

不同背景下超连续谱激光对成像系统的干扰

范瑜, 程相正*, 邵铭, 刘伟

63891 部队光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471000

摘要 超连续谱激光辐照可见光成像系统的干扰效应研究具有广泛的应用前景。针对超连续谱激光干扰效应, 开展了不同辐亮度背景下超连续谱激光对可见光成像系统的干扰实验研究。采用白光光纤激光器产生超连续谱干扰源, 搭建了超连续谱激光对可见光成像系统的干扰实验系统, 得到不同辐亮度下探测器的干扰阈值数据, 建立了探测器饱和像元数与干扰激光功率密度之间的数学关系模型, 并对干扰阈值数据进行分析。结果表明, 探测器饱和像元数与干扰激光功率密度近似呈线性对数关系, 在低辐亮度背景下可见光成像系统更易受到干扰。实验结果对超连续谱激光干扰装备的设计、论证及作战使用具有一定的参考意义。

关键词 超连续谱激光; 成像系统; 干扰; 不同辐亮度背景; 饱和像元个数

中图分类号 TN977

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230604

Jamming of Supercontinuum Spectrum Laser on Imaging Systems in Different Backgrounds

Fan Yu, Cheng Xiangzheng*, Shao Ming, Liu Wei

Key Laboratory of Photoelectric Countermeasure Testing and Evaluation Technology,

Unit 63891, Luoyang 471000, Henan, China

Abstract The study of the jamming effects on visible-light imaging systems irradiated by supercontinuum spectrum lasers has vast potential applications. Focusing on the jamming effect of the supercontinuum spectrum laser, experiments were conducted to analyze its interference on visible-light imaging systems under varying radiation brightness backgrounds. A white-light fiber laser was utilized to generate a supercontinuum spectrum interference source, and an experimental system was constructed to evaluate the jamming effects of the supercontinuum spectrum laser on visible-light imaging systems. Jamming threshold data for detectors at different irradiance intensities were obtained, along with a mathematical relationship model between the detector's saturation pixel number and the jamming laser's power density. Results indicate that the detector's saturation pixel number is approximately logarithmically linear in relation to the interference laser's power density. Additionally, the visible-light imaging system is more vulnerable to interference when operating under low-irradiance backgrounds. These experimental findings provide valuable insights for designing, demonstrating, and operating supercontinuum spectrum laser jamming equipment.

Key words supercontinuum spectrum laser; imaging system; jamming; different irradiation brightness backgrounds; number of saturated pixels

1 引言

随着光电材料的快速发展^[1-2], 各种类型的光电探测器层出不穷^[3-4], 极大扩展了人眼视觉范围。可见光成像探测器^[5-6]广泛用于光电搜索跟踪^[7]、精确制导^[8-9]等军事领域, 在机载吊舱、制导导引头、空间侦察卫星器等方面有着广泛的应用, 但其易受激光辐照影响产

生干扰。超连续谱激光结合了传统宽带光源的宽光谱特性和激光光源的高空间相干性、方向性、高亮度等特点^[10], 是激光干扰的理想光源。超连续谱激光干扰作为国内外迅速发展的一种新型激光干扰手段, 其干扰机理不同于单波长激光^[11]。目前, 国内对超连续谱激光干扰的研究多集中于与单波长激光干扰机理对比方面, 如娄小程等^[12]研究了超连续谱激光照射多光谱

收稿日期: 2023-02-09; 修回日期: 2023-03-29; 录用日期: 2023-04-04; 网络首发日期: 2023-04-15

基金项目: 试验技术研究重点项目(2200110033)

