

## 激光对长波红外探测设备的干扰效应研究

初学莲<sup>1</sup>, 姜冶<sup>2</sup>, 蔡猛<sup>1</sup>, 郁品一<sup>1</sup>, 张元生<sup>1</sup>, 周德召<sup>1</sup>

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000;

2. 中国人民解放军驻六一三所军事代表室, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 理论分析了激光对长波红外探测设备的干扰原理, 搭建了干扰试验环境, 通过试验研究了 9.4  $\mu\text{m}$  激光的功率、重复频率、束散角等参数对探测设备的饱和串音影响, 利用激光在探测器上所呈光斑大小以及光斑与背景对比度衡量红外探测设备产生饱和串音的程度, 经过分析确定了激光对红外探测设备的干扰效应取决于到达红外探测器上的激光功率密度。试验得到了在重复频率为 20 kHz 时, 长波红外探测设备的干扰阈值为 39.89  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , 取得了与理论分析一致的试验结论, 为红外探测设备的防护技术研究奠定了理论基础。

**关键词:** 激光; 干扰效应; 长波红外探测设备

中图分类号: TN249

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2016)03-0032-04

## Jamming Effect of Laser on Long Wave Infrared Detecting Equipment

CHU Xue-lian<sup>1</sup>, JIANG Ye<sup>2</sup>, CAI Meng<sup>1</sup>, YU Pin-yi<sup>1</sup>, ZHANG Yuan-sheng<sup>1</sup>, ZHOU De-zhao<sup>1</sup>

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;

2. Military Representative Office of AVIC, PLA in No. 613 Institute, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** Theoretical analysis is made to the principle of laser jamming on long wave infrared detecting equipment. The environment for laser jamming experiment was set up, through which the crosstalk effect of 9.4  $\mu\text{m}$  laser with different parameters of power, frequency and angle of divergence on detecting equipment was studied by experiments. The crosstalk level was scaled by spot of laser on detector and contrast ratio of the spot and background. It is concluded that the crosstalk effect is determined by laser power density on the detector. It is obtained through experiment that when laser frequency is 20 kHz, the jamming threshold of long wave infrared detecting equipment is 39.89  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , which is consistent with the theoretical analysis.

**Key words:** laser; jamming effect; long wave infrared detecting equipment

### 0 引言

长波红外探测设备具有抗电子干扰能力强、隐蔽性好、定位精度高、探测隐身目标能力强等特点, 并可完成对空目标探测、跟踪、定位, 同时兼顾对地面目标的探测、识别、跟踪、测距等作战任务, 是飞机航电系统的重要传感装备之一。国内外多型飞机均装备长波红外探测设备, 在战场上发挥着重要的作用。

光电对抗技术的快速发展, 使激光干扰对象已不局限于终端武器系统, 正在向光电探测设备扩展, 影响其对战场环境的探测, 并直接导致无法引导火控系统

实施打击。因此, 研究光电探测设备的激光干扰和防护技术十分必要<sup>[1-2]</sup>。国内对 HgCdTe 探测器的激光干扰研究做了许多工作, 已有研究所开展了 10.6  $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> 脉冲激光对长波红外探测器的干扰试验研究, 得出了 HgCdTe 探测器的干扰阈值; 某高校开展了 10.6  $\mu\text{m}$  激光对 HgCdTe 探测器的干扰阈值的实验研究, 并分析了不同脉宽的激光脉冲对干扰效果的影响; 而 9.4  $\mu\text{m}$  脉冲激光对机载长波红外探测设备的干扰试验研究, 国内至今未见报道。

本文将通过试验来研究 9.4  $\mu\text{m}$  长波红外激光的功率、重复频率、束散角等参数对长波红外探测设备的干扰效应, 以获得长波红外探测设备的干扰阈值, 为确定红外探测设备的防护方向并建立有效的防护措施提供参考。

收稿日期: 2014-10-31

修回日期: 2014-12-10

作者简介: 初学莲(1982—), 女, 吉林松原人, 硕士, 工程师, 研究方向为光电对抗。

## 1 工作原理

目标的红外辐射经过长波红外探测设备的光学系统进入红外探测器,探测器上的感光元器件把接收到的光信号转换为电信号,电信号被读取出来后经过积分放大、采样保持,通过输出缓冲和多路传输系统,最终使外界的热辐射分布转变成具有灰度信息的图像,图像的灰度和目标的辐射亮度成正比,通过目标检出及跟踪算法实现对目标的截获跟踪。

