

文章编号: 1001-3806(2013)04-0556-05

激光导引头探测能量分布的建模与仿真

李英华^{1,2}, 陈前荣¹, 赵宏鹏¹, 雷昊¹, 刘艳芳¹

(1. 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 洛阳 471003; 2. 中国人民解放军 63892 部队, 洛阳 471003)

摘要: 为了实现光电对抗装备对抗效果的评估, 为某型激光导引头仿真模型的子模型建立了四象限探测器模型并进行了数学仿真。提出了快速计算激光光斑落在四象限探测器每个象限的光斑能量的方法, 即激光光斑象限能量分割模型, 弥补了传统和差电路定向法的不足。结果表明, 建立的四象限探测器模型能够模拟四象限探测器的工作过程, 并且具有易实现、运算速度快等优点。这对于提高某型激光导引头数学仿真系统的可信度和真实性, 以及提高该系统的实时仿真速度是有帮助的。

关键词: 激光技术; 四象限探测器建模; 光斑象限能量分割; 响应灵敏度; 光电流

中图分类号: TN247 文献标识码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.04.031

Modeling and simulation of the detecting energy distribution of laser guidance seekers

LI Ying-hua^{1,2}, CHEN Qian-rong¹, ZHAO Hong-peng¹, LEI Hao¹, LIU Yan-fang¹

(1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics & Information System, Luoyang 471003, China; 2. 63892 Unit, Chinese People's Liberation Army, Luoyang 471003, China)

Abstract: In order to evaluate the countermeasure effect of the electro-optical countermeasure equipment in the electronic base, the quadrant detector (QD) model was established, which is the sub-model of a certain type laser seeker, and simulated. The spot quadrant energy division model compensates the deficiency of the traditional sum-and-difference circuit method. The simulation result shows that the QD model can imitate the process of the QD, and it has advantages of feasibility and fast computation, which improves the credibility and reality of this type of laser seeker, and the real-time simulation speed as well.

Key words: laser technique; quadrant detector modeling; spot quadrant energy division; response sensitivity; photocurrent

引 言

风标式激光制导炸弹作为世界上最早研制出来的精确制导武器, 被各国广泛装备, 具有代表性的有美国的宝石路系列和俄罗斯的 KAB 系列。我国的精确制导武器起步较晚, 2008 年某型激光制导炸弹正式列装部队, 成为我国首个装备部队的精确制导炸弹型号。

光电对抗装备与各种光电精确制导武器的对抗, 主要通过武器上的导引头起作用, 因此, 研究建立某型导引头仿真系统对于光电对抗装备对抗效果的评估具有重要意义。而四象限探测器是激光导引

头的核心元件, 它探测由目标漫反射的目标指示激光信号, 把激光能量转换为另外一种可测量的物理量。本文中通过对四象限探测器的结构机理及其主要特性的分析, 将光信号转化为电信号的物理形成过程用数学方法描述, 有效解决了激光导引头仿真系统中的四象限探测器数学建模问题。

1 四象限探测器工作原理

PIN 型四象限探测器具有灵敏度高、响应速度快等特点, 在跟踪和校准方面有很大的实用性, 常用于激光导引头、激光经纬仪等光电跟踪、定位和准直仪器装备中。在激光制导武器跟踪过程中, 由目标反射的激光指示信号经光学系统汇集投射在四象限探测器的 (quadrant detector, QD) 表面上, 形成目标像斑^[1], 同时探测器输出 4 路光电信号, 如图 1 所示。四象限探测器解算电路通过目标像斑在 4 个象

作者简介: 李英华 (1980-), 女, 工程师, 主要从事光电对抗与激光制导的研究。

E-mail: jinzhaoyingying@yahoo.cn

收稿日期: 2012-09-10; 收到修改稿日期: 2012-11-07

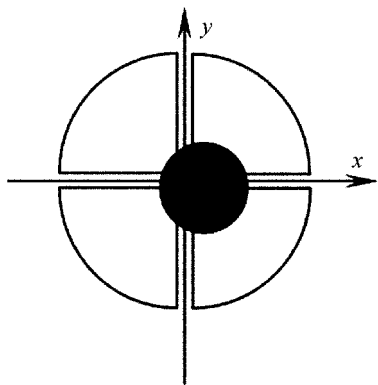


Fig. 1 Laser spot image on the QD

限上的分布状况,来解算目标在空间的位置并提供原始误差信号。当光斑落在探测器中心时,4 个象限上接收到的信号光强相等,经过处理得到的光斑中心与探测器中心的偏移信号为 0。当目标光斑相对探测器中心产生偏移时,4 个象限由于光能量的不同而产生不同的光电流,通过对光电流的幅度进行计算,即可确定入射光斑相对探测器中心的偏移量,从而对目标光斑中心进行定位。