通信作者: *846248088@qq.com

CCD 的干扰效果,同时采用 671, 473, 532 nm 等的单波长激光与超连续谱光源对多光谱 CCD 进行干扰的实验研究,将它们对多光谱 CCD 的干扰效果进行了对比分析,证明了超连续谱光源相对于单波长激光对多光谱 CCD 相机干扰效果更好的结论。王景楠等^[13]开展了超连续谱光源与 1060 nm 光纤激光辐照可见光 CMOS 图像传感器的实验,CMOS 传感器出现了多种干扰现象,并且他们从有效干扰面积、图像相关度和图像均方差等多个角度进行分析对比得到不同干扰源的干扰效果。在使用时,可见光成像系统经常面临不同辐亮度的作战背景,而研究人员对不同辐亮度背景下超连续谱激光对成像系统的干扰研究相对较少,因此本文开展不同辐亮度背景下的超连续谱激光对可见光成像系统干扰效应的研究,能够为超连续谱激光及可见光成像系统抗干扰措施提供理论及数据支持。本文设计并完成了不同背景下超连续谱激光对可见光成像系统的干扰效应实验,采用白光光纤激光器产生超连续谱激光,干扰不同辐亮度背景下的可见光成像系统,并对实验结果进行了分析。结果表明,探测器饱和像素数与干扰激光功率密度近似呈线性对数关系,在低辐亮度背景下可见光成像系统更易受到干扰。

2 理论分析

在不同辐亮度背景下,开展不同入瞳激光功率密度对可见光成像系统进行干扰的实验,得到对应条件下的激光光斑,激光光斑的饱和像素个数与入瞳激光功率密度有关。

根据 Fraunhofer 衍射规律,可得饱和光斑半径 r 为

$$r = \left[\frac{P\lambda f^2}{8F\pi^2 E_{th}} \right]^\alpha, \quad (1)$$

式中: P 为入瞳激光功率密度; λ 为入射激光波长; α 为与成像探测器材料、工艺等相关的系数; f 为光学系统

焦距; F 为光学系统 $F\#$; E_{th} 为探测器饱和阈值。假设探测器单个像素(像元)面积为 S_d ,则饱和像素个数 N 为

$$N = \frac{\pi r^2}{S_d} = \pi \cdot \left[\frac{P\lambda f^2}{8F\pi^2 E_{th}} \right]^{2\alpha}. \quad (2)$$

对式(2)等号两边分别取对数,得到

$$\lg N = 2\alpha \lg P + 2\alpha [\lg \lambda + 2\lg f - \lg(8F\pi^2 E_{th})] + \lg \pi - \lg S_d, \quad (3)$$

式中: 2α 和 $2\alpha [\lg \lambda + 2\lg f - \lg(8F\pi^2 E_{th})] + \lg \pi - \lg S_d$ 均为常数。从式(3)可以看出,饱和像素个数对数值与入瞳功率密度对数值之间呈线性关系。光学系统 F 数与光学系统焦距 f 的关系为

$$F = \frac{f}{D}, \quad (4)$$

式中: D 表示入瞳直径的大小,即光圈大小。将式(4)代入式(1)中,可得饱和光斑半径 r 为

$$r = \left[\frac{P\lambda D f}{8\pi^2 E_{th}} \right]^\alpha, \quad (5)$$

从式(5)可以看出光圈相对较大,即 D 较大时,饱和光斑半径 r 较大。

3 实验设计

实验系统主要由白光光纤激光器、可见光成像系统等几部分组成,具体布局如图 1 所示。在激光器出口处加光阑,激光分束器进行分光,激光分束器将一路激光导入激光功率计进行功率监测,另一路激光对可见光成像系统进行直瞄式干扰,通过调节激光器电流和衰减片组,实现接近连续衰减。图像采集系统实时采集和存储探测器的输出图像。通过改变白光光纤激光器的输出功率和环境的辐亮度,完成了可见光成像系统在不同辐亮度背景下的干扰效应实验。