根据前期对中红外激光干扰红外探测系统的研究<sup>[3]</sup>,只要激光能够进入红外探测系统的核心部件——红外焦平面阵列探测器,并且具有足够大的功率密度值,就会对红外探测器实现软破坏,从而影响红外探测系统的搜索、跟踪性能,即可认为激光实现了对探测设备的有效干扰。由于红外探测器是能量累积型,并且具有极高的探测灵敏度,极易受到激光的干扰和损伤,利用激光对探测器件的辐照产生的光饱和和“串音”现象是对红外探测系统的一种很有效的干扰方法。

光饱和和“串音”现象是由红外焦平面探测器的结构和工作方式决定的,其光敏元和转移传输元都是串行的,各源之间用沟阻隔开,但基底是在一起的。红外焦平面探测器的每个像元可等效成一个势阱,所能存储和处理的最大电子电荷数是一定的。当较强的激光辐照探测器局部时,电荷向邻近势阱“溢出”(见图1),即在短时间内大量电荷在光信号积分时间内向邻近区域流动,造成“串音”。一般情况下,红外探测器的光信号积分时间为几微秒至几百毫秒,而产生电荷的时间为 $10^{-12}$  s的量级,因此电荷有足够的时间溢出。在有大量电荷存在情况下,电荷的收集、转移传输过程都有“串音”的可能。如果再增加激光强度,电荷的“串音”效应加剧,电荷溢出到探测器整个像面,产生全域饱和。虽然光饱和和“串音”现象并没有对探测器材料造成破坏,但干扰了探测系统的正常工作。

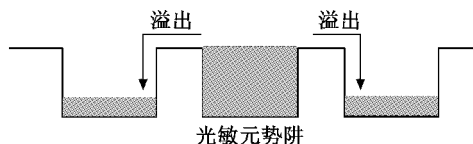


图1 探测器饱和串音原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of detector crosstalk effect

对于长波红外探测设备,对其饱和的干扰机理是相同的,决定干扰效果的主要因素是到达长波红外探测设备光学系统的激光功率密度。

## 2 试验设计

图2所示为试验布局示意图。

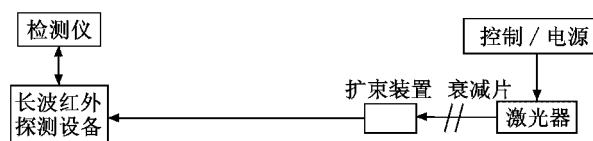


图2 干扰试验布局示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental setup

长波红外探测设备采用制冷型 HgCdTe 长波红外探测器,工作波长为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ ,面元数为 $320 \times 256$ ,面元尺寸为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ ,占空比0.9;长波红外激光器采用波长为 $9.4 \mu\text{m}$ 大功率 $\text{CO}_2$ 气体激光器,初始光斑为 $3 \text{ mm}$ ,束散角为 $8 \text{ mrad}$ ,输出功率为 $0 \sim 100 \text{ W}$ 。长波红外探测设备与激光器正对放置,使激光器成像在探测设备的视场内。激光器出光位置可根据需要放置扩束装置和/或衰减片,扩束装置的扩束倍率为 $1 \sim 10$ 可调节,衰减片衰减系数分别为0.1,0.2和0.5。

将试验设备上电,调整长波红外探测设备方位、俯仰,使长波红外激光器出光口基本呈现在视场中心。开启长波红外激光器的绿光准直光源,并调整激光器方位、俯仰,使绿光照射在长波红外探测设备视场中心附近,以上过程完成了长波红外探测设备和长波红外激光器的光轴对准。

将长波红外探测设备的红外视频信号输出到监视器上进行显示。

设置红外激光的功率、重复频率和束散角等参数,利用功率计测量激光输出功率,根据输出功率值,选择施加的衰减片种类(不同透过率)和数量。移开功率计,使激光入射到长波红外探测设备的光学系统中,观察监视器显示的视频画面是否受干扰及受干扰产生饱和和“串音”的程度,并记录视频数据。

## 3 试验结果

### 3.1 功率对干扰效果影响

在重复频率( $f = 20 \text{ kHz}$ )和束散角( $\theta = 8 \text{ mrad}$ )不变的情况下,改变长波红外激光的平均功率进行干扰试验,试验数据见表1。

从表1可以看出激光峰值功率为 $0.78 \text{ mW}$ 时,长波红外探测设备开始出现饱和串音。用光斑大小(在探测器上形成的光斑所占的像素数)和光斑与背景的对比值数值衡量饱和串音的程度(见图3),发现激光功率越高,饱和串音现象越明显<sup>[4-5]</sup>。

计算使探测器产生饱和串音的激光功率密度为







$$I = \frac{4 \cdot \tau_0 \cdot P_0}{\pi \cdot (R \cdot \theta)^2} \cdot \beta = 39.89 \text{ (mW/cm}^2\text{)} \quad (1)$$

