

反正弦型编码成像系统的极限激光防护能力研究

李仰亮^{1,2}, 吴云龙^{1,2*}, 叶庆^{1,2**}, 魏冰妍³, 罗皓琦^{1,2}, 孙可^{1,2}, 张昊^{1,2}, 张文启⁴, 孙晓泉^{1,2}¹国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;²先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;³西北工业大学物理科学与技术学院, 陕西 西安 710129;⁴陆军装甲兵学院士官学校, 吉林 长春 130000

摘要 常规成像系统的焦平面结构决定其具有极高的光学增益和有限的焦深范围, 导致系统高成像质量与弱激光防护能力的矛盾性问题。波前编码成像技术具有大焦深特点和光场调控作用, 通过像面离焦能够在保证成像质量的前提下有效提升系统的激光防护性能。研究波前编码成像系统成像质量和激光防护性能的权衡问题, 分析系统激光防护性能的极限至关重要。以反正弦型相位掩模板为例, 分别建立离焦波前编码成像系统的成像模型和激光传输模型, 研究系统的成像质量和激光防护性能随离焦参数的变化规律。通过解耦方式将系统的成像质量作为基本约束条件, 引入定量评价指标得到系统允许的最大离焦参数为 9.70λ (λ 为波长), 并在此基础上评估系统的极限激光防护性能。结果表明, 在该条件下系统的最大单像素接收功率的降幅达到 96.37%, 回波探测器接收功率降至 0.217%, 成像系统的抗激光损伤和反激光主动探测性能分别提升一个和三个数量级以上。

关键词 波前编码; 成像系统; 激光防护; 成像质量

中图分类号 TN977

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231570

1 引言

常规光电成像系统主要由成像镜头、图像传感器和信号处理部分组成, 其焦平面结构和自动对焦机制能够保证系统的成像质量, 但是, 该结构和机制使得入射激光在图像传感器处形成强度极高的聚焦光斑, 导致图像传感器极易被损伤。图像传感器反射聚焦光斑, 其中部分反射光会逆着入射光路返回, 产生远高于漫反射景物的回波强度, 导致成像系统极易被激光主动探测设备发现和定位^[1-3]。因此, 成像系统的激光防护包含抗激光损伤传感和反激光主动探测两层含义^[4]。为保证光电成像系统正常工作, 可以采用科学的技术方案减弱光电成像系统到达图像传感器的光强和回波强度, 减少其被激光损伤和探测的概率, 从而提高光电成像设备的安全性。

光电成像系统抗激光损伤的典型技术方案包括加装线性材料^[5-6]、非线性材料^[7-11]和相变材料^[12-15]等制成的防护窗口。光电成像系统反激光探测的典型技术方案是: 在成像系统的光路中增加滤光、遮挡、光隔离等不同器件, 以阻止回波的产生; 或者将光电成像系统的面阵探测器离焦放置, 以减小回波的强度^[16-18]。然而,

上述典型技术方案存在着需要先验知识和牺牲成像质量等问题。同时, 激光器的功率提升和波长扩展^[19-21]使得光电成像系统的激光防护愈发困难。着眼于解决光电成像系统的激光防护性能与成像质量之间的矛盾, 研究人员利用波前编码技术^[22-23]的大焦深特点和光场调控作用, 通过像面离焦提升光电成像系统的激光防护能力^[24-25]。波前编码技术能够较好地平衡成像系统的成像质量和激光防护性能之间的矛盾, 但是以往的研究过多地关注离焦对激光防护性能的影响, 忽视了离焦情况下系统的成像质量, 即忽视了成像质量对激光防护性能的限制。

相位掩模板是波前编码成像系统的核心元件, 决定着成像系统的焦深延拓性、成像质量和激光防护性能。本课题组提出的反正弦型相位掩模板 (ASPM)^[26], 其相位调制函数由平方项与反正弦项组成, 相较于正切型、正弦型、改进对数型和三次型相位掩模板能够进一步提高成像系统的焦深延拓性能, 为反激光主动探测和抗激光损伤提供更大的自由度。探究 ASPM 的极限激光防护能力, 即在保证成像质量的前提下成像系统能达到的最大防护能力, 具有重要的现实意义。因此本文以 ASPM 为例, 通过解耦方

收稿日期: 2023-09-18; 修回日期: 2023-10-24; 录用日期: 2023-10-27; 网络首发日期: 2023-11-07

基金项目: 基础加强计划技术领域基金 (2021-JCJQ-JJ-0284, 2022-JCJQ-JJ-0237)、中国空间技术研究院 CAST 创新基金 (1020J20210117)、国防科技大学校科研项目 (ZK20-41)、先进激光技术安徽省实验室基金 (AHL2021QN03, AHL2022ZR03)

通信作者: *wuyunlong17@nudt.edu.cn; **yeqing18@nudt.edu.cn

式将系统的成像质量作为基本约束条件,引入定量评价指标来确定系统允许的最大离焦参数,并在此基础上评估系统的激光防护性能,从而探究波前编码成像系统的极限防护性能。

2 成像模型及成像质量分析

建立的波前编码成像系统的成像模型如图 1 所示,目标景物经过相位掩模板调制和成像透镜聚焦后到达图像传感器,然后被转化为数字信号。成像透镜为理想薄透镜,成像系统的主平面和光瞳平面与成像透镜重合。图 1 中 object、PMP(phase mask plate)、L(lens)和 detector 分别表示目标景物、相位掩模板、成像透镜和图像传感器。

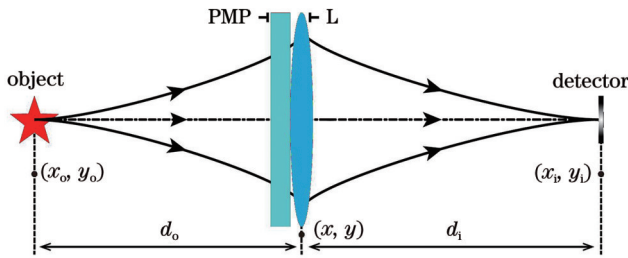


图 1 波前编码成像系统的成像模型

Fig. 1 Imaging model of wavefront coded imaging system

假设目标物体的光照是非相干的,则成像系统的线性、空间不变模型的物像关系可以表示为

$$I_i(x_i, y_i) = |h(x_i, y_i)|^2 * I_g(x_i, y_i), \quad (1)$$

式中: I_i 为像面的强度图像; (x_i, y_i) 为像面的空域坐标; h 表示点扩散函数,即物面上的单位脉冲通过衍射受限系统后在像面上的复振幅分布; I_g 表示几何光学理想像的强度图像; $|h(x_i, y_i)|^2$ 为强度点扩散函数。式(1)表明,非相干照明情况下线性空间不变成像系统的像面强度分布是理想像的强度分布与强度点扩散函数的卷积。傅里叶变换后得到式(1)对应的频域形式为

$$\mathcal{G}_i(f_x, f_y) = \mathcal{H}(f_x, f_y) \mathcal{G}_g(f_x, f_y), \quad (2)$$

