

## 内场仿真试验中激光指示信号生成方法

方艳超, 王建军, 于国权, 崔爽, 李岩

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了在内场对激光制导武器的作战能力进行鉴定, 设计了激光指示信号内场仿真系统。针对该仿真系统的组成及其工作原理, 分别对激光指示信号的发散角、能量及方向的内场等效方法进行了分析, 设计并标定了三者的动态调整装置。试验结果表明: 该系统动态模拟的激光指示信号光斑直径相对误差小于2.5%, 能量衰减动态调整误差小于0.2 dB, 方位及俯仰的动态调整误差分别小于1.3 mrad、0.6 mrad。该仿真系统已应用于某光电对抗内场仿真项目中, 可为激光制导武器内场鉴定试验提供高仿真度的激光指示信号。

**关键词:** 内场仿真; 激光指示信号等效; 仿真试验

**中图分类号:** E927   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1766-07

## Laser signal generating method in internal field simulation experiment

Fang Yanchao, Wang Jianjun, Yu Guoquan, Cui Shuang, Li Yan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to make appraisal of the combat capability for laser-guided weapons in internal field, the laser signal simulation system was designed. First of all, for the composition of the laser signal simulation system and its working principle, the internal field simulation and equivalent methods of laser signal divergence angle, energy and direction were analyzed respectively, and the dynamic adjustment of the three devices was calibrated. The experiment results show that: The relative error of dynamic simulation of the laser signal spot diameter is less than 2.5%, the dynamic adjustment error of energy attenuation is less than 0.2 dB, dynamic adjustment error of azimuth and elevation are respectively less than 1.3 mrad, 0.6 mrad. The simulation system has been applied in the photoelectric countermeasure simulation project, and this simulation system can provide high degree of laser signal simulation for laser-guided weapons qualification test.

**Key words:** internal field simulation; laser signal equivalent; simulation experiment

收稿日期: 2014-10-05; 修订日期: 2014-11-15

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室研究基金(SKLLIM0902-01); 放电引发非链式脉冲DF激光关键技术研究(LXJJ-11-Q80)

作者简介: 方艳超(1984-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事领域为光电仿真技术方面的研究。Email: fangyanchao@126.com

## 0 引言

精确光电制导武器目前已发展成为当代高技术战争的主要作战兵器之一。光电制导武器作战效果的检测与评估是光电对抗领域的重要组成部分。在内场利用半实物仿真技术对激光制导武器进行检测、鉴定与论证,不仅可为检验作战能力提供检测数据、为光电制导武器研发提供仿真论证,还可为攻防对抗双方提供开展仿真研究的平台与环境<sup>[1-2]</sup>。

激光指示信号内场仿真系统为激光制导武器仿真试验提供内场激光信号环境,是仿真试验的重要组成部分,是影响试验效果的关键因素,其作用是激光制导武器鉴定试验提供高仿真度的内场激光指示信号。目前,国内外有许多工程人员对激光信号内场仿真相关技术进行研究,但这些工作主要针对激光信号的单一特性进行,很少有针对完整激光指示信号的仿真。同时,由于现有研究对激光信号动态特性仿真的不足,使得仿真研究停留在理论阶段缺乏实用性<sup>[3-6]</sup>。

文中对激光制导武器内场仿真试验中激光指示信号的生成方法进行了研究,提出了从激光的发散角、能量及方向三个方面来模拟外场激光指示信号特性的方法,设计了发散角、能量和方向的内外场等效方法及动态调整方式,并对动态调节装置进行了标定。最后,通过内场仿真试验验证了该方法的可行性,该仿真系统已应用于某光电对抗内场仿真项目中。

## 1 内场激光指示信号仿真原理

内场激光指示信号用于在内场等效模拟外场激光设备产生的激光指示信号,为激光制导武器的鉴定提供激光指示信号源。仿真的主要内容包括:模拟外场激光指示信号发散角、能量和方向的动态变化。

根据激光制导武器激光指示信号仿真要求,设计了激光指示信号内场仿真系统,系统组成及指示信号的生成过程如图1所示。

其中,1.06  $\mu\text{m}$  激光器作为激光指示信号源;动态衰减机构、发散角动态调节机构及精密二维摆镜分别用于动态调整激光指示信号的能量、发散角及方向;伺服控制机构作为三者动态调整的控制系

