

文章编号:1001-5078(2023)06-0846-07

· 激光应用技术 ·

中波高重频激光干扰非线性响应现象试验研究

吴军勇, 陈念江, 韩隆, 谢桂娟, 褚凡忠, 李宝, 魏磊, 赵长松
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:针对中波探测器被中波高重频激光干扰时出现的非线性问题,设计了中波高重频激光器干扰制冷型中波 HgCdTe 焦平面探测器的干扰试验,分析了干扰出现的非线性响应输出现象,并得到了中波 HgCdTe 焦平面探测器干扰出现非线性响应时的阈值。

关键词:中波高重频激光;非线性响应;HgCdTe 焦平面探测器

中图分类号:TN215;TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.006

Experimental study on nonlinear response of the medium wave high repetition frequency laser interference

WU Jun-yong, CHEN Nian-jiang, HANG Long, XIE Gui-juan,
CHU Fan-zhong, LI Bao, WEI Lei, ZHAO Chang-song
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: In this paper, an interference test of a medium wave high repetition frequency laser interfering with a cooled medium-wave HgCdTe focal plane detector is designed, the nonlinear response output phenomenon of the interference is analyzed, and a threshold value for the nonlinear response of the medium wave HgCdTe focal plane detector when the interference occurs is obtained.

Keywords: the medium wave high repetition frequency laser; nonlinear response; HgCdTe focal plane detector

1 引言

HgCdTe 探测器工作的主要原理为通过光电效应将接收的目标红外光信号转换成电信号,将信号进行采样、放大、积分并顺序读出,传输至外部成像预处理电路进行成像处理,从而实现红外成像;通过中红外波段的激光照射可使红外探测器出现干扰信号,干扰激光强度较弱时,探测器的响应输出信号强度与激光干扰强度呈线性关系,当探测器接收到的红外信号足够强时,红外探测器将出现探测器饱和现象,焦平面探测器则以激光

光斑像点为中心呈现中心光斑区域饱和,随着激光功率的进一步增大,焦平面 HgCdTe 探测器的将出现混度与低输出的非线性响应现象^[1],相关文献进行了连续中波红外激光干扰单元探测器的理论和试验研究,尚未开展焦平面探测器的非线性响应试验与研究,本文设计中波高重频激光干扰中波 HgCdTe 焦平面探测器的干扰试验,分析了中波碲镉探测器在中波高重频激光干扰下出现非线性响应输出的现象,并得到了干扰出现非线性响应时的阈值。

2 基础理论

激光对 HgCdTe 焦平面探测器的干扰分为两个阶段:

2.1 线性响应阶段

线性响应阶段探测器中以激光光斑成像点像元为中心,像点的灰度值随激光干扰强度的增强而增大;干扰激光功率强度逐步增强,成像点的像元达到饱和,干扰激光功率进一步增强,呈现中心像素饱和,以激光光斑成像点像元为中心的一定范围内的像元出现灰度增加的干扰斑,干扰斑和饱和斑的面积随激光干扰强度的增加而增加,相关文献中实验结果表明^[1],随机干扰激光强度增加,饱和区域覆盖的直径与入射激光功率强度呈现 1/3 次方关系,且饱和区域半径 R_{sat} 与激光功率密度 I_L 的关系为:

$$r_{sat} = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi} \left(\frac{I_L}{I_{sat}}\right)} \quad (1)$$

其中, r_{sat} 为干扰饱和像素半径(像素数); I_L 为干扰激光功率密度 (W/cm^2); I_{sat} 为单像元饱和时的干扰激光功率密度 (W/cm^2)。

2.2 非线性响应

随着激光功率的进一步增强,当探测器像元的干扰强度达到饱和强度的 2~3 倍以上时,此时探测器像元将呈现混沌状态,如图所示,此时探测器的响应既不是稳定和规则的状态,也不是像噪声那样完全无序状态,是一种非周期的有序状态。反映在功率谱上,便是连续谱上迭加了一定宽度的线状谱,时间序列是完全随机的、周期的还是混沌的^[2],如图 1 所示。