式中: $\mathcal{G}_i(f_x, f_y)$ 为 $I_i(x_i, y_i)$ 的归一化频谱; (f_x, f_y) 为频域坐标; $\mathcal{H}(f_x, f_y)$ 为光学传递函数; $\mathcal{G}_g(f_x, f_y)$ 为 $I_g(x_i, y_i)$ 的归一化频谱。

基于式(1)和式(2),非相干成像系统仿真可以表示为

$$I_i(x_i, y_i) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{H}(f_x, f_y) \mathcal{F} \{ I_g(x_i, y_i) \} \right\}, \quad (3)$$

式中: \mathcal{F} 符号表示傅里叶变换; \mathcal{F}^{-1} 符号表示傅里叶逆变换。因此,计算光学传递函数是成像系统仿真的核心问题。同一成像系统的光学传递函数 $\mathcal{H}(f_x, f_y)$ 等于相干传递函数 $H_c(f_x, f_y)$ 的自相关归一化函数,可以表示为

$$\mathcal{H}(f_x, f_y) = H_c(f_x, f_y) \star H_c(f_x, f_y) |_{\text{norm}}, \quad (4)$$

式中: \star 表示相关性;下标 norm 表示归一化。衍射受限系统的相干传递函数表示为

$$H_c(f_x, f_y) = P(\lambda d_i f_x, \lambda d_i f_y), \quad (5)$$

式中: P 为成像系统的光瞳函数; λ 为波长; d_i 为像距。

常规成像系统的圆形光瞳函数表示为

$$P(x, y) = \text{circ} \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D/2} \right), \quad (6)$$

式中: $\text{circ}(\cdot)$ 为圆域函数; D 为成像透镜直径。

离焦波前编码成像系统的实质是有像差系统。计算离焦波前编码成像系统的广义光瞳函数时需要分别考虑离焦和相位掩模板引入的光程差 $W_1(x, y)$ 和 $W_2(x, y)$ [将其对应的相位差表示为 $kW_1(x, y)$ 和 $kW_2(x, y)$]。离焦引起的相位差可以通过实际相位分布减去理想相位分布得到,具体表示为

$$kW_1(x, y) = -\frac{\pi}{\lambda d_i'} (x^2 + y^2) + \frac{\pi}{\lambda d_i} (x^2 + y^2), \quad (7)$$

式中, d_i' 是离焦图像传感器与成像透镜之间的距离。进一步计算得到光程差

$$W_1(x, y) = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{d_i'} - \frac{1}{d_i} \right) (x^2 + y^2) = W_m \frac{x^2 + y^2}{(D/2)^2}, \quad (8)$$

式中, W_m 为离焦参数,单位为 λ ,其定义为

$$W_m(x, y) = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{d_i'} - \frac{1}{d_i} \right) \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \frac{D^2}{8} \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} - \frac{1}{d_i'} \right), \quad (9)$$

其中, d_i 为像距, d_o 为物距,且物距与像距满足高斯成像公式, f 为透镜焦距。离焦参数是像面离焦程度的指标,其物理内涵是直径为 D 的圆形光瞳的边缘处的最大光程差。

ASPM引入的相位差可以表示为

$$kW_2(x, y) = \alpha \hat{x}^2 \arcsin(\hat{x}) + \alpha \hat{y}^2 \arcsin(\hat{y}) = \alpha \left(\frac{x}{D/2} \right)^2 \arcsin \left(\frac{x}{D/2} \right) + \alpha \left(\frac{y}{D/2} \right)^2 \arcsin \left(\frac{y}{D/2} \right), \quad (10)$$

式中: (\hat{x}, \hat{y}) 为光瞳平面的归一化空域坐标,取值范围为 $[-1, 1]$; α 为调制系数。因此,离焦波前编码成像系统的广义光瞳函数可以表示为

$$\mathcal{P}(x, y) = P(x, y) \exp \left[ikW(x, y) \right] = \text{circ} \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D/2} \right) \exp \left\{ ik \left[W_1(x, y) + W_2(x, y) \right] \right\}. \quad (11)$$

接着,利用式(5)和式(4)计算得到对应的相干传

递函数和光学传递函数,以解决成像系统仿真的核心问题,进一步计算得到成像模型的仿真结果。

离焦常规成像系统需要考虑离焦引起的光程差,因此,其广义光瞳函数为

$$\mathcal{P}(x, y) = \text{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D/2}\right) \exp\left[ikW_m \frac{x^2 + y^2}{(D/2)^2}\right], \quad (12)$$

其相干传递函数和光学传递函数可以分别利用式(5)和式(4)计算得到。

波前编码成像系统中图像传感器获取的是模糊的编码图像,编码图像需要进行解码操作来恢复出清晰的解码图像。本研究采用较为常用的维纳滤波解码算法,其具体公式为

$$\mathcal{G}_d(f_x, f_y) = \frac{\mathcal{H}^*(f_x, f_y)}{|\mathcal{H}(f_x, f_y)|^2 + K} \mathcal{G}_i(f_x, f_y), \quad (13)$$

式中: $\mathcal{G}_d(f_x, f_y)$ 为解码图像的归一化频谱; $\mathcal{H}^*(f_x, f_y)$ 表示光学传递函数 $\mathcal{H}(f_x, f_y)$ 的共轭; K 为选定的试探性参数; $\mathcal{G}_i(f_x, f_y)$ 为成像强度图像 $I_i(x, y)$ 的归一化频谱。经过维纳滤波后得到的解码图像表示为

$$I_d(x_i, y_i) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{G}_d(f_x, f_y)\right\} = \mathcal{F}^{-1}\left\{\frac{\mathcal{H}^*(f_x, f_y)}{|\mathcal{H}(f_x, f_y)|^2 + K} \mathcal{G}_i(f_x, f_y)\right\}, \quad (14)$$

式中, $I_d(x_i, y_i)$ 表示解码图像。

通过数值仿真计算不同离焦参数时成像系统的成像质量。数值仿真中成像系统的具体参数如表 1 所示。

表 1 成像系统的数值仿真参数

Table 1 Numerical simulation parameters of imaging system

Parameter	Value
Imaging lens diameter	50 mm
Imaging lens focal length	100 mm
Object distance	2000 m
Image distance	100.0 mm
Imaging plane length	0.2725 mm
Modulation factor	42.21
Tentative parameter	4.25×10^{-4}

图 2 为常规成像和 ASPM 波前编码成像系统的成像结果对比,其中,第一列为常规成像系统的成像结果,第二、三列分别为波前编码成像系统的编码图像和解码图像。结果显示:随着离焦参数的增大,常规成像系统的成像结果中细节丢失,整体逐渐模糊,成像质量严重劣化。编码图像因为 ASPM 的调制作用变得模糊,通过选择试探性参数 $K=4.25 \times 10^{-4}$,计算获取的

