

2-15-2019

## Hardware-in-the-loop Simulation Method for Laser Active Imaging Guidance

Zhang Qing

*1. Science and Technology on Complex System Control and Intelligent Agent Cooperation Laboratory, Beijing 100074, China;;2. Beijing Electromechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China;*

Yijie Li

*2. Beijing Electromechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Hardware-in-the-loop Simulation Method for Laser Active Imaging Guidance

### Abstract

**Abstract:** The system of laser active imaging guidance hardware-in-the-loop simulation is a significant system for testing and validating the capability of laser active imaging guidance and control, it also means a lot in practical applications. The composition of guidance and control system for the laser active imaging aircraft is analyzed, and the purpose and test flow for the hardware-in-the-loop simulation system are introduced. *The integrated project for laser active imaging guidance hardware-in-the-loop simulation system is designed.* The functions and elements for the crucial simulation equipment of laser active imaging echo simulator are analyzed; *the elements of model composition and software for simulation system are expatiated; and the system difficulties and the pivotal technologies which need to break are presented.* This work provides support for thorough research on the laser active imaging guidance technology and on the development of the precise laser active imaging echo simulator.

### Keywords

laser active imaging, precise guidance, Hardware-in-the-loop simulation, laser active imaging echo simulator

### Recommended Citation

Zhang Qing, Li Yijie. Hardware-in-the-loop Simulation Method for Laser Active Imaging Guidance[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(2): 299-305.

## 激光主动成像制导半实物仿真方法研究

张卿<sup>1,2</sup>, 李易洁<sup>2</sup>

(1. 复杂系统控制与智能协同技术重点实验室, 北京 100074; 2. 北京机电工程研究所, 北京 100074)

**摘要:** 激光主动成像半实物仿真试验系统是检验和验证激光主动成像制导飞行器制导控制性能的重要试验系统, 在实际应用中具有十分重要的意义。在分析激光主动成像飞行器制导控制系统组成以及制导系统半实物仿真试验目的和流程基础上, 完成了激光主动成像制导仿真系统总体方案设计, 分析了激光主动成像回波模拟器等主要仿真设备的功能原理, 阐述了激光主动成像制导仿真系统模型组成与软件系统工作原理, 并提出了系统难点和需要突破的关键技术, 为激光主动成像制导仿真技术的深入研究以及高精度激光主动成像回波器的设计与研制提供指导。

**关键词:** 激光主动成像; 精确制导; 半实物仿真; 激光主动成像回波器

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2019)02-0299-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-FZ0514

## Hardware-in-the-loop Simulation Method for Laser Active Imaging Guidance

Zhang Qing<sup>1,2</sup>, Li Yijie<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Complex System Control and Intelligent Agent Cooperation Laboratory, Beijing 100074, China;

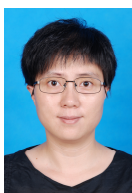
2. Beijing Electromechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China)

**Abstract:** The system of laser active imaging guidance hardware-in-the-loop simulation is a significant system for testing and validating the capability of laser active imaging guidance and control, it also means a lot in practical applications. The composition of guidance and control system for the laser active imaging aircraft is analyzed, and the purpose and test flow for the hardware-in-the-loop simulation system are introduced. *The integrated project for laser active imaging guidance hardware-in-the-loop simulation system is designed.* The functions and elements for the crucial simulation equipment of laser active imaging echo simulator are analyzed; *the elements of model composition and software for simulation system are expatiated; and the system difficulties and the pivotal technologies which need to break are presented.* This work provides support for thorough research on the laser active imaging guidance technology and on the development of the precise laser active imaging echo simulator.