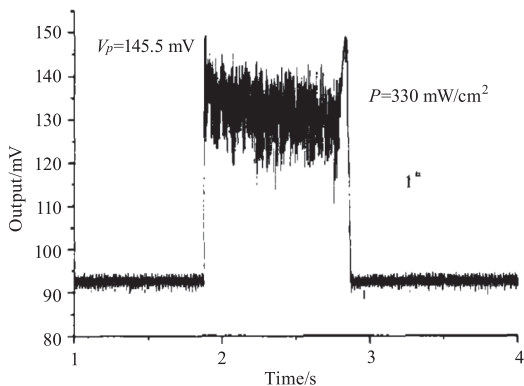


图 1 单元像素的混沌响应

Fig. 1 Chaotic response of unit pixel

随着干扰功率的进一步增强,探测器的响应进入另一个层级的非线性响应——低输出响应,直至功率到达一定强度后探测器完全零输出响应^[1]。

3 试验研究

中波高重频激光与中波连续激光相比具有更高的峰值功率,在光电干扰对抗中为常见的干扰光源,由于高重频激光具有更高的峰值功率,因此在干扰中更容易出现非线性响应现象。在相关人员的研究中,进行了连续激光的单像元的非线性响应的试验与研究^[1],对于中波高重频激光对焦平面探测器干扰后的响应情况未进行深入的研究,本文将开展相关试验并对试验结果进行研究和分析。

3.1 试验设计

采用中波红外高重频固体激光器作为试验干扰光源,激光器具体参数如表 1 所示。

表 1 中波激光器参数表

Tab. 1 Parameters of medium wave laser

峰值波长/ μm	激光器功率/ W	工作频率/ kHz	脉宽/ ns	激光发散角/ mrad
3.8~4.5	0.01~5 可调	10	70	2.2

被干扰对象采用光伏型 HgCdTe 焦平面探测器的热像仪,具体参数如表 2 所示。

表 2 中波热像仪参数表

Tab. 2 Parameters of medium wave thermal imager

探测波段	像元数量	像元尺寸/ μm	积分时间/ ms	镜头光学口径/ mm	焦距/ mm
中波	320 × 256	50	3	100	200

试验装置如图 2 布置,试验距离为 200 m,试验中,通过调节激光器电流得到如下激光器功率进行干扰试验,试验功率如表 3 所示。

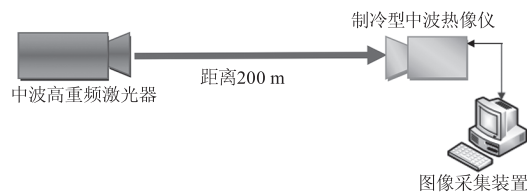


图 2 干扰试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of interference test

表 3 干扰激光输出功率列表

Tab. 3 List of interference laser output power

功率 1/W	功率 2/W	功率 3/W	功率 4/W	功率 5/W	功率 6/W	功率 7/W	功率 8/W	功率 9/W	功率 10/W	功率 11/W
0.01	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	5

3.2 功率密度计算

通过以上试验参数可知,可计算红外探测器焦平面上的激光功率密度 $I_{\text{焦}}$ 和热像仪镜头前的功率密度 $I_{\text{前}}$:

$$I_{\text{前}} = \frac{P\tau_1}{S_{\text{光斑}}} \quad (2)$$

$$P_0 = \frac{P\tau_1\tau_2 S_{\text{镜头}}}{S_{\text{光斑}}} \quad (3)$$

其中, P 为激光器发射的激光功率(W); P_0 为探测器接收到的激光功率(W); τ_1 为大气衰减系数; τ_2 为镜头衰减系数; $S_{\text{镜头}}$ 为中波热像仪光学镜头面积; $S_{\text{光斑}}$ 为激光在镜头前的光斑面积^[3-4]。

