

扫描成像系统的激光干扰效果分析

赵铭军¹, 曹卫公², 胡永钊², 沈 严², 郑永超²

(1. 西安电子科技大学技术物理学院 西安 710071; 2. 中原电子技术研究所 郑州 450005)

【摘要】从破坏机理和损伤阈值方面分析了光电探测器的干扰机理。给出了激光干扰概率模型, 提出自适应干扰和时域均匀干扰两种干扰模式, 对两种不同干扰方式下扫描成像设备的干扰概率进行了理论计算并得出了试验结果, 验证了侦察-干扰工作模式的有效性, 证明了激光自适应干扰是光电对抗中的首选干扰方式。

关键词 光电对抗; 自适应干扰; 干扰效果; 干扰机理

中图分类号 TN977 文献标识码 A

Analysis on Effects of Laser Interfering Against Scanning Imaging System

Zhao Mingjun¹, Cao Weigong², Hu Yongzhao², Shen Yan², Zheng Yongchao²

(1. School of Technical Physics Xidian University Xian 710071;

2. Zhongyuan Research Institute of Electric Technology Zhengzhou 450005)

Abstract The interfering mechanism on the photoelectric detector is analyzed in damage mechanism and jamming threshold. The model of laser interfering probability is given. The self-adaptive interference and even time-domain interference are provided and the theoretic probability of two different types of interference on the IR scanning imaging systems is calculated. The effectiveness of surveillance and interference mode is proved in the experimental results. It is also proved that the laser self-adaptive interference is the first choice in different types of optoelectronic countermeasures.

Key words optoelectronic countermeasures; self-adaptive interference; interfering effects; interfering mechanism

光电精确制导武器是现代战争的主要攻击手段, 光电对抗是在这种战争背景模式下迅速发展起来的新兴技术。激光有源干扰是光电对抗技术的重要组成部分, 即用激光对来袭的光电装备进行攻击, 使其光电传感器暂时或永久失效, 从而达到有效的防御目的。在有源干扰技术中, 当发现来袭目标后, 通常可采用两种不同的干扰模式, 一种是利用高重频激光或大功率激光对来袭目标发射时域均匀的干扰脉冲, 称之为时域均匀干扰模式, 另一种方式是根据目标工作特征发射时域上非均匀的干扰激光, 使发射的干扰激光与目标的工作特征相匹配, 称之为自适应干扰模式。采用不同的干扰方式将会导致不同的干扰效果。

1 干扰特点分析

1.1 激光干扰机理

1.1.1 干扰对象

激光干扰/致盲的主要攻击目标是敌方的光电探测器, 包括光学系统、调制器、光电探测器等。一般在战术应用中, 干扰/致盲激光器的发射功率与强激光相比要弱得多, 而目标的光学系统、调制器及其他组成

材料的损伤阈值很高,抗辐照打击能力很强,战术激光器的发射能量对它们基本没有杀伤能力。相对来说,光电探测器是其最薄弱的环节,它的损伤阈值要远远低于光电装备中其他材料的损伤阈值,如CO₂连续波激光要使石英玻璃产生炸裂、解理、熔融,辐照强度需要1 200 W/cm²,而对于红外探测器,如PbS、PbSe,它们的抗连续激光打击阈值只有0.1~1 W/cm²。因此,在战术应用时目标的光电探测器是首选的攻击对象。

1.1.2 破坏机理

激光对光电探测器的破坏机理主要有三种效应^[1],即热烧蚀、力学效应和辐射破坏,不论哪种效应,都应使目标上接收到足够的辐照度。激光破坏一般分为硬破坏和软破坏,硬破坏的阈值较高,约为数千到一万以上焦耳每平方厘米,如对于飞机蒙皮和导弹壳体等金属材料的破坏;软破坏所需的激光功率较低,如对光电传感器的破坏就属于软破坏,仅需数十焦耳每平方厘米。

