

文章编号: 1672-8785(2009)09-0030-05

激光对红外成像制导跟踪系统的干扰技术研究

杨彦杰 张国兵

(91404 部队 93 分队, 河北秦皇岛 066001)

摘 要: 激光武器作为一种新型的光电对抗武器越来越受到人们的重视, 但作为红外波段的干扰武器, 目前研究甚少。本文以红外成像制导武器跟踪系统及其核心部件硅 CCD 为研究对象, 对制导原理进行了概括, 提出了激光干扰红外成像制导系统的三种途径。实验室以发射波长为 $10.6\mu\text{m}$ 激光器作为干扰源对红外成像探测器及跟踪系统进行了干扰试验, 给出了干扰效果图, 并对影响干扰效果的因素进行了分析。

关键词: 红外成像制导; 跟踪系统; 干扰; 干扰效果

中图分类号: TN929 **文献标识码:** A

Research on Jamming of Infrared Imaging Guided Tracking System by Laser

YANG Yan-jie, ZHANG Guo-bing

(Navy Unit 91404, Qinhuangdao 066001, China)

Abstract: As a new type of opto-electric countermeasure weapon, the laser weapon is being taken more seriously. But as a jamming weapon in the infrared waveband, it is rarely reported at present. In this paper, the tracking system of an infrared imaging guided weapon and its core device, a silicon CCD are used as the objects of study. The principle of infrared imaging guidance is summarized and three approaches to jamming the infrared imaging guidance system by using a laser are proposed. Jamming experiment is made on the infrared imaging detector and tracking system by using a $10.6\mu\text{m}$ laser as the jamming source. The images displaying jamming effectiveness are given and the factors which have influence on the jamming effectiveness are analyzed.

Key words: infrared imaging guidance; tracking system; jamming; jamming effectiveness

1 引言

精密制导武器尤其是光电制导武器在打击高价值目标方面所表现的惊人效费比和作战威力使得人们愈发认识到发展光电对抗装备特别是激光对抗装备的重要性和紧迫性^[1]。另一方面, 各类重要光电设施也正受到日益发展的激光对抗武器系统的威胁, 因而研究激光对光电制导武器的核心部件(光电跟踪系统)的干扰具

有十分重要的意义。本文以红外成像制导武器跟踪系统及其核心部件硅 CCD 为研究对象, 较为系统地研究了激光干扰对光电探测器件及跟踪系统性能的影响及干扰机制。

2 红外成像跟踪系统的工作原理

2.1 红外成像制导的基本组成

红外成像制导技术是利用红外跟踪和测量

收稿日期: 2009-04-02

作者简介: 杨彦杰(1979-), 男, 河北省廊坊市人, 助理工程师, 学士学位, 主要从事激光测量方面的研究。E-mail: huayi6541@sina.com

的方法控制和导引导弹飞向目标的技术^[2]。导引头接收从目标辐射或反射而来的红外波段的光能量, 将其转变为图像, 然后经过图像处理, 确定目标的位置参数, 再经信号变换产生用于控制导弹飞行方向的控制信号, 传输到执行机构将导弹导向所攻击的目标。红外成像导引头分为实时红外成像器和视频信号处理电路两部分, 一般由红外摄像头、图像处理电路、图像识别电路、跟踪处理器和摄像头跟踪系统等部分组成, 如图 1 所示。

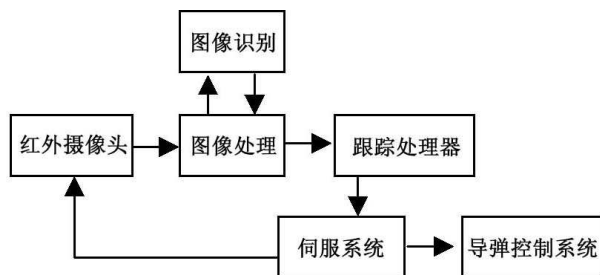


图 1 红外成像导引头的基本组成

2.2 红外成像制导的跟踪方式

从目标的图像中提取目标位置信息的方法基本上可以分为两种：波门跟踪和相关跟踪。前者能确定接收景物中的某部分就是目标像, 并且从所辨别的目标中产生跟踪信号; 后者通过计算由传感器产生的图像与存储的参考图像间的相关函数来确定跟踪点, 跟踪点就是这两个