**Keywords:** laser active imaging; precise guidance; Hardware-in-the-loop simulation; laser active imaging echo simulator

## 引言

激光制导由于激光方向性强、波束窄、发散角



收稿日期: 2018-06-23 修回日期: 2018-10-25;  
作者简介: 张卿(1981-), 女, 河北邢台, 硕士, 高工, 研究方向为系统建模、光学成像仿真等; 李易洁(1985-), 女, 河北衡水, 硕士, 工程师, 研究方向为光学成像仿真。

小, 故制导精度高, 抗干扰能力强, 是未来精确制导武器制导方式的重要发展方向。尤其是激光主动成像制导能对目标实现空间角位置、距离和高度的高精度三维成像, 能够反映目标与背景固有特征, 成像稳定且受外界因素的影响较小, 同时通过距离选通将复杂背景简化为简单背景, 目标经简单处理即可提取, 简单判别即可识别, 能在各种复杂的人

<http://www.china-simulation.com>

为干扰及背景干扰中实现对选定目标的识别与跟踪,具有较强的抗干扰能力。制导技术发展到现在阶段,视场内目标的三维几何距离像已成为提高飞行器制导精度和损毁概率的有效技术途径。

近年来,国外军事强国如美、英、法和瑞典等国,非常重视激光主动成像探测技术的研究,已研制出多种激光主动成像探测系统原理样机,许多已装备部队。AGM-129B 加装激光成像制导,使 CEP 从 40 m 提高到 3 m,美国 LOCASS 和 LAM 等低速巡飞弹与 SDM 制导子弹药均成功应用了扫描式激光主动成像制导技术,能够实现“点穴式”精确打击。

## 1 国内外激光成像制导仿真研究现状

### 1.1 国外研究现状

在激光成像雷达技术方面,目前 APD 阵列探测器的规模已经达到了 256×256 甚至更大。然而,对于激光成像雷达,作用距离越大,要求的激光器输出功率也要增大,这样导致系统的功耗和体积增大。

国外激光成像制导技术呈多波段、多成像体制、多种探测方式全面应用的发展趋势,因此对应不同类型的激光成像探测器其激光成像制导半实物仿真试验方案也不完全一致。国外已经建成了激光成像制导仿真系统。激光雷达回波目标模拟器是激光雷达半实物仿真系统的关键部件,其作用是生成半实物仿真试验所必需的目标和背景回波信号。目前国外关于目标回波信号生成技术主要有:直接电信号注入、光学场景投影、光学微机电系统(MEMS)微镜阵列<sup>[1-2]</sup>。

直接电信号注入技术绕过了被试激光成像雷达的光电探测系统,直接将生成的回波电信号注入至被试激光成像雷达的信号处理机构。直接电信号注入技术需要额外的仿真模块来模拟光电探测系统的影响,因而不能验证和测试被试激光成像雷达的全部性能。

光学场景投影技术是将含有目标距离信息的光学回波信号通过光学系统直接投影至被试激光成像雷达的接收光学系统的入瞳处。基于光学场景投影技术的激光回波模拟器需要为探测器每一个探测像元提供一路回波信号,并且需要通过扫描的方式来生成大阵列的距离图像,这样增加了系统的复杂度和体积。

2003 年,BAE 系统公司提出了基于光学 MEMS 微镜阵列的激光回波模拟器,其工作原理与光学场景投影技术相似,采用垂直腔面发射激光器(VCSEL)阵列作为光源,以 MEMS 微镜阵列作为图像投影器。这种技术相比于光学场景投影技术降低了系统的成本和体积,然而这种方式目前只是停留在概念设计和分析阶段,并且没有关于这种方式的进一步报道。

### 1.2 国内研究现状

国内在基于盖革模式 APD 作为探测器的激光雷达研究开始较晚,探测器还没有在实际中得到应用。2010 年,哈工大王飞等讨论了盖革模式 APD 作为探测器的光子雷达测距精度的影响因素,得到回波脉冲强度和脉冲宽度对精度的影响大于其他因素的结论。上海技物所郭英等利用盖革模式探测器对成像系统进行了原理验证,实现了对目标的三维成像<sup>[3]</sup>。

在激光成像制导仿真方面,不外乎上述 3 种激光目标回波信号生成方法,相比于直接电信号注入和光学 MEMS 微镜阵列,光信号投影仍然是实现光学回波信号生成最为合适的方法。目前所研制的激光成像回波模拟器图像分辨率较低,并且视场角度较小,不能满足激光主动成像探测器仿真的性能指标要求,难以实现动态闭环半实物仿真。

