

InSb 面阵探测器波段内脉冲激光干扰响应特性研究

刘俊明¹, 李丽娟^{1,2}, 王朝林^{1,2}, 段 萌^{1,2}

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009; 2. 航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘要: 介绍了激光定向干扰红外探测系统的干扰机理及波段内激光定向干扰的主要干扰方式。以 InSb 红外探测成像系统为研究对象, 开展了典型条件下的波段内脉冲激光定向干扰试验, 分析了 InSb 面阵探测器对波段内脉冲激光干扰的响应特性, 获取了探测器在脉冲激光干扰下的损伤模式和损伤阈值, 为后续深入研究激光定向干扰效能奠定基础。

关键词: 脉冲激光; 定向干扰; 红外探测系统; 响应特性; InSb 探测器

中图分类号: TN249, TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2021)05-0478-05

Response Characteristics of an InSb FPA Detector using Above-band Pulsed-laser Jamming

LIU Junming¹, LI Lijuan^{1,2}, WANG Chaolin^{1,2}, DUAN Meng^{1,2}

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang 471009, China)

Abstract: The interference mechanism of laser directional jamming to an infrared detection system was investigated in this study, and the chief jamming mode of the above-band laser was discussed. A pulsed-laser jamming experiment was conducted using the infrared detection system based on an indium antimonide (InSb) focal plane array(FPA) detector, and the response characteristics of the InSb FPA detector with above-band pulsed-laser jamming was analyzed. The failure mode and failure threshold of the InSb FPA detector were derived. The results provide a basis for further research into directional infrared countermeasure performance against infrared imaging guided weapons.

Key words: pulsed-laser, laser directional jamming, infrared detecting system, response characteristic, InSb detector

0 引言

随着红外制导技术的迅速发展, 成像型导引头由于其灵敏度高、探测距离远、全天候工作等特点在现代战争中发挥了重要的作用^[1]。为有效抑制红外成像制导武器, 激光定向干扰技术在近年得到重点发展, 并有望成为未来红外对抗的主要方式。

作为成像型导引头的核心器件红外探测器, 由于其芯片灵敏度高、材料强度低, 极易受到激光的干扰和损伤。因此, 红外探测器的激光干扰、毁伤等问题受到世界各国的普遍重视。美国佐治亚理工(Georgia Tech)的信号技术实验室于20世纪90年代末研制开发了红外探测成像仿真系统(imaging simulation for infrared sensors, ISIS)用于红外成像导引头信号处理

和红外对抗方面的研究^[2]; 美国 McDonnell Douglas 公司研制了专门的激光辐照光电探测器的检测设备。以实验物理学家 Bartoli 为代表的一大批科学家开展了大量激光损伤探测器靶材的实验, 得出了一批有价值的各类探测器损伤阈值^[3]。国内也已开展了大量关于激光损伤效应的实验和理论研究工作, 如中国科学院长春光学精密机械与物理研究所开展了激光对长波红外 HgCdTe 探测器干扰的实验研究^[4]; 中国空空导弹研究院针对探测器窗口蓝宝石开展了长波连续激光热力学损伤特性研究^[5]; 西安电子科技大学与中国空空导弹研究院联合开展了基于激光干扰红外成像系统的调制传递函数研究^[6]。国防科技大学郑鑫等研究了波段外连续激光辐照对碲化铟探测器影响^[7]。

本文主要针对中波 InSb 光伏型红外面阵探测器

收稿日期: 2020-06-28; 修订日期: 2020-08-21.

作者简介: 刘俊明(1979-), 女, 辽宁锦州人, 高级工程师, 硕士, 主要研究领域为红外探测技术、红外信息处理技术。E-mail: 19393185@qq.com。

基金项目: 航空科学基金(20170112003)。

开展波段内脉冲激光定向干扰试验,通过试验分析 InSb 面阵探测器对波段内脉冲激光干扰的响应特性、损伤模式及损伤阈值,为后续及激光定向干扰研究提供理论支持。

1 激光对红外探测系统的干扰机理

激光干扰主要是利用激光束辐照,使系统的红外探测器饱和或暂时失效,从而导致目标无法检出,失去制导能力^[8]。激光对红外成像系统干扰的机理实质上就是利用激光高度集中的能量来辐照成像系统的红外探测器,使红外探测系统光电信号饱和、信号处理通道阻塞、甚至破坏红外探测器,使导弹丢失目标,从而使目标脱离导弹视场范围,激光干扰成像过程如图 1 所示。

