束相互耦合形成类似菲涅耳波带片的作用,导致光束会聚并破坏后续光路中的光学元件^[3]。自 20 世纪 70 年代美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)的研究人员在研制诺瓦(NOVA)装置过程中首次观察到高功率激光系统中的热像效应以来,国内外学者不断建立和完善有关热像的实验和理论研究,对热像的本质认识更加深入和系统^[4-8]。然而,上述理论只分析了损伤点位于上游介质后表面的情况,并没有考虑损伤点位于介质不同深度时热像的位置以及峰值光强的变化。

为了避免热像对系统的破坏,除了研究抑制或补偿非线性热像的方法^[9-10],提前预判热像的位置及强度也是一条有效的途径。激光系统的布局以及运行通量在发射之前是预先设定的^[11]。上游损伤点是激光传输过程中热像的诱发因素,获取损伤点的特性即可预判热像的位置及峰值光强。当明场照明时上游光学元件的损伤点会在下游光路中引起特定的衍射环图像^[12]。2006 年,Chen B Y 等^[13]提出了利用上游损伤点经一定光学元件传输后引起的衍射环图像反演损伤点特性的梯度方向匹配(GDM)算法,为预判诱发热像的损伤点提供一种新的有效途径。但如何从低信噪比的单幅近场图中获取清晰准确的衍射环图像的关键信息,一直是实际应用中的技术难题。

本文首先分析了级联介质中热像的传输理论,并数值模拟了上游光学元件前后表面的损伤点经若干光学元件传输后诱发的热像的分布规律,以及热像峰值光强随损伤点尺寸的变化趋势。基于损伤点经一定距离传输后引起的衍射环图像,提出了利用具有高信噪比的 GDM 算法的热像预判技术。在理论分析的基础上,利用液晶空间光调制器产生的单个等效损伤点进行了衍射实验,以归一化平均误差为判据实现了损伤点传输距离以及尺寸的准确反演;并采用光学元件上实际存在的损伤点产生的衍射环图像,进一步分析了该算法在同时反演若干个损伤点时遇到的空间噪声及分辨率问题。

2 级联介质中热像的传输分析

为了分析损伤点所处的不同深度对热像的影响,如图 1 所示,以垂直于轴向排列的多块等厚等间距(厚度为 d ,间距为 L)的非线性介质 P_i 作为模型来演示级联介质中热像的形成过程,且损伤点分别位于 P_1 的前后表面。光束的传输包括自由空间中的衍射矩阵 \mathbf{M} 以及介质中的非线性传输矩阵 \mathbf{M}' ^[3],可表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos(q^2 L/2k) & \sin(q^2 L/2k) \\ -\sin(q^2 L/2k) & \cos(q^2 L/2k) \end{bmatrix}, \mathbf{M}' = \begin{bmatrix} \cosh(gd) & q^2 \cdot \sinh(gd)/(2k_0 g) \\ 2k_0 g \cdot \sinh(gd)/(q^2) & \cosh(gd) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 q 为空间角频率, L 为在自由空间中的传输距离, d 为介质厚度, k 以及 k_0 为自由空间以及介质中的波数, g 为增长因子。

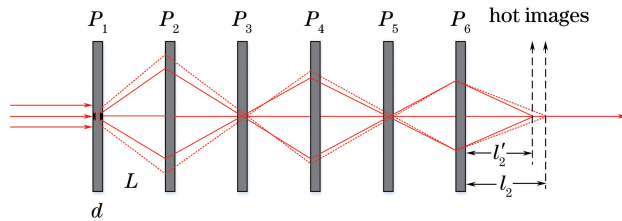


图 1 级联非线性介质中热像形成过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of formation process of hot images in cascaded nonlinear medium