图像匹配最好的位置, 如相关函数的极值点。相关跟踪比波门跟踪能得到较多的图像信息, 并可用来跟踪相当小的目标或者跟踪对波门跟踪来说对比度较差的目标。但是, 目标的剧烈运动、目标方位、透视变化或者强干扰等因素常常会严重地影响相关跟踪的可靠性。

2.3 CCD 成像器件

最常使用的 CCD 探测器件的光接收部分是 Si 光电二极管阵列^[3]。每个光电二极管将构成一个像元, 与 CCD 中的各个 MOS 电容器将一对一地连接着, 各个像元的光电转换信号将在 CCD 中转移后输出, 其基本组成如图 2 所示。

将具有共同栅极电压的 MOS 电容做在一起, 各单元之间用沟阻势垒隔开, 构成 CCD 成像器件的光敏区。在光辐照下, 硅表面附近一定深度范围内将产生电子-空穴对, 空穴被排斥出势阱, 而电子则被贮存在势阱中, 作为信号电荷, 然后再通过将以一定规则变化的电压加到 CCD 各电极上, 电极下的电荷包就能沿半导体表面按一定方向移动, 从而实现电荷的转移。

3 激光对红外成像跟踪系统的干扰试验及其分析

从红外成像制导系统的机构组成及关键器件 CCD 的工作原理来看, 激光要实现对红外成

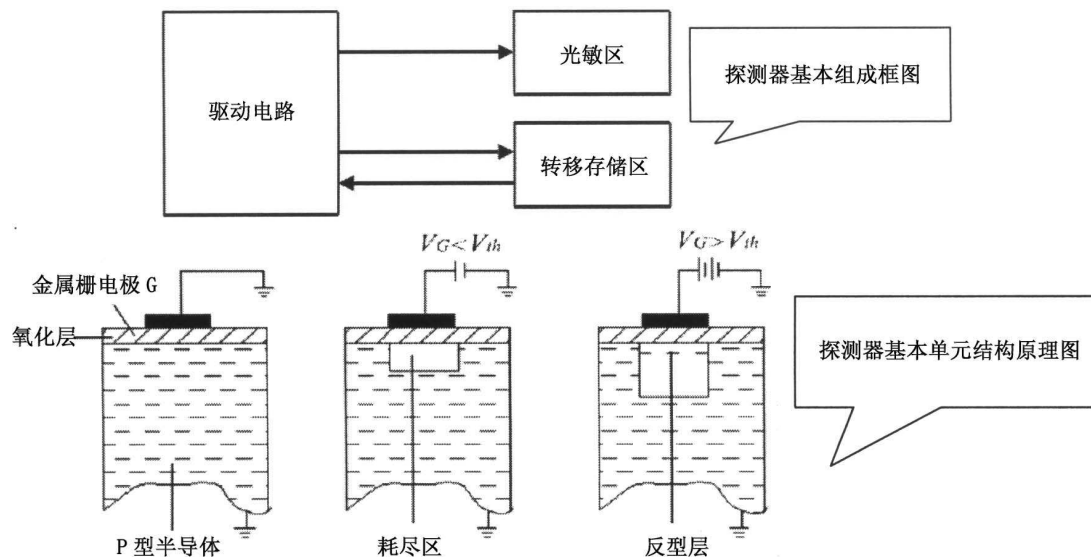


图 2 CCD 探测器的基本组成

像跟踪系统的干扰有如下几种途径:

- (1) 对自动增益控制 (AGC) 的干扰
- (2) 对探测器的辐照饱和干扰
- (3) 对波门跟踪的干扰

3.1 对自动增益控制 (AGC) 的干扰

由于导引头信号处理中的 AGC 的作用是保持信号电平在某一常值, 接收到的信号的动态范围取决于目标的特征, 其信号随方位角和作用距离而变化。当目标临近信号增强时进行增益调节, 输出辐值近似恒定, 以降低导引头对云雾、地物及太阳等干扰的噪声灵敏度。根据 AGC 的响应时间, 调节干扰激光的脉冲频率, 在一个工作期内, 尽可能地压制导引头正确的目标跟踪信号, 然后突然撤去定向干扰激光, 此时, AGC 将增加增益电平, 把目标信号增至其工作范围。当下一个脉冲激光辐射出现时, 导引头信号就会出现饱和现象, 如果激光脉冲辐射信号电平大于目标信号电平, 则对 AGC 的干扰将会导致导引性能的下降甚至失去。

3.2 对探测器的辐照饱和干扰

激光对探测器进行辐照饱和干扰同样也会造成探测器跟踪性能下降或彻底失去跟踪能力^[3]。如果激光辐照功率 / 能量密度大于探测器的饱和阈值而低于其损伤阈值时, 探测器将会

出现饱和从而失去探测能力, 导引头也因此将会失去导引能力。

实验室以波长为 $10.6\mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 激光器对某型号的红外成像 CCD 探测器进行了照射试验, 图 3 为实验室装置图。

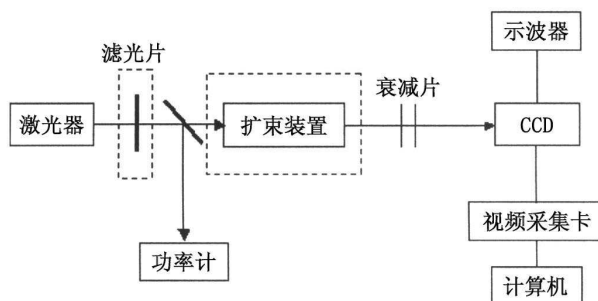


图 3 脉冲激光对 CCD 的辐照干扰实验装置示意图

功率计用来检测输出的激光功率, 用衰减片的增减来改变激光辐照强度。CCD 摄像机输出的视频信号经视频采集卡进入计算机并得到处理, 这样可以实时观察并记录图像的变化。为了与摄像机输出的视频信号进行对比, 我们在摄像机 CCD 芯片上的信号输出管脚上直接引出接线, 用示波器观察芯片上的输出信号。在实验过程中, 判断 CCD 探测器发生饱和现象的依据是: 连续增加辐照激光的能量密度, 在激光辐照过程中探测器前后两次输出的信号电压基本相同。在试验过程中, 不断减小衰减量, 探测器开

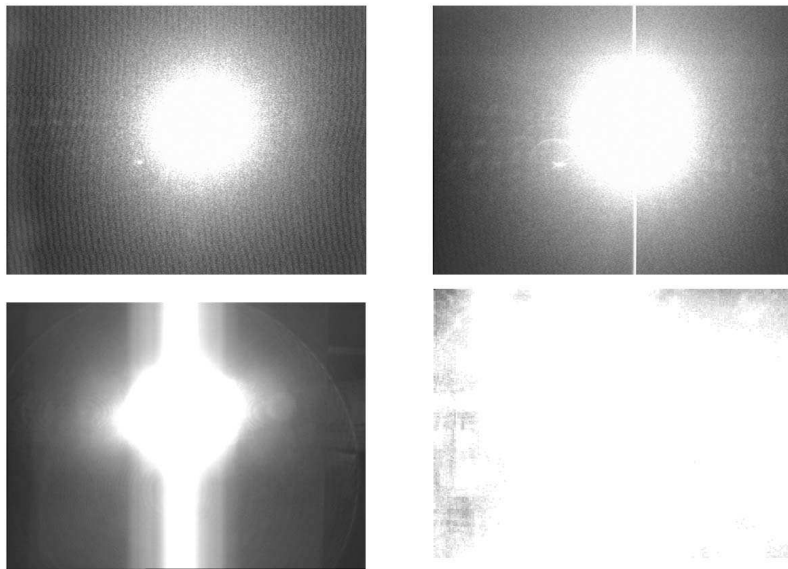


图 4 CCD 被干扰后的效果图

始出现不同程度的饱和现象, 具体干扰效果如图 4 所示。

当激光辐照功率达到一定的强度时, 探测器开始出现列串扰现象, 当激光辐照强度进一步增强时, 串扰单元饱和, 串扰行逐渐加宽, 继续增大时出现全屏饱和。从 CCD 存储电荷的原理来看, 当在某一个电极下储存了足够的电荷时, 该电极下的氧化层与半导体的交界面的表面势降到最低, 不能再束缚更多的电荷, 继续产生的信号电荷就会向周围扩散。由于 CCD 器件横向的势垒比纵向的势垒宽, 因此电荷首先在纵向上扩散, 即串音首先出现在纵向上, 然后再出现在横向上。

