

## 激光损伤四象限探测器对制导武器的影响

梁巍巍,殷瑞光,李 慧,赵宏鹏,张文攀

(中国洛阳电子装备试验中心,河南 洛阳 471003)

**摘 要:** 对激光损伤四象限探测器对制导武器的影响进行了研究。首先,简述了激光硬损伤光电探测器机理和四象限探测器目标探测定位原理;接着,建立四象限探测器模型,针对不同损伤情况,计算了归一化探测曲线和探测器偏移量;然后,将不同损伤情况下的角偏差信号送入激光制导炸弹运动控制模型,得到了不同四象限探测器损伤状态下激光制导炸弹弹道曲线;最后,分析了四象限探测器不同损伤距离下激光制导武器的脱靶量。研究表明,四象限探测器损伤程度和损伤距离都会对激光制导武器产生影响。该研究结果对大功率激光压制半主动激光制导武器效果评估有一定帮助。

**关键词:** 激光损伤; 四象限探测器; 激光制导武器; 压制干扰

**中图分类号:** TN977; TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2672-05

## Influence of laser damage quadrant detector on laser guided weapon

Liang Weiwei, Yin Ruiguang, Li Hui, Zhao Hongpeng, Zhang Wenpan

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** Analysis of laser damage quadrant detector(QD) for laser guided weapon was presented in this paper. Firstly, the principle of laser damage photoelectrical detectors and QD detection theory were shown, detection bias and normalized detection curve were calculated based on the quadrant detector model. Then, Laser guided bomb trajectory simulated by weapon control model in different laser damage level were studied. Finally, undershoot value of laser guided bomb was discussed in different QD's laser damage distance. The research indicates that QD's laser damage level and damage distance influencing the laser guided weapon, and the result will be helpful for the effect evaluation of blanket jamming to laser guided weapon.

**Key words:** laser damage; QD; laser guided weapon; blanket jamming

收稿日期:2013-02-10; 修订日期:2013-03-18

基金项目:总装重大课题研究基金(2009SY3300005)

作者简介:梁巍巍(1983-),男,硕士,主要从事光电对抗方面的研究。Email:liangblue1044@163.com

## 0 引言

随着光电精确制导武器在军事领域的广泛应用,光电精确制导武器的干扰与对抗越来越受到人们的重视,采用激光辐照进行压制性干扰是一种很有效的方法<sup>[1-2]</sup>。光电探测器在光电精确制导武器探测系统的各个环节中是最脆弱的部分:一是因为要探测到远距离目标,构成探测系统的光学系统是弱光探测系统,具有较高的光学增益;二是因为探测器对入射激光有较高的吸收系数。因此,对光电精确制导武器的干扰、损伤首先就是对其探测器进行干扰、损伤。激光辐照光电探测器,会使其瞬间受到严重破坏或探测系统处于失灵状态,从而达到干扰和对抗的目的。李海燕<sup>[3]</sup>对光电探测器受激光干扰与损伤情况进行了风险分析;胥杰<sup>[4]</sup>从大气传输、大气湍流效应、探测器自身因素等方面出发,对激光干扰、破坏光电探测器能量进行了估算;钟海荣<sup>[5]</sup>分析了强激光对典型精确制导武器光电探测器的干扰效应<sup>[3-5]</sup>。

对于激光损伤光电探测器,以往的研究都集中于强激光对光电探测器的损伤机理、损伤阈值等的研究,很少涉及光电探测器受损对精确制导武器的影响,文中以半主动激光制导武器为例,简述了激光对光电探测器硬损伤机理,从四象限探测器探测定位原理出发,计算了四象限探测器在不同激光损伤情况下的偏移量和归一化曲线,研究了不同损伤情况下激光制导炸弹的弹道曲线,分析了四象限探测器不同损伤距离下激光制导武器的脱靶量。研究结果表明,四象限探测器损伤程度和损伤时机对激光制导武器都会产生影响。

## 1 激光对光电探测器的损伤机理

激光对光电探测器的损伤主要有软损伤和硬损伤两种。随着入射激光功率的上升,探测器稳定输出的信号幅度上升,当入射激光功率增加到一定程度时,光电探测器出现饱和效应,输出信号不再随着入射激光功率的增大而上升,即软损伤,软损伤是瞬态的、可逆的,经过一定时间后,探测器可以继续响应激光辐照,并且响应度基本不变;当入射激光功率继续增加,探测器将发生不可逆的损伤,光敏面形成裂