激光器发射激光,经过大气传输至光学系统上,光学系统接收能量并将能量会聚到探测器上。因此可以把激光能量传输的过程表示为:激光光束→大气传输→光学系统→探测器。激光在到达探测器焦平面前,存在诸多影响因素,可归纳为发散角、功率、波长等激光干扰的本征特征和大气、光学系统等外部特性^[9]。

激光定向干扰技术利用激光束的相干性,将能量集中到很小的空间立体角内,并照射到红外成像系统实现诱骗、致眩和毁伤,从而使导弹失去制导能力。其中毁伤又分为致盲(波段内毁伤)和波段外毁伤,致盲一般是指采用波段内大功率激光器照射探测器使整个面阵饱和甚至直接破坏芯片,使其失去探测能力;而波段外毁伤是采用波段外超大功率的激光器,直接破坏红外成像系统光学元件、探测器,此处不加以讨论。接下来将针对波段内脉冲激光对中波 InSb

红外面阵探测器干扰特性进行研究。

2 激光干扰试验

试验在实验室环境完成,试验装置主要包括激光干扰装置、红外成像探测系统、测试设备,试验布局如图 2 所示。红外成像探测系统布置在一侧,激光干扰装置布置在另外一侧,两者之间的距离为 5 m。激光从激光器中发出后,通过平行光管和扩束装置后,达到红外探测系统。

干扰对象为红外探测系统,该系统由光学分系统、红外成像探测器及其处理板组成。光学分系统采用折返式光学结构,成像探测器为 128×128 阵列的 InSb 探测器,响应光谱范围为 3~5 μm。试验激光器输出中心波长设置为 4.1 μm,频率为 110 Hz。经过扩束装置后光斑直径为 100 mm。通过功率计标定红外成像系统镜前功率密度。调整光路中的衰减片,从而改变干扰激光能量密度。

3 试验结果分析

试验中,激光采用垂直入射方式,监测不同能量密度激光照射红外探测系统后,探测器输出的图像,分析激光对 InSb 面阵探测器的干扰、损伤特性。

3.1 干扰特性

在重复频率、占空比一定的情况下,不同能量密度脉冲激光在探测器上形成的光斑分布情况如图 3 所示。图中(a)、(b)、(c)、(d)对应的脉冲激光能量密度分别为 $2 \times 10^{-6} \text{ J/cm}^2$ 、 $8 \times 10^{-6} \text{ J/cm}^2$ 、 $6 \times 10^{-5} \text{ J/cm}^2$ 、 $1 \times 10^{-4} \text{ J/cm}^2$ 。可发现随着干扰激光能量密度的增加,探测器输出的红外图像上的干扰光斑持续增大。