当损伤点分别位于上游介质的前后表面时,光束从损伤点到热像的传输用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} u_2[q_x, q_y, Nd + (N - 1)L + l_2] \\ v_2[q_x, q_y, Nd + (N - 1)L + l_2] \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{l_2} \mathbf{M}'_d (\mathbf{M}_L \mathbf{M}'_d)^{N-2} \mathbf{M}_L \mathbf{M}'_d \begin{bmatrix} u(q_x, q_y, 0) \\ v(q_x, q_y, 0) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} u_1[q_x, q_y, (N - 1)d + (N - 1)L + l'_2] \\ v_1[q_x, q_y, (N - 1)d + (N - 1)L + l'_2] \end{bmatrix} = \mathbf{M}'_{l'_2} \mathbf{M}'_d (\mathbf{M}_L \mathbf{M}'_d)^{N-2} \mathbf{M}_L \begin{bmatrix} u(q_x, q_y, 0) \\ v(q_x, q_y, 0) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, q_x 、 q_y 分别为 q 在 x 、 y 方向的分量, $u(q_x, q_y)$ 和 $v(q_x, q_y)$ 为对应频率分量的实部以及虚部; N 为介质的数目; l_2 以及 l'_2 分别为损伤点位于 P_1 前后表面时热像离开最后一块介质后表面的距离; \mathbf{M}_{l_2} 、 \mathbf{M}'_{l_2} 与 \mathbf{M}_L 表示在自由空间中传输距离为 l_2 、 l'_2 以及 L 对应的传输矩阵, \mathbf{M}'_d 表示在介质中传输距离为 d 对应的传输矩阵。

片状放大器的厚度一般只有 3~5 cm, 根据薄介质近似得到: $\mathbf{M}'_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 2B & 1 \end{bmatrix}$ 。 B 表示本底光强在单块介质中引起的相位延迟, 表征光束自聚焦的严重程度, 称为 B 积分, 一般为小量。因此当损伤点位于 P_1 的前表面时, P_1 只会使局部的光束扰动更加剧烈, 对热像的峰值光强不会造成显著的影响; 但是会引入一个与它的厚度及折射率有关的附加光程延迟, 导致热像的位置向下游移动。

为了具体比较损伤点分别位于 P_1 前后表面时热像分布之间的差异, 本文采用分步傅里叶变换以及傅里叶变换对非线性近轴波动方程以及菲涅耳衍射积分方程进行数值求解。参数如下: 入射光束为 10 阶的超高斯光束, 真空中波长 λ_{vac} 为 1.053 μm , 束腰半径为 8 mm, 能量密度为 $3.5 \times 10^4 \text{ J/m}^2$, 脉宽为 1 ns, 相应的功率密度 I 为 $3.5 \times 10^{13} \text{ W/m}^2$; 采样区间为 2.048 cm \times 2.048 cm, 横向采样数为 1024 \times 1024; 非线性介质折射率为 1.528, 非线性折射率系数 γ 为 $3.1 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$; 厚度 d 为 5 cm, 步长为 0.05 cm, $L = 0.5 \text{ m}$; 损伤点是复振幅型, 振幅调制幅度为 0.8, 相位调制深度为 0.6π ; 等效半径为 200 μm 。根据 B 积分计算公式^[14] 得到单块薄介质的 B 积分为

$$B = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{vac}}} \gamma \int_0^d I(0, Z) dZ = \frac{2\pi}{1.053 \times 10^{-6}} \times 3.1 \times 10^{-20} \times 3.5 \times 10^{13} \times 0.05 = 0.324. \quad (4)$$

图 2 计算两种情况下热像在下级联介质中的分布情况 (F: 前表面; R: 后表面)。首先, 热像均周期性地间隔出现在各非线性介质附近; 其次, 当 P_1 上的损伤点由后表面移到前表面时, 热像的位置向下游偏移的距离 Δ 最小为 2 cm, 最大为 6 cm, 这与介质的厚度相当, 不可忽略, 说明损伤点在介质中所处的深度是影响下游热像位置的重要因素; 最后, 峰值光强的最大变化率仅为 2.55%, 针对热像对下游光学元件的损伤来说可以忽略不计。