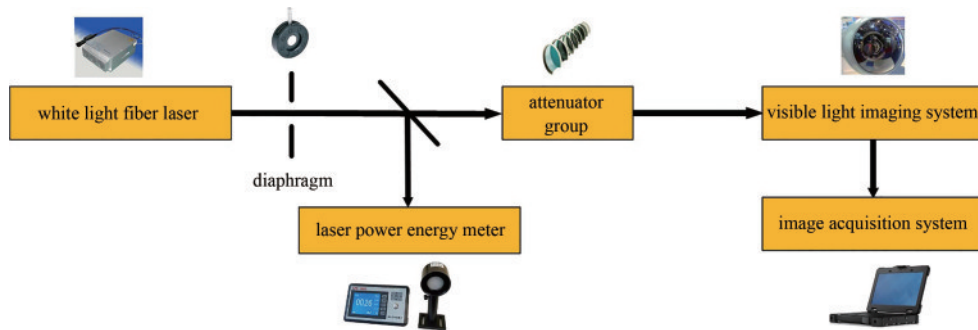


图 1 白光光纤激光器对可见光成像系统干扰的实验布局图

Fig. 1 Layout of white light fiber laser jamming experiment on visible light imaging system

实验选用的白光光纤激光器的输出光谱范围为 0.45~1.2 μm ,重复频率为 200.0 kHz,脉冲宽度为 5.6 ns,光谱平坦度为 6.4 dB@0.50~1.05 μm ,功率不稳定性为 0.5%,出光口光斑直径为 8.9 mm。可见

光成像系统包括 CCD 探测器、信息处理模块及光学系统等,其中 CCD 探测器分辨率为 1280×1280,像元尺寸为 5.5 μm ×5.5 μm ,光谱响应范围为 0.45~1.2 μm ,光学系统焦距为 21 mm,光阑孔径约为 4 mm,

干扰激光器距离探测器 18.165 m。

4 结果及分析

4.1 低辐亮度背景下的干扰效应实验

可见光成像系统采用非跟瞄模式,成像探测器首先工作在线性工作区,随着激光发射功率密度的增加,成像探测器将处在非线性区。

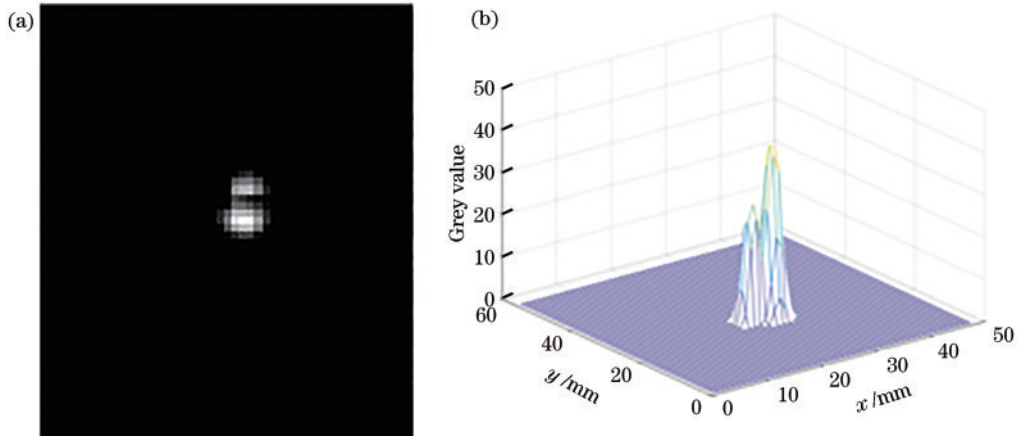


图2 低辐亮度背景下点饱和状态下激光光斑成像及三维能量分布图。(a)激光光斑;(b)三维能量分布

Fig.2 Laser spot imaging and three-dimensional energy distribution in point-saturation under low irradiation brightness. (a) Laser spot; (b) three dimensional energy distribution

逐渐增大激光功率密度,建立探测器饱和像元数与干扰激光功率密度之间的数学关系模型。当入瞳激光功率密度为 1.4 W/cm^2 时,可见光成像探测器处在非线性工作区,激光光斑如图 3(a)所示,图 3(b)表示该状态下三维能量分布情况。此时,可见光成像探测器饱和像元个数约为 94413,该功率下,光斑较大,因