纹、融化坑或气化坑,即硬损伤,对于硅光电二极管和硅雪崩光电二极管探测器,永久性硬损伤将造成影响度严重恶化,甚至是对入射光的零响应。一般来说,光电二极管的响应度下降为初始值的 20% 以下,可以认为光电二极管受到永久性损伤<sup>[5-6]</sup>。

文中集中讨论激光对光电探测器的硬损伤。光电二极管光电效应的两个重要过程是光生载流子对的产生和 PN 结区对载流子的分离,两个过程缺一不可,激光对光电二极管的永久性硬损伤就是破坏光电效应的这两个过程。大量研究发现受到永久性损伤的光电二极管的光敏面存在裂纹和坑,U-I 曲线显示光电二极管严重偏离二极管特性,甚至变成了纯电阻特性<sup>[7]</sup>。激光对光电二极管的永久性损伤,首先是对载流子分离过程的破坏,即对其 PN 结的破坏,使光电二极管收集载流子的电场减弱,甚至不能建立分离电场。对 PN 结的破坏机理,一般认为硅材料熔融时掺杂原子分离和再分布而形成漏电通道,使光电二极管收集载流子的电场减弱一致不能建立分离电场。如果 PN 结未被漏电通道贯穿,仅使其宽度变窄,也将引起 PN 结阻抗降低,使电场强度减小,收集载流子的能力减弱,宏观表现为响应度下降。如果漏电通道贯穿 PN 结就使 PN 结变成了纯电阻,即 PN 结被热击穿,PN 结击穿后就不能建立起强的分离电场,即使有光生载流子产生也不能被及时分离和收集,因而光电流为零,宏观表现为对入射光不响应。

## 2 四象限探测器目标探测定位原理

对于半主动激光制导武器,探测系统应用较多的是 PIN 型硅光电二极管四象限探测器和雪崩型硅光电二极管四象限探测器,相比 PIN 型,雪崩型由于其具有更高的信号增益,更易受到损伤,其损伤阈值比 PIN 型低一个数量级<sup>[7]</sup>。

四象限探测器是由相互独立的四个面积和形状相同、位置对称的光电二极管构成,分别对应四个象限。四象限探测器置于光学系统的焦平面附近,离焦放置使目标在其光敏面上形成光斑,若目标在武器光学系统光轴上,则光斑在光敏面中心,若目标偏离光轴,其光斑会偏离中心。四象限探测系统通过目标光斑在四个象限上的分布情况,来解算武器偏移目标的角度<sup>[8]</sup>。

半主动激光制导武器一般采用和差比幅电路处理四象限探测器输出信号,如图 1 所示,为四象限探测器和差比幅电路原理框图。当目标光斑偏离四象限探测器中心,经过信息处理电路对信号的处理,输出导引指令到尾部仪器舱,控制激光制导武器舵面偏转,修正弹体的实际飞行方向与理想的追踪方向间的偏差,使误差角减小并逐步趋于零,最终控制激光制导武器按导引规律飞向目标。

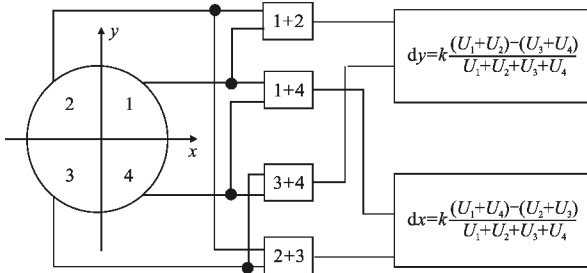


图 1 四象限探测器和差比幅电路原理框图

Fig.1 Block diagram of the QD's sum-difference amplitude comparison circuit

假定目标漫反射激光指示信号在四象限探测器上形成圆型光斑,则俯仰和偏航方向的偏差信号为:

$$dy = k \frac{(U_1 + U_2) - (U_3 + U_4)}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}$$

$$dx = k \frac{(U_1 + U_4) - (U_2 + U_3)}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}$$

式中:k 为比例系数。

### 3 四象限探测器损伤对激光制导武器的影响

四象限探测器受损,首先使四象限探测器四个象限一致性受到破坏,当目标光斑落在受损区域时,会引入额外的误差,探测器输出错误信号,不能反映目标光斑的真实位置信息。为了研究四象限探测器受损对激光制导武器的影响,建立了四象限探测处理模型,首先建立  $2R \times 2R$  矩阵,在矩阵中心以半径  $R$  画内切圆,内切圆内矩阵赋值为 1,其余为 0。按照四象限探测器象限分布,将光敏面划分为第 1、2、3、4 象限,目标光斑矩阵和探测器矩阵点乘,即可获得每个象限的信号值。

