

## 基于激光导引头对抗数据的光电对抗效果实验方法

张文攀<sup>1,2</sup>, 吴军辉<sup>1,2</sup>, 胡欣<sup>1,2</sup>, 梁巍巍<sup>1,2</sup>, 殷瑞光<sup>1,2</sup>, 刘艳芳<sup>1,2</sup>, 汪亚<sup>1,2</sup>

(1. 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003;

2. 中国人民解放军 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 为了同时获得实装对抗的高可信度和数学仿真大样本的优点, 提出了基于激光导引头实物对抗数据的光电对抗效果评估技术, 分析了该种实验方法的主要误差因素。根据目标漫反射特性和直射式激光干扰设备特点, 建立了激光导引头处目标漫反射激光能量密度模型和激光导引头处直射式激光干扰设备激光能量密度模型。采用数值计算方法, 分析了激光导引头处目标漫反射激光能量密度误差分布规律和激光导引头处直射式激光干扰设备激光能量密度误差分布规律。最后利用实际试验过程, 计算了该种实验方法下激光导引头接收到的目标漫反射激光能量密度和直射式激光干扰设备激光能量密度的误差, 证明了该实验方法的有效性。

**关键词:** 效果评估; 光电对抗实验; 仿真; 激光制导武器; 误差分析

**中图分类号:** TN977 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0637-06

## A test method to real laser seekers based on electro-optic countermeasure

Zhang Wenpan<sup>1,2</sup>, Wu Junhui<sup>1,2</sup>, Hu Xin<sup>1,2</sup>, Liang Weiwei<sup>1,2</sup>, Yin Ruiguang<sup>1,2</sup>, Liu Yanfang<sup>1,2</sup>, Wang Ya<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang 471003, China; 2. Unit 63892 of PLA, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** A simulation test method on electric-optic countermeasure to real laser seekers was proposed to get high reliability of real laser seeker and sample quality of simulation, and the major error factor was found. It was diagrammatic how the process of test worked, and the steps of test were given. According to the characteristic of diffuse reflection target and direct irradiated equipment, the models of laser energy density for diffuse reflection target and direct irradiated equipment at the point of laser seeker were established, and the error distribution principle was analyzed numerically. Besides, it was defined how to get the valid distance with error. The real jamming tests were performed to a real seeker by an electro-optic countermeasure system. The conclusion is that the jamming to laser guided weapon was valid by the electro-optic countermeasure system, and the valid distance also was given. The method was proved to be effective by the tests.

**Key words:** effect evaluation; electro-optic countermeasure test; simulation; laser guided weapon; error analysis

收稿日期: 2012-07-22; 修订日期: 2012-08-19

基金项目: 总装重大课题研究基金(2009SY3300005)

作者简介: 张文攀(1981-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为激光对抗仿真实验技术、激光对抗设备鉴定技术、激光对抗系统建模。

Email: zwp511@hotmail.com.

## 0 引言

光电对抗设备对激光制导武器的干扰效果评估之前主要依靠野外对导引头实物实验和内场仿真进行,野外对导引头实物实验时由于无法模拟激光制导武器运动控制过程,因此无法获得对抗前后激光制导武器的落点,造成对抗效果的评估结果不够准确,需要开展数学仿真进行较精确的定量分析;内场仿真虽可以利用全闭环半实物仿真系统开展实验,但实验前也需要开展数学仿真研究对抗效果的基本规律,以利于全闭环半实物仿真实验时选取适当的战情设计。因此有必要开展对激光制导武器光电对抗干扰的数学仿真<sup>[1-2]</sup>。

开展数学仿真的主要困难是模型的建立,目前激光制导武器的运动控制模型已经较为成熟,激光干扰设备的模型可以通过原理仿真和实测数据相结合建立,只有激光干扰设备对激光导引头的效应模型较难建立,需要长期实践<sup>[3]</sup>。因此在数学仿真初始阶段可以利用激光干扰设备实物对激光导引头实物对抗数据进行数学仿真。由于对激光导引头实物对抗时利用未被干扰的弹道进行激光能量密度的仿真,而数学仿真情况下激光干扰设备可能使激光制导武器的弹道发生变化,造成激光导引头接收到的指示激光和干扰激光的能量密度与实物对抗建立的模型不同,给仿真结果带来一定的误差。文中即探索利用激光导引头实物对抗数据建立干扰效果模型进行光电对抗效果评估的实验方法和误差分析<sup>[4]</sup>。