所有的光电探测器在设计与制造时^[2],为满足对远距离弱信号的探测,要求尽量提高其灵敏度和信噪比,并选择线性工作范围,线性工作段一般只能提供3~4个数量级的动态范围。当它受到强光照射,特别是激光,就会超出光电探测器的线性工作范围,产生记忆、饱和、信号混沌和受激光散射等一系列非线性光学效应。其中,当饱和、混沌效应出现时,光电探测器会暂时失效,这时所需的激光能量低,对于各种探测器均有干扰效应。熔化、汽化等永久性破坏需要的能量比较高,将使光电探测器完全失效。

光电探测器材料的光吸收能力一般较强,其峰值吸收系数一般为10³~10⁵ cm⁻¹,因此入射其上的干扰激光大部分被吸收,引起温度上升,造成不可逆的热破坏。鉴于此,光电探测器很容易被强激光辐射破坏。激光造成的不可逆的热破坏有破裂、碳化、热分解、熔化、汽化等。

1.1.3 损伤阈值

光电探测器的损伤阈值取决于激光照射时间、功率密度、波长、探测器结构、探测器材料的光学和热

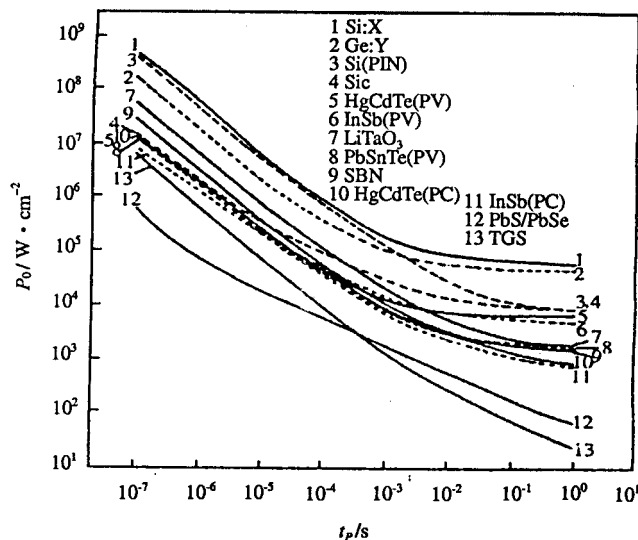


图1 各种材料的激光损伤阈值 P_0 与辐照时间的关系

学特性等^[3]。美国海军研究实验室将探测器的响应率不可逆地减少10%时的辐射能量密度定义为发生损伤阈值,将响应率减少到1%以下时的辐射能量密度定义为严重损伤阈值。为了确定损伤阈值,国内外已经对红外探测器材料的激光破坏进行了大量实验研究,获得了大量的实验数据,给出了各种材料的激光损伤域值与辐照时间的关系,如图1所示。

图中汇总了Si:X、Ge:X、Si、HgCdTe、SBN、PbSnTe、PbS、PbSe、TGS等红外探测器材料受不同波长(10.6 μm、1.06 μm)激光辐照时,开始出现激光损伤时的阈值 P_0 与辐照时间的关系。

从图中可以看出,每种红外探测器材料受激光辐照时,开始出现激光损伤时的阈值与照射时间关系密切,当照射时间确定后,激光损伤阈值实质上就是最大照射功率密度,辐照功率密度超过该值,探测器开始出现损坏。不同的红外探测器材料,由于特性不一样,其开始损伤阈值也不同。

1.2 干扰概率分析

常规武器的毁伤律模型分为数量毁伤律和坐标毁伤律两种^[4]。数量毁伤律依赖于命中弹数的毁伤律,坐标毁伤律是依赖于弹落点相对目标坐标的毁伤律。对于激光武器来说,由于具有很强的方向性,讨论干扰概率是已知来袭目标的方位,即目标坐标是已知量,且假设不存在误差,故可认为激光武器的干扰概率应服从数量毁伤律。