统;B码时统终端为系统提供绝对时间及同步触发信号;漫反射屏的主要功能是接收激光指示信号仿真系统的激光照射,用于形成漫反射激光信号;控制计算机根据外场试验条件计算相应参数,控制衰减机构、发散角调节机构及精密二维摆镜生成等效内场激光指示信号。

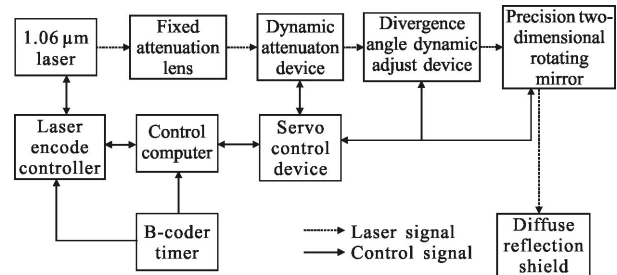


图1 激光指示信号内场仿真系统组成示意图

Fig.1 Sketch map of laser signal simulation system

内场激光指示信号的生成过程如下:

(1) 在控制计算机上对激光指示信号基频、外场试验条件等试验参数进行设置,并对激光脉冲进行编码;(2) 控制计算机根据外场试验条件实时解算内场等效的激光指示信号特性,激光编码控制器接收激光指示信号控制计算机发送的激光脉冲编码,控制1.06  $\mu\text{m}$  激光器按照编码发射脉冲激光;(3) 伺服控制机构接收控制计算机实时发送的控制信号,控制动态衰减器、发散角动态调节机构、精密二维转镜生成激光指示信号,最后漫反射屏反射生成的激光指示信号,从而实现漫反射激光指示信号的仿真。

内场试验布局及坐标系定义如图2所示。激光导引头位于漫反射屏的正前方,中心与激光指示信号出口中心、摆镜中心在同一水平线上,三者距漫反射屏距离  $H$  相同。

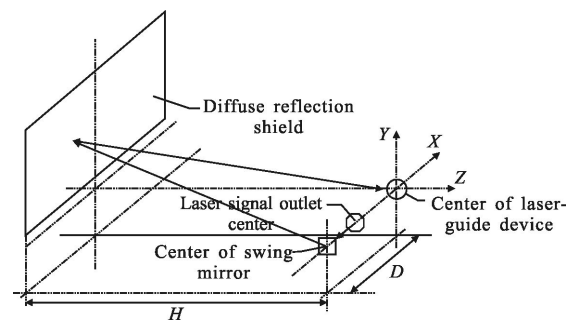


图2 内场试验布局图

Fig.2 Layout diagram of internal experiment

## 2 激光指示信号内外场等效关键技术

激光制导武器攻击地面目标时,对制导导引头而言,随着目标的迫近,激光指示信号的光斑大小、能量强弱及其指示方向实时变化,所以仿真系统中激光的发散角、能量及方向能否准确模拟这一变化过程是左右实验精度的决定性因素。

### 2.1 激光指示信号发散角动态调整的内场仿真

#### 2.1.1 激光指示信号发散角内外场等效分析

在外场,随着激光导引头与目标距离的减小,其接收的光斑会由小变大,同时在内场试验中,导引头载体会有预置的偏角,因此要满足内场仿真需求,就要求激光指示信号发散角调节装置在漫反射屏的远近位置上都能够模拟光斑由小到大的变化过程。

为分析内外场激光指示信号发散角等效状态,以弹目相对运动等效为例,即被攻击目标与激光制导武器的相对运动等效,需对外场试验环境进行假设,并根据内场试验条件进行等效分析,试验环境条件见表1。

表 1 内外场试验条件假设参数表

Tab.1 Parameters of external field and internal field conditions

	Parameter name	Parameter value
	Missile aviation velocity	300 m/s
External-field conditions	Laser indicator divergence angle	1 mrad
	Laser indicator work distance	2 km
	Interval between laser-guide device and diffuse reflection shield	10.5 m
Internal-field conditions	Interval between laser outlet and swing mirror	1.5 m
	Interval between swing mirror and laser-guide device	4.5 m

弹目相对运动的内外场等效主要是弹目距离等效和弹目运动速度的等效两方面,分别对应着内外场光斑直径大小与直径的变化速率等效,等效关系如下:

(1) 在内场通过控制激光光斑的大小来模拟弹

目距离,由等比关系可知, $x = \frac{d \cdot X_0}{D}$ ;

