

半主动激光制导能量传输与模拟技术

刘克俭¹, 苗锡奎², 徐晨阳³, 王 烨³, 张军强^{3,4*}, 杨 斌⁴, 孙婷婷^{3*}

(1. 中国人民公安大学 遥感中心, 北京 100038;

2. 中国洛阳电子装备试验中心 光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471000;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

4. 长光禹辰信息技术与装备(青岛)有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要:为模拟实战环境下半主动激光制导的目标回波能量,设计并研制了注入式激光能量模拟设备。对激光制导能量传递过程及模拟技术进行研究。首先,针对激光制导武器工作过程,建立了激光在大气中传输发生散射与衰减的模型,并针对实战中存在的各种烟雾、降雨、干扰烟剂等建模仿真。接着,设计了激光目标回波能量模拟器的总体方案,选用DPS-A激光器和布儒斯特角薄膜偏振器模拟激光衰减过程。设计了光纤耦合与匀光准直系统。最后,构建了激光制导半物理仿真系统,分别进行了激光回波能量模拟实验、激光导引头标定与激光末制导试验。实验结果表明:激光能量模拟误差小于3.0%,导引头线性角度范围内残差小于0.08°,测角精度小于0.45 mrad,末制导过程视线角跟踪误差小于0.2°。该系统可模拟多种实战环境中激光能量传输情况,且精度高,能够满足激光制导半物理仿真要求。

关键词:半主动激光制导; 能量传递; 注入法; 半物理仿真; 激光导引头

中图分类号: E933.43 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20191202.0256

Semi-active laser-guided energy transmission and simulation technology

LIU Ke-jian¹, MIAO Xi-kui², XU Chen-yang³, WANG Ye³,

ZHANG Jun-qiang^{3,4*}, YANG Bin⁴, SUN Ting-ting^{3*}

(1. Remote Sensing Center, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China;

2. Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Key Laboratory of Electro-Optical

Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang 471000, China;

3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese

Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

4. Chang Guang Yu Chen Information Technology and Equipment (Qingdao)

Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

* Corresponding author, E-mail: zjq1981_81@163.com

Abstract: In order to simulate the target echo energy of semi-active laser guidance in actual combat environ-

收稿日期: 2018-06-11; 修订日期: 2018-07-13

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFC0803000); 光电对抗测试评估技术重点实验室开发课题(No. GKCP2017001)

Supported by National Science and Technology Major Project of China(No. 2016YFC0803000); Development of Key Laboratory of Photoelectric Countermeasure Testing and Evaluation Technology(No. GKCP2017001)

ment, an injection laser energy simulation device was designed and developed. The laser-guided energy transfer process and simulation techniques were researched. First of all, aiming at the working process of laser-guided weapons, the laser scattering and attenuation model in the atmosphere were established. Fog, rainfall, and interference smoke existing in actual combat were modeled and simulated. Then, the overall scheme of the laser target echo energy simulator was proposed. The DPS-A laser and Brewster angle polarizer were used to simulate the laser attenuation. A fiber coupling and uniform light collimation system was designed. Finally, a laser-guided semi-physical simulation system was constructed, laser echo energy simulation experiments, seeker calibration and laser terminal guidance experiments were performed, respectively. The results show that laser energy simulation error is less than 3%, the residual error within the linear range of the seeker is less than 0.08° , the accuracy of angle measurement is less than 0.45 mrad , and the tracking error of line-of-sight angle in the terminal guidance process is less than 0.2° . The system can simulate laser energy transmission in a variety of real-world environments with high accuracy, which can meet the requirements of laser-guided semi-physical simulation.

Key words: semi-active laser guidance; energy transfer; injection method; semi-physical simulation; laser seeker

1 引言

半主动激光制导武器以其制导精度高、抗干扰能力强、环境气候适应能力强、结构简单、成本低、通用性强的优势一直在局部战争中占据重要地位,从20世纪60年代开始就得到了广泛的应用。现役装备中半主动激光制导武器的典型代表为^[1]:美国的 Paveway 和俄罗斯的 KAB-1500L 激光制导炸弹;美国 Hellfire、AGM-65E、法国 AS-30L 和俄罗斯 X-25ML 激光制导导弹;美国铜斑蛇、俄罗斯红土地、以色列火球等激光制导炮弹;以及美国 BAE 公司的 AKPWS-II^[2] 和洛克希德马丁公司的 DAGR 激光制导火箭弹等。半主动激光制导武器主要由半主动激光导引头、弹体、制导控制系统和目标激光指示器等部分组成。激光照射器指向并照射目标,导引头接收目标漫反射激光回波能量,测量出体视线角,并根据制导控制律计算舵偏角指令,控制弹体向目标飞去,最终命中目标。