2 四象限探测器建模仿真方法

2.1 激光光斑象限能量分割模型研究

激光制导武器在制导过程中,由目标反射的激光制导信号通过一个大视场的光学系统入射到四象限探测器上,根据光斑在四象限上的位置来确定目标的方位角和俯仰角,即炸弹的横向偏差和纵向偏差。计算光斑在四象限上的位置^[2-4]普遍采用和差电路定向法,其表达式如下:

$$\begin{cases} R_y = k \frac{(V_1 + V_2) - (V_3 + V_4)}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4} \\ R_x = k \frac{(V_1 + V_4) - (V_2 + V_3)}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4} \end{cases} \quad (1)$$

式中, (R_y, R_x) 为光斑能量分布中心到四象限探测器中心的距离, k 为比例系数, V_i 为第 i ($i = 1, 2, 3, 4$) 象限的输出电压。

当光斑能量分布均匀时:

$$V_i = S_i P_r \eta R_1 \quad (2)$$

此时 (R_y, R_x) 可表示为:

$$\begin{cases} R_y = 2k \left[y \sqrt{1 - \left(\frac{y}{r}\right)^2} + \arcsin\left(\frac{y}{r}\right) \right] / \pi \\ R_x = 2k \left[x \sqrt{1 - \left(\frac{x}{r}\right)^2} + \arcsin\left(\frac{x}{r}\right) \right] / \pi \end{cases} \quad (3)$$

当光斑能量分布不均匀时:

$$V_i = \eta R_1 \iint_{S_i} P_r(y, x) dy dx \quad (4)$$

式中,光斑的功率密度为 P_r ,探测器的光电灵敏度为 η ,光斑半径为 r ,光斑照在第 i 象限的面积为 S_i ,负载电阻为 R_1 ,光斑的几何分布中心坐标为 (y, x) 。

在导引头制导的整个过程中,从激光目标指示器发出的激光经过目标反射、两次大气传输后,四象限探测器接收的光斑并不是一个标准的圆形,有时可近似成椭圆甚至是不规则图形^[5]。因此在整个制导过程中,多数情况下光斑分布是不均匀的。当光斑能量分布不均匀时,根据(4)式可知要用到积分,这在一定程度上会增加仿真计算的时间。当光斑能量分布均匀时,由(2)式和(3)式可以看出,计算 (R_y, R_x) 需要计算光斑半径 r ,当光斑只占几个像素时,计算 r 的误差较小;当光斑变大时, r 的误差也随之增大。以上是和差电路定向法的不足。在对四象限探测器进行仿真的过程中,求解激光光斑在探测器各象限的能量分布是核心,需要用到(2)式和(4)式。上面提到了(4)式的不足,(2)式在计算过程中会遇到光斑形状不均匀的问题,这给计算光斑面积带来一定困难,从而影响仿真速度。为了解决以上问题,建立了激光光斑象限能量分割模型,具体表述如下。

已知一个从指示激光出光口发出的激光光斑图像矩阵 T_0 ,利用大气传输模型计算激光光斑经过大气传输后的光斑图像矩阵为 T_1 ,利用某型激光导引头光学系统效应仿真模型计算光斑经过光学系统传输后的光斑图像矩阵为 T_2 ,设四象限探测器所在的矩阵为 Q ,则光斑落在探测器上的激光能量总值 E 为:

$$E = T_2 \cdot Q \quad (5)$$

式中, $T_2 = k_1 \cdot T_1 = k_1 \cdot k_2 \cdot T_0$, k_1, k_2 为修正因子。

由此可得出光斑落在每个象限上的激光能量值之和为:

$$E = \sum_i T_{2i} \cdot Q_i, (i = 1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