## 1 实验方法

利用激光导引头实物对抗数据进行光电对抗效果评估的实验方法采用静态干扰实验与数学仿真相结合的方法,静态干扰实验主要获得对激光导引头的干扰效果,并分析各种干扰效果的产生条件以利于干扰效果模型的建立,数学仿真主要依据干扰效果模型结合数学仿真系统进行激光制导武器落点的仿真,并获得落点的分布用于评估激光干扰设备的对抗效果。实验步骤如下:

(1) 进行光电对抗战情设计,确定目标、激光干扰设备、激光制导武器各项战情参数;

(2) 利用设计的战情进行正常制导情况下激光

制导武器运动仿真,获取激光制导武器的运动轨迹和姿态,并计算战情条件下激光制导武器导引头处指示激光和干扰激光的能量密度;

(3) 利用目标指示激光器、直射式激光干扰设备、激光导引头、动态激光衰减器(2台)、标准漫反射板等设备进行实验布设,实验布局示意图如图1所示,此时注意将目标信号和干扰信号分别布设于激光导引头不同方位方便分辨,由于激光导引头一般采用四象限探测器,因此通常将目标信号和干扰信号分别布设于激光导引头的左前方和右前方,使得导引头的输出信号能够反映指示激光和干扰激光的不同方位;

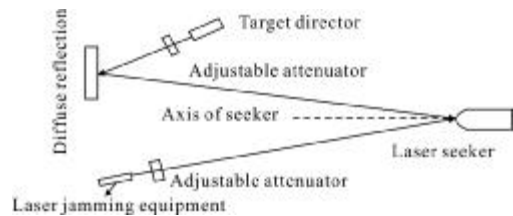


图 1 激光导引头实物对抗静态干扰实验布局示意图

Fig.1 Layout of static jamming test to real laser seeker

(4) 利用步骤(2)中获得的激光制导武器导引头处指示激光和干扰激光的能量密度数据分别控制动态激光衰减器,使得激光导引头接收到的指示激光和干扰激光与步骤(2)中的一致,记录激光导引头输出信号;

(5) 利用激光导引头输出信号数据建立干扰效果模型,并利用该模型和战情进行数学仿真,干扰效果模型用于控制激光制导武器的运动并获得该次实验落点,根据激光制导武器实际运行轨迹计算此时激光制导武器导引头处指示激光和干扰激光的能量密度并与步骤(4)实验中使用的能量密度数据进行比较,判断能量误差是否超限,若不超限,则该次仿真实验有效;若超限,则利用数学仿真弹道重新计算激光制导武器导引头处指示激光和干扰激光的能量密度,并利用该数据重新开始步骤(4),直至误差不超限为止;

(6) 多次重复步骤(5),直到完成该种战情下所需要的激光制导武器落点数;

(7) 多次重复步骤(2)~步骤(6),直到完成评估所需要的战情设计数量;

(8) 利用已建立的评估模型和方法对激光制导武器被干扰前和被干扰后的落点分布情况进行分析,完成对抗效果评估。

## 2 精度分析

由于激光导引头主要进行激光时序、能量的判断,该实验方法对激光时序的影响很小,方法的误差主要来自干扰前后弹道变化产生的激光导引头处指示激光和干扰激光的能量密度变化。下面分别分析激光导引头处指示激光和干扰激光能量密度误差。

### 2.1 激光导引头处指示激光能量密度分析

假设目标为标准漫反射体,指示激光传输到导引头处的能量密度为:

$$\varepsilon_T = \frac{\rho_T * E_D * \tau_1 * \tau_2 * \cos\theta_D * \cos\varphi_T}{\pi * I_T^2} \quad (1)$$