$$S_{\text{光斑}} = \pi \left(\frac{\theta \cdot L}{2} \right)^2 \quad (4)$$

其中, θ 为激光发散角; L 为激光器至中波热像仪镜头前的距离。

$$S_{\text{镜头}} = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (5)$$

其中, D 为红外热像仪镜头直径。

另,激光通过红外热像仪镜头在探测器焦平面处形成激光光斑面积 $S_{\text{焦光斑}}$ 大小为:

$$S_{\text{焦光斑}} = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{f\theta + d_2}{2} \right)^2 \quad (6)$$

$$d_2 = f \frac{2.44\lambda}{D} \quad (7)$$

得到:

$$S_{\text{焦光斑}} = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{f\theta + f \frac{2.44\lambda}{D}}{2} \right)^2 \quad (8)$$

其中, λ 为激光波长; f 为热像仪光学镜头焦距; D 为

光学镜头直径; θ 为激光发散角。

将公式(4)代入公式(2)中,可得到镜头前的激光功率密度 $I_{\text{前}}$:

$$I_{\text{前}} = \frac{P\tau_1}{S_{\text{光斑}}} = \frac{4P\tau_1}{\pi\theta^2 L^2} \quad (9)$$

将公式(3)、(6)代入公式(8)中,可得到焦平面上的激光功率密度 $I_{\text{焦}}$:

$$I_{\text{焦}} = \frac{P_0}{S_{\text{焦光斑}}} = \frac{4P\tau_1\tau_2 D^2}{\pi L^2 f^2 \theta^2 \left(\theta + \frac{2.44\lambda}{D} \right)^2} \quad (10)$$

由激光器的脉宽 ν 和频率 t_i 可得到探测器接收到峰值功率 P_2 与探测器接收到平均功率 P_0 的关系为:

$$P_2 = \frac{P_0}{\nu \cdot t_i} \quad (11)$$

将公式(3)、(6)、(9)代入,可得到焦平面上的峰值功率密度 $I'_{\text{焦}}$:

$$I'_{\text{焦}} = \frac{P_2}{S_{\text{焦光斑}}} = \frac{4P\tau_1\tau_2 D^2}{\pi L^2 f^2 \theta^2 \left(\theta + \frac{2.44\lambda}{D} \right)^2 \nu \cdot t_i} \quad (12)$$

由(7)、(8)、(10)可得到不同激光发射功率下的 $I_{\text{前}}$ 、 $I_{\text{焦}}$ 、 $I'_{\text{焦}}$ 。

3.3 试验结果与分析

采用 MATLAB 软件,对不同功率干扰下的探测器的原始图像进行分析处理,图像处理共分为不同功率激光干扰下原始图像(表 5)、干扰图像与原始图像求差图像(表 6)、不同干扰灰度值像素统计(表 7)等几个维度。

表 4 不同功率下对应不同功率密度值表

Tab. 4 Corresponding power density values under different powers

	功率 1	功率 2	功率 3	功率 4	功率 5	功率 6	功率 7	功率 8	功率 9	功率 10	功率 11
P/W	0.01	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	5
$I_{\text{前}}(W \cdot \text{cm}^{-2})$	5.8×10^{-6}	1.16×10^{-5}	1.68×10^{-5}	2.9×10^{-5}	5.8×10^{-4}	1.16×10^{-4}	2.32×10^{-4}	4.64×10^{-4}	9.28×10^{-4}	1.85×10^{-3}	2.9×10^{-3}
$I_{\text{焦}}(W \cdot \text{cm}^{-2})$	0.19	0.38	0.57	0.945	1.9	3.8	7.6	15.2	30.4	60.8	94.5
$I'_{\text{焦}}(W \cdot \text{cm}^{-2})$	271.5	543.0	814.5	1.35×10^3	2.72×10^3	5.43×10^3	1.09×10^4	2.17×10^4	4.34×10^4	8.69×10^4	1.35×10^5