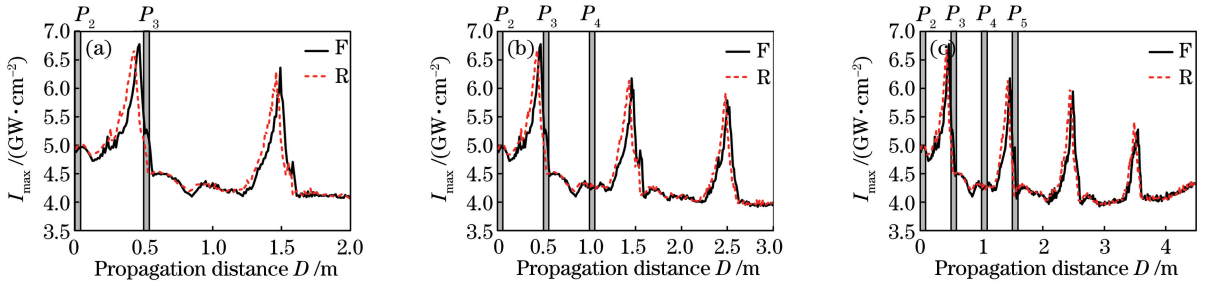


图 2 级联介质中的热像分布。(a) 2 块介质; (b) 3 块介质; (c) 4 块介质

Fig. 2 Distribution of hot images in cascaded medium. (a) Two medium plates; (b) three medium plates; (c) four medium plates

热像的峰值光强与损伤点的尺寸密切相关。以损伤点位于 P_1 前表面时下游存在两块介质为例, 分别比较两处峰值光强随损伤点等效半径的变化关系。从图 3 可以看出, 峰值光强随半径的增加而逐渐增强。因此在主激光发射之前需及时预判损伤点的尺寸是否超出上限, 从而保证装置的安全运行。

3 基于衍射环的损伤点反演

3.1 高信噪比 GDM 算法分析

为了预判高通量密度下热像在下游的位置及峰值光强, 需要提前获取损伤点的特性。利用明场照明时损伤点经一定传输距离后引起的衍射环图像可以反演损伤点的信息。损伤点在大多数情况下表现为纯振幅型, 可以用一个挡光的圆屏来模拟它对光束的调制作用^[13, 15-16]。衍射环强度与圆屏半径以及衍射距离之间的关系可表示为

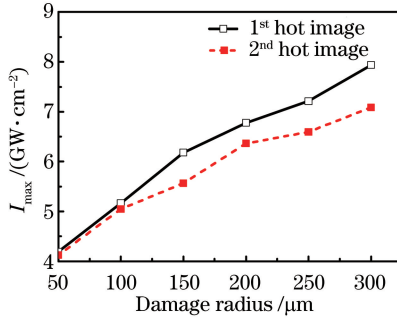


图3 不同损伤半径对应的峰值光强

Fig. 3 Peak intensities corresponding to different damage radii

$$I(r, R, z) = 1 + \frac{R}{r^2} \times J\left(1, \frac{2\pi r R}{\lambda z}\right) \left[R \times J\left(1, \frac{2\pi r R}{\lambda z}\right) - 2r \sin\left(\frac{\pi r^2}{\lambda z}\right) \right], \quad (5)$$

式中 R 为圆屏半径, z 为衍射距离, λ 为照明光的波长, $I(r, R, z)$ 为距离衍射环中心为 r 处的衍射强度, $J(1, x)$ 为第一类贝塞尔函数。光强对比度主要受到圆屏半径的影响, 而振荡周期主要与衍射距离有关。

从采集的衍射环图像中可以获取各像素点的灰度值及其对应的梯度信息。梯度信息比灰度值的抗干扰能力更强, 梯度方向又比梯度幅值更加稳健^[17]。因此采用 GDM 算法要优于传统的匹配滤波算法^[18-21]。理想的衍射环图像中各像素点的梯度方向场一部分流向衍射环的中心, 另一部分则是从衍射环的中心流出。照明板的梯度方向场分布与它非常相似, 各像素点的梯度方向全部流向或流出模板的中心。由于实际采集的近场图中的噪声干扰大多表现为随机分布的亮、暗斑, 因此传统的 GDM 算法难以准确定位到衍射环的中心。

