

激光制导武器能量特性半实物仿真技术研究*

苏建刚^{1,2}, 黄艳俊², 刘上乾³, 付梦印¹

(1 北京理工大学 信息科学技术学院, 北京 100081)

(2 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

(3 西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

摘 要:分析了激光半主动制导武器导引头接受激光能量特性,提出了激光能量特性半实物仿真系统. 根据半实物仿真条件下导引头接受能量与实战条件下导引头接受能量应一致的原则,建立了半实物仿真条件下的能量传输关系. 根据假设的激光半主动制导武器特性,对实现激光能量特性半实物仿真的相关技术进行了研究.

关键词:激光制导;激光能量;半实物仿真;激光目标模拟器

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2007)09-1722-4

0 引言

众所周知,激光具有亮度高、单色性好、方向性强、波束窄等特点,当用来精确瞄准目标时,可使目标分辨率达到很高.正是激光的这些特性,使激光制导武器应运而生.与红外、电视制导武器相比,激光制导武器具有抗干扰能力强、成本较低的优点,因而它一直是世界各军事强国优先发展的精确制导武器.

目前列装的激光制导武器主要有两类:一类是采用激光半主动制导的武器;另一类是采用激光驾束制导的武器^[1-2].本文只针对激光半主动制导武器的激光能量特性半实物仿真技术进行研究.半实物仿真是激光制导武器设计、研制、性能评估不可缺少的试验手段.根据相似性原理,激光制导武器在进行半实物仿真试验时,需要给激光导引头提供一个与真实环境相同的目标环境,一般将实现这一要求的仿真试验设备称之为激光目标模拟器.根据激光半主动制导武器的工作原理,激光目标模拟器的主要功能有三个:1)模拟导引头在实战环境下接收到的激光能量,要求为导引头提供的激光能量应与其在实战环境下接受到的能量一致;2)模拟实战环境下光斑尺寸大小变化情况,要求为导引头提供的光斑尺寸大小应与其在实战环境下“看到”的大小一致;3)模拟实战环境下光斑运动情况,要求导引头和模拟光斑运动规律应与实战环境下的弹目视线运动规律一致.本文将要开展的激光能量特性半实物仿真技术研究,主要就激光目标模拟器如何实现其第一个功能进行研究.

1 实战环境下导引头接收的激光能量

1.1 激光传输过程

激光半主动制导武器工作原理是,装在地面、战车、舰船、飞机或其他载体上的激光器照射目标,弹上导引头接受目标反射的激光能量,确定目标和导弹的相对位置,在弹上形成控制信号,自动将导弹导向目标.如图 1.

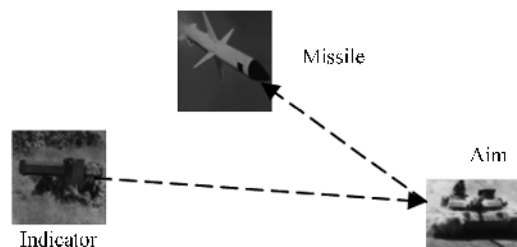


图 1 激光半主动制导原理示意图

Fig. 1 The principle of laser semi-active guide

指示目标用的激光器一般称之为激光目标指示器(以下简称指示器),对于增加了激光测距功能的指示器,又可称之为激光目标指示测距机.目前,指示器多为 Nd:YAG 激光器,工作波长 $1.06 \mu\text{m}$.为了提高指示器抗干扰能力,许多国家正在发展工作波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光指示器,并有少量列装^[1].但用于制导炮弹、炸弹和导弹的指示器,目前只有 $1.06 \mu\text{m}$ 的列装.根据激光制导武器的工作原理,激光照射及导引头接收激光的过程如图 2.

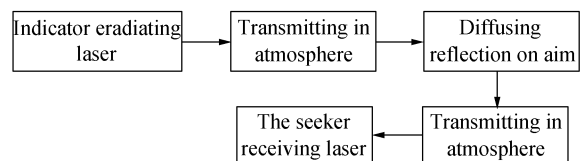


图 2 激光照射及导引头接收激光过程示意图

Fig. 2 The course of laser irradiating and the seeker receiving laser

*总装备部基金资助

Tel: 010-66361138 Email: zhshanping@sohu.com

收稿日期: 2006-01-19

指示器发出激光,经过大气传输与衰减照射到目标,经目标漫反射后,再经过大气衰减,被导引头接收.