表5 不同功率干扰下原始图像列表

Tab.5 List of original images under different power interference

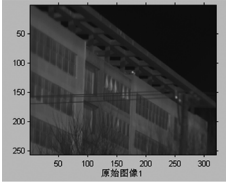
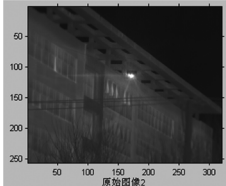
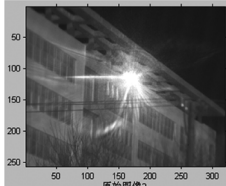
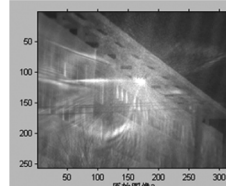
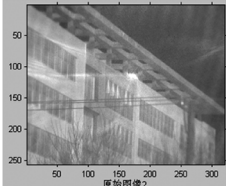
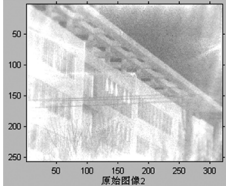
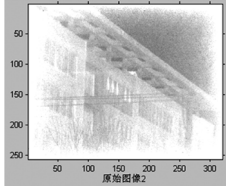
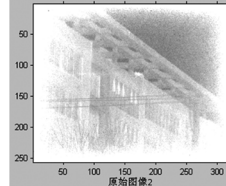
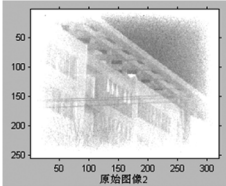
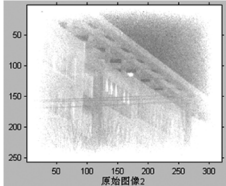
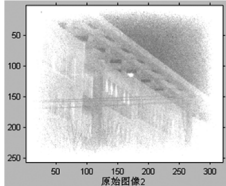
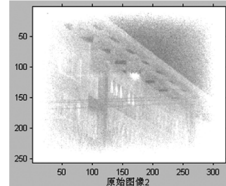
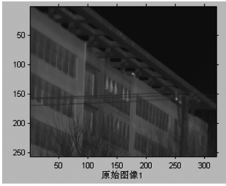
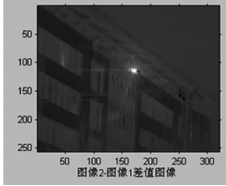
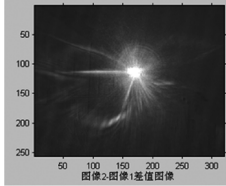
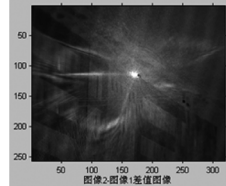
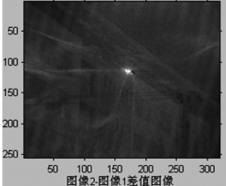
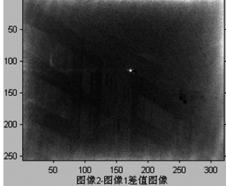
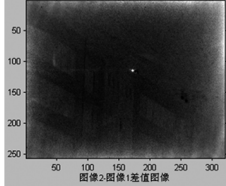
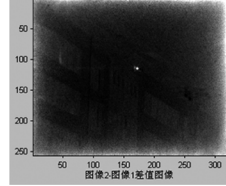
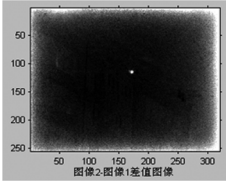
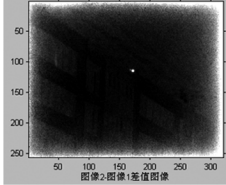
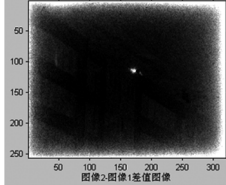
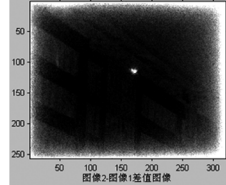
			