式中, T_{2i} 为激光光斑在第 i 象限的图像矩阵, Q_i 为四象限探测器在第 i 象限的矩阵。

上述利用两个矩阵相积分的算法计算光斑在探测器 4 个象限的激光能量值,与和差电路定向算法相比,该算法具有编程实现简单、计算速度快等优点,不用考虑落在探测器上的光斑是否均匀分布的问题,较为精准地反映了光斑在四象限探测器上的能量分布情况。同时,将该算法代入(1)式,便可方便快捷地计算出光斑在四象限上的位置,既弥补了和差电路定向算法的不足,又无需考虑光斑分布是否均匀的问题。

该算法不仅可以用于求解单四象限探测器的能量分布,对于双四象限探测器的能量分布也可用此算法。因此,该算法具有较好的通用性和可移植性。

2.2 四象限探测器建模仿真方法

在四象限探测器性能参量中最重要的一个参量就是响应灵敏度^[6],它是用来表征探测器将入射光信号转化为电信号的能力,其定义为:在给定波长的光照条件下,光电探测器的输出平均光电压 V_s 与平均入射光功率 P 之比,表达式如下:

$$R_V = \frac{V_s}{P} (\mu V / \mu W) \quad (7)$$

如果用平均电流 I_s 来表示,则为:

$$R_A = \frac{I_s}{P} (\mu A / \mu W) \quad (8)$$

响应灵敏度可分为直流响应度和脉冲响应灵敏度。在加载偏置电压的情况下,一般来讲,响应灵敏度是一个定值,但响应灵敏度不是在任何光照下都是定值。光电探测器从对超过其探测灵敏度的激光开始响应,进入线性放大区,此时光电探测器的输出光电流随着入射激光能量的增加而成比例增加;当输出光电流达到最大值时,光电探测器进入饱和区,此时输出光电流并不随着入射激光能量的增加而增

加,而是保持一个恒定的值,也可以称此时光电探测器的工作区为非线性放大区;当入射激光能量继续增大,光电探测器的输出响应开始下降,此时是深度饱和,若及时停止激光辐照,光电探测组件能够恢复原来的响应度;如果继续增大入射激光能量,光电探测器将会出现不同程度的损伤,如饱和或致眩等,最后直至输出光电流为 0,探测器彻底被破坏^[7-10]。

当 PIN 四象限探测器去掉偏置电压后,探测器工作区由光电二极管伏安特性曲线第三象限转为第四象限。此时器件上的电压即为光生电压(像光电池一样工作),响应率大大降低,但是也带来了抗激光饱和干扰能力。在激光制导炸弹制导过程中,在弹道末段一两百米距离时,激光导引头探测到的激光指示信号非常强,甚至使探测器处于饱和状态,无法继续提供制导信号。以往的做法是干脆切断制导信号,使弹体顺着惯性击中目标。此外如果在弹道末段去掉偏置电压,使探测器响应率大为降低,则激光导引头探测器组件没有处于饱和状态,导引头能够继续输出制导信号,为弹道末段提供制导,使炸弹以更高精度命中目标。