假设四象限探测器仅一个象限(第一象限)受损,受损的光敏面对入射光的响应度为零,根据受损面积占四象限探测器一个象限面积的比值,分为轻度、中度和重度,受损面积比值分别为 10%、30%和 50%。

图 2 为不同损伤状态下的四象限探测器的归一

化探测曲线,曲线表明,当四象限探测器未受损伤时,四象限探测器输出的偏差信号与光斑中心在四象限探测器上的位移近似成线性关系,四象限探测器根据光斑在光敏面上的分布,可以输出反应目标信息的信号;当四象限探测器受损时,探测曲线明显发生偏离,且随着损伤程度加深,偏离越大,此时四象限探测的输出信号就不能反应目标真实的位置信息。

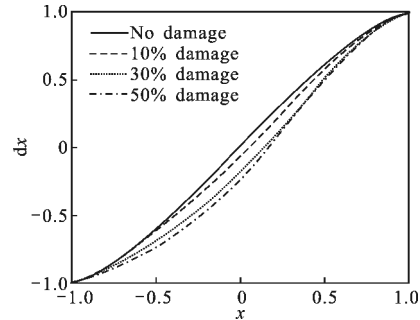


图 2 不同损伤状态下四象限探测器的归一化探测曲线

Fig.2 Normalized detection curves of QD in different laser damage level

对于激光制导武器,经过专门的光学系统设计,四象限探测器离焦放置,在其光敏面上,一般目标光斑半径  $r$  与探测器光敏面半径  $R$  的关系为:  $r/R = 1/2^{[8]}$ 。表 1 为目标光斑对准四象限探测器中心,在不同损伤程度下,四象限探测器输出的归一化偏移量,其中目标光斑  $r=R/2$ 。可以看出,虽然目标光斑在四象限探测器中心,但由于第一象限受损,四象限探测器输出的偏差信号都反映目标光斑中心在相反的第二象限,随着损伤程度的加重,偏移量也随着加大,经过和差比幅电路处理后,形成错误的制导指令,使弹体产生较大误差。

表 1 不同损伤程度下四象限探测器偏移量

Tab.1 QD bias of different laser damage level

Laser damage level	dx	dy
Gentle(10%)	-0.069 5	-0.069 5
Middle(30%)	-0.184 2	-0.198 1
Serious(50%)	-0.234 5	-0.341 4

文献报道,激光损伤四象限探测器,相当于在其进行目标探测时引入了一个大小随损伤程度而改变的固有角偏差,这个角偏差必然会对激光制导武器引入一定的脱靶量<sup>[9]</sup>。根据不同损伤程度下四象限探

测器的偏移量,计算得出了不同损伤程度下引入的固有角偏差,将固有角偏差送入某风标式半主动激光制导武器运动控制模型,如图 3 所示为得出的弹道曲线,初始参数为投弹高度 3 000 m,初速 300 m/s,下推角 0°,距离目标 6 000 m,导引头在距离目标 3 000 m 时受到大功率激光压制性干扰,四象限探测器受到损伤。

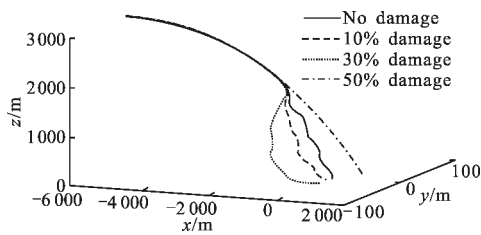


图 3 四象限探测器不同损伤程度下激光制导炸弹的弹道曲线

Fig.3 Laser guided bomb trajectory of different QD laser damage level

如图 3 所示,为根据四象限探测器在不同损伤程度下引入的角偏差,送入激光制导炸弹运动控制模型计算出的弹道曲线,从曲线可以得出当四象限探测器未受损伤时,四象限输出含有正确目标位置信息的信号给后续信号处理电路,导引头可以输出正确的制导指令,引导激光制导炸弹准确击中目标;当四象限探测器受到较轻损伤时(10%),虽然四象限输出的信号含有误差,但因为误差量不大,送入武器自动驾驶仪可以进行部分纠正,激光制导炸弹脱靶量变大,但目标依然在其杀伤范围内,因此判为有效击毁目标,压制干扰无效;当四象限探测器受到中度损伤时(30%),四象限探测器输出信号误差量加大,激光制导炸弹脱靶量进一步加大,根据参考文献[10],假设激光制导炸弹的脱靶量为  $T$ ,杀伤半径为  $D$ ,炸弹落点到目标距离为  $L$ ,是否击中目标的条件为:

$$L \leq T + D$$

如果满足,则判断有效击毁目标,压制干扰无效,否则为未击毁目标,压制干扰有效;当四象限探测器受到重度损伤时(50%),四象限探测器输出信号误差量比较大,导引头输出错误指令控制舵面向错误方向偏转,导致目标出导引头视场,此时,激光制导炸弹成为无控弹,炸弹落点远离目标,不能击毁目标,压制干扰有效。

四象限探测器在不同距离上受到损伤,也会产生不同的干扰效果。如图 4 所示为四象限探测器在

不同距离上受到不同损伤情况下的脱靶量曲线,弹道初始参数为投弹高度 3 000 m,初速 300 m/s,下推角 0°,距离目标 6 000 m,导引头分别在距离目标 4 000 m、3 000 m、2 000 m 和 1 000 m 时受到大功率激光压制性干扰,四象限探测器受到损伤。

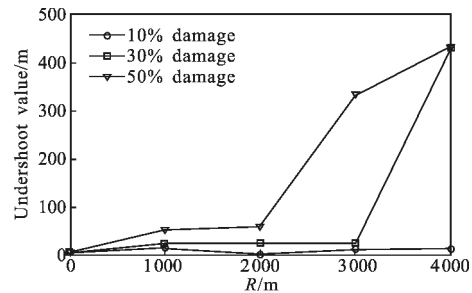


图 4 四象限探测器不同损伤距离情况下激光制导炸弹的脱靶量

Fig.4 Undershoot value of laser guided bomb in different QD's laser damage distance

由图 4 可以看出,当四象限探测器轻度损伤时(10%),随着损伤距离的增加,激光制导炸弹的脱靶量也随着增加,但增加幅度不大,即使在最远距离(4 000 m)上,目标依然在炸弹的杀伤范围内,这说明四象限探测器受到轻度损伤时,在任何损伤距离上,激光制导炸弹都还能击毁目标,压制干扰无效。当四象限探测器中度损伤时(30%),随着损伤距离的增加,激光制导炸弹的脱靶量有明显增加,特别是在最远损伤距离上(4 000 m),由于四象限探测器过早被压制干扰,激光制导炸弹成为无控弹,不能击毁目标,因此判断干扰是否有效,还要考虑损伤距离因素;损伤距离较近则激光制导炸弹可以击毁目标。当四象限探测器重度损伤时(50%),损伤距离较近时(1 000 m 和 2 000 m)压制干扰导致脱靶量大大增加,是否干扰有效还要对击中目标条件进行判断;损伤距离较远时(3 000 m 和 4 000 m)压制干扰导致四象限探测器受到损伤,使激光制导炸弹成为无控弹,落点远离目标,不能击毁目标,干扰有效。

因此,四象限探测器损伤情况越严重,损伤距离越远,激光制导炸弹的脱靶量就越大,即大功率激光对激光制导武器干扰越早,四象限受损越严重,则压制性干扰效果越好。提高大功率激光压制激光制导武器干扰效果,不仅要考虑四象限探测器损伤情况,还要考虑四象限探测器的损伤距离因素,损伤距离越远,脱靶量就越大,干扰效果也就越好。但由于技

术原因,四象限探测器重度损伤和远距离损伤两个条件不可能同时达到,或者同时达到需要付出的代价比较高,考虑到大气衰减等因素,不可能做到大功率激光对四象限探测器进行远距离硬损伤。目前大功率激光对激光制导武器系统的干扰,可以针对其中的薄弱环节,依次对敌机飞行员、敌机瞄准系统、激光导引头实施干扰,当敌机在远距离被发现和跟踪时,大功率激光对敌机飞行员眼睛、敌机瞄准系统实施致眩干扰,使其暂时迷茫或无法跟踪锁定目标,从而放弃投弹;当激光制导炸弹完成机弹分离后,激光制导炸弹的威胁等级高于敌机,大功率激光对激光导引头实施饱和致眩干扰,随着距离逐渐靠近,对其实施压制性损伤干扰,近距离损伤四象限探测器。