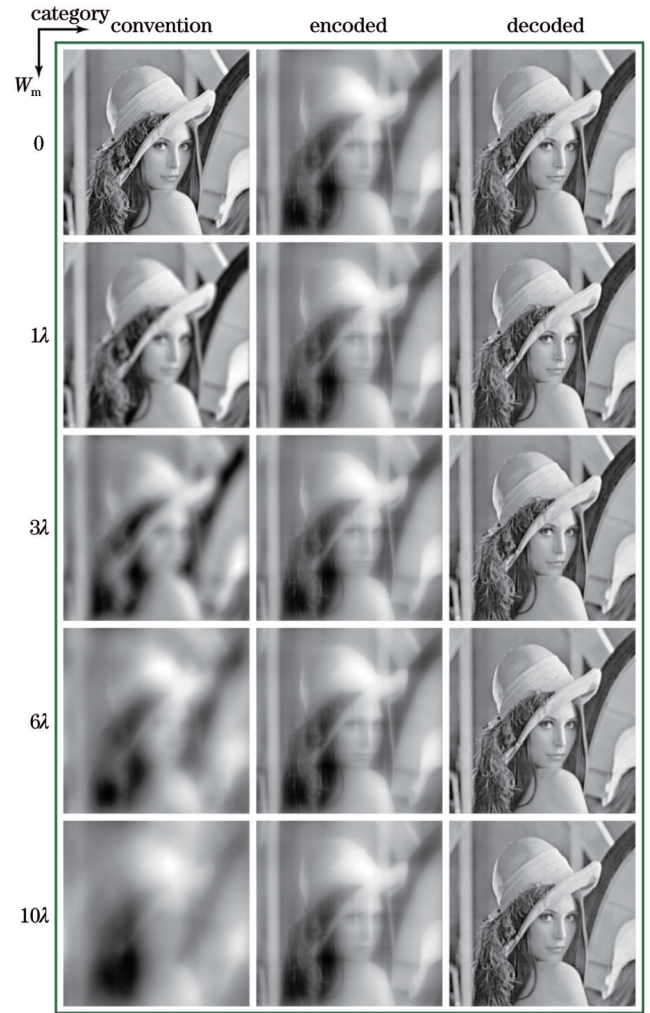


图 2 常规成像系统和 ASPM 波前编码成像系统的成像结果对比

Fig. 2 Comparison of imaging results between conventional imaging system and ASPM wavefront coded imaging system

解码图像效果接近常规成像系统的无离焦状态时的成像效果。因此,反正弦型编码成像系统通过硬件与软件联合优化取得了优异的焦深延拓性。

进一步地,利用峰值信噪比(PSNR)和结构相似度(SSIM)^[27]指标定量评价成像质量随离焦参数的变化情况,结果如图 3 所示,其中,实线和虚线分别表示常规成像系统和 ASPM 波前编码成像系统的 PSNR 变化曲线,点线和点划线分别表示常规成像系统和 ASPM 波前编码成像系统的 SSIM 变化曲线。聚焦状态时,常规成像系统的 PSNR 和 SSIM 分别为 24.47 dB 和 0.897,而 ASPM 波前编码成像系统的 PSNR 与 SSIM 分别达到 25.87 dB 和 0.899。解码操作能够恢复部分高频信息,使得解码图像质量得到提升。瑞利判据^[28]表明,常规成像系统清晰成像所允许的最大波像差为 $W = \lambda/4$,此时常规成像系统的 PSNR 和 SSIM 分别为 24.03 dB 和 0.879。离焦范围内 ASPM 波前编码成像系统的 PSNR 始终大于 24.03 dB,而当离焦参数为 9.70λ 时,

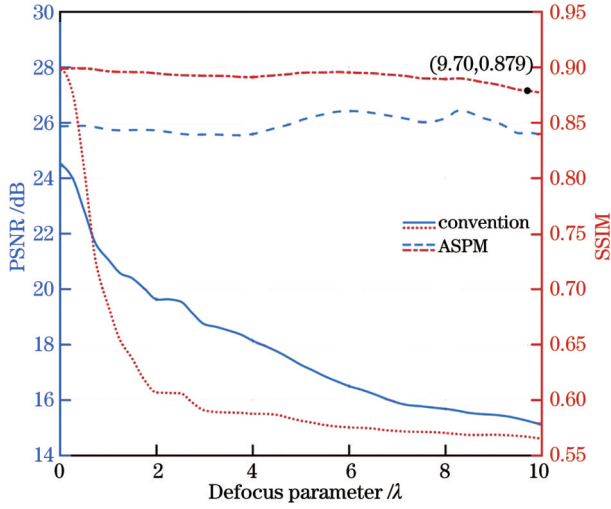


图3 常规成像系统和 ASPM 波前编码成像系统的 PSNR 与 SSIM 曲线

Fig. 3 PSNR and SSIM curves of conventional imaging system and ASPM wavefront coded imaging system

ASPM 波前编码成像系统的 SSIM 为 0.879 并逐渐下降, 因此 ASPM 波前编码成像系统的离焦极限为 9.70λ 。

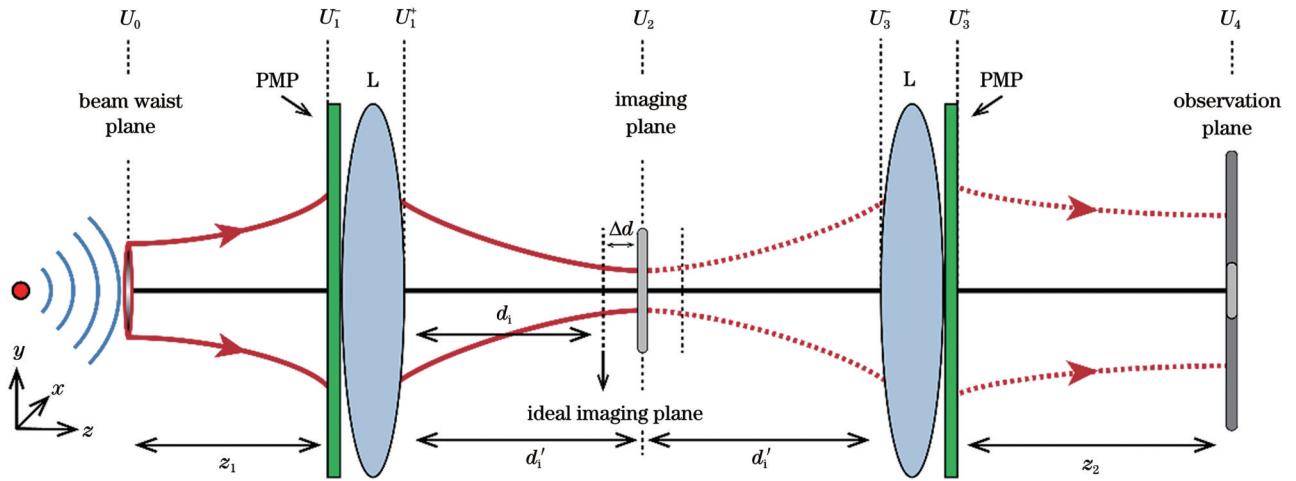


图4 波前编码成像系统激光传输模型

Fig. 4 Laser propagation model of wavefront coded imaging system

规定相位滞后为正, 如图 4 所示, 束腰尺寸为 ω_0 且束腰平面与等效相位平面之间距离为 z_1 的高斯光束传输至等效相位平面。利用高斯光束传播方程^[29] 计算得到其在等效相位平面前表面的复振幅分布, 表示为

$$U_1^-(x_1, y_1) = A_0 \frac{\omega_0}{\omega(z_1)} \exp\left[-\frac{x_1^2 + y_1^2}{\omega^2(z_1)}\right] \times \exp\left\{i\left\{k\left[z_1 + \frac{x_1^2 + y_1^2}{2R(z_1)}\right] - \arctan\left(\frac{\lambda z_1}{\pi\omega_0^2}\right)\right\}\right\}, \quad (15)$$

