

激光角度欺骗干扰半实物仿真研究

赵 乾,徐利国,范小虎,张瑞民,刘庆宝
(火箭军工程大学士官学院,山东 青州 262500)

摘要:为有效评估激光角度欺骗干扰效果,搭建了一套激光角度欺骗干扰半实物仿真系统。仿真系统接入了导引头、惯组、弹载机、舵机等实物,采用实时通讯、姿态角精确模拟、视线角精确控制、多线程触发、加速度模拟注入等关键技术,提高了系统的实时性和仿真的可信度。以某典型激光制导武器为对象开展仿真研究,在设定的仿真条件下,无干扰时仿真的脱靶量为1.7 m,角度欺骗干扰时仿真的脱靶量为744.05 m,表明该系统能对激光角度欺骗干扰效果进行仿真评估,验证了制导控制系统和仿真系统软硬件设计的合理性。

关键词:角度欺骗;激光制导;半实物仿真;实时网络

中图分类号:TN977 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.05.021

Research of hardware-in-the-loop simulation for laser angle deception

ZHAO Qian, XU Li-guo, FAN Xiao-hu, ZHANG Rui-min, LIU Qing-bao
(Rocket Force Engineering University of Sergeant College, Qingzhou 262500, China)

Abstract:To evaluate the jamming effect of laser angle deception, the hardware-in-the-loop simulation (HILS) system of laser angle deception is set up. The simulation system introduced some real equipments, such as laser seeker, IMU, missile-borne computer, steering engine, and so on. Then the key techniques were adopted to real-time ability and reliability of the system, including real-time communication, attitude angle precision simulation, angle of sight precision control, multithread trigger, acceleration simulation injection, etc. Taking a typical laser guidance weapon as the object of jamming, the simulation research was carried out. Under the given condition, miss distance is 1.7 m when there is no interference, but the miss distance is 744.05 m when the interference exists. The results show that the system can evaluate the jamming effects of laser angle deception effectively, and the reasonableness of guidance and control system and hardware and software of HILS system are verified.

Key words: angle deception; laser-guided; hardware-in-the-loop simulation; real-time network

1 引言

近些年的几场局部战争中,激光精确制导武器以其制导精度高、抗干扰能力强、作战效能显著而得到广泛应用^[1]。而激光角度欺骗干扰作为对抗精确制导武器的重要方式,在光电对抗领域越来越受到重视。

激光角度欺骗干扰半实物仿真系统由于接入了部分关键实物,能更加逼真地模拟干扰环境和真实作战场景,避免数学模型不准确带来的误差影响,可以更加有效地评估激光角度欺骗干扰效果。目前,对于激光角度欺骗干扰方面的研究还多集中于干扰理论分析^[2-3]、针对部分影响因素的建模仿真^[4],且

大多以数学建模和仿真为主^[5]。对角度欺骗干扰半实物仿真的研究还处于系统分析和初步构建阶段^[6-8],缺乏必要的全闭环试验验证和效果评估。

本文主要围绕激光角度欺骗干扰半实物仿真系统的构建和半实物仿真试验展开。通过建立与外场试验各环节高度相似的角度欺骗干扰半实物仿真系统,设置合理的仿真条件,以达到有效评估角度欺骗干扰效果的目的。仿真所得结果可以验证数学模型的合理性和系统各个环节的等效精度,检验干扰系统的可靠性和稳定性。

2 系统的设计原理

2.1 激光角度欺骗干扰机理分析

激光角度欺骗干扰是指激光告警设备通过复制或转发目标指示器发出的制导脉冲,发射与制导脉冲相类似的干扰脉冲并照射到假目标,使经过假目标漫反射的干扰脉冲进入导引头光电探测系统,以达到欺骗导引头、将激光制导武器引向假目标的目的。激光角度欺骗干扰系统一般由激光告警设备、信号识别和处理设备、干扰激光发射设备和反射率较高的假目标组成。

2.2 系统总体架构设计

根据角度欺骗干扰原理和已有的实验条件,在室内设计了激光角度欺骗干扰半实物仿真系统,该系统根据仿真相似性原理设计^[9],主要由三部分组成:武器仿真分系统、干扰仿真分系统和仿真控制分系统,如图1所示。