## 2 激光主动成像制导半实物仿真试验目的和流程

### 2.1 激光主动成像飞行器制导系统组成

激光主动成像飞行器典型制导系统主要由一

体化控制单元含组合导航系统(包括陀螺、加速度计、卫星接收机等)、高度表、舵机和激光主动成像探测器等部分组成,如图 1 所示。其特点是采用了激光主动成像制导体制。

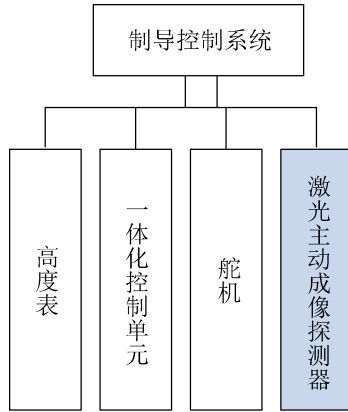


图 1 激光主动成像飞行器典型制导系统组成

Fig. 1 Composition of guidance and control system for the active laser imaging aircraft

从控制理论的角度来看,制导系统由控制姿态的稳定回路(小回路)和控制质心运动的导引回路(大回路)组成。除飞行器的动力学和弹目相对运动学方程外,小回路的全部控制装置包括:一体化控制单元含组合导航系统(包括陀螺、加速度计、卫星接收机等)、高度表、舵系统,大回路除此之外还包括激光主动成像探测器。

## 2.2 制导系统半实物仿真试验目的和流程

对制导系统进行半实物仿真试验的目的,就是要通过仿真打靶,考核对飞行器制导系统动态特性和制导精度有直接影响的实际制导部件和子系统的性能,为飞行器综合性能评定提供部分依据。

激光主动成像武器制导控制系统半实物仿真试验的内容主要包括:制导部件(惯性导航系统、高度表、舵机和探测器)的性能仿真、稳定回路的半实物仿真、探测器的半实物仿真和全制导系统回路的半实物仿真。图 2 描述了其制导控制系统半实物仿真试验流程。半实物仿真试验的步骤遵循了从部件到系统、从开环到闭环、从小回路到大回路的过程<sup>[4-5]</sup>。

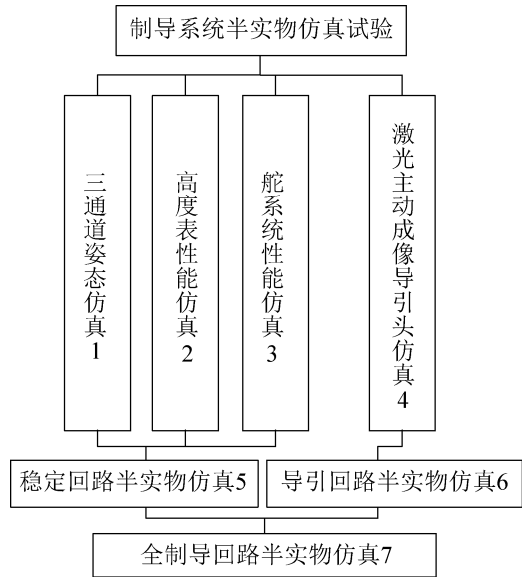


图 2 制导系统半实物仿真试验流程

Fig. 2 Test flow for the hardware-in-the-loop simulation system

## 3 激光主动成像制导半实物仿真方法研究

### 3.1 激光主动成像制导半实物仿真总体方案

激光主动成像制导仿真系统总体方案研究,须立足激光主动成像飞行器制导系统组成,紧密围绕激光主动成像探测器的功能性能要求以及制导系统中的工作原理和 workflow,进行激光主动成像回波模拟设备方案设计,构建开展激光主动成像半实物仿真试验系统。

目前半实物仿真试验采用的方法是按照覆盖探测器视场的弹目视线角度关系生成目标区场景,即采用激光主动成像回波模拟器进行目标区场景回波信号模拟,结合五轴转台和实时仿真计算机构建仿真系统开展动态仿真验证,其中五轴转台的三轴部分负载探测器模拟武器装备姿态、两轴部分负载激光主动成像回波模拟器模拟目标实时激光回波信号,仿真系统总体方案如图 3 所示。