(2) 在内场通过控制激光光斑的变化速率来模

拟导弹的运动速度, $v = -\frac{x}{D} V$

文中  $X_0$  为外场光斑半径; $D$  为激光制导导弹距离; $x$  为内场等效光斑半径; $d$  为内场弹目距离; $V$  为导弹飞行速度; $v$  为内场光斑等效变化速度。

经分析计算可知,需在距离漫反射屏 12~17 m 的各个距离上得到直径 5~50 mm 大小的光斑,以输入光斑直径 10 mm,发散角为 1 mrad 为例,不对光束加以控制时,在 17 m 距离形成的最小光斑直径为 27 mm,如果为了得到小光斑在光路上加设光阑会使能量损耗较大,不能满足能量等效要求。因此,若想满足光斑大小等效要求,且能量损耗最小,就需要设计缩束的光学系统来控制发散角变化。

#### 2.1.2 激光指示信号发散角动态调节透镜组的设计

根据等效关系,激光指示信号发散角调节单元透镜组设计如图 3 所示,通过调节最右侧透镜(第四透镜)的位置来调整投射光斑尺寸的变化,第一与第四透镜间距在 208.6~264.6 mm 之间变化,第四透镜的位移幅度为 26 mm。经推导得到理论投射光斑尺寸计算公式如下<sup>[7]</sup>:

$$R(L) = \frac{1}{2} \left( \left( 4 * D + \frac{3.74 * d - 0.13}{57} \right) \left( 1 - \frac{L}{1.1f'} \right) + \frac{L * \alpha}{4} \right) \quad (1)$$

其中

$$1.1f' \geq L$$

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{(d-0.13)}{1000f_2}$$

式中: $d$  为第三第四透镜间距 ( $31 \text{ mm} \leq d \leq 57 \text{ mm}$ );  $-0.13$  为该间距的修正项(顶点间距转换到主点间距); $R(L)$  为离开调节系统  $L$  远处,光斑的垂直截面半径,单位: mm;  $\alpha$  为入射激光束的发散角(半角  $\leq 1 \text{ mrad}$ );  $f_1 = -0.573 \text{ 148 m}$ ,  $f_2 = -0.635 \text{ 818 m}$ ;  $D$  为入射光斑直径;  $3.74 \text{ mm}$  为调节组(第三、第四透镜)的结构参数。

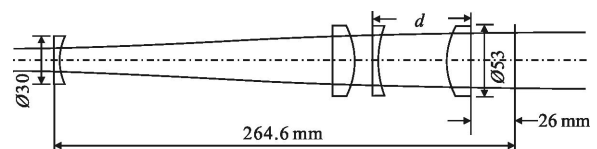


图 3 激光指示信号发散角调节单元

Fig.3 Conditioning unit for divergence angle of laser signal

利用等效及理论公式,结合伺服系统的最大速度 20 mm/s、控制精度为 0.02 mm,通过计算可能

满足光斑直径误差小于 5% 的要求, 速度为最大值 20 mm/s 时, 光斑直径动态调整引导值与实测值相对误差曲线如图 4 所示。

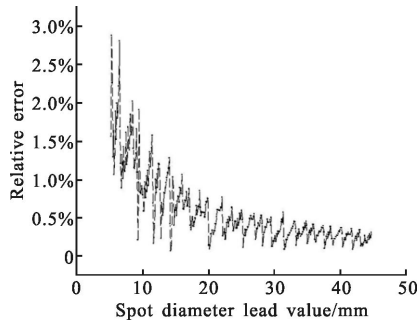


图 4 光斑直径动态调整相对误差曲线

Fig.4 Relative error curve of spot diameter dynamic adjustment

从图 4 中可以看出, 在伺服系统调节速度为最大值 20 mm/s 时, 光斑直径相对误差小于 3%。由理论公式可知, 光斑直径相对误差随着伺服系统调节速度的增加而增大, 因此, 系统的光斑直径动态调节相对误差小于 3%。

2.1.3 激光指示信号发散角动态调节装置的标定

经实验测量得知, 当伺服控制系统按照理论公式引导发散角调节机构时, 由于受激光的激发特性、像散、激光的发射频率等因素影响, 光斑直径尺寸误差在 4~6 mm 之间波动, 误差较大不能满足仿真要求<sup>[8-9]</sup>。所以需对发散角动态调节装置进行标定, 并运用基于粒子群支持向量机的方法建立光斑直径尺寸预测模型<sup>[10]</sup>, 预测模型的验证结果如表 2 所示, 标定后光斑直径尺寸绝对误差小于 2 mm, 提高了仿真精度, 满足仿真需求<sup>[11-13]</sup>。

