

超连续谱激光对可见光跟瞄设备干扰实验研究

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:激光对成像跟瞄设备的干扰效应研究是当前一个热点,目前国内采用超连续谱激光对可见光成像跟瞄设备干扰的研究较少。本文主要采用白光光纤激光器产生超连续谱激光,对不同模式下的可见光成像跟瞄设备开展辐照实验,得到了不同工作模式下跟瞄设备探测器干扰阈值数据,通过拟合得到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式,并对跟瞄设备不同工作模式下的实验结果进行了分析比较。实验结果对超连续谱激光干扰装备的论证、设计具有一定的参考意义。

关键词:超连续谱激光;成像跟瞄设备;干扰;饱和像素个数

中图分类号:TN97;TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.08.016

Experimental research on interference of supercontinuum laser on visible light tracking and aiming equipment

FAN Yu, CHEN Xiang-zheng, SHAO Ming, LIU Wei

(Key Laboratory of Photoelectric Countermeasure Testing and Evaluation Technology,
The 63891 Unit of PLA, Luoyang 471000, China)

Abstract: Laser interference effects on imaging tracking and aiming equipment is currently a hot topic. Now there are few studies on the interference of the visible light imaging tracking and aiming equipment using supercontinuum laser. In this paper, white light fiber laser is mainly used to generate supercontinuum laser. Irradiation experiments are carried out on visible light imaging tracking and aiming equipment in different modes and the interference threshold data of equipment are obtained. The mathematical relationship between the number of saturated pixels of the equipment and the power density of the interference laser is obtained by fitting, and the experimental results of the equipment under different working modes are analyzed and compared. The experimental results have certain reference significance for the demonstration and design of supercontinuum laser jamming equipment.

Keywords: supercontinuum laser; imaging tracking and aiming equipment; interference; the number of saturated pixels

1 引 言

随着光电技术^[1-2]的飞速发展,各种光电探测器^[3-5]与光电跟瞄装备^[6-7]层出不穷,极大拓展了人眼视觉范围,广泛应用在侦察预警^[8]、卫星遥感、成像跟瞄^[9]、精确制导^[10]、靶场测量等军事领域^[11]。跟瞄设备成像技术在军事上应用广泛,已用于搜索、跟踪、制导^[12]等多种领域^[13-14]。超连续

谱激光具有传统宽带光源的宽光谱特性和激光光源的高空间相干性,是激光干扰的理想光源^[15-16]。超连续谱激光^[17-18]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。本文主要采用白光光纤激光器产生超连续谱激光辐照不同工作模式下的可见光成像跟瞄设备,分析比较不同工作模式下的实验结果。

基金项目:试验鉴定技术研究重点项目(No. 2200110033)资助。

作者简介:范 瑜(1994-),女,硕士,主要研究方向为光电技术方面。E-mail:fanyu202203@163.com

通讯作者:程相正(1989-),男,硕士,研究方向为光电技术。E-mail:846248088@qq.com

收稿日期:2023-08-30; **修订日期:**2023-10-11

2 实验系统布局及步骤

实验选用白光光纤激光器对可见光成像跟瞄设备模拟器进行干扰。白光光纤激光器的输出波长范围 $0.45 \sim 1.2 \mu\text{m}$, 光谱平坦度 $6.4 \text{ dB} @ 0.50 \sim 1.05 \mu\text{m}$, 重复频率 200.0 kHz , 脉冲宽度 5.6 ns , 出光口光斑直径 8.9 mm , 功率不稳定性 0.5% 。可见光成像跟瞄设备模拟器 CCD 探测器分辨率 1280×1280 , 光学系统焦距 21 mm , 光阑孔径约 4 mm , 干扰激光器距离跟瞄设备 18.165 m 。实验布局如图 1 所示, 合作目标置于白光光纤激光器旁, 可见光成像跟瞄设备对合作目标进行捕获跟踪。在激光器出口处加光阑, 经激光分束器分光, 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跟瞄设备进行直瞄式干扰, 图像采集处理系统实时采集和存储跟瞄设备的输出图像。该实验通过改变白光光纤激光器输出功率, 完成了对可见光成像跟瞄设备全透、抗 $1.06 \mu\text{m}$ 干扰等模式的辐照实验。

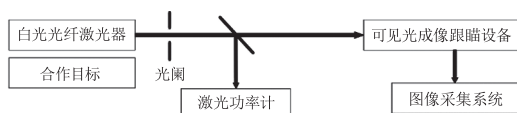


图 1 白光光纤激光器对可见光成像跟瞄设备干扰实验布局图
Fig. 1. Layout of white light fiber laser interference experiment on visible light imaging tracking and aiming equipment