激光主动成像半实物仿真试验系统组成主要包括实时仿真计算机、五轴转台、三轴转台、激光主动成像回波模拟器、舵机负载模拟器、高度表模拟器和接口计算机等设备。

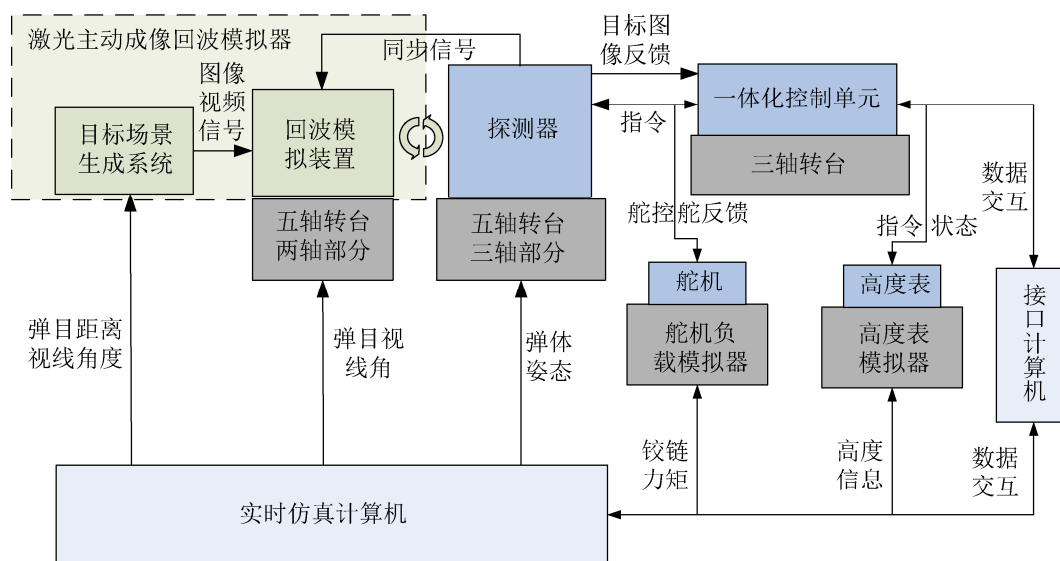


图 3 激光主动成像制导仿真系统总体方案

Fig. 3 Integrated project for active laser imaging guidance hardware-in-the-loop simulation system

## 3.2 激光主动成像制导半实物仿真硬件系统

### 3.2.1 实时仿真计算机

实时仿真计算机(以下简称仿真机)负责解算飞行器六自由度运动模型并控制整个仿真系统的工作。仿真机根据飞行器动力学模型、运动学模型、目标运动控制模型、动力控制模型及舵控/舵反馈数据进行实时仿真计算,产生控制仿真设备运转工作的信号,驱动转台模拟飞行器姿态运动,驱动舵机负载模拟器模拟铰链力矩,驱动高度表模拟器模拟高度环境。

### 3.2.2 五轴转台

五轴转台用于为激光主动成像探测器提供飞行器姿态模拟和弹目相对运动关系模拟环境,受实时仿真计算机位置指令控制,并实时反馈位置信息。探测器安装在五轴仿真转台的三轴上,将激光主动成像回波模拟器放置于五轴仿真转台的两轴上。三轴用于模拟飞行器运动姿态,两轴用于模拟弹目视线关系,二者组成的五轴仿真转台用于模拟弹目运动关系。

### 3.2.3 三轴转台

三轴转台用于为一体化控制单元集成的组合

导航系统提供飞行器俯仰、偏航和滚动三通道姿态模拟换环境,受实时仿真计算机位置指令控制,并实时反馈位置信息。当飞行器姿态没有偏航通道大角度机动(超过 $\pm 90^\circ$ )运动时,则可以与探测器一起安装在五轴转台的三轴部分,由其实现飞行器姿态模拟。

### 3.2.4 舵机负载模拟器

舵机负载模拟器用于模拟飞行器飞行过程中舵机所受的空气舵铰链力矩,实时接收仿真机发送的铰链力矩指令,驱动扭杆转动,施加到对应的空气舵轴上。

### 3.2.5 高度表模拟器

高度表模拟器用于模拟飞行器飞行过程中的高度环境信息,实时接收仿真机发送的高度数据,模拟相应的高度状态,为高度表提供高度环境模拟。在该仿真系统中属于已有成熟设备。

### 3.2.6 接口计算机

接口计算机用于解决实时仿真计算机与参试设备一体化控制计算机之间的指令和数据的交互通讯问题。目前实时仿真计算机的通用外部接口有光纤、开关量和模拟量等形式,而一体化控制计算机含有 RS422 或 CAN 总线等其它接口形式,在制