当入瞳激光功率密度为 $1.4 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$, CCD 探测器饱和像元个数约为 1,探测器处在点饱和状态,激光光斑如图 2(a)所示,图中央的白色亮点即为激光光斑中较强部分的像点。图 2(b)表示该状态下三维能量分布情况, z 轴为像元灰度值,起始平面对应 z 轴 0 平面,说明周围环境灰度值为 0,实验在全黑条件下进行。

此对应的光斑三维能量分布图中圆面积也较大。由于光斑面积较大,在截取光斑区域内周围亮度较高,因此图 3(b)起始平面并不为 0,但实验仍在周围环境全黑下进行。继续增大激光发射功率密度时,图像采集系统显示 CCD 探测器上出现损伤状态,因此判断该功率密度为低辐亮度背景下的阈值功率密度。

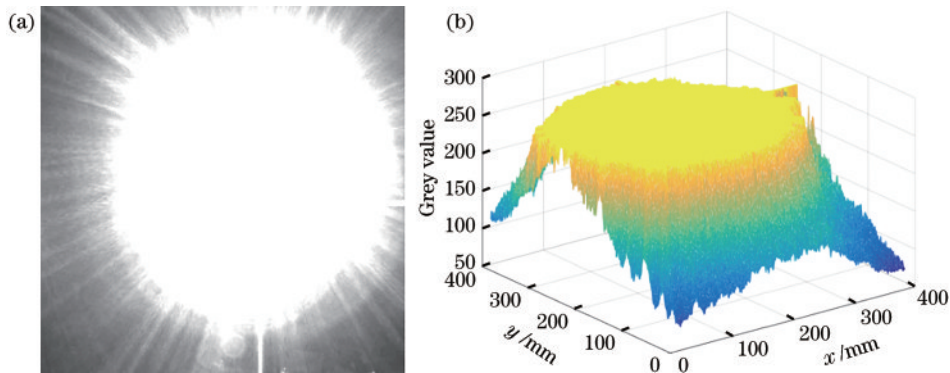


图3 低辐亮度背景下饱和状态下激光光斑成像及三维能量分布图。(a)激光光斑;(b)三维能量分布

Fig.3 Laser spot imaging and three-dimensional energy distribution in saturated-state under low irradiation brightness. (a) Laser spot; (b) three dimensional energy distribution

随着激光发射功率密度的增大,得到的饱和像元个数与激光发射功率密度的关系如图 4 所示,点实线为实验得到的阈值数据,实线为拟合曲线,纵轴为像元个数的对数值,横轴为激光发射功率密度的对数值,拟合直线方程 $\lg N = 2.22547 \times \lg P + 4.85448$, R^2 为 0.9767。其中, R^2 为拟合系数,其值越接近 1,说明拟合程度越好;反之,说明直线的拟合程度越差。图 4 中

拟合曲线与实际值较为接近,证明了式(3)理论分析的正确性。

4.2 高辐亮度背景下的干扰效应实验

在周围具有一定亮度的环境下重复进行超连续谱激光对可见光成像系统的干扰效应实验。当激光入瞳功率密度为 $7.3 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$ 时,CCD 探测器处在点饱和状态,饱和像元个数为 40。由于周围环境辐亮度较

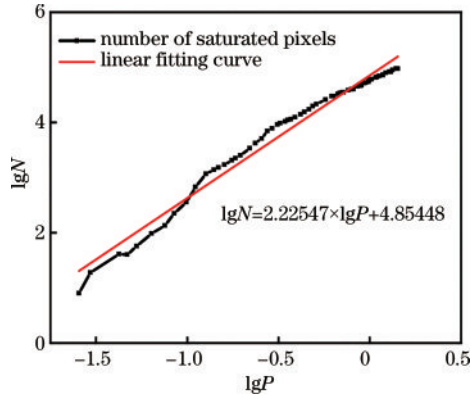


图4 低辐亮度下激光入瞳功率密度与饱和像元数关系的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of relationship between laser entrance pupil power density and saturated pixel number in low irradiation brightness