本文对传统的 GDM 算法进行改进, 提出了如图 4 所示的具有高信噪比的 GDM 算法。梯度方向场的分布是基于相邻像素点之间灰度值的差别。为了更好地克服噪声的影响, 从而得到衍射环的梯度方向场向中心流入或由中心向外流出这一规律性分布。对采集的图像进行采样, 根据压缩的图像提取衍射环梯度方向场的特征信息。利用 3×3 的 Sobel 算子分别求出该图像与照明模板的梯度方向场。利用余弦平方函数可以消除梯度方向场在匹配过程中共线反向的影响, 然后将这两个场分布进行方向匹配, 衍射图像中各像素点的匹配度为

$$S(x_i, y_i) = \frac{1}{2} + \frac{1}{G_U} \sum_{(x, y) \in U} \left\{ \cos^2[\boldsymbol{\theta}(x + x_i, y + y_i) - \boldsymbol{\beta}(x, y)] - \frac{1}{2} \right\}, \quad (6)$$

式中 $\boldsymbol{\theta}$ 和 $\boldsymbol{\beta}$ 分别为衍射图像和模板的梯度方向场矩阵, 这两个矩阵的尺寸分别为 $\omega \times h$ 和 $(2T_R + 1) \times (2T_R + 1)$, T_R 为照明模板的半径, $G_U = (2T_R + 1) \times (2T_R + 1)$, U 表示 G_U 个元素位置构成的坐标集合, (x_i, y_i) 和 (x, y) 为衍射图像和模板的坐标。

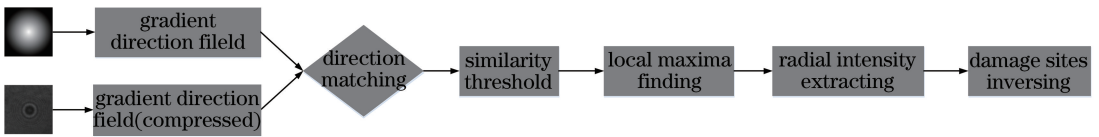


图4 高信噪比 GDM 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of GDM algorithm with high signal-noise ratio

将 $\boldsymbol{\theta}$ 和 $\boldsymbol{\beta}$ 补零扩展到尺寸为 $W \times H$ 的 $\boldsymbol{\Theta}$ 和 \boldsymbol{E} (W 和 H 是比 ω 与 h 大的 2 的最小整数次幂), $\boldsymbol{\Theta}$ 和 \boldsymbol{E} 为

$$\boldsymbol{\Theta}(x, y) = \exp[j2\boldsymbol{\theta}(x, y)], \boldsymbol{E}(x, y) = \exp[j2\boldsymbol{\beta}(x, y)], \quad (7)$$

式中 $x = 0, \dots, W - 1, y = 0, \dots, H - 1$, 为了提高匹配过程的运算效率, 运用快速傅里叶变换将 $S(x_i, y_i)$ 的计算从空域转化到频域为

$$S(x_i, y_j) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2G_U} \cdot \text{Re} \left\{ \sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} \exp[j2\boldsymbol{\theta}(x + x_i, y + y_j)] \cdot \exp[-j2\boldsymbol{\beta}(x, y)] \right\} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2G_U} \cdot \text{Re} \left\{ \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F}^* [\boldsymbol{E}(x_i, y_j)] \right\} \cdot \mathcal{F} [\boldsymbol{\Theta}(x_i, y_j)] \right\}, \quad (8)$$

式中 \mathcal{F} 、 \mathcal{F}^{-1} 以及 \mathcal{F}^* 分别为傅里叶变换及其逆变换和共轭。得到的有效匹配度区域为： $0 \leq x_i < w - 2T_R$ ， $0 \leq y_j < h - 2T_R$ 。根据匹配度大小设定相似度阈值，但噪声会使距离衍射环中心位置很近的位置出现匹配度的多个极大值，利用基于最短距离法的聚类分析方法找出最佳的局部极大值，从而找到衍射环的中心（损伤点的横向位置）。