3.3 对跟踪波门的干扰

形心跟踪、重心跟踪及边缘跟踪等统称为波门跟踪, 它是红外成像制导普遍采用的跟踪模式。其特点是, 在跟踪视场内都设置一个波门, 波门的尺寸稍大于目标图像, 波门紧紧套住目标图像。只把波门内的信号当作感兴趣的信号予以检出, 而摒除波门以外的其他信号, 这样可以减少计算量并排除干扰。相关跟踪方式通常也采用自适应波门来减少计算量和噪声的影响, 因此干扰成像制导导弹的跟踪波门是有效的干扰途径之一。根据波门跟踪的上述特点, 要干扰并破坏掉波门对目标的跟踪, 激光干扰脉冲亮带应尽可能多地占据成像画面, 并且必须掠过跟踪波门, 激光应重频工作, 频率高低取决于成像帧频的高低。此外, 激光脉冲产生的亮度必须大于目标的亮度, 这样才能使波门套住干扰信号图像而脱离对目标的跟踪。由于波门跟踪还具有预测跟踪能力, 这样就还要求干扰激光必须持续数十帧以上的时间, 才能使导弹彻底丢失目标。

4 影响激光干扰效果的因素分析

4.1 大气传输对激光能量的衰减作用

当激光在大气中传输时会因遭到大气的吸收和散射而衰减。吸收是把辐射能变成其他形式能, 而散射只改变原激光光束的传播方向, 而不改变激光光束总能量的光谱分布, 其衰减规

律遵从布格尔-朗伯定律。

当功率为 P_λ 的单色光在大气中传播时, 因吸收和散射而衰减。由于吸收和散射对辐射衰减的相对值都与通过的距离成正比, 因此有:

$$\frac{dP_\lambda}{P_\lambda} = -[\alpha(\lambda) + \gamma(\lambda)]dx = \mu(\lambda)dx$$

式中, $\alpha(\lambda)$ 为吸收系数, $\gamma(\lambda)$ 为散射系数, $\mu(\lambda)$ 为衰减系数。

4.2 激光干扰系统定位精度的影响

在激光干扰过程中, 我们最希望看到的是激光光轴线与光波前面的交点正好位于制导武器跟踪系统探测器的中心点, 但是由于跟踪系统随武器在做远程高速运动, 而且激光经远程传输后也很难对准探测器正中心, 因此实际情况下一定存在定位误差。这个误差可以用定位精度角来表示, 设定位精度角为 2ε , 它表示光轴线与波前面的交点在立体角 2ε 的集合内随机抖动。设这个交点为 a , 则:

$$a_i \in (\varepsilon, t), \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

可以认为每一次抖动的角度都是相互独立的, 服从同一分布, 具有有限的数学期望 $E(a)$ 和方差 σ , 这种抖动是服从正态分布的, 随着时间的推移, 它是一种正态随机过程。因为交点(定位点)为探测器的中心点, 所以数学期望 $E(a) = 0$; 同样, 方差 $\sigma = \varepsilon$ 。 $F(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\varepsilon}} \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} \exp\left(-\frac{a^2}{2\varepsilon^2}\right) da$, 即 $a \sim (0, \varepsilon^2)$ 。这种随机抖动的结果反映到激光束光轴线与探测器的交点 A 上, A 在 $[\pi(\varepsilon l)^2]$ 圆内服从正态分布。

4.3 激光能量分布对干扰效果的影响

如果激光球面谐振腔模式为 TEM_{mn} 模, 其模场分布为

$$E(x, y) = E_0 H_m(\sqrt{2}x/W) H_n(\sqrt{2}y/W) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{W^2}\right)$$