导系统全回路闭环仿真时, 两者之间需要信息交互, 则需要接口计算机担当两者之间的“翻译官”。

接口计算机需配置光纤接口板、RS422 或 CAN 总线等其它接口板, 将一体化控制单元的信息通过光纤转发给仿真机, 并通过 RS422 或 CAN 其它接口将仿真机数据发送给一体化控制单元。

### 3.2.7 激光主动成像回波模拟器

激光主动成像回波模拟器是在实验室条件下模拟激光的回波信号, 为探测器激光成像系统提供目标和背景的反馈信号的装置。需要具备高距离分辨率、高帧频、多像元激光目标回波模拟能力, 并将融合复杂目标及背景信息的激光回波信号投放至探测器视场内, 是目前激光主动成像制导半实物仿真系统中需要着力研究的关键设备。

激光主动成像回波模拟器系统由目标场景生成系统、同步脉冲接收系统、信号分配系统和回波信号生成系统组成, 其系统组成框图如图 4 所示。其中回波信号生成系统是模拟器核心组成部件。

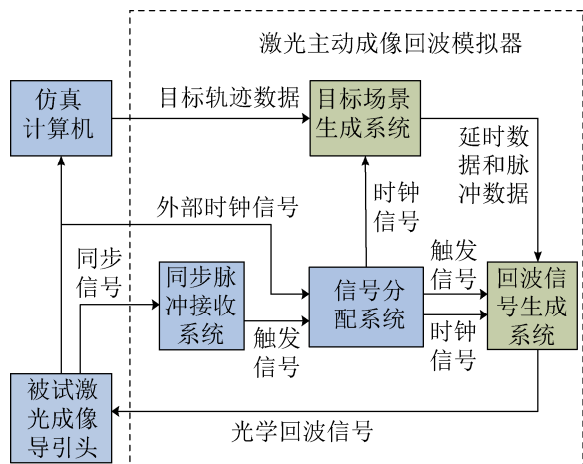


图 4 激光主动成像回波模拟器系统组成框图  
Fig. 4 Composition of active laser imaging echo simulator

系统的工作过程为: 目标场景生成系统实时接收仿真计算机发送的目标轨迹数据, 并解算生成延时数据和脉宽数据, 通过一定数据格式将其发送至回波信号生成系统; 同步信号接收系统将被试激光成像探测器发送的同步信号转换为触发信号; 信号分配系统将外部时钟信号和触发信号分别送至目

标场景生成系统和回波信号生成系统; 回波信号生成系统在触发信号的触发之下, 根据当前数据缓存中的延时数据和脉宽数据生成多路光学回波信号; 光学回波信号进入被试激光成像探测器的接收光学系统, 最终投射到被试激光成像探测器对应的各个像元上。

回波信号生成系统由 DRAM、激光光源系统、数控光纤延迟系统组成, 其系统组成框图如图 5 所示。设计思路是根据目标轨迹数据生成符合脉宽和延时要求的激光回波信号, 通过激光光源系统控制回波信号的脉宽, 通过数控光纤延迟系统控制回波信号的延时时间。

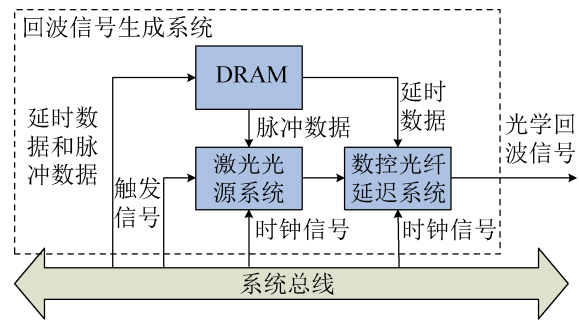


图 5 回波信号生成系统  
Fig. 5 Echo signal generation system

DRAM 不断的接收系统总线中的延时数据和脉宽数据, 当在触发信号的上升沿来临时, 回波信号生成系统根据此刻的延时数据和脉宽数据作为设定值, 分别发送至延时比较器和展宽比较器。延时计数器在触发信号上升沿触发工作, 并根据时钟信号进行计数, 当延时计数器值大于设定的延时值时, 延时计数器计数值清零, 并通过延时比较器输出一个信号, 来触发脉冲展宽计数器开始进行计数。当展宽计数值大于设定的展宽值时, 展宽计数器计数清零, 展宽比较器通过输出 I/O 口输出回波电信号。