根据以上分析,可以得出激光导引头四象限探测器仿真流程图,如图 2 所示。

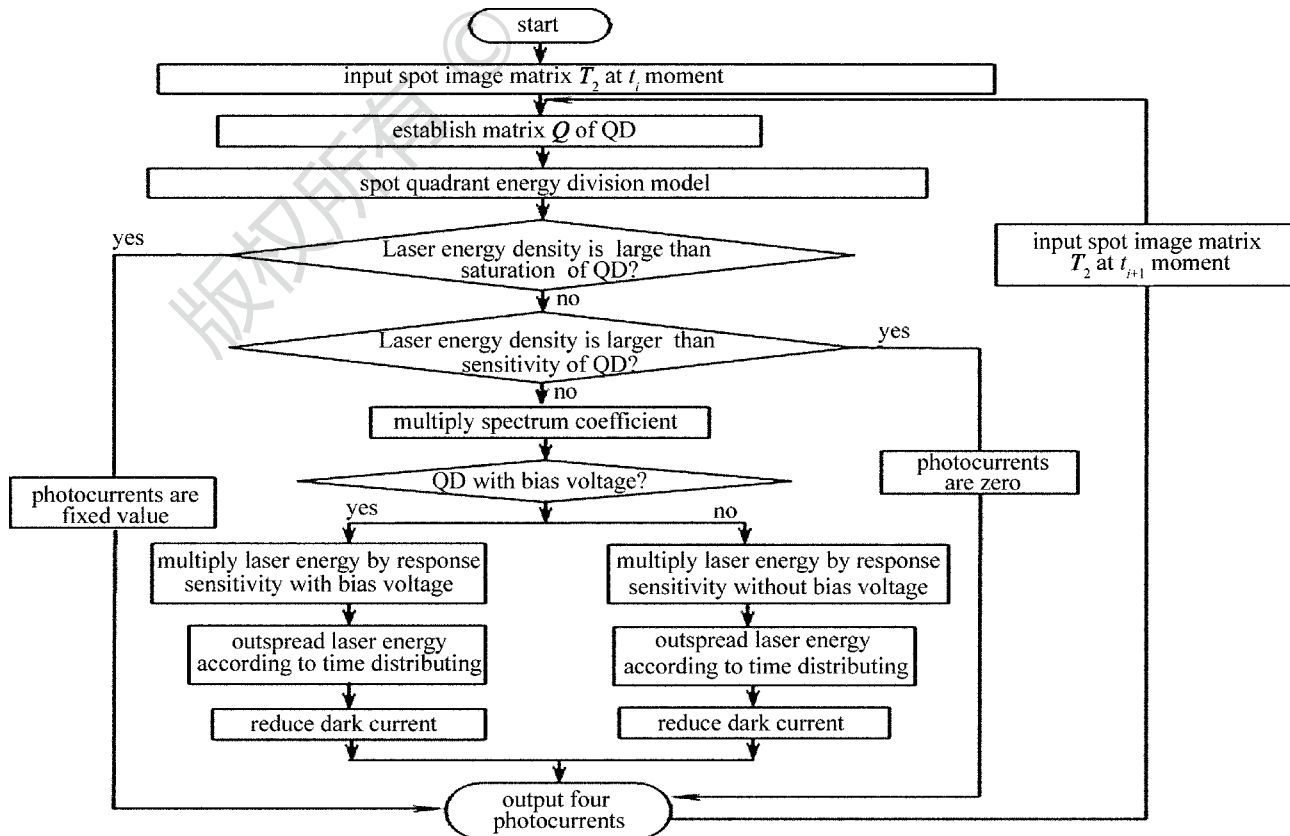


Fig. 2 Flow chart of simulation on the quadrant detector of laser seeker

3 四象限探测器模型应用

根据作者提出的算法,利用 MATLAB 软件进行了仿真,设定激光光斑照射在四象限探测器上的两种情况,并假设落在探测器上的光斑能量分布为高斯分布。图 3 和图 4 为激光光斑照在探测器上的位置,图 5 和图 6 为激光光斑能量随时间变化曲线,图 7 和图 8 为四象限探测器输出的 4 路光电流随时间变化曲线。在第 1 种情况中,光斑落在了探测器第三象限。从图 7 可以看出,第三象限光电流值明显高于其它 3 个象限。在第 2 种情况中,光斑落在了第二象限和第三象限以及分划线上,且落在第二象限的面积比第三象限大。为了便于观察光斑在探测器上的位置,通过语句处理改变了图像的灰度值。从图 8 可以看出,第二象限、第三象限的光电流值明显高于其它两个象限,且第二象限的光电流值高于第三象限。由此可知,本文中的仿真结果符合实际情况。