式中, $H_m(\zeta)$ 、 $H_n(\zeta)$ 为第 m 阶和第 n 阶厄密多项式。

假设干扰激光采用的是基模激光, 即模式为 TEM_{00} 模时 $H_0(\zeta) = 1$, 这时,

$$E(x, y) = E_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{W^2}\right)$$

场分布是高斯函数分布, W 为光斑半径, E_0 为振幅最大值, 则其能量分布为

$$F(E) = K' \left[E_0 \exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{W^2} \right) \right]^2 \\ = K'' \exp \left(-2\frac{x^2 + y^2}{W^2} \right)$$

因此,

$$E = K'' \int_s \exp \left(-2\frac{x^2 + y^2}{W^2} \right) dx$$

式中, E 为传输到 L 处的激光束能量; K' 、 K'' 为比例常数。

4.4 激光干扰跟踪系统跟踪精度的影响

由于目标做高速运动, 跟踪系统的跟踪精度就必须予以考虑。这个跟踪精度是激光干扰武器测角误差的均方根值, 设测角误差服从正态分布, 则其方差 σ 就是干扰设备的跟踪精度, 若激光束远场发散角为 θ , 则激光光斑能够照射到目标的概率为

$$P = \int_{u-\theta/2}^{u+\theta/2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left(-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2} \right) dx$$

~~~~~

### 简讯 News

#### 近红外 GaAs 上变频器

据《laser focus world》杂志报道, 硅 CCD 摄像机通常对波长在  $1.2\mu\text{m} \sim 1.6\mu\text{m}$  区域的红外辐射不敏感而敏感于波长在  $1\mu\text{m}$  以下的红外辐射, 要想用这种摄像机对波长在  $1.2\mu\text{m} \sim 1.6\mu\text{m}$  范围内的红外辐射进行成像, 就得用上变频器的方法使光的波长短于  $1\mu\text{m}$ 。上变频可以通过把光探测器和发射波长更短的发光二极管(LED) 相结合来实现; 随后, 该元件阵列就产生一个能够被硅 CCD 摄像机所捕捉的图像。然而, 这些上变频元件并不是那么高效, 也难以制作。现在, 上海交

通大学、加拿大国家研究委员会和新加坡南洋理工大学的研究人员, 已经开发出一种基于砷化镓(GaAs) 的近红外上变频器, 其价格便宜、效率高并可直接使用。

#### 5 结束语

本文研究了激光对探测器件及跟踪系统的干扰, 并对影响干扰效果的因素进行了简单的分析。由于激光干扰过程是一个复杂的研究领域, 至今仍没有一个全面的、统一的实用准则和方法, 因此, 对干扰效果进行综合评估将仍然是今后一段时间需要研究的课题。

#### 参考文献

- [1] 王永仲. 现代军用光学技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] R D 小哈得逊. 红外系统原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1975.
- [3] 刘泽金, 等. 面阵 CCD 图像传感器点破坏机理研究 [J]. 应用激光, 1995, 15(2): 23-25.

通大学、加拿大国家研究委员会和新加坡南洋理工大学的研究人员, 已经开发出一种基于砷化镓(GaAs) 的近红外上变频器, 其价格便宜、效率高并可直接使用。

设计中, 他们是将定制的 GaNAsSb/GaAs 光探测器和基于 GaAs 的 LED 串联配置起来。然后在室温试验里, 他们用发射波长为  $1.3\mu\text{m}$  的发光二极管照射上变频器; 当入射光强度为  $12\text{mW}/\text{cm}^2$  以及上变频器的发射波长为  $0.9\mu\text{m}$  时, 上变频效率达到  $0.048\text{W}/\text{W}$  (当入射光强度为  $335\text{mW}/\text{cm}^2$  时, 上变频效率则降至  $0.011\text{W}/\text{W}$ ; 然而, 该强度比实际应用中的期望值要高很多。)。通过使用谐振腔或定制的 LED, 上变频效率可以得到进一步的提高。

□ 岳桢千