## 3.3 激光主动成像制导半实物仿真模型与软件系统

### 3.3.1 激光主动成像制导半实物仿真模型

半实物仿真模型是激光主动成像制导仿真系

统的理论核心，完备的硬件需要完备的模型来支配，以达到全制导系统回路的半实物仿真验证的最终目的<sup>[6]</sup>，如图 6 所示系统进行半实物仿真的主要模型。

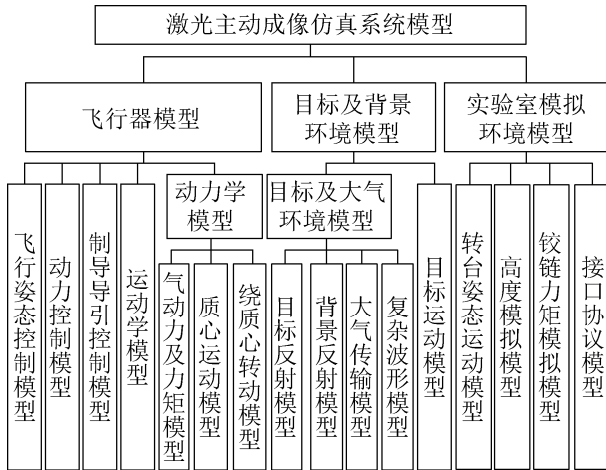


图 6 激光主动成像仿真系统模型

Fig. 6 Model of laser active imaging simulation system

### 3.3.2 激光主动成像制导半实物软件系统

激光主动成像制导仿真系统软件由仿真机软件、目标控制软件、激光回波控制软件、五轴转台控制软件、三轴转台控制软件、舵机负载模拟系统软件、高度模拟系统软件、接口控制软件等组成，如图 7 所示。

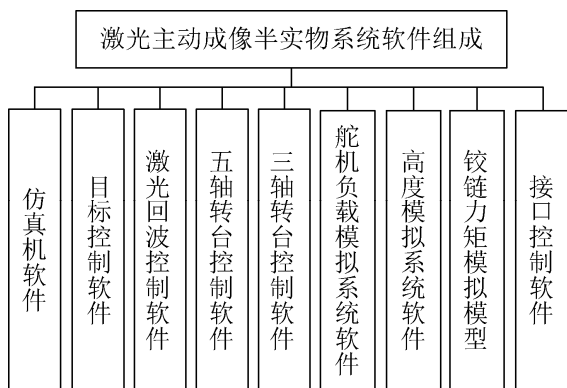


图 7 激光主动成像仿真软件系统

Fig. 7 Laser active imaging simulation software system

仿真机软件用于实时解算飞行器模型，并产生实时驱动转台、舵机负载模拟器、高度表模拟器、激光目标回波模拟器等设备的驱动控制信号，并控

制各设备按照仿真步长实时推进，各设备接收信号，通过其控制软件完成每个解算步骤的相应执行，所有软件在半实物仿真系统中相互协同工作，共同完成激光主动成像制导控制系统闭环半实物仿真<sup>[7-8]</sup>。

## 4 难点问题分析

激光主动成像半实物仿真系统需要具备复杂目标及背景激光成像反射特性三维模型精确模拟能力，具备高分辨率激光主动成像回波信号生成能力和激光主动成像制导全流程动态仿真验证能力。通过上述系统方案设计，核心问题是突破激光主动成像回波模拟器研制的高分辨率、高帧频、多像元激光目标回波生成难点。