1.2 导引头接受的能量

为了在仿真环境下使导引头接受到的激光能量与实战环境相同,必须先确定导引头接受激光能量的变化情况. 设指示器发射某个激光脉冲,经过其光学系统后的功率为 Φ_0 , 激光发散角为 α , 则其发光强度 I_0 为

$$I_0 = \frac{\Phi_0}{4\pi \sin^2 \frac{\alpha}{4}} \quad (1)$$

从目标向指示器看,可将指示器看做发光强度为 I_0 的点光源,并将目标视为无穷大半球面. 若指示器与目标之间距离为 R_1 ,从指示器到目标的大气透过率为 τ_1 ,则指示器在目标上产生的照度 E_{zm} 为

$$E_{zm} = \frac{\tau_1 I_0 \cos \theta_{zm}}{R_1^2} \quad (2)$$

式中 θ_{zm} 是发射光源中心到被照面中心所引矢径与该面法线的夹角,如图 3.

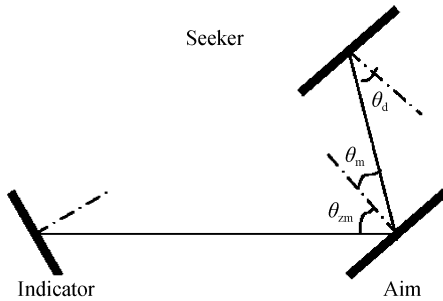


图 3 激光光路示意图
Fig. 3 The light route of laser

假设目标为朗伯反射体,反射系数为 ρ , 则目标的亮度 L_m 为

$$L_m = \frac{\rho}{\pi} E_{zm} \quad (3)$$

假设指示器在目标上形成的光斑面积为 A_m , 目标与导引头的距离为 R_2 , 从目标到导引头的大气透过率为 τ_2 , 则在激光导引头整流罩处产生的照度 E_d 为

$$E_d = \frac{\tau_2 L_m A_m \cos \theta_d \cos \theta_m}{R_2^2} \quad (4)$$

式中 θ_d 、 θ_m 分别为连结导引头中心与目标上的光斑中心形成的矢径与两个面元法线间的夹角.

若导引头接受激光的有效面积为 A_d , 则导引头整流罩处接受到的激光能量功率 Φ 为

$$\Phi = \frac{\tau_1 \tau_2 \rho A_d A_m \Phi_0 \cos \theta_{zm} \cos \theta_d \cos \theta_m}{4\pi^2 R_1^2 R_2^2 \sin^2 \frac{\alpha}{4}} \quad (5)$$

假设在垂直于指示器发射轴的平面上,激光光

斑是近似圆形的,则有

$$A_m \cos \theta_{zm} = \frac{\pi}{4} (R_1 \alpha)^2 \quad (6)$$

实际情况下 θ_d 很小,可假设 $\theta_d \approx 0$, 另外考虑到 α 极小,于是可将式(5)进一步简化为

$$\Phi = \frac{\tau_1 \tau_2 \rho A_d \cos \theta_m}{\pi R_2^2} \Phi_0 \quad (7)$$

1.3 大气透过率

一般来说,单色辐射在大气中的透射率有如下关系

$$\tau = \exp(-\gamma R) \quad (8)$$

式中 γ 为衰减系数, R 为辐射透过的路程长度.

文献[3]介绍了一种简化的计算衰减系数的方法. 对于清洁的空气,当大气能见度 $S_{NJD} > 10$ km 时,对于波长为 λ 的光辐射,其衰减系数为

$$\gamma(\lambda) = \frac{3.91}{S_{NJD}} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-n} \quad (9)$$

$$n = 0.585 (S_{NJD})^{1/3} \quad (10)$$

2 激光能量特性半实物仿真系统

激光半主动制导武器的激光能量特性半实物仿真,属于激光目标特性模拟的一部分. 目前主要有两种模拟方式:直接照射法和投影反射法,本文采用投影反射法. 图 4 是激光能量特性半实物仿真原理图.

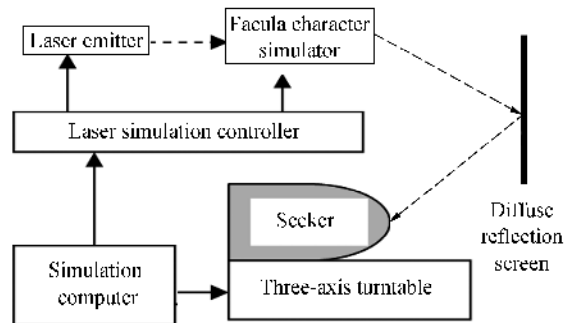


图 4 激光能量特性半实物仿真原理图
Fig. 4 The principle of the Hardware-in-the-loop simulation for the characteristics of laser energy

半实物仿真系统主要由仿真计算机、三轴转台、激光器、光斑特性模拟器、激光模拟控制器和漫反射屏组成,导引头置于三轴转台上.