检测激光制导武器的精度一般可采用实弹打靶法、半实物仿真法与数值仿真法等。据美国大西洋导弹测试基地的统计,美国军方超过90%的武器系统的鉴定、评估数据来自于半实物仿真的结果。通过半实物仿真能够有效评估干扰效果,并缩短武器研发与试验周期,降低研发与试验费

用,是武器研发试验中一种极其有效的方法^[3-5]。

常用的半主动激光制导回波能量模拟主要有漫反射法与注入法。漫反射法能够较真实地模拟出激光在目标表面的漫反射特性,但所需条件设备复杂、试验场地要求苛刻且成本较高;注入法可通过建立制导过程的准确数学模型,利用可调衰减激光器产生导引头接收到的激光回波信号。该方法简单便捷、成本低,适用范围广。

本文主要从半主动激光制导系统工作过程中的能量传输链路出发,分析并建立激光能量传输衰减模型,设计注入式激光模拟器总体架构、光纤耦合、匀光与准直系统,并对其进行了测试及导引头制导应用验证。

2 激光制导系统能量传递过程建模

2.1 激光制导武器工作过程

半主动激光制导系统主要由机载/地面激光照射器、激光传递散射场、目标与激光导引头等组成^[6],如图1所示。半主动激光制导武器工作过程受多种因素影响,较为复杂。导引头与激光照射器配置于两地,激光照射器发出激光编码脉冲。在激光光束通过大气传输到达目标过程中会发生不同程度散射与衰减。此外,根据目标漫反射率与照射空间角等不同,激光在目标表面也会发生

不同程度漫发射,这些漫反射激光回波再次经过大气传输后被导引头接收,激光导引头按预置编码控制波门开关,若与照射器预设编码一致,则激光四象限探测器能探测出漫反射激光经导引头光学系统后的能量,并根据和差法计算出光斑重心位置(即体视线角),并将其输出给制导控制系统完成导弹制导。

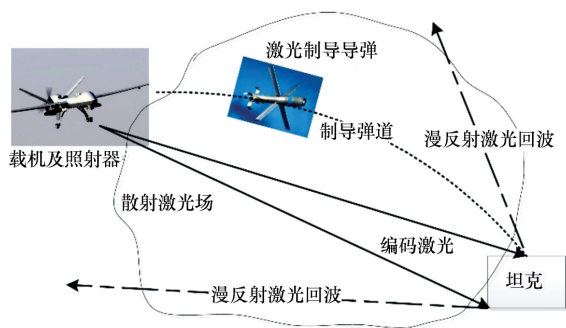


图 1 半主动激光制导系统原理图

Fig. 1 Schematic of semi-active laser guidance system

2.2 激光能量传输建模

激光导引头入瞳处的能量是机载照射器、大气传输及目标反射之间的函数,可以用式(1)表示^[7-10]。

$$E_{rd} = \frac{1}{\pi R_2^2} E_i \tau_{aR1} \tau_{aR2} \rho \cos \varphi \cos \varepsilon, \quad (1)$$

式中 E_i 为激光照射器的脉冲激光能量 ρ 为目标反射率 τ_{aR1} 为激光照射路程 R_1 上的大气激光透过率 τ_{aR2} 为导引头与目标之间路程 R_2 上的大气激光透过率 φ 为照射器目标视线与目标表面法线的夹角 ε 为导引头光轴与目标表面法线的夹角 E_{rd} 为导引头入瞳处的激光能量密度。

由式(1)可知,激光能量传输非常复杂,受多种因素影响,大气激光透过率除了与传播路径长度有关,还与大气中各成分浓度有很大关系。单程大气斜程传输的大气透过率为:

$$\tau_a = e^{-\frac{k_1}{k_2 \sin \theta} (1 - e^{-k_2 h}) - \frac{k_3}{k_4} (1 - e^{-k_4 h})}, \quad (2)$$

式中 θ 是天顶角 k_1 是地面大气粒子散射系数 k_2 是粒子散射标高的倒数 k_3 是地面大气分子散射系数 k_4 是分子散射标高的倒数,它们是与大气能见度、激光波长有关的量。