式中: $\rho_T$ 为目标漫反射率; $E_D$ 为激光器出射能量; $\tau_1$ 为激光器到目标路径上激光透过率; $\tau_2$ 为目标到激光导引头路径上激光透过率; $\theta_D$ 为激光器到目标连线与目标法线之间的夹角; $\varphi_T$ 为目标到激光导引头连线与目标法线之间的夹角; $I_T$ 为目标到激光导引头的距离。

1.06  $\mu\text{m}$  激光斜程大气透过率可用以下经验公式<sup>[5]</sup>:

$$\tau_2 = \exp\left[\frac{2.06}{0.83 * V_m * \sin\alpha_T} (1 - e^{-0.83 * I_T * \cos\alpha_T})\right] \quad (2)$$

其中 $V_m$ 为大气能见度, $\alpha_T$ 为目标到激光导引头连线的天顶角,将公式(2)代入公式(1),可得:

$$\varepsilon_T = \frac{\rho_T * E_D * \tau_1 * \cos\theta_D * \cos\varphi_T}{\pi * I_T^2} \exp\left[\frac{2.06}{0.83 * V_m * \sin\alpha_T} (1 - e^{-0.83 * I_T * \cos\alpha_T})\right] \quad (3)$$

### 2.2 激光导引头处干扰激光能量密度分析

为了保证干扰激光能够以较高概率进入到激光导引头,一般将干扰激光整形为平顶光束,因此可以假设干扰激光为均匀光束,则激光导引头处干扰激光能量密度为:

$$\varepsilon_J = \frac{E_J * \tau_3}{\pi * \left(\frac{\omega_J * I_J}{2}\right)^2} \quad (4)$$

式中: $E_J$ 为干扰激光出射能量; $\tau_3$ 为干扰激光出口到激光导引头路径上激光透过率; $\omega_J$ 为干扰激光光束

发散角; $I_J$ 为干扰激光出口到激光导引头的距离。

由公式(2)可得:

$$\tau_3 = \exp\left[\frac{2.06}{0.83 * V_m * \sin\alpha_J} (1 - e^{-0.83 * I_J * \cos\alpha_J})\right] \quad (5)$$

其中, $\alpha_J$ 为干扰激光出口到激光导引头连线的天顶角。

将公式(5)代入公式(4)中,可得:

$$\varepsilon_J = \frac{4E_J}{\pi * \omega_J^2 * I_J^2} \exp\left[\frac{2.06}{0.83 * V_m * \sin\alpha_J} (1 - e^{-0.83 * I_J * \cos\alpha_J})\right] \quad (6)$$

### 2.3 误差数值分析

分析时,以目标位置为原点,以目标与激光制导武器连线在水平面的投影为 $X$ 轴,目标指向激光制导武器投影方向为正,以竖直方向为 $Z$ 轴,向上为正,以右手系确定 $Y$ 轴方向。目标和激光目标指示器静止,目标法线方向为 $(1,0,0)$ ,激光制导武器位置为 $(x_B, y_B, z_B)$ ,则, $I_T = \sqrt{x_B^2 + y_B^2 + z_B^2}$ , $\cos\varphi_T = \frac{|x_B|}{\sqrt{x_B^2 + y_B^2 + z_B^2}}$

分析过程中 $\rho_T$ 、 $E_D$ 、 $\tau_1$ 、 $\theta_D$ 、 $V_m$ 皆不变化,设 $C_T = \frac{\rho_T * E_D * \tau_1 * \cos\theta_D}{\pi}$ , $C_\tau = \frac{-2.06}{0.83 * V_m}$ ,则公式(3)可变为:

$$\varepsilon_T = \frac{C_T * |x_B|}{(x_B^2 + y_B^2 + z_B^2)^{3/2}} \exp\left[\frac{C_\tau * \sqrt{x_B^2 + y_B^2 + z_B^2}}{\sqrt{x_B^2 + y_B^2}} (1 - e^{-0.83 * |z_B|})\right] \quad (7)$$