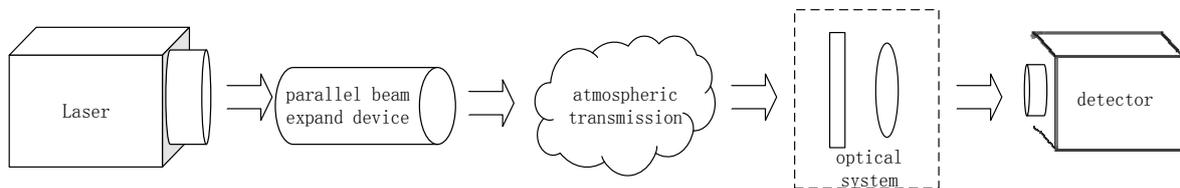


图 1 激光干扰成像过程示意图
Fig.1 Diagram of laser jamming imaging process

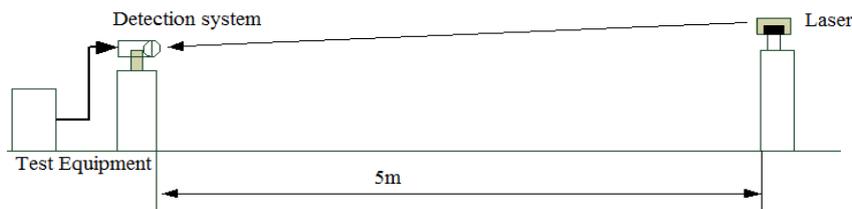


图 2 激光干扰试验布局示意图
Fig. 2 Schematic diagram of laser jamming experimental setup

干扰光斑大小随干扰激光能量密度变化过程如图4所示。当焦面能量密度小于 10^{-5} J/cm^2 时, 光斑面积较小, 与目标相似, 此时激光对红外成像系统干扰主要是诱骗。但当焦面能量密度大于 10^{-5} J/cm^2 时, 干扰光斑随激光能量的增加迅速变大, 光学系统的内部反射也随之增强, 激光对红外成像系统干扰主要是致眩效果。当焦面能量密度达到 10^{-3} J/cm^2 时光斑占满视场但未仍饱和, 但目标与激光干扰的分离更加困难。

干扰激光能量继续增加, 探测器面阵也没有达到饱和。只有当焦面能量密度达到 10^{-1} J/cm^2 时, 干扰光斑中心像元性能下降, 周围相邻像元才出现饱和现象, 干扰去除后, 中心像元对人体温度的红外辐射已无响应。当能量密度继续增大时, 中心像元彻底损坏,

周围相邻像元饱和现象消失。饱和像元数变化情况如图5所示。

图6为干扰光斑平均灰度和中心像元灰度与干扰激光能量密度的关系曲线。如图6所示, 当干扰激光能量小于 10^{-6} J/cm^2 时, 干扰光斑的平均灰度随干扰激光能量密度的增加而增大; 当干扰激光能量在 $10^{-6} \text{ J/cm}^2 \sim 10^{-3} \text{ J/cm}^2$ 之间时光斑的平均灰度随激光能量增加开始下降, 主要是此时光斑面积迅速增大, 致眩效果增强导致光斑平均灰度降低; 当干扰激光能量密度大于 10^{-3} J/cm^2 时, 干扰光斑接近全屏后, 其平均灰度随干扰激光能量密度的增加又开始增大, 增大趋势逐渐趋缓。

