

激光制导武器干扰半实物仿真系统激光光斑研究

梁巍巍 张文攀 李慧 陈前荣

中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003

摘要 激光光斑是激光制导武器干扰半实物仿真系统中目标特性模拟的重要组成部分。介绍了半实物仿真系统组成和激光导引头工作原理;研究了基于相似性原理采用等比例缩放的光斑模拟方案;利用LightTools建立了导引头光学系统模型,计算了不同制导时刻内外场光斑在探测器光敏面上的光斑尺寸;基于激光制导武器干扰半实物仿真系统实际需求,提出了光斑模拟优化方案。研究发现,半实物仿真条件下,导引头光敏面上形成的光斑比外场条件下要大,并且变化规律也不一致;随着距离目标越来越近,漫反射屏上光斑越来越大,导致导引头光敏面上光斑也越来越大。研究结果有助于提高光斑模拟精度和激光制导武器干扰半实物仿真系统可信度。

关键词 测量;激光制导武器;半实物仿真;激光光斑

中图分类号 TN977;TP391.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.021201

Study of Laser Spot in Hardware-in-the-Loop Simulation System for Laser Guided Weapon Jamming

Liang Weiwei Zhang Wenpan Li Hui Chen Qianrong

Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang, Henan 471003, China

Abstract Laser spot simulation is the important part of target characteristic simulation in hardware-in-the-loop (HITL) simulation system for laser guided weapon jamming. The HITL system composition and laser seeker theory are introduced. Laser spot simulation scheme based on correspondent ratio scaling in similarity theory is shown. Optical system model of laser seeker is established by LightTools, and the sizes of laser spot on detector's photosensitive surface in infield and outfield are calculated in different guided time. Laser spot simulation optimization methods based on HITL simulation system for laser guided weapon jamming are proposed. The research result indicates that under HITL condition the size of laser spot on detector's photosensitive surface is bigger than that in outfield environment, and their changings are not the same. With the distance from the target decreasing, the size of laser spot on diffuse reflectance screen increases and this leads to the increase of laser spot on detector's photosensitive surface. The result is helpful to improve the precision of laser spot simulation and the reliability of HITL simulation system for laser guided weapon jamming.

Key words measurement; laser guided weapon; hardware-in-the-loop simulation; laser spot

OCIS codes 120.1880; 120.5700; 290.1990

1 引言

激光制导武器以其高精度、低成本、大威力、使用方便等特点,在近几次局部战争中取得了显著的实战效果,受到世界各国的青睐^[1-3]。激光制导武器的干扰与对抗越来越受到人们的重视,各国都在竞相发展激光制导武器干扰装备,我国也研制了多种激光干扰对抗装备。干扰是否有效,干扰效果如何评估以及干扰装备如何达到其最佳战术使用效果都是装备研制使用及实验鉴定部门迫切需要解决的问题。要检验光电对抗装备的干扰效果和激光制导武器的抗干扰效果,最直接的方法是进行实弹打靶,但实弹打靶代价昂贵,

收稿日期: 2014-06-06; 收到修改稿日期: 2014-06-27; 网络出版日期: 2015-01-15

基金项目: 军队重大专项基金

作者简介: 梁巍巍(1983—),男,硕士,工程师,主要从事光电对抗及光电对抗仿真方面的研究。

E-mail: liangblue1044@163.com

难以获得较大的实验样本;而地面实装实验和外场飞行实验,不能模拟弹的真实运动过程和规律,得到的只是对导引头的干扰效果,具有一定的局限性。目前,工业部门建立了激光制导武器的半实物(HITL)仿真实验系统,结合对激光制导武器干扰技术和相关仿真模型,构建对激光制导武器干扰半实物仿真系统,可以得到干扰装备接入前后,激光制导武器的弹道曲线、脱靶量及命中精度,实现对激光制导武器干扰效果的综合评估。