当激光在接近地面的大气层中传播时,大气成分、密度等可认为是均匀的,大气透过率模型可简化为:

$$\tau_{R1} = e^{-\kappa R_1}. \quad (3)$$

以上为理想状态下 $1.06 \mu\text{m}$ 激光在大气中的传输模型。而在实际作战环境中,存在着各种烟雾、降雨、干扰烟剂等因素。这种局部透过率同样对激光传输起到较大的衰减作用。

降雨状态下,雨滴尺寸远远大于激光波长,其散射系数为降雨强度的函数,降雨引起的衰减系数为^[11]:

$$\beta_r = 0.21 J^{0.74}, \quad (4)$$

此时的激光透过率为:

$$\tau_r = e^{-\beta_r R},$$

其中 R 为距离,单位 km; J 为降雨强度,单位 mm/h。

战场烟剂是一种局部的人造大气环境,它通常是不均匀且短暂的,激光束通过战场烟剂的透过率是波长和路径长度的函数:

$$\tau_s = e^{-\mu CR}, \quad (5)$$

式中: μ 是烟剂消光系数,单位 m^2/g ; C 是烟剂浓度,单位 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; R 是路径长度,单位 km。表 1 为几种典型烟剂的消光系数。

表 1 典型烟剂的消光系数

Tab. 1 Extinction coefficients of typical smoke agents

烟剂	油雾	红磷	酸雾	六氯甲烷
消光系数 $/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	3.64	1.93	2.19	3.0

云雾对光波的传输也有较大衰减作用,其中卷云的透过率为:

$$\tau_c = e^{-0.14L^2}, \quad (6)$$

式中 L 为云的厚度,单位 km。

激光能量传输是大气传输过程与战场实际作战场景的串行复合,在半主动激光制导过程能量建模与仿真中,需要分析典型作战场景中各种传输环节,设置多种典型参数,再将各传输环节进行串联处理,如公式(7)所示。

$$\tau_t = \tau_r \tau_s \tau_c. \quad (7)$$

3 激光目标回波能量模拟器设计

3.1 总体方案

激光能量模拟器用于模拟制导过程中不同大气环境、不同距离下激光导引头接收到的回波激光能量^[12],主要由激光器单元、驱动电源单元、衰减系统单元、控制系统单元、光纤耦合系统、匀光系统和准直系统等组成。其中,激光器具有大动态范围能量输出可调功能;控制单位可以控制激光器输出,能根据大气环境和作用距离的变化调整能量输出;光学耦合系统把激光器输出激光耦合到光纤中;通过光纤传输后由匀光系统进行匀光,最后又经过平行光管进行准直,来模拟远处目标反射能量,并将其直接输出给激光导引头。

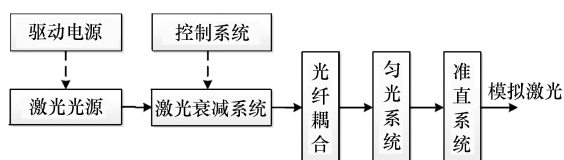


图2 激光能量模拟器总体方案图

Fig. 2 Overall scheme diagram of laser energy simulator

3.2 激光器单元

激光器选用 DPS-A 激光器,为侧面泵浦电光调 Q 式激光器,属于主动调 Q 范畴,可产生高峰值功率的脉冲激光,具有结构紧凑、高能量、高峰值功率等优势。LD 侧面泵浦源工作在脉冲模式下,能发射较高的单脉冲能量,采用主动的电光调 Q 方式将脉冲宽度压缩至纳秒范围内,并且具有可控性。驱动电源中 LD 电路部分为 LD 提供高峰值的脉冲电流,实现 1 064 nm 激光的运转,Q 开关驱动电路用以控制调 Q 开关,实现纳秒级高峰值功率的短脉冲激光,温度控制器通过控制电路,控制发热元件的工作温度,确保激光稳定输出,同时使谐振腔在恒定温度范围内,增强激光器的环境适应性,实现外场环境下的正常运转。