式中: A_0 为与功率相关的常数; ω_0 为束腰尺寸; k 为波数; $\omega(z_1)$ 为等效相位平面处高斯光束等相位面上的

3 激光传输模型及防护性能分析

研究波前编码成像系统的抗激光损伤与反激光探测性能, 需要建立波前编码成像系统的激光传输模型, 如图 4 所示, 其中, PMP 表示相位掩模板, L 表示透镜。模型包括聚焦光斑形成过程和回波光斑形成过程两个部分, 分别使用实线和虚线表示该过程中高斯光束的传输。模型认为相位掩模板和成像透镜紧密结合在一起, 将二者视为一个等效相位平面。聚焦光斑形成的具体过程为: 束腰平面与等效相位平面距离为 z_1 的高斯光束入射至等效相位平面, 分别经相位掩模板调制和透镜聚焦后衍射至其后距离 d_1' 处的成像平面, 从而形成聚焦光斑。理想像距 d_1' 取决于高斯成像公式 $1/z_1 + 1/d_1' = 1/f$, 其中, z_1 为物距, d_1' 为理想像距, f 为成像透镜焦距。若考虑像面离焦情况, 则离焦像面与理想像面之间的离焦距离为 Δd 。回波光斑形成的具体过程为: 成像平面处聚焦光斑的反射分量逆着入射光路返回, 再次经过参数完全一致的透镜聚焦和相位掩模板调制后, 衍射至距光学系统 z_2 处的观测平面, 形成回波光斑。

光斑半径; $R(z_1)$ 为等效相位平面处高斯光束等相位面的曲率半径, 分别表示为

$$\begin{cases} \omega(z_1) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z_1}{\pi\omega_0^2}\right)^2} \\ R(z_1) = z_1 \left[1 + \left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda z_1}\right)^2\right]^{-1} \end{cases} \quad (16)$$

成像透镜和 ASPM 的复振幅透过率函数分别表示为

$$T_1(x_1, y_1) = \text{circ}\left(\frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{D/2}\right) \exp\left[-i\frac{k}{2f}(x_1^2 + y_1^2)\right], \quad (17)$$

$$T_2(x_1, y_1) = \exp \left[i \alpha \left(\frac{x_1}{D/2} \right)^2 \arcsin \left(\frac{x_1}{D/2} \right) + \alpha \left(\frac{y_1}{D/2} \right)^2 \arcsin \left(\frac{y_1}{D/2} \right) \right], \quad (18)$$

同时像面离焦导致的离焦像差表示为

$$T_3(x_1, y_1) = \exp \left[i k W_m \frac{x_1^2 + y_1^2}{(D/2)^2} \right], \quad (19)$$

三项相乘得到等效相位平面的复振幅透过率函数为

$$T(x_1, y_1) = T_1(x_1, y_1) T_2(x_1, y_1) T_3(x_1, y_1), \quad (20)$$

计算得到等效相位平面的透射光束复振幅分布为

$$U_1^+(x_1, y_1) = U_1^-(x_1, y_1) T(x_1, y_1). \quad (21)$$

菲涅耳近似^[30-31]下,光场从等效相位平面后表面到成像平面的传播满足菲涅耳衍射。计算得到其成像平面处的复振幅分布为

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{\exp(i k d_i)}{i \lambda d_i} \exp \left[i \frac{k}{2 d_i} (x_2^2 + y_2^2) \right] \times \iint U_1^+(x_1, y_1) \exp \left[i \frac{k}{2 d_i} (x_1^2 + y_1^2) \right] \times \exp \left[-i \frac{k}{d_i} (x_1 x_2 + y_1 y_2) \right] dx_1 dy_1. \quad (22)$$

仿真计算中主要考虑探测器硅基底的反射,假设其反射率为 ρ ,反射分量 $\rho U_2(x_2, y_2)$ 经过菲涅耳衍射到达等效相位平面,利用菲涅耳衍射公式计算得到回波在等效相位平面的复振幅分布为

$$U_3^-(x_3, y_3) = \frac{\exp(i k d_i)}{i \lambda d_i} \exp \left[i \frac{k}{2 d_i} (x_3^2 + y_3^2) \right] \times \iint \rho U_2(x_2, y_2) \exp \left[i \frac{k}{2 d_i} (x_2^2 + y_2^2) \right] \times \exp \left[-i \frac{k}{d_i} (x_2 x_3 + y_2 y_3) \right] dx_2 dy_2. \quad (23)$$

回波经过相位掩膜板与透镜的二次调制,计算得到透射光束复振幅分布为

$$U_3^+(x_3, y_3) = U_3^-(x_3, y_3) T(x_3, y_3). \quad (24)$$

透射光束经过菲涅耳衍射到达观测平面,计算得到观测平面处形成的衍射回波复振幅分布为

$$U_4(x_4, y_4) = \frac{\exp(i k z_2)}{i \lambda z_2} \exp \left[i \frac{k}{2 z_2} (x_4^2 + y_4^2) \right] \times \iint U_3^+(x_3, y_3) \cdot \exp \left[i \frac{k}{2 z_2} (x_3^2 + y_3^2) \right] \times \exp \left[-i \frac{k}{z_2} (x_3 x_4 + y_3 y_4) \right] dx_3 dy_3. \quad (25)$$

最后,通过复振幅乘以复振幅的共轭计算成像平面处聚焦光斑和观测平面处回波光斑的光强,表示为

$$I_2(x_2, y_2) = U_2(x_2, y_2) U_2^*(x_2, y_2), \quad (26)$$

$$I_4(x_4, y_4) = U_4(x_4, y_4) U_4^*(x_4, y_4). \quad (27)$$

最终得到聚焦光斑和回波光斑的轮廓和强度分布,并利用强度分布计算防护性能的定量指标,即最大单像素接收功率和回波探测器接收功率。最大单像素接收功率 P_{pixel} 的具体计算方法是:寻找成像平面处峰值光强位置,并以该位置坐标为中心,累加计算单元像素等效面积内的聚焦光斑功率。评价准则为:相同干扰激光参数时,最大单像素接收功率越小,抗激光损伤性能越好。回波探测器接收功率 P_{dec} 的具体计算方法是:以系统光轴位置坐标为中心,累加计算回波探测系统简化而来的回波探测区域内的回波光斑功率。评价准则为:相同干扰激光参数时,回波探测器接收功率越小,反激光探测性能越好。