工业部门建立的激光制导武器半实物仿真系统关注的是弹在无干扰情况下的精度问题,与工业部门不同,实际战场环境下对激光制导武器干扰半实物仿真系统关注的是干扰情况下干扰装备的干扰效果和激光制导武器的抗干扰效果,因此,为激光制导武器构造一个接近真实飞行环境、目标特性及弹目相对运动环境和激光干扰环境的仿真试验环境是仿真系统基本的要求。其中激光光斑模拟是半实物仿真试验系统中战场激光环境模拟的重要环节,工业部门对激光光斑模拟已经有很多相关文献报道。沈永福等^[4]对激光制导武器半实物仿真系统的需求进行了分析,介绍了一种系统构建方案,指出光学模拟模块是系统的重要组成部分;苏建刚等^[5]对激光半主动制导武器半实物仿真系统中的激光目标模拟技术进行了研究,提出了激光制导武器半实物仿真对目标模拟的技术要求;王仕成等^[6]为满足激光制导武器半实物仿真中的光斑大小仿真需求,建立了实验室环境下的目标光斑位置和大小变化的仿真模型。激光导引头光敏面上的光斑大小是导引头探测定位目标的重要依据,在有干扰的情况下,光敏面上甚至有可能出现多个光斑^[7],因此,对激光制导武器干扰半实物仿真系统对光斑大小模拟的精度有了更高的要求,也是干扰效果评估的关键之一,而以往的相关研究报道较少。

本文通过研究半实物仿真中光斑模拟的具体需求,建立导引头光学系统模型,结合激光制导武器实际战情,计算了内外场条件下不同制导时刻在导引头光敏面上形成的光斑,分析了内外场条件下光斑差异原因和变化规律,对激光制导武器干扰半实物仿真系统的光斑模拟提出了优化方案。

2 系统组成

激光制导武器干扰半实物仿真系统主要由仿真控制与实验评估分系统、激光指示/干扰信号模拟分系统、激光制导武器模拟分系统、背景光信号模拟分系统、实时通信网络以及辅助分系统等组成。图1为半实物仿真系统框图。

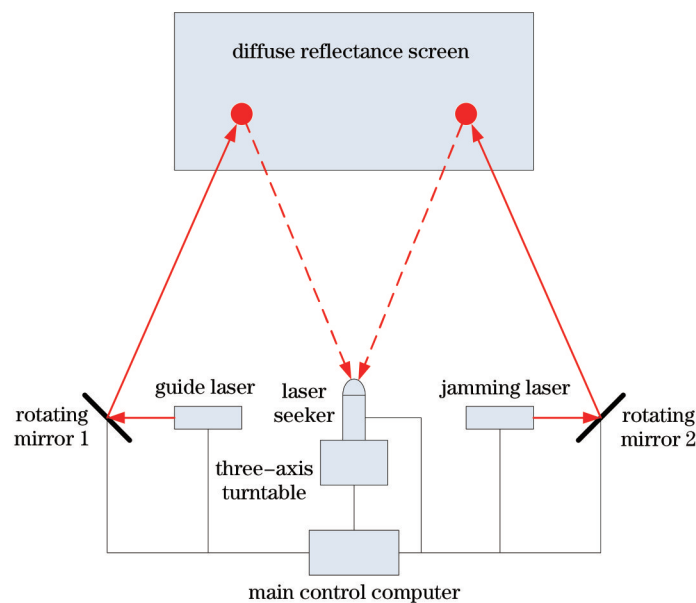


图1 半实物仿真系统框图

Fig.1 Block diagram of the HITL simulation system

仿真控制与实验评估分系统完成全系统的运行管理与控制、战情设计和事后数据处理及评估等功能;激光指示/干扰信号模拟分系统将指示和干扰激光经过光束变换后投射到漫反射屏上,目标光斑和干扰光斑分别按照弹目、弹干相对运动关系在漫反射屏上运动,模拟目标和干扰的远场光学特性及弹目视线的相对运动;激光导引头安装在模拟导弹姿态角运动特性的三轴飞行仿真转台上,制导控制回路通过数学仿真方

式实现,激光导引头在转台的带动下,跟踪漫反射屏上的目标光斑和干扰光斑,模拟制导武器的工作特性。

导引头是半主动激光制导武器的重要组成部分,具有目标探测跟踪和编码识别功能,并输出制导指令给自动驾驶仪,在半实物仿真系统中,激光导引头是武器系统中唯一以硬件形式纳入仿真回路的设备。

假设 r 为四象限探测器光敏面上目标光斑半径, x 为偏航方向的误差位置,即光斑中心相对光敏面中心水平方向的位移, y 为俯仰方向的误差位置,则俯仰和偏航方向的偏差电压信号为^[7]

$$\begin{aligned} U_y &= k \frac{(A+B)-(C+D)}{A+B+C+D} = 2k \left[\frac{y}{r} \sqrt{1-(y/r)^2} + \arcsin(y/r) \right] / \pi, \\ U_x &= k \frac{(A+D)-(B+C)}{A+B+C+D} = 2k \left[\frac{x}{r} \sqrt{1-(x/r)^2} + \arcsin(x/r) \right] / \pi, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 A 、 B 、 C 、 D 代表四象限探测器4个象限, k 为比例系数。