3.3 激光衰减系统

衰减系统由精密电动位移台和偏振光学元件组成,高性能偏振光学组件放置在精密光学机械夹上,如图3所示。

输入激光经过第一片偏振片由部分偏振光变成偏振光,偏振光穿过半波片时,出射光仍为偏振光,只不过偏振光的振动面旋转了一定角度(2θ)。此旋转角的大小取决于入射光振动平面与晶体光轴间的夹角 θ 。偏振光学元件使用布儒斯特角薄膜偏振器调节,通过分光元件将光束分为 P 光和 S 光,一个旋转石英 $\lambda/2$ 波片放置在入射偏振光束上,用来改变 P 光和 S 光的比例,从而调节输出光束能量。这两束光的强度比例可以在不改变其它参数的情况下连续变化。为不影响衰减后的输出特性,在激光头前端放置反射型衰减装置,衰减后部分激光漫反射到吸收体上,图3为衰减系统内部结构示意图。

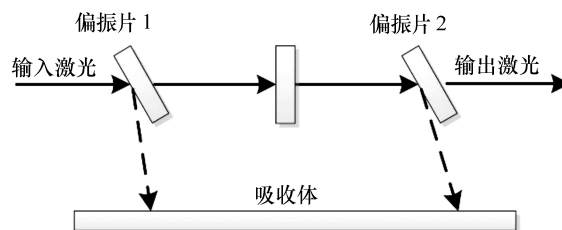


图3 衰减系统内部结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of internal structure of the attenuation system

3.4 光学耦合系统

光学耦合系统主要作用为将出射激光耦合到光纤中。设计参数如下:激光光斑为 6 mm,光纤芯径为 200 μm ,NA 数为 0.39。根据耦合要求,光学系统光斑直径要小于 200 μm 聚焦后光学系

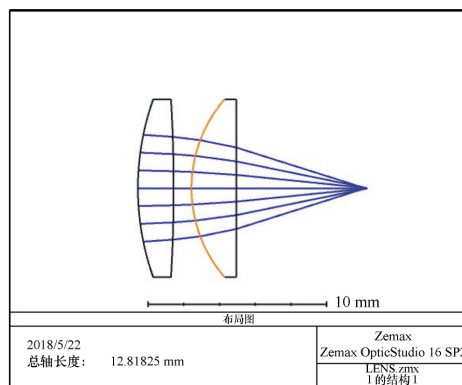


图4 耦合透镜图

Fig. 4 Coupled lens diagram

统汇聚角要小于 46° 。设计光学系统焦距为 10 mm, 光束汇聚角度为 33.34° , 小于 46° , 满足设计要求^[13-15], 设计耦合透镜组如图 4 所示, 相应的耦合透镜点列图如图 4 所示, 相应的耦合透镜点列图如图 5 所示。

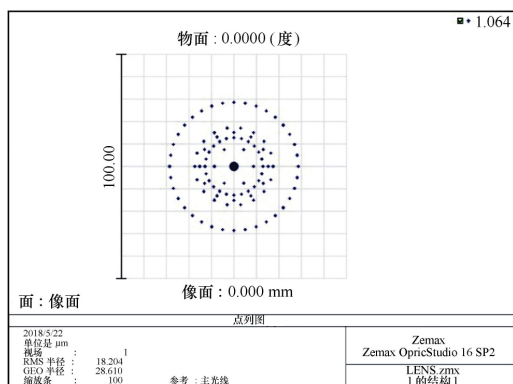


图 5 耦合透镜点列图

Fig. 5 Spot diagram of coupling lens

3.5 匀光准直系统

匀光准直系统主要由积分球与离轴抛物面组成。由于光纤出射光束不均匀, 无法进行直接准直, 需要由积分球进行匀光, 再在出射口放置小孔光阑, 模拟点光源, 最后由离轴抛物面进行准直出射, 其结构如图 6 所示。采用离轴的匀光准直方案有两个优点, 第一可以作为多波段目标模拟器通用方案; 二是在装调测试阶段, 可以采用可见光波段进行测试。