表 2 预测模型验证误差表

Tab.2 Error table of forecast model validation

Forecast spot diameter/mm	Measurement value /mm	Error value/mm
13.058 02	14	0.941 98
22.580 71	24	1.419 29
31.603 4	33	1.396 6
31.303 4	32	0.696 6
40.426 09	40.5	0.073 91

2.2 激光指示信号能量动态调整的内场仿真

2.2.1 激光指示信号内外场能量等效分析

在外场, 接收器处接收到的激光辐照度计算公式如下:

$$E_{nw} = \frac{P_{sw}\tau(R)\rho_0}{\pi R^2\theta_1^2} \tag{2}$$

式中:  $P_{sw}$  为外场指示器发出的激光能量, 单位为 mJ;  $E_{nw}$  为接收器处接收到的激光辐照度, 单位为  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ;  $\tau(R)$  为与距离相关的大气透过率;  $R$  为外场激光器与接收器的距离, 单位为 m;  $\theta_1$  为激光器发散角, 单位为 rad;  $\rho_0$  为目标的反射率。

激光指示信号内场仿真时, 由于各设备距离较短, 可假定大气透过率为 1, 简化后经推导得到接收器处的激光辐照度计算模型为:

$$E_m = \frac{P_{si}\rho\cos\alpha\cos\beta}{\pi R_1^2} \tag{3}$$

式中:  $P_{si}$  为内场激光指示信号指示器发出的激光能量, 单位为 mJ;  $E_m$  为接收器处接收到的激光辐照度, 单位为  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ;  $\rho$  为激光漫反射屏的漫反射率;  $\alpha$  为漫反射屏激光入射角;  $\beta$  为到接收器漫反射夹角;  $R_1$  为漫反射屏光斑到接收器的距离, 单位为 cm。

要在内场等效外场的激光指示信号能量, 需满足  $E_{nw}=E_m$ , 由公式(2)、(3)可推出内场激光指示信号出射能量的计算公式:

$$P_{si} = \frac{R_1^2 P_{sw}\tau(R)\rho_0}{\rho\cos\alpha\cos\beta R^2\theta_1^2} \tag{4}$$

2.2.2 激光指示信号能量衰减方法设计

根据激光器的输出能量、外场激光指示信号能量及内外场参数, 结合公式(4)通过运算得知, 当仿真系统的能量衰减范围为 0~40 dB, 激光指示信号能量的衰减速率达到 4 dB/s 时, 才能满足内外场能量等效需求。

因为激光器输出的激光波长为 1 064 nm, 且为线偏振光, 所以, 通过调节线偏振光和检偏器所成的夹角, 可以达到衰减激光能量的目的。衰减装置采用消光比为 100 000:1 的格兰棱镜, 远大于偏振片的 500:1, 其损伤阈值为 500 MW/cm<sup>2</sup>, 满足使用要求, 偏振衰减原理如图 5 所示<sup>[14-15]</sup>。

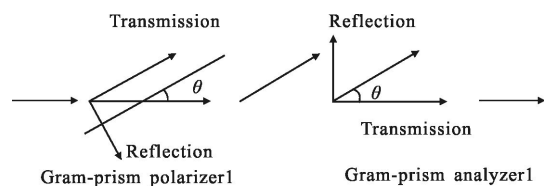


图 5 偏振衰减示意图

Fig.5 Polarization attenuation schematic diagram

激光通过起偏器时,如果起偏器方向不是水平的,将反射一部分激光,另一部分透射的激光通过检偏器时,受到检偏的作用,再次被反射一部分激光。因此,只要精确控制起偏器的角度,就能连续调节输出激光的能量。在光的反射方向,有装置吸收反射激光。能量衰减与格兰棱镜转过角度的对应关系如下:

$$n_{dB}=10\lg \frac{1}{\cos^4\theta} \quad (5)$$

根据要求的 4 dB/s 衰减速率,公式(5)两边对时间求导,可求得格兰棱镜转动的角速度公式如下:

$$\frac{d\theta}{dt}=\frac{1}{4.34\tan\theta} \text{rad/s} \quad (6)$$

根据能量的衰减范围,由公式(5)可计算出  $\theta$  的变化范围为 0~1.48 rad,当衰减速率为 4 dB/s 时,能量衰减动态调节精度如图 6 所示,在角度调整的初始段角加速度较大,衰减至 6dB 后调节精度能达到 0.2dB。