3 半实物仿真光斑模拟

在激光制导武器半实物仿真实验中,根据相似性原理,由武器和目标光斑的空间相对位置关系求出仿真光斑在漫反射屏上的位置,再根据外场实际光斑大小和光斑内外场转换模型求出仿真光斑大小,最后由扩束系统伺服电机实现光斑大小的控制^[8]。

定义外场地面坐标系和内场漫反射屏坐标系。地面坐标系 $AX_0Y_0Z_0$:原点 A 选在炸弹投放点在当地地平面上的铅垂投影点处,轴 AY_0 垂直向上,轴 AX_0 在炸弹初始飞行平面内,成水平指向,轴 AZ_0 、 AY_0 成右手直角坐标系。

漫反射屏坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$:以漫反射屏的中心点为原点 O_0 ;水平正右方为 O_0X_0 轴正向;竖直正向上方为 O_0Y_0 轴; O_0Z_0 轴与 O_0X_0 、 O_0Y_0 轴成右手系。

外场条件,地面坐标系 $AX_0Y_0Z_0$ 下,假设 t 时刻导引头的位置为 (x_B, y_B, z_B) ,目标位置为 (x_T, y_T, z_T) ,则导引头和目标光斑的相对距离 R 为

$$R = \sqrt{(x_B - x_T)^2 + (y_B - y_T)^2 + (z_B - z_T)^2}. \quad (2)$$

光学暗室内,漫反射屏坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 下,假设 t 时刻导引头的位置为 (x_D, y_D, z_D) ,模拟光斑在漫反射屏上位置为 (x_P, y_P, z_P) ,则导引头和模拟光斑的相对距离 h 为

$$h = \sqrt{(x_D - x_P)^2 + (y_D - y_P)^2 + (z_D - z_P)^2}. \quad (3)$$

设 t 时刻外场目标光斑直径为 L ,则光学暗室内漫反射屏上的模拟光斑直径 d 为

$$d = L \cdot h / R. \quad (4)$$

4 漫反射屏上光斑对导引头影响分析

实际战场环境下,弹目或弹干距离变化范围为几千米到截断距离几百米之间,距离远远大于导引头入瞳直径;指示或干扰激光经过大气传输衰减以及大气湍流的影响,可以认为漫反射光斑形成平行光线入射导引头光学系统。半实物仿真条件下,弹目距离(三轴转台回转中心到漫反射屏距离)由于场地限制不能做到无限大,根据相似性原理采用等比例缩放的方法模拟外场光斑,会造成导引头光敏面上光斑大小内外场不同,影响系统仿真精度。

以某激光制导炸弹为例,设置战情条件为地照空投,激光指示器距目标1000 m,外场实际光斑直径为0.3 m,激光制导炸弹投弹高度为3000 m,目标距离为5600 m,投弹时初始速度为250 m/s。根据文献[6]报道,设定导引头的制导工作区间为4000~100 m,半实物仿真条件下,假定导引头到漫反射屏的距离为10 m。图2为弹目距离和漫反射屏上光斑随制导时间的变化曲线。

图2中实线为弹目距离随时间变化曲线,虚线为利用相似性原理等比例缩放的方法,根据(4)式在漫反射屏上形成的光斑直径。由于导引头的制导工作区间设定为4000~100 m,因此,在弹道曲线的初始段,漫反射屏上没有光斑;大约10 s时,进入导引头的制导工作区间,漫反射屏上出现光斑,光斑刚开始变化非常缓慢,随着离目标越来越近,光斑直径变化剧烈;在制导区间末端时,由于能量非常强,导引头进入截断距离,光斑模拟停止。为了分析漫反射屏上模拟光斑对导引头光敏面上光斑的影响,可以通过建立导引头光学系