通过数值仿真计算不同离焦参数时成像系统的激光防护性能。数值仿真中涉及到的干扰激光、光学系统和探测系统的参数如表 2 所示。

表 2 激光传输模型的数值仿真参数

Table 2 Numerical simulation parameters of laser propagation model

Parameter	Value
Laser power	1000 W
Laser wavelength	532 nm
Gaussian beam waist size	2.5 mm
Propagation distance	2000 m
Imaging lens focal length	100 mm
Imaging lens size	$\Phi 50$ mm
Imaging plane pixel size	$2.0 \mu\text{m} \times 2.0 \mu\text{m}$
Imaging plane reflectance	0.1
Echo detector size	$\Phi 25$ mm

图 5 为不同离焦参数时成像平面处聚焦光斑轮廓、强度分布和对应的最大单像素接收功率,其中,convention 表示常规成像系统,ASPM 表示 ASPM 波前编码成像系统。结果表明:随着离焦参数的增加,常规成像系统成像平面处聚焦光斑逐渐弥散,造成最大单像素接收功率迅速下降。ASPM 波前编码成像系统中,相位掩膜板的相位调制作用致使成像平面处的光斑呈非旋转对称分布,光斑能量的重新分布能够降低到达探测器的光强;同时,相位调制形成的光束能够保证探测器表面光斑轮廓和光强分布在较大离焦范围内保持稳定,使得最大单像素功率变化幅度较小。

离焦参数为 0 时,常规成像系统处于无离焦状态,最大单像素接收功率为 54960.4 mW;离焦参数为 1λ 、 3λ 、 6λ 、 10λ 时,最大单像素接收功率分别为 6768.7、668.1、164.8、59.1 mW。

离焦参数为 0 时,ASPM 波前编码成像系统处于无离焦状态,最大单像素接收功率为 3046.6 mW,对比无离焦状态的常规成像系统,最大单像素接收功

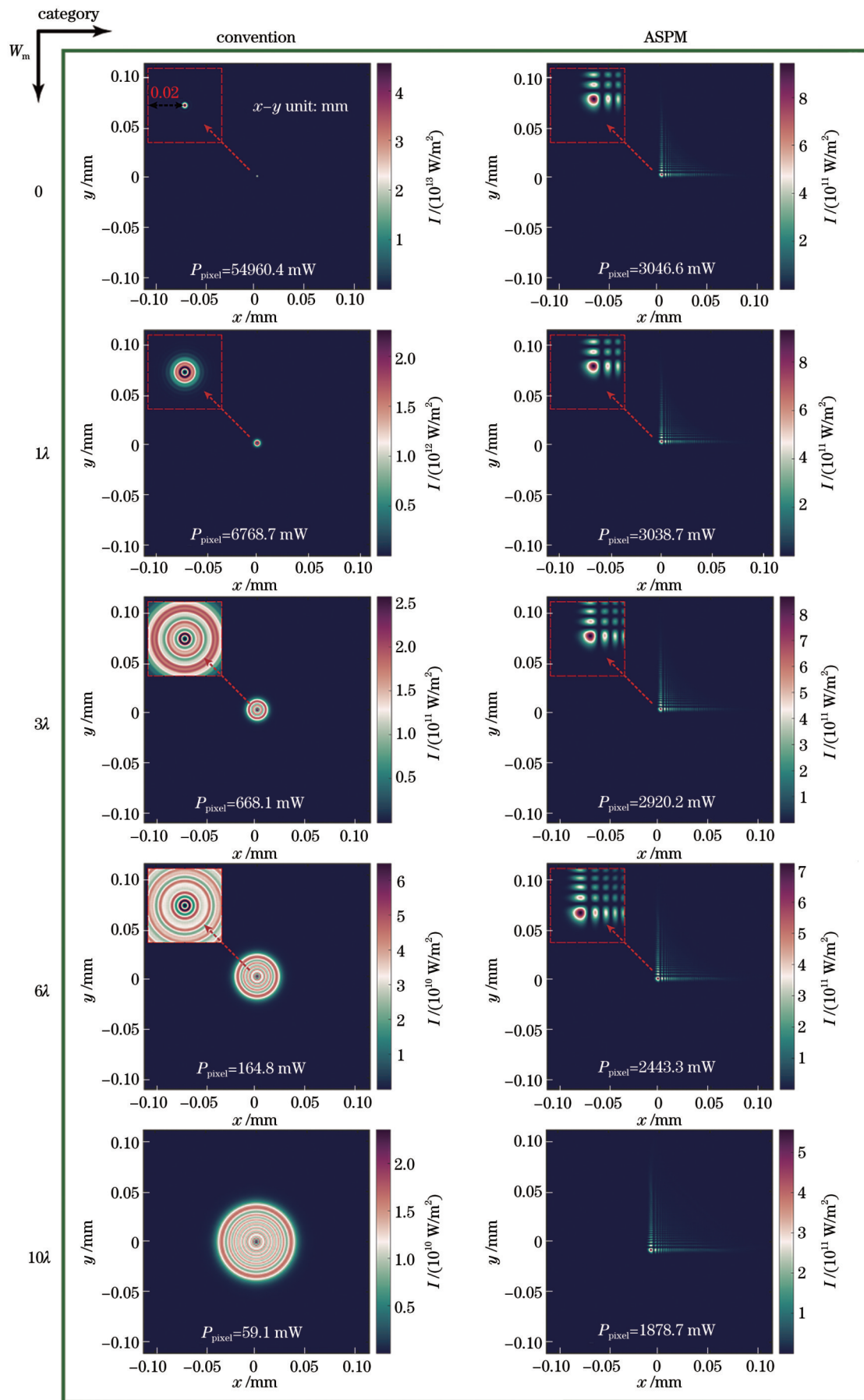


图 5 不同离焦参数时成像平面处光斑轮廓及对应的最大单像素接收功率

Fig. 5 Spot profiles and corresponding maximum single-pixel receiving power with different defocus parameters at imaging plane

率的降幅为 94.46%。离焦参数为 1λ 、 3λ 、 6λ 、 10λ 时, 最大单像素接收功率分别降为 3038.7、2920.2、2443.3、1878.7 mW。