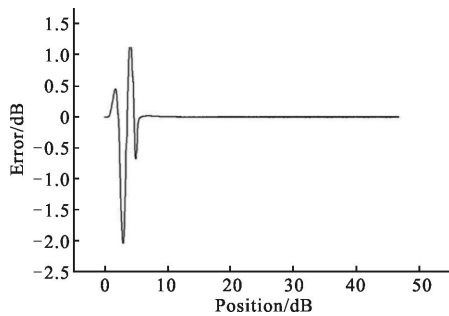


图 6 能量衰减动态调节精度

Fig.6 Dynamic regulation accuracy of energy attenuation

### 2.2.3 激光指示信号能量动态调整装置的标定

由于调整装置的安装误差、反射光干扰误差的影响,使得能量衰减的理论公式不能满足系统精度要求,所以利用分光比标定法对衰减机构进行精确标定,如图 7 所示。

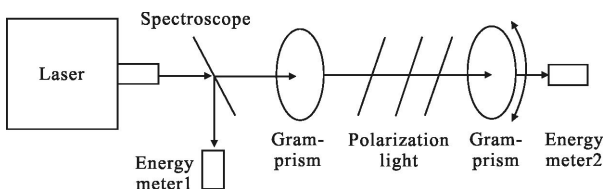


图 7 激光能量衰减标定原理图

Fig.7 Laser energy attenuation calibration schematic diagram

标定曲线的验证结果如表 3 所示,可见标定后能量衰减调节精度可达到 0.1 dB,满足系统需求。

表 3 能量衰减引导值与实测值误差表

Tab.3 Error table of energy attenuation calibration

Energy attenuation lead value/dB	Measurement value /dB	Error value/dB
5	5.011 24	-0.011 24
10	9.968 26	0.031 737
15	15.072 6	-0.072 6
20	20.0781 3	-0.078 13
25	24.961 5	0.038 5
30	30.088 6	-0.088 6
35	34.949 9	0.050 1
40	39.977 7	0.022 3

### 2.3 激光指示信号方向动态控制的内场仿真

#### 2.3.1 激光指示信号内外场方向等效分析

设外场激光指示信号光斑相对与激光导引头的方位、俯仰分别为  $A_1$ 、 $E_1$ ,根据内场的实验条件可计算光斑在漫反射屏上的位置为:

$$x=H\tan A_1$$

$$y=\sqrt{H^2+x^2} \times \tan E_1$$

则摆镜应转过的方位与俯仰分别为  $A_2$ 、 $E_2$ :

$$A_2=\arctan\left(\frac{x+D}{H}\right) \quad (7)$$

$$E_2=\arctan\left(\frac{y}{\sqrt{(D+x)^2+H^2}}\right) \quad (8)$$

式中: $H$ 为激光导引头中心到漫反射屏的距离; $D$ 为激光导引头与摆镜的距离。

#### 2.3.2 激光指示信号方向控制方法设计

由方向等效分析可知,控制二维摆镜方位俯仰转动,可改变激光指示信号在漫反射屏上光斑的位置,控制计算机根据外场激光指示信号光斑相对与激光导引头的方位俯仰,利用公式(7)、(8)实时计算出摆镜的方位及俯仰,通过伺服控制系统实时控制摆镜将激光指示信号的光斑投射到漫反射屏上,从而实现对激光指示信号方向的模拟。

#### 2.3.3 激光指示信号方向摆镜的动态控制精度

当正弦曲线基准点位置分别为  $(A30, E50)$ 、 $(A50, E20)$ 、 $(A90, E90)$  时,使用  $A=\dot{\theta}^2/\ddot{\theta}=18^\circ$ ,  $\omega=\ddot{\theta}/\dot{\theta}=1.667$  的正弦曲线以 100 Hz 数据更新频率引导摆镜,试验结果如表 4 所示,可知方位俯仰方向引导值