高,成像系统的光圈变小,产生的激光光斑如图5(a)所示,中央的白色亮点即为激光光斑中较强部分的像点。图5(b)中 z 轴为像元灰度值,其能量分布的平面并不为0,有一定的灰度值,表明周围环境有一定的亮度。

继续增大激光发射功率密度,建立在高辐亮度背景下探测器饱和像元数与干扰激光功率密度之间的数学关系模型。当激光入瞳功率密度为 1.4 W/cm^2 时,可见光成像探测器处在线性工作区,激光光斑如图6(a)所示,图6(b)表示该状态下三维能量分布情况。此时,可见光成像探测器饱和像元数约为35848,对应的光斑三维能量分布图中圆面积也较大。实验在周围环境具有一定亮度的情况下进行,因此 z 轴起始平面灰度值不为0且较高。继续增大激光发射功率密度,图像采集系统显示CCD探测器上出现损伤状态,因此判断该功率密度为高辐亮度背景下的损伤阈值功率密度。

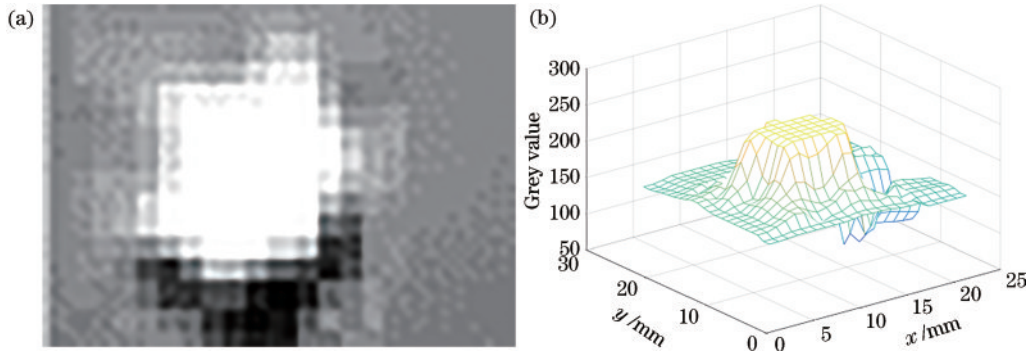


图5 高辐亮度背景下点饱和状态下激光光斑成像及三维能量分布图。(a)激光光斑;(b)三维能量分布

Fig.5 Laser spot imaging and three-dimensional energy distribution in point-saturation under high irradiation brightness. (a) Laser spot; (b) three dimensional energy distribution

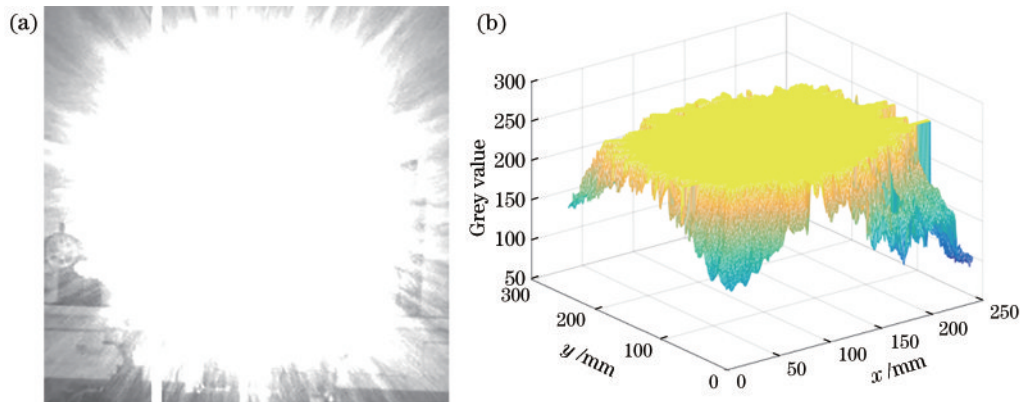


图6 高辐亮度背景下饱和状态下激光光斑成像及三维能量分布图。(a)激光光斑;(b)三维能量分布

Fig.6 Laser spot imaging and three-dimensional energy distribution in saturated-state under high irradiation brightness. (a) Laser spot; (b) three dimensional energy distribution