3 实验结果分析及归纳

3.1 全透模式下的干扰实验

可见光成像跟瞄设备工作在全透模式, 即未加窄带滤光片, 光谱响应范围为 $0.45 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 。成像跟瞄设备采用边缘跟踪算法, 首先工作在线性工作区状态, 随着激光发射功率的增加, 探测器处在点饱和状态, 此时跟瞄设备仍能够稳定跟踪目标。当跟瞄设备入瞳处辐射功率密度进一步增大时, 无法正常跟踪目标。

实验时, 当入瞳激光功率密度为 $4.9 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$ 时, 跟瞄设备探测器饱和像素个数约为 43, 此时跟瞄设备探测器处在饱和状态下, 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 轴表示光斑区域的灰度值。此时, 目标与干扰光斑存在一定的位置偏差, 如图 2(c) 所示, 干扰光斑小于目标且无法覆盖目标, 跟瞄设备仍能稳定跟踪目标。

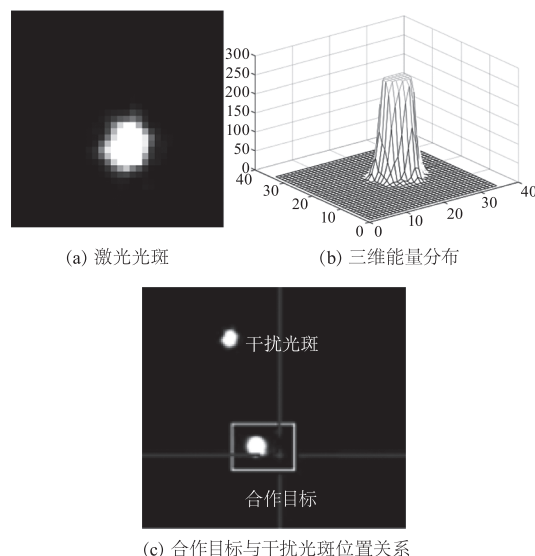


图 2 全透模式稳定跟踪状态下激光光斑成像及三维能量分布图
Fig. 2 Laser spot imaging and three-dimensional energy distribution in stable tracking state in all-transparent mode

逐渐增大激光功率, 当入瞳激光功率密度为 $1.7 \times 10^{-1} \text{ W/cm}^2$ 时, 跟瞄设备能够跟踪目标, 但无法稳定跟踪, 处于跟踪状态临界。此时, 跟瞄设备探测器饱和像素个数约为 1610, 此时成像跟瞄设备探测器处在中度饱和状态, 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, 图 3(c) 为合作目标与干扰光斑位置关系。从图中可以看出, 干扰光斑远大于目标, 目标处于干扰光斑的边缘, 跟瞄设备无法稳定跟踪目标。

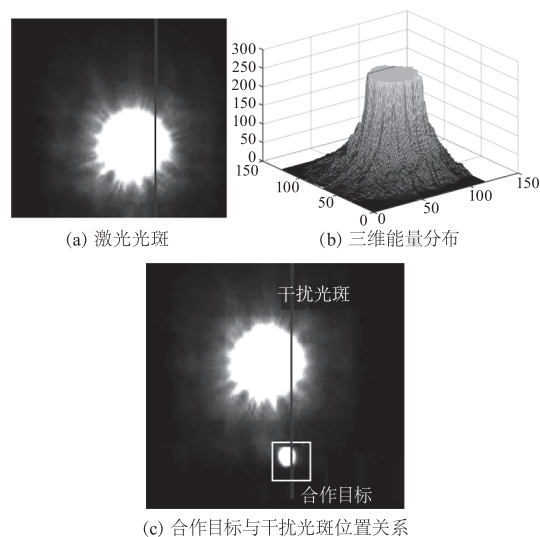


图 3 全透模式临界跟踪状态下激光光斑成像及三维能量分布图
Fig. 3. Laser spot imaging and three-dimensional energy distribution in critical tracking state in all-transparent mode

随着入瞳激光功率的增加, 跟瞄设备探测器光斑面积随之增大, 跟瞄设备无法跟踪目标, 光斑的能

量分布图横截面积进一步增大。由于跟瞄设备成像探测器主要用于远距离信号检测,其灵敏度较高,即使在激光功率未造成探测器损伤也可对其构成干扰。点饱和时,饱和像元数为 40 个左右,在中度饱和情况下,饱和像元个数已经增大到约 1500 个左右,跟瞄设备已经无法稳定跟踪目标。若在远距离进行干扰,由于光学系统衍射等原因,饱和像元数量会进一步增大。