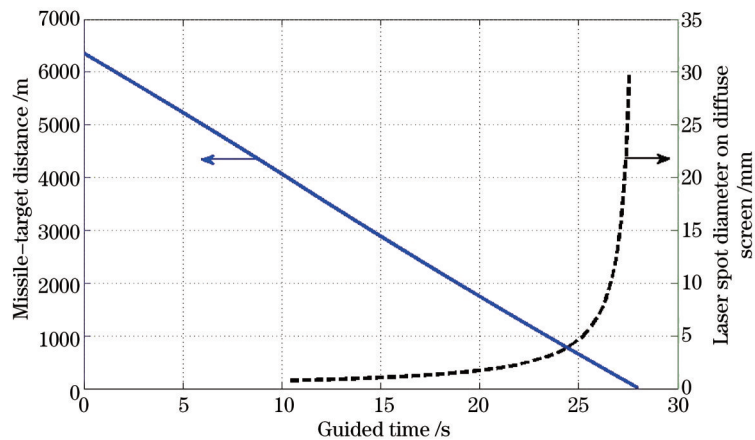


图2 弹目距离和漫反射屏上光斑直径随制导时间变化曲线

Fig.2 Missile-target distance and laser spot diameter on diffuse screen versus guided time

统模型,量化计算光敏面上光斑尺寸来进行分析。

LightTools是由美国 Optical Research Associates 公司研制开发的一款光学系统建模仿真软件,可以精确定义不同距离下光源的形状和发光特性,利用其照明模块可实现蒙特卡洛(Monte Carlo)光线追迹,以便确定某个(或某几个)指定表面上的光照度、强度或亮度,因此广泛应用在光学仿真领域^[8]。通过 LightTools 仿真软件,建立导引头光学系统模型,可以方便地计算漫反射屏上不同大小的光斑在导引头光敏面上形成的光斑情况。

图3(a)为使用 LightTools 仿真软件建立的导引头光学系统模型,图3(b)为通过光线追迹方法得到的导引头光敏面上的光斑。利用建立的光学系统模型,根据制导时间推进,设定导引头距离漫反射屏为 10 m,计算不同时刻漫反射屏上不同大小光斑情况下,导引头光敏面上形成的光斑情况。

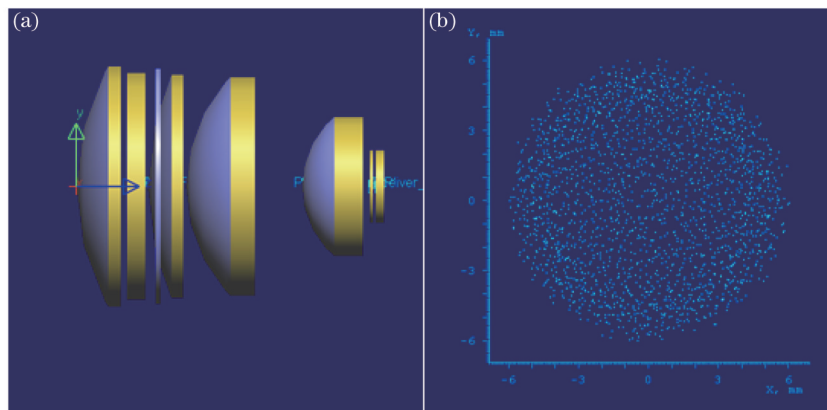


图3 (a)导引头光学系统模型及(b)光敏面上光斑

Fig.3 (a) Optical system model of laser seeker and (b) laser spot on detector's photosensitive surface

图4为外场和半实物仿真条件下导引头光敏面上光斑直径随制导时间变化曲线。外场条件下,远距离漫反射光斑可以形成平行光线入射导引头光学系统,除了截断距离附近,可以看出光敏面上光斑几乎没有变化。半实物仿真条件下,弹目距离有限(设定为 10 m),导引头光敏面上形成的光斑比外场条件下要大,并且变化规律也不一致,随着距离目标越来越近,漫反射屏上光斑越来越大,导致导引头光敏面上光斑也越来越大,这显然和实际外场条件下光敏面上光斑变化规律不符。这主要是在光学暗室内,由于距离限制,不能获得类似外场条件下的平行光线,然而有近场光学效应,导致光敏面上光斑直径过大且变化规律与外场实际不符。由(1)式可以看出,光敏上光斑大小直接影响着偏差电压信号和制导指令的输出,光斑模拟精度直接影响了半实物仿真系统的仿真的精度和系统的可信度。

对激光制导武器干扰半实物仿真系统关注的是干扰情况下干扰装备的干扰效果和激光制导武器的抗干扰效果,更加关注弹攻击过程中的干扰效应及其对弹道曲线和最终落点分布的影响,对目标和干扰光斑