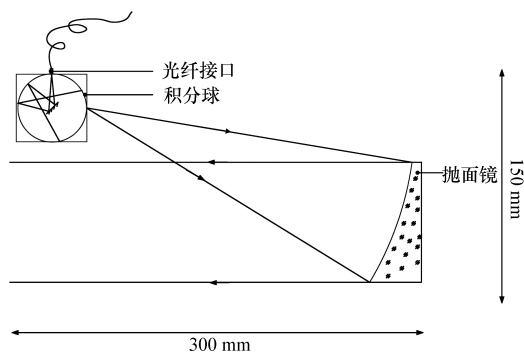


图 6 匀光准直系统图

Fig. 6 Uniform light collimation system

积分球的内径为 30 mm, 材质为 PTFE, 出口处采用小孔光阑拦光, 两者结合可以模拟点光源。抛物面镜是口径为 100 mm 的离轴抛物面反射镜, 焦

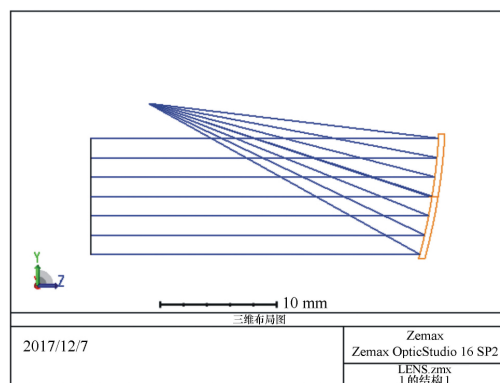


图 7 匀光准直系统光路图

Fig. 7 Optical path map of uniform light collimation system

距为 250 mm, 光路图和点斑图分别如图 7、图 8 所示。

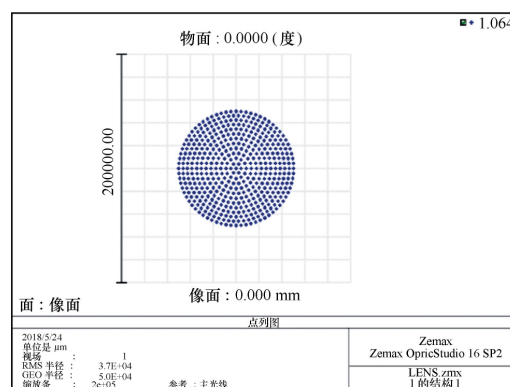


图 8 匀光准直系统点斑图

Fig. 8 Spot pattern of uniform light collimation system

4 测量实验与结果

4.1 激光模拟器测试实验

依据激光能量传递链公式, 按照图 2 构建激光模拟器, 如图 9 所示。激光模拟器采用级联能量控制, 1 号电机控制 mJ 级的能量变化, 2 号电机控制 μJ 级的能量变化, 两者相互配合完成能量模拟。在测试的能量值中取出几个特征点进行拟合, 如图 10 所示, 可以看出能量的拟合程度很高。如果通过电机将旋转角度和时间联系在一起可以很好地完成曲线的稳定拟合。表 2 给出了能量模拟参数。

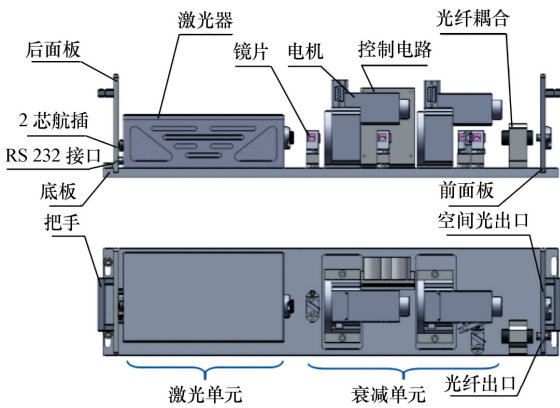


图 9 激光模拟器设计图

Fig. 9 Design diagram of laser simulator

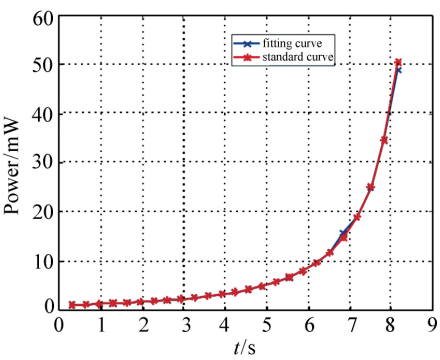


图 10 特征点与标准曲线拟合

Fig. 10 Fitting curves of feature points and standard curves

表 2 半主动激光导引头测角结果
Tab. 2 Result of Semi-active laser seeker

名称	结果				
理论值(mW)	2. 071 5	6. 699 3	14. 753 0	25. 055 1	50. 451 9
实测值(mW)	2. 078 9	6. 579 0	15. 112 1	25. 120 2	48. 947 4
误差值(mW)	0. 007 4	-0. 120 3	0. 359 1	-0. 065 1	-1. 504 5
相对误差 /%	0. 36	1. 8	2. 43	0. 26	2. 98