根据弗朗和费衍射规律,经推导可得饱和光斑半径 r 为:

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

式(1)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:

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

对式(2)等号两边分别取对数得到式(3):

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

式中,除 N, P 外其余各项均为常数,从式(3)可以看出,饱和像素个数对数值与入射功率对数值之间呈线性关系。

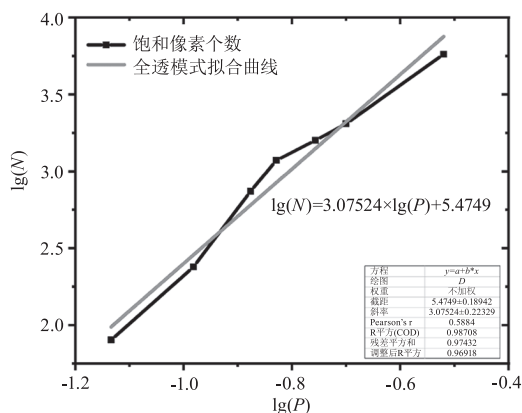


图4 全透模式下饱和像素个数与发射功率的关系及对应拟合曲线

Fig. 4. The relationship between the number of saturated pixels and the transmit power and the corresponding fitting curve in all-transparent mode

处理实验数据,可得如图4所示的饱和像素个

数与激光发射功率的关系。其中,纵坐标采用饱和像素个数的对数作为纵轴,横坐标采用入瞳激光功率密度的对数作为横轴,拟合得到直线方程 $\lg(N) = 3.07524 \times \lg(P) + 5.4749$, 拟合系数 0.97432。其中拟合系数越接近 1,说明拟合程度越好,反之,说明直线的拟合程度越差。

3.2 抗 1.06 μm 干扰模式下的干扰实验

可见光成像跟瞄设备工作在抗 1.06 μm 干扰模式时,跟瞄设备光学系统加载 1.06 μm 窄带陷波滤光片,对 1060 nm $\pm$ 10 nm 波段的激光透过率较低,从而达到抗 1.06 μm 单波长激光干扰的目的。

实验时,当辐照激光功率密度在 $2.8 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$ 时,跟瞄设备探测器饱和像素个数约为 2 个,此时跟瞄设备探测器处在点饱和状态下,激光光斑如图 5(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 5(b)表示该状态下三维能量分布情况。此时,饱和光斑很小,跟瞄设备能够稳定跟踪目标。

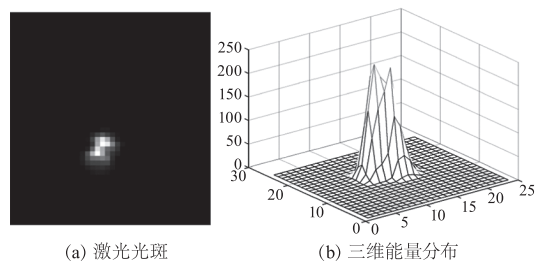


图5 抗 1.06 μm 模式稳定跟踪状态下激光光斑成像及三维能量分布图

Fig. 5 Laser spot imaging and the three-dimensional energy distribution in stable tracking state of anti-1.06 μm mode

进一步增大激光功率,当入瞳激光功率密度为 $1.7 \times 10^{-1} \text{ W/cm}^2$ 时,跟瞄设备能够跟踪目标,但无法稳定跟踪,处于跟踪状态临界。此时,跟瞄设备探测器饱和像素个数约为 1473 个,此时成像跟瞄设备探测器处在中度饱和状态,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,图 6(c)为合作目标与干扰光斑位置关系。对比图 3、图 6 以及跟踪状态可知,超连续谱激光对全透模式和抗 1.06 μm 干扰模式的跟瞄设备干扰效果相当,这是因为跟瞄设备抗 1.06 μm 干扰模式加载 1.06 μm 窄带陷波滤光片,对 1060 nm $\pm$ 10 nm 波段的激光透过率较低,而超连续谱具有较宽的光谱特性,在 0.45 ~ 1.2 μm 波段范围内均具有光谱激光输出。由于陷波滤光片带通较窄,半波宽一般为 10nm,因