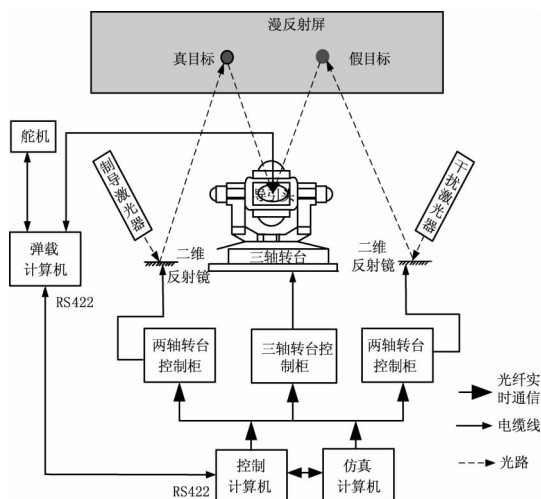


图1 激光角度欺骗干扰半实物仿真系统原理图

Fig. 1 The schematic diagram of HILS for angle deception

武器仿真分系统用于对激光制导武器全闭环打击过程仿真研究,主要包括仿真计算和实物两部分,其中,仿真计算部分包括弹体六自由度模型、弹目视线角解算、激光光斑特性解算等,为提高仿真的可信

度,实物部分接入仿真回路的主要有激光导引头、惯组、弹载机和舵机等;干扰仿真分系统主要用于仿真角度欺骗干扰对导引头的干扰过程,主要包括干扰激光传输、漫反射和干扰光斑运动控制过程,其硬件组成与武器仿真分系统硬件组成一致;仿真控制分系统主要用来完成全系统试验流程的控制和数据结果的保存与处理,根据试验流程和人机交互界面完成仿真进程的实时控制和数据传输功能。

系统工作过程为:首先,根据仿真初始条件,设置制导和干扰激光器发射的激光参数(包括能量强度、波长、频率、脉宽和编码方式等信息),按照目标和干扰机运动规律设置二维反射镜的运动参数,控制制导和干扰光斑运动。而后,安装在三轴转台的激光导引头接收漫反射制导和干扰激光脉冲,经导引头信号判断和处理后,将弹目或弹干视线角信号传递到弹载机中进行导引律解算,生成过载指令并传输到自动驾驶仪中输出舵偏指令,弹载机发送舵偏指令信号到舵机,控制舵机动作。然后,舵机将舵偏量反馈回弹载机中,在控制计算机进行数据帧格式转化,通过实时网络将舵偏量传输到仿真计算机中,利用舵偏角进行气动插值和弹体六自由度解算,更新导弹姿态运动参数。最后,仿真计算机通过光纤实时通信网络发送三轴转台驱动指令控制转台转动,实现导引头对目标或干扰激光光斑的跟踪。

为满足半实物仿真系统可信度和实时性的要求,系统接入了弹载计算机、导引头、惯组、舵机等实物,制导和干扰脉冲激光通过激光器产生,漫反射过程在实验室高反射率漫反射屏上完成,接入实物和环境模拟设备提高了系统的可信度。数据传输和仿真控制过程在光纤实时通讯网络下实现。光纤实时通讯网络平均延迟时间在微秒级,保证了整个系统的实时性。

2.3 系统硬件构成

2.3.1 姿态模拟设备

高精度三轴飞行仿真转台(ET305B)是该半实物仿真系统姿态模拟的核心模拟设备,通过将导引头(内含惯组)固联在内环转动轴上,用转台的转动带动导引头转动,用以模拟导弹的飞行姿态。

2.3.2 激光目标和干扰模拟设备

主要包括激光脉冲发射器和两轴转台,激光脉冲发射器用于产生符合预定波长、脉宽、能量、编码方式的激光脉冲。激光脉冲发射器可发射不同能量大小和编码方式(精确频率码、二变间隔码、随机周期码等)的激光脉冲,实现对制导或干扰激光脉冲

的调制。产生的激光脉冲通过二维反射镜反射到漫反射屏上,通过控制二维反射镜的运动来控制光斑在漫反射屏上的运动,模拟导引头与制导或干扰光斑之间的相对运动。

2.3.3 弹上实物

激光导引头采用陀螺稳定式导引头,能够实现目标的搜索和跟踪,对波长 1064 nm、脉宽 10 ~ 20 ns 的激光有较强的敏感能力。弹载机主要通过重力补偿比例导引律解算、自动驾驶仪解算等功能,保持与控制计算机的数据和指令传输。舵机能够根据舵偏指令精确完成摆动,其频响、带宽、摆动幅值均达到试验的要求。