由试验结果可知 ,模拟相对误差小于 3. 0% ,表明该系统可以模拟不同距离下目标激光回波能量。

4. 2 导引头标定测试实验

将激光模拟器与五轴飞行转台应用在激光导引头标定实验中 ,将激光模拟器的匀光与准直系统安装到二轴仿真转台上 ,激光头安装于三轴转台内框中 ,通过二轴转台模拟不同角度目标回波 ,激光模拟器用以模拟不同距离目标回波 ,两者结

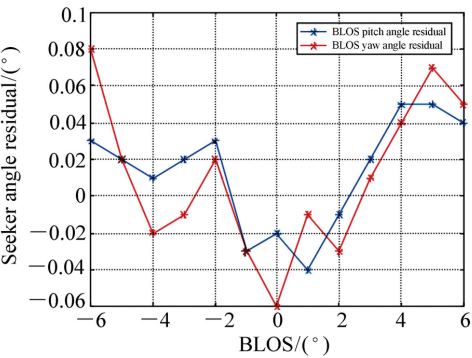


图 12 导引头标定拟合后残差

Fig. 12 Residual after seeker calibration fitting

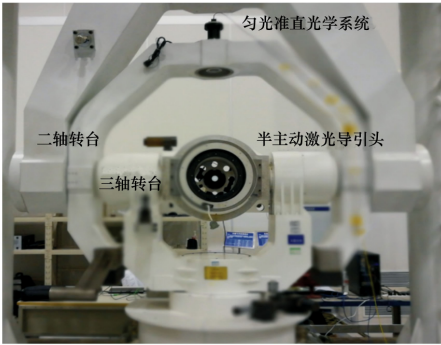


图 11 激光制导半物理仿真系统

Fig. 11 Laser-guided semi-physical simulation system

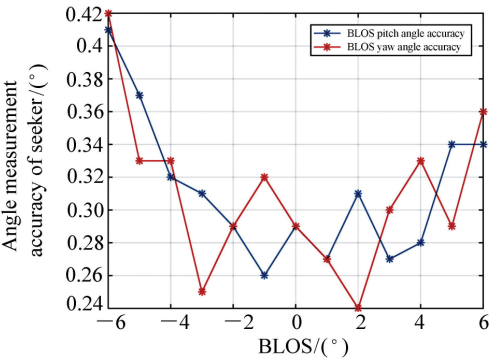


图 13 半主动激光导引头精度

Fig. 13 Semi-active laser seeker accuracy

合,可以模拟制导过程中任意角度任意距离目标头零位误差、线性度等参数 相关实验系统及结果激光回波信号^[16-18]。此系统可以标定激光导引如图 11 ~ 图 13 和表 3 所示。

表 3 半主动激光导引头测角结果
Tab.3 Results of semi-active laser seeker

理论角度/(°)	体视线高低角		体视线方位角	
	角度/(°)	精度/mrad	角度/(°)	精度/mrad
-6	-6.03	0.41	-6.08	0.42
-5	-5.02	0.37	-5.02	0.33
-4	-4.01	0.32	-3.98	0.33
-3	-3.02	0.31	-2.99	0.25
-2	-2.03	0.29	-2.02	0.29
-1	-0.97	0.26	-0.97	0.32
0	0.02	0.29	0.06	0.29
1	1.04	0.27	1.01	0.27
2	2.01	0.31	2.03	0.24
3	2.98	0.27	2.99	0.30
4	3.95	0.28	3.96	0.33
5	4.95	0.34	4.93	0.29
6	5.96	0.34	5.95	0.36

从图 12 ~ 图 13 和表 3 中可以看出,所研制的半主动激光能量模拟器可以很好地模拟目标回波能量,对导引头起到很好的标定作用,线性角度范围内残差小于 0.08°,测角精度小于 0.45 mrad。

4.3 末制导半物理仿真实验

在以上试验系统的基础上,增加弹道仿真计算机、弹载计算机、电动舵机等设备即可构成激光末制导半物理仿真系统,弹道仿真计算机用以计算弹目距离,并根据作战使用场景设置局部天气状况,计算后将结果一并输出给激光模拟器,模拟