原始图像	0.01 W	0.02 W	0.03 W
			
0.05 W	0.1 W	0.2 W	0.4 W
			
0.8 W	1.6 W	3.2 W	5 W

表6 不同功率干扰下图像与原始图像差值图列表

Tab.6 Map list of difference between image and original image under different power interference

			
原始图像	0.01 W 差值图	0.02 W 差值图	0.03 W 差值图
			
0.05 W 差值图	0.1 W 差值图	0.2 W 差值图	0.4 W 差值图
			
0.8 W 差值图	1.6 W 差值图	3.2 W 差值图	5 W 差值图

续表 6 不同功率干扰下图像与原始图像差值图列表

Tab. 6 Map list of difference between image and original image under different power interference

差值图 3D 图

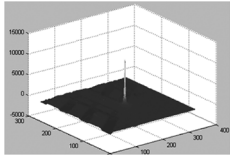
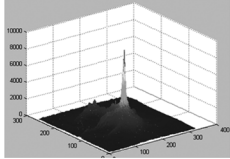
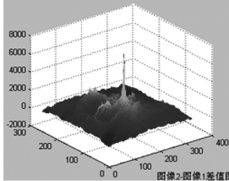
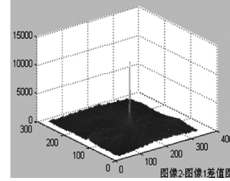
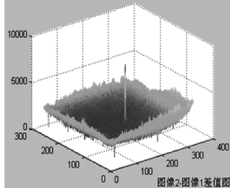
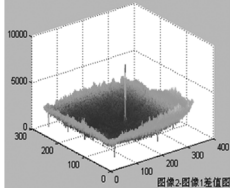
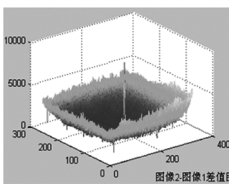
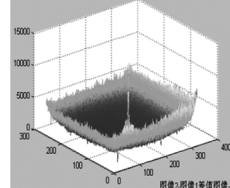
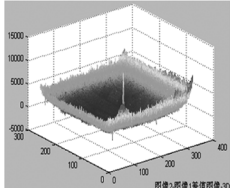
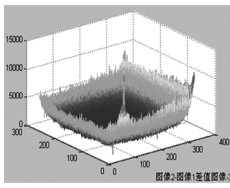
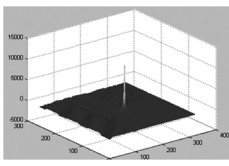
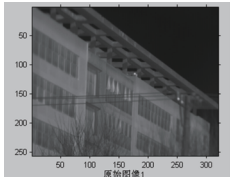
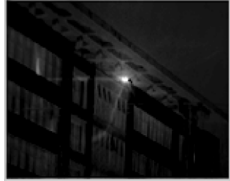
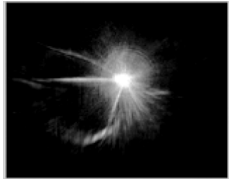
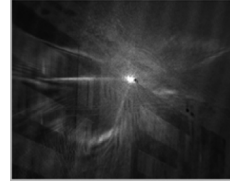
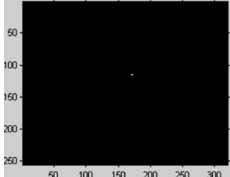
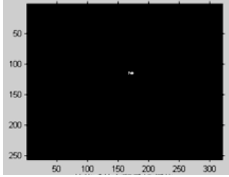
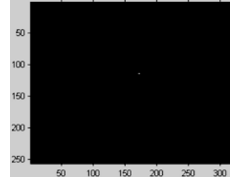
			