设对目标的干扰概率为 $P(N)$,其中 N 表示命中目标的脉冲个数,具有如下性质:1) $N=0$ 时, $P(N)=0$; 2) $P(N) > P(N-1)$; 3) 当 $N \rightarrow \infty$ 时, $P(N) \rightarrow 1$ 。在对目标进行干扰时,干扰效果应服从零-壹毁伤律,即当 $N < m$ 时, $P(N)=0$;当 $N \geq m$ 时, $P(N)=1$,表示当命中弹数少于 m 时,肯定不能干扰目标,而当命中弹数等于或大于 m 时,必然能干扰目标。 m 的取值根据目标的工作特性而不同。

对于扫描成像光电设备, 设其扫描周期为 T , 在一个周期内其瞬时视场打开次数为 N , 持续时间为 t , 定义有效干扰时的干扰概率为90%, 即对于一个周期内干扰脉冲的有效干扰个数大于 $0.9N$, 可比较两种干扰模式下的干扰概率。为便于计算, 设干扰激光的脉宽也为 t 。

1.2.1 自适应干扰模式

在自适应干扰模式下, 目标的工作特性已知, 干扰激光脉冲可将目标瞬时视场完全覆盖, 此时干扰概率为1, 即完全干扰。

1.2.2 时域均匀干扰模式

在该种工作模式下, 一个周期 T 内, 同样也发出 N 个脉冲, 脉冲宽度为 t , 但 N 个脉冲在时域上是均匀的, 其周期为 T/N 。令 $N_1 = T/t$, 则每一个干扰脉冲进入瞬时视场的概率为

$$P(1) = \frac{N}{N_1} \quad (1)$$

在这种工作模式下, N 个干扰脉冲都能打入瞬时视场的概率为

$$P(N) = \left(\frac{N}{N_1}\right)^N \quad (2)$$

2 试验结果及分析

在对某型号扫描成像侦察设备的试验过程中, 首先测出成像设备的工作特性, 然后根据其工作特性设计干扰脉冲波形, 对该型号成像侦察设备的主动侦察回波波形如图2所示。

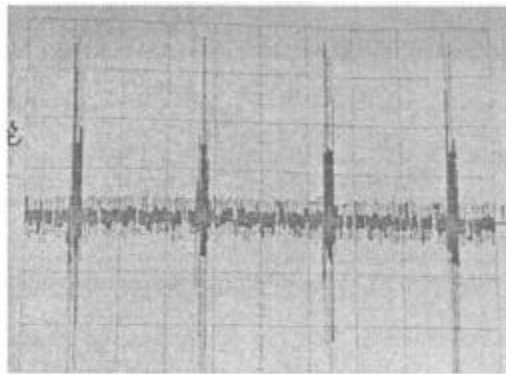


图2 主动侦察回波波形

根据目标回波特征, 设计了自适应干扰和时域均匀干扰二种不同的工作模式, 并对干扰效果通过视频设备实时转录。两种干扰模式示意图如图3所示。

为对两种工作模式的干扰效果进行比较, 控制干扰激光器的发射频率, 使两种工作方式在周期 T 内发射的脉冲个数相同。根据图2的试验数据, 测得 $T = 24 \text{ ms}$, $t = 0.05 \text{ ms}$, $N = 5$, 根据式(1)、(2)得到: 单个干扰脉冲打进目标瞬时视场的概率为

$$P(1) = \frac{N}{N_1} = \frac{1}{96}$$

N 个干扰脉冲都能打入瞬时视场的概率为

$$P(N) = \left(\frac{N}{N_1}\right)^5 \approx 10^{-5}$$

由此可以看出, 对于该种型号的成像设备, 自适应工作模式的干扰概率比时域均匀工作方式要高约 10^5 倍。不同工作模式下的干扰图像如图4所示: 从图4a中可以看出, 时域均匀干扰模式下的输出图像与无干扰时的输出图像相同, 这种干扰方式对成像设备没有干扰效果; 从图4b中明显看到在图像上形成亮区, 起到了干扰效果, 但并没有形成完全干扰。分析其原因, 是由于干扰激光脉冲时序与目标瞬时视场未作到很好同步, 只有一部分干扰脉冲打进了目标瞬时视场。