与实测值的差值分别小于 1.3 mrad、0.6 mrad，满足系统需求。

表 4 正弦曲线引导误差表

Tab.4 Table of sine curve guide error

Sine curve datum point pos	Lead azimuth value minus measure azimuth value/mrad	Lead elevation value minus measure elevation value/mrad
(A30, E50)	1.211	0.517
(A50, E20)	0.368	0.469
(A90, E90)	0.375	0.523 6

### 3 激光指示信号内场仿真效果验证

当投弹高度 3 000 m, 速度 300 m/s, 弹目距离 6 500 m, 激光指示信号波长为 1.06 μm, 发散角为 1 mrad, 单脉冲能量为 10 mJ 时, 外场弹道如图 8 所示。利用该激光指示信号内场仿真系统, 同时对其激光制导设备指示信号的光斑、能量及方向 3 个外场特性进行等效, 试验结果如图 9~12 所示。由实验结果可知, 该内场系统可同时对激光制导设备的 3 个外场特性进行等效, 激光指示信号发散角的动态调整能力满足对外场光斑直径的等效需求, 相对误差

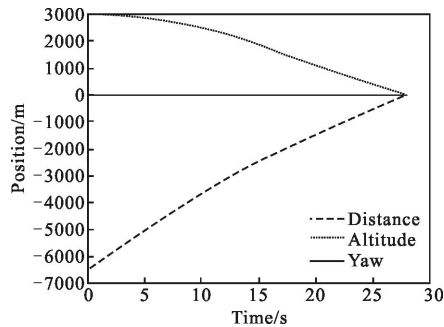


图 8 外场弹道曲线

Fig.8 Curve of field trajectory

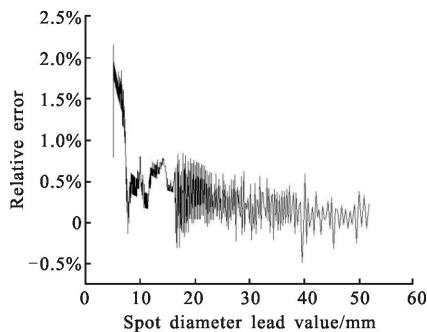


图 9 等效光斑直径相对误差曲线

Fig.9 Curve of spot diameter relative error

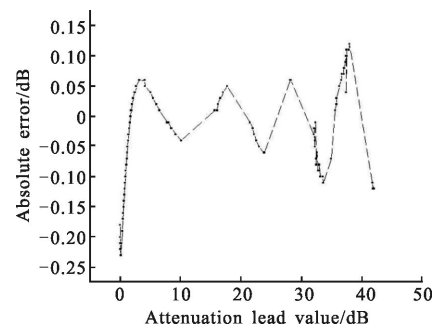


图 10 能量衰减差值曲线

Fig.10 Curve of energy attenuation absolute error

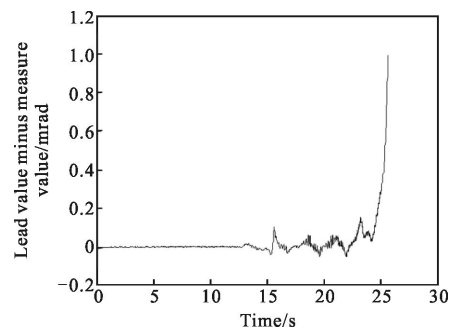


图 11 方位差值曲线

Fig.11 Curve of azimuth absolute error

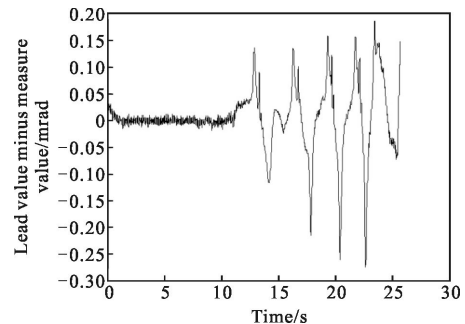


图 12 俯仰差值曲线

Fig.12 Curve of elevation absolute error

小于 2.5%, 内场实时测得激光导引头处的能量衰减调节误差小于 0.2 dB, 方向动态调整相对误差远小于 2mrad 该系统可模拟的最近弹目距离为 60 m。

### 4 结束语

文中讨论了激光指示信号内场仿真系统中激光指示信号的内场生成方法及其关键技术。提出了通过对外场激光指示信号的发散角、能量及方向的等效模拟, 为光电对抗内场仿真试验生成等效激光指示信号的方法, 并对内场激光指示信号的仿真效果进行试验验证。结果表明, 该方法可以为激光制导武