随着激光入瞳功率密度的进一步增大,得到激光功率密度与饱和像元个数之间的关系及线性拟合曲线如图7所示。其中纵轴为像元个数的对数值,横轴为激光发射功率密度的对数值,拟合直线方程 $\lg N = 1.80643 \times \lg P + 4.26406$, R^2 为0.95651。图7中拟合曲线和实际曲线较为接近,再次证明理论分析的正确性。

4.3 不同辐亮度背景下的结果比较及分析

低辐亮度背景下的斜率为2.22547,高辐亮度背景下的斜率为1.80643,表明低辐亮度背景下的饱和像元个数随激光发射功率密度的增加增长得更快,原因在于环境较黑时,可见光成像系统的光圈更大,入瞳的激光更多,饱和像元个数更多,验证了式(5)的理论分析。

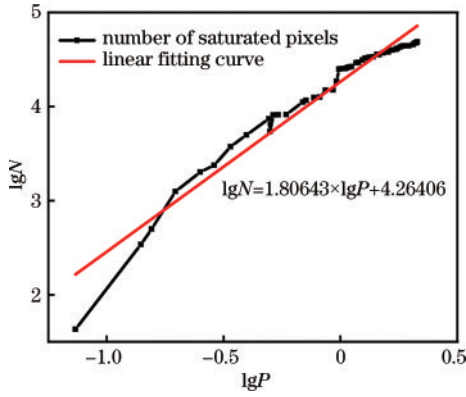


图 7 高辐亮度下激光功率密度与饱和像元数之间关系的拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of relationship between laser power density and saturated pixel number in high irradiation brightness

当入瞳激光功率密度为 1.4 W/cm^2 时,低辐亮度背景下饱和像元个数为 94413,高辐亮度背景下饱和像元个数为 35848,低辐亮度的饱和像元个数远大于高辐亮度时的个数。

选择具有相同入瞳功率密度的激光辐照不同亮度

背景的成像系统,对结果加以验证。当入瞳功率密度均为 $2.0 \times 10^{-1} \text{ W/cm}^2$ 时,得到的结果如图 8 所示,图 8(a)和图 8(b)表示在周围环境条件相对较暗时可见光成像系统得到的光斑图像及三维能量分布图,图 8(c)和图 8(d)则表示周围较亮时得到的光斑图像及能量分布图。从图 8 中可看出,周围环境亮度不同即灰度值不同,能量分布图的初始平面值不同,低辐亮度背景下的起始值为 0,高辐亮度背景下的起始值约为 150。对不同辐亮度下光斑的饱和像元个数进行统计,得到表 1。由表 1 可得,当激光入瞳功率密度为 $2.0 \times 10^{-1} \text{ W/cm}^2$ 时,低辐亮度下的饱和像元个数为 2524,高辐亮度下的饱和像元个数为 1255,同样低辐亮度下的饱和像元个数大于高辐亮度下的,与激光入瞳功率密度为 1.4 W/cm^2 时得到的结论一致。对该现象进行分析,主要原因在于成像系统的自动增益控制功能,在低辐亮度背景下增益较强,光圈较大,到达探测器靶面的功率密度较大,溢出的电荷更多,因此低辐亮度背景比高辐亮度背景下的饱和像元个数更多。由此,可见光成像系统的饱和像元个数与激光入瞳功率密度及周围环境条件均具有一定关系。