#### 4 结 论

简述了激光硬损伤光电探测器机理和四象限探测器目标探测定位原理,建立了四象限探测器模型,针对不同损伤情况,仿真计算得出了归一化探测曲线和探测器偏移量。根据不同损伤情况下的角偏差信号,得到了不同四象限探测器损伤状态下激光制导炸弹弹道曲线,分析了四象限探测器不同损伤距离下激光制导武器的脱靶量。研究表明,四象限探测器损伤程度和损伤距离都会对激光制导武器产生影响,当四象限探测器为轻度损伤时,脱靶量有所增加,但依然能够击毁目标;中度损伤和重度损伤时,干扰时机越早则压制性干扰效果越好。该研究结果对大功率激光压制半主动激光制导武器效果评估有一定帮助。

#### 参考文献:

- [1] Jiang Yaoting, Yang Jie, Zhou Xiaosong. Developing status quo of laser interference technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(5): 387-390. (in Chinese)  
蒋耀庭, 杨杰, 周晓松. 激光干扰技术及发展现状[J]. *红外与激光工程*, 2001, 30(5): 387-390.
- [2] Xing Hui, Xu Daisheng. A measurement method of the equipment of laser suppresses interference effectiveness [J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(2): 103-105. (in Chinese)  
邢晖, 徐代升. 一种对激光压制干扰效果进行量化评估的方法[J]. *激光与红外*, 2004, 34(2): 103-105.
- [3] Li Haiyan, Hu Yunan, Liu Xudong. Energy estimation method for laser disturbing photoelectrical detectors in remote distance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1038-1043. (in Chinese)  
李海燕, 胡云安, 刘旭东. 激光干扰远场光电探测器能量估算方法[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(6): 1038-1043.
- [4] Xu Jie, Zhao Shanghong, Hou Rui, et al. Researches on high power laser jamming effect on typical laser guiding photoelectric detectors[J]. *Optical Technique*, 2008, 34: 80-82. (in Chinese)  
胥杰, 赵尚弘, 侯睿, 等. 强激光对典型激光制导武器光电探测器的干扰效应研究[J]. *光学技术*, 2008, 34: 80-82.
- [5] Zhong Hairong, Liu Tianhua, Lu Qisheng, et al. Review on the laser-induced damage mechanism study of photoelectric detectors [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(4): 423-428. (in Chinese)  
钟海荣, 刘天华, 陆启生, 等. 激光对光电探测器的破坏机理研究综述[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(4): 423-428.
- [6] Xu Lijun, Zhang Xihe, Lv Yanfei, et al. Research on responsibility of PIN detector interaction with laser[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(7): 717-720. (in Chinese)  
徐立君, 张喜和, 吕彦飞, 等. 激光与 PIN 光电探测器相互作用的响应度研究[J]. *激光与红外*, 2009, 39(7): 717-720.
- [7] Zhong Hairong, Liu Tianhua, Lu Qisheng, et al. Analysis of threshold of laser damage in photoelectric detectors[J]. *Laser Journal*, 2001, 22(4): 1-5. (in Chinese)  
钟海荣, 刘天华, 陆启生, 等. 光电探测器的激光破坏(损伤)阈值分析[J]. *激光杂志*, 2001, 22(4): 1-5.
- [8] Chen Yong, Zhu Tianrui, Li Rui. Design and realization of the angle-measurement algorithm of the four-quadrant detector based on the interpolation algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 544-547. (in Chinese)  
陈勇, 祝天瑞, 李蕊. 基于插值法的四象限探测器测角算法设计与实现方法分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(3): 544-547.
- [9] Shu Bohong, Lu Qisheng, Zhang Guoqing, et al. Laser damage of quadrant detector and its influences on optical guidance[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, 9(3): 463-465. (in Chinese)  
舒柏宏, 陆启生, 张国清, 等. 四象限探测器的激光破坏及其对光学制导的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 1997, 9(3): 463-465.
- [10] GJB4972.1-2003. Evaluating rule for efficiency of optic electric active jamming-first part: laser jamming[S]. Beijing: The military standard press of the PLA general armament department, 2003. (in Chinese)  
GJB4972.1-2003. 光电有源干扰效果评定准则-第一部分: 激光干扰[S]. 北京: 解放军总装备部军标出版发行部, 2003.