器内场鉴定试验提供高仿真度的激光指示信号。

### 参考文献:

- [1] Fan Shipeng, Lin Defu, Lu Yulong, et al. Design and achievement of hardware-in-the-loop simulation system for guided shell based on laser semi-active seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 395–396. (in Chinese)  
范世鹏, 林德福, 路宇龙, 等. 激光制导武器半实物仿真系统的设计与实现 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 395–396.
- [2] Sun Shaojun, Zhang Jiyong. Overview of simulation test system used for photoelectronic countermeasure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(6): 551–552. (in Chinese)  
孙少军, 张继勇. 光电对抗仿真试验系统综述 [J]. 红外与激光工程, 2003, 32(6): 551–552.
- [3] Yang Zaifu, Qian Huanwen, Gao Guanghuang. Development of laser warning technology [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(1): 99–101. (in Chinese)  
杨在富, 钱焕文, 高光煌. 激光告警技术发展现状[J]. 激光技术, 2004, 28(1): 99–101.
- [4] Deng Fanglin, Liu Zhiguo, Wang Shicheng. Design and development of the hardware-in-the-loop simulation system for laser seeker [J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(2): 255–257. (in Chinese)  
邓方林, 刘志国, 王仕成. 激光导引头半实物仿真系统的设计与研制[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 255–257.
- [5] 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): 1937–1938. (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): 1937–1938.
- [6] Li Ming, Ji Yong, Jia Hongguang, et al. Hardware-in-closed-loop simulation system for aircraft based on rapid simulation prototype [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(10): 1949–1955. (in Chinese)  
厉明, 纪勇, 贾宏光, 等. 基于快速仿真原型的飞行器半物理仿真系统[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1949–1955.
- [7] Jia Yong, Gao Yunguo. A switch zoom design for reflective laser beam expander [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 23(10): 1–8. (in Chinese)  
贾勇, 高云国. 反射式激光扩束器的切换变倍技术 [J]. 光学学报, 2012, 23(10): 1–8.
- [8] Zhao Jianke, Li Xia, Xu Liang, et al. Laser beam wave-front error reduction accuracy analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 80–81. (in Chinese)  
赵建科, 李霞, 徐亮, 等. 激光缩束系统波前畸变精度分析 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 80–81.
- [9] Zhang Zhen, Zhou Menglian, Zhang Jianmin, et al. Shadows of laser spots in CCD and their mechanism [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1366–1368. (in Chinese)  
张震, 周孟莲, 张检民, 等. CCD 中的激光光斑阴影现象及机理[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1366–1368.
- [10] Zhang Tongxin. Research on support vector machine based on quantum particle swarms optimization and its Application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)  
张同心. 基于量子粒子群的支持向量机算法的研究与应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [11] Li Xiaojing, An Zhiyong, Xiao Zuojiang, et al. Study on measuring method of the laser divergence angle based on CCD second imagery [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2010, 33(4): 50–51. (in Chinese)  
李晓晶, 安志勇, 肖作江, 等. 基于 CCD 二次成像法的激光束散角测量方法研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(4): 50–51.
- [12] Huang Jipeng, Wang Yanjie, Sun Honghai, et al. Precise position measuring system for laser spots [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 842–845. (in Chinese)  
黄继鹏, 王延杰, 孙宏海, 等. 激光光斑位置精确测量系统 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 842–845.
- [13] Shan Xiaonan, Liu Yun, Cao Junsheng. 808 nm kW output high-efficiency diode laser sources [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 455–456. (in Chinese)  
单肖楠, 刘云, 曹军胜. 808 nm 千瓦级高效大功率半导体激光光源[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 455–456.
- [14] Huang Chong, Chen Haiqing, Liao Zhaoshu, et al. Lightattenuation coefficient of polarization attenuator at high attenuation level [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3): 1756–1761. (in Chinese)  
黄翀, 陈海清, 廖兆署, 等. 高量级光衰减时对线偏振片组衰光系数的研究[J]. 物理学报, 2010, 59(3): 1756–1761.
- [15] Yu Guoquan, Guo Jin, Li Yan, et al. Precision analysis of indoor simulation system for laser angle deception jam [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2610–2613. (in Chinese)  
于国权, 郭劲, 李岩, 等. 激光角度欺骗干扰内场仿真系统精度分析[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2610–2613.