激光模拟控制器由计算机和控制软件组成,用于与仿真计算机进行实时信息交换,并控制激光器和光斑特性模拟器按仿真计算机的要求运行.

激光器为 Nd:YAG 激光器,用于模拟激光目标指示器的主要性能,包括:激光波长、激光脉冲重复频率、脉宽、脉冲能量等. 其中激光波长、重复频率、脉宽等指标,应与被模拟的激光目标指示器一致,其输出的脉冲能量应稳定在要求的值上.

光斑特性模拟器由能量衰减器^[4-6]、尺寸模拟器

和运动模拟器组成. 其作用有三个: 1) 将激光器输出的激光能量按照预定要求进行衰减, 以模拟弹目相对运动而引起的导引头接受激光能量变化的情况; 2) 将激光器输出的激光束按照预定要求进行扩束, 以模拟弹目相对运动和指示器与目标之间相对运动而引起的导引头“看到”光斑尺寸变化的情况; 3) 使照射在漫反射屏上的激光光斑按预定要求运动, 以模拟弹目相对运动和指示器与目标之间相对运动而引起的导引头“看到”光斑能量中心运动的情况.

仿真计算机和三轴转台属于半实物仿真系统的通用设备, 本文不再赘述.

激光器发射的激光, 经光斑特性模拟器照射在漫反射屏上, 三轴转台带动导引头进行三维姿态运动, 以模拟弹体姿态运动规律, 此时导引头就可从漫反射屏上“看到”一个与实战情况完全相似的激光光斑.

3 半实物仿真导引头接受激光能量特性

在半实物仿真条件下, 由于激光器与漫反射屏之间距离, 以及导引头与漫反射屏的距离很近, 一般在几米到十几米之间, 激光传输的大气衰减几乎为零, 于是由式(7)可以得到

$$P = \frac{\rho_t A_a \cos \theta_{mf}}{\pi r_2^2} P_{of} \quad (11)$$

式中: P 为导引头整流罩处接受到的激光脉冲能量; P_{of} 为激光脉冲经过光斑特性模拟器后的能量; ρ_t 为漫反射屏的反射系数; r_2 为导引头到漫反射屏上光斑能量中心的距离; θ_{mf} 为导引头到光斑能量中心连线与漫反射屏法线的夹角.

半实物仿真的目的就是要使导引头接受到的能量与实际环境下的相同, 即要求 $P = \Phi$, 则由式(7)和(11)得

$$P_{of} = \tau_1 \tau_2 \frac{\rho}{\rho_t} \frac{r_2^2}{R_2^2} \frac{\cos \theta_m}{\cos \theta_{mf}} \Phi_0 \quad (12)$$

半实物仿真时, 需要保证 $\theta_m = \theta_{mf}$, 于是式(12)可变为

$$P_{of} = \tau_1 \tau_2 \frac{\rho}{\rho_t} \frac{r_2^2}{R_2^2} \Phi_0 \quad (13)$$

4 仿真分析

参考国外 1.06 μm 激光半主动制导武器性能^[7-8], 假设某激光半主动制导武器, 其导引头有效作用距离为 100 m~4 000 m, 指示器的有效作用距离为 1 000 m~6 000 m, 指示器发射功率为 5 mW, 并假设大气能见度为 $S_{\text{NJD}} = 20 \text{ km}$. 另外, 还假设漫反射屏的反射系数 ρ_t 与目标反射系数 ρ 相同, 在仿

真条件下导引头到漫反射屏的距离 $r_2 = 10 \text{ m}$.

根据上述数据, 可以计算出导引头接受到最大能量和最小能量时的 P_{of} 值.

由激光半主动制导武器的工作原理可知, 导引头接受到最大能量的条件为: 导引头和指示器离目标都最近. 对于本文假设的激光制导武器, 有 $R_1 = 1 000 \text{ m}$, $R_2 = 100 \text{ m}$. 则由式(8)、(9)、(10)和(13), 可得如表 1 结果.