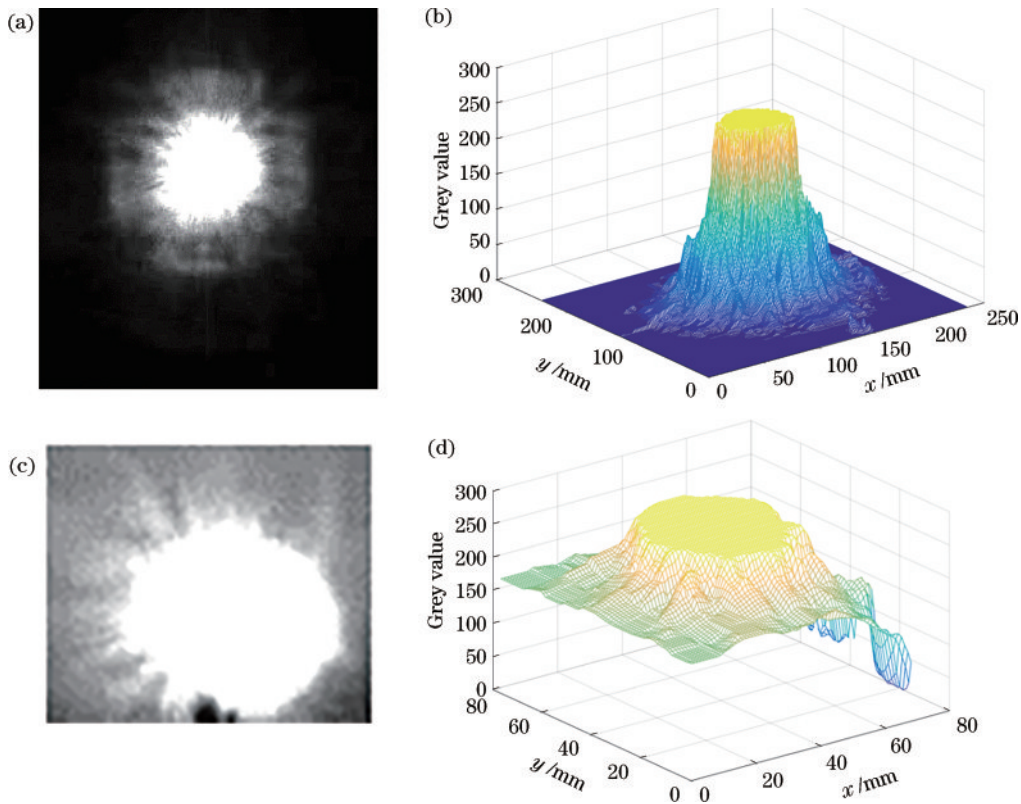


图 8 不同辐亮度下的光斑成像及三维能量分布图。(a)(b)低辐亮度;(c)(d)高辐亮度

Fig.8 Spot imaging and three-dimensional energy distribution under different irradiances. (a)(b) Low irradiation brightness; (c)(d) high irradiation brightness

表 1 不同背景下的饱和像元个数

Table 1 Number of saturated pixels in different backgrounds

Background condition	Laser input pupil power density / ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Number of saturated pixels
Low irradiance background	2.0×10^{-1}	2524
High irradiance background	2.0×10^{-1}	1255

5 结 论

为了研究超连续谱激光对可见光成像系统的干扰,主要采用白光光纤激光器产生超连续谱激光,对不同辐亮度下的可见光成像系统进行干扰实验,得到了不同辐亮度下可见光成像系统的饱和像元个数与激光入射功率密度的数学模型,并对实验数据进行了分析比较。得出结论:随着激光入瞳功率密度的增加,成像探测器先后呈现点饱和、面饱和状态,对应光斑区域的饱和像元个数随之增加,两者的对数值近似呈线性关系,进而验证理论分析的正确性;激光入瞳功率密度相同时,不同辐亮度背景下成像系统的饱和像元个数不同,低辐亮度下的饱和像元个数更多。可见光成像系统的饱和像元个数与激光入射功率密度及周围环境条件均具有一定关系。通过研究超连续谱激光对可见光成像系统的干扰效应,本文能够为超连续谱激光及可见光成像系统抗干扰措施提供理论及数据支持。实验结果对超连续谱激光干扰装备的设计、论证具有一定的参考意义,给研究成像系统的干扰模式提供了借鉴。