0.01 W 差值图 3D 图	0.02 W 差值图 3D 图	0.03 W 差值图 3D 图	0.05 W 差值图 3D 图
			
0.1 W 差值图 3D 图	0.2 W 差值图 3D 图	0.4 W 差值图 3D 图	0.8 W 差值图 3D 图
			
1.6 W 差值图 3D 图	3.2 W 差值图 3D 图	5 W 差值图 3D 图	

表 7 不同干扰灰度值像素统计表

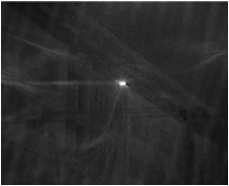
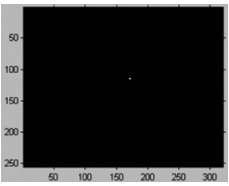

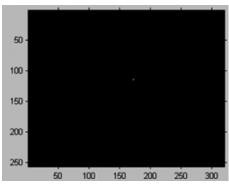

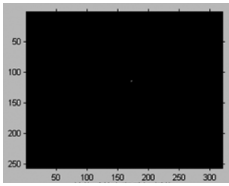
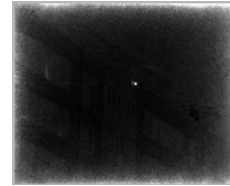
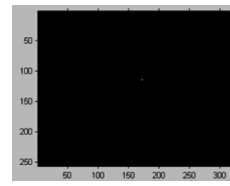
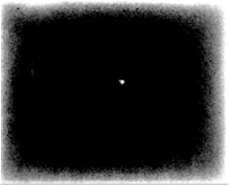
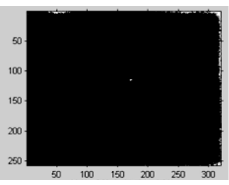
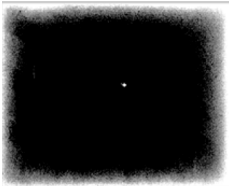
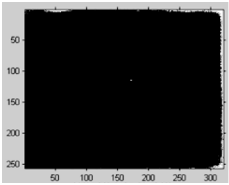

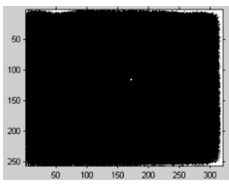
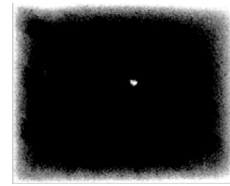
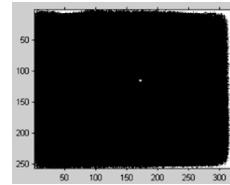
Tab. 7 Statistical table of pixels with different interference gray values

干扰灰度大于 6000 像素个数统计

	干扰像素个数统计 	干扰像素个数统计 	干扰像素个数统计 
	像素个数=4,灰度和值=1726625	像素个数=27,灰度和值=37364995	像素个数=3,灰度和值=71904713
原始图像(个数 0)	差值后的光斑局部阈值 	差值后的光斑局部阈值 	差值后的光斑局部阈值 
	0.01 W(个数 4)	0.02 W(个数 27)	0.03 W(个数 3)

续表7 不同干扰灰度值像素统计表

Tab.7 Statistical table of pixels with different interference gray values

<p>干扰像素个数统计</p>  <p>像素个数=6,灰度和值=95965773</p>  <p>差值后的光斑局部阈值 0.05 W(个数6)</p>	<p>干扰像素个数统计</p>  <p>像素个数=3,灰度和值=180739366</p>  <p>差值后的光斑局部阈值 0.1 W(个数3)</p>	<p>干扰像素个数统计</p>  <p>像素个数=3,灰度和值=180739366</p>  <p>差值后的光斑局部阈值 0.2 W(个数3)</p>	<p>干扰像素个数统计</p>  <p>像素个数=8,灰度和值=188591058</p>  <p>差值后的光斑局部阈值 0.4 W(个数8)</p>
<p>干扰像素个数统计</p>  <p>像素个数=892,灰度和值=204709374</p>  <p>差值后的光斑局部阈值 0.8 W(个数892)</p>	<p>干扰像素个数统计</p>  <p>像素个数=1603,灰度和值=206386997</p>  <p>差值后的光斑局部阈值 1.6 W(个数1603)</p>	<p>干扰像素个数统计</p>  <p>像素个数=2717,灰度和值=219150830</p>  <p>差值后的光斑局部阈值 3.2 W(个数2717)</p>	<p>干扰像素个数统计</p>  <p>像素个数=3400,灰度和值=221827364</p>  <p>差值后的光斑局部阈值 5 W(个数3400)</p>