2.3.4 控制和仿真计算机

控制计算机内配置有 8 通道 Moxa 串口卡 (RS422 串口) 和 D/A 数据采集板卡,用于保证控制计算机与弹载机接口的通信和数据存储;仿真计算机采用国防科大银河仿真系统,该系统能够进行弹体六自由度模型实时解算,仿真帧时间能够达到 1 ms。

2.4 系统软件设计

该半实物仿真系统的算法和程序实现部分设计为两个部分:半实物仿真控制解算软件和弹载机内部程序。弹载机内部程序主要通过重力补偿比例导引律和自动驾驶仪解算功能,半实物仿真控制解算软件主要完成仿真数据和流程控制以及弹体运动学和动力学解算过程。

半实物仿真控制解算软件设计思路为:通过触发三个线程以完成仿真流程和数据的控制以及仿真解算任务,按照任务规划在控制计算机和仿真计算机内划分不同功能模块具体实现。半实物仿真控制解算软件结构如图 2 所示。

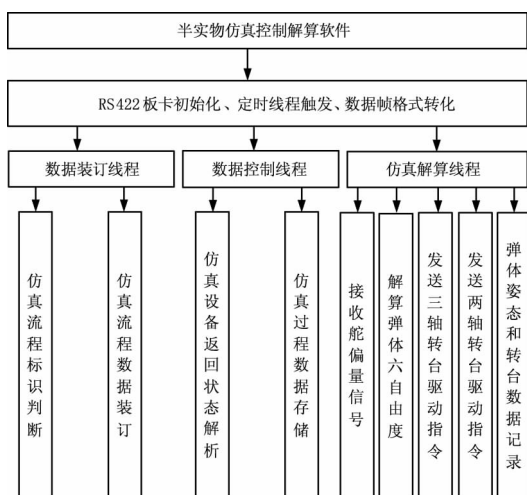


图 2 半实物仿真控制解算软件组成

Fig. 2 The software design principle of HILS system

图 2 中,数据装订线程和数据控制线程在控制计算机 VC++6.0 软件中调用线程处理函数触发,数据装订线程主要在仿真准备阶段实现数据装订和仿真流程标识位判断;数据控制线程主要完成仿真过程中导引头、惯组、舵机和弹载机中间数据的定时接收和存储以及各组件状态判断,接收舵机反馈回的舵偏量信号为气动插值和弹体六自由解算提供输入;仿真解算线程是在仿真解算计算机通过银河实时仿真系统实现,主要完成舵偏量接收、六自由度解算、发送转台驱动指令以及数据存储功能。

3 主要关键技术

3.1 实时通讯技术

为解决各组件外部接口数据实时传输问题,保证系统实时性,系统采用反射内存实时网络。该网络由反射内存卡、集线器和多模光纤组成,通过光纤线路将控制计算机、仿真解算计算机、三轴转台控制柜、两轴转台控制柜连接起来,可以实现传输延迟在 50 μ s 以内。

为了减少整个系统的延迟,只提高外部接口之间的实时性还不够,还需要提高计算机系统内部运行的实时性。该系统计算机内部采用了 RTX 实时操作系统。RTX 系统是在 Windows 平台上开发的一个实时子系统,通过增加 HAL 扩展(硬件抽象层)抢占中断优先级来实现线程管理和调度。RTX 线程调度优先于 Windows 的其他线程,调用平均响应延迟 30 μ s 以内,定时器精度可以自行设置到 0.1 ms。RTX 系统与反射内存网络结合使用形成实时通讯网络,可以实现仿真组件内部和外部端口的实时数据交互。

3.2 姿态角精确模拟技术

仿真中,三轴转台用于模拟弹体飞行姿态,根据转台驱动指令运动到输入位置,其姿态模拟精度直接决定了导引头和惯组的敏感精度。本系统采用的三轴飞行转台控制端采用了 Window + RTX 实时操作系统,通频带、定位精度、响应速度均满足系统要求,内、中、外框位置控制精度可达 5"、3"、3"。实际仿真时,转台三轴定位精度均控制在 0.001° 以内,能够实现姿态的高精度模拟。