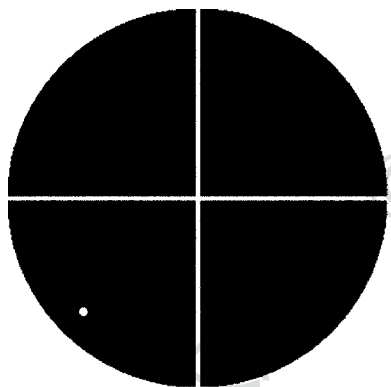


Fig. 3 Spot position on the QD at a certain moment in the first case

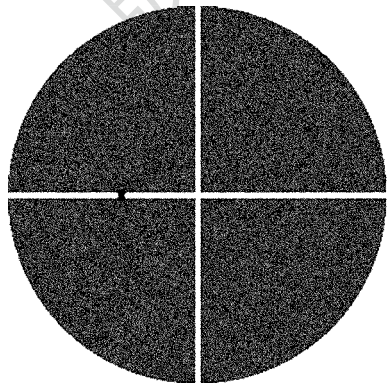


Fig. 4 Spot position on the QD at a certain moment in the second case

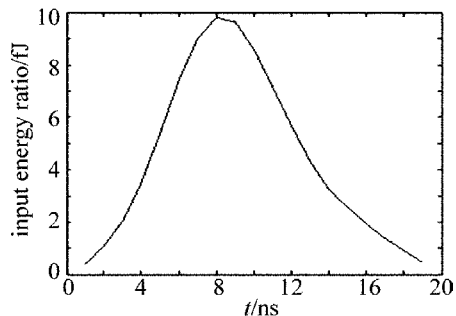


Fig. 5 Spot curve changing with time at a certain moment in the first case

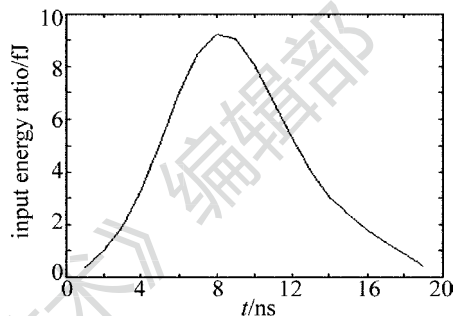


Fig. 6 Spot curve changing with time at a certain moment in the second case

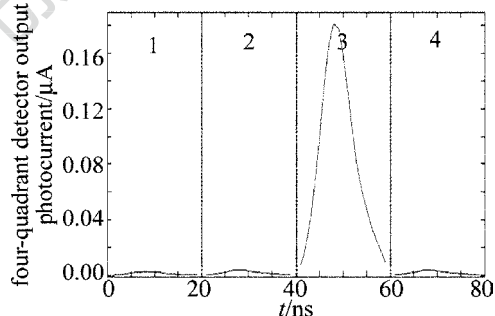


Fig. 7 Four output photocurrent curves of QD in the first case

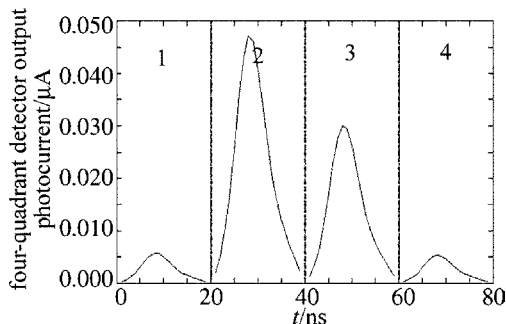


Fig. 8 Four output photocurrent curves of QD in the second case

4 结论

根据激光导引头四象限探测器的工作原理对四象限探测器进行了建模仿真。仿真结果表明,利用本文中建立的模型对四象限探测器进行仿真是可行

的,其仿真的输出值为某型导引头仿真系统的混合网络子模型提供了输入。下一步要利用激光照射四象限探测器的真实输出光电流值来校验和改进探测器模型的相关参量,使其达到更高的仿真精度。

参 考 文 献

- [1] FAN J K,ZHANG G Y. Design and development of the parameters testing system for quadrantal detector[J]. Journal of Harbin University Science and Technology,2005,10(4):4-7(in Chinese).
- [2] GAO Z J,ZHANG A J,SHI G H. Simulation study on the seeker of aerodynamically stabilized laser-guided aerial bomb [J]. Opto Electronic Engineering,2007,34(1):4-8(in Chinese).
- [3] LIU Z G,ZHANG J S,WANG S C,*et al.* Research of digital simulation of laser-guided bomb [J]. Journal of System Simulation, 2005,17(7):1757-1759.
- [4] YU F,HE Y,LI S,*et al.* Improvement of positioning algorithm for four-quadrant optoelectronic detection system [J]. Journal of Applied Optics,2008,29(4):493-497(in Chinese).
- [5] BAI L. Research and application of laser atmospheric transmission theory[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications,2008:5-21(in Chinese).
- [6] WU Q B. Research on parameters-automatic-measurement system of the quarter infrared optoelectronic detector[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology,2005:9-11(in Chinese).
- [7] NIU Y X. Research on high-power laser-induced damage and protective technology of opoelectronics systems [D]. Tianjin: Tianjin University,2005:83-88(in Chinese).
- [8] XU L J,ZHANG X H,LU Y F,*et al.* Research on responsibility of PIN detector interaction with Laser[J]. Laser & Infrared,2009,39(7):717-720(in Chinese).
- [9] NIU Y X,WANG Y F,ZHAO J G,*et al.* Research on laser damage of four-quadrant photodetector[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 1996,10(3):215-217(in Chinese).
- [10] SHU B H,LU Q S,ZHANG G Q,*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).