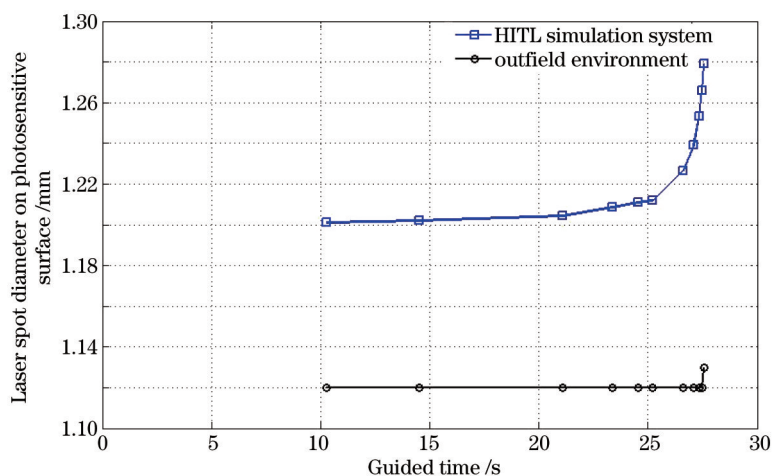


图4 外场和半实物仿真条件下导引头光敏面上光斑直径变化曲线

Fig.4 Changing curves of laser spot diameter on photosensitive surface in outfield environment and HITL simulation system 的敏感程度,特别是探测器光敏面上的光斑。因此,以效应建模和实际测量数据为基础,深入分析不同因素对光敏面上光斑的影响,采用更加精确的方法模拟外场光斑情况,要考虑近场光学效应,可以对导引头光学系统或探测器离焦量进行调整,要根据半实物仿真内场实际,优化光斑模拟方案,以漫反射屏上光斑对导引头的实际作用效应为基础,实现光斑模拟。

5 结 论

对激光制导武器干扰半实物仿真系统光斑模拟进行了研究,以半实物仿真具体需求为依据,通过建立导引头光学系统模型,计算了实际战情条件下不同制导时刻光敏面上光斑情况,针对系统关注的干扰效果评估,提出了光斑模拟优化方案,下一步还需进一步的实际测量数据作为校验,设计半实物仿真光斑模拟建设方案。

参 考 文 献

- 1 Wang Kuangbiao. Status quo, key technology and development of laser guided weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 651-655.
王狂飙. 激光制导武器的现状、关键技术与发展[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(5): 651-655.
- 2 Wang Yunping, Zhao Changming, Li Yan, *et al.*. Hardware-in-the-loop simulation system for laser-angle-deception jamming [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1217-1222.
王云萍, 赵长明, 李岩, 等. 激光角度欺骗干扰半实物仿真试验系统[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(5): 1217-1222.
- 3 Liang Weiwei, Yin Ruiguang, Li Hui, *et al.*. Influence of laser damage quadrant detector on laser guided weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2672-2676.
梁巍巍, 殷瑞光, 李慧, 等. 激光损伤四象限探测器对制导武器的影响[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(10): 2672-2676.
- 4 Shen Yongfu, Deng Fanglin, Ke Xizheng. Scheme design of semi-physical simulation system for a laser-guided bomb seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(2): 166-169.
沈永福, 邓方林, 柯熙政. 激光制导炸弹导引头半实物仿真系统方案设计[J]. *红外与激光工程*, 2002, 31(2): 166-169.
- 5 Su Jiangang, Huang Yanjun, Zeng Chang'e, *et al.*. Target simulation technology in semi-physical simulation for laser-guided munitions [J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, 17(7): 58-65.
苏建刚, 黄艳俊, 曾嫦娥, 等. 激光制导弹药半实物仿真目标模拟技术[J]. *光电与控制*, 2010, 17(7): 58-65.
- 6 Wang Shicheng, Liu Yuan, Liu Zhiguo, *et al.*. Hardware-in-the-loop simulation technology for size of laser facular of laser guided weapon [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(9): 1-5.
王仕成, 刘源, 刘志国, 等. 激光制导武器目标光斑大小半实物仿真研究[J]. *光电工程*, 2009, 36(9): 1-5.
- 7 Liu Ning, Chai Jinhua. Dual spots detection algorithm of four-quadrant laser guidance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 627-633.
刘宁, 柴金华. 四象限激光制导的双光斑探测算法[J]. *红外与激光工程*, 2009, 2010, 39(4): 627-633.
- 8 Liu Hongxing, Ren Jianwei, Li Xiansheng, *et al.*. Radiometric characteristic simulation of large aperture integrating sphere based on LightTools [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 960-965.
刘洪兴, 任建伟, 李宪圣, 等. 基于LightTools的大口径积分球辐射特性仿真[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(4): 960-965.

栏目编辑: 史敏