3.3 视线角精确控制技术

为合理模拟外场光斑由远到近的传输过程,有效解算弹目或弹干视线角,本系统采用光斑能量和大小实时控制技术,能量变化范围达 50 dB,视线角控制精度可达 0.5 mrad。

二维反射镜用于模拟目标和干扰光斑在漫反射

屏上的运动,其转动精度直接影响目标和干扰光斑的运动精度。根据导引头、反射镜、激光入射光路位置标定信息和反射定律,解算出反射镜运动角控制关系。本系统采用的位置控制二维反射镜,其定位误差不大于 0.005° ,能够实现目标和干扰光斑的高精度定位。

3.4 多线程触发技术

完成数据装订、数据控制和仿真解算任务,主要有数据装订线程、数据控制线程、仿真解算线程。这些线程主要通过 Moxa 串口卡和反射内存光纤接口实现通讯功能。在程序中融合了多线程指令触发技术,可以同步触发多个线程,可以定时处理不同运行时序、不同线程、不同串口卡通道和反射内存地址下指令和数据控制任务。多线程触发技术能够保证多个线程高精度启动和重置,极大地提高软件和系统的执行效率,解决了仿真数据的网络化同步传输和存储问题。

3.5 加速度模拟技术

由于在该半实物仿真系统中,三轴转台只能模拟模拟弹体姿态运动,不能模拟导弹线运动。安装在三轴转台上的惯组只能敏感到角速度、角度等信息,而敏感不到加速度、速度信息,弹载机不能根据仿真系统中加速度计输出数据解算出弹体位置、速度等信息,以实现气动插值和六自由度解算。因此,仿真系统采用加速度模拟技术,即通过反射内存网络,将六自由度解算过程中通过数学模型产生的加速度注入到弹载机中完成位置解算,以代替加速度计的实际输出信号。加速度模拟注入技术解决了模拟导弹线运动问题,使系统构成完整的闭环仿真回路。

4 半实物仿真试验

在仿真解算计算机中设置仿真初值,假设在地面坐标系下,导弹初始发射位置为 $(0\text{ m}, 0\text{ m}, 0\text{ m})$,导弹离轨速度为 16.7 m/s ,发射时俯仰、偏航、滚动初始姿态为 $20^\circ, 0^\circ$ 和 0° ,目标布设位置为 $(3725\text{ m}, 0\text{ m}, -30\text{ m})$,假目标布设位置为 $(3470\text{ m}, 0\text{ m}, -780\text{ m})$,制导激光编码方式设置为 10.18 Hz 的精确频率码,仿真机解算步长为 1 ms 。干扰过程中,干扰激光脉冲与制导激光同步发射,且编码方式、脉冲频率与制导激光脉冲相同,初始发射能量大于制导激光,干扰激光器和激光目标指示器均布设在距离目标 100 m 处。据此,开展角度欺骗干扰半实物仿真研究。

在无干扰和激光角度欺骗干扰两种情况下,分

别开展半实物仿真试验。导弹在地面坐标系下的位移变化曲线如图3~图5所示。由图可知,引入角度欺骗干扰后,导弹飞行位移有明显变化。无干扰时,导弹落点为 $(3726.1\text{ m}, 0\text{ m}, -31.3\text{ m})$,脱靶量为 1.70 m ,引入角度欺骗干扰后,导弹落点为 $(3567.1\text{ m}, 0\text{ m}, -757.1\text{ m})$,脱靶量为 744.05 m ,引入干扰前后导弹各个轴向位移变化与假目标方位一致,表明干扰光斑干扰成功。相比而言,侧向位移受到影响较大,这与假目标侧向布设距离有关。