同公式(7)推导过程的假设,且设 $C_J = \frac{4E_J}{\pi * \omega_J^2}$ ,干

扰激光出口位置为 $(x_J, y_J, z_J)$ ,则公式(6)可变为:

$$\varepsilon_J = \frac{C_J}{(x_B - x_J)^2 + (y_B - y_J)^2 + (z_B - z_J)^2} * \exp\left[\frac{C_\tau * \sqrt{(x_B - x_J)^2 + (y_B - y_J)^2 + (z_B - z_J)^2}}{\sqrt{(x_B - x_J)^2 + (y_B - y_J)^2}} (1 - e^{-0.83 * |z_B - z_J|})\right] \quad (8)$$

由于公式(7)和公式(8)解析获得的结果相当复杂,不易分析,因此,文中采用数值分析的方法。数值分析时,相关系数取值如下: $\rho_T = 0.3$ 、 $E_D = 0.1 \text{ J}$ 、 $\tau_1 = 0.5$ 、 $\theta_D = 0^\circ$ 、 $V_m = 10\ 000 \text{ m}$ 、 $E_T = 0.000\ 1 \text{ J}$ 、 $\omega_J = 4^\circ$ 、 $x_B$ 和 $z_B$ 取值范围为 $[0 \text{ m}, 2\ 000 \text{ m}]$ 、 $y_B$ 取值范围为 $[-2\ 000 \text{ m}, 2\ 000 \text{ m}]$ 、干扰激光出口位置取值为 $(0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0 \text{ m})$ ,则 $C_T = -0.004\ 77$ 、 $C_\tau = -0.000\ 248\ 19$ 、 $C_J = 0.026\ 12$ ,由此可得 $\varepsilon_T$ 和 $\varepsilon_J$ 的值和梯度,最终获得 $\varepsilon_T$ 和 $\varepsilon_J$ 的相对梯度。

激光导引头处指示激光能量密度相对梯度数值如图 2 所示,其中(a)为等相对梯度数值面三维图,(b)为俯视图,(c)为正视图。由图可以看出,等相对梯

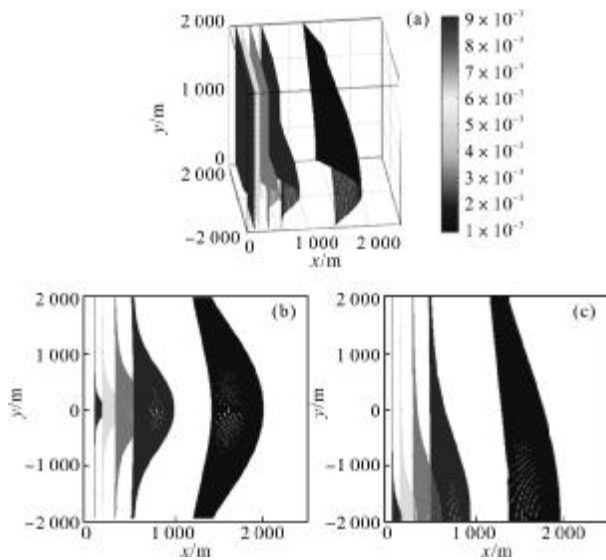


图 2 激光导引头处指示激光能量密度等相对梯度数值图

Fig.2 Contour of relative gradient of target laser energy density at the point of laser seeker

度数值面为以  $XOZ$  平面对称,沿  $Y$  轴向外凸起的曲面,且  $Y$  值越大凸起越明显。图 3 为激光导引头处指示激光能量密度梯度方向,其中(a)为梯度方向三维图,(b)为正视图,(c)为俯视图,(d)为右视图。由图可以看出,梯度方向以  $XOZ$  平面对称,朝目标聚拢,离目标距离越近方向变化率越大,在  $YOZ$  平面直接指向目标方向。