得到干扰灰度值超过6000像素个数曲线图,如图3所示。

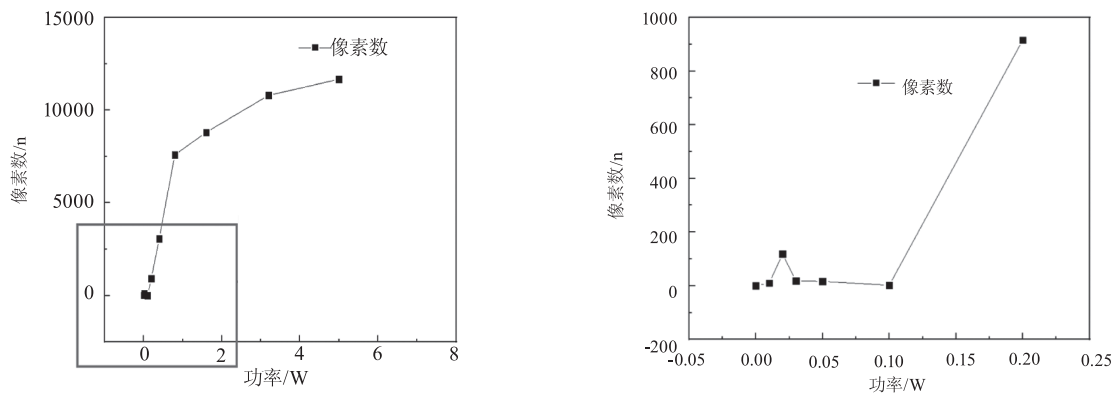


图3 干扰像素大于6000统计曲线

Fig.3 Statistical curve of interference pixels greater than 6000

同样的方式可以得到干扰像素超过 4000 像素个数曲线图如图 4 所示。

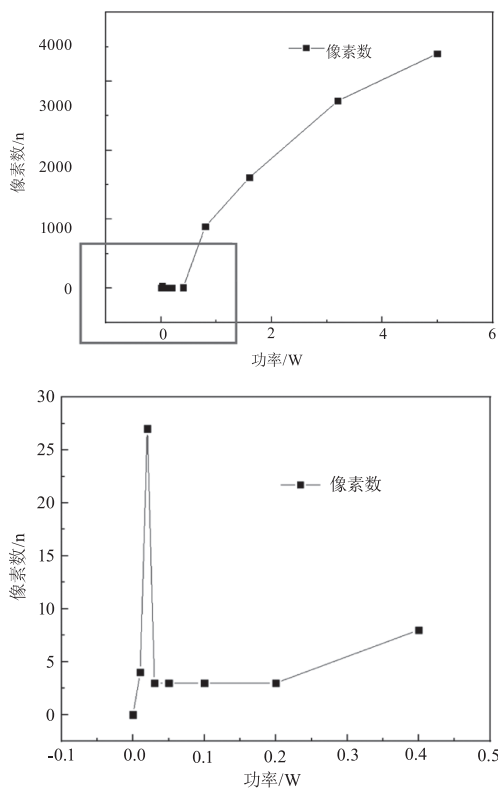


图 4 干扰像素大于 4000 统计曲线

Fig. 4 Statistical curve of interference pixels greater than 4000

由表中图像与数据可得干扰结果分析如下：

(1) 激光干扰功率为 0.02 W 时,探测器的响应仍为线性响应,中心干扰饱和半径逐步增大,以激光器像点为中心,干扰斑灰度向外呈逐渐减弱趋势;