整个制导系统的攻击过程。图 14 ~ 图 15 是某具体条件下导引头实测仿真曲线及其误差值。

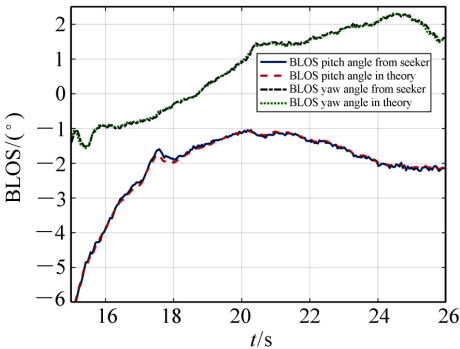


图 14 半物理仿真导引头实测曲线
Fig. 14 Measured curves of semi-physical simulation seeker

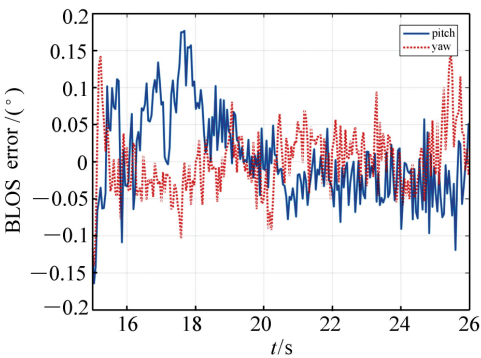


图 15 导引头体视线角误差
Fig. 15 Angle error of body line of sight for seeker

由图 14、15 可知,激光目标模拟器能够较好地模拟出制导过程中体视线角的能量变化,导引头能够精确跟踪目标模拟器输出激光,体视线角跟踪误差均小于 0.2°,满足激光末制导系统要求。

5 结 论

本文为模拟实战环境下半主动激光制导的目

标回波能量,设计并研制了注入式激光能量模拟系统。建立了激光在大气中传输发生散射与衰减的模型,选用 DPS-A 激光器和布儒斯特角薄膜偏振器衰减激光,设计了光纤耦合与匀光准直系统,并进行了激光回波能量模拟实验、导引头标定与激光末制导试验。试验结果表明:激光回波能量

精度小于 3.0%,导引头线性角度范围内残差小于 0.08°,测角精度小于 0.45 mrad,末制导过程视线角跟踪误差小于 0.2°。该系统可模拟多种实战环境中激光能量传输情况,且精度高,能够满足激光制导半物理仿真要求。

参考文献:

- [1] 王琦,穆希辉,路桂娥. 美军制导弹药发展现状及趋势[J]. 飞航导弹, 2015(8): 12-17.
WANG Q, MU X H, LU G E. Development status and trend of US military guided ammunition[J]. *Winged Missiles Journal* 2015(8): 12-17. (in Chinese)
- [2] 崔平,范志锋,徐敬青,等. 英国 BAE 公司先进精确杀伤武器系统技术路线及启示[J]. 飞航导弹, 2016(5): 12-16.
CUI P, FAN ZH F, XU J Q *et al.*. Technical line and enlightenment of British BAE's advanced precision kill weapon system[J]. *Winged Missiles Journal* 2016(5): 12-16. (in Chinese)
- [3] 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): 2610-2616.
YU G Q, GUO J, LI Y *et al.*. Precision analysis of indoor simulation system for laser angle deception jam[J]. *Opt. Precision Eng.* 2013, 21(10): 2610-2616. (in Chinese)
- [4] 张伟,张合,张祥金. 捷联激光制导弹药末段全弹道目标捕获仿真[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1231001.
ZHANG W, ZHANG H, ZHANG X J. Simulation on target acquisition of strapdown laser guided munitions in whole terminal trajectory[J]. *Infrared and Laser Engineering* 2016, 45(12): 1231001. (in Chinese)
- [5] 赵乾,徐利国,范小虎,等. 激光角度欺骗干扰半实物仿真研究[J]. 激光与红外, 2017, 47(5): 635-640.
ZHAO Q, XU L G, FAN X H *et al.*. Research of hardware-in-the-loop simulation for laser angle deception[J]. *Laser & Infrared* 2017, 47(5): 635-640. (in Chinese)
- [6] 华创录,王春艳,王晓曼,等. 外场激光导引性能分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(1): 60-63.
HUA CH L, WANG CH Y, WANG X M *et al.*. Analysis of laser guidance performance in external field[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)* 2017, 40(1): 60-63. (in Chinese)
- [7] 丛明煜,邵成勋,王学孝. 1.06 μm 激光半主动制导的目标与大气环境模型[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(4): 71-77.
CONG M Y, SHAO CH X, WANG X X. Target and atmospheric environment model of 1.06 micron laser[J]. *Infrared and Laser Engineering* 2000, 29(4): 71-77. (in Chinese)
- [8] 吕嵩,马辉,程彦杰,等. 大气散射对激光制导武器对抗影响研究[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(8): 162-165.
LV S, MA H, CHENG Y J *et al.*. Atmospheric scattering effect on confrontation in laser guided weapon[J]. *Ship Electronic Engineering* 2014, 34(8): 162-165. (in Chinese)
- [9] 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.
WANG J, LIN W, WANG P *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)
- [10] 马康,刘传波. 基于阵列式探测器的高能激光大气传输试验与评估方法研究[J]. 光学与光电技术, 2017, 15(4): 16-20.
MA K, LIU CH B. Test and evaluation method of the high-energy laser atmospheric transmission based on the detector array[J]. *Optics & Optoelectronic Technology* 2017, 15(4): 16-20. (in Chinese)
- [11] 王敏帅,袁茂森. 激光传输模型与仿真研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 368-371.
WANG M SH, DOU M S. Laser's transmitting model and simulation[J]. *Infrared and Laser Engineering* 2006, 35(1): 368-371. (in Chinese)
- [12] 周瑞岩,刘明皓. 激光目标回波模拟器设计技术[J]. 指挥控制与仿真, 2017, 39(4): 124-127.