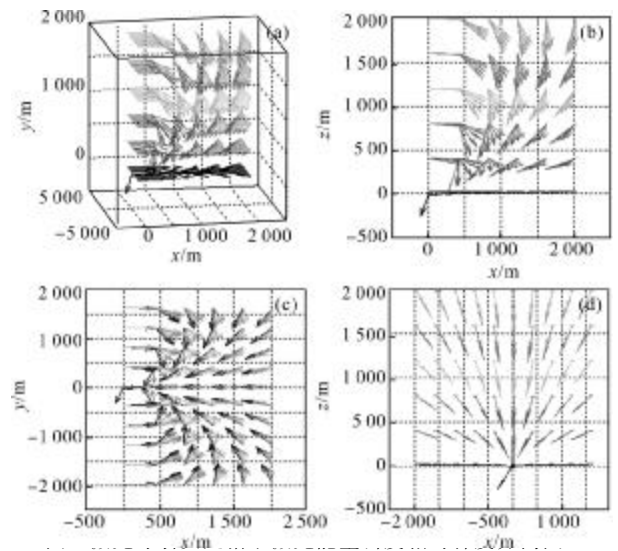


Fig.3 Direction of relative gradient of target laser energy density at the point of laser seeker

激光导引头处干扰激光能量密度相对梯度数值

如图 4 所示,其中(a)为等相对梯度数值面三维图,(b)为俯视图,(c)为正视图,(d)为左视图。由图可以看出,等相对梯度数值面近似为球面,距离干扰激光出口越远越接近球面。

激光导引头接收的干扰激光能量密度梯度方向如图 5 所示,其中(a)为梯度方向三维图,(b)为正视图,(c)为俯视图,(d)为左视图。由图可以看出,梯度

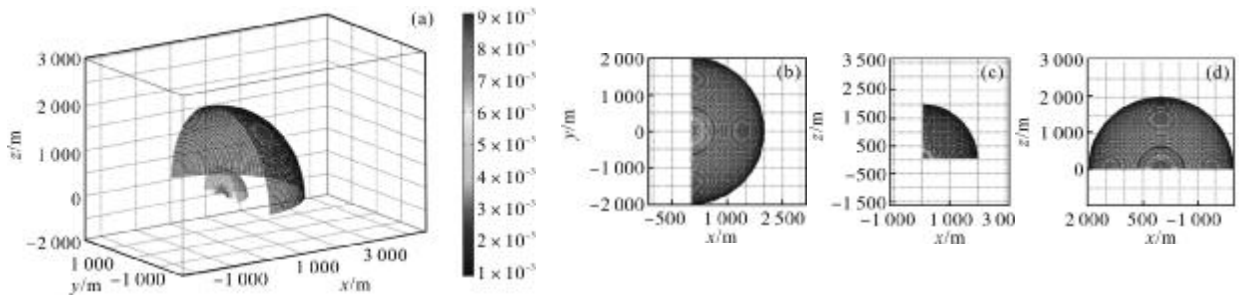


图 4 激光导引头处干扰激光能量密度等相对梯度数值图

Fig.4 Contour of relative gradient of jamming laser energy density at the point of laser seeker

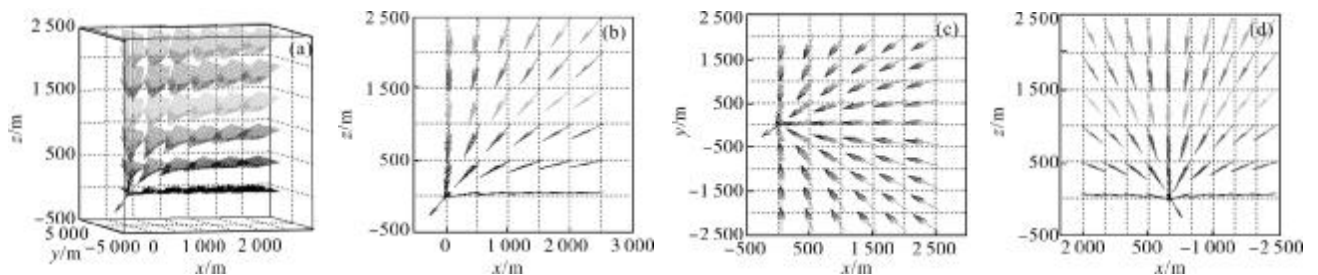


图 5 激光导引头处干扰激光能量密度相对梯度方向图

Fig.5 Direction of relative gradient of jamming laser energy density at the point of laser seeker