由(5)式可知，纯振幅型损伤点的衍射强度与损伤点的衍射距离以及等效半径有关。考虑到实际系统的布局，进行数值模拟时的衍射距离只需取有限的几个已知量，同时在损伤点尺寸常见的范围内对等效半径进行穷举。将每一个衍射距离处所有的数值模拟结果与提取的径向强度分布进行拟合。强度拟合度为^[13]

$$Q_1 = 1 - \frac{F}{T_R} = 1 - \frac{\sum_{r=0}^{\sigma \cdot T_R} [I(r) - \bar{I}(r)]^2}{T_R}, \quad (9)$$

式中 Q_1 为强度拟合度， σ 为压缩的衍射图像中每个像素单元对应的物理尺寸。所有组合中使 Q_1 取最大值的就是反演的衍射距离及损伤点等效半径， $I(r)$ 与 $\bar{I}(r)$ 分别为数值计算与提取的归一化的衍射强度， F 为强度的误差平方和。按照系统实际的工程经验，强度拟合度 $Q_1 > 95\%$ 时才能得到真实的反演结果^[13]。由于噪声干扰等因素的影响，从单一的衍射环提取的径向强度只能判断损伤点位于上游哪一块光学元件上，无法获取损伤点准确的深度，反演的损伤点尺寸与真实值相比会存在一定的偏差。下面通过实验来验证 GDM 算法的有效性，并讨论其抑制噪声干扰的能力和面临的分辨率问题。

3.2 单个损伤点反演与实验验证

实验利用棋盘相格法^[22]在纯相位液晶空间光调制器 (SLM) 上模拟单个不同尺寸的完全挡光点。光路如图 5 所示，其中 LP 为线偏振片，它使入射光的偏振方向与 SLM 的长边平行。A 为衰减片，SF 为空间滤波器，BS 为分束镜，CCD 为电荷耦合器件。

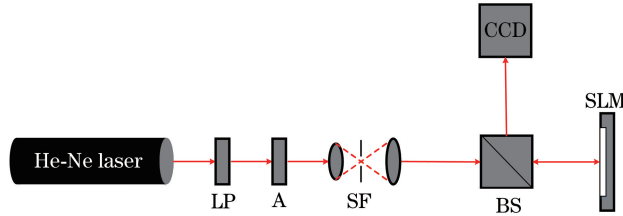


图 5 利用液晶 SLM 模拟等效损伤点的衍射光路图

Fig. 5 Diffraction beam path of the equivalent damage point simulated by liquid crystal SLM

将 CCD 沿光轴置于两个已知的位置(对应的衍射距离分别为 80 mm 和 300 mm)，改变调制区域的等效半径，分别设定为 80, 120, 160 μm 。利用高信噪比的 GDM 算法对采集的衍射环图像进行处理：在 80 mm 和 300 mm 处的图像压缩比分别为 0.8 以及 0.2，匹配半径 T_R 分别为 45 pixel 以及 22 pixel。数值计算采用的衍射距离取 80 mm 和 300 mm，半径的取值范围为：32~480 μm ，精度为 16 μm 。图 6(a) 表示半径为 120 μm 的调制区域在衍射距离为 80 mm 时引起的衍射环图像，压缩后的尺寸为 512 pixel \times 512 pixel。图 6(b) 表示该算法得到的有效匹配度分布，尺寸为 422 pixel \times 422 pixel。图 6(c) 表示利用提取的归一化径向

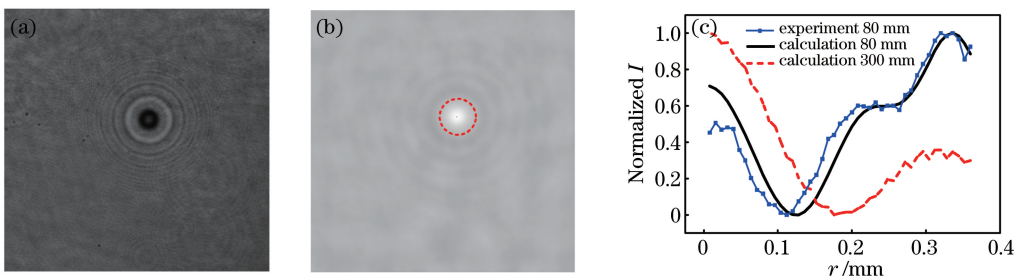


图 6 (a) 衍射环；(b) 标定的衍射环中心；(c) 拟合结果

Fig. 6 (a) Diffraction rings; (b) calibrated diffraction ring center; (c) fitting result