(2) 当激光干扰功率在 0.03 W 时,探测器的响应已呈现为非线性响应,中心干扰饱和半径减小,干扰区域扩展到整个探测器焦平面区域;

(3) 当激光干扰功率从 0.03 W 逐步增加,探测器焦平面区域均有干扰,呈现四周区域干扰灰度值高,中间区域干扰灰度值低现象,且四边界区域随激光干扰功率增强干扰灰度值增加明显,且高灰度值干扰区域从四周往中间逐步增大,中心区域干扰灰度值无明显变化;

(4) 中心区域始终有几个像素点为高灰度值,分析认为是干扰激光器本身为一热源在探测器中心所成的像,由于干扰激光为高重频激光,在激光脉冲与脉冲的间隙,激光器本身的热辐照仍能在探测器中心累加成像,脉冲间隙成像并不受脉冲激光干扰非线性效应的影响;

(5) 当激光干扰功率从 0.01 W 增加到 5 W,整个焦平面探测器干扰像素(不论是灰度值大于 4000

还是大于 6000),都经历从少变多再变少再迅速变多的一个过程,变化的转折点约为 0.03 W 时;由此可判断激光功率为 0.03 W 时,探测器的响应从线性响应转变为非线性响应,此时对应的镜头前的功率密度 $I_{前} = 1.68 \times 10^{-5} \text{ W/cm}^2$,对应的探测器焦平面处的平均功率密度 $I_{焦} = 0.57 \text{ W/cm}^2$,探测器焦平面上高重频中波激光脉冲峰值功率密度 $I'_{焦} = 814.5 \text{ W/cm}^2$ 。

4 结论

试验结果表明,当中波高重频激光在中波 HgCdTe 探测器镜头前的平均功率密度大于 $I_{前} = 1.68 \times 10^{-5} \text{ W/cm}^2$,探测器焦平面处的平均功率密度大于 $I_{焦} = 0.57 \text{ W/cm}^2$,探测器焦平面上激光脉冲峰值功率密度大于 $I'_{焦} = 814.5 \text{ W/cm}^2$ 时,中波 HgCdTe 焦平面探测器将呈现非线性响应,此时探测器焦平面开始将呈现四周像元干扰灰度值高,中心像元灰度值较低的现象。

中波 HgCdTe 焦平面探测器在中波激光干扰作用下的非线性响应现象是普遍存在的,但目前得到的出现探测器非线性响应的参数为做此次试验使用的探测器得到,每一台探测器之前是否存在阈值差异有待后续进一步开展研究。

参考文献:

- [1] Lü Yueguang, Sun Xiaoquan. Fundamentals and applications of laser countermeasures [M]. Beijing: National Defense Industry, 2015: 229 - 233. (in Chinese)
吕跃广, 孙晓泉. 激光对抗原理与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 229 - 233.
- [2] Wang Keqiang, Hang Long, Wang Jianjun, et al. 3 ~ 5 μm solid-state laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 8(3): 169 - 173. (in Chinese)
王克强, 韩隆, 王建军, 等. 3 ~ 5 μm 固体激光器 [J]. 红外与激光工程, 2006, 8(3): 169 - 173.
- [3] Chu Xuelian, Qiq Zhenan, Zhang Yuansheng, et al. Experimental research of infrared detecting system disturbed by mid-wave infrared laser [J]. Infrared Technology, 2011, 33(8): 440 - 442. (in Chinese)
初学莲, 仇振安, 张元生, 等. 中红外激光对红外探测系统的干扰试验研究 [J]. 红外技术, 2011, 33(8): 440 - 442.
- [4] Chu Xuelian, Wu Qifeng, Zhang Yuansheng. Experimental research on jamming infrared seeker with mid-wave infrared laser [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(10): 1168 - 1170. (in Chinese)
初学莲, 吴奇峰, 张元生. 中红外激光对红外导引头干扰试验研究 [J]. 激光与红外, 2012, 42(10): 1168 - 1170.