方向指向激光干扰设备。

由以上分析可以看出,在距离目标和干扰激光出口 300 m 以外,激光能量密度的相对梯度值均小于 5%。由激光导引头的视场有限并且根据保护目标的基本原则,激光干扰设备需要距离目标 100 m 以上可知,在激光制导武器运动的绝大多数时间内,指示激光和干扰激光的误差均可被接受,该实验方法的误差在相当大的范围内能够满足评估干扰效果的要求。

### 3 具体实验举例

设  $\beta$  为目标到激光导引头连线与激光导引头光轴之间的夹角,  $\gamma$  为直射激光干扰设备(干扰激光出口)到激光导引头连线与激光导引头光轴之间的夹角,则激光导引头接收的指示激光能量密度为:

$$\epsilon_{TS} = \epsilon_T \cdot \cos\beta \tag{9}$$

激光导引头接收的干扰激光能量密度为:

$$\epsilon_{JS} = \epsilon_J \cdot \cos\gamma \tag{10}$$

利用激光制导武器对抗数学仿真系统,设定仿真初始战情如下:

目标位置为(0 m, 0 m, 0 m)、漫反射率为 0.3,直射式激光干扰设备位置为(0 m, 100 m, 0 m)、单脉冲能量 0.000 1 J、发散角为 4°,目标指示方向与目标法线夹角为 0°,目标指示器单脉冲能量 0.1 J,目标指示器到激光制导武器路径上的大气透过率为 0.5,激光制导武器初始位置(6 000 m, 0 m, 3 000 m)、初始速度为 200 m/s、初始方向为(-1,0,0),大气能见度为 10 000 m,将能量密度误差定为 20%。

进行正常制导情况下仿真,获得弹道曲线,如图6实线所示。经导引头实物实验后获得导引头干扰效果数据,如图 7 所示。由此开展数学仿真获得对抗后

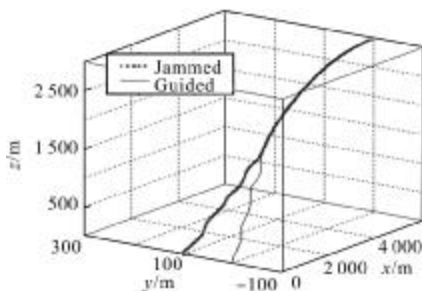


图 6 激光制导武器正常制导和被对抗后弹道  
Fig.6 LGB tracks in guidance and jamming

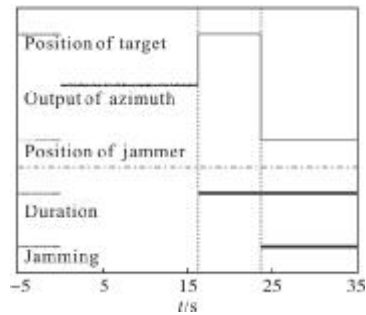


图 7 导引头实物实验获得的导引头干扰效果数据  
Fig.7 Curve of jamming effect by real laser seeker

弹道曲线,如图 6 粗点线所示。可得正常制导和对抗后激光导引头接收的目标漫反射激光能量密度误差如图 8 所示,激光导引头接收的对抗设备激光能量密度误差如图 9 所示。经计算目标脱离视场的距离为 372.93 m,由图可知,指示激光能量密度和干扰激光能量密度最大误差分别为 12.69%和 12.19%,由此可知本次实验有效。

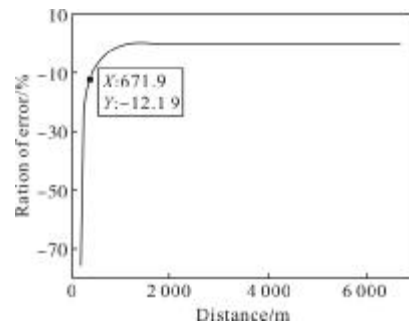


图 8 制导和对抗后激光导引头接收的指示激光能量密度误差  
Fig.8 Error of target laser energy density for real laser seeker in guidance and jamming