参 考 文 献

- [1] Zhang B, Hu C Z, Xin Y Z. MOS-based model of four-transistor CMOS image sensor pixels for photoelectric simulation[J]. Chinese Physics B, 2022, 31(5): 058503.
- [2] Zhao W S, Li X X, Zha H, et al. Controllable photoelectric properties of carbon dots and their application in organic solar cells[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2022, 40(1): 7-20.
- [3] 李卫, 武志学, 王庆伟, 等. 高信噪比集成化共振光电探测器研究[J]. 光学学报, 2023, 43(9): 0927001.
Li W, Wu Z X, Wang Q W, et al. Research on integrated resonance photodetector with high signal to noise ratio[J]. Journal of Optics, 2023, 43(9): 0927001.
- [4] 何剑涛, 吕且妮, 张明娣, 等. 基于 SPR 和干涉模式复合增强窄带钙钛矿光电探测器[J]. 中国激光, 2022, 49(23): 2304004.
He J T, Lü Q N, Zhang M D, et al. Narrow-band perovskite photodetector based on SPR and interference mode composite enhancement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(23): 2304004.
- [5] 陈钱. 先进夜视成像技术发展探讨[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(2): 20220128.
- [6] Chen Q. Discussion on the development of advanced night vision imaging technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(2): 20220128.
- [6] 马国锐, 王长力, 眭海刚, 等. 弱小目标可见光传感器成像特性研究[J]. 无线电工程, 2010, 40(0): 48-51.
Ma G R, Wang C L, Sui H G, et al. Research on imaging characteristics of visible light sensors for small and weak targets[J]. Radio Engineering, 2010, 40(1): 48-51.
- [7] 高明, 侯宏录. 外场多光轴瞄准偏差测试的基准光轴建立方法[J]. 光子学报, 2008, 37(5): 1029-1033
Gao M, Hou H L. Setup of reference optical axis for aiming deviation evaluation with multi-optical axis in field [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(5): 1029-1033.
- [8] Bárdosi Z, Plattner C, Özbek Y, et al. CIGuide: *in situ* augmented reality laser guidance[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2020, 15(1): 49-57.
- [9] 宿天桥, 张合新, 刘志国, 等. 激光导引头对目标测角精度的研究[J]. 电光与控制, 2021, 28(10): 21-25, 35
Su T Q, Zhang H X, Liu Z G, et al. Research on angular measurement accuracy of laser seeker[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(10): 21-25, 35
- [10] 贾志旭, 姚传飞, 李真睿, 等. 新型高功率中红外光纤激光材料与超连续谱激光研究进展[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508006.
Jia Z X, Yao C F, Li Z R, et al. Research progress of new high power mid-infrared fiber laser materials and supercontinuum laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508006.
- [11] Li G, Shen H B, Hua W S, et al. Quantitative evaluation of high repetition rate laser jamming effect on the pulsed laser rangefinder[J]. Optik, 2014, 125(10): 2450-2453.
- [12] 娄小程, 李晓英, 牛春晖, 等. 白光辐照多光谱 CCD 的干扰效应研究[J]. 激光技术, 2021, 45(6): 703-708.
Lou X C, Li X Y, Niu C H, et al. Study on the interference effect of white light irradiation multispectral CCD[J]. Laser Technology, 2021, 45(6): 703-708.
- [13] 王景楠, 聂劲松. 超连续谱光源辐照可见光 CMOS 图像传感器的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0106004.
Wang J N, Nie J S. Experimental study on supercontinuum laser irradiating a visible light CMOS imaging sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(1): 0106004.