- ZHOU R Y ,LIU M H. Design technique of laser target echo simulator[J]. *Command Control & Simulation* 2017 39 (4):124-127. (in Chinese)
- [13] 薛珮瑶,吴耀,冯茜,等.大视场四象限探测光学系统设计[J].中国光学 2014 7(3):462-468.
XUE P Y ,WU Y ,FENG Q *et al.* . Design of the large field optical system for four-quadrant detecting[J]. *Chinese Optics* 2014 7(3):462-468. (in Chinese)
- [14] 张军强,谢飞,薛庆生,等.基于四象限探测器的激光导引镜头的研制[J].中国光学 2015 8(3):471-479.
ZHANG J Q ,XIE F ,XUE Q SH *et al.* . Laser guided lens based on four-quadrant detector[J]. *Chinese Optics* 2015 8 (3):471-479. (in Chinese)
- [15] 张鑫,杜智远,乔彦峰,等.全捷联激光半主动导引头线性视场研究[J].中国光学 2015 8(3):415-421.
ZHANG X ,DU ZH Y ,QIAO Y F *et al.* . Study on linear field of strapdown semi-active laser seeker[J]. *Chinese Optics* , 2015 8(3):415-421. (in Chinese)
- [16] 张伟,张合,张祥金.捷联激光制导弹药末段全弹道目标捕获仿真[J].红外与激光工程 2016 45(12):1231001.
ZHANG W ,ZHANG H ,ZHANG X J. Simulation on target acquisition of strapdown laser guided munitions in whole terminal trajectory[J]. *Infrared and Laser Engineering* 2016 45(12):1231001. (in Chinese)
- [17] 姚跃民,温求道,刘小军,等.基于大气能见度的激光制导炸弹武器系统作战使用性能研究[J].航空兵器 2017 (3):74-80.
YAO Y M ,WEN Q Q ,LIU X J *et al.* . Research on laser guided bomb weapon system combat efficiency based on atmospheric visibility[J]. *Aero Weaponry* 2017(3):74-80. (in Chinese)
- [18] 王璐璐,高爱华,刘卫国,等.基于 LabVIEW 的角分辨空间激光散射测量系统[J].光学与光电技术 2018 16(3):40-45.
WANG L L ,GAO A H ,LIU W G *et al.* . Angle resolution space laser scattering measurement system based on LabVIEW [J]. *Optics & Optoelectronic Technology* 2018 16(3):40-45. (in Chinese)

作者简介:



刘克俭(1969—),男,山东潍坊人,工学博士,中国人民公安大学遥感中心主任,主要从事导航制导与控制及遥感应用方面的研究。E-mail: liukejian@pp-suc.edu.cn



张军强(1981—),男,江苏泰兴人,博士,副研究员,主要从事光学仪器总体技术方面的研究。E-mail: zjq1981_81@163.com



孙婷婷(1989—),女,吉林公主岭人,博士,助理研究员,主要从事光学制导技术方面的研究。E-mail: suntt@ciomp.ac.cn