即饱和串音发生的阈值为 $39.89 \text{ mW/cm}^2$ ,探测器像元势阱已被电荷充满,当激光峰值功率继续提高时,电荷

将向周围像元溢出,使未被激光照射区域照亮,因此经过饱和串音产生的激光光斑大于理论计算光斑,与文献中记载的 HgGeTd 红外探测器饱和干扰阈值一致。

表 1 不同功率红外激光干扰试验数据

Table 1 Experimental data of jamming with different infrared laser power

| 序号 | 峰值功率 $P_f/mW$ | 干扰图像  | 光斑大小 | 对比度   |
|----|---------------|---|------|-------|
| 1  | 0.078         |  | 309  | 2.69  |
| 2  | 0.78          |  | 1021 | 2.68  |
| 3  | 7.8           |  | 1832 | 3.03  |
| 4  | 39            |  | 3079 | 4.36  |
| 5  | 195           |  | 3446 | 27.96 |
| 6  | 500           |  | 3635 | 89.79 |

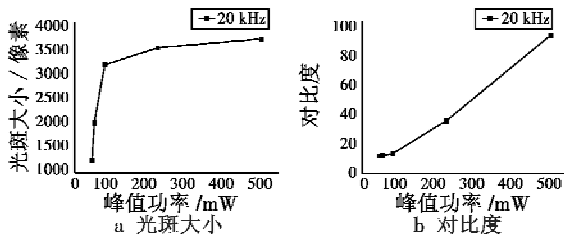






图 3 光斑大小、对比度与激光峰值功率关系曲线  
Fig.3 The grey contrast and the size of light spot versus the peak power of laser

### 3.2 重复频率对干扰效果影响

在激光平均功率和束散角 ( $\theta = 8 \text{ mrad}$ ) 不变的情况下,改变长波红外激光的重复频率进行干扰试验,试验结果见表 2。

表 2 不同重频率长波红外激光干扰试验

Table 2 Experimental data of jamming with different infrared laser frequency

| 序号 | 峰值功率 $P_f/mW$ | 重复频率 $f/kHz$ | 干扰图像  | 光斑大小 | 对比度   |
|----|---------------|--------------|---|------|-------|
| 1  | 1.75          | 1            |  | 4487 | 26.21 |
| 2  | 1.75          | 5            |  | 3874 | 24.71 |
| 3  | 0.35          | 20           |  | 3599 | 70.44 |
| 4  | 0.35          | 30           |  | 3724 | 75    |

从表 2 中可以看出,激光峰值功率和束散角相同时,重复频率不同,但干扰效果基本一致;峰值功率越高,激光饱和串音产生的光斑越大,干扰效果越明显。

重复频率不同时,对探测器干扰的差别主要是在






探测器一次积分时间内,激光脉冲的宽度和脉冲数目不同,但是由于峰值功率相同,所以干扰效果是一致的,且激光峰值功率对于干扰效果的影响起主要作用,即峰值功率越高,饱和串音效果越明显。

### 3.3 束散角对干扰效果影响

在激光平均功率 ( $P_f = 5.38 \text{ mW}$ ) 和重复频率 ( $f = 1 \text{ kHz}$ ) 不变的情况下,改变长波红外激光的束散角进行干扰试验,试验结果见表 3。

表 3 不同束散角的红外激光干扰试验

Table 3 Experimental data of jamming with different infrared laser angle of divergence

| 序号 | 束散角 $\theta/mrad$ | 干扰效果  | 光斑大小  | 对比度   |
|----|-------------------|---|-------|-------|
| 1  | 0.8               |    | 86356 | 51.3  |
| 2  | 1                 |    | 3944  | 17.73 |
| 3  | 1.33              |    | 3734  | 5.27  |
| 4  | 2.67              |   | 2693  | 3.28  |
| 5  | 8                 |  | 2086  | 3.24  |

从表 3 中可以看出,在激光平均功率、重复频率等参数不变的情况下,随着激光扩束倍数逐渐变小,即激光束散角逐渐变大,饱和串音效果逐渐减弱。

激光经过长波红外探测设备光学系统在红外探测器上成像光斑,当激光束散角变大,激光在探测器上产生的光斑变大,由于入射激光功率一定,光斑变大导致激光入射到红外探测器像元上的激光功率密度变小,所以饱和串音效果会逐渐减弱。

### 3.4 误差分析

对试验结果可能产生误差的原因有:

1) 激光器自身的激光输出功率存在不稳定性,即在同样供电输入的情况下,激光输出功率存在波动,波动范围不超过 1%,因此可认为激光输出功率存在最大 1% 的误差;

2) 由于激光具有一定束散角,且功率计探头面积有限,因此测量激光功率时将功率计放置在激光器出口位置,经过大气传输存在一定程度的衰减,但是由于是在试验室内,工作距离仅有几十米,因此认为大气对激光功率的衰减可忽略不计;