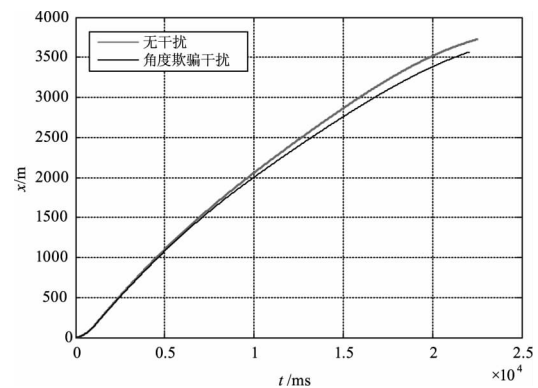


图3 x 轴(纵向)位移变化

Fig. 3 The distance of length wise direction

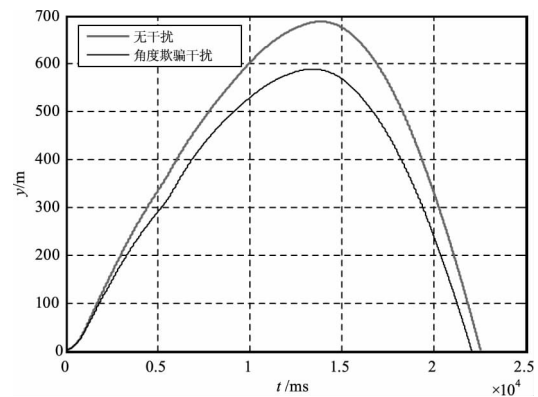


图4 y 轴(高度)位移变化

Fig. 4 The curve of height

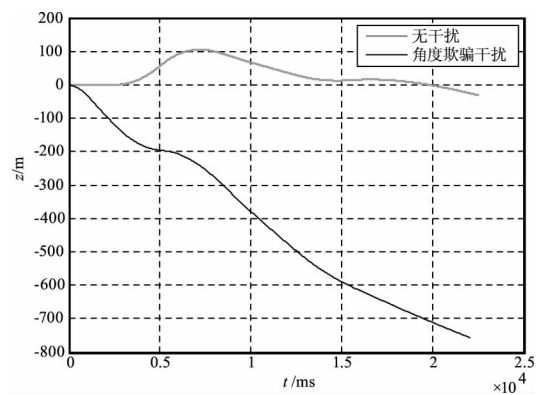


图5 z 轴(侧向)位移变化

Fig. 5 The distance of side direction

导弹飞行过程中姿态变化曲线如图6~图8所示。从图中可知,引入干扰光斑后,俯仰角变化较小,偏航角变化较大,为保持弹体平稳运动,滚转角变化幅度明显加剧。在引入干扰激光瞬间(0~0.5 s),弹体俯仰、偏航和滚动姿态角发生突变,说明初始时刻干扰激光脉冲即成功实现了诱偏。持续加入干扰后,干扰光斑和制导光斑同时出现在导引头视场内,干扰成功率较多,导致后续飞行姿态角不断变化。