图 6 为成像平面处最大单像素接收功率随离焦参数的变化曲线。结果显示: 随着离焦参数的增大, 常规

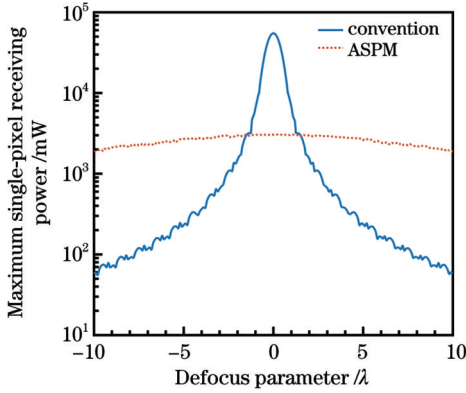
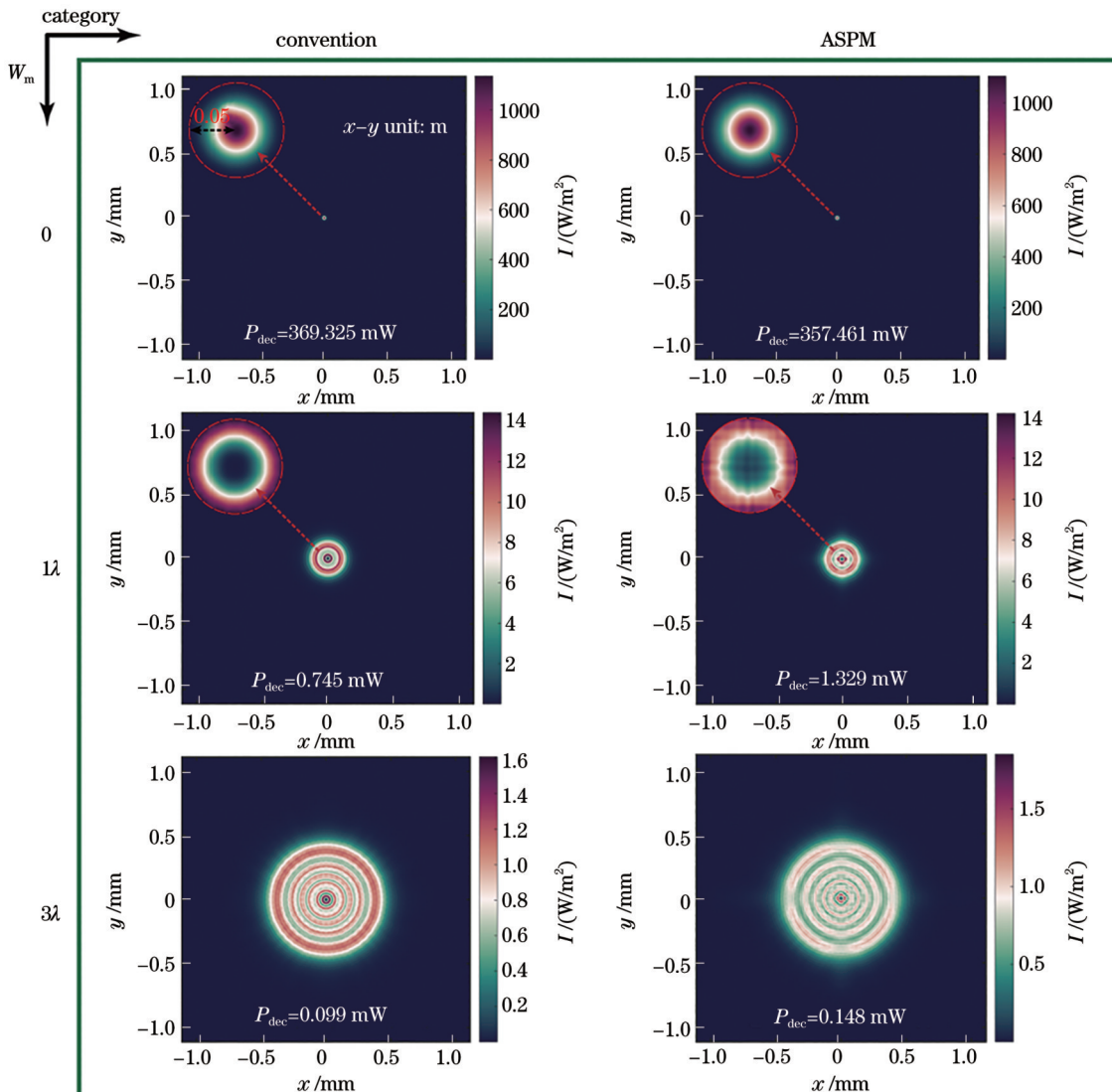


图 6 成像平面处最大单像素接收功率随离焦参数的变化曲线
Fig. 6 Variation curves of maximum single-pixel receiving power with defocus parameters at imaging plane

成像系统的最大单像素接收功率急剧下降。分析原因为成像平面处光斑尺寸随着离焦参数的增大迅速增大, 导致光强迅速下降, 离焦时的衍射造成了最大单像素接收功率的振荡。ASPM 波前编码成像系统的最大单像素接收功率缓慢下降, 分析原因为相位掩模板的离焦不变性。上文得出 ASPM 波前编码成像系统的离焦极限为 9.70λ , 此时其最大单像素接收功率为 1993.5 mW, 对比无离焦状态的常规成像系统, 最大单像素接收功率的降幅达到 96.37%。

图 7 为不同离焦参数时观测平面处回波光斑轮廓、强度分布和对应的回波探测器接收功率。结果表明, 观测平面上回波光斑尺寸随着离焦参数的增大逐渐增大, 回波探测器接收到的光斑尺寸占整体回波光斑尺寸的比例有所下降, 造成回波探测器接收功率的下降。

离焦参数为 0 时, 常规成像系统处于无离焦状态, 回波探测器接收功率为 369.325 mW; 离焦参数为 1λ 、 3λ 、 6λ 、 10λ 时, 回波探测器接收功率分别为 0.745、0.099、0.033、0.018 mW。



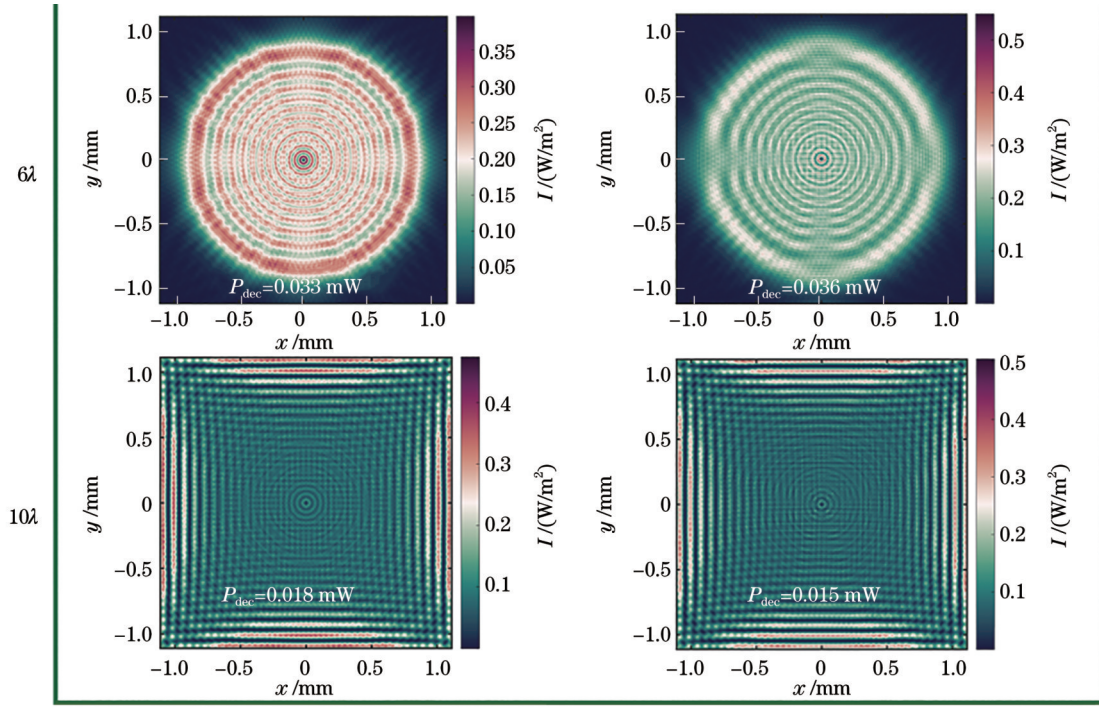


图 7 不同离焦参数时回波光斑轮廓及对应的回波探测器接收功率

Fig. 7 Echo spot profiles and corresponding echo-detection receiving power with different defocus parameters