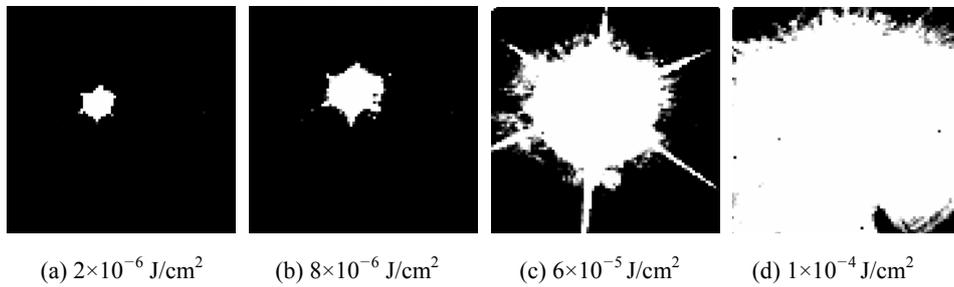


图3 不同能量密度脉冲激光干扰效果图

Fig.3 Jamming effect of different energy density in pulsed-laser

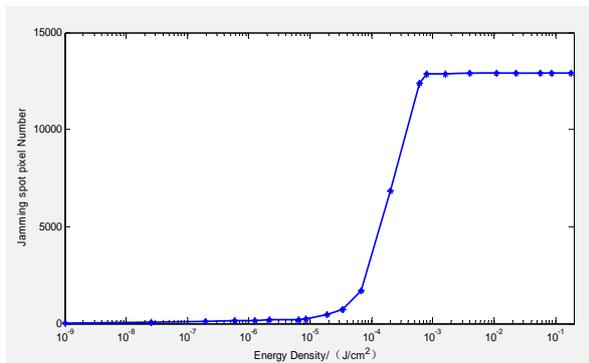


图4 不同能量密度激光干扰下探测器干扰光斑大小

Fig.4 Pixels of jamming spot varying with energy density of jamming laser

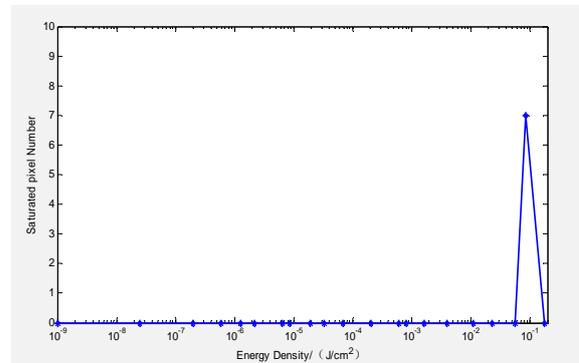


图5 饱和像元数随干扰激光能量变化情况

Fig.5 Saturation pixels of jamming spot varying with energy density of jamming laser

像的三维灰度图。图中(a)、(b)、(c)、(d)对应的干扰激光焦面能量密度分别为 10^{-6} J/cm^2 、 10^{-5} J/cm^2 、 10^{-4} J/cm^2 、 10^{-2} J/cm^2 。

干扰光斑中心像元灰度与光斑平均灰度一样, 随着干扰激光能量的增加也是先增大后减小, 当焦面能量密度小于 10^{-5} J/cm^2 时, 中心像元的灰度随干扰激光的能量升高而增大, 中心像元处于正常的响应状态; 当焦面能量密度达到 10^{-5} J/cm^2 以后, 探测器出现信号记忆效应, 输出电压降低, 此时干扰光斑中心像元的灰度随着干扰激光能量的增加开始降低; 当干扰激光能量达到 10^{-2} J/cm^2 , 中心像灰度迅速增加。具体变化过程如图6所示。

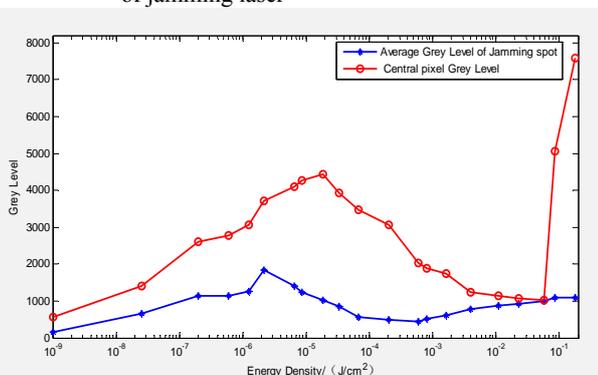


图6 光斑平均灰度、中心像元灰度随激光能量变化情况

Fig.6 Average gray of jamming spot and central pixel gray varying with energy density of jamming laser