强度分布在上述的两个距离处进行拟合的结果,反演得到衍射距离为 80 mm,等效半径为 128 μm 。同时表 1 具体分析了各种情况的反演结果及其精度与强度拟合程度,其中 Q_1 均大于 95%,表示反演的结果是可靠的。可以看出:一方面,该算法能够准确定位到衍射环的中心并反演出损伤点实际的衍射距离;另一方面,考虑到衍射环的强度受到噪声等因素的干扰,因此它所反演的尺寸与实际尺寸存在一定的偏差。

表 1 基于衍射环的损伤点反演结果及精度分析

Table 1 Inversion results and precision analysis of damage point on the basis of diffraction rings

Experiment		Numerical inversion		Matching precision		Q_1
Diffraction length /mm	Damage radius / μm	Diffraction length /mm	Damage radius / μm	Diffraction length	Damage radius	
80	80	80	80	100%	100%	97.24%
80	120	80	128	100%	93.3%	98.91%
80	160	80	160	100%	100%	99.10%
300	80	300	80	100%	100%	97.57%
300	120	300	144	100%	80%	99.28%
300	160	300	144	100%	90%	99.24%

3.3 多个损伤点反演与实验验证

元件上实际损伤点产生的衍射环图像比较复杂:一方面,随机分布的噪声使图像上出现多处亮、暗斑;另一方面,大多数情况下损伤点同时存在且彼此靠近,相邻损伤点在下游不同位置引起的衍射环会有不同程度的重叠。按压缩比 0.2 将采集的图像压缩并截取包含衍射环的图像如图 7(a)、(b)、(c)所示,尺寸均为 155 pixel \times 155 pixel。图 7(a)表示由两个相距 2.771 mm 的损伤点在衍射距离为 410 mm 处产生的衍射环 C_1 、 C_2 ,图 7(b)和(c)表示由两个相距 1.374 mm 的损伤点在衍射距离分别为 410 mm 以及 245 mm 处产生的不同重叠程度的衍射环 C_3 、 C_4 和 C'_3 、 C'_4 。410 mm 以及 245 mm 处匹配半径 T_R 分别为 22 pixel 和 24 pixel。图 7(a)、(b)、(c)的匹配结果分别如图 7(d)、(e)、(f)所示:图 7(d)和(e)尺寸均为 111 pixel \times 111 pixel,图 7(f)尺寸为 107 pixel \times 107 pixel。可以看出:一方面,该算法能有效抑制噪声的干扰[图 7(d)];另一方面,衍射距离较大时,衍射环重叠程度严重,只有缩短衍射距离,才能够定位各自的中心(对应的衍射环临界重叠比大概为 50%)。