此超连续谱激光对采用这种抗干扰体制的跟瞄设备和全透的跟瞄设备干扰效果相当。

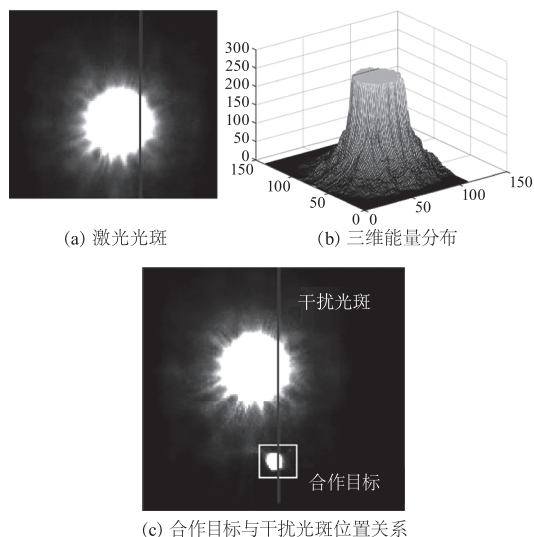


图 6 抗 1.06 μm 模式临界跟踪状态下激光光斑成像及三维能量分布图

Fig. 6. Laser spot imaging and three-dimensional energy distribution in the critical tracking state of anti-1.06 μm mode

随着入瞳激光功率的增加,跟瞄设备探测器光斑面积随之增大,跟瞄设备无法跟踪目标,光斑的能量分布图横截面积进一步增大。依据式(3),处理实验数据可得如图 7 所示的饱和像素个数与激光发射功率的关系,其中纵坐标采用饱和像素个数的对数作为纵轴,横坐标采用入瞳激光功率密度的对数作为横轴,拟合得到直线方程 $\lg(N) = 3.59956 \times \lg(P) + 5.94188$,横坐标单位 W/cm^2 ,拟合系数 0.99403。

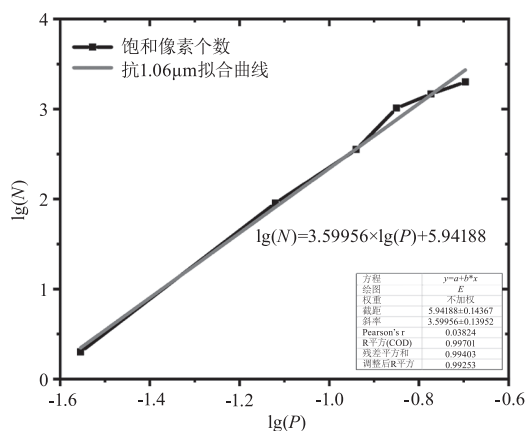


图 7 抗 1.06 μm 模式下饱和像素个数与发射功率的关系及对应拟合曲线

Fig. 7 The relationship between the number of saturated pixels and the transmit power and the corresponding fitting curve in the anti-1.06 μm mode

3.3 实验结果及分析

可见光成像跟瞄设备工作在全透模式,辐照激

光功率密度为 $4.9 \times 10^{-2} \text{ W}/\text{cm}^2$,跟瞄设备探测器呈现饱和但仍能跟踪目标;入瞳功率密度为 $1.7 \times 10^{-1} \text{ W}/\text{cm}^2$ 时,跟瞄设备探测器呈现中度饱和,但无法稳定跟踪,处于跟踪临界状态。

可见光成像跟瞄设备工作在抗 1.06 μm 干扰模式,辐照激光功率密度为 $2.8 \times 10^{-2} \text{ W}/\text{cm}^2$,跟瞄设备探测器呈现点饱和,能够稳定跟踪目标;入瞳功率密度为 $1.7 \times 10^{-1} \text{ W}/\text{cm}^2$ 时,跟瞄设备探测器呈现中度饱和,但无法稳定跟踪,处于跟踪临界状态。

对比超连续谱激光对可见光成像跟瞄设备全透模式和抗 1.06 μm 干扰模式下的实验结果可知,超连续谱激光对这两种模式的跟瞄设备干扰效果相当;相比 1.06 μm 单波长激光,超连续谱激光能够有效对抗镀有截止膜的可见光成像跟瞄设备。