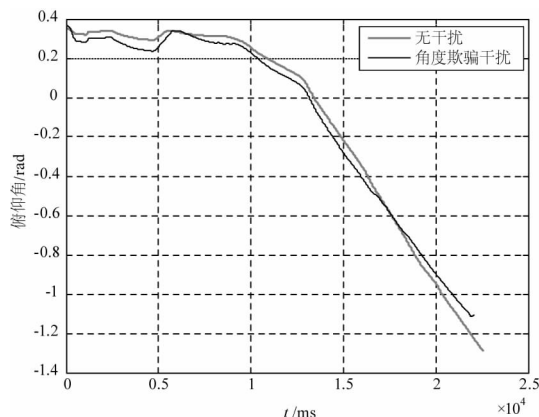


图6 俯仰角变化曲线

Fig. 6 The curve of pitch angle

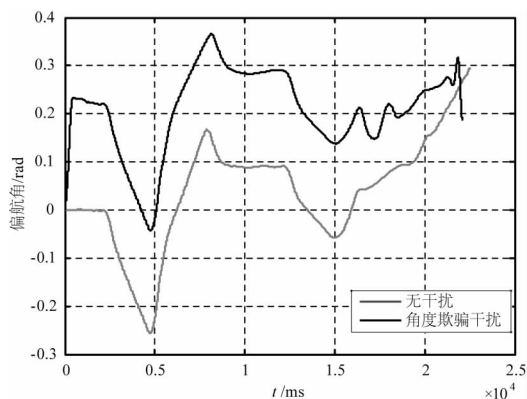


图7 偏航角变化曲线

Fig. 7 The curve of yaw angle

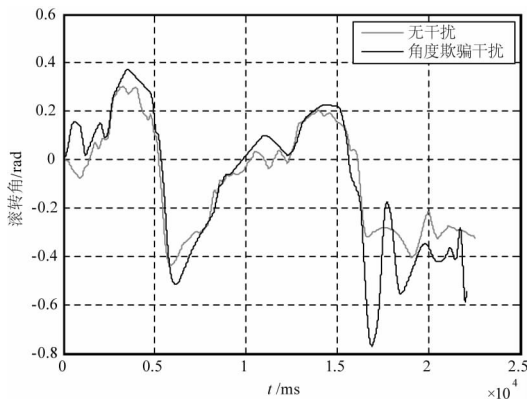


图8 滚转角变化曲线

Fig. 8 The curve of roll angle

综上,引入激光角度欺骗干扰后,导引头同时接收到干扰激光光斑和制导脉冲光斑,由于干扰激光能量设置较制导激光强,在干扰加入瞬间,从弹体姿态变化曲线可以看出,导引头被干扰脉冲成功干扰,导弹飞向假目标方向,说明激光能量大小是角度欺骗干扰成功实施的重要因素之一。此外,由于在飞行过程中,同时存在制导激光和干扰激光,导引头的信号判断和提取过程受到了干扰,追踪的目标在真假目标之间交替变化,导致导弹飞行过程中偏航和滚转姿态角变化较为剧烈。导弹的位移和姿态角变化曲线表明角度欺骗干扰发挥了较为明显的作用,反映了角度欺骗实施的过程。

5 结束语

本文通过在实验室条件下设计并搭建了激光角度欺骗干扰半实物仿真系统,重点分析和阐述了干扰实施机理、软硬件组成和系统关键技术,开展了激光角度欺骗干扰闭环半实物仿真试验。本文的研究可以为角度欺骗干扰效果评估提供参考,为光电对抗装备的研制和应用提供一定的借鉴手段。

参考文献:

- [1] WEI Wenjian. Key techniques and system study on HWIL simulation for laser guidance and electro-optical countermeasures[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
魏文俭. 激光制导光电对抗半实物仿真关键技术与系统研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010.
- [2] XING Hui, LEI Ping, LIU ling, et al. Analysis of numerical model of the laser active jamming effectiveness[J]. Electro-Optic Technology Application, 2006, 21(3): 20-23. (in Chinese)
邢晖, 雷萍, 刘灵, 等. 激光有源欺骗干扰效果的数学模型的分析[J]. 光电技术应用, 2006, 21(3): 20-23.
- [3] ZANG Yongqiang, LIU Zhiguo, WANG Shicheng, et al. Digital simulation on laser-angle-cheating jamming[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3234-3240. (in Chinese)
臧永强, 刘志国, 王仕成, 等. 激光角度欺骗干扰的数学仿真[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3234-3240.
- [4] TONG Zhongcheng, SUN Xiaoquan, HAN Chunlin, et al. Modeling and simulation of laser-guiding weapon[J].

- Journal of System Simulation, 2007, 19 (22): 5115 - 5119. (in Chinese)
童忠诚,孙晓泉,韩春林,等. 激光制导武器有源干扰的建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19 (22): 5115 - 5119.
- [5] LI Shuanggang, NIE Jinsong, LI Hua, et al. Assessment of effectiveness on angle deceptive jamming to semi-active laser-guided weapon[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40 (1): 41 - 45. (in Chinese)
李双刚, 聂劲松, 李化, 等. 对激光半主动激光武器的角度欺骗干扰的效能评估[J]. 红外与激光工程, 2011, 40 (1): 41 - 45.
- [6] 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. (in Chinese)
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.
- [7] DANG Dongni, LI Bin, FAN Dongqi. Design of hardware-in-the-loop simulation test system for laser jamming of angle deception[J]. Laser & Infrared, 2007, 37 (5): 398 - 401. (in Chinese)
党冬妮, 李斌, 范东启. 激光角度欺骗干扰半实物仿真试验系统设计[J]. 激光与红外, 2007, 37 (5): 398 - 401.
- [8] LI Hui, WU Junhui, ZHANG Wenpan, et al. Exploratory development of the HWIL simulation system for laser angle deception jamming against laser guidance weapons [J]. Optoelectronic Technology, 2011, 31 (1): 37 - 41. (in Chinese)
李慧, 吴军辉, 张文攀, 等. 激光制导武器角度欺骗干扰半实物仿真系统设计的探讨[J]. 光电子技术, 2011, 31 (1): 37 - 41.
- [9] YU Guoquan. Study on Hardware-in-the-loop simulation system for laser angle deception Jam [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
于国权. 激光角度欺骗干扰半实物仿真系统研究 [D]. 长春: 中国科学院大学, 2013.