研制过程涉及到激光技术、光电探测技术、光束扫描与控制技术、图像处理技术、自动目标识别技术、高速信息处理技术等多学科技术，技术难度大、风险较高。

## 5 结论

本文在分析激光主动成像仿真系统需求及激光主动成像飞行器制导系统半实物仿真试验目的和流程基础上，完成了激光主动成像制导仿真系统总体方案设计，并提出了系统难点和需要突破的关键技术，为后续激光主动成像制导仿真技术的深入研究以及高精度激光主动成像回波模拟系统的设计与研制提供指导。

### 参考文献：

- [1] 舒宁. 激光成像[M]. 武汉: 武汉大学出版社. 2005: 10-12.  
Shu Ning. Laser Imaging[M]. Wuhan: Wuhan University Press. 2005: 10-12.
- [2] 余德军, 龚俊斌, 马杰. 激光成像雷达成像仿真技术研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(增 4): 160-166.  
Yu Dejun, Gong Junbin, Ma Jie. Study for the techniques of lidar imaging simulation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S4): 160-166.
- [3] 赵洪利, 范有臣, 孙华燕, 等. 基于盖革模式 APD 阵



- 列的非扫描激光三维成像雷达研究综述[J]. 激光与红外, 2013, 43(10): 1083-1088.
- Zhao Hongli, Fan Youchen, Sun Huayan, et al. Review about 3D laser radar system based on Geiger-mode APD array[J]. Laser and Infrared, 2013, 43(10): 1083-1088.
- [4] 张金山, 王仕成, 徐萍, 等. 激光制导武器仿真系统设计与研制[J]. 电光与控制, 2005, 12(2): 55-59.
- Zhang Jinshan, Wang Shicheng, Xu Ping, et al. Design of a simulation system for laser guided weapons[J]. Electronics Optics & Control, 2005, 12(2): 55-59.
- [5] 单家元, 刘藻珍. 激光制导武器半实物仿真试验系统[J]. 计算机仿真, 2002, 19(2): 15-17.
- Shan Jiayuan, Liu Zaozhen. The Hardware-in-the-Loop Simulation System for The Guidance System Laser guided Weapon[J]. Computer Simulation, 2002, 19(2): 15-17.
- [6] 张秋晨, 施蕊, 李卓. 激光成像目标模拟器建模方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 112-117.
- Zhang Qiuchen, Shi Lei, Li Zhuo. Modeling method of laser imaging target simulator[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(1): 112-117.
- [7] 胡朝晖, 罗继勋, 王邑, 等. 红外制导空空导弹抗干扰性能试验及评估研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(增 1): 478-481.
- Hu Zhaohui, Luo Jixun, Wang Yi, et al. Evaluation and testing method for infrared air-to-air missile countermeasure performance[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S1): 478-481.
- [8] 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.
- 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.

(上接 298 页)

- [11] 苗欣. FLUENT 在丙烷泄漏扩散研究中的应用[J]. 南开大学学报, 2014(4): 26-33.
- Miao Xin. Application of FLUENT in the study of propane leakage and diffusion[J]. Journal of Nankai University, 2014(4): 26-33.
- [12] Fisher M, Ritchie D, Savva M, et al. Example based synthesis of 3D object arrangements[J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2012, 31(6): 135.
- [13] 制定地方大气污染物排放标准的技术方法[S]. GB/T3540-1991.
- Technical methods for making local emission standards of airpollutants[S]. GB/T3540-1991.
- [14] Byun D, Schere K L. Review of the Governing Equations, Computational Algorithms, and Other Components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System[J]. Applied Mechanics Reviews (S0003-6900), 2006, 59(2): 51.
- [15] Giglio L, Randerson J T, Werf G R vander, et al. Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products[J]. Biogeosciences (S1726-4170), 2010, 7: 1171-1186.
- [16] Hong S M, Jiao L, He X, et al. Variation of visibility in Hangzhou urban and their relation with major factors[J]. China Power Science and Technology (S1008-5548), 2009, 15(2): 56-61.
- [17] Li L, Chen C H, Huang C, et al. Regional air pollution characteristics simulation of O<sub>3</sub> and PM<sub>10</sub> over Yangtze River Delta region[J]. Environmental Science (S0250-3301), 2008, 29(1): 237-245.
- [18] Parisi T. Programming 3D Applications with HTML5 and WebGL: 3D Animation and Visualization for Web Pages[M]. "O'Reilly Media, Inc.", 2014.