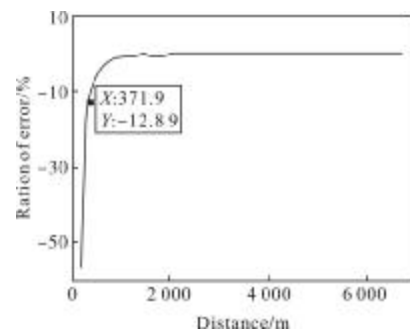


图 9 制导和对抗后激光导引头接收的干扰激光能量密度误差  
Fig.9 Error of jamming laser energy density for real laser seeker in guidance and jamming

### 4 结论

文中提出了基于激光导引头实物对抗数据的光

电对抗效果评估技术。在分析根据目标漫反射特性和直射式激光干扰设备特点,推导了激光导引头接收的目标漫反射激光能量密度公式和激光导引头接收的干扰激光能量密度公式。采用数值计算方法,分析了激光导引头接收的目标漫反射激光能量密度误差分布规律和激光导引头接收的干扰激光能量密度误差分布规律,从理论上说明了方法的可行性。利用实际实验数据说明了实验的实现方法,并利用实际弹道数据证明了该实验方法的有效性。

#### 参考文献:

- [1] Guo Ruhai, Wang Bing. Development of optical countermeasure technique [J]. OME information, 2011, 28(7): 21-26. (in Chinese)  
郭汝海, 王兵. 光电对抗技术研究进展 [J]. 光机电信息, 2011, 28(7): 21-26.
- [2] Wang Jianjun, Zhang Peilu, Li Yan, et al. Design of indoor simulation test system for laser warning [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(9): 1936-1942. (in Chinese)  
王建军, 张沛露, 李岩, 等. 激光告警内场仿真试验系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 1936-1942.
- [3] Zhang Jie, Wang Xun, Liu Jingmei. Design and application of software platform for electro-optical countermeasure simulation test system[J]. Infrared, 2011, 32(7): 34-37. (in Chinese)  
张洁, 王迅, 刘静梅. 光电对抗仿真试验系统软件平台的设计与应用[J]. 红外, 2011, 32(7): 34-37.
- [4] Li Hui, Wu Junhui, Zhu Zhen, et al. Analysis and simulation of stabilization and tracking principle for rate gyroscope laser seeker [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1337-1341. (in Chinese)  
李慧, 吴军辉, 朱震, 等. 速率陀螺式激光导引头稳定跟踪原理分析与仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1337-1341.
- [5] Lihui, Wu Junhui, Hu Xin, et al. Dynamic modeling and simulation of dynamic-gyro laser homing head [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(07): 758-762. (in Chinese)  
李慧, 吴军辉, 胡欣, 等. 动力陀螺式激光导引头的动力学建模与仿真[J]. 激光与红外, 2011, 41(07): 758-762.
- [6] Li Hua, Qin Shiqiao, Yao Mei, et al. Test and model to extra laser energy in the lab on laser-guided weapon simulation [J]. Journal of Optoelectronics: Laser, 2009, 20(03): 374-377. (In Chinese)  
李华, 秦石乔, 姚梅, 等. 激光制导半实物仿真中弱激光能量测试和控制[J]. 光电子·激光, 2009, 20(03): 374-377.
- [7] Wang Jiang, Lin Wei, Wang Peng, et al. Analysis of laser energy chain in the hardware-in-the-loop simulation system of semi-active laser guidance [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1230-1233. (in Chinese)  
王江, 林蔚, 王鹏, 等. 激光半主动制导武器半实物仿真系统能量链研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1230-1233.
- [8] Chen Qianrong, Wang Guoyu, Chen Yongguang, et al. Creation and application of the atmospheric transmittance database for 1 064 nm laser [J]. Laser & Infrared, 2007, 30(07): 610-613. (in Chinese)  
陈前英, 王国玉, 陈永光, 等. 1 064 nm 激光大气透过率数据库的建立与应用[J]. 激光与红外, 2007, 30(07): 610-613.