离焦参数为 0 时, ASPM 波前编码成像系统处于无离焦状态, 回波探测器接收功率为 357.461 mW, 对比无离焦状态的常规成像系统, 回波探测器接收功率降低了 11.864 mW; 离焦参数为 1λ 、 3λ 、 6λ 、 10λ 时, 回波探测器接收功率分别降为 1.329、0.148、0.036、0.015 mW。

图 8 为回波探测器接收功率随离焦参数的变化曲线。需要注意的是, 图 8 中两条曲线的中间部分趋于重合, 导致中间部分看起来仅有一条曲线。结果显示: 相同离焦参数下, ASPM 波前编码成像系统的回波光斑尺寸与常规成像系统接近, 其回波探测器接收功率与常规成像系统基本一致。同时, 随着离焦参数的增大, 数值出现明显振荡, 分析原因是离焦时成像平面处

光斑强度分布的变化导致回波光斑强度分布的改变, 从而造成回波探测器接收功率的振荡。

考虑到回波探测器接收功率的振荡, 寻找其中的极大值, 利用修正 Akima 分段三次 Hermite 插值方法^[32]拟合极大值, 得到回波探测器接收功率在不同离焦参数下可能出现的最大值。上文得出 ASPM 波前编码成像系统的离焦极限为 9.70λ , 此时回波探测器接收功率可能的最大值为 0.080 mW, 对比无离焦状态的常规成像系统, 回波探测器接收功率降至 0.217%, 因此 ASPM 波前编码成像系统的反激光主动探测性能提升三个数量级以上。

4 结 论

本文通过解耦方式研究了 ASPM 波前编码成像系统的成像质量和激光防护性能的权衡问题, 探究了系统的极限激光防护性能。建立了离焦波前编码成像系统的成像模型, 利用定量评价指标评估了系统的成像质量随离焦参数的变化情况。结果显示: 随着离焦参数的增大, 常规成像系统的成像结果中细节丢失, 整体逐渐模糊, 成像质量严重劣化。ASPM 波前编码成像系统的解码图像效果接近常规成像系统的无离焦状态成像效果, 计算确定其离焦极限为 9.70λ 。接着建立了 ASPM 波前编码成像系统的激光传输模型, 研究了系统激光防护性能随离焦参数的变化情况。结果表明: 随着离焦参数的增大, 常规成像系统成像平面处聚焦光斑逐渐弥散, 造成最大单像素接收功率急剧下降, 而 ASPM 波前编码成像系统的离焦不

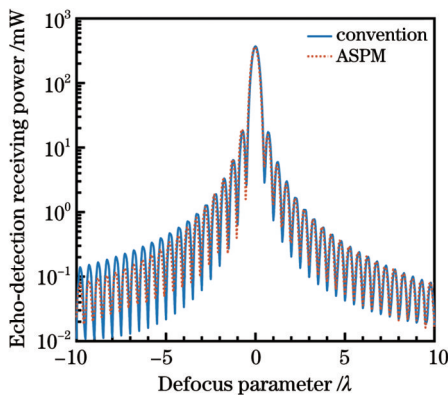


图 8 回波探测器接收功率随离焦参数的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of echo-detection receiving power with defocus parameters

变性使其最大单像素接收功率缓慢下降;另一方面,相同离焦参数下,ASPM波前编码成像系统的回波光斑轮廓接近常规成像系统,其回波探测器接收功率与常规成像系统基本一致。最后以系统的成像质量作为基本约束条件,确定了ASPM波前编码成像系统允许的最大离焦参数为 9.70λ ,在该条件下与常规成像系统相比,系统的最大单像素接收功率的降幅达到96.37%,回波探测器接收功率降至0.217%,抗激光损伤和反激光主动探测性能分别提升一个和三个数量级以上。

参 考 文 献

- [1] Wang L, Ye Q, Nie J S, et al. Tilted wavefront coding system to eliminate the retroreflection with superior imaging property[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(26): 7205-7211.
- [2] Wang L, Ye Q, Dou X N, et al. Anti-cat-eye effect imaging technique based on the light-field imaging technique[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2019, 28(5): 053020.
- [3] 王磊, 孙晓泉, 叶庆. 波前编码光电成像系统猫眼回波分析[J]. *量子电子学报*, 2020, 37(4): 418-429.
Wang L, Sun X Q, Ye Q. Retroreflection analysis of wavefront coding imaging system[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37(4): 418-429.
- [4] Wang L, Dou X N, Ye Q, et al. Wavefront coded light-field imaging system to achieve substantial retroreflection reduction and anti-laser blinding property[J]. *Optik*, 2019, 192: 162947.
- [5] Monks J N, Yue L Y, Yan B, et al. A wide-angle shift-free metamaterial filter design for anti-laser striking application[J]. *Optics Communications*, 2018, 429: 53-59.
- [6] Monks J N, Williams J, Hurst A, et al. Shift-free fixed-line laser protection filter technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11539: 1153908.
- [7] Ali H E. A novel optical limiter and UV-Visible filters made of Poly (vinyl alcohol)/KMnO₄ polymeric films on glass-based substrate[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, 30(7): 7043-7053.
- [8] Wu J Q, Wei Y, Shen W L, et al. Antimonene nanosheets fabricated by laser irradiation technique with outstanding nonlinear absorption responses[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(26): 261903.
- [9] Liu Q R, Hu S Y, Zhang C X, et al. Polarization-dependent and wavelength-tunable optical limiting and transparency of multilayer selenium-doped black phosphorus[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(1): 2001562.
- [10] 董宁宁, 刘强虎, 王俊. 二维非线性光限幅材料研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(13): 1300001.
Dong N N, Liu Q H, Wang J. Research progress of two-dimensional nonlinear optical limiting materials[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(13): 1300001.
- [11] Liang C L, Wang E Z, Li X, et al. Optical limiting performances of transitional metal dichalcogenides MX₂ (M=V, Nb, Ta; X=S, Se) with ultralow initial threshold and optical limiting threshold[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(2): 021901.
- [12] Huang Z L, Chen S H, Lü C H, et al. Infrared characteristics of VO₂ thin films for smart window and laser protection applications [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(19): 191905.
- [13] Howes A, Zhu Z H, Curie D, et al. Optical limiting based on Huygens' metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(6): 4638-4644.
- [14] Wan C H, Zhang Z, Salman J, et al. Ultrathin broadband reflective optical limiter[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(6): 2100001.
- [15] Guan H, Ren F F, Liang S H, et al. Ultra-high transmission broadband tunable VO₂ optical limiter[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(4): 2200653.
- [16] He S F, Gong M L. Optimized phase mask to realize retro-reflection reduction for optical systems[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(10): 105610.
- [17] He S F, Meng Y, Gong M L. Freeform lens design to eliminate retroreflection for optical systems[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(5): 1218-1224.
- [18] Song D L, Chang J, Zhao Y F, et al. Anti-detection technology of cat eye target based on decentered field lens[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(9): 094220.
- [19] 崔宇龙, 周智越, 黄威, 等. 中红外光纤激光技术研究进展与展望[J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0900001.
Cui Y L, Zhou Z Y, Huang W, et al. Progress and prospect of mid-infrared fiber laser technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0900001.
- [20] 李敬岁, 李博, 张丹, 等. 渐变折射率多模光纤产生可见光超连续谱研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(23): 2300004.
Li J S, Li B, Zhang D, et al. Research advances of visible supercontinuum generation in graded-index multimode fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(23): 2300004.
- [21] 江丽, 宋锐, 侯静, 等. 高功率可见光至近红外波段超连续谱光源研究进展[J]. *光学学报*, 2023, 43(17): 1719001.
Jiang L, Song R, Hou J, et al. Research progress of high-power visible to near-infrared supercontinuum source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(17): 1719001.
- [22] Dowski E R, Cathey W T. Extended depth of field through wave-front coding[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(11): 1859-1866.
- [23] Cathey W T, Dowski E R. New paradigm for imaging systems [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(29): 6080-6092.
- [24] Ye Q, Wu Y L, Li Y L, et al. A retroreflection reduction technique based on the wavefront coded imaging system[J]. *Crystals*, 2021, 11(11): 1366.
- [25] Ruane G J, Watnik A T, Swartzlander G A. Reducing the risk of laser damage in a focal plane array using linear pupil-plane phase elements[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(2): 210-218.
- [26] Wang L, Ye Q, Nie J S, et al. Optimized asymmetrical arcsine phase mask for extending the depth of field[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(14): 1309-1312.
- [27] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [28] Barakat R. Rayleigh wavefront criterion[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, 55(5): 572-573.
- [29] Karl F R. Basics of laser physics: for students of science and engineering[M]. 2nd ed. Cham: Springer, 2017.
- [30] Schmidt J D. Numerical simulation of optical wave propagation with examples in MATLAB[M]. Bellingham: SPIE Press, 2010.
- [31] Voelz D G. Computational Fourier optics: a MATLAB tutorial [M]. Bellingham: SPIE Press, 2011.
- [32] Akima H. A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting based on local procedures[J]. *Communications of the ACM*, 1974, 17(1): 18-20.