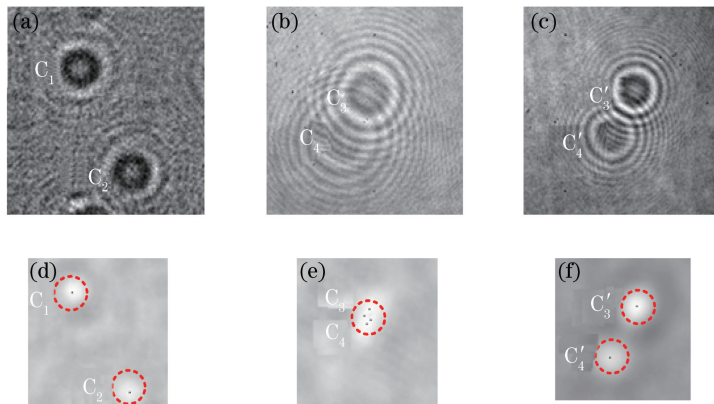


图 7 (a)~(c)衍射环;(d)~(f)标定的衍射环中心

Fig. 7 (a)-(c) Diffraction rings; (d)-(f) calibrated diffraction ring centers

从 4 个定位到的衍射环中心提取归一化的径向强度并与数值计算结果进行匹配。计算采用的衍射距离取上述的 410 mm 以及 245 mm,半径的取值范围为:32~480 μm ,精度为 8 μm 。拟合结果如图 8(a)~(d)所示:得到 C_1 、 C_2 、 C'_3 对应的 Q_1 分别为 98.79%、99.18%以及 97.54%,即反演得到的衍射距离以及损伤点等效半径是可靠的,它们分别为: C_1 :410 mm, 184 μm ; C_2 :410 mm, 184 μm ; C'_3 :245 mm, 112 μm 。而 C'_4 对应的 Q_1 等于 93.12%,小于 95%,超出可接受范围,无法反演出有效的匹配结果。

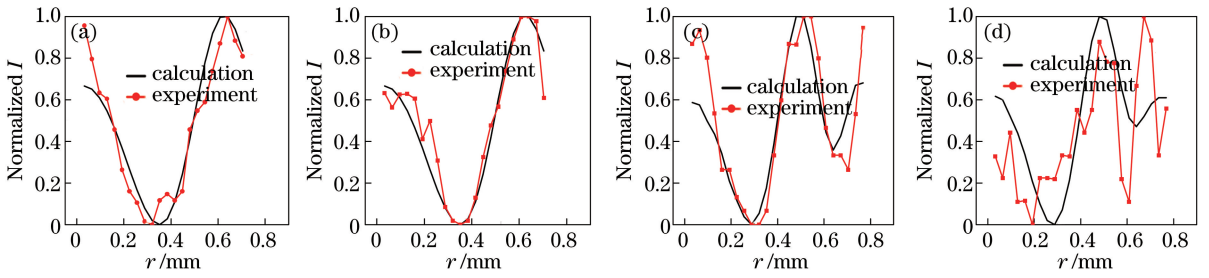


图 8 拟合结果。(a) C_1 ; (b) C_2 ; (c) C_3' ; (d) C_4'

Fig. 8 Fitting results. (a) C_1 ; (b) C_2 ; (c) C_3' ; (d) C_4'

4 结 论

级联介质中热像的传输分析表明:当损伤点分别位于上游光学元件的前后表面时,热像均周期性地间隔出现在各非线性介质附近,但损伤点所处的深度不同会引起下游热像的位置产生一定的偏移,最大偏移量与介质的厚度相当;同时热像的峰值光强随损伤点尺寸的增加而逐渐增强。基于损伤点经一定传输距离后引起的衍射环,提出了利用高信噪比的 GDM 算法来确定损伤点的位置以及尺寸的热像预判技术。利用 SLM 产生的单个等效损伤点进行的衍射实验证明了该方法的有效性,显示该算法能准确判断损伤点位于上游的哪一块元件上,从而预判高通量密度下光路中哪几块光学元件会受到热像的危害。采用元件上实际损伤点产生的衍射环图像分析了高信噪比的 GDM 算法在定位衍射环中心具有的抑制噪声干扰的能力以及在衍射环重叠情况下的空间分辨率问题。但是由于噪声等因素对衍射环强度的干扰,从单一衍射环图像提取的径向强度还无法反演损伤点在光学元件中的准确深度,未来应当采用新的方案来进一步优化 GDM 算法,从而指导下游光学元件的移动以规避热像的损伤。