表 1 仿真分析表

假设条件	计算结果	备注
$R_1 = 1 000 \text{ m}$	$\tau_1 = 0.933$	导引头接受到最大激光能量
$R_2 = 100 \text{ m}$	$\tau_2 = 0.993$	
$r_2 = 10 \text{ m}$	$P_{of} = 46.325 \text{ kW}$	
$R_1 = 6 000 \text{ m}$	$\tau_1 = 0.661$	导引头接受到最小激光能量
$R_2 = 4 000 \text{ m}$	$\tau_2 = 0.759$	
$r_2 = 10 \text{ m}$	$P_{of} = 15.680 \text{ W}$	
$R_2 = 10 \text{ m}$		

导引头接受到最小能量的条件为: 导引头和指示器离目标都最远. 对于本文假设的激光制导武器, 有 $R_1 = 6 000 \text{ m}$, $R_2 = 4 000 \text{ m}$. 则由式(8)、(9)、(10)和(13), 也可得如表 1 结果.

根据表 1 的数据, 可以确定激光目标模拟器的部分技术指标. 首先要求激光器的输出功率必须大于 62.942 kW, 其次要求能量衰减器的能量衰减倍数至少达到 3×10^3 倍以上.

5 结论

在激光半主动制导武器半实物仿真系统中, 目标模拟技术是其中的难点和关键点. 本文对目标模拟技术中的激光能量模拟问题进行了深入探讨, 所提出的技术方案和激光能量传输的数学模型已应用到实际工作中, 并得到验证.

参考文献

- [1] ZENG Xian-lin, LI Xiang. Review on development of airborne laser target designator[J]. *Infrared and Laser*, 2000, **30**(1): 4-6.
曾宪林, 李翔. 机载激光目标指示器发展综述[J]. *红外与激光*, 2000, **30**(1): 4-6.
- [2] LI Jing-zhen. Optics handbook[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1986: 1-27.
李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986: 1-27.
- [3] Байбородин Ю В, Криксунова Л И. Laser technology handbook [M]. Beijing: Machine Industry Press, 1986: 335-346.
巴伊鲍罗金, 克里克松诺夫. 激光技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986: 335-346.
- [4] CAO Zhong-hui, YAN Hun-ming, WU Xing-kun. The linearity compensation of a digital micro-machining based variable optical attenuator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 826-829.

- 曹钟慧,宴辉鸣,吴兴坤. 可调光衰减器的光衰减量线性补偿[J]. 光子学报,2004,**33**(7):826-829.
- [5] FANG Qi-yong, SHI Huan-fang, GAO Hong-yao. Application of right angle prism's plane reflection attenuation in laser beam diagnostic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1220-1224.
- 房启勇,施浣芳,高洪尧. 直角棱镜平面反射衰减在激光光束诊断中的应用研究[J]. 光子学报,2003,**32**(10):1220-1224.
- [6] YUAN Ye, CAO Zhong-hui, BAO Jun-feng, *et al.* Measurement and dynamic response analysis on a MEMS variable optical attenuator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4):439-442.
- 袁野,曹钟慧,鲍俊峰,等. 一种 MEMS 可调光衰减器性能测试及动态响应分析[J]. 光子学报,2004,**33**(4):439~442.
- [7] DALY J G. The Nd : YAG laser rangefinder/designator[C]. *SPIE*,1986,**610**:68-71.
- [8] ROBERT T A. Laser rangefinder optics[C]. *SPIE*,1986,**610**:99-106.

Research on The Hardware-in-the-loop Simulation Technology for the Energy Characteristics of Laser Guided Weapons

SU Jian-gang^{1,2}, HUANG Yan-jun², LIU Shang-qian³, FU Meng-yin¹

(1 School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

(3 School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Received date:2006-01-19

Abstract: The laser energy characteristics the seeker of semi-active laser guided weapon receiver were analyzed, and the Hardware-in-the-loop simulation system for the laser energy characteristics was built. According to the principle that the energy received by the seeker under the Hardware-in-the-loop simulation is consistent with the energy received by the seeker under actual combat, the relation of the energy transmitting under the Hardware-in-the-loop simulation was set up. According to the characteristics of semi-active laser guided weapon supposed by this paper, the relational technology of the Hardware-in-the-loop simulation for the laser energy characteristics were studied.

Key words: Laser guided; Laser energy; Hardware-in-the-loop simulation; Laser aim simulator



SU Jian-gang was born in 1963, and received M. S. Degree from Beijing Institute of technology in 1991. Now he is working in Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, and studying for Ph. D. in School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology. His researches focus on navigation, guided and control.