Limit of Laser Protection Capability of Arcsine Coded Imaging System

Li Yangliang^{1,2}, Wu Yunlong^{1,2*}, Ye Qing^{1,2**}, Wei Bingyan³, Luo Haoqi^{1,2}, Sun Ke^{1,2},
Zhang Hao^{1,2}, Zhang Wenqi⁴, Sun Xiaoquan^{1,2}

¹State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, Anhui, China;

²Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, Anhui, China;

³School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, Shaanxi, China;

⁴School of Noncommissioned Officers, Army Academy of Armored Forces, Changchun, 130000, Jilin, China

Abstract

Objective Traditional imaging systems, due to their focal plane structure, exhibit significant optical gain but have a limited depth of focus. This creates a paradoxical scenario: achieving high image quality comes at the expense of weak laser protection capabilities. Established methods for laser protection in optoelectronic imaging systems encounter challenges including reliance on prior knowledge, bandwidth limitations, and degraded image quality. To address the conflict between image quality and laser protection, researchers utilize wavefront coding technology, leveraging its deep focus characteristics and light field regulation. This enables defocusing the image plane to enhance the system's laser protection capacity without compromising image quality. While wavefront coding can achieve a balance, previous studies have placed excessive focus on how defocus affects laser protection, overlooking its consequential impact on image quality and essentially ignoring how image quality can restrict laser protection. Therefore, investigating the balance between laser protection capability and image quality in wavefront coded imaging systems, as well as understanding the limits of the system's laser protection, is of utmost importance. We aim to examine this balance within the context of the arcsine wavefront coded imaging system and discern the limits of its laser protection capabilities.

Methods Using the arcsine phase mask (ASPM) as an exemplar, we build imaging and laser transmission models for a defocused wavefront coding system. The trends are investigated in image quality and laser protection as the defocus parameters shift. By employing a decoupling approach, we take the system's image quality as a fundamental constraint. To ascertain the system's maximum permissible defocus parameters, we introduce quantitative evaluation metrics. Furthermore, our study assesses the system's laser protection capability based on these parameters, providing insights into the protection limits of wavefront coded imaging system.

Results and Discussions Numerical simulations of the imaging model demonstrate that in conventional imaging system, increasing defocus parameters gradually blur the resulting image, leading to a significant deterioration in image quality. In the case of the ASPM wavefront coded imaging system, the coded image, modulated by the ASPM, also becomes blurred. However, by selecting an exploratory parameter $K=4.25 \times 10^{-4}$, the decoded image closely resembles the imaging effect of the conventional imaging system in its non-defocused state. This indicates that the ASPM wavefront coded imaging system achieves superior depth-of-focus extensions through joint hardware and software optimization (Fig. 5). To quantitatively evaluate the changes in image quality with defocus parameters, we employ peak signal-to-noise ratio and structural similarity metrics. Based on the Rayleigh criterion and using the peak signal-to-noise ratio and structural similarity values of the conventional imaging system as a threshold, we compute the defocus limit for the wavefront coded imaging system to be 9.70λ . The numerical simulation results of the laser propagation model reveal that as defocus parameters increase, the size of the light spot at the imaging plane of the conventional system grows rapidly. This leads to a sharp decline in light intensity and a significant reduction in the maximum single-pixel receiving power. However, the wavefront coded imaging system, with its defocus invariance, exhibits a more gradual decline in its maximum single-pixel receiving power (Fig. 6). Furthermore, both the conventional and wavefront coded systems show a decreasing trend in echo-detection receiving power (Fig. 7 and Fig. 8). At the same defocus parameters, the echo spot size of the wavefront coded imaging system is similar to that of the conventional imaging system, and their echo-detection receiving power are essentially the same. Therefore, the defocus limit of the imaging system determines the boundary of its laser protection capability.

Conclusions By considering the image quality of the ASPM wavefront coded imaging system as a fundamental

constraint, we establish that the maximum permissible defocus parameter for the wavefront coded imaging system is determined to be 9.70λ . When compared to the non-defocused state of the conventional imaging system, at this specific defocus parameter, the ASPM wavefront coded imaging system experiences a significant decline in the maximum single-pixel receiving power, reaching 96.37%. Additionally, the echo-detection receiving power drops to 0.217%. These findings highlight the enhanced capabilities of the wavefront coded imaging system, with an improvement over one order of magnitude in anti-laser damage and three orders of magnitude in anti-laser active detection.

Key words wavefront coding; imaging system; laser protection; imaging quality