4 结 语

本文主要采用白光光纤激光器产生超连续谱激光,对不同模式下的可见光成像跟瞄设备进行辐照,得到了不同工作模式下跟瞄设备探测器干扰阈值数据,通过拟合得到了探测器饱和像素数与干扰激光功率密度之间的数学关系式,并对跟瞄设备不同工作模式下的实验结果进行了分析比较。实验结果对超连续谱激光干扰装备的论证、设计具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] Zhou X. Recent progress in high-speed and high spectral efficiency optical transmission technology[J]. China Communications: English Version, 2022, (3): 24–34.
- [2] Tomov R, Aleksandrova M. Study of seed-free perovskite photoelectric devices with TiO_2 as a buffer layer[J]. Sustainability, 2022, 14(16): 1–14.
- [3] Ye Zhenhua, Li Huihao, Wang Jindong, et al. Frontier hotspots and changing trends of infrared photodetectors[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(1): 15–39. (in Chinese)
- 叶振华, 李辉豪, 王进东等. 红外光电探测器的前沿热点与变革趋势[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(1): 15–39.
- [4] Hao Liu, Junhong Yang. Research on photoelectric detection performance based on Pb Se quantum dots[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2290(12047): 1–6.
- [5] Wang Y, Wang J, Ma J, et al. Multi-functional photoelec-

- tric sensor based on a three-fold interpenetrated Cd(II) coordination polymer for sensitive detecting different Ions [J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2022, 38 (4): 1105 – 1110.
- [6] Lin Z, Shi C, Sang S. Photoelectric sighting device capable of performing 3D positioning and display of target object, US: 201514978712 [P]. 2017 – 06 – 22.
- [7] Qian Y S, Guo X C, Gao Q, et al. Simulation training technology study of photoelectric sighting device in the antiaircraft weapon system [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(9): 1107 – 1109.
- [8] Sheng G Q, Gong C K. Research of vehicular laser passive reconnaissance warning system [J]. Infrared & Laser Engineering, 2003, 32(3): 248 – 250.
- [9] Zhang L, Shi C, Sang S U. Photoelectric sighting system and calibration method thereof, US: 201815901658 [P]. 2018 – 02 – 21.
- [10] Zhao Hongyan, Ni Yongping, Wang Xiuping. The development of infrared detectors and their application in air-to-air missiles [J]. Aeronautical Missiles, 2008, (7): 46 – 49. (in Chinese)
赵鸿燕, 倪永平, 王秀萍. 红外探测器的发展及其在空空导弹上的应用 [J]. 飞航导弹, 2008, (7): 46 – 49.
- [11] Guo Jiaxiang, Xie Runzhang, Wang Peng, et al. Multi-dimensional infrared photodetectors [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(1): 40 – 60. (in Chinese)
郭家祥, 谢润章, 王鹏, 等. 多维度红外光电探测器 [J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(1): 40 – 60.
- [12] Fu Xiuhua, Wang Gang, Liu Dongmei, et al. Research and preparation of the visible and infrared control and guide system filters [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40 (1): 1 – 6. (in Chinese)
付秀华, 王刚, 刘冬梅, 等. 可见与红外制导系统高通滤光片的研制 [J]. 中国激光, 2013, 40(1): 1 – 6.
- [13] Guanhua Huang. Research on data acquisition, control and preprocessing of infrared detectors [D]. Xiamen: Xiamen University, 2008. (in Chinese)
黄冠华. 红外探测器数据采集、控制及预处理研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [14] Zhang Yipeng, Wang Xue, Ji Peixuan, et al. Research progress of graphene-based photo-detectors with different response mechanisms [J]. Journal of Luminescence, 2022, 43(4): 552 – 575. (in Chinese)
张翼鹏, 王雪, 纪佩璇, 等. 不同响应机制下的石墨烯基光电探测器研究进展 [J]. 发光学报, 2022, 43(4): 552 – 575.
- [15] Chiu L D, Su L, Reichelt S, et al. Use of a white light supercontinuum laser for confocal interference-reflection microscopy [J]. Journal of Microscopy, 2012, 246(2): 153 – 159.
- [16] Jing Gao, Feng Yu, Hongshen Kuang. 28 W high power supercontinuum fiber laser light source [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, (9): 2840 – 2843. (in Chinese)
高静, 于峰, 匡鸿深. 28 W 高功率超连续谱光纤激光光源 [J]. 红外与激光工程, 2014, (9): 2840 – 2843.
- [17] Perry S. Edwards, Andrea M. Wyant, David M. Brown, et al. Supercontinuum laser sensing of atmospheric constituents [C] // Conference on Laser Radar Technology and Applications XIV, Orlando, FL (US), 2009, 73230: 1 – 8.
- [18] Liu J, Liu K, Shi H, et al. High-power all-fiber mid-infrared supercontinuum laser source [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 21 – 25.