图7 为不同能量密度激光干扰下探测器输出图

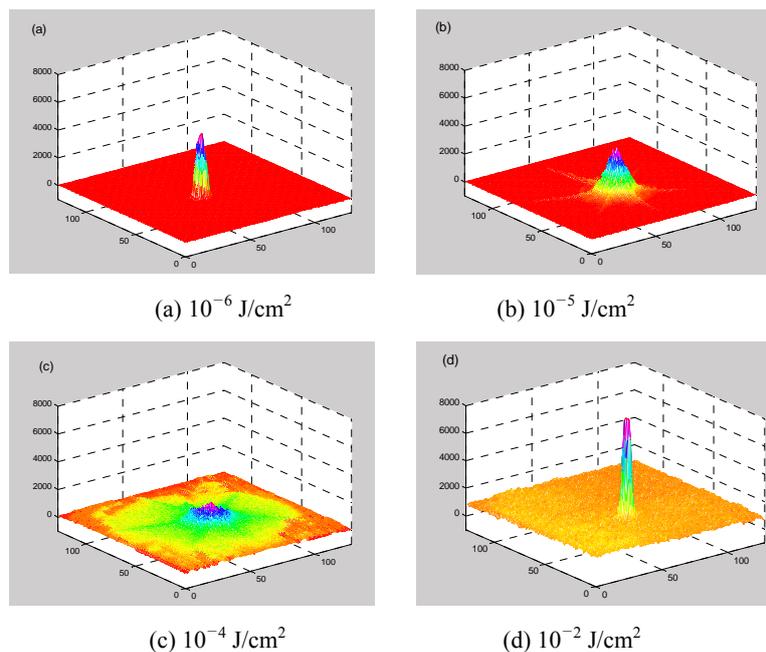


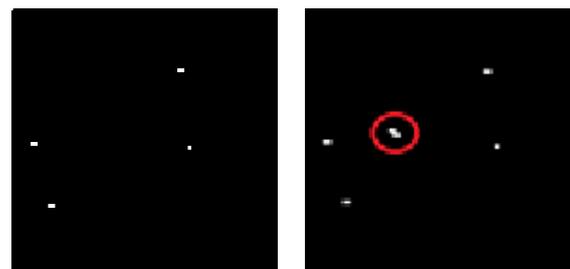
图7 不同能量密度激光干扰下探测器三维灰度图

Fig. 7 Gray scale image of InSb FPA detector with different energy density jamming laser

3.2 损伤特性

当干扰激光焦面能量密度达到 10^{-1} J/cm^2 , 中心像元出现热损伤, 探测器 p-n 结退化, 探测器的暗电阻增加, 光电探测器对信号光的响应率下降, 表现为此时中心像元对人体温度的红外辐射没有响应。这种热损伤不可逆且可以积累, 随着干扰激光能量密度的继续增加, 当干扰激光焦面能量密度达到 $2 \times 10^{-1} \text{ J/cm}^2$ 时, 探测器光敏芯片出现硬损伤, 干扰光斑中心的像元损坏, 失去探测能力, 实现了波段内激光干扰局部致盲的效果。图 8 中(a)、(b)分别为探测器焦平面能量密度为 $2 \times 10^{-1} \text{ J/cm}^2$ 激光照射前后探测器成像图。图(a)为激光照射前探测器对均匀背景的成像图, 图中可见有 4 处盲元。图(b)为激光照射后探测器对同一均匀背景的成像图, 图像增加一处盲元, 如图内圆圈处所示。这主要是由于探测器芯片被激光照射后出现了点损伤, 导致像面出现新的盲元簇。试验中, 在激光功率不变的条件, 继续增加照射次数, 损伤像元数会有所增加, 但增大到一定范围后基本维持不变。

脉冲激光的辐照功率继续增大, 当焦面能量密度达到 $4 \times 10^{-1} \text{ J/cm}^2$ 时, InSb 探测器开始出现线损伤, 如图 9(a)所示, 图中白色线条为线损伤。脉冲激光照射次数继续增加, 探测器线损伤情况加剧如图 9(b)所示。当照射次数累积到一定程度, 线损伤情况不再变化, 但探测器的整个像面探测率下降约 30%左右, 具体成像效果如图 9(c)所示。



(a) 激光照射前 (b) 激光照射后
(a) Before laser irradiation (b) After laser irradiation

图8 InSb 面阵探测器点损伤情况

Fig.8 Pixel damage of InSb FPA detector

通过试验发现, 探测器芯片在脉冲激光照射下已经出现大面积裂纹, 但探测器窗口、滤光片等光学元件依然完好, 与波段外激光毁伤效果明显不同。受试验激光器条件限制, 本次试验未实现探测器全区域致盲, 但在波段内脉冲激光定向干扰下探测能力已显著下降。

4 结语

对于中心波长为 $4.1 \mu\text{m}$, 频率为 110 Hz 的脉冲激光, 随着干扰激光能量密度的增加, 干扰光斑的大小随之变大直到占满全屏; 干扰光斑的平均灰度和中心像元灰度随干扰激光能量密度的增加经历一个先增大再减小然后又增大的过程; 低频脉冲激光干扰很难让探测器达到全屏饱和。