参 考 文 献

- [1] Kelley P L. Self-focusing of optical beams[J]. Physical Review Letters, 1965, 15(26): 1005.
- [2] Liu Rende, Hu Dongxia, Zhao Junpu, *et al.* Assessment research of small-scale self-focusing in intense laser beam by near-field intensity entropy[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s2): s226001.
刘仁德, 胡东霞, 赵军普, 等. 强激光小尺度自聚焦过程的近场强度熵表征研究[J]. 光学学报, 2015, 35(s2): s226001.
- [3] Hunt J T, Manes K R, Renard P A. Hot images from obscurations[J]. Applied Optics, 1993, 32(30): 5973-5982.
- [4] Williams W H, Renard P A, Manes K R, *et al.* Modeling of self-focusing experiments by beam propagation codes[R]. Inertial Confinement Fusion, 1996: 94551.
- [5] Widmayer C C, Milam D, de Szoeko S P. Nonlinear formation of holographic images of obscurations in laser beams[J]. Applied Optics, 1997, 36(36): 9342-9347.
- [6] Widmayer C C, Nickels M R, Milam D. Nonlinear holographic imaging of phase errors[J]. Applied Optics, 1998, 37(21): 4801-4805.
- [7] Widmayer C C, Jones L R, Milam D. Measurement of the nonlinear coefficient of carbon disulfide using holographic self-focusing[J]. Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials, 1998, 7(4): 563-570.
- [8] Peng T, Zhao J L, Li D. Theoretical analysis of hot-image effect in a high-power laser system with cascaded nonlinear medium[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(7): 972-978.
- [9] Zhao Jianlin, Peng Tao, Ye Zhijun. Hot-image effects in high-power solid state laser systems[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(10): 1315-1322.
赵建林, 彭涛, 叶知隽. 高功率固体激光系统中的“热像”效应[J]. 中国激光, 2007, 34(10): 1315-1322.
- [10] Zhang Y L, Zhang J Y, Jiao Z Y, *et al.* Study on impact of spatial filter on a hot image through medium with gain[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(11/12): 1209-1212.
- [11] Shaw M, Williams W, House R, *et al.* Laser performance operations model[J]. Optical Engineering, 2004, 43(12): 2885-2895.
- [12] Kegelmeyer L M, Senecal J G, Conder A D, *et al.* Optimizing blocker usage on NIF using image analysis and machine

- learning[C]. ICALEPCS, 2013.
- [13] Chen B Y, Kegelmeyer L M, Liebman J A, *et al.* Detection of laser optic defects using gradient direction matching[C]. SPIE, 2006, 6101: 61011L.
- [14] Hunt J T, Glaze J A, Simmons W W, *et al.* Suppression of self-focusing through low-pass spatial filtering and relay imaging[J]. Applied Optics, 1978, 17(13): 2053-2057.
- [15] Zhou Lidan, Su Jingqin, Liu Lanqin, *et al.* Effects on beam quality of booster stage induced by “defects” on optics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(3): 326-330.
周丽丹, 粟敬钦, 刘兰琴, 等. 光学元件“缺陷”对助推放大级光束质量的影响[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(3): 326-330.
- [16] You Kewei, Zhang Yanli, Zhang Xuejie, *et al.* Analysis of near-field modulations caused by defects in high power laser system[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0302002.
尤科伟, 张艳丽, 张雪洁, 等. 高功率激光系统中缺陷引起的近场调制分析[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0302002.
- [17] Paglieroni D W, Eppler W G. Resolution analysis for gradient direction matching of object model edges to overhead images[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2009, 113(2): 235-248.
- [18] Horner J L, Gianino P D. Phase-only matched filtering[J]. Applied Optics, 1984, 23(6): 812-816.
- [19] Awwal A, Candy J V, Haynam C A, *et al.* Accurate position sensing of defocused beams using simulated beam templates[C]. SPIE, 2004: 233-242.
- [20] Tagare H D, de Figueiredo R J P. On the localization performance measure and optimal edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(12): 1186-1190.
- [21] Verbeek P W, van Vliet L J. On the location error of curved edges in low-pass filtered 2-D and 3-D images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(7): 726-733.
- [22] Dudley A, Vasilyeu R, Belyi V, *et al.* Controlling the evolution of nondiffracting speckle by complex amplitude modulation on a phase-only spatial light modulator[J]. Optics Communications, 2012, 285(1): 5-12.