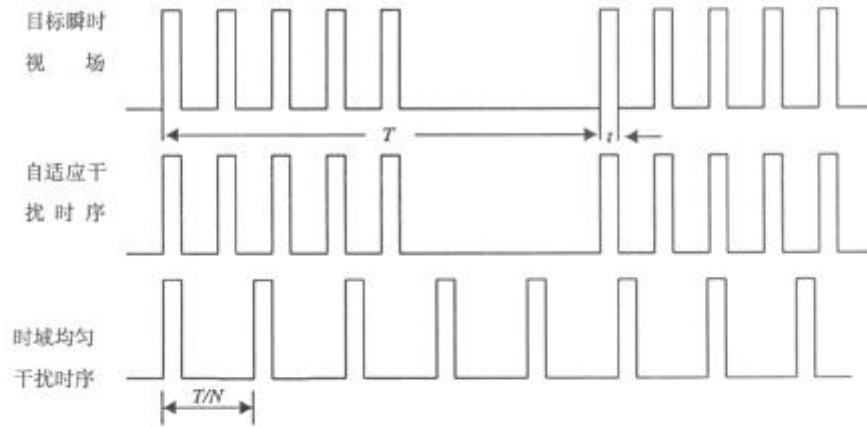
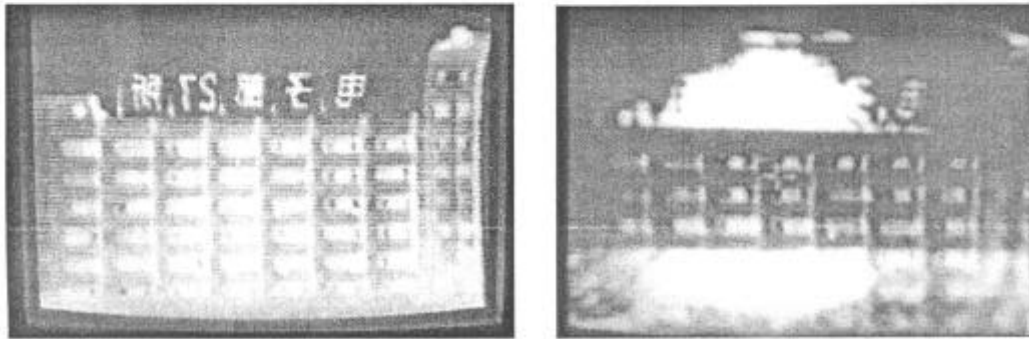


图3 两种干扰模式示意图



(a) 时域均匀干扰模式下成像设备输出图像

(b) 自适应干扰模式下成像设备输出图像

图4 两种不同干扰模式干扰效果图

3 结论

从以上讨论可以看出,对于扫描成像光电装备而言,在激光干扰源的峰值功率、单位时间输出脉冲个数相同的情况下,两种干扰方式的干扰效果差别较大。根据理论计算和试验结果得出结论:若要对目标实施有效干扰,应采用自适应工作模式。在这种工作模式下的干扰激光源应配备主动侦察设备加以引导,先侦察出目标的工作参数,再根据目标工作特点对干扰激光源进行调制以保证取得良好的干扰效果。

参 考 文 献

- [1] 魏光辉, 杨培根. 激光技术在兵器工业中的应用[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995
- [2] Kaminow I. An introduction to electro-optical devices[M]. Academic Press, New York, 1974
- [3] Meyer J, Krueer M, Bartoli F. Optical heating in semiconductors: laser damage in Ge Si InSb GaAs[J]. Journal of Applied optics, 1980, 51(10): 293-304
- [4] 徐培德, 谭东风. 武器系统分析[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2001

编辑 孙晓丹