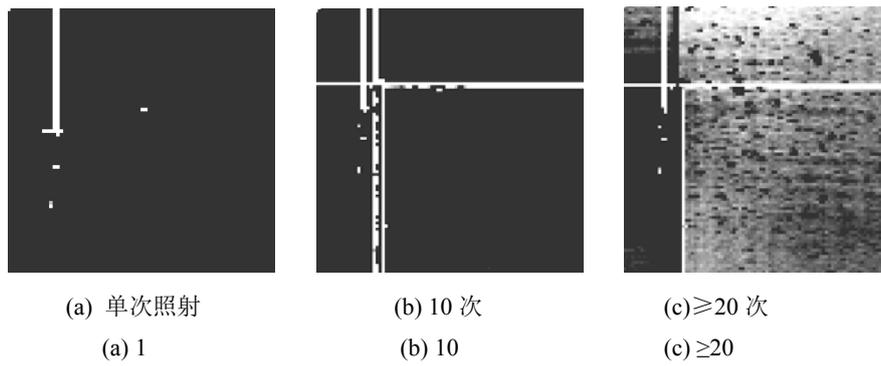


图9 不同激光照射次数下 InSb 面阵探测器线损伤情况

Fig.9 Line damage of InSb FPA detector with different times of laser irradiation

当焦面能量密度小于 10^{-5} J/cm^2 时, 脉冲激光对红外成像系统干扰主要是诱骗。当焦面能量密度大于 10^{-5} J/cm^2 时, 激光对红外成像系统干扰主要是致眩。当干扰激光焦面能量密度达到 $2 \times 10^{-1} \text{ J/cm}^2$, InSb 面阵探测器出现点损伤; 当焦面能量密度达到 $4 \times 10^{-1} \text{ J/cm}^2$ 时, 探测器出现线损伤, 整个像面探测率下降 30%左右。

由此可知, 低频脉冲激光对 InSb 面阵探测器干扰的光学效应有限, 热学效应可使探测器出现点损伤、线损伤, 从而使探测器局部致盲、探测能力显著下降。若脉冲激光功率足够大, 完全有可能毁伤探测器整个芯片, 使其彻底失去探测能力。

参考文献:

[1] 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.
CHU Xuelian, QIU 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.

[2] John S, Di Marco. Closed loop modeling of imaging infrared missiles[C]// *Proc. of SPIE*, 1998, 3375: 221-229.

[3] 陈晓琪, 潘谊春, 董文锋, 等. “全球鹰”光电探测系统激光干扰饱和和阈值分析[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(5): 33-36.
CHEN Xiaqi, PAN Yichun, DONG Wenfeng, et al. Saturation threshold analysis of laser interference for global Hawk's photoelectric detection system[J]. *Optic & Optoelectronic Technology*, 2015, 13(5): 33-36.

[4] 王思雯, 李岩, 郭立红, 等. CO₂ 激光对长波红外 HgCdTe 探测器干

扰的分析[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(2): 102-104.
WANG Siwen, LI Yan, GUO Lihong, et al. Analysis on the disturbance of CO₂ laser to long-wave infrared HgCdTe detector[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2010, 29(2): 102-104.

[5] 张文锋, 郭云芝, 燕飞, 等. 蓝宝石长波连续激光热力学损伤特性研究[J]. 航空兵器, 2016(2): 52-55.
ZHANG Wenfeng, GUO Yunzhi, YAN Fei, et al. Study on thermodynamics damage characteristic of sapphire from CW laser[J]. *Aero Weaponry*, 2016(2): 52-55.

[6] 徐强, 潘丰, 黄莉, 等. 基于激光干扰红外成像系统的调制传递函数研究[J]. 航空兵器, 2017(3): 59-63.
XU Qing, PAN Feng, HUANG Li, et al. Study on MTF of laser jamming infrared imaging system[J]. *Aero Weaponry*, 2017(3): 59-63.

[7] 郑鑫. 铽化镧探测器在波段外连续激光辐照下的效应研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
ZHENG Xin. Research on the Irradiation Effects of Insb Detectors under Sub-band CW Laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.

[8] 殷艳华, 王学伟. 强激光干扰红外成像制导弹效能仿真研究[J]. 红外技术, 2008, 30(1): 18-20.
YIN Yanhua, WANG Xuewei. Simulation research on the jamming performance of laser to IR imagery guidance[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(1): 18-20.

[9] 王冰, 成斌, 赵威, 等. 3.8 μm 激光对中波红外成像导引头的定向干扰性能研究[J]. 红外, 2016, 37(10): 30-34.
WANG Bing, CHENG Bin, ZHAO Wei, et al. Research on directional jamming to IR imaging seeker by 3.8 μm laser[J]. *Infrared*, 2016, 37(10): 30-34.