3) 探测器上激光光斑大小的测量是通过 Matlab 图像灰度值统计完成数据处理,对光斑边界的像素测量统计会存在一定的误差,但由于光斑边缘像素数目较少,因此对统计结果影响较小。

## 4 结论

试验结果与理论分析一致,即激光对长波红外探测设备的干扰效应为红外探测器的光饱和串音,并且饱和串音程度主要取决于入射到探测器单位面积上的激光脉冲峰值功率,即激光功率密度。当激光功率密度大于探测器的干扰阈值,则出现饱和串音干扰现象,且激光功率密度越高,干扰效果越好。对于重复频率为 20 kHz 的长波红外激光,长波红外探测设备发生饱和串音的激光干扰阈值在数十毫瓦每平方米量级。同时,根据大量干扰试验数据分析可以看出,红外探测设备的受干扰程度可通过激光在探测器上成像光斑的大小及光斑与背景的对比度反映出来,二者可以作为定量衡量饱和串音程度的指标,也可作为衡量激光干扰防护措施有效程度的指标。

## 参考文献

- [1] 牛燕雄. 光电系统的强激光破坏及防护技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2005. (NIU Y X. Research on high-power laser-induced damage and protective technology of OPO electronics systems[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.)
- [2] 张乐, 赵威, 王非. 光电探测器受强激光干扰与损伤风险分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(s1): 711-713. (ZHANG L, ZHAO W, WANG F. Risk analyzing of high energy laser effecting on photodetector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(s1): 711-713.)
- [3] 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, 449. (CHU X L, QIU Z A, ZHANG Y S, et al. Experimental research of infrared detecting system disturbed by mid-wave infrared laser[J]. Infrared Technology, 2011, 33(8): 440-442, 449.)
- [4] 周建民, 郭劲, 付有余. 激光对远程目标光电探测器的干扰技术分析[J]. 半导体光电, 2004, 25(4): 326-328. (ZHOU J M, GUO J, FU Y Y. Analysis of laser-induced disturbance to remote target detector[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2004, 25(4): 326-328.)
- [5] 王思雯, 郭立红, 赵帅. 脉冲激光对长波红外探测器干扰实验分析[J]. 控制系统, 2009, 25(4): 17-18. (WANG S W, GUO L H, ZHAO S. Experiment analysis of pulsed laser disturbance on long-wave infrared detector[J]. Control System, 2009, 25(4): 17-18.)
- (上接第 31 页)
- [2] 杨彦通, 龙洪明. 导弹战斗部破片杀伤实验误差分析[J]. 国防技术基础, 2003(3): 28-29. (YANG Y T, LONG H M. Error analysis of killing test on fragments of missile warhead[J]. Technology Foundation of National Defence, 2003(3): 28-29.)
- [3] 王高, 尹国鑫, 李仰军, 等. 电阻网靶破片群速度测量方法[J]. 探测与控制学报, 2011, 33(3): 47-55. (WANG G, YIN G X, LI Y J, et al. Fragments velocity measuring based on resistor net target[J]. Journal of Detection & Control, 2011, 33(3): 47-55.)
- [4] 庞秋红, 田会, 倪晋平. 六幕光幕靶测量破片群飞行参数算法[J]. 西安工业大学学报, 2008, 28(5): 417-421. (PANG Q H, TIAN H, NI J P. An algorithm to measure flying parameter of swarm of fragments with six light screens[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2008, 28(5): 417-421.)
- [5] 韦宏强, 王劲松, 冯进良, 等. 基于激光靶的战斗部破片群速度测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(10): 2225-2229. (WEI H Q, WANG J S, FENG J L, et al. Measurement method for velocity of warhead fragments based on laser screen[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(10): 2225-2229.)
- [6] 蔡荣立, 倪晋平, 田会. 一种抗光干扰光幕靶的设计与改进[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 790-792. (CAI R L, NI J P, TIAN H. A new design used in optical screen for measuring velocity of bullets[J]. Optical Technique, 2006, 32(5): 790-792.)
- [7] 王泽, 童幼堂, 李立纬. 防空导弹战斗部破片飞散运动的仿真分析[J]. 战术导弹技术, 2010(6): 93-96. (WANG Z, TONG Y T, LI L W. Dispersion process simulation of warhead fragments of anti-air missile[J]. Tactical Missile Technology, 2010(6): 93-96.)
- [8] 吴洪波, 王笑寒, 孔丽. 舰空导弹战斗部破片飞散运动规律解析[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(5): 34-36, 70. (WU H B, WANG X H, KONG L. Analysis of dispersion movement rule of warhead fragment for ship-air missile[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(5): 34-36, 70.)